

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Макеєва Ганна Сергіївна

УДК 621.77

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____Г.С. Макеєва

Науковий керівник

Фролов Ярослав Вікторович,
доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2018

АНОТАЦІЯ

Макеєва Г.С. Розробка основ технології прокатки алюмінієвих штаб з армуванням сталеною 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 актуальної науково-технічної задачі, що полягає в розробленні основ технології отримання алюмінієвих штаб з армуванням сталеною сіткою способом гарячої прокатки для конструкційних виробів з прогнозованими механічними властивостями. Для цього в дисертації проведено теоретичні та експериментальні дослідження параметрів деформації ґратки сітки, видовження та овалізації її дротів, а також впливу цих параметрів на механічні властивості отриманого композиту.

Проведено аналіз сучасного стану технологій виробництва армованих композитів та обґрунтована необхідність розробки технології прокатки нових композитних матеріалів, що поєднують в собі міцність, легкість та здатність до поглинання енергії удару для вирішення сучасних проблем будівництва, машинобудування. Прикладом розвитку такого напрямку може бути шаруватий композит на основі алюмінієвої матриці, що армований міцною фазою, яка рівномірно розташована всередині. Такі композиційні матеріали можуть бути використані в машинобудуванні та будівництві, зокрема для виробництва дверей, ролетів, вікон, ліфтів, захисних елементів бойової техніки.

Аналіз відомих технологій отримання армованих композитів на основі алюмінієвої матриці дозволив встановити, що процес прокатки є раціональним для отримання армованих композитів та виявив необхідність досліджень параметрів деформації сітки в складі композиту.

В рамках роботи розроблено інженерну методику розрахунку параметрів деформації сітки у складі композиту при прокатці між двох алюмінієвих штаб.

Отриманий метод дозволив кількісно визначити видовження ґратки сітки, витяжку та овалізацію дротів сітки у складі композиту при гарячій прокатці між двох алюмінієвих штаб, що дозволяє оцінити та прогнозувати кінцеві властивості композиту.

Досліджено вплив орієнтації армуючої сітки між шарами матриці на деформацію ґратки сітки та властивості композиту. Встановлено, що діагонально орієнтована сітка сприяє течії металу матриці в серединному шарі композиту завдяки обмеженню поширення та за рахунок трансформації ґратки сітки.

Встановлено, що коефіцієнт витяжки дроту сітки, розраховний з урахуванням орієнтації сітки та трансформації її ґратки, має бути більшим, ніж загальний коефіцієнт витяжки всього композиту. Ця умова є маркером цілісності дротів сітки в композиті.

В результаті дослідження впливу параметрів деформації на формозміну сітки у складі матричного алюмінієвого композиту встановлені залежності таких параметрів деформації армуючої сітки як: трансформація (видовження) ґратки сітки (μ_c), коефіцієнт витяжки дротів сітки (μ_w) та овалізація дроту (O_w) від ступеню деформації (ϵ) при прокатці. Ці залежності отримано для наступних умов: відношення довжини зони деформації до її середньої висоти в межах 2,49...4,3; відношення довжини (діагоналі) ґратки сітки до довжини зони деформації в межах 0,07...0,29; відношення висоти композиту до висоти (діаметру) сітки в межах 12...32, відсоток армуючої фази у поперечному перерізі композиту після прокатки - до 5%.

До виконання цієї роботи даних щодо залежності витяжки та овалізації дротів сітки у складі композиту при прокатці між двох алюмінієвих штаб від ступеня деформації відомо не було. Отримані результати дозволяють визначити раціональний діапазон ступенів деформації (35...45%) композиту при прокатці, в яких пропорційно та послідовно відбувається: трансформація ґратки сітки, видовження дроту та його овалізація.

Проаналізовані результати випробувань прокатаних композитів на розтягування та визначено, що армовані композити, порівняно з двома сумісно

прокатаними штабами без армування, що були з'єднані прокаткою, мають більші значення межі міцності на 3...10 % та межі плинності 12...25%.

Дістали подальшого розвитку наукові уявлення про анізотропію прокатаного композиту в залежності від параметрів деформації ґратки сітки та овалізації її дротів. До виконання цієї роботи вважалося, що анізотропія властивостей прокатаного без подальшої термічної обробки композиту пропорційна ступеню деформації при прокатці. Отримані дані дозволяють визначити раціональний з точки зору мінімізації різниці між показниками механічних властивостей композиту в поздовжньому та поперечному напрямках діапазон ступенів деформації при прокатці. 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.

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 визначити залишковий кут та радіус згинання зразків.

Створено комп'ютерну модель процесу гарячої прокатки алюмінієвих штаб, армованих сталеву сіткою під кутом 45° до напрямку прокатки, в скінченно-елементному середовищі QForm. Порівняння результатів моделювання видовження ґратки та витяжки дротів сітки з експериментальними даними показало відхилення результатів розрахунків 5,6 % та 2%, відповідно. Отримані результати свідчать про високу збіжність розрахунків та адекватність побудованої моделі. Це дає можливість подальшого розвитку технології виготовлення композитів армованих сталеву сіткою для різних розмірів його складових.

Порівняння армованих композитів та двох прокатаних штаб без армування показало, що перші мають радіус згинання вищий на 3...11 %, а термічно оброблені на 25...49% , залишковий кут згинання на 2...18 %, та питому енергію удару на 17...22 %. Після термічної обробки питома енергія удару та залишковий

кут згинання зменшуються на 2...12%. Індикатори жорсткості (радіус згинання і залишковий кут) мають екстремальні показники при ступені деформації 45%. У той же час енергія удару, що поглинається, монотонно підвищується зі збільшенням ступеня деформації.

Досліджено вплив термічної обробки після деформації на властивості композиту та встановлено, що термічна обробка призвела до суттєвого 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).

На основі результатів випробувань 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 «Zip-з'єднання», що сприяє прояву механізму розшарування «Відшарування першого шару → Обмежене розшарування → Розрив другого шару».

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 дисертаційної роботи передані для використання в умовах ПрАТ Дніпровський завод «АЛЮМАШ». Результати, отримані в ході виконання дисертаційної роботи, використовуються в навчальному процесі на кафедрі обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова Національної металургійної академії України при викладанні дисциплін «Обробка металів тиском», «Процеси та машини обробки тиском» і «Зварювання тиском та процеси з'єднання». Також дані, отримані в ході виконання дисертаційної роботи, використовуються на кафедрі матеріалознавства в Університеті Падерборн.

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

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 actual scientific and technical problem, which is in the development of technology foundation of obtaining aluminum stripes reinforced with steel netting by the method of hot rolling for structural products with predicted mechanical properties. For this purpose, in thesis the theoretical and experimental researches of strain parameters of net cell elongation, wire elongation and wire ovalisation as well as the influence of these parameters on the mechanical properties of the obtained composite were carried out.

The analysis of current state of producing technology of reinforcement composites was done, the necessity of the technology developing for obtaining new composite materials, that combine the strength of lightness and the ability to adsorb impact energy to solve modern problems of construction, machine building, was substantiated. The example of development of such a stream might be the laminated composite, based on the aluminium matrix, that reinforced with strong phase that is evenly located inside. Such a composite could be used in engineering and construction, in particular for doors, roller shutters, windows, elevators, protective elements of military equipment production.

The analysis of known technologies of production reinforced composites based on the aluminum matrix made it possible to establish that the rolling process is rational

for obtaining the reinforced composites and found the necessity of developing calculations of strain parameters of the wire within composite.

In the framework of this thesis the engineering methodology of calculation of strain parameters of wire within the composite during rolling between two aluminium stripes was developed. This obtained method allowed to determine quantitatively the elongation of net cell, elongation and ovalisation of net wires within a composite in a hot rolling of two aluminum stripes, that allows to estimate and predict the final properties of the composite.

The influence of the orientation of the reinforcing net between the matrix layer on the deformation of the net cell and on the composite properties was investigated. It was established that the diagonally oriented net contributes to the flow of metal matrix in the middle layer of the composite due to the limited broadening and the transformation of the net cell.

It was established, that wire elongation wire factor, that calculated with net orientation and net cell transformation should be higher, then elongation factor of the whole composite. This condition was a marker for the integrity of net wires in a composite.

As a result of the study of the influence of the strain parameters on the change of net shape within matrix aluminum composite, the dependencies of such strain parameters of the reinforcing net as net cell elongation (μ_c), elongation of the net wire (μ_{w45}) and ovalization of the wire (O_{w45}) depending on the deformation degree (ε) during rolling were established. Those dependencies were obtained for the following conditions: the ratio of length of the deformation zone to its average height in the range 2.49...4.3; the ratio of the net cell length to the length of the deformation zone in the range of 0.07...0.29; the ratio of the height of the composite to the height (diameter) of the net in the range of 12...32, with the percentage of the reinforcing phase in the cross section of the composite up to 5%.

Prior to this work, data on the dependence of elongation and ovalization of wire of the net within the composite during rolling between two aluminum stripes from the deformation degree was not known. The obtained results allowed to determine the

rational ranges of deformation degrees (35...45%) of the composite during rolling, in which proportionally occurs: net cell elongation, wire elongation and wire ovalization.

The results of rolled composites of tensile testing were analyzed and it was determined that all reinforced composites, in comparison with two rolled aluminium stripes without reinforcement, had larger values of the ultimate tensile strength by 3...10% and yield strength 12...25%.

Further development of scientific ideas about the anisotropy of the rolled composite were obtained, depending on the strain parameters of net cell and wire ovalisation. Prior to this work it was considered that the properties anisotropy of the rolled composite without further thermal treatment is proportional to the deformation degree during rolling. The obtained data allow to determine the rationale in terms of minimizing the difference between the indicators of mechanical properties of the composite in the longitudinal and transverse directions of the range of deformation degrees during rolling. It was established that for a range of deformation degree within the limits of 35 ...45% may be recommended to obtain a compromise between the durability and plasticity of composites in the longitudinal and transverse directions.

The well-known method of impact testing was adapted for samples with different thicknesses under rolling conditions with different deformation degrees for evaluation of the properties of the aluminum stripes, reinforced with steel net. It made it possible to determine the ability of the composite to absorb the impact energy as well as the residual angle and bending radius of the sample.

A computer model of the hot rolling process of aluminum stripes, reinforced with a steel net at an angle of 45° to the rolling direction, was created in the finite-element environment QForm. The comparison of the results of modeling the net cell elongation and wire net elongation with experimental data showed a deviation of the results of calculations by 5,6% and 2%, respectively. The obtained results testify to the fairly high convergence of calculations and the adequacy of the constructed model. This enables the further development of the technology of manufacturing composites reinforced with steel net for various sizes of its components.

The comparison of reinforced composites and two rolled stripes without reinforcement showed that the first ones had a higher residual bending radius of 3...11%, and heat-treated composites 25...49%, a residual bending angle of 2...18%, and fitted impact energy of 17... 22%. After thermal treatment, the fitted impact energy and the residual bending angle were reduced of 2...12%. The rigidity indicators (residual bending radius and the residual bending angle) had extreme rates at the deformation degree of 45%. At the same time, the absorbed energy monotonically increases with an increase in the deformation degree.

The influence of heat treatment after deformation on the properties of the composite was investigated and it was established that heat treatment led to a significant reduction in tensile strength (7 ...15% in longitudinal and 4...23% in transverse direction) and the yield stress (7 ...18% in longitudinal and on 27 ... 81% in the transverse direction) with simultaneous increase of its elongation at fracture (for 19...50% in longitudinal and 27 ... 68% in the transverse direction).

Based on the results of the tensile test, three mechanisms for the destruction of reinforced composites obtained by rolling with different degrees of deformation were established. These mechanisms moved one to the other with an increase in the deformation degree during rolling. It was established that with a degree of deformation of 35 ... 45%, there was a «Zip-bonding», which facilitates the manifestation of the bundle mechanism «Fracture of the first layer → Limited delamination → Fracture of the second layer»

The technology fundamentals of rolling aluminum strips with steel net reinforcement by hot rolling method was developed on the basis of the results of the study net cell deformation parameters, elongation and ovalisation of wire net as well as the influence of these parameters on the mechanical properties of the resulting composite and the ability to absorb impact energy.

The results of the thesis were transmitted for use in the conditions of the private joint-stock company Dniprovsky Plant «ALUMASH». The results obtained during the implementation of this thesis are used in the educational process at the Metal Forming Department named by acad. O.P. Chekmarev of National metallurgical academy of

Ukraine during the teaching of disciplines «Metal Forming», «Processes and machines of metal forming» and «Welding by pressure and connection processes». Obtained during the thesis data are used at the Department of Material Science at the Paderborn University as well.

Keywords: rolling, aluminum matrix, steel net, reinforcing, delamination, mechanical properties

Список публікацій здобувача за темою дисертації

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 bimetals 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. – 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. Tershakovec, 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. Макеева**, 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. Макеева**, С.Ю. Макеев, 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. Макеева, Г.С. Анізотропія гарячекатаних, армованих сталевую сіткою алюмінієвих матричних композитів / **Макеева 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. Макеева, Г.С. Вплив параметрів деформації на формозміну сталевій сітки в складі армованого алюмінієвого матричного композиту / **Г.С. Макеева**, 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. Макеева**, М.Ю. Столбченко, А.К. Андреев, В.Д. Коваленко // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2016. – №3. – С. 57-65.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ЩОДО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ З'ЄДНАННЯ АРМОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ	25
1.1 Методи армування композитних матеріалів з алюмінієвою матрицею та їх застосування	25
1.2 Параметри впливу на процес з'єднання прокаткою композитів з алюмінієвою матрицею.....	37
1.3 Стан питання щодо дослідження процесу виготовлення шаруватих армованих алюмінієвих штаб	43
1.4 Метод розрахунку впливу кількості армуючої фази у складі композиту на властивості всього композиту.....	47
Висновки по розділу 1.....	49
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ	52
2.1 Методика проведення експериментальних досліджень гарячої прокатки армованих алюмінієвих композитів	52
2.2 План дослідження впливу розташування сітки на з'єднання шарів композиту та його механічні властивості	58
2.3 Методика розрахунку параметрів деформації та овалізації сітки у складі композиту.....	62
2.4 Методика проведення досліджень механічних властивостей армованих композитів	66
2.5 Модель процесу з'єднання прокаткою армованих алюмінієвих штаб.....	69
Висновки по розділу 2.....	72
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТИПУ ТА ОРІЄНТАЦІЇ СІТКИ НА ЇЇ ФОРМОЗМІНУ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ОТРИМАНОГО КОМПОЗИТУ.....	74
3.1 Вплив розташування сітки на трансформацію її ґратки в складі алюмінієвої матриці, геометричні характеристики	

процесу.....	74
3.2 Параметри деформації армованих композитів.....	78
3.2.1 Прокатані за один прохід композити з матрицею зі сплаву EN AW -5056.....	78
3.2.2 Прокатані за один прохід композити з матрицею зі сплаву EN AW -6063	80
3.2.3 Прокатані за два проходи композити з матрицею зі сплаву EN AW -6063.....	81
3.3 Результати механічних випробувань	83
3.3.1 Композити з матрицею зі сплаву EN AW -5056.....	83
3.3.2 Композити з матрицею зі сплаву EN AW -6063, прокатані за один прохід.....	85
3.3.3 Композити з матрицею зі сплаву AW-6063, прокатані за два проходи.	88
3.4 Узагальнення результатів з'єднання композитів прокаткою з матрицями зі сплавів EN AW -5056, EN AW -6063.....	90
3.5 Розрахункові межі міцності та плинності.....	92
3.5.1 Порівняння розрахункової та експериментальної меж міцності прокатаних композитів.....	92
3.5.2 Порівняння розрахункової та експериментальної меж плинності прокатаних композитів.....	96
3.6 Закономірності розшарування композитів зі сплавів EN AW -5056, EN AW -6063.....	99
3.7 Результати моделювання процесу у програмі Q-FORM.....	105
Висновки по розділу 3.....	106
РОЗДІЛ 4. ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДЕФОРМАЦІЇ НА ФОРМОЗМІНУ СІТКИ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АРМОВАНОГО КОМПОЗИТУ	109
4.1 Вплив параметрів деформації на формозміну сітки у складі композиту з матрицею зі сплаву EN AW-5083.....	109

4.2 Дослідження впливу ступеня деформації на параметри деформації сітки в складі композиту.....	125
4.3 Результати механічних випробувань композитів	129
4.3.1 Криві «напруження-деформація».....	129
4.3.2 Аналіз меж міцності та плинності композитів.....	130
4.3.3 Аналіз впливу термічної обробки на механічні властивості композиту.....	133
4.3.4 Результати випробувань на удар	137
4.4 Закономірності розшарування композиту з матрицею зі сплаву EN AW-5083.....	143
4.5 Анізотропія властивостей армованих композитів в поздовжньому та поперечному напрямках.....	145
4.6 Розрахунок коефіцієнту трансформації сітки	150
4.7 Основи технології виробництва армований алюмінієвих композитів.....	153
Висновки по розділу 4.....	155
ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	160
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	165
Додатки.....	177
Додаток А Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	178
Додаток Б Довідка про використання результатів дисертаційної роботи	181
Додаток В Акт про передачу на використання наукових результатів дисертаційної роботи.....	182
Додаток Г Рекомендаційний лист.....	183
Переклад додатку Г.....	184

ВСТУП

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 компоненту. 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 будівництві та машинобудуванні, зокрема, для виробництва ролетів, дверей, вікон, підбою бойових відсіків броньованих машин тощо.

Розвитку технологій виробництва композитів, що виготовляють 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-елементу 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 сталевую сіткою, способом гарячої прокатки, що базується на визначенні параметрів деформації ґратки сітки, витяжки та овалізації її дротів, а також впливові 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 $120\text{м}^2/\text{с}^2$ » (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 сталевую 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-елементному 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 сталевою 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 сталевій армуючій 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 сталевий 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 сталевий сіткою, були невідомі. Це дало можливість обирати раціональний ступінь деформації й заповнити порожнини між дротами армуючої сталевий сітки і алюмінієвої матриці та збільшити внаслідок цього рівень механічних властивостей, а також визначити раціональну геометрію складових композиту.

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

Раніше таких даних для алюмінієвого композиту, армованого сталевий 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. Моделювання з 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 Національної металургійної академії України 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): [71, 102, 105, 115] – аналіз відомих технологій отримання армованих композитів на основі алюмінієвої матриці; [100] – дослідження впливу орієнтації армуючої сітки між шарами матриці на деформацію ґратки сітки та властивості композиту; [87] – розробка методу розрахунку параметрів деформації сітки у складі композиту; [99, 101, 108] – дослідження впливу параметрів деформації на формозміну сітки у складі композиту та механічні властивості; [109] – проведення експериментів та аналіз впливу термічної обробки після процесів деформації на властивості композиту; [114] – дослідження анізотропії властивостей прокатоного композиту шляхом порівняння результатів вимірювання механічних властивостей в поздовжньому та поперечному напрямках; [86] – оцінка стадій 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 металургія» (м. 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 імпакт 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.

Хочу подякувати науковому керівнику Фролову Ярославу Вікторовичу за насагу та підтримку в написанні роботи, а також колегам Олександру Гридіну, Михайлу Столбченко, Анатолію Андрєєву, Олегу Ремезу та Коваленко Валерії за плідну співрацю в рамках проекту «Praxispartnerschaft Metallurgie» (за підтримки Німецького товариства академічних обмінів DAAD), зокрема в роботі над дослідженнями, що стосуються прокатки алюмінієвих штаб, армованих сталевую сіткою.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ЩОДО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ З'ЄДНАННЯ АРМОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Методи армування композитних матеріалів з алюмінієвою матрицею та їх застосування

На сучасному етапі розвитку виробництва в нашій країні з огляду на значне подорожчання всіх видів продукції багато уваги приділяється питанням продовження термінів служби і підвищення ресурсу використання деталей без їх заміни на нові. Застосування матеріалів, що мають меншу вагу з тими ж, чи покращеними механічними властивостями, призводять до економії палива, електроенергії і, як наслідок, зменшення забруднення навколишнього середовища.

Застосування нововведень в інженерії потребує матеріалів, що має гарне співвідношення міцності і ваги, мають здатність до поглинання енергії удару. Такий матеріал може бути застосований в частинах автомобілів, різноманітних оболонках, що працюють під тиском, щоб зробити його легше, оскільки дедалі частіше стає критичним питання економії ресурсів [1]. Ще одним напрямком застосування матеріалів з високою здатністю до поглинання енергії удару та невеликою питомою вагою є захисні елементи для військових, підбою бойових відсіків броньованих машин. Також такий матеріал застосовується при виробництві конструкційних виробів: ролетів, дверей, вікон та інше.

Для обслуговування та роботи багатьох сучасних інженерних систем потрібні матеріали з широким спектром властивостей, які важко отримати, використовуючи лише моно матеріали [2]. Металічні матричні композити пропонують таку індивідуальну комбінацію властивостей [3].

У сучасній промисловості використовуються композитні матеріали завдяки їх багатофункціональності та оптимального поєднання якості та вартості. Композитні матеріали, що виготовлені шляхом поєднання шарів різних

матеріалів, можуть бути виготовлені у різних формах, таких як пластини, лист, фольга, труба, стрижень, дріт і т.д. Функціональні можливості різних металевих композитів можна інтегрувати з метою отримання необхідних електричних, магнітних, корозійностійких, термомеханічних властивостей, отримання бажаної структури чи управління термічним розширенням, а також отримання потрібної текстури та якості поверхні [4].

Композит — це композиційний матеріал, штучно створений неоднорідний суцільний матеріал, що складається з двох та більше компонентів з чіткою межею розділу між ними, згідно з визначенням вільної електронної енциклопедії — Вікіпедії. Композитом також називають неоднорідний (гетерогенний) матеріал, що складається з двох або декількох взаємонерозчинних компонентів (фаз). Згідно цього визначення до композитів відносять дисперсійно зміцнені сплави, бетони, метали з покриттям [5].

Згідно ДСТУ 2241-93, композитний матеріал, композиційний матеріал, композит – це гетерофазний матеріал, окремі фази якого виконують специфічні функції, забезпечуючи йому властивості, яких не має жодний з компонентів окремо [6].

Автори [7] виділяють такі композитні матеріали: волокнисті, шаруваті та дисперсійно зміцнені. Волокнисті композиційні матеріали – це матеріали, в яких матриця з'єднує волокна чи інші зміцнені елементи в єдиний монолит, захищаючи їх від пошкоджень.

Алюмінієві композити — це нове покоління композитних металевих матриць, які мають потенціал, що задовільнює останнім вимогам передових інженерних технологій. Ці вимоги досягаються за рахунок поліпшення механічних властивостей, здатності до традиційної технології обробки та можливості зниження собівартості алюмінієвих композитів. Продуктивність цих матеріалів в основному залежить від вибору правильної комбінації армуючого матеріалу та матеріалу матриці, оскільки деякі параметри обробки пов'язані з армуючою складовою. Алюмінієві матричні композити широко

використовуються в автомобільних промисловості, будівній промисловості та інших областях [8].

Наприклад, композиційні матеріали можуть бути використані в легких деталях для обшивки та термоізоляції, для задовільнення пожежних та акустичних вимог покрівлі та стін. Алюмінієві композити використовують для виробництва дверей, ролетів вікон. Композити з алюмінію та нержавіючої сталі використовуються як бампери в автомобілях, для виконання вимог як міцності, так і корозійної стійкості.

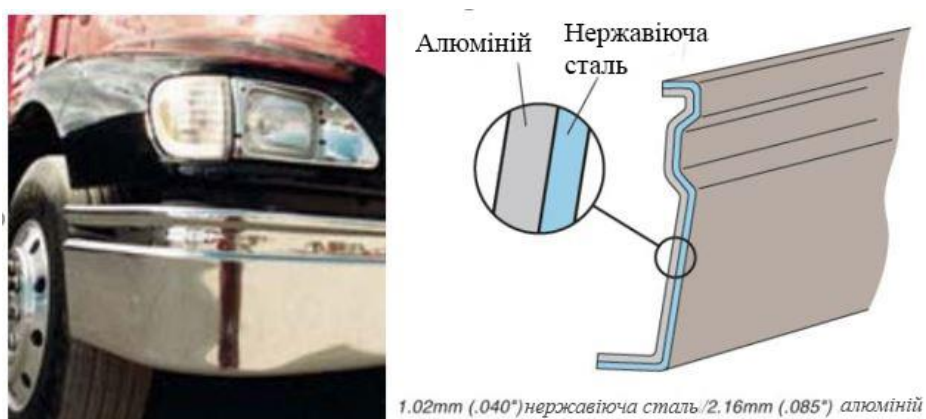


Рис. 1.1. Композити з алюмінію та нержавіючої сталі використовуються як бампери в автомобілях [9]

Конструкція кузова авто повинна відповідати багатьом вимогам. З однієї сторони знижувати масу та покращувати аеродинамічні властивості, з іншого боку все більше значення набувають фактори безпеки. Для виконання вимог, що містять протиріччя, використовують такі напрями для вдосконалення конструкцій:

- використання алюмінієвих та магнієвих сплавів;
- використання високоміцного листового матеріалу;
- оптимізація товщини панелей;
- нові технології з'єднань деталей [9].

Одним з напрямів, що привертає все більшу увагу вчених, [10] є використання алюмінію для зменшення ваги автомобіля з точки зору збереження

навколишнього середовища. Використання алюмінієвих сплавів замість сталі є найбільш корисним способом вирішення цієї проблеми. Зменшення ваги автомобіля призводить до зменшення використання палива і, як наслідок, менше забруднень навколишнього середовища. Але лист алюмінієвого сплаву для кузова автомобіля не достатньо міцний. Виготовлення повністю алюмінієвого кузова робить виробника зобов'язаним надавати деталям відповідних механічних властивостей, тому їх необхідно оснащувати додатковими ребрами міцності чи шукати інші шляхи зробити алюміній менш пластичним [11]. Одним з шляхів збільшення міцності матеріалу та здатності до поглинання енергії удару є армування алюмінієвих штаб.

Алюмінієві матричні композити зарекомендували себе як успішні «високотехнологічні» матеріали в різних областях застосування (рис. 1.2). Використання таких композитів забезпечує значні прибутки, включаючи вигоди від продуктивності (підвищення строків експлуатації, підвищення продуктивності праці), економічні вигоди (енергозберігаючі заощадження або зниження витрат на технічне обслуговування) та екологічні вигоди (нижчий рівень шуму та менше викидів в атмосферу) [3].



Рис. 1.2. Вигоди від використання алюмінієвих матричних композитів

Зацікавленість до алюмінієвих матричних матеріалів викликана тим, що притаманний їм комплекс властивостей та особливостей суттєво відрізняє їх від традиційних конструкційних матеріалів. Найбільший інтерес складають висока міцність та мала щільність, а також можливість управління механічними та фізичними характеристиками при виробництві матеріалу. Таким чином композит

отримує властивості, які залежать насамперед від властивостей матриці та армуючих елементів.

Більш того, їх з'єднання дає ефект синергізму, що пов'язаний з появою у композитів властивостей, що не характерні для ізольованих компонентів композиту.

Композитні матеріали відрізняються тим, що мають набір властивостей, що корисні, а іноді унікальні і необхідні для вдосконалення технологій машинобудування та інженерного розвитку взагалі.

Рациональне поєднання дозволяє отримувати ефективні конструкції з високою перевагою у вазі при заданій анізотропії та фізико-механічних характеристиках матеріалу. Реалізація цих властивостей пов'язана з тим, що управління характеристиками композитів в процесі виготовлення конструкції здійснюється шляхом зміни орієнтації волокон та поєднання шарів з різних матеріалів.

Це дозволяє отримувати матеріали з необхідними властивостями та характеристиками. Взагалі для кожної конструкції може бути винайдений матеріал, що найбільш повно відповідає вимогам до неї, полю діючих навантажень та умовам експлуатації.

Загально прийнятими металевими сплавами для отримання композитних матеріалів є сплави легких металів (Al, Mg та Ti), проте, інші металеві сплави, такі як цинк (Zn), та мідь (Cu) і нержавіючу сталь також широко використовують [12, 13]. Алюміній та сплави з нього залишаються металевим сплавом, що все частіше застосовують як матеріал матриці для металевих матричних композитів, і причини цього розкриті в літературних джерелах [14 - 16].

Таким чином, основні зусилля дослідників в основному спрямовані на вибір армуючого матеріалу, оскільки зміцнюючі матеріали грають значущу роль у визначенні властивостей всього композиту.

Автори [17] порівнюють різні матеріали в якості армуючої складової алюмінієвого композиту та виділяють три типи армування алюмінієвого композиту на основі алюмінієвої матриці: армування металом, керамікою чи

органічною складовою. Описують переваги та недоліки прикладів армування силікон карбідом, карбідом бору, алюмінієм оксидом, волокном, цирконієм, деревиною ясеню.

Автори [18] виділяють три різні підходи, що спрямовані на підвищення продуктивності армованих алюмінієвих композитів.

Перший підхід передбачає пошук альтернативних та дешевих армуючих матеріалів. Серед вже відомих матеріалів армування таких як керамічні фази, існують також і альтернативні варіанти армування [19 - 22]. Це пов'язано в високою вартістю та обмеженою наявністю інших армуючих матеріалів. Проте альтернативні армуючі матеріали мають нижчі властивості в порівнянні з армованими алюмінієвими матричними композитами, що розроблені з використанням традиційних синтетичних посилюючих матеріалів [23 -25].

Другий підхід спрямований на оптимізацію армованих алюмінієвих матричних композитів шляхом зменшення розміру частинок армуючого матеріалу від мікронної шкали до наномасштабної (зазвичай від <50 мкм до середнього значення <100 нм) [26-28].

Як повідомляється в [29, 30], міцність та пластичність армованих алюмінієвих матричних композитів поліпшується без суттєвого зменшення сили, коли наночастинки використовуються як арматурні матеріали.

Армування наночастинками є цікавим напрямком для досліджень, але висока вартість і можливості для отримання наночасток є обмежувальним фактором для його розвитку. Крім того, обґрунтування механізмів пластичності та міцності на розрив при поліпшенні якості наночастинкових армованих композитів є недостатньо непереколивими. Деякі автори повідомили про поліпшення міцності та зносостійкості за рахунок пластичності [31, 32].

Третій підхід передбачає розвиток армування алюмінієвих матричних композитів, з використанням двох або більше армуючих матеріалів. Цей клас армованих алюмінієвих матричних композитів називається гібридними композитами. Такий підхід дає простір для можливого зниження вартості у поєднанні з оптимізацією властивостей композиту. Автори [2, 33] повідомили про

задовільну або покращену ефективність гібридних армованих матричних композитів з одним армуючим матеріалом.

Але слід відзначити, що гібридні армовані матричні композити здебільшого виробляються методами порошкової металургії. Цей метод дозволяє виробляти композити з наночастками армуючого матеріалу, а також композити при яких вміст армуючих часток більший, ніж частка матриці [3, 34, 35].

Характеристика видів армуючих складових алюмінієвих матричних композитів приведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Види армуючих складових алюмінієвих матричних композитів

Армуюча складова	Позитивні властивості	Негативні властивості	Літературні джерела
Наночастки - оксид алюмінію (Al_2O_3) та карбід кремнію (SiC)	Фракції часток від 2,5 до 10 % об'єму, висока міцність, пластичність, електропровідність та теплопровідність	Висока вартість	[26-30]
Гібридні компоненти - два або більше армуючих матеріали	Зниження вартості у поєднанні з оптимізацією властивостей композиту	Виробляються здебільшого шляхом методу порошкової металургії, частка армуючих часток більша, ніж частка матриці	[2, 3, 33-35]
Кераміка чи органічна складова	Альтернативні дешеві варіанти	Гірші властивості композиту, порівняно з іншими методами	[19-23, 33]
Армування металом	Композити з порівняно високими механічними властивостями	-	[36].

Розглянувши існуючі методи армування алюмінієвих матричних композитів можна зробити висновок, що серед методів армуючих матеріалів, все ж таки слід надати перевагу класичному методу армування металом, оскільки розглянуті методи або показують гірші механічні властивості, або припускають використання методів порошкової металургії, що робить процес виробництва композиту дорожчим.

Аналіз способів виробництва алюмінієвих матричних композитів представлено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Способи виробництва алюмінієвих матричних композитів

Метод виробництва	Переваги	Недоліки	Літературні джерела
Зварювання плавлінням	Міцне з'єднання	Лише для металів з взаємною розчинністю як у рідкому так і твердому стані	[37]
Зварювання вибухом	Простота обладнання та швидкість виконання	Необхідні спеціальні заходи безпеки, умови виробництва	[37, 39,40]
Дифузійне зварювання під тиском	Висока міцність з'єднання	Необхідна чиста поверхня, часто застосовують хімічне травлення поверхні	[41]
Дифузійне зварювання в вакуумі	Висока міцність з'єднання, основними параметрами процесу є температура, питомий тиск, час, чистота обробки поверхні	Вакуумна установка підвищує вартість реалізації процесу	[38]
Метод прокатки в вакуумі	Необхідний менший тиск, можливість прокатки високоактивних металів, хороше з'єднання контактних поверхонь	Вакуумна установка підвищує вартість реалізації процесу	[38, 42, 43]
Пресування	Можна отримати вироби необхідних розмірів з малими допусками	Виробництво прес форми	[37,44]
Волочіння	Отримання продукції малого діаметру	Виробництво продукції обмежено її діаметром	[37]
Прокатка	Масове виробництво з якостями міцності та пластичності	—	[37, 7]
Валковий розлив-прокатка	Можливість одержати тонкий рівномірний шар інтерметалевих фаз на поверхні матеріалів, добра холодна формуємість штаб	Необхідний пристрій валкового розливу-прокатки	[49-52]
Порошкова металургія	Велика суцільність отриманого матеріалу, особливістю є застосування наночасток.	Процес виробництва має високу вартість	[7]

В роботі [37] виділяють три основних способи виробництва шаруватих металевих композитів: зварювання плавлінням, з'єднання металів пластичною деформацією та отримання металів з використанням енергії вибуху.

Велику долю в виробництві шаруватих алюмінієвих композитів займає спільна пластична деформація, найчастіше – прокатка. Суть методу полягає у тому, що поверхні, що будуть з'єднані, очищують від забруднень та оксидних плівок, знежирюють, з'єднують у пакети та піддають спільній гарячій деформації.

Температуру нагріву та режим обтиску підбирають для композиту, щоб отримати необхідну міцність з'єднання [37].

Одним з різновидів прокатки є прокатка в вакуумі або в захищених середовищах. Особливо відчутні переваги цього методу при прокатці високоактивних металів. При прокатці в вакуумі відсутність утворення оксидних плівок покращує з'єднання композиту. Для здійснення даного виду прокатки використовують спеціальні стани для прокатки в вакуумі або в інертних газах [38].

Застосування вакууму має ряд переваг у порівнянні з застосуванням інертних газів, контроль глибини вакууму більш легкий, ніж контроль чистоти інертного газу, не потрібні дорогі установки для очищення газу. Нагрів металу в вакуумі призводить до випаровування поверхневого шару, при цьому на поверхнях контакту металевих шарів утворюється хороше з'єднання. З-за складності конструкції та високої вартості експлуатації вакуумні стани рідко застосовуються у промислових масштабах.

Автори [7] виділяють наступні методи виробництва алюмінієвих матричних композитів: виготовлення композитних матеріалів зварюванням вибухом, дифузійною сваркою під тиском, отримання композитів обробкою металів тиском.

Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки.

Метод виробництва композиту з використанням енергії вибуху [39] полягає у тому, що пластини після зачистки та знежирення поверхонь, що будуть з'єднані, встановлюють горизонтально одна відносно одної. На верхній пластині розміщують вибухову речовину. При детонації верхня пластина на великій швидкості з'єднуються з нижньою пластиною. В зоні з'єднання розвивається тиск до декількох тисяч МПа [37].

При застосуванні цього методу на контактних поверхнях утворюються рідкі фази, оскільки на дуже короткий час поверхні розігріваються до 3000 °C [40].

Для отримання даного шаруватого композиту пластини повинні бути достатньо пластичними для переміщення шару металу при поздовжньому згинанні під час вибуху вибухової речовини.

Приклад застосування зварювання вибухом наведено в [39], де описано як композитний листовий матеріал був виготовлений з поперемінно розташованих дротяних ґраток з нержавіючої сталі та алюмінієвої фольги. Було виявлено, що шари можуть бути задовільно скріплені за допомогою алюмінієвої пластини, яку не скріплювали в композит, а запобігли цьому за допомогою шару поліетилену. До недоліків даного методу належить важкість організації технологічного процесу, мала продуктивність, висока ціна будівництва та експлуатації полігонів та складів для вибухових речовин [37].

Дифузійне зварювання під тиском забезпечує з'єднання двох шарів під тиском, при тісному контакті з'єднуваних поверхонь через взаємне проникнення речовин одна в одну внаслідок теплового руху атомів речовини. Процес дифузійного зварювання металів може забезпечувати високу міцність, якщо зварювані деталі звільнені від всякого роду забруднень, включаючи і окисні плівки, які утрудняють утворення металевих зв'язків. Одним з найбільш поширених способів очищення поверхонь є хімічне травлення деталей безпосередньо перед зварюванням [41]. Основними параметрами процесу дифузійного зварювання у вакуумі є температура, питомий тиск, час, чистота обробки поверхні матеріалів, що з'єднуються, і ступінь розрідження атмосфери. Недоліком даного методу є необхідність застосування вакуумної установки для здійснення процесу, що підвищує вартість реалізації процесу.

Метод прокатки в вакуумі [45] відрізняється тим, що для отримання з'єднання композиту необхідно використовувати менше деформації, що відповідно буде менше пошкоджувати волокна армуючої складової композиту. Але при цьому необхідне більш складне обладнання для проведення прокатки в вакуумі.

Дослідження, які приведені в [42, 43], показали, що при зварюванні матеріалів у твердій фазі на границі відбувається перерозподіл атомів з одного

матеріалу в інший. З отриманих розрахункових та експериментальних даних зроблено висновок, що межа міцності границі з'єднання завжди більше, ніж межа міцності менш міцного матеріалу.

Існують методи отримання композитних матеріалів шляхом формування металу, такі як пресування [44], волочіння, метод прокатки [7].

В дослідженні [44], описують спосіб отримання алюмінієвого композиту, зміцненого сталевую пластиною шляхом пресування. Отриманий таким чином композит може бути застосований для виготовлення іншого композиційного матеріалу. Недоліком отримання такого композитного матеріалу шляхом пресування є необхідність попереднього виробництва спеціальної прес форми.

Отримання багат шарових металевих матеріалів шляхом прокатки є найбільш простим виробничим методом обробки тиском, і таким, що представляється можливим для масового виробництва і для отримання матеріалів з високою міцністю, твердістю, при достатньо високій пластичності [46].

Одним з різновидів методу виготовлення композиту алюміній – сталева сітка – алюміній є метод валкового розливу-прокатки [47, 48], який має певні переваги. До них слід віднести: можливість виготовлення даним методом композиційних матеріалів великої довжини безперервно і тим самим зменшити час виробництва. Перевага методу валкового розливу-прокатки з двухвалковою машиною – можливість легко вставляти та утримувати дріт. Такий спосіб дозволяє контролювати час контакту дроту та матриці.

Реалізація енергозберігаючої технології валкового розливу-прокатки для алюмінієвих та сталевих сплавів дозволяє одержувати тонкий і рівномірний шар інтерметалідних фаз на поверхні матеріалів [49]. Більш того, хороша холодна формуємість валкового розливу-прокатки і, як наслідок, гарячекатаної плавленої штаби з чистого алюмінію та аустенітної сталі, що отримана методом валкового розливу-прокатки, показана в [50].

Незначна кількість відомих досліджень присвячена технологіям розливки, зокрема валкового розливу-прокатки, для виготовлення алюмінієвих матричних композитів, посилених дротами та сіткою та оцінки їх властивостей. В публікації

[51] описано параметри процесу та верхні обмеження діаметру дроту при валковому розливі-прокатки, армованих сіткою алюмінієвих штаб. У той же час у цьому процесі не спостерігалось суттєвого зменшення поперечного перерізу дротів. Прилади для подачі та розташування дротів всередині композиту під час валкового розливу-прокатки описані в [52].

З аналізу літературних джерел видно, що валковий розлив-прокатки може бути використаний як метод виробництва армованих алюмінієвих штаб. Але для цього необхідний спеціальний пристрій для валкового розливу-прокатки, що на даному етапі обмежує можливості для проведення досліджень. Крім того, оскільки метал знаходиться в рідкій фазі, то важко контролювати розташування сітки всередині композиту внаслідок термічних напружень, що виникають в сітці.

Для підтвердження переваг прокатки, порівняно з пресуванням, для отримання з'єднання алюмінієвого армованого композиту було проведено експеримент. Композит на основі алюмінієвої матриці зі сплаву EN AW-5083 та розмірами ($h \times b \times l$): $5 \times 150 \times 150$ мм з сіткою з нержавіючої сталі EN 1.4301 з діаметром дроту сітки 0,5 мм та розміром с ґратки сітки $0,2 \times 0,2$ мм та розміром ґратки сітки $0,5 \times 0,5$ мм намагались з'єднати методом пресування, застосовували силу 5,6 МН. Максимальна сила пресу складає 6 МН.

Результати пресування представлено на рисунку 1.3.



Рис.1.3. Зразок пресованого армованого композиту. Напруження при з'єднанні було 249 МПа.

Отримати армований композит методом пресування не вийшло, незважаючи на досягнення 249 МПа контактного тиску, оскільки з'єднання матричних шарів не відбулося (Рис.1.3). Одразу після пресування відбулося розшарування композитних шарів. Таким чином, у відповідності до відомих літературних даних та власного досвіду, для отримання зчеплення між шарами необхідно в зоні деформації також мати силу, яка діє по дотичній до контактної поверхні.

Отже, серед розглянутих методів виробництва особливу увагу слід приділити методу прокатки. Використання процесу прокатки для отримання продукції має свої переваги над іншими методами отримання армованих алюмінієвих композитів. Він забезпечить більш ефективний, економічний і швидкий метод виготовлення армованих листів.

1.2 Параметри впливу на процес з'єднання прокаткою композитів з алюмінієвою матрицею

Прокатка – це один з основних процесів обробки металів тиском, де відбувається пластична деформація металу та метал рухається між двома валками, що обертаються у протилежних напрямках [53]. Пластична деформація при прокатці зменшує початкову товщину заготовки до заданої кінцевої товщини. Через постійність обсягу матеріалу до та після прокатки зменшення товщини матеріалу визначає збільшення його довжини - витяжку. Зміна ширини при цьому незначна. Процес прокатки не тільки зменшує товщину, але також підвищує властивості матеріалу, такі як міцність, в'язкість, морфологію поверхні тощо.

Процес прокатки, як правило, залежить від багатьох факторів і окремих характеристик:

- характеристик стану: діаметру валків, швидкості прокатки, матеріалу валків, потужності приводу;
- характеристик продукції: матеріалу і його властивостей, геометрії, попередньої обробки;
- характеристик процесу: режиму температур, відстані між валками.

Основними параметрами, котрі характеризують процес є: відносна деформація, швидкість деформації, фактор форми осередку деформації.

Для того, щоб отримати добре з'єднання шарів матриці, використовують гарячу прокатку при температурах 0,7...0,9 від температури плавлення.

Обов'язковими умовами для якісного з'єднання металів тиском є [54]:

- ретельна очистка місця з'єднання від жирових і масляних плям, окалини та інших речовин зі складним хімічним складом, які не мають яскраво вираженої кристалічної структури;

- поступовість наростання зусилля, внаслідок чого спочатку утворюється деформація приконттактних шарів, а потім починають відбуватися дифузійні процеси;

- схильність металів, що з'єднуються таким чином, до утворення так званих інтерметалідів – хімічних сполук одного металу з іншим. Дана умова забезпечується при наявності в складі сталі хрому, кобальту, вольфраму і молібдену.

Після досягнення певного тиску в приповерхневих шарах заготовок починаються деформаційні процеси. При цьому змінюються, а саме зменшуються, розміри кристалічної решітки, а атоми переходять з одного енергетичного рівня на інший, в результаті чого їх рухливість істотно зростає. Утворюються хімічні зв'язки. Чим більше в мікроструктурі металу різнорідних атомів, тим ці зв'язки міцніше. Тому межа міцності з'єднаних таким чином деталей з нелегованої сталі, при тих же робочих параметрах зусилля і часу нижче, ніж для легованих.

На якість зварювання тиском впливають також [54]:

- ступінь деформації: для високопластичних металів і сплавів - алюмінію, олова, свинцю - продуктивність з'єднання збільшується;

- температура: термомеханічне з'єднання засноване на одночасному впливі тиску і температури, дозволяє з'єднувати таким чином навіть високолеговані сталі, що звичайній з'єднуються важко.

Разом з тим, на зварювання тиском суттєво не впливає наявність металевих плівок, які утворюються, наприклад, після поверхневого легування деталей. Тому

даний вид обробки слід виконувати на завершальних операціях технологічного процесу.

Існує гіпотеза [55], що з'єднання відбувається завдяки деформації зсуву, що характеризується зміною кутів елементарних обсягів тіла без зміни розмірів їх граней. Вона викликана дотичними напруженнями і відбувається взаємним зсувом паралельних граней. Деформації зсуву збільшуються із збільшенням температури і збільшенням тиску. Було визначено енергію активації для з'єднання, котра залежить від температури. Температура є найбільш важливим фактором для якості зв'язку, а ступінь деформації, швидкість прокатки і коефіцієнт тертя – на другому місці. Інші дослідження стверджують, що швидкість прокатки майже не впливає на з'єднання шарів при прокатці [56]. В [37] визначено, що на отримання композиту з біметалу впливає ряд факторів: температура, тиск, товщина шарів пакету, та інші. Також відокремлено вплив оксидних плівок. При значному збільшенні товщини оксидних плівок їх вплив на запобігання з'єднання збільшується. Якщо прокатка проводиться при високих температурах, то плівка оксидів може дифузійно розчинятися в металі. [37].

З'єднання прокаткою моно- та біметалевих металів вивчено в [57]. Досліджувався процес холодної та гарячої прокатки алюмінієвих штаб і вплив температури прокатки на з'єднання матеріалів та виявлена гранична деформація між двошаровими композитами, що складаються з штаб алюмінію.

Гранична межа температури та деформації, за даними [57], при якій відбувається з'єднання композиту – 30% деформації та 200° С (рис. 1.4). Було встановлено, що збільшення чи зменшення температури прокатки чи товщини листа впливають на міцність з'єднання композиту.

Питаннями з'єднання листів прокаткою займалися вчені R. Abedi та A. Akbarzadeh [58]. На основі їх робіт можна робити висновки щодо доцільності використання відпалу після прокатки. Для оцінки міцності з'єднання необхідно провести аналіз дифузійного слою між заготовками. Збільшення обтиску по товщині і температури попереднього нагрівання, дає змогу зменшення товщини і в результаті кращого з'єднання за рахунок збільшення відносної товщини області

з'єднання. Відпал матеріалу після прокатки робить істотний вплив на зчеплення шарів за рахунок дифузії елементів і створення дифузійного шару. Якщо товщина дифузійного шару, утворена після процесу відпалу, менше критичного рівня (5 мкм) міцність зв'язку може бути збережена. Після цієї точки міцність з'єднання почне зменшуватися і буде порушуватися зчеплення між шарами.

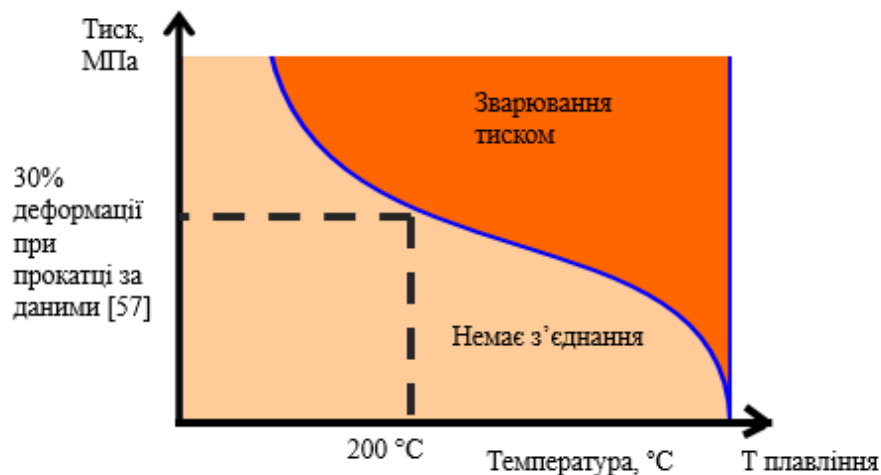


Рис. 1.4. Гранична межа температури та деформації, при якій відбувається з'єднання композиту [57]

Питанням впливу термообробки на з'єднання заготовок займалися також вчені R.Jamaati та M. R.Toroghinejad [59]. Вони встановили, що міцність зчеплення між алюмінієвими штабами збільшується із збільшенням часу відпалу. Порогове значення деформації для з'єднання зменшується з підвищенням температури відпалу або часом відпалу. Збільшення сили тертя підвищує значення контактного тиску і міцності з'єднання.

Величини обтисків, що необхідні для з'єднання, з збільшенням температури зменшуються. Однак при збільшенні температури при звичайній прокатці на повітрі збільшується швидкість окислення. При високих температурах поверхні металів вкриваються товстим шаром оксидів, що запобігають з'єднанню [60].

Вчені P. Chaudhari та V.Acoff [61] досліджували вплив кількості проходів при прокатці на адгезію між шарами алюмінію та карбіду кремнію. При випробуваннях на зсув та властивості міцності не змінювалися у армованих

композитах та двох сумісно прокатаних штаб без армування. Однак значення енергії розподілення чи поглинання виявилось чуттєвим до кількості проходів прокатки. Максимальна енергія поглинання удару та його розподілення по поверхні ламінату при квазистатичному трьохточковому випробуванні на згинання спостерігалось в випадку композита, що було прокатано при мінімальній кількості проходів.

Декілька авторів присвятили свої дослідження численним випробуванням температурно-деформованих умов з'єднання прокаткою плоских виробів [62-65]. Встановлено, що параметрами, що домінують у формуванні з'єднання двох металевих поверхонь при з'єднанні прокаткою, є вихідна температура матеріалів, тривалість взаємодії, напруження на контакті і ступень деформації. Деформація матеріалу та пластична течія призводять до утворення мікротріщин на окислених поверхнях матеріалів, що з'єднуються та активізують дифузійну взаємодію. Формування інтерметалевих фаз між сталлю і алюмінієм або дифузійне зчеплення двох алюмінієвих поверхонь регулюється тепловими ефектами при температурах від 300 °C до 650 °C [56, 66]. В роботі [10] запропонована теоретична чисельна модель визначення температури матеріалу протягом процесу гарячої прокатки алюмінію.

Питанням вивчення холодної і гарячої прокатки алюмінієвих сплавів займалися також Н. Yani J.G. Lenard [67]. Завдяки їх дослідженням було з'ясовано, що саме висока температура (більше від 0,7 температури плавлення алюмінію) прокатки дає краще з'єднання, ніж холодна. Міцність з'єднання, як і зчеплення при зсуві можна порівняти із міцністю початкового металу, можливо отримати на сплаві алюмінію EN AW-1010 гарячою прокаткою. Температура початку прокатки, температура відпалу, витяжка і швидкість обертання валків є найбільш важливими в процесі прокатки. Але найважливішим фактором є саме температура. Гаряча прокатка дає більш кращий рівень з'єднання, ніж холодна прокатка. В інших роботах цих же вчених [67] є і інші висновки, які також можна використати. Ці роботи були присвячені тому, щоб управляти міцністю з'єднання шляхом зміни температури і варіювати товщини листів. Різномірні метали можуть

бути з'єднані шляхом теплої прокатки. Різниця в силі з'єднання може бути досягнута шляхом зміни параметрів прокатки, таких як: товщини прокату і температури прокатки. Міцність з'єднання може бути підвищена за рахунок збільшення товщини прокатки або зниження температури на вході в зону деформації. Поріг обтиснень по товщині знижує співвідношення певних необхідних температур для з'єднання різнорідних металевих листів шляхом теплої прокатки, і зниження порогу товщини стає нижче в міру збільшення температури. Повторне нагрівання не обов'язково може підвищити міцність з'єднання. Тільки повторне нагрівання протягом достатнього проміжку часу може посилити силу з'єднання.

Проведено аналіз факторів впливу на процес прокатки різними авторами. В таблиці 1.3 можна побачити, на які фактори автори звертають найбільше уваги в своїх дослідженнях.

Таблиця 1.3 – Дослідження факторів впливу на прокатку різними авторами

Фактори впливу	[58]	[59]	[60]	[61]	[62]	[63]	[64]	[65]	[66]	[72]	Σ
Температура	+	+	+	+	—	—	+	—	+	+	7
Знежирення, матеріал покриття	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7
Видовження, ступінь деформації	—	+	+	+	+	+	—	—	—	+	5
Температура відпалу	—	—	+	+	—	+	—	—	—	—	3
Швидкість валків	—	—	+	—	—	—	—	—	—	—	1
Товщина листів	—	—	+	—	—	—	—	—	—	—	1
Коефіцієнт тертя	—	—	—	—	+	+	—	—	—	—	2
Радіус валків	—	—	—	—	+	—	—	—	—	—	1
Розташування армуючої фази	—	—	—	—	—	—	+	+	+	—	3
Кількість проходів	—	—	—	—	+	—	—	—	—	—	1

Результати дослідження щодо з'єднання прокаткою двошарових (алюміній - алюміній) і тришарових (алюміній - сталь - алюміній) композицій описані в [68]. Показано, що швидкість деформації під час прокатки істотно не впливає на механічні властивості композиту. Основні параметри: контактний тиск, температура і деформація.

Отже, можна зробити висновок, що на процес з'єднання при гарячій прокатці найбільш впливає температура прокатки, відносна деформація, швидкість деформації, фактор форми осередку деформації.

1.3 Стан питання щодо дослідження процесу виготовлення шаруватих армованих алюмінієвих штаб

Вчені приділяють значну увагу вивченню прокатки алюмінієвих композитів, алюмінієвих композитів з дротом всередині [69] та алюмінієвих композитів з сталевими листами. Автори [70] дослідили процес з'єднання при прокатці композиту, що складається з алюмінієвих листів та сталюого листа всередині, а також вплив поверхні при підготовці композиту, температуру підігріву перед прокаткою композиту та вплив умов охолодження композиту на з'єднання шарів, які аналізували за допомогою випробувань на зсув та випробувань на зворотній вигін. Окрім знежирення поверхні використовувалися матеріал покриття. Дослідники підтвердили випробуванням на розрив, що при застосуванні покриття показники міцності більш високі. Але яке покриття застосовувалося, залишилося невисвітленим.

В дослідженні [71] було з'ясовано, що з'єднання алюмінієвого композиту з алюмінієвими дротами всередині відбувається при ступені деформації 35% та вище.

У патенті Сполучених Штатів [72] описуються способи виготовлення металевих композитного матеріалу, який включає в себе складання щонайменше двох штаб матричних шарів відносно низькоміцних металів та одного або декількох підкріплень у вигляді дроту. Цей метод включає в себе:

- а) розміщення алюмінієвого листа з металевою обгорткою між двома додатковими алюмінієвими листами та прокаткою його при 400-450 °С;
- б) гарячу прокатку листів з дротами, розташованими діагонально між двома листами алюмінієвого сплаву;
- в) гаряча прокатка багатошарового композиту з переплєтених альтернативних шарів матриці, дротів з нержавіючої сталі та алюмінієвих дротів;
- г) огортання дротів алюмінієвим розпиленням і прокатка між листами м'якої матриці.

Окрім виробничих методів, в цьому патенті також представлені результати механічних випробувань та досліджень витривалості отриманих композитів. Вони показують, що всі композити мали підвищену витривалість, особливо з діагонально розміщеною арматурою. Проте в деяких експериментах прокатані композити показали знижений рівень міцності та пластичності порівняно з прокатаними штабами без армування. У дослідженні [73] параметри деформації прокатки та стиснення дротів поперечного перерізу залишаються нерозкритими.

В патенті [74] описуються елементи технології армуванням сталевим дротом алюмінієвої матриці під час прокатки (рис. 1.5). Методологія починається з утворення напівкруглих поздовжніх канавок на поверхні алюмінієвої матриці. Потім сталевий дріт поміщається в пази обох матриць і прокатується. Реалізація цих методів дозволяє уникнути значного навантаження як в матриці, так і в дротах сітки. Проте, ця технологія з додатковою операцією виробництва пазів зменшує зчеплення в них та ускладнює технологічний процес.

У патенті [74] описано ще один спосіб армування, який полягає у складанні та наступній прокатці поперечно-канавкової алюмінієвої матриці з подовженими сталевими дротами. Ця технологія з невеликим ступенями деформації при прокатці забезпечує вищий контактний тиск між матрицею та армуючою фазою, а також між матричними шарами. Однак його недоліком є висока вірогідність пористої зовнішності всередині готового композиту. Автори стверджують, що така пористість може бути усунута після подальших процесів деформації. Обидві технології, описані вище, вимагають відповідності між діаметром дроту та

діаметром канавки для кожного шару матеріалу, а також визначення температурних умов процесу деформації.

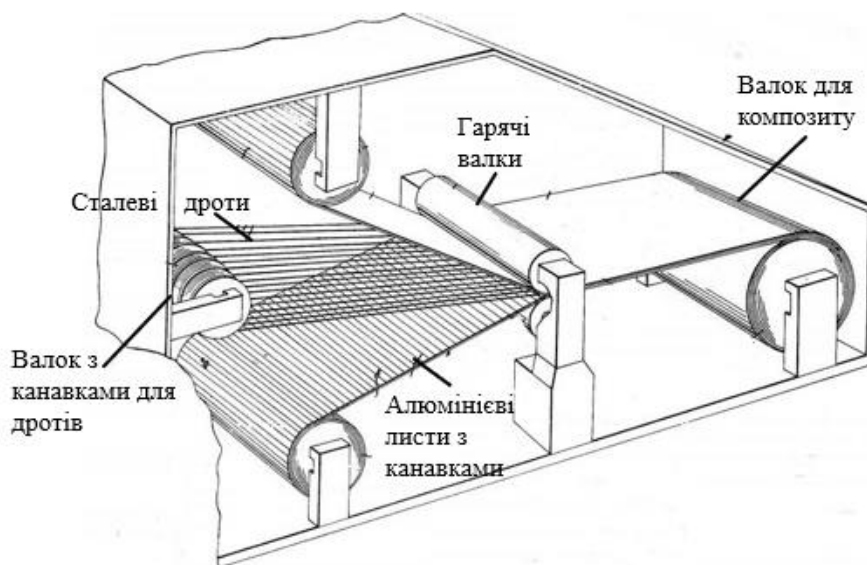


Рис.1.5. Пристрій для отримання композиту методом гарячої прокатки з канавками на алюмінієвому листі, описаний в патенті [74]

При цьому методі виробництва композитів з'єднання шарів здійснюється шляхом гарячої прокатки, температура прокатки 400 - 450 °С, частина дротів становить 1-20% від обсягу композиту.

У більшості випадків для досягнення міцного зчеплення між матеріалами для обшивки необхідно подолати порогове значення ступеня деформації під час прокатки. Проте негативний ефект локальних пошкоджень у матричному матеріалі спостерігався при виробництві композитів м'яких та твердих матеріалів при високих ступенях деформації шляхом з'єднання прокаткою [75-77] та пресуванням [78]. Достатнє з'єднання прокаткою при порівняно низьких ступенях деформації може бути досягнуте при високотемпературних процесах, таких як валковий розлив-прокатки. Реалізація цієї енергозберігаючої технології для плоских алюмінієвих та сталевих сплавів дозволяє одержати тонкий та рівномірний шар приповерхневих фаз на поверхні матеріалів товщиною приблизно 3 мкм з адгезійною міцністю більше 70 МПа [49]. Більш того, хороша

холодна формуємість при розливі та, відповідно, гарячекатана плакована штаба з чистого алюмінію та аустенітної сталі показана в [50].

Незначна кількість відомих досліджень присвячена технологіям розливки, зокрема двовалкового розливу-прокатки, для виготовлення алюмінієвих матричних композитів, посилені дротами та сіткою та оцінки їх властивостей (рис.1.6).

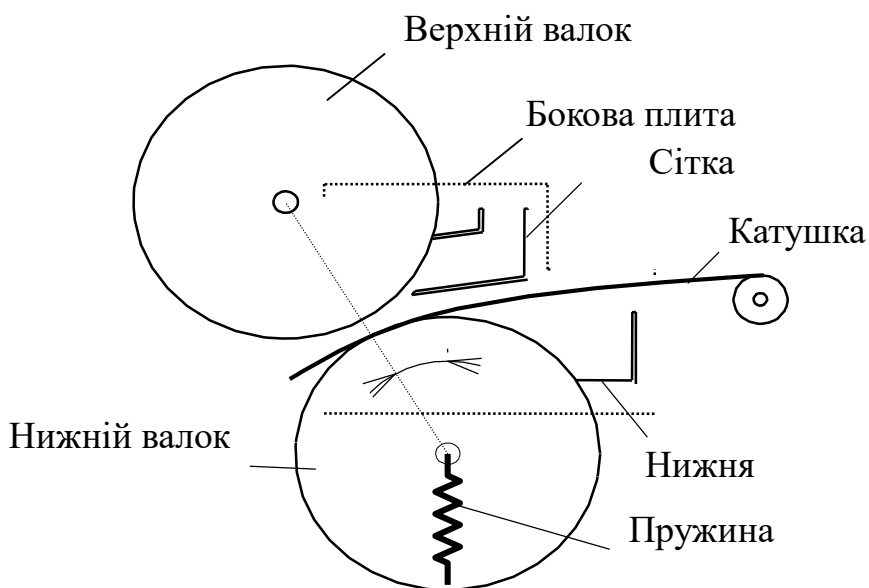


Рис.1.6. Пристрій для отримання композиту методом валкового розливу-прокати [51]

Деякі аналізи деформації поздовжніх та поперечних дротів сітки у складі композиту з подвійним валком після подальшої прокатки були зроблені Нага та ін. [79]. Результати експерименту показують, що під час прокатки перетин дроту змінюється двома способами: овалізація (сплощення) та розтягування. Набір цих деформацій залежить від положення дроту в композиції, а також від параметрів деформації під час прокатки [65].

Хоча армування високоміцним матеріалом дозволяє досягти значного збільшення механічних властивостей композиту, його часткове руйнування при виробництві може зіпсувати властивості готового продукту [62, 80]. Це також наголошує на важливості моніторингу параметрів деформації під час прокатки композиту.

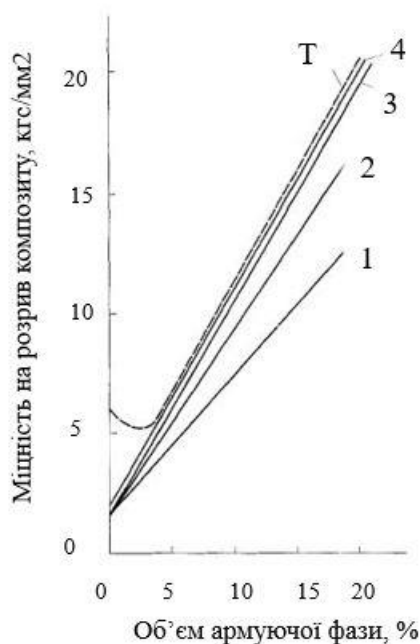
Таким чином, нинішній рівень досліджень показує, що параметри деформацій з'єднання прокаткою в певному діапазоні можуть збільшити властивості композиту. Встановлення діапазону цього впливу необхідне для розуміння того, як параметри прокатки впливають на деформацію армуючої фази і як вони впливають на властивості композиту. Хоча параметри, що впливають на з'єднання плоских виробів та їх діапазону, досить добре висвітлені в літературі, кількісні дані про параметри деформації армуючої фази при з'єднанні прокаткою армованих штаб є обмеженими.

1.4 Метод розрахунку впливу кількості армуючої фази у складі композиту на властивості всього композиту

Автори Heinrich W, Nixdorf J. [81] досліджували криві напруження та деформовані стани армуючих волокон та матриці. На основі досліджень були отримані залежності межі міцності всього композиту від об'єму армуючої фази (рис. 1.7). З'ясовано, що невеликий відсоток армуючої фази може поглинати лише невелику кількість напружень, що діють на композит. З іншого боку, вони призводять до зменшення об'єму поперечного перерізу матриці. Тому необхідно збільшити частку об'єму волокна до того моменту, коли в композиті виникне ефект зміцнення. Залежність міцності на розрив від кількості армуючої фази в площі поперечного перерізу композиту зображений на рис. 1.7.

Ця крива свідчить про те, що до 5 % армуючої фази не відбувається збільшення міцності композиту. Зі зростанням частки армуючої частки в складі композиту до 5% відбувається зменшення міцності, а потім зростання міцності до рівню базового матеріалу. Тобто початковий рівень міцності композиту досягається при 7% армуючої фази в складі композиту. При цьому постає питання ваги композиту, оскільки сталевий дріт має питому вагу в 2,9 рази більшу, ніж питома вага алюмінію. Дослідження в рамках цієї дисертаційної роботи проведено в діапазоні частки армуючої фази в композиті до 5%, де вважається, що не повинно бути покращення механічних властивостей. Ідеєю роботи було

отримати покращення механічних властивостей, хоча б не значне саме в умовах цього так званого «мікро-армування».



Т – Теоретична крива; 4 - L/D=400; 3 - L/D=200; 2 - L/D=100; 1- L/D=50

Рис.1.7. Міцність алюмінію з сталевими дротами всередині з різним відношенням довжини (L) до діаметру(D) [80]

Автори роботи [81] зробили висновок, що при виробництві композиційних армованих матеріалів слід надавати перевагу процесам, які гарантують рівномірне розподілення армуючої фази по всьому поперечному перерізу композиту.

На основі досліджень авторами запропоновано метод калькуляції розрахункової межі міцності, що визначений пропорційно до частини композитного поперечного перерізу, заповненого сталевими дротами з урахуванням розрахункової міцності дроту σ_f , за формулою:

$$\sigma_{fm} = (\eta)\sigma_f \frac{V_f}{V_{fm}} + \sigma_m \left(1 - \frac{V_f}{V_{fm}}\right), \quad (1.1)$$

де відповідно до [81]:

σ_{fm} – межа міцності композиту;

η – ступінь деформації існуючий в діапазоні 1-0,5;

σ_f - межа міцності армування композиту;

V_f - об'єм армування композиту- дроту;

V_{fm} –об'єм композиту;

σ_m - межа міцності матриці;

Даний метод калькуляції розрахункової межі міцності взятий за основу під час порівняння експериментальної межі міцності з розрахунковою межею міцності прокатаних армованих алюмінієвих композитів.

Розвитку застосування сітки в якості армуючої фази в композитах, що отримуються прокаткою, 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, витяжки та овалізацією її дротів зі зміною механічних властивостей композиту, зокрема здатністю до поглинання енергії удару. Тому робота, спрямована на вирішення науково-технічної задачі розробки основ технології отримання двошарового алюмінієвого композиту, армованого сталеву сіткою способом гарячої прокатки за рахунок дослідження параметрів деформації ґратки сітки, витяжки та овалізації її дротів, а також впливу цих параметрів на механічні властивості отриманого композиту, є актуальною.

1.5. Висновки по розділу 1.

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 ударної в'язкості для вирішення сучасних проблем будівництва, машинобудування. Зроблений аналіз досягнень в області інженерії та нових матеріалів. Розглянуті існуючі методи армування композитних матеріалів, їх переваги та недоліки. Серед методів армування керамікою, наночастками, гібридними компонентами, перевага надається армуванню металами.

2. Проведений огляд сучасних методів отримання композитних матеріалів, визначені їх сильні та слабкі сторони. Серед проаналізованих методів, таких як зварювання плавленням, зварювання вибухом, дифузійне зварювання під тиском, дифузійне зварювання в вакуумі, метод прокатки в вакуумі, екструзія, волочіння, валковий розлив-прокатки, порошкова металургія обрано метод з'єднання композитів обробкою тиском, шляхом прокатки.

3. Досліджено процес прокатки алюмінієвих штаб, та визначені його параметри, що впливають на з'єднання алюмінієвих штаб при прокатці, такі як температура прокатки, товщина штаб матриці, ступінь деформації, підготовка поверхні, наявність та режим подальшої термічної обробки, швидкість валків, коефіцієнт тертя, радіус валка, розташування армуючої фази.

4. Проаналізована інформація про параметри прокатки алюмінієвих штаб та армування алюмінію є підґрунтям для подальшого дослідження процесу армування та з'єднання алюмінієвих штаб методом гарячої прокатки. Аналіз відомих технологій отримання композитів прокаткою на основі алюмінієвої матриці показав, що основні параметри, які впливають на процес це: температура прокатки, ступінь деформації і температура нагріву перед прокаткою. Оптимальний температурний діапазон для прокатки алюмінієвих штаб – 450-500°C, мінімальний ступінь деформації та температура, при якій відбувається з'єднання алюмінієвих штаб, – 30% та 200°C.

5. Кількісні дані про зменшення поперечного перерізу дроту під час з'єднання прокаткою композитних матеріалів з алюмінієвої матрицею армованих сіткою та параметри деформації армуючої фази в складі композиту залишилися нез'ясованими. Крім того, у досліджених джерелах бракує відомостей про вплив змін армуючої фази в поперечному перетині композиту на міцність композиту при випробуваннях на розрив та випробуваннях на удар.

Виходячи з наведеного, сформульовані мета та задачі досліджень.

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

Для досягнення поставленої мети в роботі поставлені наступні задачі:

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-елементному 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 композитів, прокатаних при різних ступенях деформації;
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.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Методика проведення експериментальних досліджень гарячої прокатки армованих алюмінієвих композитів

Для вирішення поставлених в розділі 1 задач необхідно провести експериментальні дослідження гарячої прокатки армованих алюмінієвих композитів.

Застосування прокатки для отримання зміцненого матеріалу на основі алюмінієвих сплавів є однією з цікавих ідей отримання композиційного матеріалу з поєднанням властивостей матеріалів композиту. Якість отриманих штаб композиційного матеріалу можна перевірити спираючись на ДСТУ ISO 6361-2:2007 «Алюміній і алюмінієві сплави здеформовані. Листи, штаби та плити. Частина 2. Механічні властивості» [82].

Під час проведення експериментальних досліджень використовувалися сплави EN AW-6063, EN AW-5056 та EN AW-5083, хімічний склад яких наведений в таблиці 2.1, згідно стандарту DIN EN 573-3 [83].

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сплаву алюмінію в матриці, що використовувався при проведенні досліджень

Значення сплаву	Хімічний склад, %									
	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Інші	Решта
EN AW-6063 / АД31	<0,35	0,20- 0,6	<0,1	<0,1	0,45- 0,9	<0,1	<0,1	-	<0,05	Al
EN AW-5056 / АМг6	0,4<	0,3<	<0,1	0,05- 0,2	4,5- 5,6	<0,1	-	0,05- 0,2	<0,05	Al
EN AW-5083 / АМг5	0,4<	0,4<	<0,1	0,4-1	4-4,9	<0,25	<0,15	0,05- 0,25	<0,05	Al

Фізичні властивості сплаву EN AW-6063: щільність алюмінієвого сплаву – 2660 кг/м^3 , теплопровідність матеріалу – $151 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, питома теплоємність металу – $880 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$.

Фізичні властивості сплаву EN AW-5056: щільність – 2700 кг/м^3 , теплопровідність матеріалу – $150 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, питома теплоємність металу – $910 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ [84].

Фізичні властивості сплаву EN AW-5083: щільність алюмінієвого сплаву – 2660 кг/м^3 , теплопровідність матеріалу – $100\text{-}150 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, питома теплоємність металу – $900 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$.

Сплав EN AW-6063 характеризується високими пластичними властивостями в температурно - швидкісних умов обробки тиском і підвищеною корозійною стійкістю, яка практично не знижується при з'єднанні.

Сплави EN AW-5056 та EN AW-5083 мають високий вміст магнію, що позитивним чином позначається на міцності і твердості виробів з цього матеріалу, і вони добре піддаються обробці різанням.

Сплави EN AW-5056 та EN AW-5083 показують схожі фізичні властивості та хімічний склад, та по своїм характеристикам вони є деформаційно-зміцнюваними, що підходять до композиту матриці.

В якості армуючої складової композиту взято сітку марки сталі 1.4301 (аналог X18H9). Ця сталь характеризується здатністю до деформування та аустенітної структурою, що дозволяє здійснювати глибоку витяжку без проміжного відпалу.

Відмінна корозійна стійкість в різних агресивних середовищах є додатковою перевагою цієї марки сталі.

Криві зміцнення сталі – аналога тієї, що використовувалася, X18H10T при різних температурах прокатки наведені на рис. 2.1 [85].

Початкові механічні властивості матеріалу сітки: межа міцності $\sigma_b = 540 \text{ МПа}$; межа плинності $\sigma_{0,2} = 230 \text{ МПа}$; відносне подовження $\delta_5 = 45\%$.

Практична реалізація експерименту була проведена на базі лабораторії кафедри обробки металів тиском Національної металургійної академії України та на базі лабораторії Кафедри Матеріалознавства Університету Падерборну (ФРН).

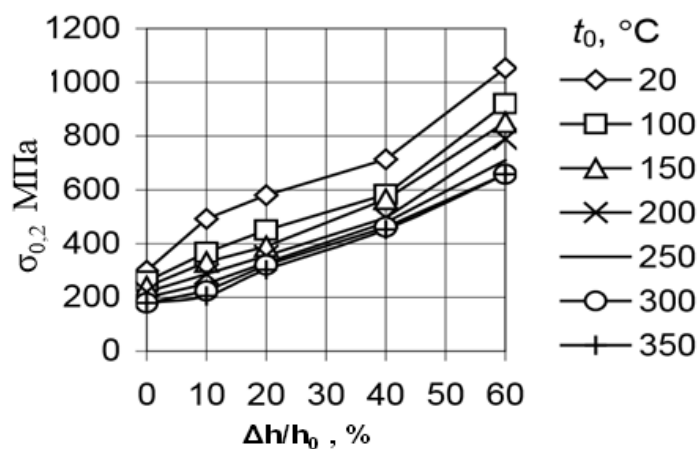


Рис.2.1. Криві зміцнення сталі X18H10T при різних деформаційних та температурних режимах [85]

На базі лабораторії кафедри обробки металів тиском Національної металургійної академії України використовували прокатний стан 180 (рис. 2.2). Він має наступні характеристики: діаметр валків становить 250 мм, кліть закритого типу, швидкість стану – 23,55 м/хв.



Рис. 2.2. Прокатний стан 180 кафедри ОМТ НМетАУ

У лабораторії кафедри Матеріалознавства університету Падерборну використовували для прокатки стан 210. Діаметр валків становить 210 мм, довжина бочки валка 300 мм, зазор між валками може бути контрольованим від 0 до 25мм. Стан обладнаний двома двигунами з окремими приводними валками з незалежною настройкою швидкості та потужністю 11 кВт кожний. Це дає можливість проводити асиметричну чи симетричну прокатку. Також стан обладнаний системою гідравлічного контролю попереднього натиску системи валків (рис. 2.3). Швидкість валків під час експерименту - 23,5 м/хв.



Рис. 2.3. Прокатний стан 210 кафедри Матеріалознавства Університету Падерборн (ФРН)

Для нагріву зразків перед прокаткою використовували піч з максимальною температурою нагріву 1280 °С, що має тристоронній обігрів з обох боків і дна печі (рис. 2.4). Для подальшої термічної обробки зразків використовували, в разі потреби, цю ж саму піч.



Рис. 2.4. Нагрівальна піч для нагріву зразків перед прокаткою

Підготовка зразків для проведення випробувань проводилась за допомогою спеціальних агрегатів і машин. Для різання пакетів на мірні довжини використовували машину «Cuto 20» з диском для нарізки діаметром 254 мм та потужністю в 2.2 кВт (рис. 2.5).

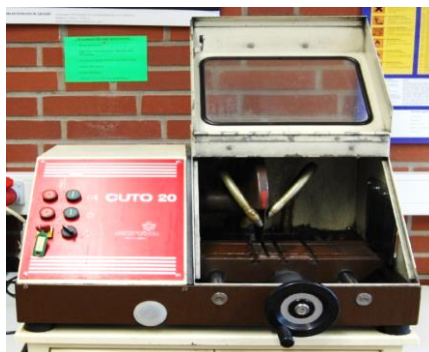


Рис. 2.5. Машина для різання «Cuto 20»

Для аналізу мікроструктури поперечного перерізу зразків прокатаних композитів використовували шліфувальну машину «Saphir 320» з діаметром робочої поверхні 200-250 мм та зі швидкість від 60 до 200 об/хв (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Шліфувальна машина «Saphir 320»

Для аналізу з'єднання матриці композиту та армуючих дротів робили зріз зразка композиту та використовували світловий мікроскоп Keyence VHX5000 (Рис 2.7).

Для проведення експериментальних досліджень гарячої прокатки армованих алюмінієвих композитів в якості заготовки використовували дві штаби та сітку з'єднані між собою алюмінієвими заклепками.



Рис. 2.7. Світловий мікроскоп Keyence VHX5000

Експерименти проводились в два етапи: перший з алюмінієвими штабами з мірними довжинами: висота 3 мм, ширина 36 мм, довжина 120 мм (рис. 2.8), та висота 4 мм, ширина 36 мм, довжина 120 мм; другий – з мірними довжинами: висота - 3,1 мм, ширина – 120 мм, довжина – 240 мм.

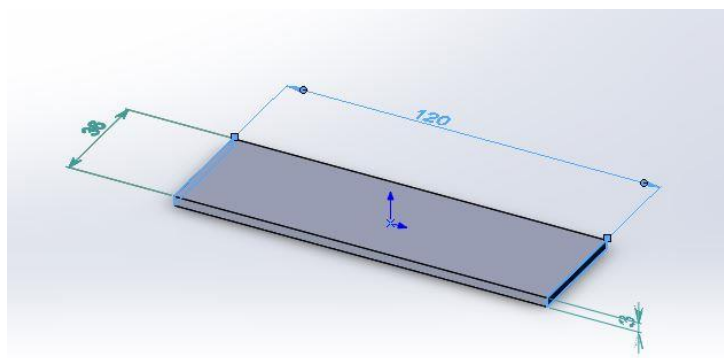


Рис. 2.8. Розміри алюмінієвої штаби

Для з'єднання пакету в кожній штабі висвердлювались два отвори. Потім зразки знежирювали. Після цього з'єднували пакет: алюмінієва штаба – сталева сітка – алюмінієва штаба та скріплювали за допомогою заклепок. Таким чином були з'єднані усі зразки.

З'єднувались пакети різних типів з різними матеріалами матриці і різними сітками, також з різним положенням сітки відносно напрямку прокатки.

Загальна схема проведення експерименту зображена на рис. 2.9.

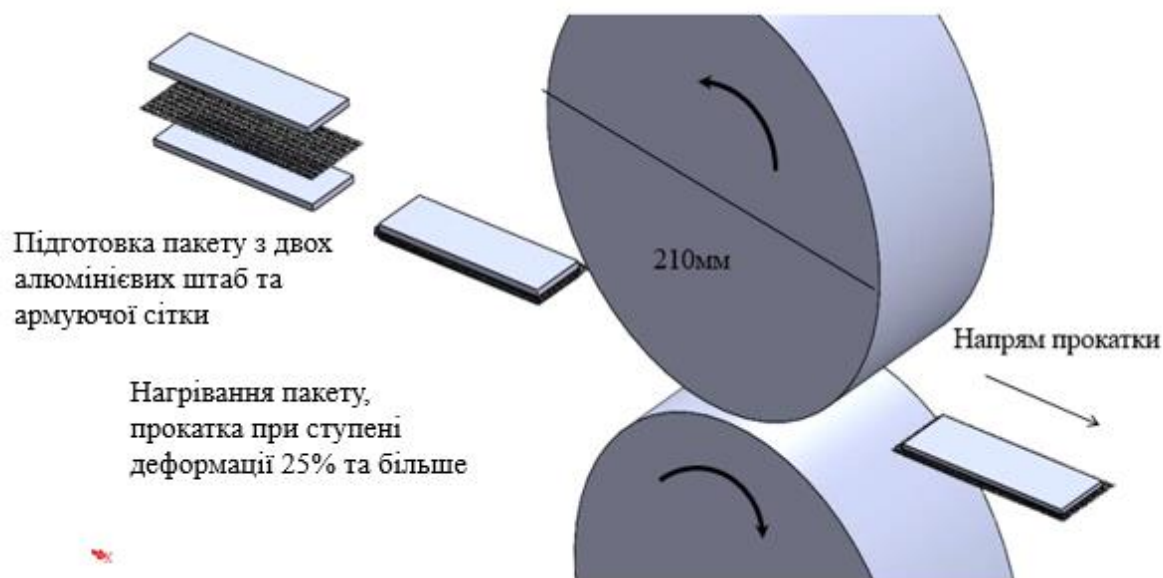


Рис. 2.9. Схема проведення процесу прокатки алюмінієвих штаб, армованих сталевую сіткою

Прокатки проводилася при ступенях деформації 25 % та більше. Загальна схема та план проведення експерименту з дослідження впливу розташування армуючої складової до напрямку прокатки на з'єднання шарів композиту та його механічні властивості детально описані в наступному підрозділі.

2.2 План дослідження впливу розташування сітки на з'єднання шарів композиту та його механічні властивості

Для досягнення мети роботи, були проведені експериментальні дослідження з прокатки двох алюмінієвих штаб, армованих сталевую сіткою з нержавіючої сталі. В якості матеріалу матриці композиту використовувались наступні алюмінієві сплави у вигляді тонких штаб:

1) АМг6 або аналог EN AW-5056 (система Al-Mg) в відпаленому стані, розміри зразків ($h \times b \times l$): $4 \times 36 \times 120$ мм. Цей сплав обраний, оскільки він зміцнюється пластичною деформацією.

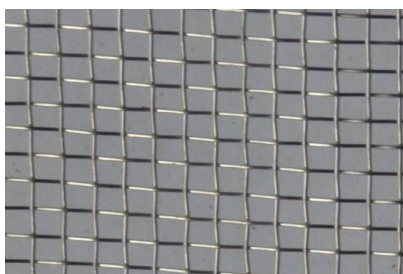
2) АД31 або аналог EN AW-6063 (система Al-Mg-Si) у відпаленому стані; розміри зразків: ($h \times b \times l$) $3 \times 36 \times 120$ мм. Цей сплав обраний, оскільки він зміцнюється термічною обробкою.

3) АМг5 або аналог EN AW-5083 (система Al-Mg) у відпаленому стані; розміри зразків: ($h \times b \times l$) $3,1 \times 120 \times 240$ мм. Цей сплав обраний, оскільки він зміцнюється пластичною деформацією. Використовувався при другому етапі експериментів.

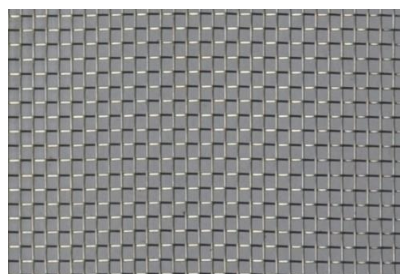
Два типи плетених сіток, дроти якої розташовані під кутом 90° , із нержавіючої сталі EN 1.4301 використовувалися як армуючий матеріал:

Перший тип «А» - діаметр дротяної сітки: 0,5 мм; розмір квадратної ґратки сітки 3×3 мм;

Другий тип «В» - діаметр дротяної сітки: 0,25 мм; розмір квадратної ґратки сітки 1×1 мм (рис. 2.10).



а)



б)

Рис. 2.10. Сітка, що застосована при дослідженні: а) розмір 3×3 мм, б) розмір 1×1 мм.

Третій тип «С» - діаметр дротяної сітки: 0,5 мм; розмір квадратної ґратки сітки 1×1 мм. Цей тип сітки був використаний для другого етапу експерименту.

Для кожної з перших 2-х пар матеріалу, для подальшого проведення експерименту (рис. 2.11) були підготовлені три типи заготовок, попередньо закріплених у кутах алюмінієвими заклепками.

1) «Тип 90» – дротяна сітка, орієнтована вздовж і перпендикулярно напрямку прокатки.

2) «Тип 45» – дротяна сітка, орієнтована під кутом 45° (діагонально) до напрямку прокатки.

3) «Тип 0» – дві штаби без армуючої складової.

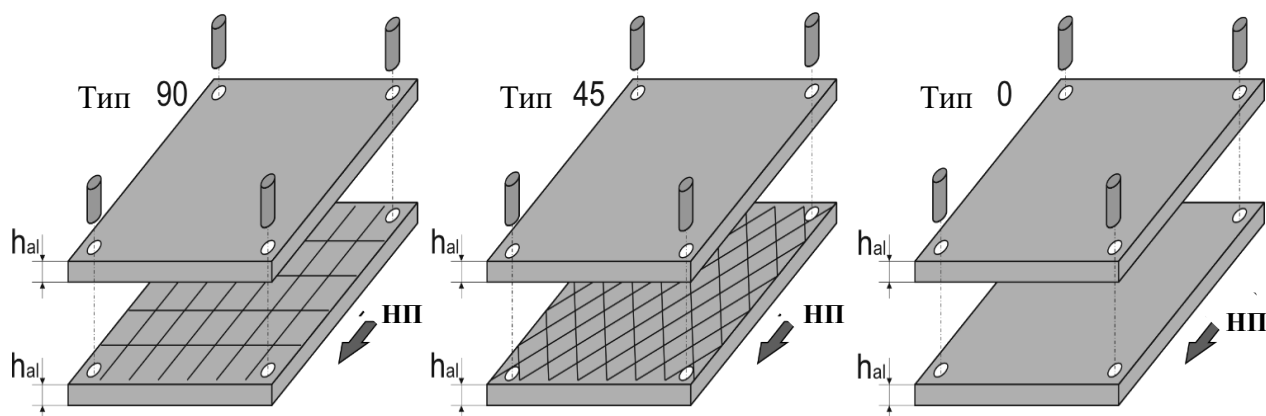


Рис. 2.11. Схема підготовки пакетів з двох алюмінієвих штаб та армуючої сітки до експериментів: НП - напрям прокатки, h_{al} - початкова товщина алюмінієвої штаби

Прокатка у цій серії експериментів була проведена в один чи два проходи (рис. 2.12) з попереднім нагрівом до температури прокатки (табл. 2.3).

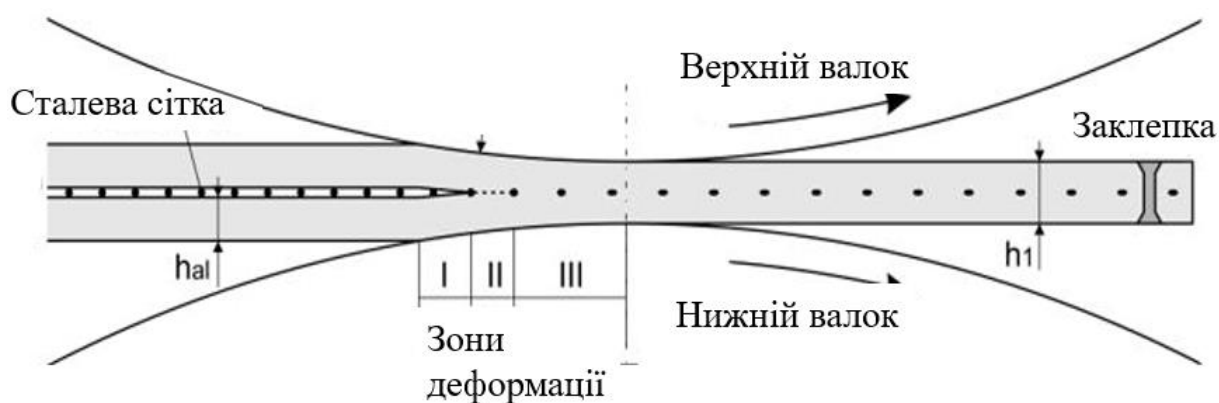


Рис. 2.12. Схема процесу прокатки армованих сіткою композитів: h_{al} - товщина однієї алюмінієвої штаби, h_1 - товщина композиту після прокатки. Зона I - стискання сітки та її наближення до штаб алюмінію; зона II – початок з'єднання складових композиту; зона III - деформація всього композиту

Для забезпечення повторюваності експериментів на кожному наборі параметрів було прокатано два однакові зразки. Загальний план експерименту та параметри з'єднання алюмінієвих штаб шляхом гарячої прокатки зі сталевією сіткою представлений в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Експерименти зі з'єднання композиту з алюмінієвої матриці та сталевієї сітки шляхом гарячої прокатки:

- експеримент проводився, – експеримент не проводився

Характеристика		Сплав матриці	
		EN AW-5056	EN AW-6063
Зразки	сітка типу А	●	●
	сітка типу В	●	●
	композит «Тип 90»	●	●
	композит «Тип 45»	●	●
	штаби без армування «Тип 0»	●	●
Процес	ступінь деформації 30% за один прохід, температура прокатки 200 °С, стан 180	-	●
	ступінь деформації 30% за один прохід, температура прокатки 500 °С, стан 180	●	-
	ступінь деформації 60%, за два проходи та проміжне попереднє нагрівання, температура прокатки 500 °С, стан 210	-	●
Випробування	вимірювання деформації дроту	●	●
	випробування на розтягування в поздовжньому напрямку	●	●

Температура прокатки 500 °С була вибрана як значення, що широко використовується на практиці. З іншого боку, 200 °С і 30% деформації - нижня точка, що передбачена для можливого з'єднання з точки зору деформації та

температури [64]. Ці дані були використані при проведенні досліджень прокатки алюмінієво- сталевих композитів [86].

В дослідженні [71] встановлено, що при 30% деформації не відбувається з'єднання алюмінієвих шарів з алюмінієвими дротами всередині, а при 35% деформації при 500°C таке з'єднання вже є.

В другій серії експериментальних досліджень, з метою визначення впливу параметрів деформації на деформацію армуючої фази всередині композиту, нижню межу обрано 25% умовного відносного обтиснення при прокатці.

Після з'єднання матеріалів, поперечні перерізи прокатаних армованих штаб у поздовжній та поперечній площинах (до напрямку прокатки) були досліджені для аналізу положення та форми дроту сітки в матеріалі матриці. Поперечні перерізи були підготовлені за допомогою абразивної машини та наступного шліфування наждачним папером до 4000 розміру зерна. Форму та положення дротів у поперечному перерізі аналізували та вимірювали за допомогою цифрового мікроскопа Keyence VHX5000.

Для того, щоб проаналізувати деформацію сітки по довжині і ширині зразка, один із матричних шарів після прокатки було видалено. Один з алюмінієвих шарів було знято за допомогою шліфувальної машини та потім хімічно видалено з використанням 5% -ного розчину NaOH, поки сітку стало видно. Механічне та хімічне видалення одного з матричних шарів показало, що ґратка сітки всередині пакету композиту деформується нерівномірно. Фотографії сітки всередині композиту були зроблені за допомогою цифрового мікроскопу Keyence VHX5000.

2.3 Методика розрахунку параметрів деформації та овалізації сітки у складі композиту

Для розрахунку параметрів деформації композиту та сітки у складі композиту були використані позначення, наведені в таблиці 2.3, та запропоновано метод розрахунку параметрів деформації сітки при прокатці між двох алюмінієвих штаб [87].

Таблиця 2.3 – Перелік основних символів, що використовуються при розрахунках параметрів деформації

Параметр	Опис
1	2
i	індекс; початковий (0) або після процесу прокатки (1) ;
L	індекс; проекція поздовжнього дроту на поперечній площині;
T	індекс; проекція поперечного дроту на поздовжній площині;
90	індекс; композит «Тип 90»;
45	індекс; композит «Тип 45»;
h_{Al}	товщина алюмінієвої матриці;
$h_{i\Sigma}$	товщина композиту;
$b_{i\Sigma}$	ширина композиту;
h_{iw}	виміряна на площині висота дроту, що спочатку дорівнює її діаметру;
b_{iw}	виміряна на площині ширина дроту;
μ_{Σ}	коефіцієнт витяжки всього композиту;
μ_{iw}	коефіцієнт витяжки дроту;
F_{iw}	площа поперечного перерізу дроту;
φ	кут між дротом та вісями прокатки;
O_w	овалізація дроту;
α	кут ґратки сітки;
A_w	частина композитного перерізу, заповнена дротами після прокатки;
μ_c	видовження ґратки сітки;
5056-A-90-30	приклад шифру експерименту: це означає: (5056) марка сплаву матриці (за стандартом DIN EN 573-3) - (A) тип сітки - (90) тип композиту - (30) номінальний ступінь деформації при прокатці;
e_h, e_b, e_l	справжня логарифмічна деформація по висоті, ширині та довжині зразка, відповідно.

Для визначення деформації дроту всередині прокатаного пакету «Тип 90» розташування шарів композиту та дротів сітки всередині композиту до (рис. 2.13а) та після (рис.2.13б) прокатки відносно напрямку прокатки візуалізовано на рис 2.14.

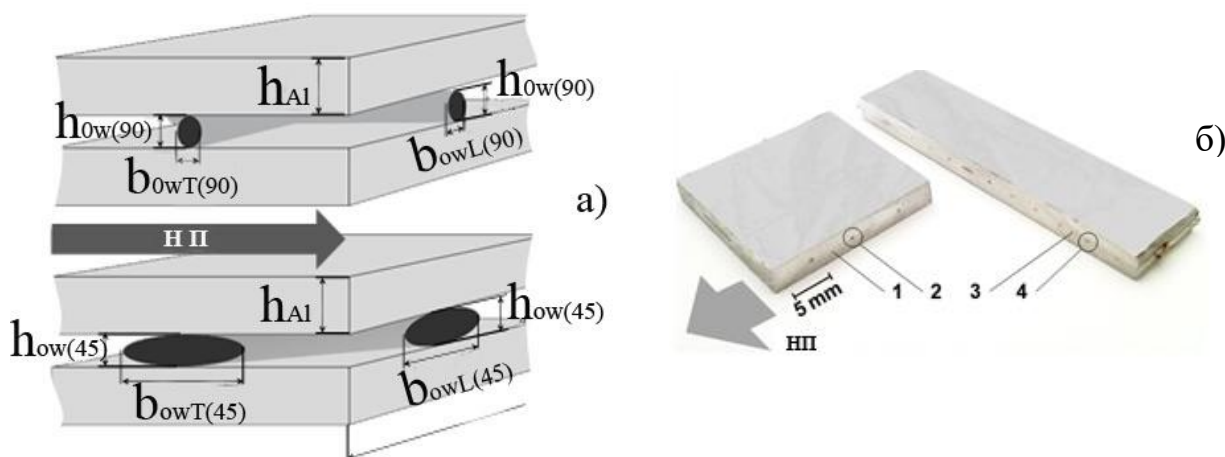


Рис. 2.13. Схема оцінки витяжки та овалізації сітки прокатаних композитах а) композити «Тип 90» і «Тип 45» перед прокаткою; б) композит «Тип 90» після прокатки; НП - напрямок прокатки; 1 - поздовжня площина поперечного перерізу композиту (L); 2 - проекція поперечного дроту на поздовжній площині; 3 - поперечна площина поперечного перерізу композиту (T); 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 (2.1):

$$h_{0\Sigma} = 2h_{Al}. \quad (2.1)$$

Коефіцієнт витяжки всього композиту μ_Σ визначено як співвідношення (2.2) поперечного перерізу композиту до ($h_{0\Sigma} \times b_{0\Sigma}$) та після прокатки ($h_{1\Sigma} \times b_{1\Sigma}$):

$$\mu_\Sigma = (h_{0\Sigma} \times b_{0\Sigma}) / (h_{1\Sigma} \times b_{1\Sigma}). \quad (2.2)$$

Поздовжній $\mu_{wL(90)}$ і поперечний $\mu_{wT(90)}$ коефіцієнти витяжки дроту композитів «Тип 90» розраховано як співвідношення (2.3) і (2.4) 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.

$$\mu_{wL(90)} = F_{0wL(90)} / F_{1wL(90)}, \quad (2.3)$$

$$\mu_{wT(90)} = F_{0wT(90)} / F_{1wT(90)}, \quad (2.4)$$

де:

$$F_{0w} = \pi(h_{0w(90)} / 2)^2;$$

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

Коефіцієнт витяжки дротів $\mu_{w(45)}$ у складі композиту визначався як (2.5). Для розрахунків використовувались проекції середніх площин дротів ($F_{0w(45)} / F_{1w(45)}$) на поперечну площину композиту, що прилягає до кута φ між дротом та вісями прокатки:

$$\mu_{w(45)} = F_{0w(45)} / F_{1w(45)}, \quad (2.5)$$

де відповідно:

$$F_{iw(45)} = (F_{iwL(45)} + F_{iwT(45)})/2;$$

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

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

Овалізацію $O_{w(90)}$ поздовжніх та поперечних дротів у композиті «Тип 90» після прокатки розраховано окремо як співвідношення (2.6) між шириною ($b_{1w(90)}$) і висотою дроту ($h_{1w(90)}$) після прокатки:

$$O_{w(90)} = b_{1w(90)} / h_{1w(90)}. \quad (2.6)$$

Овалізація дротів у складі композиту «Тип 45» була визначена як середнє значення (2.7), прилеглого до кута φ відношення ($b_{1w(45)}/h_{1w(45)}$):

$$O_{w(45)} = (O_{wL(45)} + O_{wT(45)})/2, \quad (2.7)$$

$$\text{де } O_{wL(45)} = (b_{wL(45)}/h_{wL(45)})\sin\varphi;$$

$$O_{wT(45)} = (b_{wT(45)}/h_{wT(45)})\sin(90 - \varphi).$$

Частина поперечного перерізу композиту, що заповнена дротами, розраховувалась як відношення суми площ проекції дротів до площі перерізу композиту. Кількість вимірюваних дротів становило 5...12 для поздовжніх і 3...7 для поперечної площини композиту.

У складі композиту «Тип 45» - коефіцієнт видовження ґратки не пропорційний коефіцієнту витяжки. Вони пов'язані між собою через зміну кута ґратки. Коефіцієнт видовження ґратки μ_c може бути визначений відповідно до схеми, представленої на Рис.2.14.

Згідно з рис.2.14., $c_1 = c_0 \times \mu_{w(45)}$. Довжину діагоналі d_1 можна обчислити, використовуючи довжину c_1 краю та кут α_1 , який вимірюється після травлення. Видовження ґратки сітки μ_c дорівнює відношенню d_1/d_0 .

Оскільки локальна деформація в перехрестях дроту зменшується під час розрахунків, коефіцієнт видовження ґратки сітки переоцінений до 5-8%.

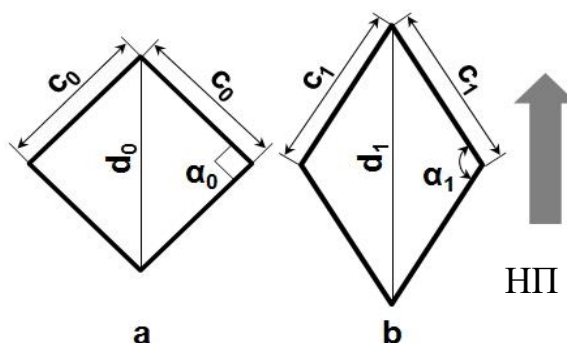


Рис. 2.14. Схема для розрахунку коефіцієнту видовження ґратки сітки для композитів «Тип 45»: а) ґратка сітки перед прокатою; б) ґратка сітки після прокатки; c_0 , d_0 та α_0 - відповідно вихідна довжина краю, довжина діагоналі і кут ґратки; c_1 , d_1 та α_1 - відповідно, довжина краю, довжина діагоналі і кут ґратки після прокатки.

2.4 Методика проведення досліджень механічних властивостей армованих композитів

Наступним етапом при проведенні досліджень був аналіз механічних властивостей армованих композитів. Механічні випробування на розтягування

здійснювалися у відповідності до стандарту EN ISO 6892-1: 2017 при кімнатній температурі[88].

Зразки для одновісного випробування на розтягування були взяті з композиту після прокатки без термічної обробки, вздовж напрямку прокатки. Зразки, зображені на рисунку 2.15, з шириною обробленої частини 12,5 мм та шириною кінців для затисків машини, що дорівнюють 18 мм, відбирали з прокатаних армованих штаб після кожної прокатки.

Випробування на розтягування проводився на універсальному гідравлічному агрегаті MTS Landmark 250 з використанням швидкості 4 мм/хв.

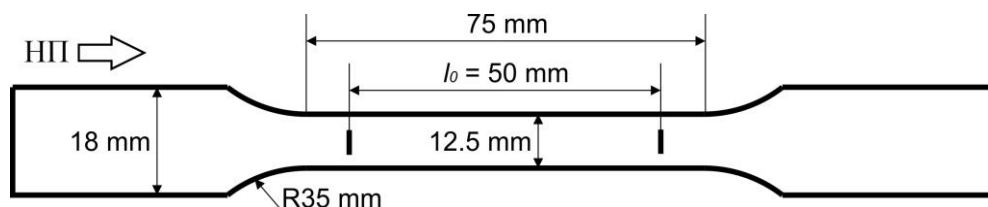


Рис. 2.15. Стандартні зразки, що використовуються під час одновісного випробування на розтягування, де НП - напрямок прокатки

У результаті для кожного зі зразків вимірювалась межа плинності $\sigma_{0,2}$, межа міцності σ_b , а також два типи подовження при розриві, $\delta(\sigma_b)$ та δ . $\delta(\sigma_b)$ – це розрахункове значення, що відображає непропорційне подовження зразка при максимальному напруженні; δ – це вимірюване загальне подовження зразка після випробування.

Для кожної умови експерименту середні значення властивостей, виміряні з двох зразків, були взяті для подальшого аналізу. Зображення довжини зразків під час напружень були також взяті в рівних інтервалах часу за допомогою цифрової камери.

Випробування на удар здійснювали за допомогою маятникового копру 50 Дж при кімнатній температурі за методом Шарпі за стандартом ISO 179/2D [89] (без надрізу).

Зразки обробляли до розміру $h_1 \times 10 \times 55$ мм, де h_1 - товщина композиту після прокатки. Для того, щоб значення можна було порівняти, в розрахунку значення енергії удару була посилена компонента висоти. Через різну товщину зразків (оскільки різний ступінь деформації) поглинену енергію ділили на момент інерції (I_z) для прямокутника $h_1 \times 10$ мм. ($I_z = b \cdot h^3 / 12$; де b – ширина зразку, та h – товщина зразку відповідно). Момент інерції розраховано відносно осі, яка являє собою лінію перерізу поверхні маятника та поверхні зразка, що стоять перед молотом [90].

Після ударних випробувань зразки не були зруйновані, а згинання зразків відбувся за різною формою. Для оцінки формозміни зразків композитів після випробування на удар у даному випадку визначали залишковий кут згинання та радіус згинання зразка по схемі (рис.2.16.)

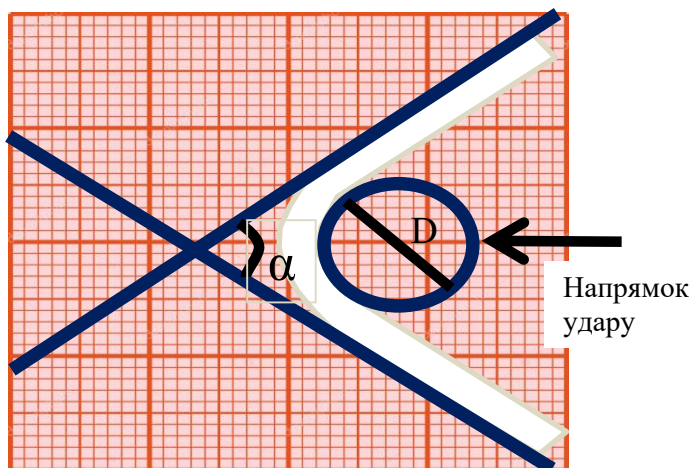


Рис. 2.16. Схема до визначення залишкового кута та радіусу згинання зразка: α - залишковий кут згинання, D - залишковий діаметр згинання зразку

Форма згинання та механізми руйнування пластично деформованих армованих та зразків без армування після випробувань на згинання за трьох точковою схемою показав, що армування має істотний вплив на геометрію подібне згинання зразку. Так автори виділяють два типи згинання -V-подібне та Ω -подібний [91]. Всі досліджені в данній роботі зразки показали V-подібний тип згинання.

2.5 Модель процесу з'єднання прокаткою армованих алюмінієвих штаб

Експериментальні дослідження процесів прокатки можуть бути трудомісткими та потребувати багато різних ресурсів. Сучасні технології дозволяють виконувати математичне моделювання процесів обробки металів тиском методом скінчених елементів, що дозволяє заощаджувати час та ресурси [92-96].

Теоретичне дослідження прокатки алюмінієвих штаб з сталеву сіткою проводилося за допомогою програмного забезпечення QForm версії 8.0.7, розроблене виробником QFX Simulations Ltd.

QForm - це універсальний комплекс для математичного моделювання процесів обробки металів тиском. Він призначений для проведення моделювання методом скінчених елементів для процесів прокатки, екструзії, кування металів. Симуляція процесу з'єднання алюмінієвих штаб шляхом поздовжньої прокатки може бути вивчена в цьому програмному забезпеченні.

В основу програмного забезпечення покладено ряд систем математичних рівнянь, що закладено в пакеті програми, зокрема системи рівнянь, що описують зв'язок швидкостей точок і швидкостей деформацій (2.8), сили контактної тертя (2.9), передачу тепла та інші.

Рівняння зв'язку швидкостей точок і швидкостей деформацій:

$$T_{\dot{\epsilon}} = \begin{pmatrix} \dot{\epsilon}_{11} & \dot{\epsilon}_{12} & \dot{\epsilon}_{13} \\ \dot{\epsilon}_{21} & \dot{\epsilon}_{22} & \dot{\epsilon}_{23} \\ \dot{\epsilon}_{31} & \dot{\epsilon}_{32} & \dot{\epsilon}_{33} \end{pmatrix}; \quad (2.8)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (2.9)$$

де $T_{\dot{\epsilon}}$ – тензор механічних напружень,

$\dot{\epsilon}_{ij}$ – тензор деформації

Сили контактної тертя при обробці металів тиском залежать від багатьох факторів: контактної тиску, властивостей мастила, температури, швидкості

ковзання, чистоти поверхні, механічних властивостей інструменту та матеріалу, що деформується та ін. При моделюванні зазвичай використовують прості залежності, виділяючи в якості аргументу один або два з факторів, що впливають на силу контактного тертя. Вплив інших факторів зводять до певних коефіцієнтів, отриманих при фізичному експерименті.

При побудові моделі з метою підвищення точності та стабільності виконання розрахунків математичного моделювання було виконано припущення у вигляді умовного повного прилипання між шарами матриці для запобігання зсуву штаб матриці одна відносно одної. При виконанні експерименту проскальзуванню запобігали заклепки. Коефіцієнт тертя між композитом та валками заданий по закону Амонтона-Кулона і дорівнює 0,47.

Закон Амонтона-Кулона, згідно якому питома сила тертя T (2.10) пропорційна контактному тиску σ_n з коефіцієнтом пропорційності, який ще називають коефіцієнтом тертя μ :

$$T = \sigma_n \mu \quad , \quad (2.10)$$

де T - питома сила тертя;

σ_n - контактний тиск;

μ - коефіцієнт тертя.

Для побудови моделі прокатки в QForm використовувалися допоміжні програми. За допомогою САПР SolidWorks 2014 створено геометрію заготовки та валків прокатного стану, які імпортовано до компонента системи QForm – Qshape, та використано під час моделювання процесу листової прокатки. Компонент системи QForm, QShape використовується для призначення типу складових створеної геометрії – заготовка, інструмент та т.і. Також за допомогою QShape створюється тривимірна сітка (рис. 2.17). Отриманий файл з геометрією експортується до QForm.

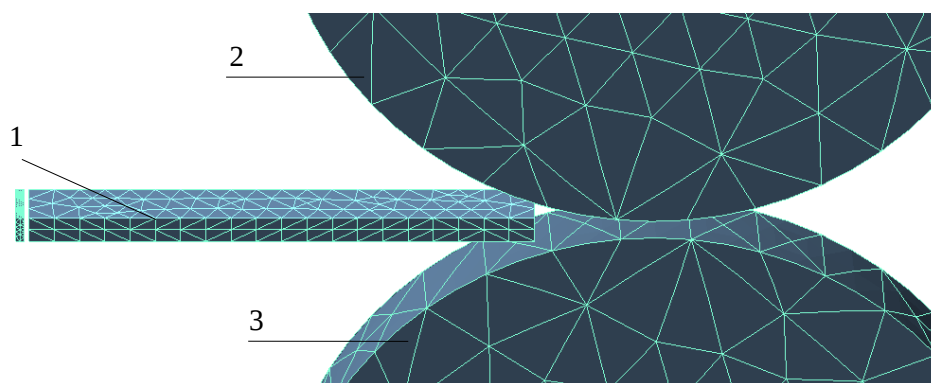


Рис. 2.17. Приклад геометрії процесу прокатки штаби в QShape:
1 – штаба до прокатки, 2 і 3 – верхній та нижній валки, відповідно.

Після імпортування геометрії були визначені осі обертання та руху. Після того, як було встановлено основні геометричні параметри, були визначені заготовки та інструменти, обрано відповідний матеріал та температура.

В якості матеріалу штаб для комп'ютерного моделювання та наступної верифікації результатів експериментів був обраний алюмінієвий сплав EN AW-5056. Хімічний склад алюмінієвого сплаву представлено в таблиці 2.1.

При математичному моделюванні обрано сталь X18H9. Фізичні властивості матеріалу сітки, що встановлені в побудованих моделях, наступні: щільність сплаву – 7397 кг/м^3 , теплопровідність матеріалу – $24,7 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, питома теплоємність металу – 744 Дж/кгК . Хімічний склад матеріалу сітки, що застосовувався при математичному моделюванні, представлено в таблиці 2.4

Таблиця 2.4– Хімічний склад сплаву сітки, що використовується при комп'ютерному моделюванні

Позначення сплаву	Хімічний склад, %								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Решта
Сталь 1.4301	<0,3	<0,1	<2,0	<0,04	<0,3	17,5- 19,5	8,0- 10,3	<0,1	Fe

При створенні комп'ютерної моделі матеріалом валків є сталь 40X з наступними фізичними властивостями: щільність – 7850 кг/м^3 , теплопровідність матеріалу – $50,2 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, питома теплоємність – 472 Дж/кгК .

Моделювання процесу прокатки армованих сталеву сіткою алюмінієвих штаб в скінчено-елементному середовищі Q-Form представлено на рис. 2.18.

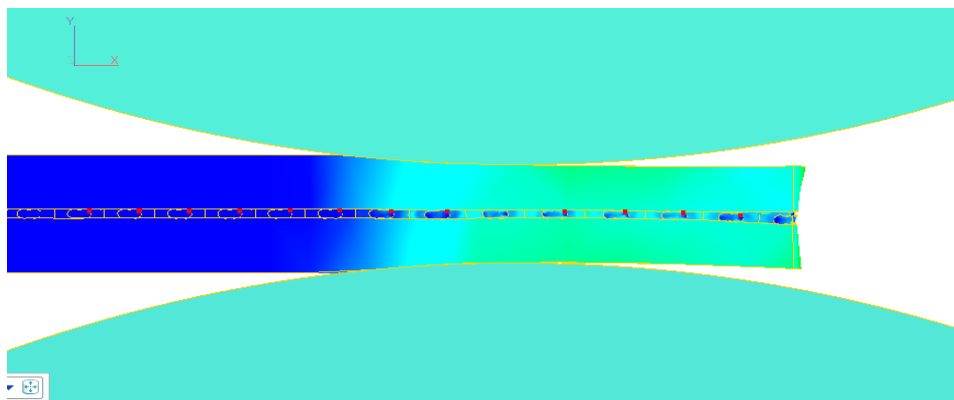


Рис. 2.18. Моделювання процесу прокатки армованих сталеву сіткою алюмінієвих штаб в скінчено-елементному середовищі Q-Form

При моделюванні були прийняті наступні граничні умови. Коефіцієнт тертя на поверхні метал-валки – 0,47 за системою Кулона. Коефіцієнт теплопередачі між штабою та валками у програмній системі визначений як простий - температура інструменту розраховується лише на контактній поверхні з заготовкою. При цьому температура валків приймається 20°C.

Результатом моделювання процесу з'єднання прокаткою алюмінієвих штаб зі сталеву сіткою показали здатність програми Q-Form до вирішування таких задач. Такий висновок зроблено на підставі порівняння геометричних характеристик композитів після «реальної» та «віртуальної» прокатки.

Висновки по розділу 2

1. Обґрунтовано методичне забезпечення проведення експериментальних досліджень гарячої прокатки армованих алюмінієвих композитів, описані характеристики використаного обладнання, фізичні властивості та хімічний склад алюмінієвих сплавів і сталеву сітки, що використані в проведених дослідженнях.

2. Розроблені загальна схема та план проведення експерименту з дослідження впливу розташування армуючої складової до напрямку прокатки на з'єднання

шарів композиту та його механічні властивості. Обґрунтовано температурні 200 та 500 °C та деформаційні режими (прокатка зі ступенями деформації більше 25%), особливості розташування армуючої фази у складі композиту.

3. Розроблено інженерну методику розрахунку параметрів деформації сітки у складі композиту при прокатці між двох алюмінієвих штаб. Отриманий метод 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.

4. Адаптовано методику проведення аналізу механічних властивостей армованих алюмінієвих композитів за умов прокатки з різними ступенями деформації, а саме методику проведення механічних випробувань на удар. В наслідок того, що під час проведення експериментальних досліджень з різним ступенем деформації товщина зразків є різною, для зіставлення результатів експериментів визначення поглиненої енергії удару було введено момент інерції прямокутного перерізу композиту. Всі досліджені в даній роботі зразки показали V-подібний тип вигину. Запропоновано визначати залишковий кут та радіус згинання зразка для оцінки формозміни зразків композитів після випробувань на удар.

5. Створено комп'ютерну модель в програмному середовищі QForm процесу гарячої прокатки алюмінієвих штаб, армованих сталеву сіткою, під кутом 45^0 до напрямку прокатки. Задано граничні умови процесу прокатки армованого алюмінієвого композиту. Перевірено працездатність такого програмного забезпечення для моделювання процесу з'єднання прокаткою алюмінієвих штаб, армованих сталеву сіткою.

РОЗДІЛ 3

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

3.1 Вплив розташування сітки на трансформацію її ґратки в складі алюмінієвої матриці, геометричні характеристики процесу

Після проведення серії експериментів, згідно з планом експерименту (табл.2.3), зроблено аналіз отриманих армованих композитів. В усіх випадках прокатки відбулося з'єднання пакету. Єдиний випадок не з'єднання в серії експериментів був при прокатці композиту без сітки матриці сплаву EN AW -6063 за один прохід. В цьому випадку, відшарування композиту відбулося відразу після прокатки, можливо через недостатньо високу температуру прокатки – 200 °С. Подальший аналіз цього композиту був неможливий.

Під час прокатки дроти рівномірно заповнили довжину і ширину композитних штаб. Не виявлено видимих розривів дроту або матриці.

Аналіз показав, що сітка практично не впливає на параметри деформації при прокаті композитів. Розширення композитів після прокатки становить 9...11% для штаб з матрицями зі сплавів EN AW -5056 та EN AW -6063.

Хімічне видалення одного з матричних шарів показало, що ґратки сітки всередині композиту деформувалися нерівномірно (рис. 3.1). Таким чином, при армування композиту «Тип 90» спостерігається істотне згинання поперечних дротів у центральній частині композиту, а також нерівномірне збільшення відстані між ними (рис.3.1a). Аналіз поперечного викривлення дротів показав, що товстіший дріт сітки типу «А» - більш схильний до згинання, ніж тонший дріт сітки типу «В».

У той же час, прокатка композитів з матрицею зі сплаву EN AW -5056 при температурі 500 °С призводять до меншого згинання дроту, ніж для композиту з матрицею зі сплаву EN AW -6063 при 200 °С. Підвищення напружень в зоні деформації у цьому випадку призводить до збільшення вигину в поперечних

дротах. Кут між дротами сітки (рис. 3.1б) у складі композиту «Тип 45» змінюється під час прокатки, але обтиск дроту менше, ніж у композиті «Тип 90». Значення показників деформації дроту у проведених експериментах приведені в таблицях 3.3, 3.4, 3.5.

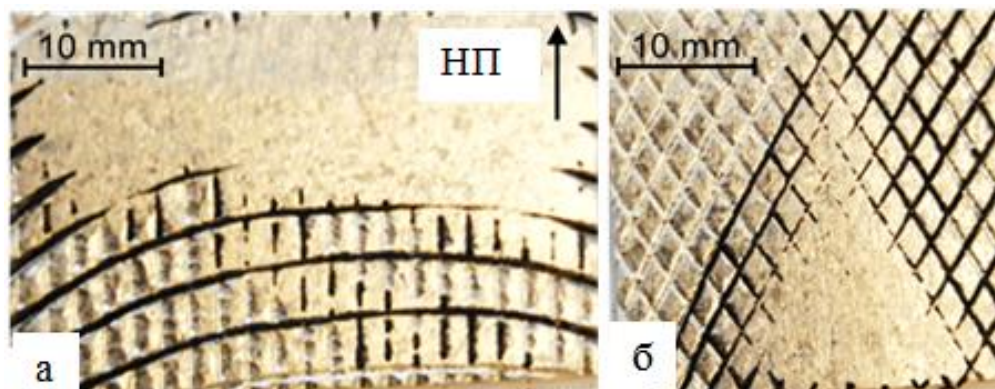


Рис. 3.1. Приклади деформації сітки композитів «Тип 90» (а) та «Тип 45» (б) після прокатки: НП - напрямок прокатки

Як буде показано нижче, справжні значення коефіцієнту витяжки для поперечних дротів у композиті «Тип 90» нижче на 2...4%, а значення овалізації – вищі через те, що ці дроти згиналися під час прокатки (рис. 3.2а). Аналіз ділянки перерізу дротів сітки у композиті «Тип 45» (рис. 3.2б) показує, що поблизу цих перехресть можна виявити зони локалізованої інтенсивної деформації.

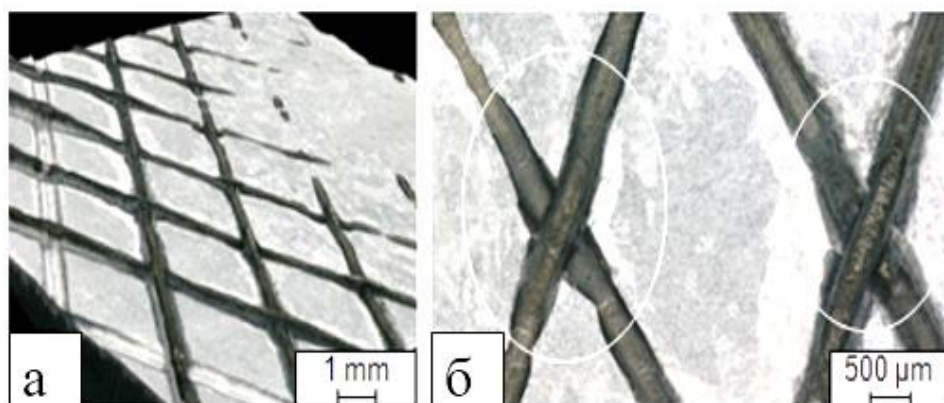


Рис. 3.2. Реконструкція топографії поверхні, зроблена за допомогою мікроскопу Keyence VHX5000 (а) та перехрестя дроту сітки (б) всередині прокатного композиту «Тип 45». Позначені ділянки - зони локалізованої інтенсивної деформації

Зображення з цифрового мікроскопу, представлене на рисунку 3.2а, являє собою 3D-реконструкцію сітки усередині прокатного композиту «Тип 45».

Таким чином, при прокатці з номінальною деформацією 30%, максимальне відхилення кута перетину α_1 від α_0 в сітці типу «А» - становило 12° та 13° для композитів з матрицями з сплавів EN AW -5056 та EN AW -6063, відповідно. Для сітки типу «В» ці значення дорівнювали 16° для обох матеріалів матриць композитів. Для композиту з матрицею зі сплаву EN AW -6063, що прокатана двома проходами, кут перетину α збільшився на 32° для обох типів сітки. Результати кута відхилення представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати кута відхилення композитів з розташуванням сітки під кутом 45°

Тип композиту	Кут відхилення α , %
5056-A-45-30	12
6063-A-45-30	13
5056-B-45-30	16
6063-B-45-30	16
6063-A-45-60	32
6063-B-45-60	32

Для оцінки сукупності параметрів армованого композиту визначений фактор форми, що визначається як відношення довжини зони деформації до середньої висоти композиту.

$$\text{Фактор форми } K_1 = l_d/h_{cp},$$

$$\text{де } h_{cp} = (h_1 + h_0)/2, \text{ мм}$$

h_1 – висота композиту до прокатки, мм

h_0 – висота композиту після прокатки, мм

l_d – довжина зони деформації, мм

$$l_d = (R\Delta h)^{1/2}, \text{ мм}$$

R – радіус валку, мм

Δh – абсолютний обтиск, мм

Для обмеження параметрів композитів, для яких справедливе дане дослідження, запропоновано наступні коефіцієнти, що описують геометричні характеристики процесу:

$$\text{Коефіцієнт } K_2 = c / l_d$$

c – довжина діагоналі ґратки сітки, мм

$$\text{Коефіцієнт } K_3 = 2h_{Al} / D_w$$

$2h_{Al}$ – дві висоти алюмінієвих штаб, мм

D_w – діаметр дроту сітки, мм

Важливим фактором, що обмежує геометричні розміри композитів, є 5% армуючої фази у складі композиту.

Отже для переходу до безрозмірних коефіцієнтів, що описують геометричні характеристики процесу, враховують такі залежності:

- довжина зони деформації до середньої висоти композиту;
- довжина ґратки сітки до довжини зони деформації;
- висота композиту до висоти (діаметру) сітки.

Розрахунок даних коефіцієнтів представлений в таблиці табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахунок коефіцієнтів для армованих композитів

Тип композиту	l_d , мм	h_0 , мм	h_1 , мм	Δh	K_1	c , мм	$K_2 = c/l$	$2h_{Al}$, мм	D_w , мм	K_3
5083-C-45-25	13,24	6,1	4,53	5,32	2,49	1,41	0,11	6,2	0,5	12,4
5083-C-45-30	14,38	6,1	4,23	5,17	2,78	1,41	0,10	6,2	0,5	12,4
5083-C-45-35	15,54	6,1	3,90	5,00	3,11	1,41	0,09	6,2	0,5	12,4
5083-C-45-45	17,60	6,1	3,25	4,68	3,76	1,41	0,08	6,2	0,5	12,4
5083-C-45-55	19,06	6,1	2,74	4,42	4,31	1,41	0,07	6,2	0,5	12,4
5056-A-45-30	17,75	8	5,48	6,74	2,63	4,24	0,24	8	0,5	16
5056-B-45-30	17,75	8	5,48	6,74	2,63	1,41	0,08	8	0,25	32
6063-A-45-30	14,87	6	4,23	5,12	2,91	4,24	0,29	6	0,5	12
6063-B-45-30	15,04	6	4,19	5,10	2,95	1,41	0,09	6	0,25	24

Отже можна зробити висновок, що дані дослідження справедливі для композитів, в яких відношення:

- довжини зони деформації до середньої висоти композиту в межах 2,49...4,31;
- 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%.

3.2 Параметри деформації армованих композитів

3.2.1 Прокатані за один прохід композити з матрицею зі сплаву EN AW -5056

Основні вимірені та розраховані параметри деформації цієї серії експерименту армованого прокатаного композиту представлені в таблиці 3.3. Частина зразків представлена на рис. 3.3.



Рис. 3.3. Зразки сплаву EN AW -5056 при прокатці зі ступенем деформації 30%: 1) 5056-A-90-30; 2) 5056-A-45-30; 3) 5056-B-90-30; 4) 5056-B-45-30; 5) і 6) 5056-0-30 [101].

Таблиця 3.3 – Параметри деформації прокатних композитів з матрицею зі сплаву EN AW -5056

Шифр експерименту	h_1	e_h	e_b	e_l	μ_Σ	μ_c	$\mu_{w(45)}$	$\mu_{wL(90)}$	$\mu_{wT(90)}$	$O_{w(45)}$	$O_{wL(90)}$	$O_{wT(90)}$	$A_w, \%$
5056-A-90-30	5,81	-0.32	0.03	0.28	1.28	-	-	1.44	1.08	-	1.13	1.07	2.90
5056-A-45-30	5,48	-0.38	0.07	0.34	1.37	1.49	1.36	-	-	1.15	-	-	3.29
5056-B-90-30	5,53	-0.37	0.07	0.31	1.35	-	-	1.13	1.02	-	1.1	1.04	1.14
5056-B-45-30	5,48	-0.38	0.09	0.33	1.37	1.38	1.21	-	-	1.08	-	-	2.73
5056-0-0-30	5,53	-0.37	0.06	0.35	1.35	-	-	-	-	-	-	-	-

Коефіцієнт витяжки поздовжніх дротів $\mu_{wL(90)}$, який перевищує коефіцієнт витяжки всього композиту μ_Σ , вказує на додаткову локалізовану деформацію в вузлах сітки. Для композиту з шифром 5056-A-90-30 витяжка поздовжніх дротів $\mu_{wL(90)}$ більше витяжки композиту μ_Σ на 0,16.

У випадку, коли коефіцієнт витяжки поздовжніх дротів $\mu_{wL(90)}$ значно менше, ніж витяжка композиту μ_Σ , наприклад, у зразку 5056-B-90-30 на 0,22, може свідчити про розрив дротів всередині композиту. Ці твердження підтверджено протравленням, що виявляє структуру сітки. Це може бути викликано крихкістю дроту з нержавіючої сталі під час нагрівання при температурі 500 °С.

Менші значення коефіцієнту витяжки дротів для композиту «Тип 45» $\mu_{w(45)}$ компенсуються зміною кута перетину дроту. Кут перетину змінився на 12° в експерименті 5056-A-45-30, що разом з коефіцієнтом видовження ґратки сітки $\mu_c = 1,49$ дозволило забезпечити коефіцієнт витяжки дроту $\mu_{w(45)} = 1,36$. Видовження ґратки сітки μ_c більше, ніж коефіцієнт витяжки всього композиту $\mu_\Sigma = 1,37$.

Коефіцієнт видовження ґратки сітки для експерименту 5056-B-45-30 μ_c дорівнював 1,38, що більше, ніж коефіцієнт витяжки для всього композиту μ_Σ . Цей висновок вказує на те, що існує відносно низька ймовірність розриву дроту в цьому композиті. Крім того, ця ймовірність нижче в зразках з типом сітки «А», ніж у зразках з типом сітки «В».

Незважаючи на коефіцієнт витяжки дроту $\mu_{w(45)} = 1,38$, що перевищує загальний коефіцієнт витяжки композита $\mu_\Sigma = 1,37$, перелом дротів під час прокатки навіть мав місце в композиті «Тип 45».

Використовуючи той самий початковий зазор між валками, найменший ступінь деформації був досягнутий при прокатаних композитах «Тип 90» та «Тип 0». Найбільший ступінь деформації (38%) був при прокатці композитів «Тип 45». Це вказує на те, що діагонально орієнтована сітка сприяє потоку металу в основному шарі композиту шляхом зменшення тертя між шарами матриці. Цей ефект був більше для тонких дротів сітки типу «В» (37...38%).

Композит з сіткою типу «В», що має менші розміри ґратки сітки, тонші дроти та діагональну орієнтацію сітки, також демонструє більше розширення (9%) порівняно з зразками з сіткою типу «А» (3 %), що орієнтована вздовж напрямку прокатки. Проте слід зазначити, що розширення в цьому експерименті взагалі було незначним.

3.2.2 Прокатані за один прохід композити з матрицею зі сплаву EN AW -6063

Основні параметри деформації цієї серії прокатки представлені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Параметри деформації прокатаних композитів з матрицею зі сплаву EN AW -6063 з номінальним ступенем деформації 30%*

Шифр експерименту	h_1	e_h	e_b	e_l	μ_Σ	μ_c	$\mu_{w(45)}$	$\mu_{wL(90)}$	$\mu_{wT(90)}$	$O_{w(45)}$	$O_{wL(90)}$	$O_{wT(90)}$	$A_w, \%$
6063-A-90-30	4,19	-0.36	0.04	0.32	1.37	-	-	1.68	1.3	-	1.25	1.04	2.51
6063-A-45-30	4,23	-0.35	0.05	0.33	1.35	1.49	1.35	-	-	1.11	-	-	4.35
6063-B-90-30	4,19	-0.36	0.03	0.34	1.39	-	-	1.24	1.05	-	1.08	1.09	0.91
6063-B-45-30	4,19	-0.36	0.04	0.34	1.38	1.45	1.27	-	-	1.1	-	-	3.51

Більш інтенсивну деформацію дротів сітки можна побачити в даній експериментальній серії, ніж з композитами на основі сплаву алюмінію EN AW -

5056. Таким чином, розрахункова витяжка та овалізація дротів мають більш високі значення, наприклад композиту з шифром 6063-A-90-30 овалізація O_{wL90} дорівнює 1,25, витяжка композиту μ_{Σ} - 1.37, а в композиті з шифром 5056-A-90-30 O_{wL90} дорівнює 1,13, μ_{Σ} - 1.28., що на 0,12 та 0,09 більше відповідно.

У всіх випадках коефіцієнт витяжки дроту μ_w , включаючи збільшення в видовження ґратки сітки у композитах «Тип 45», був більшим, ніж загальний коефіцієнт витяжки всього композиту μ_{Σ} . Цей висновок вказує на те, що дроти в композиті не були порушені. Більшу деформацію порівняно з композитами з матрицею зі сплаву EN AW -5056 можна пояснити сприятливим діапазоном температур для деформації дроту. Для матеріалу дроту з аустенітної нержавіючої сталі деформація відбувається в діапазоні температур близько 200 °C, що може називатися теплою прокаткою [97].

У композитах «Тип 45» діагональна довжина ґраток сіток збільшилася за рахунок перетворення ґраток з квадратної форми до ромба. Діагоналі ґраток збільшено відповідно на 1,49 і 1,45 рази для сітки типу «А» та типу «В». Ймовірність руйнування дроту в цьому випадку була мінімальною.

3.2.3 Прокатані за два проходи композити з матрицею зі сплаву EN AW -6063

Прокатка відбувалася за два підходи з номінальним ступенем деформації 30% при першому проході та загальним ступенем деформації 60% після двох підходів. Параметри деформацій для цієї експериментальної серії представлені в таблиці 3.5.

Під час процесу прокатки сітка типу «В» не змогла витримати високі напруження при прокатці і як результат розірвалася. Це можна побачити у співвідношенні між коефіцієнтами витяжки дротів сітки μ_w з урахуванням видовження ґратки сітки до коефіцієнтів витяжки всього композиту μ_{Σ} , а також від частини сітки в поперечному перерізі композиту A_w .

Таблиця 3.5 – Параметри деформації прокатаних композитів з матрицею зі сплаву EN AW -6063 у двох проходах зі ступенем деформації 60%*

Шифр експерименту	h_1	e_h	e_b	e_l	μ_Σ	μ_c	$\mu_{w(45)}$	$\mu_{wL(90)}$	$\mu_{wT(90)}$	$O_{w(45)}$	$O_{wL(90)}$	$O_{wT(90)}$	$A_w, \%$
6063-A-90-60	2,87	-0.74	0.10	0.69	1.90	-	-	2.38	1.06	-	1.58	1.28	4.91
6063-A-45-60	2,90	-0.73	0.09	0.68	1.89	2.56	2.07	-	-	1.47	-	-	4.00
6063-B-90-60	2,68	-0.81	0.09	0.74	2.06	-	-	1.65	1.03	-	1.29	1.04	1.80
6063-B-45-60	2,68	-0.81	0.10	0.75	2.04	1.4	1.13	-	-	1.26	-	-	5.79
6063-0-60	3,33	-0.88	0.10	0.81	2.19	-	-	-	-	-	-	-	

Під час процесу прокатки сітка типу «В» не змогла витримати високі напруження при прокатці і, як результат, розірвалася. Це можна побачити у співвідношенні між коефіцієнтами витяжки дротів сітки μ_w з урахуванням видовження ґратки сітки і витяжки всього композиту μ_Σ , а також від частини сітки в поперечному перерізі композиту A_w .

Прокатка за два проходи показала істотну різницю в кінцевому розмірі зразків, прокатаних з тим же зазором між валками. Дві прокатані штаби без армування з шифром 6063-0-60 мають висоту кінцевого композиту 3,33 мм, а армовані композити в межах 2,68-2,9 мм.

Таким чином, остаточна товщина двох прокатаних армованих штаб без сітки всередині була на 13% менше, ніж у композитів, армованих сіткою типу «А». Композити з сіткою типу «В» поводити себе як дві прокатані штаби без армування, оскільки зламана сітка не впливала на течію металу під час прокатки.

3.3 Результати механічних випробувань

3.3.1 Композити з матрицею зі сплаву EN AW -5056

Наведені криві «напруження-деформація», отримані в результаті випробувань на розтягування цього композиту, представлені в табл.3.6 та на рисунку 3.4. Найбільші показники межі міцності (377 МПа), межі плинності (199 МПа) серед композитів, що армовані сіткою, були отримані шляхом випробування композиту 5056-A-45-30. Однак у цьому композиті залишкове подовження при розриві було нижчим (15%), ніж дві прокатні штаби без армування (шифр експерименту - 5056-0-30) (18%).

Армований композит 5056-B-45-30 демонстрував нижчу межу плинності та межу міцності, ніж композит з шифром 5056-A-45-30, на 24 МПа та 12 МПа, відповідно, і в той же час мав кращу пластичність на 2 %, порівняно з двома прокатаними штабами без армування. Отримані механічні властивості композитів з шифром 5056-B-45-30 (межа плинності 205 МПа, межа міцності 365 МПа) більше, порівняно з двома сумісно прокатаними штабами без армування (межа плинності – 183 МПа, межа міцності 356 МПа). Схожі механічні властивості у композиту з шифром 5056-A-45-30 (межа плинності – 229 МПа, межа міцності 377 МПа), що на 46 та 24 МПа більше, ніж у двох сумісно прокатаних штаб без армування.

Таблиця 3.6 – Результати випробувань на розтягування композиту з матрицею зі сплаву EN AW -5056

Шифр експерименту	$\sigma_{0,2}$ МПа	σ_B МПа	$\delta, (\sigma_B)$ %	$\delta, %$
5056-A-90-30	199 $\pm$ 2	335 $\pm$ 3	8 $\pm$ 1	10 $\pm$ 2
5056-A-45-30	229 $\pm$ 6	377 $\pm$ 8	11 $\pm$ 2	15 $\pm$ 1
5056-B-90-30	162 $\pm$ 4	219 $\pm$ 3	1 $\pm$ 2	6 $\pm$ 1
5056-B-45-30	205 $\pm$ 2	365 $\pm$ 1	15 $\pm$ 1	18 $\pm$ 1
5056-0-30	183 $\pm$ 2	353 $\pm$ 2	15 $\pm$ 2	18 $\pm$ 1

Випробування композитів «Тип 90» показало їх відносно низькі механічні властивості: межа міцності (335 та 219 МПа) і межа плинності (119 та 162 МПа) не досягають тих самих характеристик, що отримано при прокатці двох алюмінієвих штаб без армування (353 та 183 МПа). Це свідчить про руйнування дротів сітки всередині композиту. При високих ступенях деформації прокатані армовані алюмінієві штаби поведуть себе як дві прокатані штаби без армування.

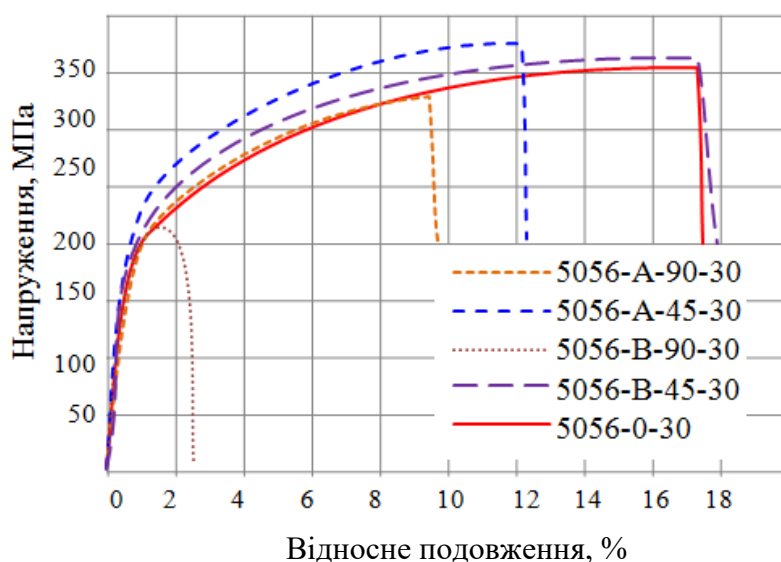


Рис. 3.4. Криві «напруження-деформація» композитів з матрицею зі сплаву EN AW-5056

На рис. 3.5 показані зображення зразків, взятих під час випробування на розтягування безпосередньо перед і після руйнування. На основі спостереження поведінки зразків під час випробувань на розтягування встановлено механізм їх руйнування. Він розвивається у наступній послідовності:

- 1) розрив одного шару композиту;
- 2) розшарування композиційних шарів;
- 3) розрив другого шару композиту.

У цьому випадку відшарування може бути обмежено всередині однієї чи кількох ґраток сітки і не відбувається протягом всієї довжини зразка (рис. 3.5г).

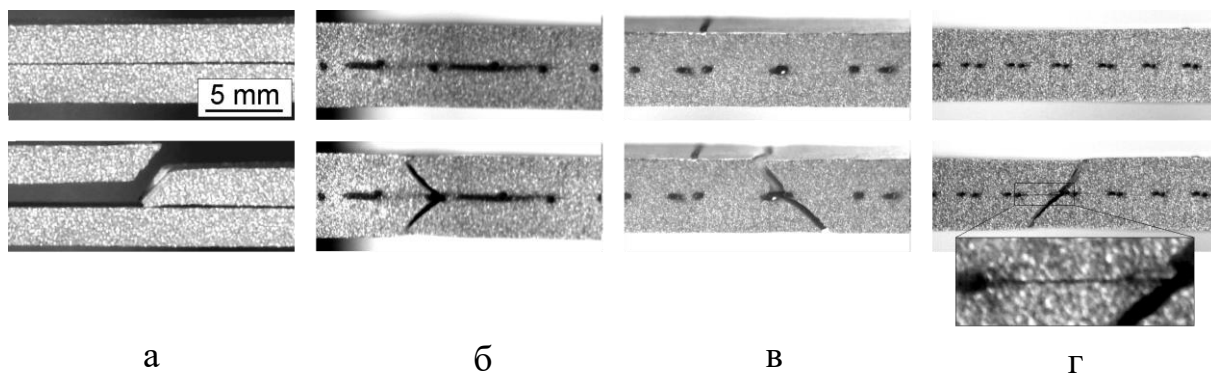


Рис. 3.5. Зображення композиту з матрицею зі сплаву EN AW -5056, взяті під час випробувань на розтягування безпосередньо перед (верхній малюнок) та після (нижній малюнок) розриву: а - 5056-0-30; б - 5056-A-90-30; в - 5056-A-45-30; г - 5056-B-45-30

3.3.2. Композити з матрицею зі сплаву EN AW -6063, прокатані за один прохід

Випробування на розтягування композиту з матрицею зі сплаву EN AW - 6063, прокатаного за один прохід, показало, що його міцність і пластичність не сильно залежать від типу та орієнтації армуючої сітки (рис.3.6).

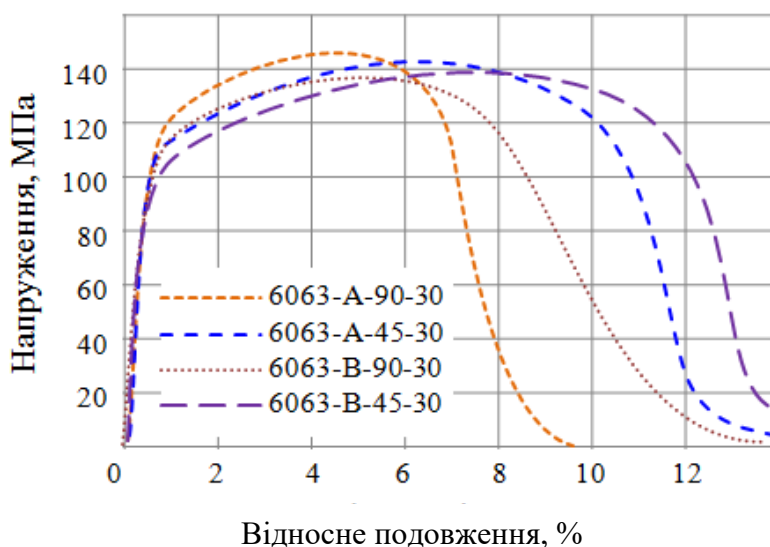


Рис. 3.6. Криві «напруження-деформація» композитів з матрицею зі сплаву EN AW -6063, прокатаних за один прохід

Композит, укріплений товстою сіткою типу «А», загалом міцніше – межа міцності 145 та 141 МПа, ніж композит з сіткою типу «В» - межа міцності 137 та 138 МПа (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Результати випробувань на розтягування композиту з матрицею зі сплаву EN AW -5056

Код експерименту	$\sigma_{0,2}$ МПа	σ_B МПа	$\delta, (\sigma_B)$ %	$\delta, \%$
6063-A-90-30	118 $\pm$ 2	145 $\pm$ 2	4 $\pm$ 1	13 $\pm$ 2
6063-A-45-30	109 $\pm$ 4	141 $\pm$ 4	6 $\pm$ 1	14 $\pm$ 2
6063-B-90-30	103 $\pm$ 3	137 $\pm$ 3	5 $\pm$ 2	14 $\pm$ 1
6063-B-45-30	98 $\pm$ 5	138 $\pm$ 4	7 $\pm$ 2	16 $\pm$ 3

На відміну від композитів з матрицею зі сплаву EN AW 5056, аналіз механізму розриву в композитній матриці зі сплаву EN AW -6063 показує, що при первинному навантаженні на розтягування відшарування матричних шарів відбувається до розриву (рис.3.7).

У композиті з сіткою типу «А», з орієнтації сітки під кут 90°, спочатку відбувається розшарування, а потім композит стає тоншим в місцях, де є перехрестя дротів. Для композиту з сіткою типу «А», що розташована під кутом 45° до напрямку прокатки, спочатку відбувається розшарування, а потім видовження в зоні між дротами.

У композиті з сіткою типу «В», «Тип 90», спочатку відбувається розшарування, а потім композит стає тоншим в місцях, де є перехрестя дротів. Перехрестя дротів незначно сповільнюють розшарування композиту. Для композиту з сіткою типу «А», «Тип 45» спочатку відбувається відшарування, а потім видовження в зоні між дротами (рис. 3.8).

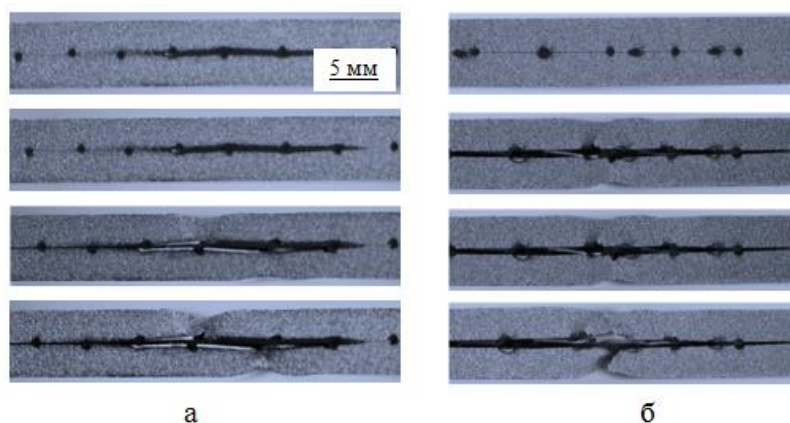


Рис. 3.7. Зображення композиту з матрицею зі сплаву EN AW-6063, прокатаного за один прохід, зроблене під час випробувань на розтягування перед їх руйнуванням: а - 6063-A-90-30; б - 6063-A-45-30

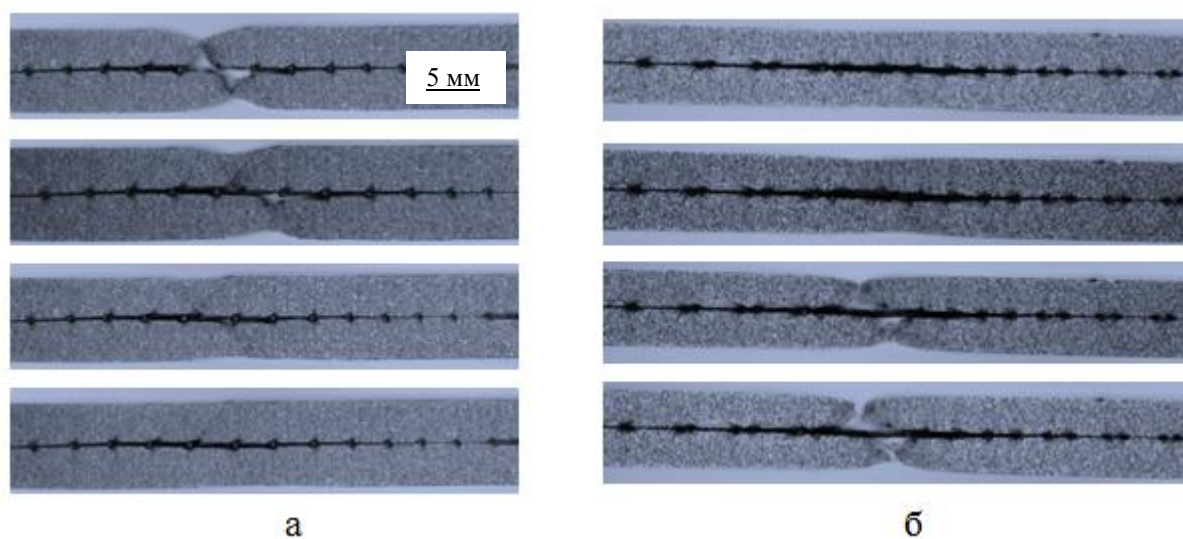


Рис. 3.8. Зображення композиту з матрицею зі сплаву AW-6063, прокатаного за один прохід, зроблене під час випробувань на розтягування перед їх руйнуванням: а - 6063-B-90-30; б - 6063-B-45-30

Таким чином, витоншення алюмінієвої матриці у складі композиту «Тип 90» відбувається у місці розташування поперечних дротів, які є концентраторами напружень, особливо після повного розшарування композиту. У складі композитів «Тип 45» роль концентраторів напружень займають вузли сітки.

3.3.3 Композити з матрицею зі сплаву EN AW -6063, прокатані за два проходи

Аналіз результатів випробувань на розтягування показує, що всі армовані композити «Тип 45», порівняно з двома прокатаними штабами без армування, мають більші значення межі міцності на 6...10 %. Композити з шифром 6063-A-45-60 порівняно з композитами з шифром 6063-A-90-60 мають більші межі міцності та межі плинності на 22 та 13 %, відповідно. Композити з шифром 6063-B-45-60 порівняно з композитами з шифром 6063-B-90-60 мають більші межі міцності та межі плинності на 14 та 10 %, відповідно (рис. 3.9, табл. 3.8).

Таблиця 3.8 – Результати випробувань на розтягування композиту з матрицею зі сплаву EN AW -6063

Шифр експерименту	$\sigma_{0,2}$ МПа	σ_B МПа	$\delta, (\sigma_B)$ %	$\delta, %$
6063-A-90-60	113 $\pm$ 5	132 $\pm$ 2	6 $\pm$ 2	17 $\pm$ 3
6063-A-45-60	128 $\pm$ 4	154 $\pm$ 3	5 $\pm$ 3	13 $\pm$ 2
6063-B-90-60	112 $\pm$ 3	135 $\pm$ 2	5 $\pm$ 1	10 $\pm$ 3
6063-B-45-60	120 $\pm$ 2	149 $\pm$ 1	7 $\pm$ 2	16 $\pm$ 1
6063-0-60	128 $\pm$ 4	140 $\pm$ 3	6 $\pm$ 3	15 $\pm$ 2

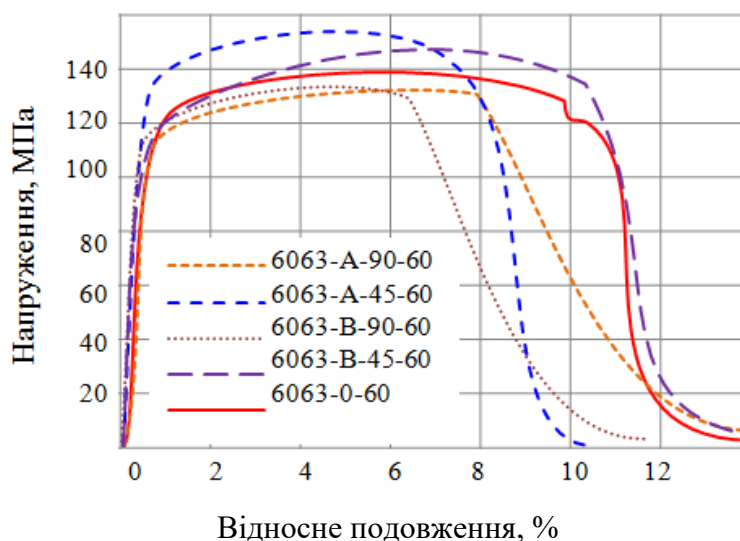


Рис. 3.9. Криві «напруження-деформація» композитів з матрицею зі сплаву EN AW -6063, прокатані за два проходи

Композити «Тип 90» порівняно з двома прокатаними штабами без армування мають нижчі показники межі міцності та межі плинності на 3...6 % та 13...14 %, відповідно.

Композити «Тип 45» порівняно з двома прокатаними штабами без армування мають показники межі міцності більші на 6...10%. Межа плинності на тому ж рівні, що і в двох прокатаних штаб без армування.

Таким чином, можна зробити висновок, що ступінь деформації 60 % при прокатці та розташування армуючої сітки під кутом 90° до напрямку прокатки дає незадовільні результати.

Зображення, отримані до розриву зразків при випробуваннях на розтягування (рис. 3.10), показують, що прокатка у два проходи забезпечує міцне з'єднання шарів алюмінієвої матриці. У будь-якому з експериментів не спостерігалось значного розшарування шарів матриці.

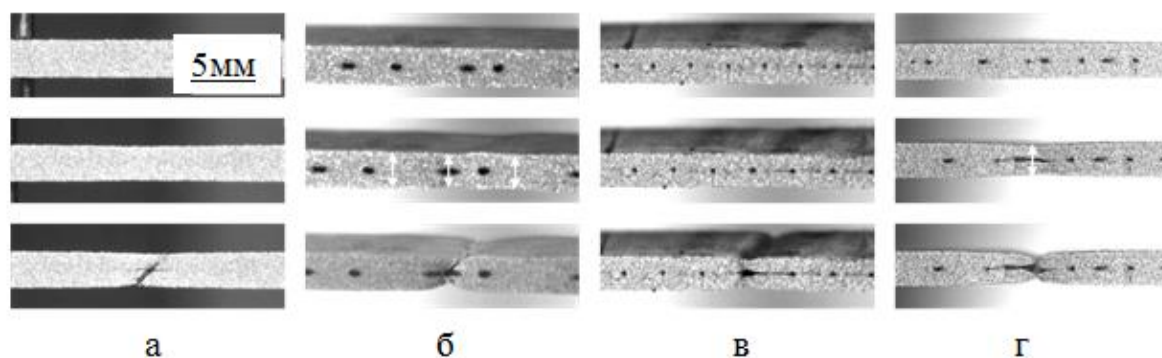


Рис. 3.10. Зображення композитів з матрицею зі сплаву EN AW -6063 прокатаних за два проходи, взятими під час випробувань на розтягування до руйнування (стрілки вказують на місцях розшарування алюмінієвої матриці):
а - 6063-0-60; б -6063-А-45-60; в - 6063-В-90-60; г - 6063-В-45-60

Основна особливість композиту «Тип 45», що спостерігається при його руйнуванні, полягає у розриві зразка в зонах між вузлами сітки. Завдяки сильному зчепленню між матрицею та армуючими дротами ці дроти перешкоджають розвитку деформації. Важливо також зазначити, що спостерігається лише

обмежене відшарування у двох прокатаних штаб без армування, тоді як у армованому композиті «Тип 45» відшарування не спостерігається [98-102].

3.4 Узагальнення результатів з'єднання композитів прокаткою з матрицями зі сплавів EN AW -5056, EN AW -6063

Той факт, що видиме розшарування після деформації не спостерігалось, свідчить про можливість виробництва композитних матеріалів, армованих сіткою, з матрицею досліджуваних сплавів шляхом з'єднання прокаткою при температурах 200 та 500 °С, при загальному ступені деформації близько 30%, дотримуючись коефіцієнтів геометричної характеристики процесів: висота композиту до висоти (діаметру) сітки знаходиться в межах – 12...32; довжина ґратки сітки до очагу деформації в межах – 0,07...0,29; відсоток армуючої фази у поперечному перерізі композиту до 5%.

Було встановлено, що ступінь деформації з'єднанням прокаткою в цьому експерименті обмежується міцністю армуючого дроту.

Похибка визначення логарифмічної деформації становила 0,04...4,63 % і обумовлена неминучою неточністю вимірювання довжини композиту після прокатки.

Похибка при визначенні коефіцієнта витяжки, овалізації, видовження та зміни площі поперечного перерізу оцінюється як $\pm 3\%$.

Для більшості експериментів розтягування було основним типом деформації дроту, що спостерігалася. Проте локальне зменшення площі поперечного перерізу дротів спостерігається в вузлах їх перетину, зокрема для сітки типу «А». Відношення овалізації (зменшення діаметру сітки у порівнянні з її шириною) до розтягування дротів залежить від параметрів зони деформації при прокатці. Зокрема, це залежить від ступеню деформації та діаметру валків.

Сітка типу «А» найбільш інтенсивно деформована у складі композиту «Тип 45». Щоб уникнути руйнування дроту в цьому типі композиту, коефіцієнт

витяжки дроту μ_w^{45} з урахуванням трансформації ґратки сітки μ_c повинен бути співвіднесений з загальним коефіцієнтом витяжки композиту μ_Σ .

Якщо загальний коефіцієнт витяжки композиту μ_Σ вищий, ніж коефіцієнт витяжки дроту μ_w^{45} з урахуванням трансформації ґратки сітки, то існує висока ймовірність руйнування дроту. Крім того, навіть якщо коефіцієнт витяжки дроту μ_w^{45} однаковий або трохи вище, ніж композит μ_Σ , вірогідність розриву дроту залишається. Баланс цих факторів потребує подальшого уточнення. Імовірність руйнування дроту може бути оцінена як кореляція коефіцієнтів витяжки композиту та дротів сітки з урахуванням максимально можливого видовження матеріалу дроту.

Поздовжні дроти беруть на себе основну деформацію у складі композиту «Тип 90». Коефіцієнт витяжки дроту μ_{wL}^{90} повинен бути безпосередньо співвіднесений з коефіцієнтом витяжки композиту μ_Σ , щоб передбачити можливий розрив цих дротів.

У сітки типу «А» деформація поздовжніх дротів в композиті «Тип 90» є на 29...33% вища ніж деформація поперечних дротів та не залежить від матеріалу матриці та ступеню деформації проведених експериментів. Ця різниця близько 10...60% для сітки типу «В».

Овалізація дроту багато в чому залежить від ступеню деформації при прокатці. Овалізація поперечних дротів у композиті «Тип 90» мінімальна (1,04...1,08); помірна овалізація спостерігалася в дротах композиту «Тип 45» (1,08...0,15); і максимум цього критерію досягався поздовжніми дротами у складі композиту «Тип 90» (1,09...1,25).

Деформація поперечних дротів у композиті «Тип 90» відбувається в основному за рахунок згинання у напрямку прокатки. Овалізація поперечних дротів була мала для більшості експериментів і дорівнювала 1,04...1,08.

Композит «Тип 90» демонструє незадовільні результати при випробуваннях на розтягування. 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 %. Це може бути пов'язано з виснаженням пластичних

властивостей поздовжніх дротів при прокатці, а також тим, що поперечні дроти служать концентраторами напружень при прокатці. Композит «Тип 45» показав найкращі результати в випробуваннях на розтягування через те, що розтягування дротів пом'якшується трансформацією ґратки сітки.

3.5 Розрахункові межі міцності та плинності

3.5.1 Порівняння розрахункової та експериментальної меж міцності прокатаних композитів

Порівняння отриманих результатів з розрахунковим теоретичним значенням міцності для армованих композитів показує, що останній був досягнутий лише один раз. Єдиний композит, що показує таку високу міцність, є композит з шифром 5056-A-45-30.

Розрахункову межу міцності визначено пропорційно до частини композитного поперечного перерізу, заповненого дротами (A_w) з урахуванням розрахункової міцності дроту σ_f , за формулою (1.1), описаною в розділі 1.

В цьому дослідженні формула (1.1) була застосована при наступних умовах: коефіцієнт деформації η дорівнював 1; σ_f розраховано за формулою, наведеною нижче, в Н/мм²; замість співвідношення об'ємів $\frac{V_f}{V_{fm}}$ було застосовано співвідношення поверхонь A_w ; як межа міцності матриці використовувалося (σ_B) значення межі міцності двох сумісно прокатаних штаб без армування для кожного експерименту («Тип 0»). Композити з шифром 6063-0-30 прокатані при температурі 200°C з ступенем деформації 30% не були розглянуті під час оцінки межі міцності, оскільки відбулося розшарування при обробці зразків.

Через невеликий діаметр дроту враховується тільки межа міцності (UTS) взята відповідно до ASTM A 478 [103]. Його початкове значення дорівнює 630 МПа. Зазначене стандартною специфікацією вимірювання видовження на базі 254 мм не проводилося в цьому дослідженні. Очікуване значення межі міцності

деформованого всередині композитного дроту, що відповідає 30% деформаційному зміцненню, становить 900 МПа для температури прокатки 500°C. Випробування на розтягування дротів сітки після прокатки не виконувалися. У цілому експериментальна процедура найбільш небезпечна для аустенітної сталі, тому що відносно довгий час (більше 3 хвилин) томління при температурі вище 450 °C може викликати утворення карбідів хрому.

Зміну межі міцності пропонується описати в вигляді залежності (3.1):

$$\sigma_f = \sigma_{b0} + a \cdot \varepsilon^m, \quad (3.1)$$

где: σ_{b0} – початкове значення межі міцності для сталі X18H10T, яка застосовується для виготовлення дроту; a та m – емпіричні коефіцієнти, ε – відносна деформація по площі поперечного перетину дроту.

На рисунку 3.11 представлені графіки зміни межі міцності сталі X18H10T в залежності від ступеню деформації [85].

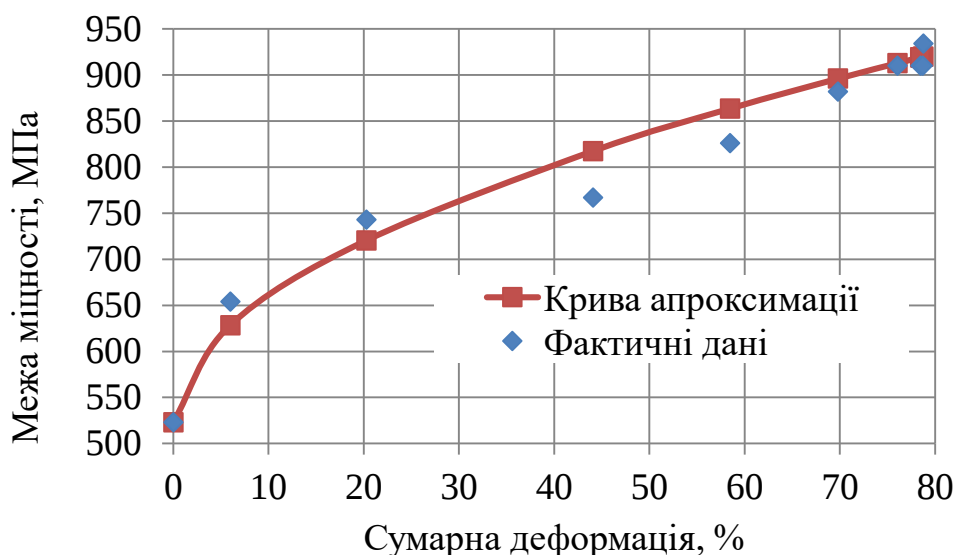


Рис. 3.11. Зміна межі міцності сталі X18H10T в залежності від сумарної деформації [85]

В таблиці 3.9 приведені коефіцієнти в функції (3.1), а також величина достовірності апроксимації R^2 .

Таблиця 3.9 – Коефіцієнти для функції (3.1) для сталі зі сплаву 1,4301

Вид деформації	a	m	R^2
Сумарна деформація	42,0076	0,51439	92,3%

Початкове значення напруження межі міцності σ_{B0} для сталі X18H10T дорівнює 659 МПа, яке було розраховано на розривній машині під час експериментів.

Відповідно до формули (3.1) змінний коефіцієнт межі міцності σ_f при 30 % деформації дорівнює:

$$\sigma_f = 659 + 42,0076 * 30^{0,51439};$$

$$\sigma_f = 900 \text{ МПа};$$

Відповідно до формули (3.1) змінний коефіцієнт межі міцності σ_f при 60% деформації дорівнює:

$$\sigma_f = 659 + 42,0076 * 60^{0,51439};$$

$$\sigma_f = 1004 \text{ МПа};$$

Значення межі міцності для двох армованих штаб, прокатаних без армування, що мають шифр експерименту 5056-0-30, 6063-0-30, 6063-0-60 відповідно дорівнюють 353 МПа, 138 МПа, 140 МПа.

Результати розрахункової та експериментальної меж міцності композитів представлено в табл. 3.10.

На рисунку 3.12 представлено діаграму, яка показує співвідношення отриманої міцності (σ_B) до розрахункової міцності ($\sigma_{B(T)}$) прокатаних композитів. Причини не досягнення теоретичних значень під час експериментальних досліджень можливі через виникнення послідовності наступних процесів: концентрація напружень у вузлах сітки, а також поблизу поперечних дротів; розшарування; передчасний розрив дротів і розшарування матриці композиту з армуючою сіткою через геометричне викривлення ґратки сітки.

Таблиця 3.10 – Результати визначення розрахункової межі міцності у вигляді співвідношення експериментальної та розрахункової меж міцності

Шифр експерименту	Fw, %	σ_B , МПа	$\sigma_B(T)$	$\sigma_B / \sigma_B(T)$
5056-A-90-30	2,9	335	368,88	0,90
5056-A-45-30	3,29	377	371,02	1,02
5056-B-90-30	1,14	219	359,24	0,61
5056-B-45-30	2,73	365	367,95	0,99
6063-A-90-30	2,51	145	157,14	0,92
6063-A-45-30	4,35	141	171,17	0,82
6063-B-90-30	0,91	137	144,94	0,95
6063-B-45-30	3,51	138	164,77	0,84
6063-A-90-60	4,91	132	182,43	0,72
6063-A-45-60	4,00	154	174,57	0,88
6063-B-90-60	1,80	135	155,55	0,87
6063-B-45-60	5,79	149	190,03	0,78

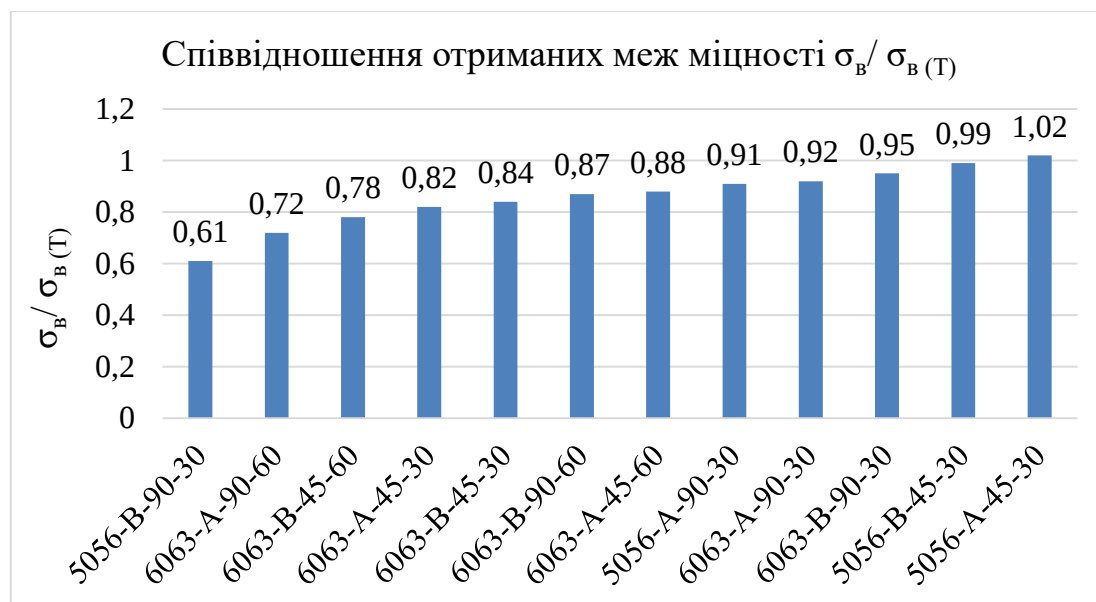


Рис. 3.12. Співвідношення отриманих експериментальних меж міцності (σ_B) до розрахункових меж міцності ($\sigma_B(T)$) прокатаних композитів

Руйнування дротів сітки при прокатці знижує механічні властивості всього композиту. Проте в деяких випадках армовані композити також покращують механічні властивості в порівнянні з механічними властивостями двох прокатаних штаб без армування. Це свідчить про те, що зміцнення композиту виникає внаслідок армування сіткою, а також від локального зміцнення алюмінієвої матриці дротами.

Встановлено, що максимальна розбіжність експериментальних та розрахункових значень не перевищує для межі міцності для композитів «Тип 90» і «Тип 45» – відповідно 39% та 22%

3.5.2 Порівняння розрахункової та експериментальної меж плинності прокатаних композитів

Розрахункова межа плинності розрахована аналогічно до формули межі міцності, тобто пропорційно до частини композитного поперечного перерізу, заповненого дротами (A_w) з урахуванням розрахункової межі плинності дроту $\sigma_{0,2}$.

$$\sigma_{0,2m} = (\eta)\sigma_{0,2} \frac{V_f}{V_{fm}} + \sigma_m(1 - \frac{V_f}{V_{fm}}), \quad (3.2)$$

де відповідно до [81]:

$\sigma_{0,2m}$ – межа плинності композиту;

η – ступінь деформації існуючий в діапазоні 1-0,5;

$\sigma_{0,2}$ – межа плинності армованого дротом композиту;

V_f – об'єм армування всередині композиту;

V_{fm} – об'єм композиту;

σ_m – межа плинності двох прокатаних штаб без армування;

В цьому дослідженні формула (3.2) була застосована при наступних умовах: коефіцієнт деформації η дорівнював 1; $\sigma_{0,2}$ розраховано за формулою, Н/мм²; замість співвідношення об'ємів $\frac{V_f}{V_{fm}}$ було застосовано поверхня A_w ; як межа

плинності матриці($\sigma_{0,2}$) використовувалося значення двох сумісно прокатаних штаб без армування для кожного експерименту («Тип 0»).

Зміну межі плинності пропонується описати в вигляді залежності (3.3):

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{0,20} + a \cdot \varepsilon^m, \quad (3.3)$$

где: $\sigma_{0,2}$ – початкове значення межі плинності для сталі X18H10T, яка застосовується для виготовлення дроту; a та m – емпіричні коефіцієнти, ε – відносна деформація по площі поперечного перетину дроту.

Значення коефіцієнтів в формулі (3.3) для апроксимації значень σ_T сталі X18H10T наведено в [104] і дорівнюють $a = 35$; $m = 0,76$; при початковій температурі 20 °С. Початкове значення напруження межі плинності $\sigma_{0,20}$ для сталі X18H10T дорівнює 220 МПа, яке було розраховано на розривній машині під час експериментів.

Відповідно до формули (3.3) змінний коефіцієнт межі плинності $\sigma_{0,2}$ при 30 % деформації дорівнює:

$$\sigma_{0,2} = 220 + 35 \cdot 30^{0,76};$$

$$\sigma_f = 684 \text{ МПа};$$

Відповідно до формули (3.3) змінний коефіцієнт межі плинності $\sigma_{0,2}$ при 60 % деформації дорівнює:

$$\sigma_{0,2} = 220 + 35 \cdot 60^{0,51439};$$

$$\sigma_f = 996 \text{ МПа};$$

Значення межі міцності для двох сумісно прокатаних штаб без армування з шифром зразків 5056-0-30, 6063-0-30, 6063-0-60 відповідно дорівнюють 183 МПа, 98 МПа, 128 МПа.

Результати розрахункової та експериментальної меж плинності композитів представлено в табл. 3.11.

Композити прокатані при 60% деформації показують найменшу збіжність результатів (рис. 3.13). При високих ступенях деформації армування композиту не покращують його властивості.

Таблиця 3.11 – Результати визначення розрахункової межі плинності у вигляді співвідношення експериментальної та розрахункової меж плинності

Шифр експерименту	Fw, %	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2(T)}$	$\sigma_{0,2}/\sigma_{0,2(T)}$
5056-A-90-30	2,9	199	197,53	1,01
5056-A-45-30	3,29	229	199,49	1,15
5056-B-90-30	1,14	162	188,71	0,86
5056-B-45-30	2, 73	205	196,68	1,04
6063-A-90-30	2,51	118	112,71	1,05
6063-A-45-30	4, 35	109	123,50	0,88
6063-B-90-30	0,91	103	103,33	1,00
6063-B-45-30	3,51	98	118,57	0,83
6063-A-90-60	4,91	113	170,62	0,66
6063-A-45-60	4,00	128	162,72	0,79
6063-B-90-60	1,80	112	143,63	0,78
6063-B-45-60	5,79	120	178,26	0,67

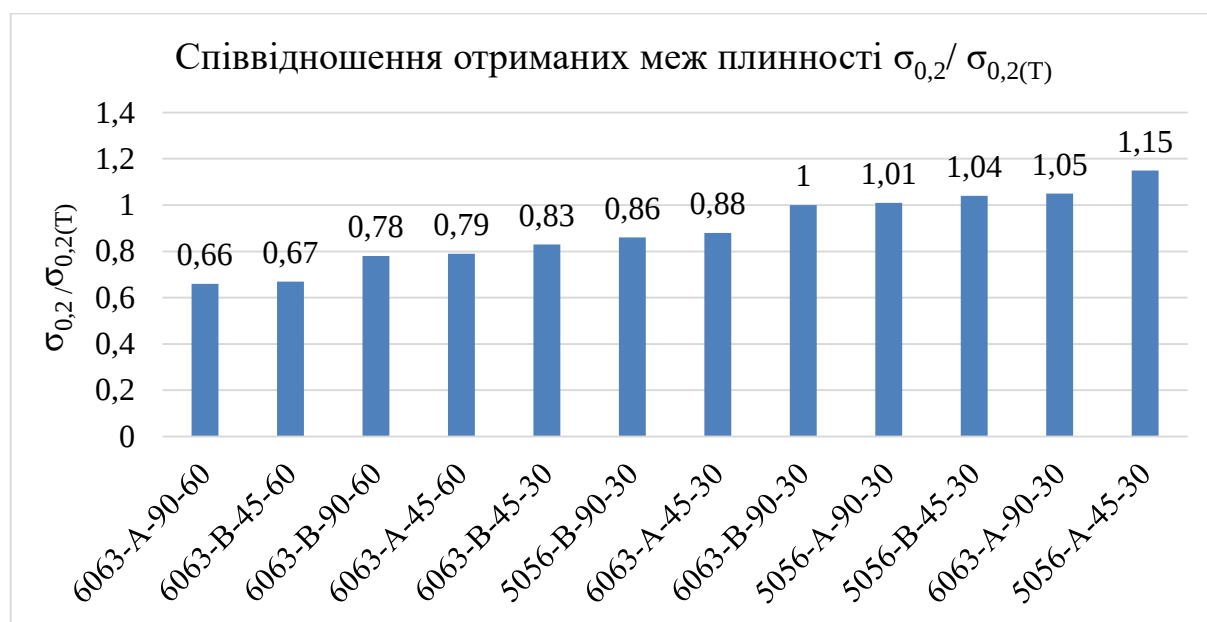


Рис. 3.13. Співвідношення отриманих експериментальних меж плинності ($\sigma_{0,2}$) до розрахункової межі плинності ($\sigma_{0,2(T)}$) прокатаних композитів

Слід відмітити, що в дослідженні [81], що розглянуто в розділі 1 (рис. 1.6) зазначено, що композити з армуючою фазою до 5%, мають не прямолінійну залежність. Саме в цій області здійснено це дослідження.

Композити прокатані з ступенем деформації 30% мають відхилення до 18%. Композиту з розташування армуючої фази під кутом 45° до напрямку прокатки мають 1...15% розбіжність як в сторону збільшення від розрахункових меж міцності та плинності, так і в сторону зменшення. Встановлено, що максимальна розбіжність експериментальних та розрахункових значень не перевищує для межі плинності композитів «Тип 90» і «Тип 45» відповідно 34% та 33%,

Загальним висновком щодо порівняння розрахункових та експериментальних значень межі міцності та плинності є те, 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».

3.6 Закономірності розшарування композитів зі сплавів EN AW -5056, EN AW -6063

При прокатці відбувається з'єднання шарів композиту, а саме між шарами матриці та між матрицею та армуючою фазою. При випробуваннях на розтягування відбувається розрив цих шарів за такими механізмами:

– «Розшарування → Відшарування частини шарів» (Р-Ш). Цей механізм проявляється, коли композит має низьку міцність з'єднання в системі матриця-матриця, а також відносно малу частину дротів в поперечному перерізі композиту (рис. 3.14).

– «Відшарування першого шару → обмежене розшарування → розшарування другого шару» (Ш1-Р-Ш2). Цей механізм є характерним для композиту, в якому частина поперечних дротів (відповідно до осі навантаження) менша та міцність з'єднання між матрицею та армуючою сіткою вища, ніж між матричними шарами. В цьому випадку плинність призводить до руйнування першого шару, армування «розщеплює» шари композиту (рис. 3.15). У цьому випадку відшарування може

бути обмежено всередині однієї чи кількох ґраткок сітки і не відбуватися протягом всієї довжини зразка.

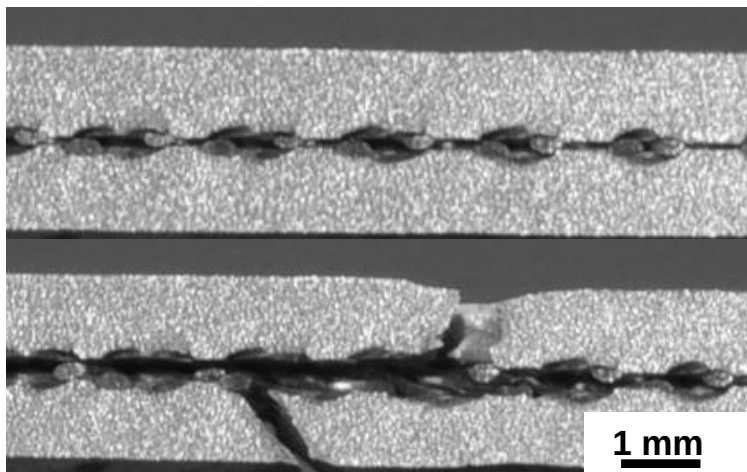


Рис. 3.14. Зразок “Р-ІІІ” механізму розриву композиту

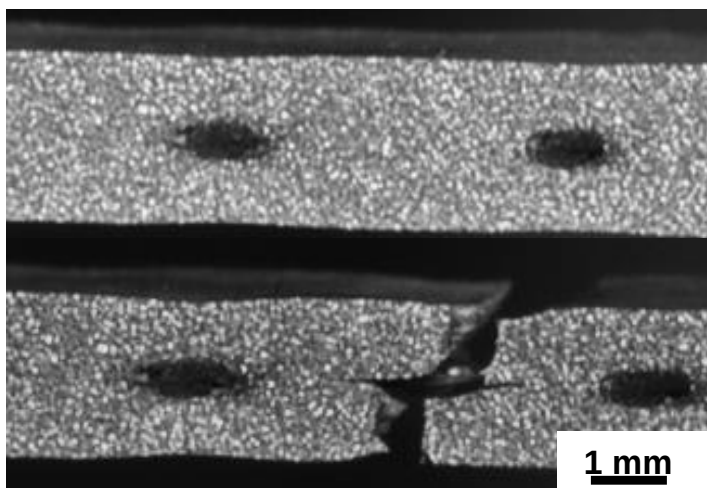


Рис. 3.15. Приклад “ІІІ1-Р-ІІІ2” механізму розриву композиту

– «Розрив без розшарування» (Р). Цей механізм характеризує композит з високою міцністю з’єднання як між шарами матриць, так і між шарами матриця-армуюча сітка, так само з значною частиною дротів в поперечному перерізі композиту (рис. 3.16).

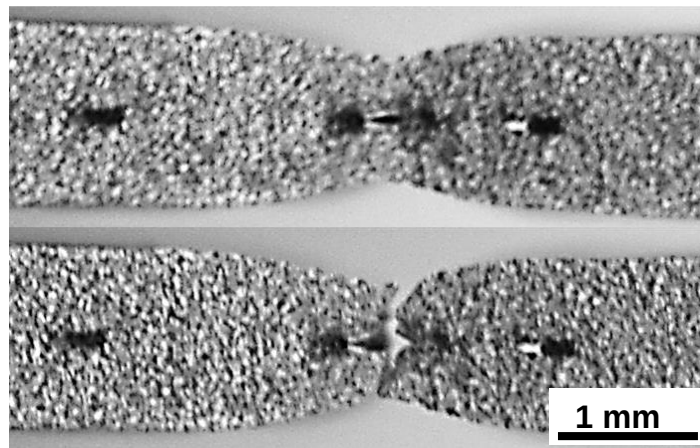


Рис. 3.16. Приклад “Р” механізму розриву композиту.

В таблиці 3.12 приведено аналіз механізму розриву композиту та механічні властивості армованих композитів.

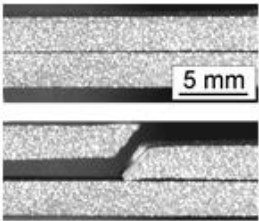
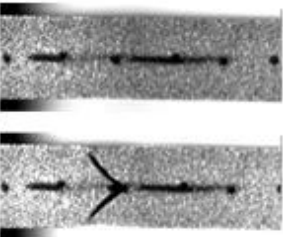
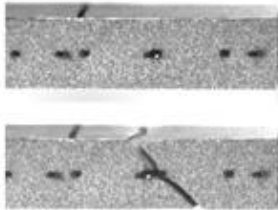
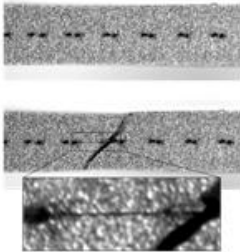
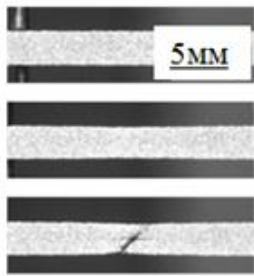
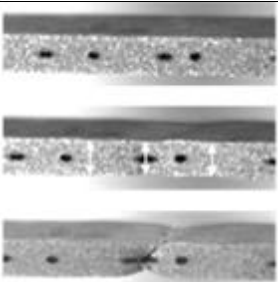
Ці три головні механізми змінюють один одного при збільшенні ступеню деформації при прокатці.

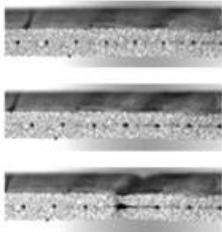
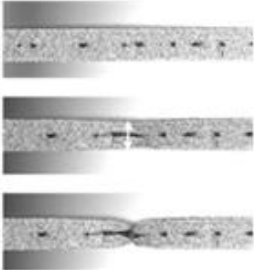
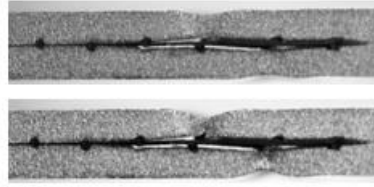
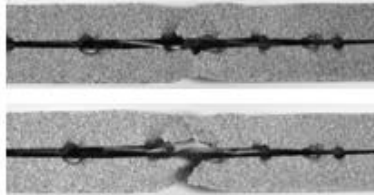
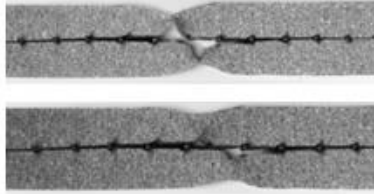
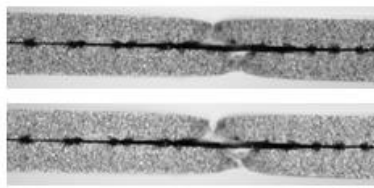
На основі проведеного аналізу, можна зробити висновок, що механізм «Розрив без розшарування» (Р) композиту характерний для композитів, прокатаних з ступенем деформації 60%, що свідчить про стайке з’єднання між шарами матриці та між армуючою складовою, а також про те, що відбув розрив дротів сітки в середині композиту. Хоча він поводить себе як суцільний композит, але показники межі міцності та межі плинності знаходяться в межах 135...154 МПа та 112...128 МПа, відповідно.

Механізм розриву композиту «Розшарування → відшарування частини шарів» (Р-Ш) характерний для композитів з невисоким з’єднанням між шарами матриці та між матрицею та армуючою фазою, про це свідчить показники межі міцності та межі плинності композитів, що знаходяться в межах 137...145 МПа та 98...118 МПа, відповідно.

Механізм розриву композиту «відшарування першого шару → обмежене розшарування → розшарування другого шару» (Ш1-Р-Ш2) має найбільші показники меж міцності та плинності 335...377 МПа та 183...229 МПа, що свідчить про найбільш вдале з’єднання шарів матриці, армуючої складової та матриці.

Таблиця 3.12 – Аналіз закономірностей розшарування композиту з механічними властивостями

Фото композиту	Шифр композиту	Тип розриву	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
1	2	3	4	5
	5056-0-30	Р-III	183 ± 2	353 ± 2
	5056-A-90-30	III1-P-III2	199 ± 2	335 ± 3
	5056-A-45-30	III1-P-III2	229 ± 6	377 ± 8
	5056-B-45-30	III1-P-III2	205 ± 2	365 ± 1
	6063-0-60	Р-III	128 ± 4	140 ± 3
	6063-A-45-60	Р	128 ± 4	154 ± 3

1	2	3	4	5
	6063-B-90-60	P	112 ± 3	135 ± 2
	6063-B-45-60	P	120 ± 2	149 ± 1
	6063-A-90-30	P-III	118 ± 2	145 ± 2
	6063-A-45-30	P-III	109 ± 4	141 ± 4
	6063-B-90-30	P-III	103 ± 3	137 ± 3
	6063-B-45-30	P-III	98 ± 5	138 ± 4

Залишилася незрозумілою присутність інтерметалевої фази під час досліджень світловим мікроскопом. Більшість малюнків показують малі проміжки, що з'являються між матрицею та дротом. Це відбувається через різні значення температурного коефіцієнту теплового розширення: для аустенітної сталі він дорівнює $16-18 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, для матриці на основі алюмінію – $23-25 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. В випадку проведеного дослідження близький контакт між матрицею та армуючою складовою був досягнутий при температурі прокатки. Потім холодження матриці

відбулося швидше, ніж охолодження армуючої фази. З-за цієї різниці між охолодженням матриці та армуючої фази виникають розтягуючі напруження на межі поверхонь алюмінію та сталі. Це означає, що немає сприятливих умов для зростання інтерметалевих фаз. Цей ефект прискорювався при значній передачі тепла від зразків до валків під час прокатки.

Таким чином, можна зробити висновок, що поліпшення властивостей армованих сіткою композитів обмежене завдяки накопиченню деформації в дротах сітки під час прокатки. Отже, коли ця деформація поєднується з додатковою локалізованою інтенсивною деформацією в вузлах сітки, цей ефект призводить до руйнування дроту та до погіршення властивостей всього композиту. Таким чином, існує протиріччя між напруженням, необхідним для належного зчеплення матричних шарів (при заданій температурі) та напружень, викликаних цією деформацією, що викликає надмірні напруження в армуючих дротах. Найбільш сприятливі результати в поздовжніх випробуваннях на розтягування були отримані при використанні зразків з армуючою сіткою, розташованою діагонально до осі прокатки. Поздовжня орієнтація дротів не приносить користі, а поперечна орієнтація небезпечна через концентрацію напружень під час випробувань.

Вперше встановлені характерні особливості руйнування армованих сталевую сіткою алюмінієвих композитів, отриманих сумісною прокаткою, під час механічних випробувань.

Особливості руйнування армованих композитів при випробуваннях на розтягування залежать від наступних факторів: 1) частина дротів у поперечному перерізі композиту, 2) властивості дротів, 3) орієнтація дротів до вісі прокатки, 4) властивості матриці, 5) міцність з'єднання між шарами матриці та між матрицею та армуючою фазою. Найлегший спосіб поліпшення властивостей зміцнення композиту - це не використання армуючої сітки. З іншого боку, поліпшення також могло б бути досягнуто за рахунок збільшення частки дротів у поперечному перерізі композитів. Однак це призводить до зростання питомої ваги композиту. У випадку використання сітки, це може бути сітка з мінімізованими виступами на

перехрестях дротів. Це може бути просічно-витяжна сітка. Однак подальші дослідження з іншими видами сітки лежать за межами цієї роботи.

3.7 Результати моделювання процесу у програмі Q-FORM

Математична модель побудована в програмному забезпеченні QForm. Моделювання процесу прокатки алюмінієвих штаб було досліджено в [105].

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 °C. В якості армуючої складової застосовувалась стальна сітка зі сплаву 1,4301 з розміром ґратки сітки 1×1 мм та діаметром 0,25 мм, що розташована діагонально до напрямку прокатки (рис. 3.17).

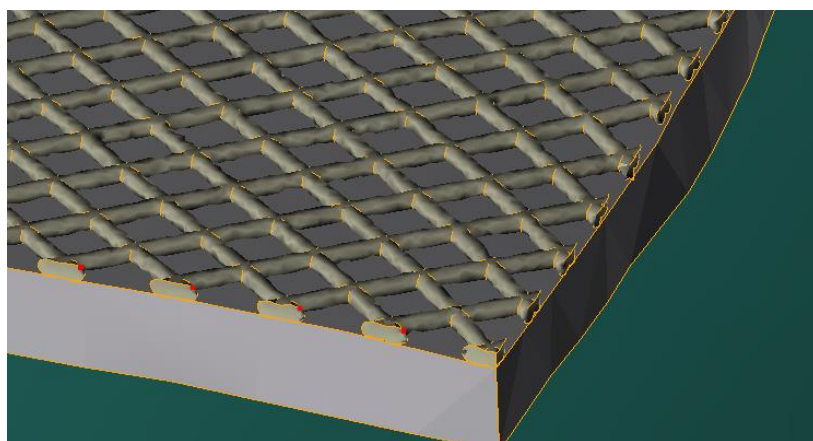


Рис. 3.17. Прокатані дві алюмінієві штаби з сталеву сіткою після моделювання, представлені без верхнього шару алюмінію

На рисунку 3.18 приведено поперечний переріз композиту після математичного моделювання прокатки армованих алюмінієвих композитів, які складаються з двох штаб сплаву EN AW-5056 з сталеву сіткою між ними.

Аналізуючи рис. 3.18 можна зробити висновок, що алюмінієвий шар рівномірно заповнює ґратки сітки. Моделювання дозволило отримати візуальну якісну збіжність поперечного перерізу композиту, отриману експериментально та за допомогою моделювання.



Рис. 3.18. Поперечний переріз армованого композиту після процесу моделювання, НП – напрям прокатки

Проведено моделювання та співставлено результати видовження ґратки та витяжки дротів сітки з експериментальними даними.

При експериментальних даних видовження ґратки сітки $\mu_c = 1,38$, а витяжки дротів сітки становить $\mu_{w(45)} = 1,21$ (згідно таблиці 3.3).

За результатами моделювання видовження ґратки сітки $\mu_c = 1,31$, а витяжка дротів сітки становить $\mu_{w(45)} = 1,19$.

Порівняння результатів моделювання з видовження ґратки та витяжки дротів сітки з експериментальними даними показало відхилення результатів розрахунків 5,6 % та 2%, відповідно.

Отримані результати свідчать про досить високу збіжність результатів розрахунків та адекватність побудованої в скінченно-елементному середовищі QForm моделі.

Висновки до розділу 3

1) Вплив орієнтації армуючої сітки між шарами матриці на деформацію композиту та його механічні властивості дозволив встановити, що діагонально орієнтована сітка сприяє потоку металу матриці.

2) Аналіз результатів випробувань на розтягування показав, що всі армовані композити «Тип 45», порівняно з двома прокатаними штабами без армування, мають більші значення межі міцності на 3...10 % та межі плинності на 12...25%.

3) Композит з меншими розмірами ґратки сітки (1×1 мм), демонструє більше розширення порівняно з зразками з розміром ґратки сітки 3×3 .

4) Співвідношення між коефіцієнтами витяжки дротів сітки μ_w з урахуванням витяжки ґратки сітки і коефіцієнтами видовження всього композиту μ_Σ , а також частини сітки в поперечному перерізі композиту A_w є індикатором цілісності дротів сітки у складі композиту. Коефіцієнт витяжки дроту з урахуванням витяжки ґратки повинен бути співвіднесений з загальним коефіцієнтом витяжки композиту, щоб уникнути розриву дроту в композиті. Якщо загальний коефіцієнт витяжки композиту μ_Σ вищий, ніж коефіцієнт витяжки дроту та ґратки сітки, то існує висока ймовірність розриву дроту в середині композиту під час прокатки.

5) Загальним висновком щодо порівняння розрахункових та експериментальних значень межі міцності та межі плинності є твердження, що в проведених серії експериментів з часткою армуючої фази в поперечному перерізі меншою, ніж 5%, вдалося досягти теоретичних значень міцності в одному випадку (див. Рис. 3.12) та межі плинності у п'яти випадках (див. Рис. 3.13). 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».

6) Вперше встановлені характерні особливості руйнування армованих сталевую сіткою алюмінієвих композитів, отриманих сумісною прокаткою, під час механічних випробувань.

Проведена оцінка стадіям руйнування композиту під час випробувань на статичне розтягування дозволила встановити закономірність розшарування композиту. Яка полягає в тому, що виділено три механізми руйнування композиту: «Розшарування $\rightarrow$ відшарування частини шарів»; «Відшарування першого шару $\rightarrow$ обмежене розшарування $\rightarrow$ розшарування другого шару»; «Розрив без розшарування». Кожен з них залежить від наступних факторів: 1)

частина дротів у поперечному перерізі композиту, 2) властивості дротів, 3) орієнтація дротів до вісі прокатки, 4) властивості матриці, 5) міцність з'єднання між шарами матриці та між матрицею та армуючою фазою.

7). З метою майбутньої можливості розширення результатів проектування технології з іншими розмірами складових композиту, виконано моделювання прокатки двох алюмінієвих штаб при ступені деформації 30%, температурі прокатки 500 °C. Розмір алюмінієвих штаб – 3×36×120 мм, що виготовлені зі сплаву EN AW-5056. Сталева сітка – зі сплаву 1,4301 з розміром ґратки сітки 1×1мм 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. Отримані результати свідчать про досить високу збіжність результатів розрахунків та адекватність побудованої в скінченно-елементу середовищі QForm моделі. Моделювання дозволило отримати візуальну якісну збіжність поперечного перерізу композиту, що прокатаний експериментально та за допомогою моделювання. Це дає можливість розширення проектування технології з іншими розмірами складових композиту.

РОЗДІЛ 4

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДЕФОРМАЦІЇ НА ФОРМОЗМІНУ СІТКИ ТА
МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АРМОВАНОГО КОМПОЗИТУ

4.1 Вплив параметрів деформації на формозміну сітки у складі композиту з матрицею зі сплаву EN AW-5083

Попередні дослідження показали, що найбільш оптимальне розташування сітки в композиті під кутом 45° до напрямку прокатки. Ці дослідження також підтверджені в роботі [106], де з'ясовано, що алюмінієві композити, армовані сталевою сіткою під кутом 45° до напрямку прокатки, показують найкращі механічні властивості, порівняно з композитами, що мають розташування армуючої фази під іншим кутом напрямку прокатки.

З огляду на це приведена серія експериментів, що була проведена при різних ступенях деформації, з розташуванням сітки під кутом 45° до напрямку прокатки.

Ця серія досліджень була проведена для композиту з матрицею зі сплаву ENAW-5083 (хімічний склад наведено в табл. 2.1), обґрунтування доцільності використання якого приведено в розділі 2. Розміри зразків для прокатки ($h \times b \times l$) складали: $3,1 \times 120 \times 240$ мм. В якості армуючого матеріалу використовувалася сітка з кутом 90° з нержавіючої сталі EN 1.4301 з діаметром дроту сітки 0,5 мм та розміром ґратки сітки 1×1 мм.

Кожна заготовка з сталевою сіткою між алюмінієвими шарами була попередньо закріплена в кутах алюмінієвими заклепками. Конфігурація заготовки для прокатки була наступна (рис.4.1):

- «Тип 45» – дроти сітки, орієнтовані під кутом 45° (діагонально) до напрямку прокатки;
- «Тип 0» - без армуючої сітки.

Зразки попередньо нагрівали в електричній печі до температури 500°C та прогрівали протягом 20 хвилин перед прокаткою. Прокат здійснювався за один прохід на двовалковому стані з діаметром валку 210 мм при горизонтальній

швидкості обертання валків 23,5 м/хв. Номінальний ступінь деформації при прокатці змінювався і складав 25, 30, 35, 45 і 55%.

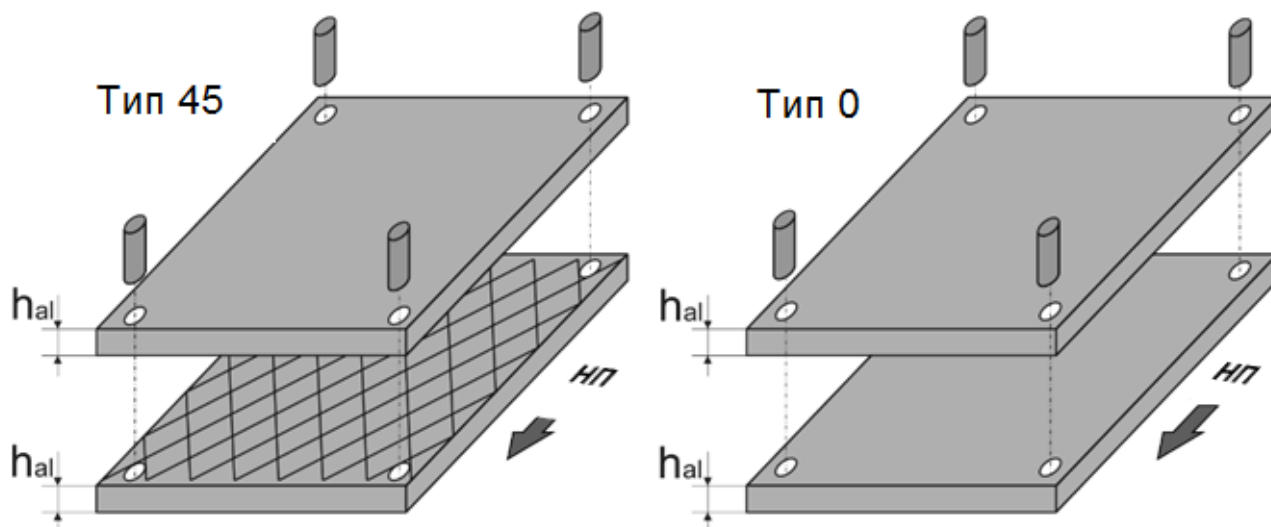


Рис. 4.1. Схема підготовки заготовок прокатки армованих композитів:
НП - напрям прокатки, h_{al} -початкова товщина алюмінієвих штаб

Для розвитку дифузійного з'єднання між шарами матриці половина прокатаних композитів була піддана термічній обробці при 500 °С протягом 2 годин. Після термічної обробки армованих композитів було підготовлено поперечні перерізи у поздовжніх та поперечних (до напрямку прокатки) площинах для аналізу положення та форми дротів сітки в матеріалі матриці у відповідності до методики, що описана в розділі 2.

На рисунку 4.2 наведено схему для оцінки коефіцієнту витяжки та овалізації дроту всередині композиту «Тип 45» та для розрахунків параметрів деформації сітки.

Зразки відбирали з використанням абразивної відрізної машини. Армовані штаби, з'єднані прокаткою при ступені деформації до 45%, були піддані випробуванню на розшарування [107]. Один з шарів матриці було видалено.

Композит, який прокатаний при 55% деформації, має таку міцність з'єднання, що відшарування неможливе без пошкодження алюмінієвих шарів. У цьому випадку один з алюмінієвих шарів був хімічно видалений з використанням 5% -ного розчину NaOH, доки стало видно сітку. Форма та положення дротів у

поперечному перерізі та всередині композиту проаналізовано та виміряно за допомогою цифрового мікроскопа Keyence VHX5000.

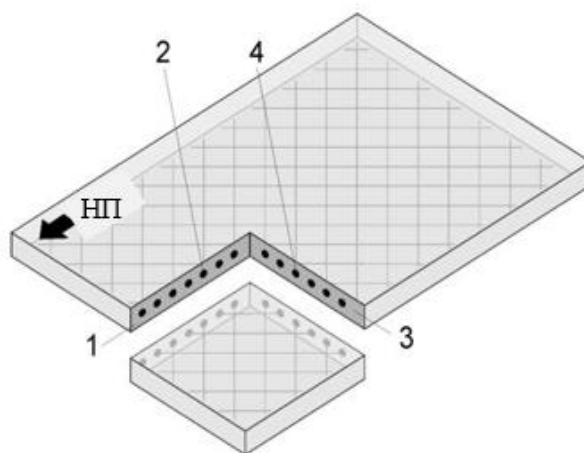


Рис. 4.2. Схема для оцінки коефіцієнту витяжки та овалізації дроту всередині композиту «Тип 45»: НП - напрямок прокатки; 1 - поздовжня площина поперечного перерізу композиту; 2 – проекція дроту на поздовжній площині; 3 - поперечна площина поперечного перерізу композиту; 4 - проекція дроту на поперечній площині

Аналіз зони руйнування зв'язків між дротами сітки та алюмінієвою матрицею проводився на поперечних перерізах композитів із застосуванням скануючого електронного мікроскопу Zeiss Ultra Plus. Для вимірювання градієнтів хімічного складу в зоні з'єднання використовувалась енергетично-дисперсійна рентгенівська спектроскопія.

Підготовка зразків, розрахунок овалізації дротів та проведення випробувань на розтягування проводилось аналогічно попереднього експерименту. Також було проведено ударні випробування, особливості яких описані в розділі 2.

Явне відшарування композитів під час процесу з'єднання прокаткою, а також на виході з прокатного стану не спостерігалось для всього ряду експериментів. Навпаки, зразки без армуючої фази, прокатані зі ступенем деформації 25-35%, були розшаровані під час випробувань на розтягування. Під час прокатки дроти досить однорідно заповнили довжину і ширину композитних

штаб. Відсутні видимі тріщини, прогалин не виявлено. Розширення композитів після прокатки становило 1...2%. Хімічне видалення одного з матричних шарів показало, що ґратки сітки всередині композиту деформувалися нерівномірно при різних ступенях деформації (рис. 4.3).

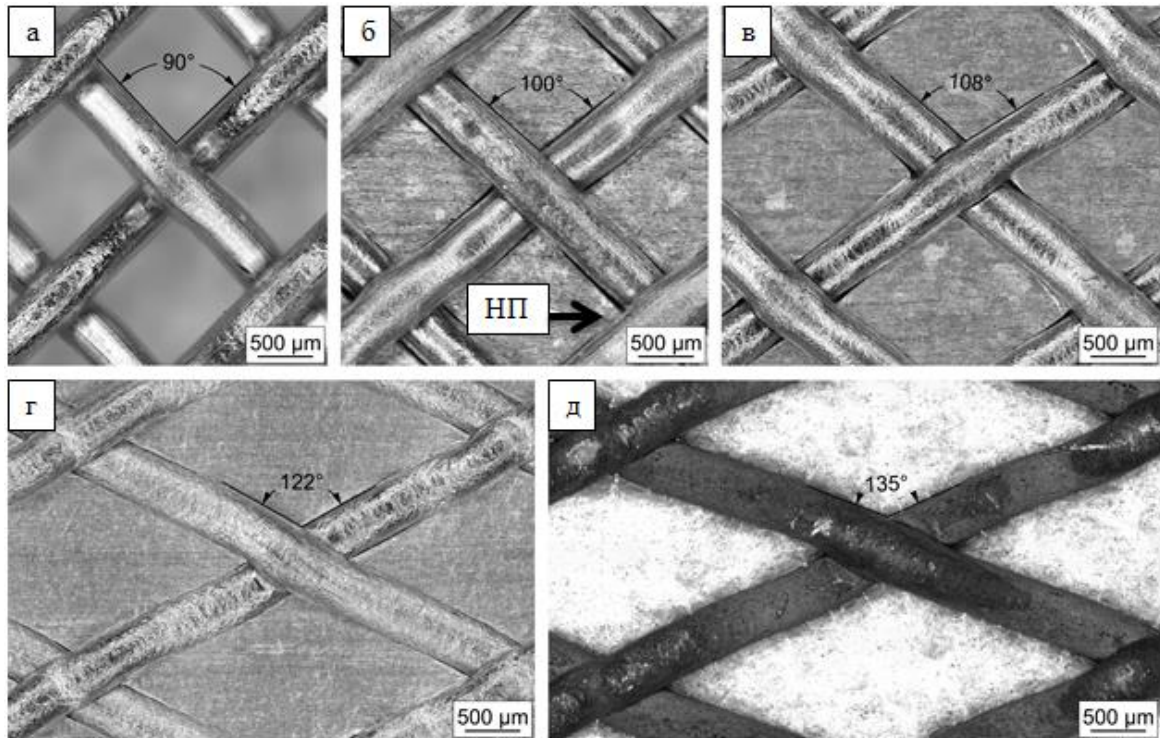


Рис. 4.3. Мікрофотографії перетинів дротів сітки всередині прокатаного композиту «Тип 45» після прокатки: а - 0% (початкова ґратка сітки); б - 25%; в - 30%; г - 45%, д - 55%; НП - напрямок прокатки

Зростання деформації в досліджуваному діапазоні передбачувано призводить до зміни кута між дротами з 90° з початкової ґратки сітки (рис.4.3а) до 135° в композитах, прокатаних при 55% деформації (рис.4.3д). Найменша трансформація ґратки сітки при цьому спостерігається при ступенях деформації 30...45%. Аналіз ділянки перетину дротів сітки (рис. 4.3 і 4.4) показує, що поблизу цих перехресть можна виявити зони локалізованої інтенсивної деформації. Їх поява обумовлена стисненням дроту до дроту та одночасним переміщенням цих перехресть в напрямку прокатки через осьове напруження та витяжку всього композиту.

Однак, перехрестях дротів існує певна «насиченість» – зупинка процесу втискання дротів один в один. Зі збільшенням ступеню деформації при прокатці дроти більше не були втиснуті один в одного, а деформували в м'яку алюмінієву матрицю навколо них.

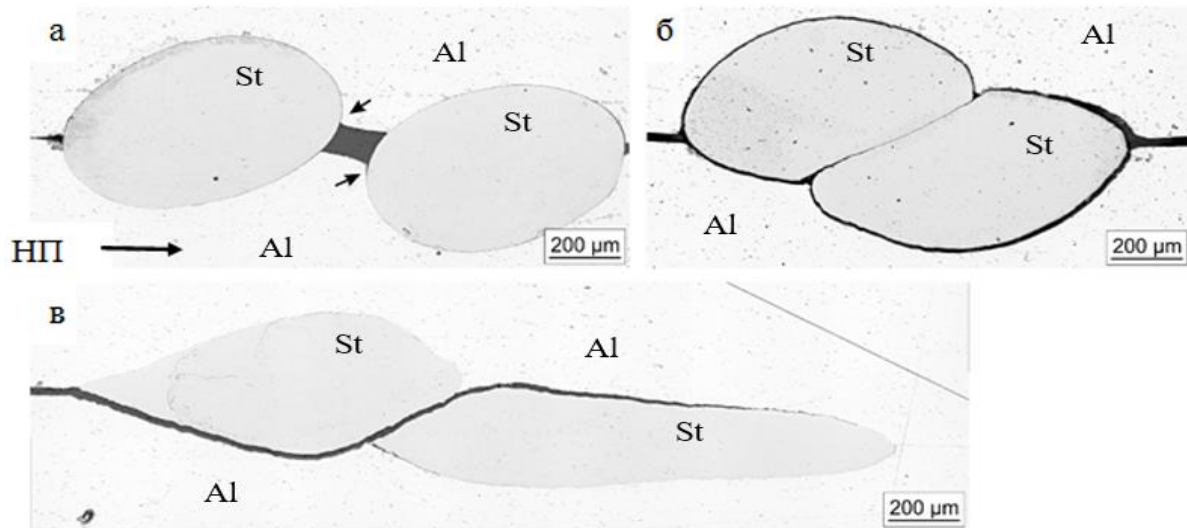


Рис. 4.4. Приклад позиції дротів сітки між матрицями сплаву EN AW -5083 поблизу перехресть дротів: а - ступінь деформації 25%; б - ступінь деформації 35%; с - ступінь деформації 55%;. НП - напрямок прокатки. Стрілки вказують на зайняті області, які забезпечують з'єднання за допомогою зв'язку «Zip-з'єднання».

З'єднання, яке спостерігається в армованому композиті при відносно низьких ступенях деформації (25%) при прокатці, призвело до зміни форми ґратки сітки та повороту трохи овалізованого дроту. Такий механізм з'єднання можна назвати «Zip-з'єднання». На рисунку 4.5 представлений приклад такого з'єднання. Границі матриці, що забезпечують таке з'єднання композиту, відмічені стрілками на рисунку 4.5.

Такий тип з'єднання спостерігався в даних експериментах до ступеню деформації 45%. А після досягнення 35% деформації поруч з «Zip-з'єднанням» з'являються численні області з'єднання між шарами матриці, так само як між шарами матриці 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 за відомими даними з'єднання шарів матриці нестабільне, або навіть неможливе. Подальше дослідження співвідношення механізмів з'єднання шарів в композиті лежить поза рамками даної роботи.

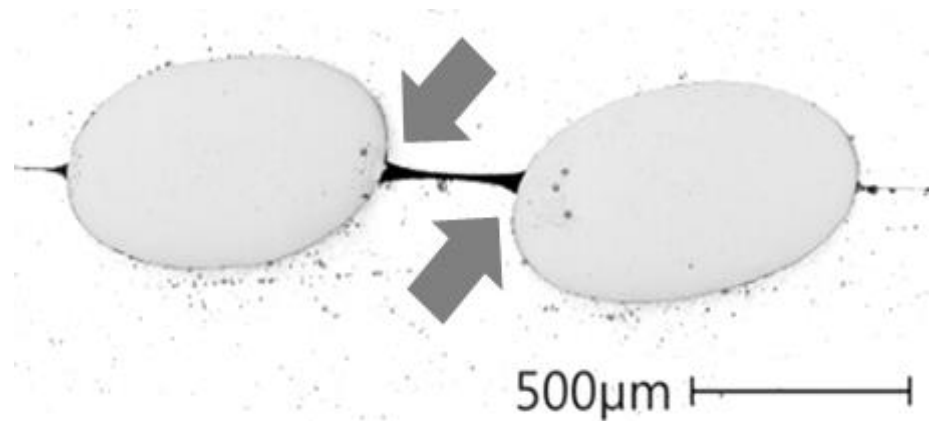


Рис. 4.5. Приклад позиції дроту сітки між шарами матриці зі сплаву EN AW-5083 при ступені деформації 25%. Стрілки вказують на зайняті області, які забезпечують «Zir-z'єднання»

Подальше збільшення деформації при прокатці призводить до значної овалізації, сплюснення дротів сітки, які усувають «Zir-z'єднання». У таблиці 4.1 наведені дані про коефіцієнти витяжки композиту та дротів в ньому, а також овалізацію дротів сітки всередині композиту залежно від ступеня деформації при прокатці за один прохід. Слід зазначити, що композити, прокатані зі ступенем деформації 45 та 55%, вже мають вміст армуючої фази більший за 5%.

У всіх випадках коефіцієнт витяжки дротів сітки з урахуванням видовження ґратки сітки μ_c , був більшим, ніж загальний коефіцієнт витяжки всього композиту μ_Σ . Цей висновок вказує на те, що в дротах сітки не було розриву після прокатки [108].

Для випадку армування сіткою, що розташована під кутом 45° до напрямку прокатки, коефіцієнт витяжки не може бути безпосередньо співвіднесений з витяжкою всього композиту, оскільки сталеві сітка має декілька особливостей, які зменшують її коефіцієнт витяжки порівняно з коефіцієнтом витяжки всього композиту:

Сталева сітка має не рівну форму, тобто на перехрестях дротів сітки є вигін сітки, при деформації сітка спочатку вирівнюється та вдавлюється одна в одну на перехресті, а потім починає видовжуватися.

Таблиця 4.1 – Параметри деформації прокатних композитів з матрицею зі сплаву EN AW -5083 за один прохід з різними номінальними ступенями деформації при $h_0 = 6,2$ мм

Код експерименту*	h_1	μ_Σ	μ_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	-	-	-	-	-

Спочатку видовжуються дроти сітки, а кут між дротами сітки збільшується з 90° до 135° , як показано на рис. 4.5.

Рисунок 4.6 візуалізує дані таблиці 4.1. та ілюструє різні види переважної деформації дроту всередині композиту в залежності від ступеня деформації при прокатці:

25...30% деформації – переважна деформація сітки – трансформація ґраток. Завдяки наявності вигинів сітки в перехрестях дротів, трансформація ґратки призводить до обертання дроту і забезпечує «Zip-з'єднання»;

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

35...45% деформації – переважним механізмом деформації дроту є його овалізація та заповнення сформованої матрицею порожнини.

45...55% деформації – овалізація дротів підсилюється, інші параметри деформації дроту набувають відповідності до витяжки всього композиту.

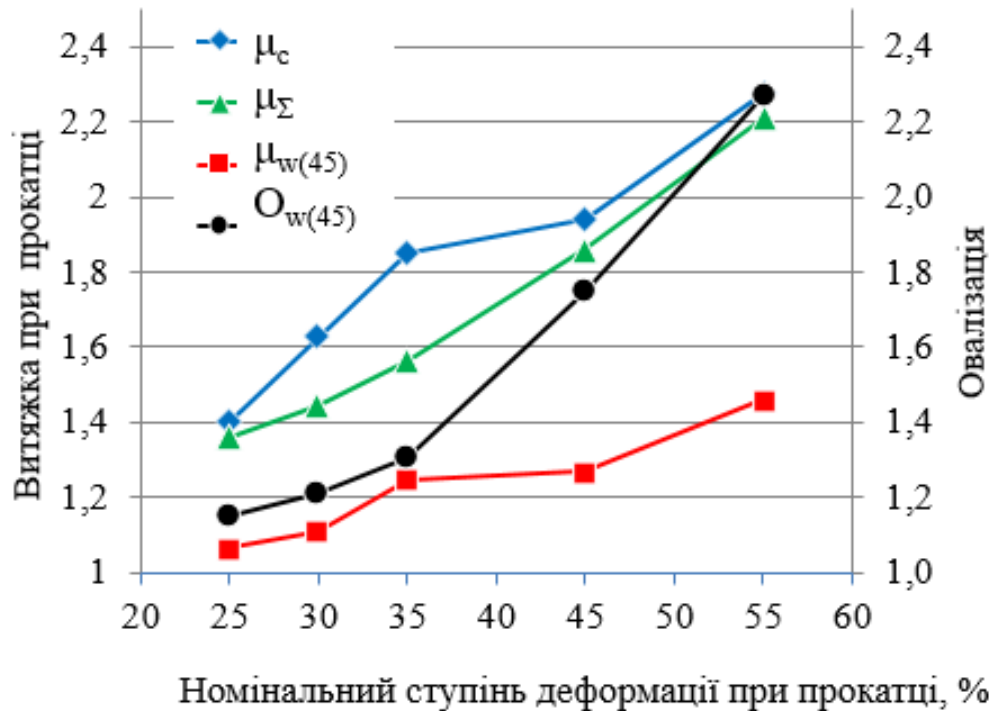


Рис. 4.6. Параметри деформації всього композиту та армуючої сітки в залежності від ступеня деформації при прокатці: μ_c - коефіцієнт видовження ґратки сітки; μ_Σ - коефіцієнт витяжки всього композиту; $\mu_{w(45)}$ - коефіцієнт витяжки дротів сітки; $O_{w(45)}$ - овалізація дротів після прокатки [109]

Зображення світлового мікроскопу поздовжніх та поперечних перерізів композитів, що прокатані при різних ступенях деформації, представлені на рис. 4.7. Зазор між шарами матриці можна побачити в композитах, прокатаних при 25% деформації. Матеріал матриці не зміг заповнити порожнини між сусідніми дротами. Цей факт можна також спостерігати поблизу перехресть дротів (рис. 4.4).

У зонах перехресть дротів утворюються складні пустоти, які важко заповнити текучим алюмінієм під час прокатки. Проте, при збільшенні ступеня деформації, алюміній заповнює сітку, що армує композит, а міцний зв'язок між шарами матриці і дротами сітки, може бути досягнутий на поверхнях, що з'єдналися, як видно на рисунку 4.7б та 4.7в.

Заповнення порожнин поблизу перехресть дротів також покращується при збільшенні ступеня деформації. Після досягнення ступеня деформації 35%, дроти

сітки повністю покриті шарами алюмінію. Єдине виключення є при прямому контакті з поверхнею двох перехресних дротів сітки (рис. 4.4б).

Рисунки 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 та 4.9 дозволяють виділити три етапи розвитку впливу параметрів деформації на з'єднання фаз в композиті:

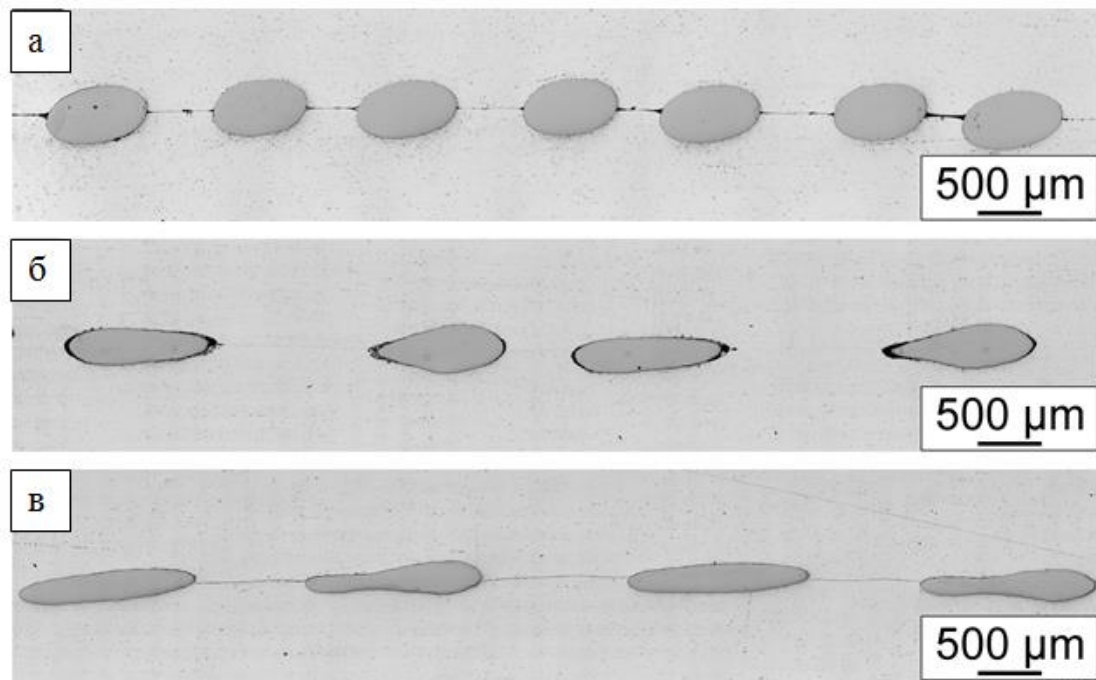


Рис. 4.7. Поперечні ділянки композиту при різних ступенях деформації при прокатці: а - 25%, б - 45%, в - 55%

а) деформація 25...35%. Цей діапазон показує інтенсивну трансформацію ґраток сітки, майже постійну невелику овалізацію дроту та зростаюче зменшення поперечного перерізу дроту. Така поведінка при деформації забезпечує вищезгадане скріплення «Zір-з'єднання»(рис.4.7а та 4.8).

Поверхня між алюмінієвими матрицями після прокатки із ступенем деформації 25% показала відсутність пластичного руйнування після механічного розшарування композиту (рис. 4.9). Це вказує на відсутність дифузійного з'єднання між алюмінієвими шарами. З іншого боку, спостерігались сліди подряпин на боках паза, утвореного дротом, що закатаний в матричні шари. Формування таких слідів деформації підтверджує механізм «Zір-з'єднання», коли дріт огорнутий алюмінієвою матрицею, утворює з'єднання, отримане прокаткою.

Розшарування композиту в даному випадку можливе, коли алюміній, що огортає дроти сітки, деформується або розривається.

б) деформація 35...45%. Метал матриць повністю заповнює ґратки сітки та формує схему локалізованих контактних поверхонь між алюмінієвими шарами та відбитками дротів. Вертикальний тиск (напруження) збільшується на цих поверхнях. Пластичний потік заповнення ґратки алюмінієм обмежений і направлений дротами сітки. На цьому етапі зменшується інтенсивність викривлення ґратки сітки, а також витяжка дроту. Це може бути пов'язане з більш високим тертям, що перешкоджає деформації дротів між з'єднаними матричними шарами. Овалізація дротів значно зростає (рис. 4.7б).

Після розшарування зразків спостерігалися порожнини в алюмінієвій матриці з дротом, що розташований під кутом до напрямку прокатки (Рис. 4.9). Аналогічні порожнечі також спостерігалися у Huagui Huang і співавторів у штабах з дротами всередині, що отримані валковим розливом-прокатки [106].

с) деформація 45...55%. На цьому етапі спостерігалася інтенсивна овалізація дроту. Видовження ґратки сітки і витяжка дротів сітки стали майже пропорційними до витяжки всього композиту. Одночасно надзвичайно овалізовані дроти схожі на ножі, що розщеплюють матричні шари (рис. 4.7 в). Сильно деформована ґратка сітки і інтенсивно спотворені дроти ініціюють локалізовану пластичну деформацію алюмінію і, таким чином, забезпечують міцне зчеплення між матричними шарами поблизу краю сплющеного дроту. Рис. 4.8). Руйнування на перехресті дротів не виявлено, але зустрічалося на краях ґратки сітки. Це вказує на те, що критичне значення ступеня деформації при прокатці, що призвело до руйнування дротів під час отримання композитів, не було досягнуто в даній експериментальній серії [98]. Цей діапазон ступеня деформації при прокатці не можна рекомендувати для використання у виробництві композитів.

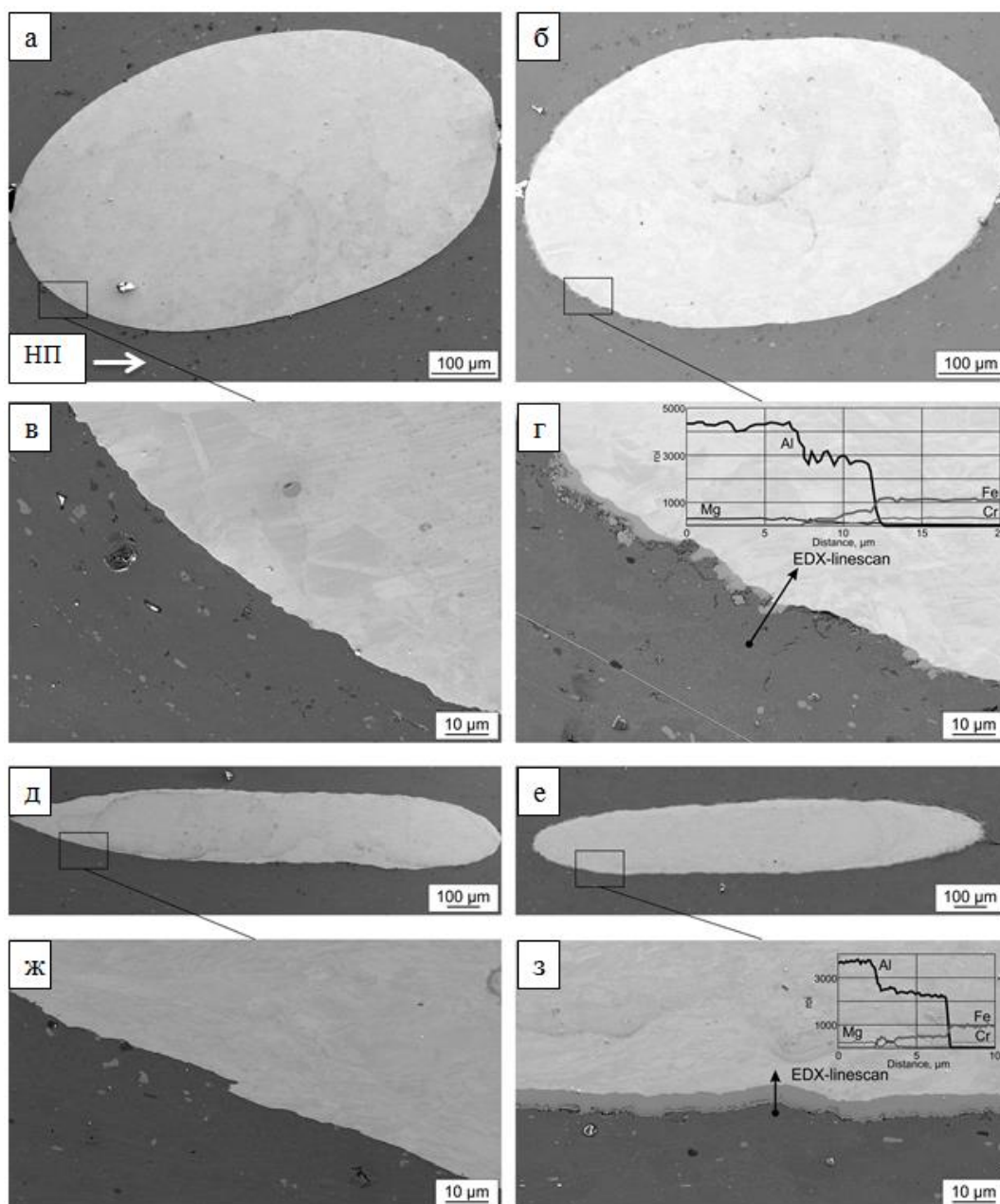


Рис. 4.8. Зона з'єднання між алюмінієвою матрицею та сіткою, що армує композит: а, б, в, г – ступінь деформації 25%, д, е, ж, з - ступінь деформації 55%; а, в, д, з, - після прокатки; б, г, е, з - після термічної обробки при 500°C, 2 години. НП - напрям прокатки. Електронні зображення скануючого електронного мікроскопу (SEM) Zeiss Ultra Plus, 5кВ, г, з – енергетично-дисперсійна рентгенівська спектроскопія, 5кВ [109]

Незважаючи на гарне покриття алюмінієм дrotів під час прокатки, на поверхні контакту не спостерігалось дифузійного шару для всього діапазону

ступенів деформації (рис. 4.8а, 4.8в, 4.8д, 4.8ж). У той же час після термічної обробки на межі між дротами та матрицею видно шар інтерметалічних фаз.

Товщина цього шару залежить від ступеню деформації при прокатці. У композиті, прокатаному при 25% деформації, інтерметалічні фази спостерігаються лише в деяких областях поверхні з'єднання дрот-матриця. Їх товщина вимірювана за допомогою енергетично-дисперсійного рентгенівського спектроскопа - EDX-сканера і становить приблизно 6 мкм (рис.4.8г). Форма кривих на рисунку 4.8г, яка показує градієнти концентрації Al, Fe, Mg та Cr у зоні з'єднання, підтверджує наявність інтерметалевих фаз Fe-Al, Fe-Al-Mg та (Fe, Cr) - Al системи [110].

Формування інтерметалевих фаз під час термічної обробки вказує на жорсткий початковий контакт між двома металами. У композитах, що прокатані при 55% деформації, цей шар безперервний і охоплює весь периметр дроту. Товщина шарів інтерметалевих фаз, утворених в смугу під час термічної обробки, становить приблизно 6 мкм (рис. 4.8з).

Як показано на Рис. 4.8, термічна обробка при 500 °C сприяла утворенню безперервного шару інтерметалевих фаз і призвела до усунення деформаційного зміцнення та залишкових напружень у композиті.

Чітку межу між матричними шарами можна побачити у композиті, що прокатаний при ступені деформації 25% (рис. 4.7а). Матеріал матриці не зміг заповнити проміжки між сусідніми дротами. При зростанні ступеню деформації, алюміній заповнює армуючу сітку і може бути досягнуто міцне з'єднання між матричними шарами. Після термічної обробки шар інтерметалевих фаз товщиною близько 3 мкм видно на поверхні з'єднання між дротами та матрицею. Формування інтерметалічних фаз свідчить про жорсткий контакт між двома металами. У композиті, що прокатаний зі ступенем деформації 55%, цей шар безперервний і охоплює весь периметр дроту. Навпаки, в композиті, що прокатаний при ступеню деформації 25%, інтерметаліди спостерігались лише в деяких областях поверхні з'єднання сітки та матриці.

Зображення з електронного скануючого мікроскопа розшарованої армованої штаби, прокатої при 25% деформації, представлено на рисунку 4.9. Аналіз з'єднаної поверхні між алюмінієвими матрицями показав відсутність пластичного розриву (рис 4.9в). Це вказує на відсутність дифузного з'єднання між алюмінієвими шарами. На краю канавки, утвореної затиснутим дротом, можна чітко помітити сліди подряпин (рис 4.9г). Вони утворилися під час розшарування композиту, коли дріт був вилучений з місця в канавці, одночасно деформуючи алюмінієву матрицю.

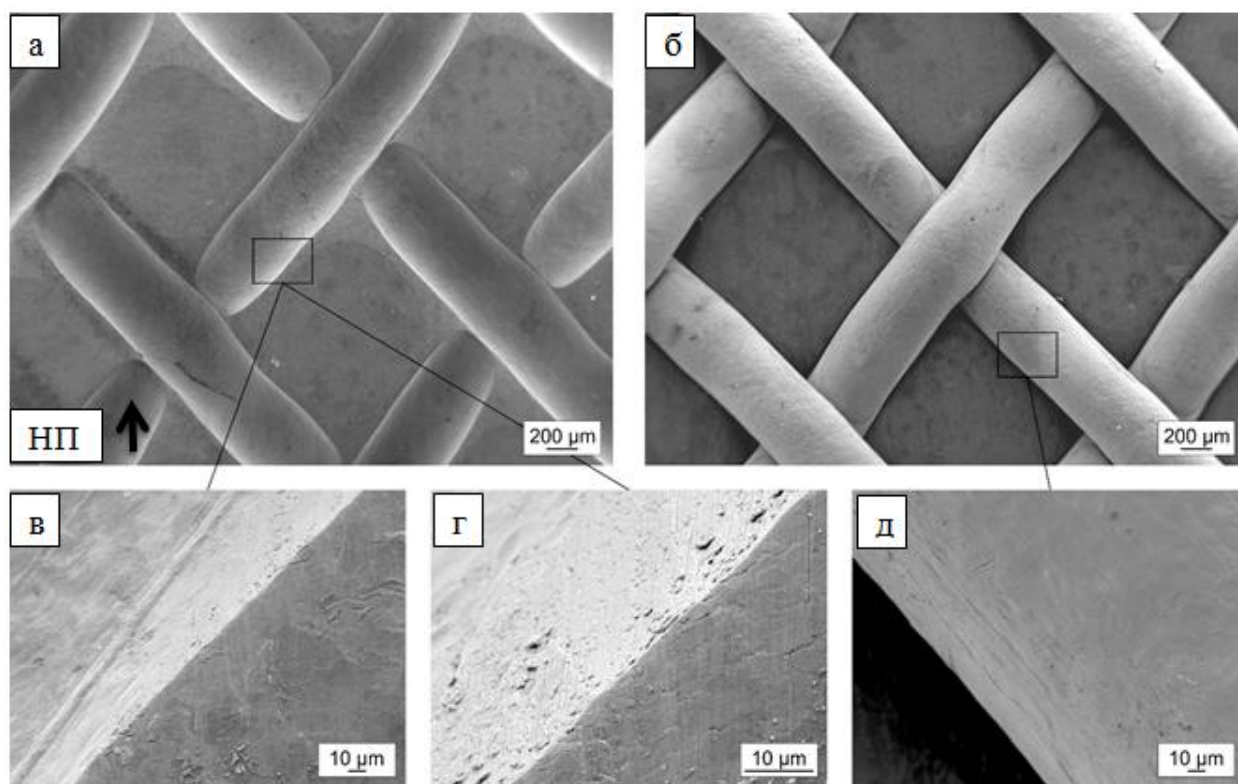


Рис. 4.9. Зображення з електронного скануючого мікроскопа розшарованих поверхонь композиту, прокатої при 25% деформації: а – очищена поверхня алюмінію, б – очищена поверхня армуючих дротів, в, г – нерівності поверхні дроту; д – поверхня дроту НП – напрям прокатки

Формування слідів деформації, що видно на рис. 4.9г підтверджує механізм «Zір-з'єднання», коли дріт огорнутий алюмінієвою матрицею, утворює не дифузне з'єднання.

Поверхня дроту, показана на рис. 4.9д, не має жодних слідів пластичного перелому, що свідчить про відсутність жорсткого дифузійного з'єднання між дротами та алюмінієвою матрицею при ступені деформації 25%.

На рисунку 4.10 представлено зображення з електронного скануючого мікроскопу розшарованого композиту, прокатаного при 35% деформації. Просліджується більш посилена контактна поверхня між дротом і алюмінієвою матрицею, а також більш овальні дроти, порівняно з прокаткою при 25% деформації. Дискретні сліди пластичних переломів спостерігаються на раніше з'єднаній поверхні між алюмінієвими шарами (рис. 4.10в) та на поверхні дроту (рис. 4.10д).

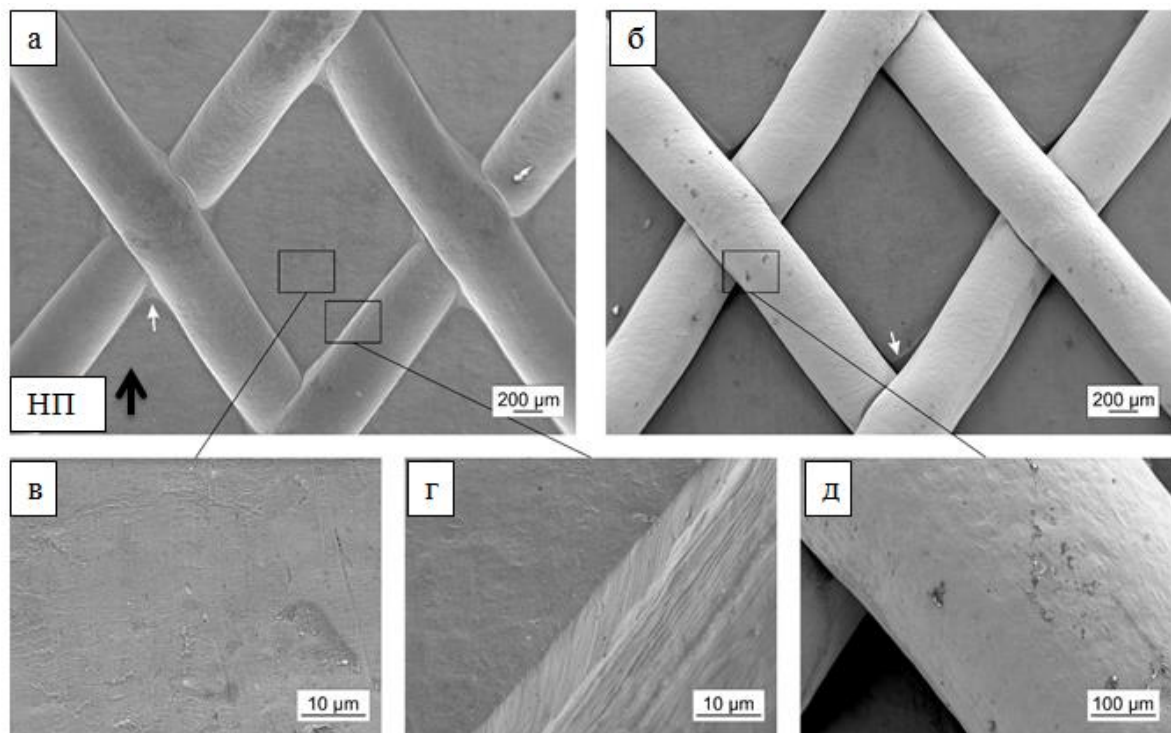


Рис. 4.10. Зображення з електронного скануючого мікроскопу розшарованих поверхонь композиту, прокатаного при ступені деформації 35%: а, в – очищена поверхня алюмінію, б – очищена поверхня армуючих дротів; г – нерівності поверхні дроту; д – поверхня дроту НП – напрям прокатки

На краю впадини на рис. 4.10г показані сліди деформації, що відносяться до «Zір-з'єднання», аналогічно рис. 4.9г. В алюмінієвій матриці поблизу дротів на

рисунках 4.10а, 4.10б (позначені стрілками) є деякі видимі порожнини, які відповідають тим, що показано на рис. 4.4б.

Розшаровані поверхні на рисунках 4.10в і 4.10д вказують на тісний контакт між компонентами композиту, однак зв'язування між ними все ще не є міцним і безперервним. Пустоти поблизу перетину дротів (рис 4.10а та 4.10 б) зменшують загальну зону зв'язку і можуть негативно впливати на міцність з'єднання та на міцність всього композиту.

На рис. 4.11 представлено зображення з електронного скануючого мікроскопа розшарованих поверхонь композиту прокатаного при ступені деформації 45%.

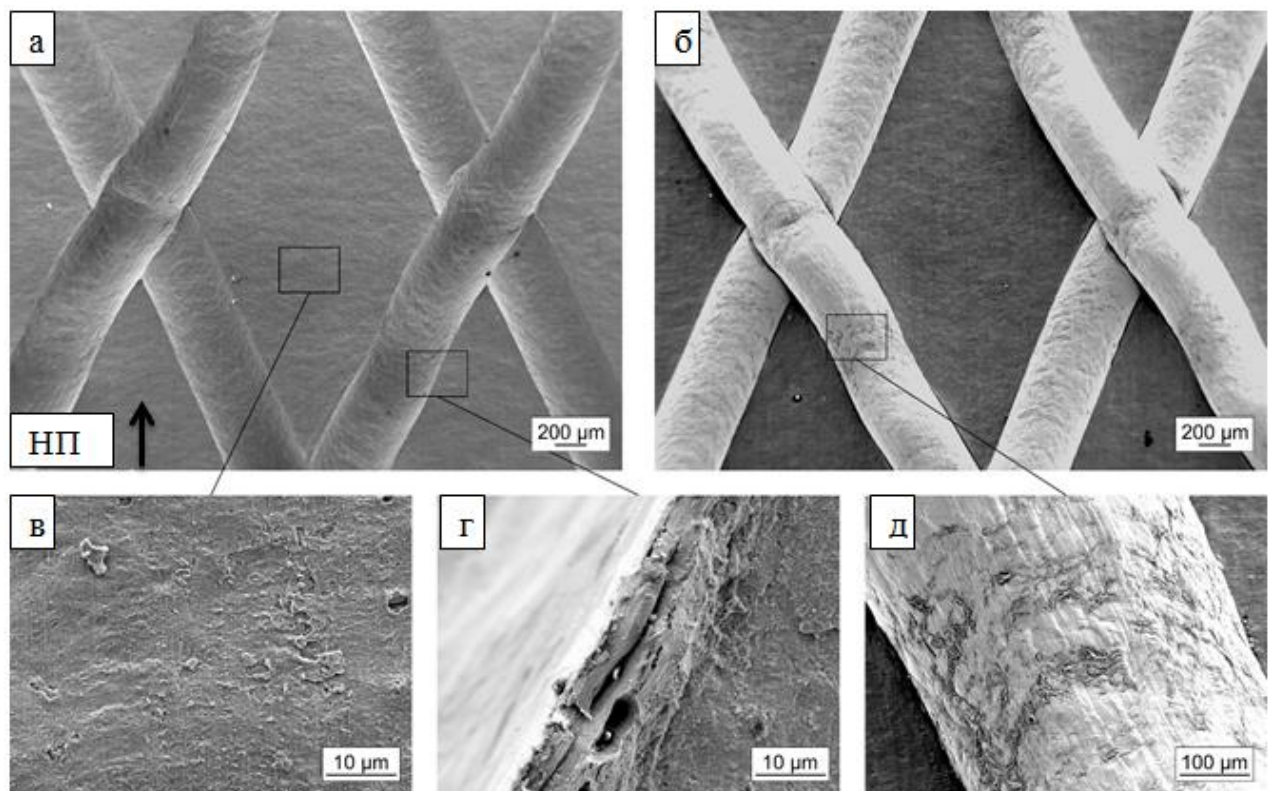


Рис. 4.11. Зображення з електронного скануючого мікроскопа розшарованих поверхонь композиту, прокатаного при ступені деформації 45%: а, в – очищена поверхня алюмінію; б – очищена поверхня армуючих дротів; г – нерівності поверхні дроту; д – поверхня дроту НП – напрямок прокатки

Сильно деформовану ґратку сітки та інтенсивно викривлені дроти показано на рис. 4.11б. На з'єднаній поверхні між алюмінієвими шарами (рис.4.11в) та

поверхнею дроту спостерігались сліди пластичного перелому (рис. 4.11д). Інтенсивно деформований край впадини дроту з слідами пластичного перелому на рис. 4.11г пов'язаний з деформацією матриці поблизу дротів під час прокатки.

Дроти, що просковзують, розпочинають локалізовану пластичну деформацію алюмінію і, таким чином, забезпечують міцне зчеплення між матричними шарами поблизу краю дроту (рис. 4.11г). Для цієї стадії характерний інтенсивний дифузійний зв'язок, що підвищує міцність зв'язків між матричними шарами та армуючими дротами зі збільшенням ступеню деформації при прокатці.

Роз'єднання штаб композиту, прокатаного при 55% деформації, за допомогою випробувань на розшарування для аналізу поверхні з'єднання було неможливе без його пошкодження.

З цієї причини аналіз фрагментованої поверхні був зроблений з використанням зразків після випробувань на розтягування. Розшарована поверхня зразків композитів з шифром 5083-45-55 після прокатки та термічної обробки після випробувань на розтягування представлена на рис.4.12, де показано локальне відшарування, яке відбулося в зразку до руйнування.

Затікання алюмінія між армуючою сіткою з заповненням найменших проміжків під час прокатки з ступенем деформації 55% підтверджено металографічними зображеннями на рисунку 4.7в, рисунках 4.8д, 4.8е та рис. 4.12г. Це підтверджує можливість виготовлення твердого композиту без пустот та проміжків при більш високих ступенях деформації при прокатці. Перелом дроту не відбувається на перехресті та між вузлами ґратки сітки (Рис. 4.12). Це вказує на те, що критичний ступінь деформації при прокатці, що призведе до руйнування дротів під час виготовлення композиту, не було досягнуто в даній експериментальній серії [98]. Це було викликано рухом армуючих дротів з їх початкового положення через подальшу деформацію ґраток сітки під навантаженням на розтягування. У обох зразках чітко видно сліди пластичного перелому на колишній з'єднаній поверхні між дротами та матрицею (рис. 4.12а, 4.12б). Їх інтенсивність в зразках, що пройшли термічну обробку, вище, що свідчить про кращі дифузійні зв'язки (позначено стрілками на

рис. 4.12б). На рисунку 4.12г видно, що метал матриці наповнює найменші прогалини поблизу дротів, включаючи перехрестя (позначені стрілками).

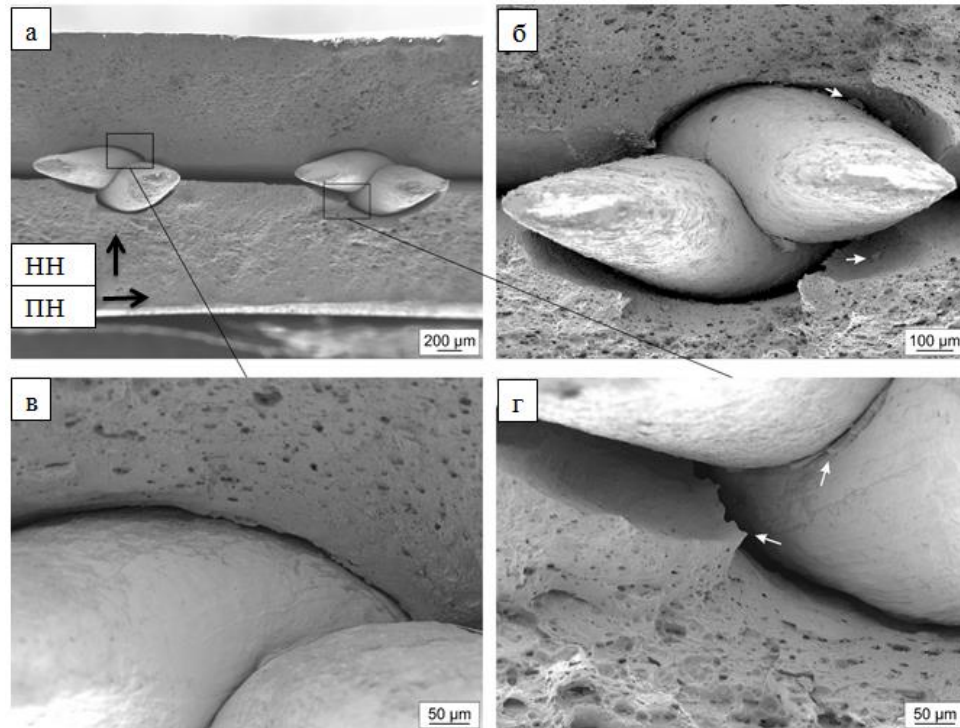


Рис. 4.12. Зображення з електронного скануючого мікроскопа зламаних поверхонь композиту, прокатаного при ступенях деформації 55% після випробування на розтягування: а – після прокатки; б – після термічної обробки при 500°C протягом 2 годин; в, г – потріскана поверхня між армуючим дротом і алюмінієвою матрицею. НН і ПН – нормальний і перпендикулярний напрям

Композити, що прокатані зі ступенем деформації 45%, згідно рисунку 4.7, мають візуально повне з'єднання матриці та не таку велику овалізацію дротів сітки. Таким чином, ступінь деформації 45% є верхньою межею раціонального з'єднання композиту при прокатці.

4.2 Дослідження впливу ступеня деформації на параметри деформації армуючої сітки в складі композиту

Побудова математичних функцій параметрів деформації сітки від ступеню деформації зроблена в програмному продукті «Статистика».

На рисунку 4.13 представлений графік зміни коефіцієнту витяжки всього композиту в залежності від ступеня деформації.

Залежність коефіцієнту витяжки всього композиту від ступеня деформації при прокатці описана такою функцією:

$$\mu_{\Sigma} = a_1 + a_2 \cdot \varepsilon \quad (4.1)$$

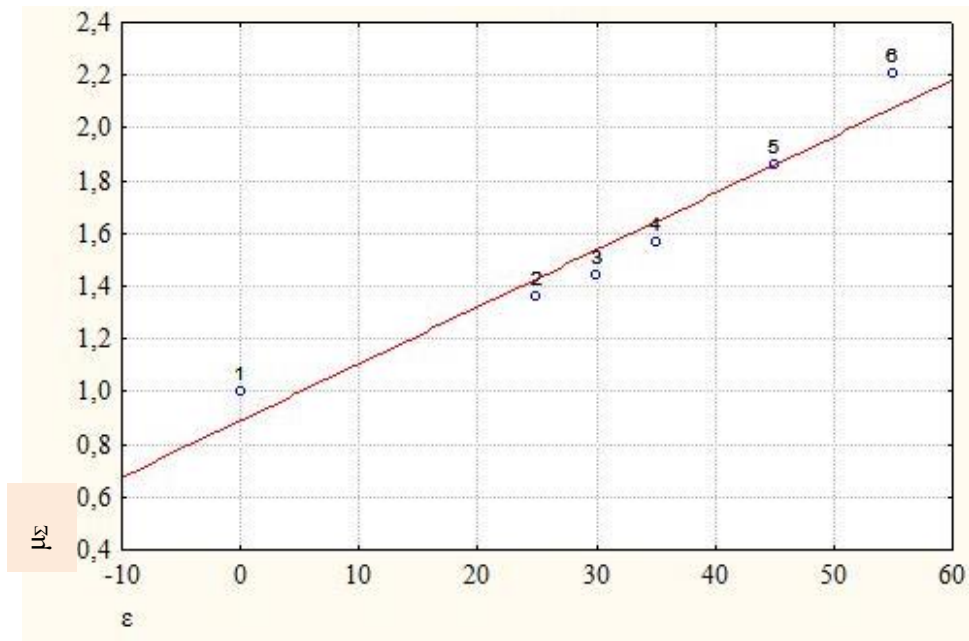


Рис. 4.13. Крива коефіцієнту витяжки всього композиту (μ_{Σ}) в залежності від ступеня деформації при прокатці

На рисунку 4.14 представлений графік зміни коефіцієнту витяжки ґратки сітки в залежності від ступеня деформації.

Залежність коефіцієнту видовження ґратки сітки μ_c від ступеня деформації при прокатці описана такою функцією:

$$\mu_c = a_1 + a_2 \cdot \varepsilon + a_3 \cdot \varepsilon^2 \quad (4.2)$$

На рисунку 4.15 представлений графік зміни коефіцієнту витяжки дротів сітки в залежності від ступеня деформації.

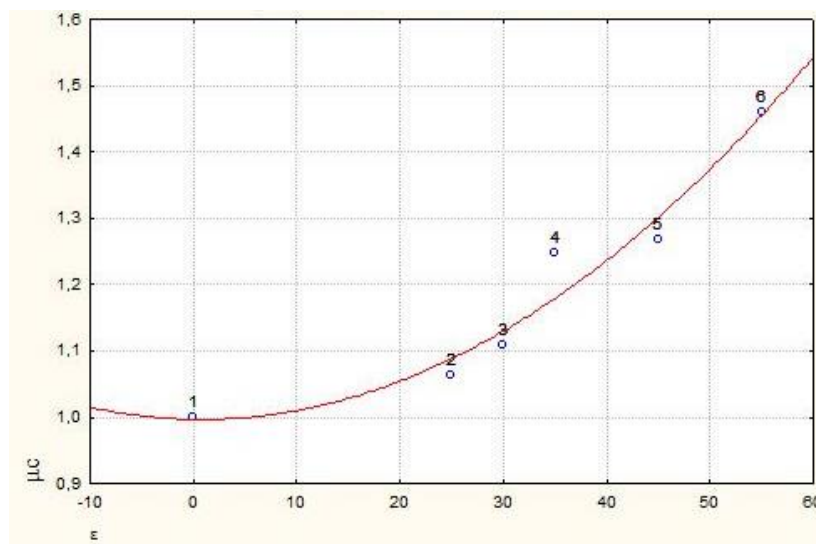


Рис. 4.14. Крива коефіцієнту видовження ґратки сітки (μ_c) в залежності від ступеню деформації при прокатці

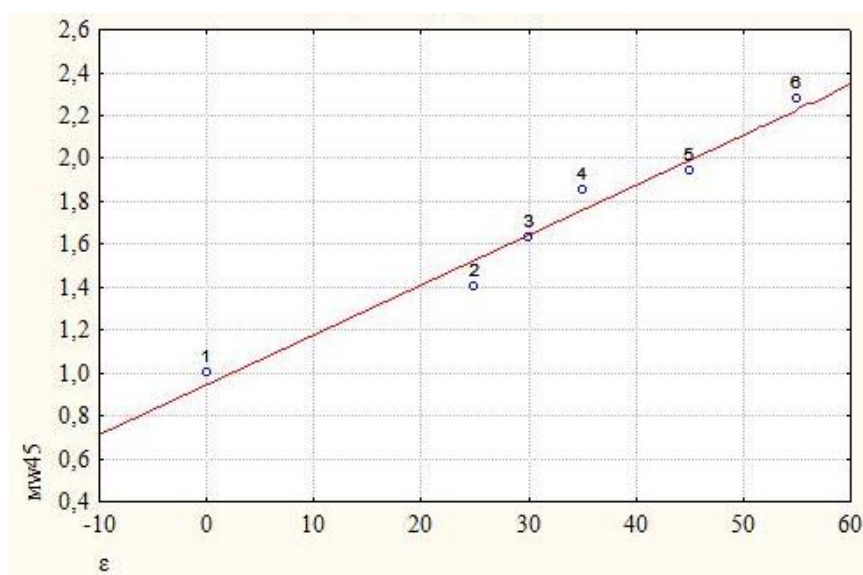


Рис. 4.15. Крива коефіцієнту витяжки дротів сітки ($\mu_{w(45)}$) в залежності від ступеня деформації при прокатці

Залежність коефіцієнту витяжки дротів сітки ($\mu_{w(45)}$) від ступеня деформації при прокатці описана такою функцією:

$$\mu_{w(45)} = a_1 + a_2 \cdot \varepsilon \quad (4.3)$$

На рисунку 4.16 представлений графік зміни овалізації дротів сітки в залежності від ступеня деформації

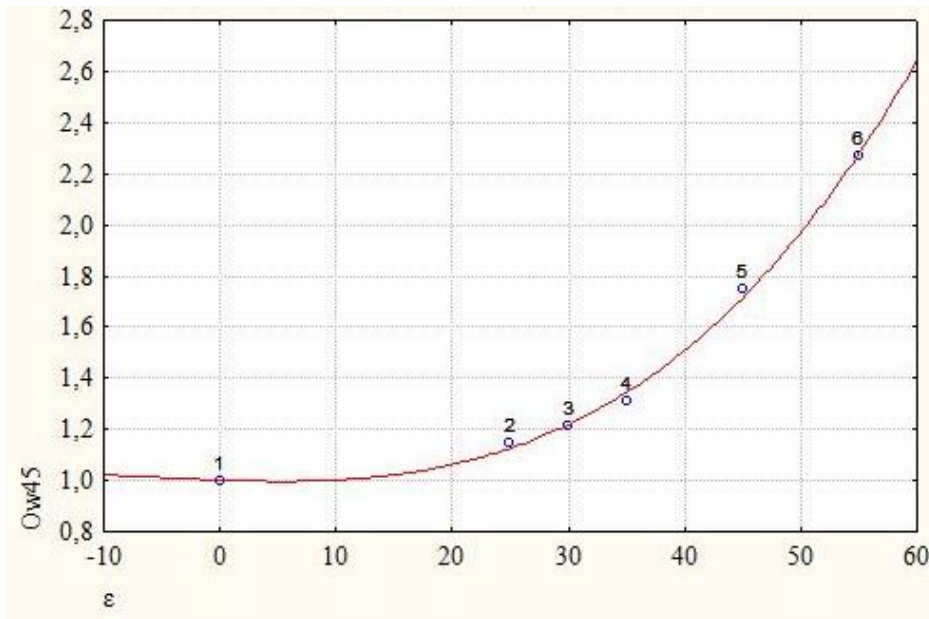


Рис. 4.16. Крива овалізація дротів сітки ($O_{w(45)}$) в залежності від ступеня деформації при прокатці

Залежність овалізації дротів сітки ($O_{w(45)}$) від ступеню деформації при прокатці описана такою функцією:

$$O_{w(45)} = a_1 + a_2 \cdot \varepsilon + a_3 \cdot \varepsilon^2 + a_4 \cdot \varepsilon^3 \quad (4.4)$$

Коефіцієнти для функцій (4.1)-(4.4) та величина достовірності апроксимації R^2 приведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Коефіцієнти для кривих апроксимації

Вид деформації	a_1	a_2	a_3	a_4	R^2
Витяжка всього композиту μ_Σ	0,89	0,0215	—	—	0,971
Видовження ґратки сітки μ_c	0,997	0,0003	0,0002	0,0002	0,976
Витяжка дротів сітки $\mu_{w(45)}$	0,946	0,0233	—	—	0,983
Овалізація дротів сітки $O_{w(45)}$	1,002	0,0016	0,0001	0,00006	0,976

Отже, вперше встановлені закономірності деформації сталевій армуючій сітки, розташованої між алюмінієвих штаб, а саме трансформація (видовження)

ґратки сітки (μ_c), витяжка ($\mu_{w(45)}$) та овалізація ($O_{w(45)}$) дроту від ступеня деформації (ϵ) при прокатці.

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 здатність поглинання енергії удару композиту.

4.3 Результати механічних випробувань композитів

4.3.1 Криві «напруження-деформація»

Методика проведення механічних випробувань армованих композитів описана в першому розділі.

На рисунку 4.17 наведені криві «напруження-деформація», отримані в результаті випробувань на статичне розтягування композитів без термічної обробки.

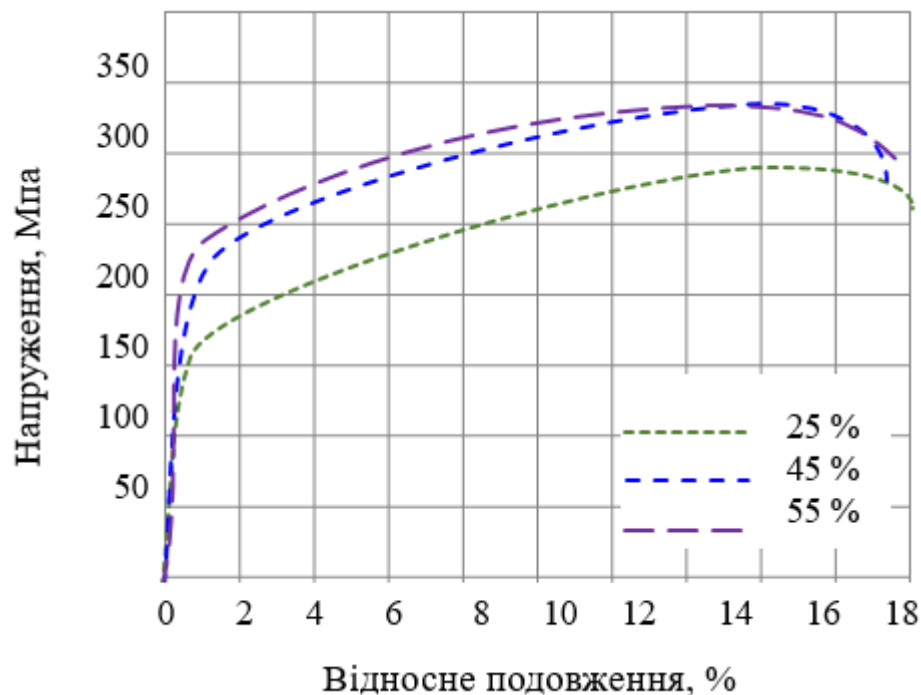


Рис. 4.17. Криві «напруження-деформація» в поздовжньому напрямку композитів без термічної обробки залежно від ступеня деформації при прокатці

Криві «напруження-деформація», отримані в результаті випробувань на статичне розтягування композиту з термічною обробкою, представлені на рисунку 4.18.

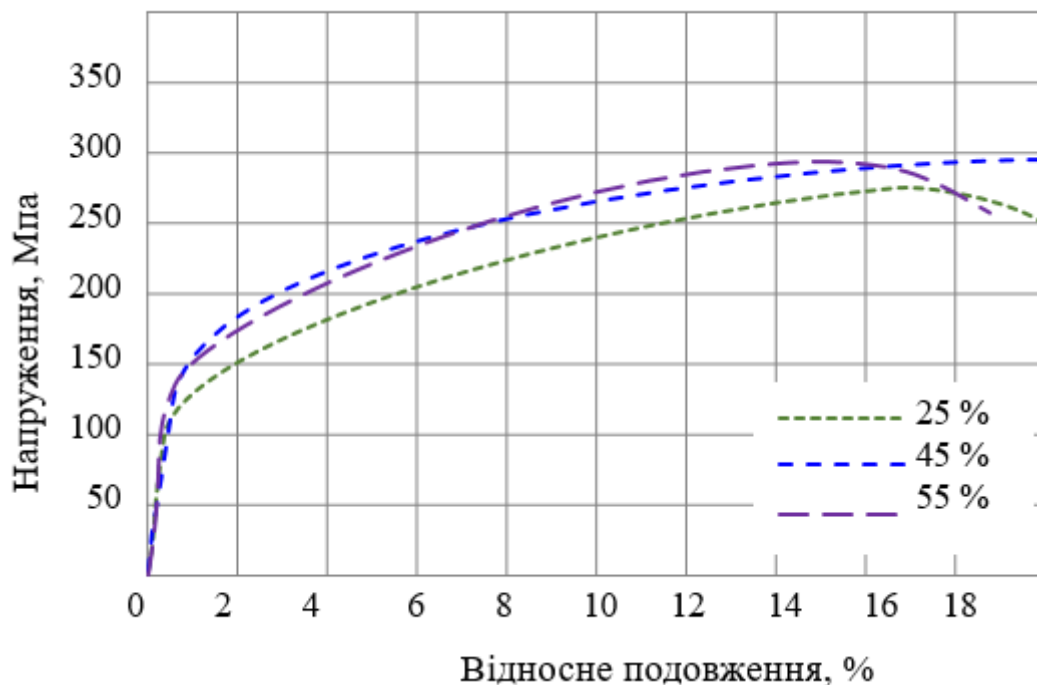


Рис. 4.18. Криві «напруження-деформація» в поздовжньому напрямку композитів з термічною обробкою залежно від ступеня деформації при прокатці

Ці криві дозволяють побачити, що прокатані композити зі ступенем деформації 45% призводить до кращого поєднання межі плинності та межі міцності (відношення межі плинності до межі міцності). Це відношення межі міцності до межі плинності було розраховано у роботі [111].

4.3.2 Аналіз меж міцності та плинності композитів

Аналіз меж міцності та плинності армованих композитів представлено в таблиці 4.3 та на рис. 4.19 та 4.20.

Таблиця 4.3 – Дані меж міцності (σ_B), меж плинності ($\sigma_{0,2}$) та залишкового видовження (Π) композитів при розриві після прокатки та термічно оброблених (ТО) в поздовжньому напрямку

Ступінь деформації	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_B / \sigma_{0,2}$	$\Pi, \%$	$\sigma_{0,2} + \text{ТО}$, МПа	$\sigma_B + \text{ТО}$, МПа	$\sigma_B / \sigma_{0,2} + \text{ТО}$	$\Pi, \%$
5083-45-25	165	295	1,79	16	112	275	2,46	19,1
5083-45-30	185	316	1,71	15,6	119	281	2,36	20,9
5083-45-35	203	317	1,56	13,4	114	284	2,49	17,8
5083-45-45	229	333	1,46	15,2	122	294	2,41	20,7
5083-45-55	249	341	1,37	15,3	136	289	2,16	18,9
5083-0-45	227	322	1,41	14	126	285	2,41	19
5083-0-55	232	328	1,41	16	134	291	2,13	24

Аналізуючи таблицю 4.3 можна зробити висновок, що армовані композити прокатані з ступенем деформації 45% та 55% мають найменше співвідношення межі міцності до межі плинності, як після прокатки (1,46 та 1,37) так і після термічної обробки (2,41 та 2,16).

Як відображено на рис. 4.19, збільшення ступеня деформації вище 45% призводить до різкого падіння співвідношення межі міцності до межі плинності навіть після термічної обробки (рис. 4.20). Причиною цього є надмірна овалізація дротів сітки, що призводить до того, що сталеві дроти розрізають алюмінієві матричні шари.

Як було показано в [64] та [98], нижня межа раціонального діапазону ступеню деформації знаходиться приблизно при 30%. Це пов'язано з повним заповненням ґраток сітки матеріалом матриці (рис. 4.7).

Для визначення раціонального діапазону виготовлення армованого алюмінієвого композиту слід враховувати його механічні властивості як в поздовжньому, так і в поперечному напрямках.

У композитів без термічної обробки після прокатки перетин графіків межі плинності та відношення межі міцності до межі плинності відбувається при 35% деформації (рис. 4.19).

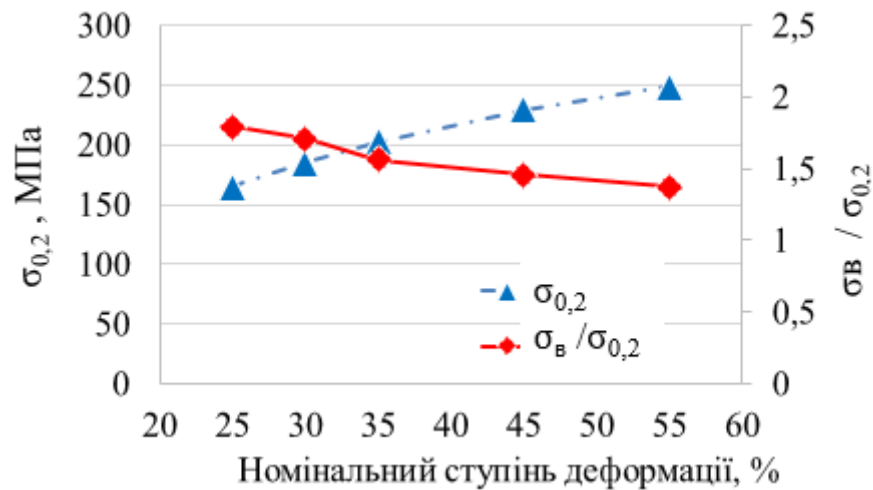


Рис. 4.19. Межа плинності та співвідношення межі міцності до межі плинності композитів без термічної обробки в залежності від ступеня деформації в поздовжньому напрямку

У композитів з термічною обробкою після прокатки точки першого перегину графіків знаходяться на рівні 30% деформації (рис. 4.20). При 35% відсотках можна бачити другий перегин.

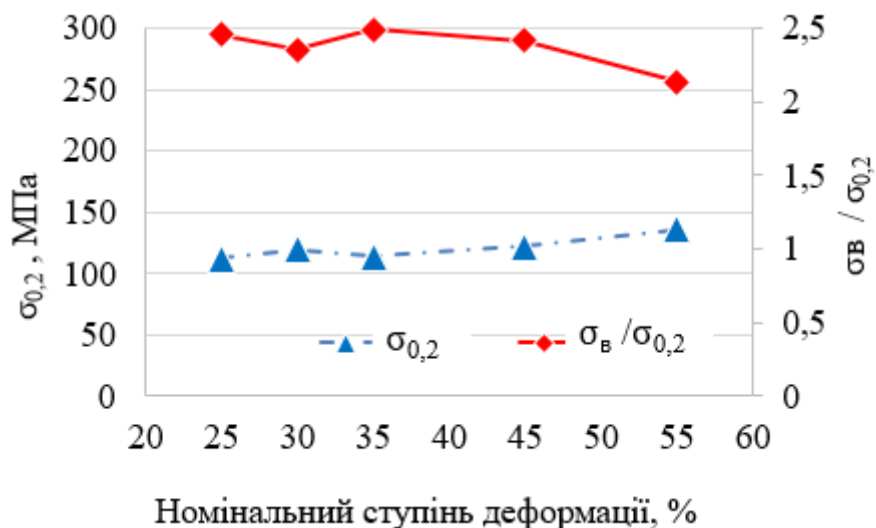


Рис. 4.20. Межа плинності та співвідношення межі міцності до межі плинності композитів з термічною обробкою в залежності від ступеня деформації в поздовжньому напрямку

Встановлена залежність властивостей композитів, армованих сталевією сіткою, від ступеня деформації та визначено, що прокатані композити зі ступенем деформації 45% призводить до кращого поєднання межі плинності та межі міцності (відношення межі плинності до межі міцності).

4.3.3 Аналіз впливу термічної обробки на механічні властивості композиту

З'єднання шарів алюмінієвої матриці та сталевих дротів можна поліпшити шляхом термічної обробки [112, 113].

Вплив термічної обробки на механічні властивості композиту в поздовжньому та поперечному напрямках проаналізовано за допомогою даних, приведених в таблицях 4.3 та 4.4 і проілюстровано на рис. 4.21 - 4.24. Механічні властивості композиту в поздовжньому напрямку мають більші значення меж міцності та плинності, ніж у поперечному. Необхідно визначити оптимальне співвідношення цих меж та вплив на них термічної обробки.

Таблиця 4.4 – Дані меж міцності (σ_B), меж плинності ($\sigma_{0,2}$) та залишкового подовження (Π) композитів при розриві після прокатки та термічно оброблених (ТО) в поперечному напрямку

Ступінь деформації	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_B /$ $\sigma_{0,2}$	Π , %	$\sigma_{0,2}$ +ТО, МПа	σ_B + ТО, МПа	$\sigma_B / \sigma_{0,2}$ + ТО,	Π , %
5083-45-25	150	281	1,87	17	103	269	2,61	21,8
5083-45-30	168	297	1,77	18	106	270	2,55	23
5083-45-35	141	293	2,08	18	111	265	2,39	23
5083-45-45	178	288	1,62	15	119	260	2,18	21
5083-45-55	228,5	315,5	1,38	12,5	126	256	2,03	21
5083-0-45	221,5	339	1,53	15,1	128	296	2,31	24
5083-0-55	233	342	1,47	16	132,5	294	2,22	25

Результати випробувань на розтягування композитів без термічної обробки у поздовжньому напрямку представлені на рис. 4.21.

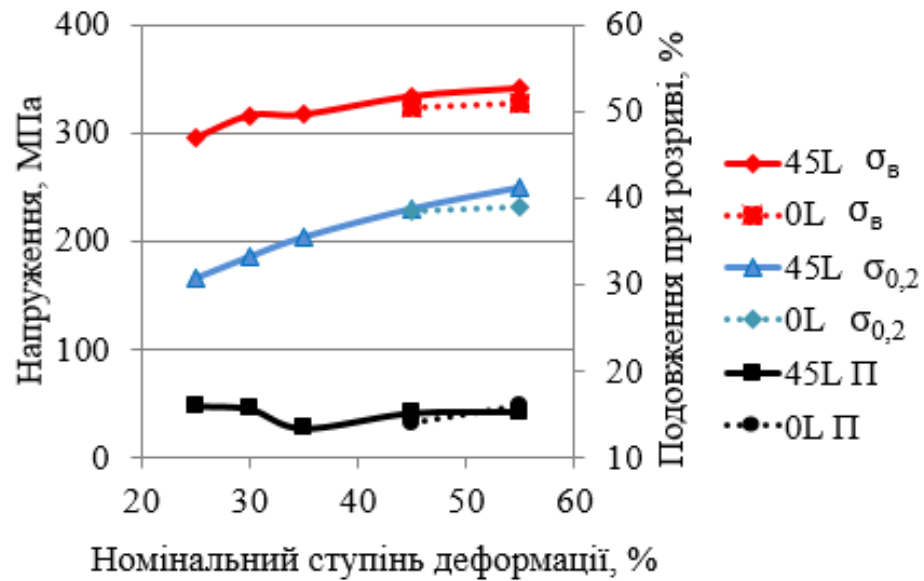


Рис. 4.21. Механічні властивості після прокатки без термообробки 5083-45 та 5083-0 у поздовжньому (L) напрямку залежно від ступеня деформації при прокатці. σ_B – межа міцності, $\sigma_{0,2}$ – межа плинності, Π – залишкове подовження при розриві

Межа міцності композиту збільшується зі збільшенням деформації прокатки для зразків в поздовжньому напрямку як з термічною обробкою так і без неї. В той же час не існує суттєвого впливу армування сітки на механічні властивості в поздовжньому напрямку, що спостерігається в досліджуваному діапазоні деформації 45...55%. Зниження залишкового подовження при розриві від основної тенденції на 15 % привертає увагу при деформації 35% (рис 4.21).

Результати випробувань на розтягування композитів після термічної обробки у поздовжньому напрямку представлені на рис. 4.22.

Термічна обробка призвела до суттєвого 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). (рис 4.22). Цей ефект

пояснюється пом'якшенням матеріалу та зменшенням твердості після термічної обробки.

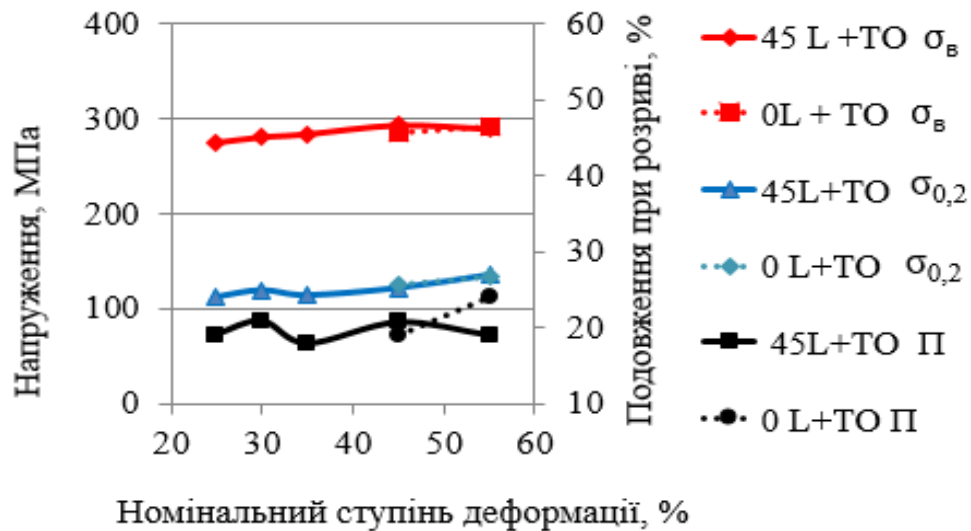


Рис. 4.22. Механічні властивості після прокатки та термообробки композитів 5083-45 та 5083-0 у поздовжньому напрямку залежно від ступеня деформації при прокатці. σ_B – межа міцності, $\sigma_{0.2}$ – межа плинності, П – залишкове подовження при розриві

Механічні властивості композитів у поперечному напрямку представлені на рис. 4.23 та 4.24.

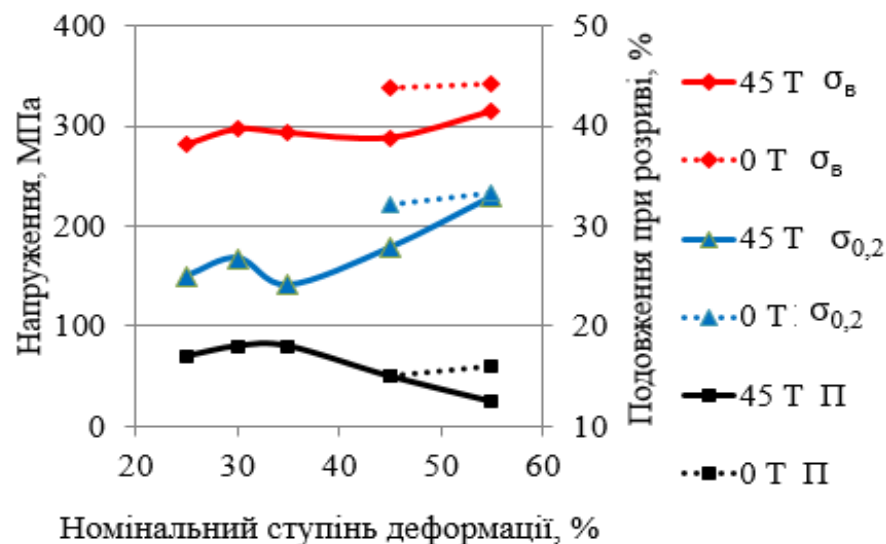


Рис. 4.23. Механічні властивості після прокатки без термообробки композитів 5083-45 та 5083-0 в поперечному напрямку залежно від ступеня деформації при прокатці. σ_B – межа міцності, $\sigma_{0.2}$ – межа плинності, П – залишкове подовження при розриві

Як і очікувалось, властивості композиту в поздовжньому напрямку вищі, ніж у поперечному (на 6...17 % межі плинності та на 1...5 % межі міцності). Крім того, в поперечному напрямку як міцність (на 8...17 %), так і пластичність (на 1...24 %), двох прокатаних штаб без сітки краще, ніж у штабах з армуванням. Причиною цього є витягування дротів в напрямку прокатки та зміна форми ґратки сітки. Отже, напружені дроти, що лежать поперечно напрямку прокатки, працюють переважно як концентратори напружень, а не як армуючі волокна. Максимальна різниця меж плинності (на 44 %) та міцності (на 8 %) в поздовжньому та поперечному напрямках спостерігається при деформації 35% (рис. 4.23).

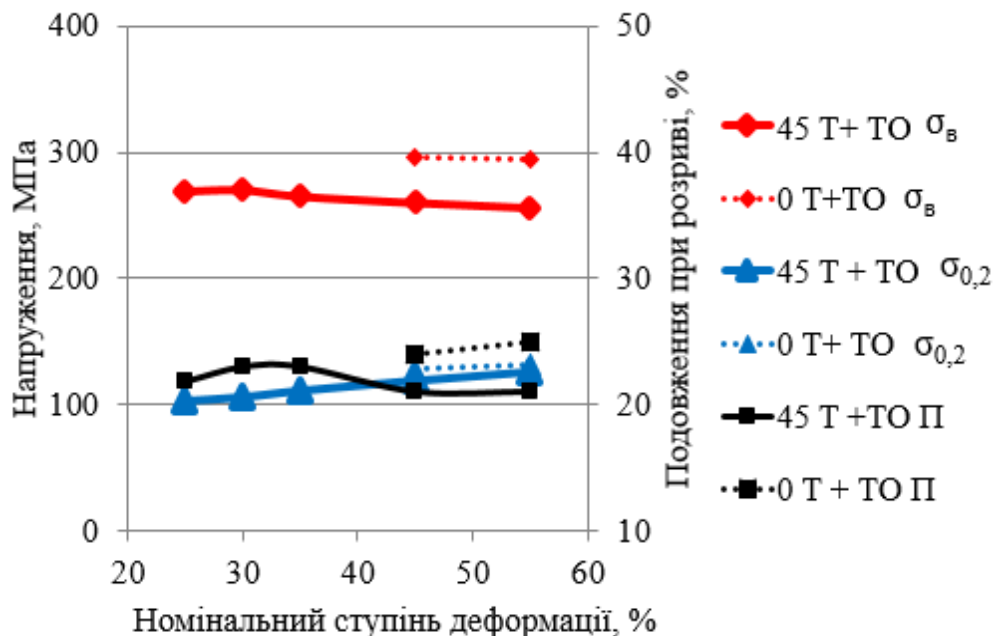


Рис. 4.24. Механічні властивості після прокатки з термообробкою композитів 5083-45 та 5083-0 в поперечному напрямку залежно від ступеня деформації при прокатки. σ_b — межа міцності, $\sigma_{0,2}$ — межа плинності, П — залишкове подовження при розриві

Це корелюється з вищезазначеним 3-ступінчастим механізмом з'єднання. Порівняння міцності в поздовжньому та поперечному напрямку двох сумісно прокатаних штаб без армування (рис. 4.21 і 4.23) показує, що в поздовжньому напрямку вищі показники (межа міцності на 14...17 МПа, межа плинності на

1...6 МПа). З одного боку, здатність досліджених армованих композитів до розтягування не вище, ніж у двох сумісно прокатаних штаб без армування (рис. 4.21), з іншого боку, наявність сітки між матрицями дозволяє досягти механічного з'єднання композиту навіть при деформації 25% (рис.4.21).

Армування алюмінієвих штаб зі 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.

4.3.4 Результати випробувань на удар

Ударні випробування були проведені за допомогою маятникового копру з енергією удару 50 Дж при кімнатній температурі. Кількість енергії, поглиненої композитами, лежала в діапазоні від 11 до 26 Дж.

Для кожного ступеня деформації було здійснено три випробування та розраховано середнє значення.

Зразки не були зруйновані після проведення випробувань на удар. Тому для подальшого аналізу було визначено залишковий кут та радіус згинання зразків після випробувань.

Відповідно до вищезгаданої процедури, властивості композиту при випробуваннях на удар перевірялися в поздовжньому напрямку. Це означає, що вісь маятника у її нижній точці була паралельна напрямку прокатки.

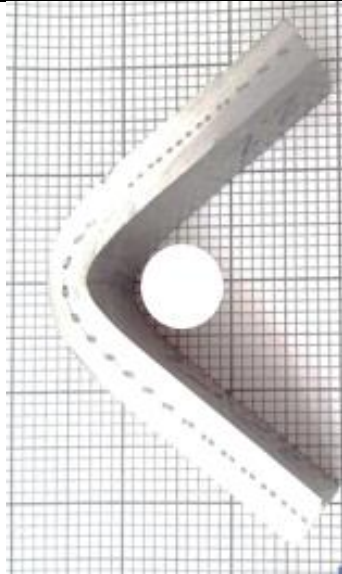
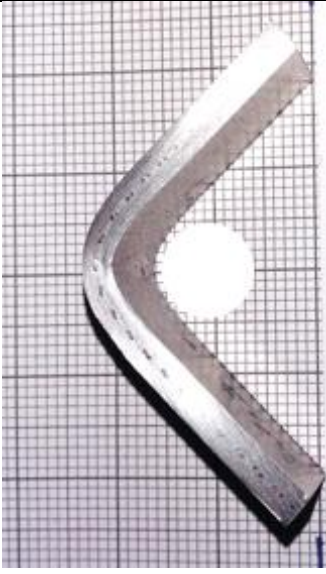
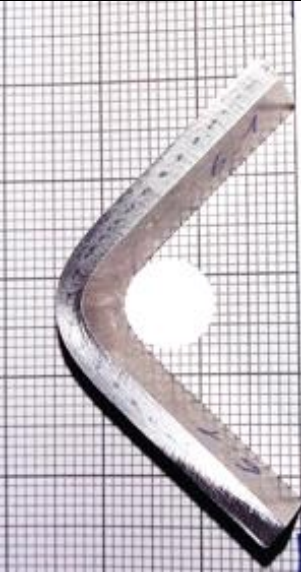
Результати цих досліджень на удар показані в таблицях 4.5 та 4.6.

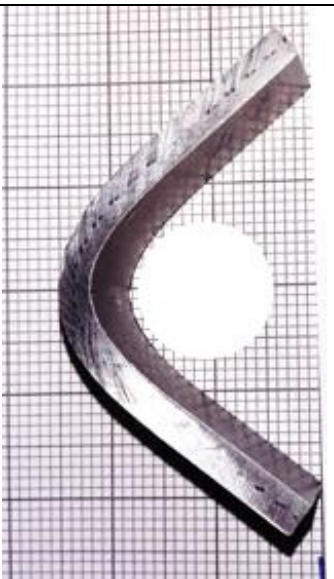
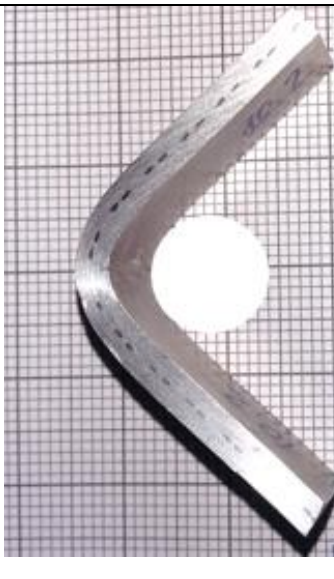
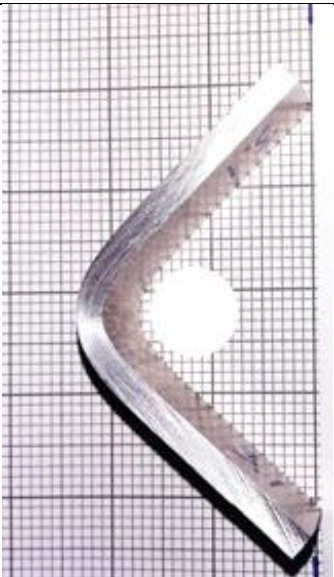
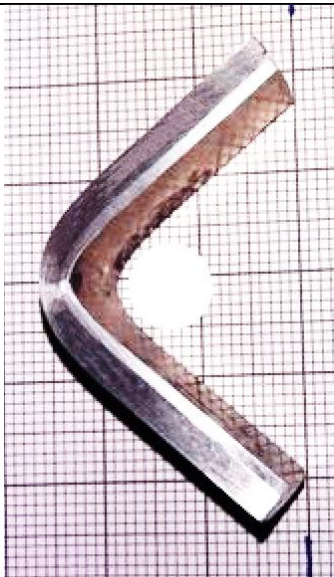
Таблиця 4.5 – Результати випробувань на удар після прокатки зразків: армованих (5083-45), армованих та термічно оброблених(5083-45 +ТО) та двох суміснопрокатаних штаб без армування (5083-0) в залежності від ступеня деформації при прокатці в поздовжньому напрямку

Код експерименту*	Ширина, мм	Висота, мм	Площа, мм ²	Енергія удару, Дж	Момент інерції удару, Дж/мм ⁴	Залишковий кут згинання, град	Залишковий радіус згинання, мм
5083-45-30	10,26	4,23	43,4	26	0,40	80	3,75
5083-45-45	10,82	3,25	35,17	16,5	0,53	91	4,50
5083-45-55	10,73	2,74	29,4	13,5	0,73	96	4,45
5083-45-35- ТО	10,26	3,9	40,01	24	0,47	82	4,10
5083-45-45- ТО	10,2	3,25	33,15	12	0,41	78	6,50
5083-45-55- ТО	10,1	2,74	27,67	11	0,64	83	5,00
5083-0-45	10	3,25	32,5	14	0,49	89	4,35
5083-0-55	10	2,74	27,4	11	0,64	81	4,0

* Код експерименту: сплав матриці – армований композит (45) або сумісно прокатані штаби без армування(0) – ступінь деформації – термічна обробка за наявності.

Таблиця 4.6 – Результати випробувань на удар композитів в поздовжньому напрямку

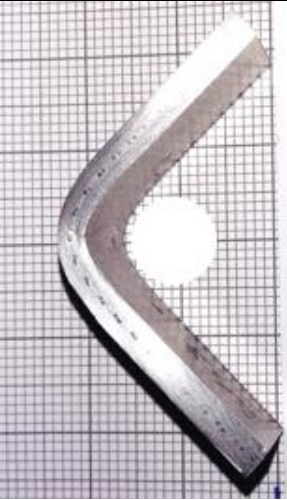
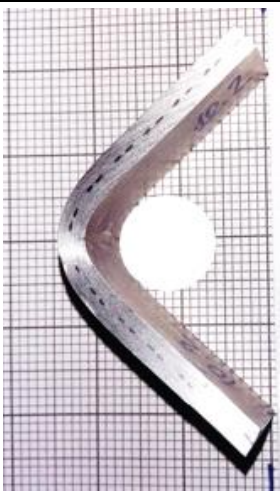
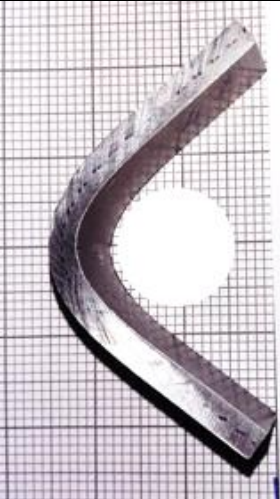
Шифр зразку	5083-45-30	5083-45-45	5083-45-55
Без термічної обробки			

Шифр зразку	5083-45-35- TO	5083-45-45- TO	5083-45-55- TO
З термічною обробкою			
Шифр зразку		5083-0-45	5083-0-55
Без армування, без термічної обробки			

Порівняльна характеристика результатів в поздовжньому та поперечному напрямку представлена в таблицях 4.7 та 4.8.

Залежність питомої енергії удару після прокатки армованих композитів з шифром 5083-45 (45), після прокатки та термічної обробки 5083-45+ТО (45+ТО) та двох сумісно прокатаних штаб без армування 5083-0 (0) від ступеня деформації при прокатці згідно таблиць 4.5-4.8 відображена на рис. 4.25.

Таблиця 4.7 – Порівняння результатів випробувань на удар композитів в поздовжньому та поперечному напрямках

Композити з 45% деформації	Поздовжній напрям	Поперечний напрям
Без термічної обробки		
З термічною обробкою		

Таблиця 4.8 – Результати випробувань на удар в поздовжньому та поперечному напрямках після прокатки та термічно оброблених зразків

Шифр експерименту*	Ширина, мм	Висота, мм	Площа, мм ²	Енергія удару, Дж	Момент інерції удару, Дж/мм ⁴	Залишковий кут згинання, град	Залишковий радіус згинання, мм
5083-45-45-В	10,82	3,25	35,17	16,5	0,53	91	4,50
5083-45-45- В-ТО	10,2	3,25	33,15	12	0,41	78	6,50
5083-45-45-П	9,74	3,25	31,66	11,5	0,41	78	7,10
5083-45-45-П- ТО	10,77	3,25	35,0	17	0,55	85	5,50

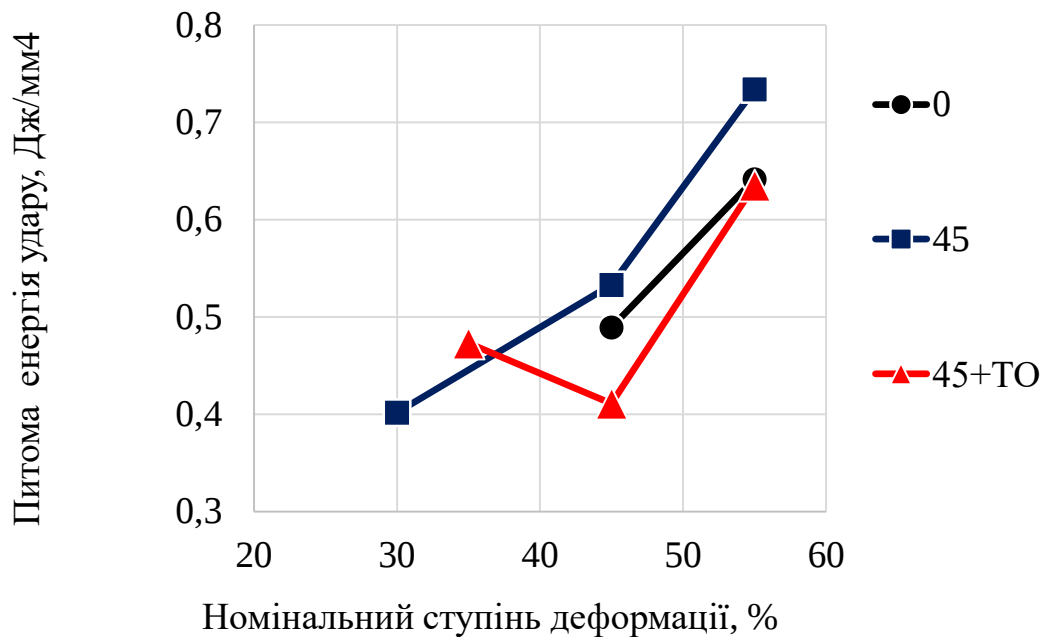


Рис. 4.25. Залежність питомої енергії удару армованих композитів після прокатки (45), після прокатки та термічної обробки (45+ТО) та двох сумісно прокатаних штаб без армування (0) в залежності від ступеня деформації при прокатці

Порівняння армованих композитів та двох прокатаних штаб без армування (рис 4.25) показує, що перші мають питому енергію удару, яка стає більшою з збільшенням ступеня деформації. Енергія удару термічно оброблених зразків з армуванням (рис. 4.25) досягла такого ж рівня, що і в двох прокатаних штабах без армування та без термічної обробки.

Порівняння армованих зразків та двох прокатаних штаб без армування (рис 4. 26) показує, що перші мають більший залишковий кут згинання на 2-18 %.

Термічно оброблені армовані композити, прокатані при ступеню деформації 45%, мають найменший залишковий кут згинання 78 град.(рис 4. 26).

Порівняння армованих композитів та двох прокатаних штаб без армування (рис 4. 27) показує, що перші мають вищий радіус згинання на 3...11 %. Ця різниця стає більшою зі збільшенням ступеня деформації.

На рис. 4.27 відображено, що композити, прокатані зі ступенем деформації 45% з наступною термічною обробкою, досягають майже 50% збільшення радіусу згинання, який становить 6,5 мм.

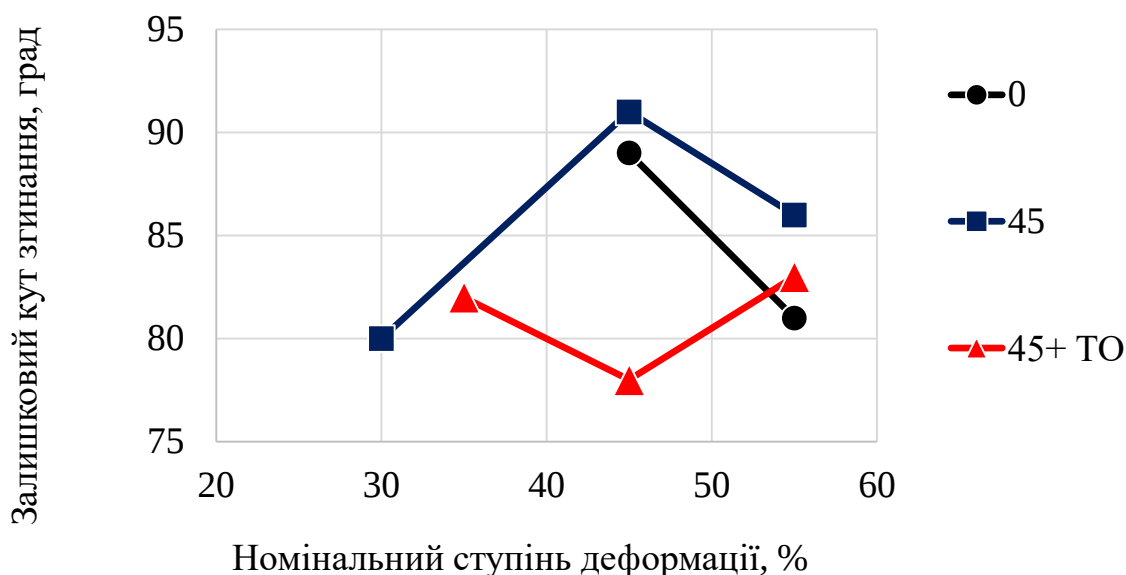


Рис. 4.26. Залежність залишкового кута згинання після прокатки композитів 5083-45 (45), композитів 5083-45 з термічною обробкою (45+ТО) та двох сумісно прокатаних штаб без армування (0) від ступеня деформації при прокатці

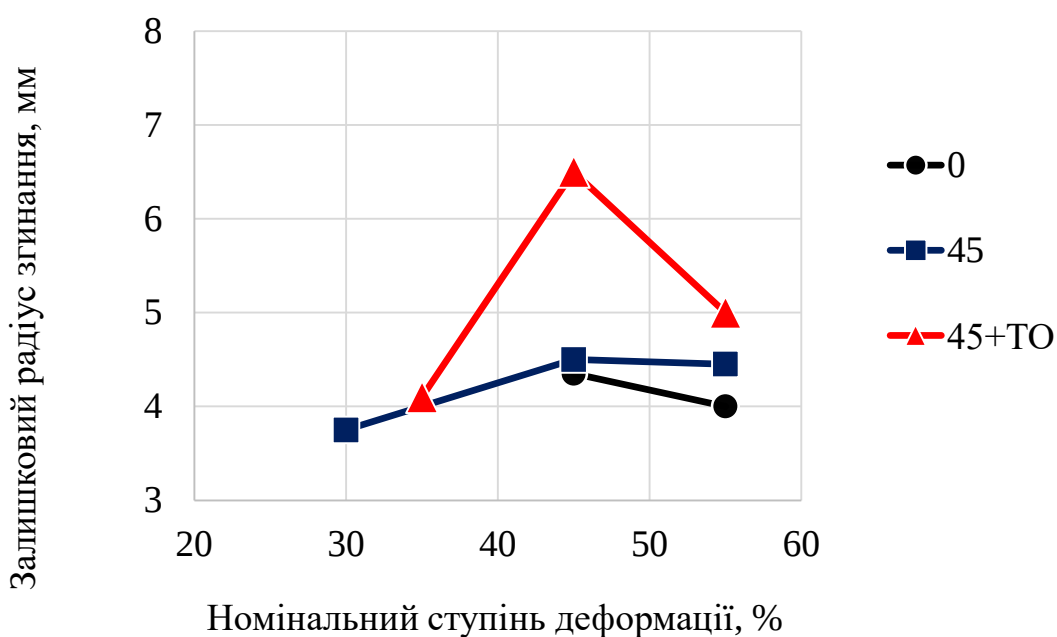


Рис. 4.27. Залежність залишкового радіуса згинання після прокатки композитів 5083-45 (45), композитів 5083-45 з термічною обробкою (45+ТО) та двох сумісно прокатаних штаб без армування 5083-0 (0) від ступеня деформації при прокатці 5083-45

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 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.

4.4 Закономірності розшарування композиту з матрицею зі сплаву EN AW-5083

Використовуючи зображення, отримані під час випробувань на розтягування, були встановлені основні механізми руйнування композитів. Залежно від розподілу дроту в поперечному перерізі композиту та міцності з'єднання між шарами матриці з армуванням та без нього, розрив композиту відбувається за такими механізмами:

1) «Розшарування → Розрив шарів» (рис. 4.28а). 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 спостерігався як для композитів одразу після прокатки, так і для двох прокатаних штаб без армування після термічної обробки. Відсутність жорсткого з'єднання між шарами матриці та армуючих дротів призводить до інтенсивного відшарування та роздільного протистояння цих компонентів під навантаженням на розтягування.

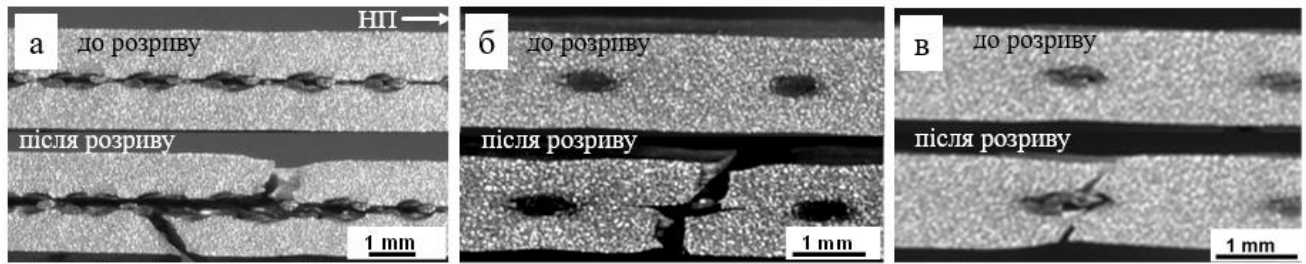


Рис. 4.28. Розрив армованого композиту під час випробувань на розтягування. Ступінь деформації: а - 25%, б - 45%, в - 55%. НП – напрям прокатки

2) «Відшарування першого шару → Обмежене розшарування → Розрив другого шару» (рис. 4.28б). Ця послідовність характерна для прокатаного композиту, в якому частина поперечних дротів (відносно осі напружень) невелика, а міцність зв'язку між матрицею та армуючою фазою вища, ніж між шарами матриці. В цьому випадку плинність призводить до руйнування першого шару, а армуюча фаза «розщеплює» шари композиту. Відшарування може бути обмежено всередині однієї чи кількох ґраток сітки і не відбуватися протягом всієї довжини зразка.

3) «Розрив без розшарування» (рис. 4.28в). Цей механізм характерний для композиту з високою міцністю з'єднання між шарами матриці та між шарами матриці та армованою фазою так само, як з великою частиною дротів у поперечному перерізі.

Ці три основні механізми руйнування при випробуваннях на розтягування змінюють один одного в процесі збільшення ступеня деформації при прокатці. У всіх композитах «Тип 45» перехрестя дротів сітки відіграють роль концентраторів напружень.

Ці механізми розшарування армованих композитів ідентичні до механізмів розшарування, визначених для першої серії експериментів. На основі результатів випробувань на розтягування встановлено три механізми руйнування армованих композитів, отриманих сумісною прокаткою при різних ступенях деформації. Це

дозволяє прогнозувати механізм руйнування прокатаного композиту при навантаженнях на розтягування по одному з трьох встановлених механізмів.

Ці механізми переходять один в другий при збільшенні ступеня деформації при прокатці. Встановлено, що при ступенях деформації 35...45%, має місце «Zip-з'єднання», що сприяє прояву механізму розшарування «Відшарування першого шару → Обмежене розшарування → Розрив другого шару».

4.5 Анізотропія властивостей армованих композитів в поздовжньому та поперечному напрямках

Для визначення анізотропії властивостей композитів, що були прокатані з різними ступнями деформації, було проведено зіставлення їх механічних властивостей, отриманих у поздовжньому (до осі прокатки) та поперечному напрямках.

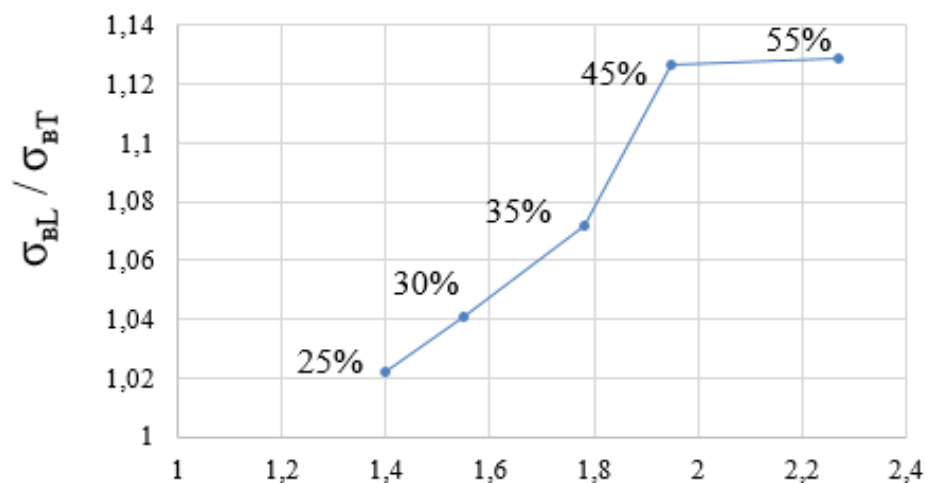
Отримані результати досліджень представлені в таблиці 4.9. На основі цих даних проаналізовані відношення меж міцності в поздовжньому напрямку (σ_{bl}) відносно поперечного напрямку (σ_{bt}) (відносно напрямку прокатки) до зміни видовження ґратки сітки (μ_c) у складі композиту та овалізації дроту сітки (O_w).

Для візуалізації даних таблиці 4.9 було побудовано залежності зміни розміру ґратки сітки у складі композиту при різних ступенях деформації до зміни межі міцності композиту у поздовжньому та поперечному напрямку до напрямку прокатки при різних ступенях деформації. Дана залежність представлена на рис.4.29.

Аналізуючи рис. 4.29, можна зробити висновки, що при деформації від 25 до 35 % відбувається поступове видовження ґратки сітки у складі композиту та відповідне збільшення різниці властивостей межі міцності композиту у поздовжньому напрямку відносно поперечного.

Таблиця 4.9 – Розрахунок меж міцності в поздовжньому та поперечному напрямку в залежності від розміру ґратки сітки та овалізації

Ступінь деформації	25	30	35	45	55
μ_c	1,4	1,55	1,78	1,95	2,27
O_W	1,07	1,12	1,22	1,25	1,44
σ_{Bl} , МПа	275	281	284	293	289
σ_{Bt} , МПа	269	270	265	260	256
$\sigma_{Bl} / \sigma_{Bt}$	1,02	1,04	1,07	1,13	1,13



μ_c – зміна розміру ґратки сітки при різних ступенях деформації

Рис. 4.29. Анізотропія армованих композитів при різних ступенях деформації (25, 30, 35, 45, 55%) в залежності від зміни розміру ґратки сітки та відношення меж міцності композитів у поздовжньому до поперечного напрямку

Починаючи з 35% деформації до 45% деформації спостерігається збільшення різниці властивостей композиту у поздовжньому та поперечному напрямку. Після 45 до 55% деформації різниці не спостерігається. Це пояснюється тим, що при таких ступенях деформації композит поводить себе як прокатані штаби без армування. При таких ступенях деформації в армованому композиті відбувається інтенсивне видовження ґратки сітки, витяжка та овалізація дротів сітки (див. рис. 4.6).

Побудовані залежності зміни овалізації дроту сітки у складі композиту при різних ступенях деформації до зміни межі міцності композиту у поздовжньому та поперечному напрямку до напрямку прокатки при різних ступенях деформації. Дана залежність представлена на рис. 4.30.

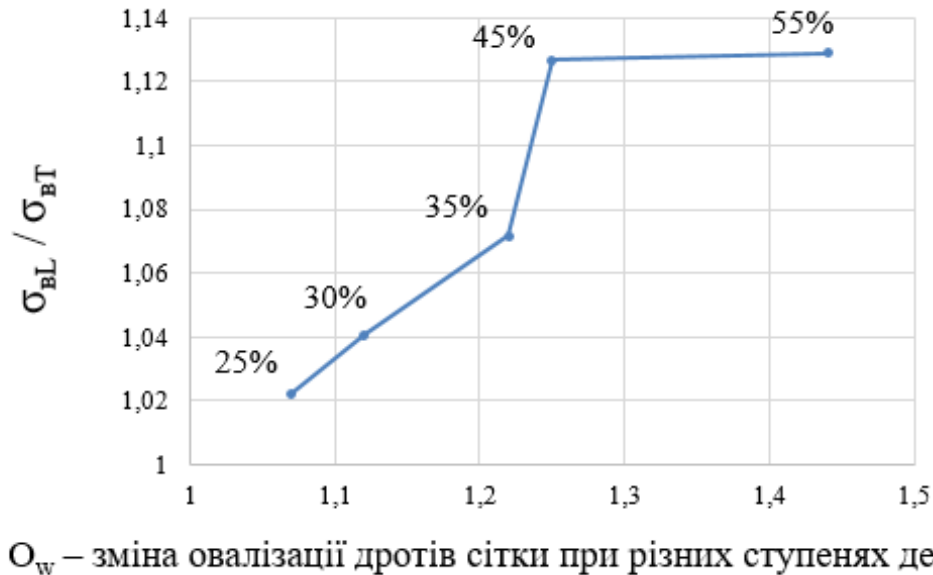


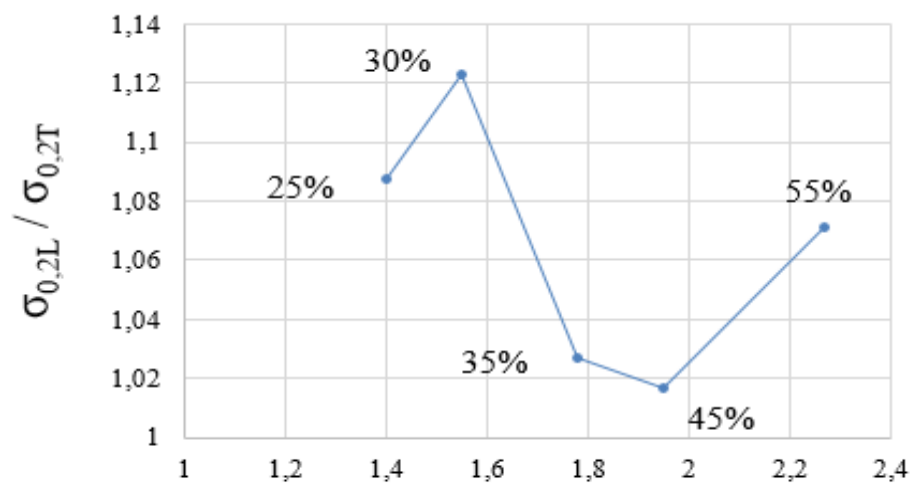
Рис. 4.30. Анізотропія армованих композитів при різних ступенях деформації (25, 30, 35, 45, 55%) в залежності від овалізації дротів сітки та відношення між міцності композитів

Аналізуючи рисунок 4.30, можна зробити висновок, що видовження ґратки сітки та овалізація дротів сітки презентують схожий перебіг процесу деформації армованого композиту. Анізотропія властивостей армованих композитів у поздовжньому та поперечному напрямках свідчить про те, що в діапазоні від 25 до 35% деформації – відбувається рівномірна овалізація та анізотропія армованого композиту. В діапазоні від 35 до 45% деформації межа міцності у поздовжньому напрямку різко зростає у порівнянні до поперечного. Після 45% деформації овалізація дротів однакова як в поздовжньому, так і в поперечному напрямку.

Проведено аналіз межі плинності в поздовжньому та поперечному напрямках композитів в залежності від овалізації та видовження ґратки сітки (таблиця 4.10, рис. 4.31, рис. 4.32).

Таблиця 4.10 – Розрахунок меж плинності в поздовжньому до поперечного напрямку в залежності від розміру ґратки сітки та овалізації

Ступінь деформації	25	30	35	45	55
μ_w	1,4	1,55	1,78	1,95	2,27
O_w	1,07	1,12	1,22	1,25	1,44
$\sigma_{0,2l}$	112	119	114	121	135
$\sigma_{0,2t}$	103	106	111	119	126
$\sigma_{0,2l} / \sigma_{0,2t}$	1,09	1,12	1,03	1,07	1,07



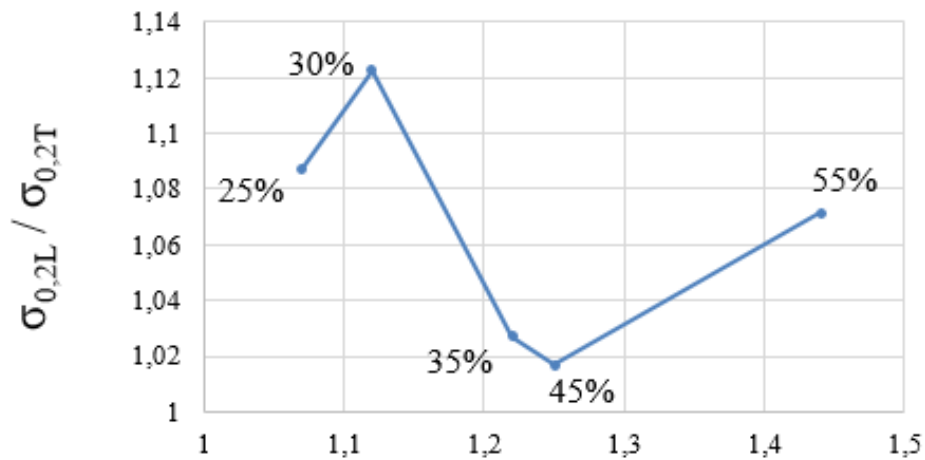
μ_c – зміна розміру ґратки сітки при різних ступенях деформації

Рис. 4.31. Анізотропія армованих композитів при різних ступенях деформації (25, 30, 35, 45, 55%) в залежності від зміни розміру ґратки сітки та відношення меж плинності композитів

Аналізуючи рис. 4.31, можна зробити висновки, що при деформації від 25 до 30 % відбувається різке видовження ґратки сітки у складі композиту, та відповідне збільшення різниці властивостей межі плинності композиту у поздовжньому напрямку відносно поперечного.

Від 30 до 35 % деформації видовження ґратки сітки зменшується та зменшується різниця між властивостями межі плинності в поздовжньому та поперечному напрямку.

Зміна овалізації композиту в залежності від відношення меж плинності композитів представлена на рис. 4.32



O_w – зміна овалізації дротів сітки при різних ступенях деформації

Рис. 4.32. Анізотропія армованих композитів при різних ступенях деформації (25, 30, 35, 45, 55%) в залежності від овалізації дротів сітки та відношення між плинності композитів

В діапазоні від 35 до 45% деформації різниця між показниками меж 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. Видовження ґратки сітки – помірне. Після 45% деформації відбувається видовження ґратки сітки.

При 25...30% деформації відбувається зростання овалізації дротів сітки. Від 30 до 35% деформації овалізація уповільнюється, зменшується різниця між плинності в поздовжньому та поперечному напрямках. При 35...45% деформації спостерігається мінімальна різниця між межами плинності композитів [114].

Таким чином, можна зробити висновок про те, що при ступені деформації 35...45% є мінімальною анізотропія армованих алюмінієвих матричних композитів у поздовжньому та поперечному напрямках.

Порівняння значень подовжньої та поперечної межі плинності показує, що їх співвідношення (анізотропія) є найнижчим у цьому діапазоні ступенів деформації (1,03 і 1,07 при 35 та 45%) (таблиця 4.13).

Схоже співвідношення подовжньої та поперечної межі міцності зростає з 1,07 при 35% до 1,13 при 45% ступенях деформації при прокатці (таблиця 4.12, рис.4.29). Це означає, що розвиток овалізації дротів погіршує опір пластичній деформації (відношення межі міцності до межі плинності).

Таким чином, діапазон ступенів деформації в межах 35...45% може бути рекомендований для отримання компромісу між міцністю і пластичністю композитів у подовжньому та поперечному напрямках.

4.6 Розрахунок коефіцієнту трансформації сітки

Одним з напрямків обґрунтувати з'єднання армованого сталеву сіткою композиту можна тим, що відбувається локальне підвищення тиску для з'єднання шарів алюмінію. Це лежить за межами даної роботи, але нижче наведено методику визначення коефіцієнту трансформації сітки, що у порівнянні з замірами сил прокатки може стати корисним для аналізу тиску всередині композиту.

На рисунку 2.12 представлена зона деформації армованого композиту. Запропоновано визначити коефіцієнт k , що розраховується як відношення довжини ґратки сітки (d_{cp} , мм) до довжини зони деформації (l , мм).

Для розрахунку коефіцієнту k , представлено таблицю 4.11, в якій зібрані всі розрахункові дані.

На рис. 4.29 відображено зміну коефіцієнтів k_0 і k_1 в залежності від ступеню деформації. При 35...45% деформації відбувається мінімальне трансформація ґратки сітки по відношенню до зони деформації.

Таблиця 4.11 – Розрахунок коефіцієнту трансформації сітки

Шифр експерименту	D	c ₀	d _a	C ₀	m _c	C ₁	C _{cp}	ε	2h _{al}	h ₁	Δh	l _d	k ₀	k ₁
5083-C-45-25	210	1	0,5	1,41	1,4	1,974	1,69	25	6,2	4,53	1,67	13,24	0,11	0,128
5083-C-45-30	210	1	0,5	1,41	1,63	2,2983	1,85	30	6,2	4,23	1,97	14,38	0,10	0,129
5083-C-45-35	210	1	0,5	1,41	1,85	2,6085	2,01	35	6,2	3,9	2,3	15,54	0,09	0,129
5083-C-45-45	210	1	0,5	1,41	1,94	2,7354	2,07	45	6,2	3,25	2,95	17,60	0,08	0,118
5083-C-45-55	210	1	0,5	1,41	2,28	3,2148	2,31	55	6,2	2,74	3,46	19,06	0,07	0,121
5056-A-45-30	250	3	0,5	4,24	1,49	6,3176	5,28	30	8	5,48	2,52	17,75	0,24	0,297
5056-B-45-30	250	1	0,25	1,41	1,38	1,9458	1,68	30	8	5,48	2,52	17,75	0,08	0,095
6063-A-45-30	250	3	0,5	4,24	1,35	5,724	4,98	30	6	4,23	1,77	14,87	0,29	0,335
6063-B-45-30	250	1	0,25	1,41	1,38	1,9458	1,68	30	6	4,19	1,81	15,04	0,09	0,112

де D – діаметр валку, мм;

c₀ – сторона ґратки сітки, мм;

d_a – діаметр дроту сітки, мм;

d₀ – довжина ґратки сітки вздовж напрямку прокатки(гіпотенуза), мм;

ε – номінальний ступінь деформації, %;

2h_{al} – товщина пакету, мм;

h₁ – товщина пакету після прокатки, мм;

Δh= 2h_{al}-h₁, мм;

l – довжина зони деформації, мм;

k₀ = c₀/l – відношення довжини ґратки сітки до довжини зони деформації;

k₁ = C_{cp}/l – відношення довжини ґратки сітки до довжини зони деформації.

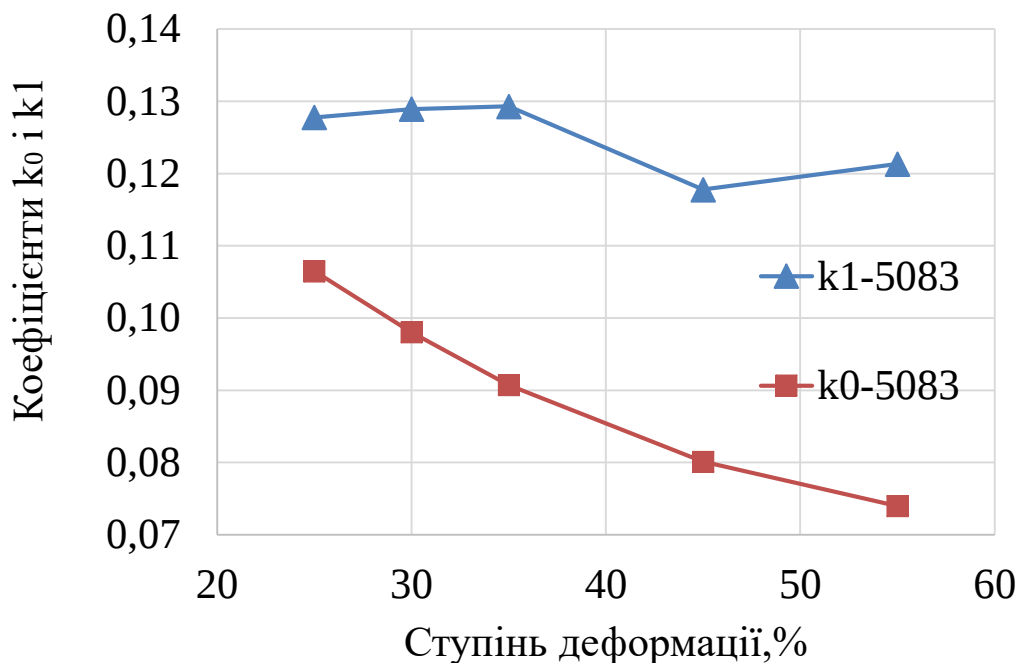


Рис. 4.33. Трансформація ґратки сітки типу «С» в залежності від ступеня деформації

Розглянемо цей коефіцієнт з точки зору впливу розміру ґраток сітки.

На рис. 4.34 відображено значення коефіцієнту k_1 , при ступені деформації 30% для різних типів сітки.

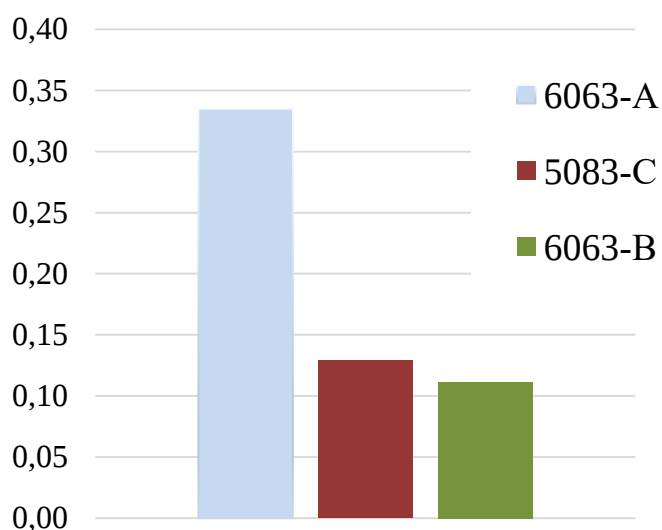


Рис. 4.34. Коефіцієнт k_1 при ступені деформації 30% для різних типів сітки (А - діаметр 0,5 мм; розмір 3×3 мм; С - діаметр 0,5 мм; розмір 1×1 мм; В - діаметр 0,25 мм; розмір 1×1 мм)

Найменше значення коефіцієнту досягається при застосуванні сітки з найменшим розміром ґратки та найменшим діаметром (сітка типу «В» - діаметр 0,25 мм; розмір 1×1 мм). Вплив діаметру сітки на значення коефіцієнту є мінімальним. Для максимальної трансформації сітки пасує сітка з меншим розміром ґратки сітки. Менший вплив має діаметр сітки. Сітка з меншим діаметром показала вищі показники трансформації сітки.

Таким чином, наведено інструмент для подальшого аналізу впливу геометричних параметрів сітки на її поведінку в зоні деформації при прокатці.

4.7 Основи технології виробництва армований алюмінієвих композитів

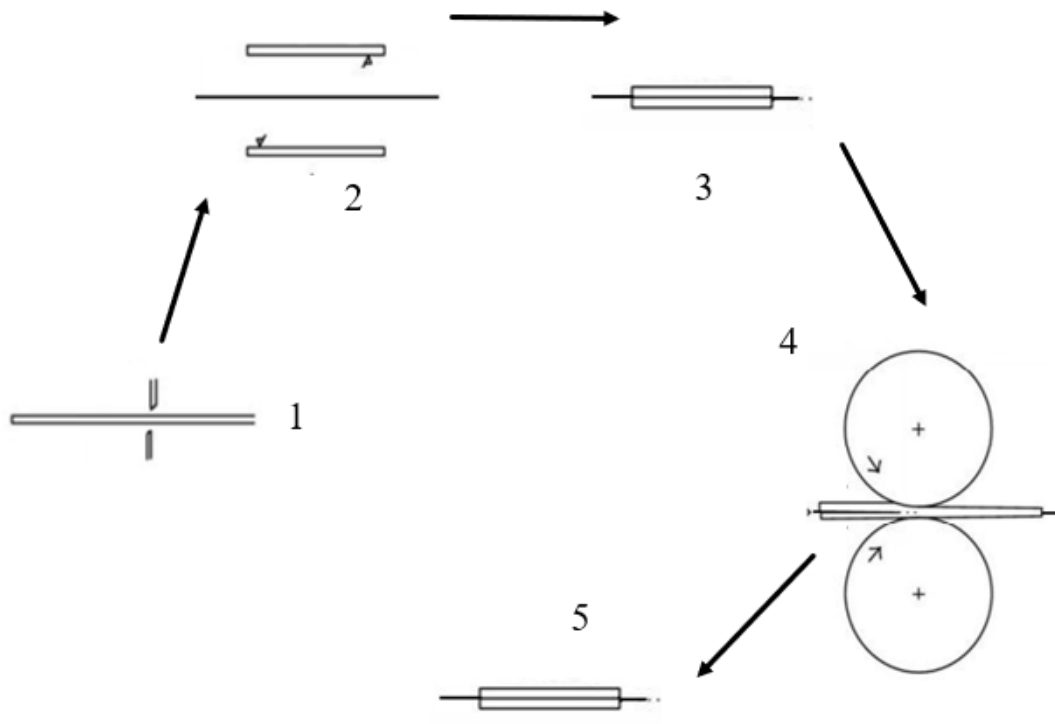
Автором розроблено спосіб отримання композиційних виробів з внутрішніми каналами, який захищено патентом [114]. Згідно з корисною моделлю, складають тришаровий пакет з розміщенням між алюмінієвими пластинами прошарку за певним трафаретом, температуру і час нагрівання пакета визначають, виходячи з сортаменту металу, виду прошарку і товщини пакета, обробку пакета тиском здійснюють прокаткою між валками зі ступенем деформації, який залежить від виду прошарку. Дана технологія змінена під виробництво армованих алюмінієвих композитів. Технологію виробництва армованих композиційних матеріалів описано в роботі [87].

Технології отримання алюмінієвого матричного композиту в загальному вигляді представлена на рис 4.35.

Для отримання алюмінієвого композиту, армованого сталеву 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;
- висоти композиту до висоти (діаметру) сітки в межах 12...32;

- відсоток армуючої фази у поперечному перерізі композиту до 5%.



1. різання алюмінієвих штаб на рівні довжини, підготовка отворів для заклепок;
2. очищення поверхні алюмінієвих штаб та сталевій сітці;
3. з'єднання композиту заклепками та підігрів в печі 500 °С (6 хв на 1 мм висоти заготовки);
4. гаряча прокатка при 35...45% деформації;
5. термічна обробка готового композиту в печі 500 °С 2 години

Рис. 4.35. Основа технології отримання алюмінієвого матричного композиту методом прокатки

Рекомендовані до застосування алюмінієві сплави EN AW-5056 та EN AW-5083, сталева сітка зі сплаву 1.4301, (аналог сплаву X18H9) зі здатністю до деформування та аустенітної структурою, що дозволяє здійснювати глибоку витяжку без проміжного відпалу. Дані про проведення прокатки армованих алюмінієвих штаб передані на виробництво для використання (Додаток В).

Висновки по розділу 4

1) Для всіх зразків прокатаних композитів розшарування після деформації не спостерігається, що свідчить про можливість виробництва композитних матеріалів з алюмінієвою матрицею посиленою сіткою за допомогою гарячої прокатки з ступенем деформації 25...55%. Армування алюмінієвих штаб сплаву EN AW-5083 сіткою з нержавіючої сталі призвело до зміни їх механічних властивостей. Таким чином, міцність армованих штаб у напрямку прокатки трохи вище (на 3 ... 4 %), ніж у двох прокатаних штаб без сітки, тоді як міцність і пластичність останніх в поперечному напрямку краще (на 8...17 та 24...49%), відповідно. Параметри деформації при прокатці відіграють ключову роль в отриманих механічних властивостях композитів.

2) Встановлено, що максимальна деформація при з'єднанні прокаткою обмежується міцністю армуючого дроту. Основний набір параметрів деформації, що характеризують поведінку армуючої сітки, визначали як: коефіцієнт витяжки всього композиту, коефіцієнт видовження ґратки сітки, коефіцієнт витяжки дроту, овалізація дротів. Похибка при визначенні коефіцієнта витяжки, овалізації дроту та зміни площі поперечного перерізу оцінюється як $\pm 3\%$.

Щоб уникнути руйнування дроту у складі композиту з діагональним розташуванням сітки, коефіцієнт витяжки дроту повинен бути співвіднесений із загальним коефіцієнтом витяжки композиту μ_Σ з урахуванням параметру трансформації ґратки сітки. Якщо загальний коефіцієнт витяжки композиту вищий, ніж коефіцієнт витяжки дроту з урахуванням трансформації ґратки сітки, то існує висока ймовірність руйнування дроту в процесі прокатки.

Деформація 25...35% призводить до інтенсивної трансформації ґраток сітки. Крім того, овалізовані дроти обертаються навколо своєї осі. Сума цих явищ призводить до механічного з'єднання шарів матриць через сітку, так зване «Zip-з'єднання», що відбувається між шарами матриці та сіткою. При деформації вище 30 % до зазначеного з'єднання додається з'єднання «матриця-матриця» в середині ґратки сітки.

Встановлено, що при ступеню деформації 25%, поверхня дроту не має жодних слідів пластичного руйнування, що свідчить про відсутність жорсткого дифузійного з'єднання між дротами та алюмінієвою матрицею. Таким чином, при ступеню деформації на 25% армуючі дроти дозволяють механічно зв'язати шари композиту. Це підтверджується тим фактом, що штаби без армування сіткою, прокатані при тих самих параметрах, повністю розшарувалися одразу після прокатки. Відсутність скріплення між шарами композитних та армуючих дротів призводить до інтенсивного відшарування та роздільного протистояння цих компонентів під навантаженням на розтягування.

При деформації 35-45% метал матриць повністю заповнює ґратки сітки та утворює контактну поверхню між алюмінієвими шарами. На цьому етапі зменшується інтенсивність формозміни ґратки сітки, а також витяжки дроту. Овалізація дротів зростає на 33%. У цьому діапазоні ступенів деформації спостерігається помірність всіх вимірюваних властивостей. Розшаровані поверхні при ступені деформації 35% вказують на тісний контакт між компонентами композиту, однак зв'язок між ними все ще не є міцним і безперервним. Пустоти поблизу перетину дротів зменшують загальну зону зв'язку і можуть негативно впливати на міцність з'єднання та на міцність всього композиту.

При деформації 45...55% інтенсивність зміни форми ґратки сітки, а також витяжка дроту падає, заповнюючи решту порожнин. Овалізація дротів істотно зростає. Видовження ґраток та дротів тут стає майже пропорційним поведінці усього композиту. Дроти просковзують та розпочинають локалізовану пластичну деформацію алюмінію і, таким чином, забезпечують міцне зчеплення між матричними шарами поблизу краю дроту. Для цієї стадії характерний інтенсивний дифузійний зв'язок, що підвищує міцність зв'язків між матричними шарами та армуючими дротами зі збільшенням ступеню деформації при прокатці.

Проте при підвищенні ступеню деформації при прокатці армуючі дроти сітки набувають значної овалізації, грають роль ножа, який розрізає щойно утворений зв'язок «матриця-матриця». Термічна обробка композитів при 500° С сприяла

утворенню безперервного шару інтерметалевих фаз і призвела до усунення зміцнення та залишкових напружень у композиті.

Проникнення алюмінію між армуючою сіткою з заповненням найменших проміжків під час прокатки з ступенем деформації 55% підтверджено металографічними зображеннями. Це ж підтверджує можливість виготовлення твердого композиту без пустот та проміжків при більш високих ступенях деформації при прокатці.

3) У всіх випадках подовжні властивості композиту «Тип 45» вищі, ніж поперечні. Поперечні механічні властивості зменшуються зі збільшенням деформації. Це викликано зміною форми ґратки сітки, а також овалізацією дротів. Термічна обробка прокатоного композиту знижує межі плинності і міцності, а також підвищує подовження при розриві. При випробуваннях на удар вплив термічної обробки відіграє більш значну роль, що призводить до майже 50% збільшення залишкового радіусу згинання при ступені деформації 45%.

4) Вперше встановлені закономірності деформації сталевих армуючих сіток, розташованих між алюмінієвими штаб, а саме трансформація (видовження) ґратки сітки (μ_c), витяжка ($\mu_{w(45)}$) та овалізація ($O_{w(45)}$) дроту від ступеня деформації (ε) при прокатці.

Підвищення межі міцності композиту відбувається за рахунок армування сіткою так само, як від локального зміцнення алюмінієвої матриці дротами сітки. Основною особливістю композиту «Тип 45» є те, що спостерігається при його руйнуванні. Це є чисельні відокремлені розриви зразку в зонах між сіткою. Завдяки сильному зчепленню між матрицею та армуючими дротами ці дроти заважають розвитку деформації і руйнування.

5) Поліпшення властивостей армованого композиту обмежене завдяки накопиченню деформації в дротах під час прокатки. Отже, коли вона поєднується з додатковою локалізованою інтенсивною компресією в вузлах сітки, цей ефект призводить до передчасного руйнування дроту та індукованому передчасному руйнуванню всього композиту.

Найбільш сприятливі результати в поздовжніх випробуваннях на розтягування були отримані в зразках, що були прокатані при деформації 45%.

6) Досліджено вплив термічної обробки після деформації на властивості композиту та встановлено, що термічна обробка призвела до суттєвого 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).

7) Проаналізовано здатність композиту до поглинання енергії удару, виявлено, що порівняння армованих композитів та прокатанах 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 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.

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

8) Дістали подальшого розвитку відомості про закономірності анізотропії механічних властивостей армованого композиту в залежності від параметрів деформації композиту та деформації його елементів: видовження ґратки сітки та овалізації сітки. Таким чином, діапазон ступенів деформації в межах 35...45% може бути рекомендований для отримання компромісу між механічними властивостями композитів у поздовжньому та поперечному напрямках.

Як правило, збільшення деформації прокатки призводить до наступного ланцюжку деформації сітки: зміна форми ґратки - натяг дротів - овалізація дротів. Виявлено три механізми руйнувань композиту, які корелюють за даними, отриманими в третьому розділі роботи для іншої серії експериментів.

9) На основі результатів випробувань на розтягування встановлено три механізми руйнування армованих композитів, отриманих сумісною прокаткою при різних ступенях деформації. Це дозволяє прогнозувати механізм руйнування прокатаного композиту при навантаженнях на розтягування по одному з трьох встановлених механізмів.

Ці механізми переходять один в другий при збільшенні ступеня деформації при прокатці. Встановлено, що при ступенях деформації 35...45%, має місце «Zip-з'єднання», що сприяє прояву механізму розшарування «Відшарування першого шару → Обмежене розшарування → Розрив другого шару».

Запропонований та визначений коефіцієнт трансформації сітки. Для максимального локального підвищення тиску для з'єднання шарів алюмінію пасує сітка з меншим розміром ґратки сітки. Менший вплив має діаметр сітки. Наведено методику визначення коефіцієнту трансформації сітки, що у порівнянні з замірами сил прокатки може стати корисним для аналіз тиску всередині композиту.

10) Запропоновано основи технології прокатки алюмінієвих штаб армованих сталевими сітками для одержання суцільного композиту з підвищеними механічними властивостями. Елементи цієї технології передані до ПАТ «АЛЮМАШ» для впровадження (акт про передачу для використання наукових результатів дисертаційної роботи від 19 червня 2018 р.)

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

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 сталеву 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 здатності 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 сталевією сіткою під кутом 45° до напрямку прокатки, в скінченно-елементному середовищі QForm. При моделюванні використовувалась температура зразка 500° 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 видовження 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 (μ_Σ), трансформації (видовження) ґратки сітки (μ_c), витяжки ($\mu_{w(45)}$) та овалізації ($O_{w(45)}$) дроту від ступеня деформації (ϵ) 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 ступеню 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 випробувань 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 «Зір-з'єднання», що сприяє прояву механізму розшарування «Відшарування першого шару → Обмежене розшарування → Розрив другого шару».

11. Розроблено основи технології отримання алюмінієвого композиту, армованого сталевією 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tjong, S.C. Processing and deformation characteristics of metals reinforced with ceramic nanoparticles / S.C. Tjong // Nanocrystalline materials [Internet]. 2nd ed. Oxford: Elsevier. – 2014. – P. 269–304.
2. Rino J.J., An overview on development of aluminium metal matrix composites with hybrid reinforcement. / Rino J.J., Chandramohan D., Sucitharan K.S., Jebin V.D. // International Journal of Science and Research. – 2012. – vol. 1. – №3. – P. 196-203.
3. Surappa, M.K. Aluminium matrix composites: challenges and opportunities / M.K Surappa. // Sadhana. – 2003.– 28(1–2). –P. 319–334.
4. Clad metals, roll bonding and their application for SOFC in terconnects / L. Chen, Z. Yang, B. Jha, G. Xia, J. W. Stevenson // Journal of Power Sources. – 2005. – 152. – P. 40-45.
5. Ramnath B. V., Aluminium metal matrix composites - a review/ B. Vijaya Ramnath, C. Elanchezhian, RM. Annamalai, S.Aravind, T. Sri Ananda Atreya, V. Vignesh, C.Subramanian//Reviews on advanced materials science . –2013. – №38. – P. 55-60.
6. ДСТУ 2241-93 Матеріали композитні. Склопластики. Терміни та визначення. / Нац.стандарт України. – Вид. офіц. – [чинний від 1994 -07-01]. – Київ: Держспоживстандарт України, 1993. – 47 с.
7. Структура и свойства композиционных материалов / К.И. Портной, С.Е. Салибеков, И.Л. Светлов, В.М. Чубаров. – Москва: Машиностроение, 1979. – 255 с.
8. Ralph B., The processing of metal matrix composites — an overview/B. Ralph, H.C. Yuen and W.B. Lee // Journal of Materials Processing Technology. – 1997. –vol. 63. – №1-3. – P. 339 – 353.
9. Конструктивные особенности кузова легкового автомобиля [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: www.autoexp.org/files/constr_features.doc.
10. Thermal calculation of the hot rolling process of sheet aluminium / N. Hatta, H. Takuda, H. Fujimoto M. Ueda // Applied Mechanics. – 1992. – 62. – P. 435-446.
11. Алюминиевый кузов — хорошо или плохо? Ищем «плюсы» и «минусы» использования алюминия в автомобилестроении [Електронний ресурс]. – 2016. –

Режим доступа до ресурсу: <http://avtopulsar.ru/alyuminievyj-kuzov-xorosho-ili-ploxo-ishhem-plyusy-i-minusy-ispolzovaniya-alyuminiya-v-avtomobilestroenii>.

12. Casati, R. Metal matrix composites reinforced by nano-particles: review / R. Casati, M. Vedani // *Metals*. – 2014. – 4(1). – P.65–83.

13. Alaneme, K.K. Corrosion and wear behaviour of rice husk ash-alumina reinforced Al-Mg-Si alloy matrix hybrid composites / K.K. Alaneme, P.A. Olubambi // *J. Mater Res Technol.* – 2013. – 2(2). – P.188–194.

14. Fabrication and heat treatment of ceramic-reinforced aluminium matrix composites: a review / D.K. Das, P.C. Mishra, S. Singh, S. Pattanaik // *Int. J. Mech. Mater. Eng.* – 2014/ – 9(1). – P.1-15.

15. Alaneme K.K., Mechanical behaviour of alumina reinforced AA 6063 metal matrix composites developed by two step – stir casting process / Alaneme K.K., Bodunrin M.O. // *Acta Tech Corvinensis. – Bulletin of Engineering*. – 2013. – № 6(3). – P. 105-110.

16. Alaneme, K.K. Fracture toughness (K_{1C}) and tensile properties of as-cast and age-hardened aluminium (6063) – silicon carbide particulate composites / K.K. Alaneme, A.O. Aluko // *Sci. Iran.* – 2012. – 19(4). – P. 992–998.

17. Ramnath, B.V. Metal matrix composites: a review Rev / B.V. Ramnath, C. Elanchezhian, R.M. Annamalai et al. // *Adv. Mater. Sci.* – 2014. – 38. – P.55-60.

18. Bodunrina, M.O. Aluminium matrix hybrid composites: a review of reinforcement philosophies; mechanical, corrosion and tribological characteristics / M.O. Bodunrina, K.K. Aalanemea, L.H. Chown // *Jornal of Materials research and technology*. – 2015. – 4(4). – P. 434-445.

19. Fatile O.B., Microstructure and mechanical behaviour of stir-cast Al-Mg-Si alloy matrix hybrid composite reinforced with corn cob ash and silicon carbide/ Fatile O.B., Akinruli J.I., Amori A.A. // *International Journal of Engineering and Technology Innovation*. – 2014. – №4 (4). – P. 251-259.

20. Sugarcane bagasse – the future composite material: a literature review / Y.R. Loh, D. Sujan, M.E. Rahman, C.A. Das // *Resour Conserv Recycl.* – 2013. – 75. – P. 14–22.

21. Madakson, P.B. Characterization of coconut shell ash for potential utilization in metal matrix composites for automotive applications / P.B. Madakson, D.S. Yawas, A. Apasi // *International Journal of Engineering Science and Technology*. – 2012. – vol. 4. – №3. – P. 1190–1198.
22. Anilkumar, H.C. Mechanical properties of fly ash reinforced aluminium alloy (Al6061) composites / H.C. Anilkumar, H.S. Hebbar, K.S. Ravishankar // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* – 2011. – 6(1). – P. 41-45.
23. Aigbodion, V.S. The development of mathematical model for the prediction of ageing behaviour for Al-Cu-Mg/Bagasse Ash Particulate Composites experimental study of ageing behaviour of Al-Cu-Mg/bagasse ash particulate composites / V.S. Aigbodion, S.B Hassan., E.T. Dauda // *Trib. Ind.* – 2010. – 9(10). – P.28.
24. Prasad, S.D. Production and mechanical properties of A356.2/RHA composites / S.D. Prasad, R.A. Krishna // *Int. J. Adv. Sci. Technol.* – 2011. – 33. – P.51–58.
25. Fabrication characteristics and mechanical behaviour of rice husk ash–alumina reinforced Al-Mg-Si alloy matrix hybrid composites / K.K. Alaneme, I.B. Akintunde, P.A. Olubambi, T.M. Adewale // *J. Mater. Res. Technol.* – 2013. – 2(January (1)). – P. 60–67.
26. Mechanical behavior of ultrafine-grained Al composites reinforced with B4C nanoparticles/ Z. Zhang, T. Topping, Y. Li et al. // *Sci. Mater.* – 2011. – 65(8). – P.652–657.
27. Microstructural and mechanical evaluation of Al-TiB₂ nanostructured composite fabricated by mechanical alloying / Z. Sadeghian, B Lotfi., M.H. Enayati, P. Beiss // *J. Alloys Compd.* – 2011. – 509(29). – P. 7758–7763.
28. Liu Y.Q., AlN nanoparticle-reinforced nanocrystalline Al matrix composites: fabrication and mechanical properties / Y.Q. Liu, H.T. Cong, W. Wang, C.H. Sun, H.M. Cheng // *Mater Sci Eng A*. – 2009. – 505(1–2). – P. 151–156.
29. Casati, R. Metal matrix composites reinforced by nano-particles — a review / R. Casati, M. Vedani // *Metals*. – 2014. – 4(1). – P. 65–83.

30. Tjong, S.C. Processing and deformation characteristics of metals reinforced with ceramic nanoparticles / S.C. Tjong // *Nanocrystalline materials*. 2nd ed. Oxford: Elsevier. – 2014. – P. 269–304.
31. Mobasherpour, I. Effect of nano-size Al₂O₃ reinforcement on the mechanical behavior of synthesis 7075 aluminum alloy composites by mechanical alloying / I. Mobasherpour, A.A. Tofigh, M. Ebrahimi // *Mater. Chem. Phys.* – 2013. – 138(2–3). – P. 535–541.
32. Mazahery, A. Characterization of cast A356 alloy reinforced with nanoSiC composites / A. Mazahery, M.O. Shabani // *Trans Nonferrous Metal Soc. China*. – 2012. – 22(February (2)). – P. 275–280.
33. Shivaraja, H.B. Experimental determination and analysis of fracture / H.B. Shivaraja, B.P. Kumar // *Toughness MMC*. – 2014. – 3(7). – P. 888–892.
34. Miracle, D.B. Metal matrix composites – from science to technological significance / D.B. Miracle // *Compos Sci. Technol.* – 2005. – 65(15–16). – P. 2526–2540.
35. Rajmohan, T. Synthesis and characterization of sintered hybrid aluminium matrix composites reinforced with nanocopper oxide particles and microsilicon carbide particles / T. Rajmohan, K. Palanikumar, S. Arumugam // *Compos. Part. B. Eng.* – 2014. – 59. – P. 43–49.
36. Ramnath, B.V. Metal matrix composites: a review Rev / B.V. Ramnath, C. Elanchezhian, R.M. Annamalai et al. // *Adv. Mater. Sci.* – 2014. – 38. – P.55-60.
37. Биметаллические материалы / М.И. Чепурко, В.Я. Остренко, Л.Я Глускин и др. - Л.: Судостроение, 1984. – 272 с.
38. Прокатка металлов в вакууме и инертной среде / Ф.Е. Долженков, Ю.И. Бать, Ю.И. Кривоносов и др. // *Труды Украинского науч.- иссл. ин-та металлов*. – 1964. – Вып. X. – С.64.
39. Bhalla, A. K. Production of stainless steel wire-reinforced aluminium composite sheet by explosive compaction / A. K. Bhalla, J. D. Williams // *Journal of Materials Science*. – 1977, Volume 12, Issue 3. – P. 522–530.

40. Получение биметаллических листов прокаткой вакуумированных пакетов / В.С. Смирнов, О.Ф. Данилевский, А.А. Александров и др. // Сталь. – 1966. – № 11. – С. 1014-1015.

41. Процес - дифузійне зварювання [Електронний ресурс]. – Технічна енциклопедія Tech Trend. – Режим доступу до ресурсу: <http://techtrend.com.ua/index.php?newsid=23680>

42. Борц, Б.В. Создание композиционных материалов методом горячей прокатки в вакууме / Б.В. Борц // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (93). – 2009. №2. – С. 128-134.

43. Вакуумный прокатный стан для изделий атомной энергетики / И.М. Неклюдов, Б.В. Борц, А.Т. Лопата и др. // Труды XVIII Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению, 8-13 сентября 2008, Алушта, 2008. – С. 199-201.

44. Luo H. Preparation of aluminum foam sandwich reinforced by steel sheets / Luo H., Lin H., Zhao Zh., Liu Yi., Yao G. // Procedia Materials Science. – 2014. – № 4. – P. 39-42.

45. Расщупкин, В.П. Композиционные материалы, системы алюминиевые сплавы – сталь / В.П. Расщупкин, Г.С. Гарибян, В.В. Гурдин // Омский научный вестник, 2009. - № 1 (77). – С. 15-16.

46. Шинкарев, А.С. Моделирование прокатки многослойных композитов на основе разнородных металлов / А.С. Шинкарев, А.Г. Колесников // Издатель ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана». – 2. – № 6, Эл № ФС 77-48211. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/191739.html>.

47. High speed twin roll casting of 6016 aluminium alloy strip / H. Sakaguchi, T. Haga, H. Watari, S. Kumai // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2007. – V.20. – Issues 1-2. – P. 495-498.

48. High speed twin roll casting of 6061 alloy strip / T. Haga, H. Sakaguchi, H. Watari, S. Kumai // Journal of Achievements in Materials Science and Engineering and Manufacturing Engineering. – 2008. – V.31. – Issues 1. – P. 49-52.

49. Twin-roll casting of aluminum-steel clad strips / O. Grydin, G. Gerstein, F. Nürnberger et al. // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2013. – 15 (4). – P. 501-507.
50. Sandwich rolling of twin-roll cast aluminium-steel clad strips / M. Stolbchenko, O. Grydin, F. Nürnberger et al. // *Procedia Engineering*. – 2014. – 81. – P. 1541-1546.
51. Casting of wire-inserted composite aluminum alloy strip using a twin roll caster / T. Haga, K. Takahashi, R. Nakamura et al. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – 192–193. – P. 108–113.
52. Casting of a wire inserted strip using a twin roll caster equipped with two nozzlesb / T. Haga, K. Takahashi, S. Kumai et al. // *Advanced Materials Research*. – 2011. – 337. – P. 556-559.
53. Технология прокатного производства: Учебник для вузов / А.П. Грудев, Л.Ф. Машкин, М.И. Ханин. - М.: Металлургия, 1994. – 656 с.
54. Данченко, В.М. Обробка металів тиском: Навчальний посібник / В.М. Данченко. - Дніпропетровськ: Пороги, 2006. - 183 с.
55. Бейгельзимер, Я.Е. Простой сдвиг в обработке материалов давлением / Бейгельзимер Я.Е., Павленко Д.В., Тарасов А.Ф., Коцюба В.Ю., Кулагин Р.Ю., Давиденко А.А. // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти: матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. - 2018. - С. 25-28.
56. Manesh, H. The effect of annealing treatment on mechanical properties of aluminum clad steel sheet / H. Manesh, A. Taheri // *Materials and Design*. – 2003. – 24 (8). – P. 617-622.
57. Eizadjou, M. Investigation of roll bonding between aluminum alloy strips / M. Eizadjou., H. Danesh Manesh, K. Janghorban // *Materials and Design*. – 2008. – 29. – P. 909–913.617-622.
58. Abedi, R. Bond strength and mechanical properties of three-layered St/AZ31/St composite fabricated by roll bonding / R. Abedi, A. Akbarzadeh // *Materials & Design*. – 2015. – 88. – P. 880-888.

59. Jamaati, R. Effect of friction, annealing conditions and hardness on the bond strength of Al/Al strips produced by cold roll bonding process / R. Jamaati, M.R. Toroghinejad // *Materials & Design*. – 2010. – 31(9). – P. 4508-4513.

60. Аркулис, Г.Э. Методика графического анализа пластической деформации n-слойных тел / Г.Э. Аркулис // *Черная металлургия*. – 1960. – № 1. – С. 49-52.

61. Chaudhari, P. Cold roll bonding of multi-layered bi-metal laminate composites / P. Chaudhari, V. Acoff // *Composites Science and Technology*. – 2009. – 69(10). – P. 1667-1675.

62. Grydin O. Twin-Roll Casting of Carbon Fiber-Reinforced and Glass Fiber-Reinforced Aluminum Strips [Электронный ресурс] / Grydin O., Stolbchenko M., Schaper M. // *Light Metals 2016*. – 2016. – P. 1007-1012. – Режим доступа до ресурсу: <http://dx.doi.org/10.1002/9781119274780.ch168>.

63. Quadir, M.Z. Influence of processing parameters on the bond toughness of roll-bonded aluminum strip / M.Z. Quadir, A. Wolz, M. Hoffman, M. Ferry // *Scripta Materialia*. – 2008. – 58(11). – P. 959-962.

64. Eizadjou, M. Mechanism of warm and cold roll bonding of aluminum alloy strips / M. Eizadjou, H. Danesh Manesh, K. Janghorban // *Materials & Design*. – 2009. – 30(10). P. 4156-4161.

65. Cold roll bonding of bimetallic sheets and strips Materials / D. Pan et al. // *Science and Technology*. 1989. – 5 (9). – P. 934-939.

66. Effect of heat treatment on bond characteristics of aluminum clad steel: Production and characteristics of vacuum roll bonded clad materials / S. Mukae et al. // *Welding International*. – 1995. – 9. – P. 384-389.

67. Yan, H. A study of warm and cold roll-bonding of an aluminum alloy / H. Yan, G. Lenard // *Materials Science and Engineering*. – 2004. – 385(12). – P. 419-428.

68. Manesh, H.D. Effective parameters on bonding strength of roll bonded Al/St/Al multilayer strips / H.D. Manesh, H.Sh. Shahabi // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2009. – 476. – P. 292-299.

69. Some preliminary tests on aluminum alloy sheets reinforced with strong wires / P.J.E. Forsyth, R.W. George, D.A. Ryder // *Applied Materials Research*. – 1964. – №3. – P. 223-228.

70. Investigation of different parameters on roll bonding quality of aluminium and steel sheets / M. Buchner, B. Buchner, B. Buchmayr, H. Kilian, F. Riemelmoser // *Int. J. Mater. Form.* – 2008. – Suppl 1. – P.1279–1282.

71. Макеева, А. С. Исследование процесса пластической деформации совместной горячей прокатки двух алюминиевых полос с алюминиевой проволокой / А. С. Макеева, 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. – 2017. - № 57. – P. 175-180.

72. Patent US3314825 Composite metal structural components. – a new method. / Forsyth P.J., Farnham S., George R.W. et al., USA. - 1967.

73. Patent US3201862 Process for making steel-reinforced aluminum members - a new method./ Gotoh, K., USA.– 1965.

74. Patent US3551996 Process for the production of aluminum-steel composite. – a new method./ Cole DQ, Davis LRW, Sumner EV, USA.– 1971.

75. Talebian, M. Manufacturing Al/steel multilayered composite by accumulative roll bonding and the effects of subsequent annealing on the microstructural and mechanical characteristics / M. Talebian, M. Alizadeh // *Materials Science and Engineering*. – 2014. – A 590. – P.186-193.

76. A deformation mechanism of hard metal surrounded by soft metal during roll forming / Y.U. Hailiang, A.K. Tieu, L.U. Cheng et al. // *Scientific reports* 2014. – 4.

77. Semiatin, S.L. Formability of sandwich sheet materials in plane strain compression and rolling / S.L. Semiatin, H.R. Piehler // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 1979. – 10(1). – P. 97-107.

78. Recent developments in bulk metal forming / A.E. Tekkaya, T. Ishikawa, Y. Yoshida, K. Hayakawa, Z. Wang // *Proceedings of the 45th ICFG Plenary Meeting*. – 2012. – ICFG2012. – P.57–77.

79. Roll casting of net inserted aluminum alloy strip / T. Haga, K. Takahashi, R. Nakamura et al. // Mater Form. – 2010. – 3. – P. 1063-1066.

80. Characterization of debonding strength in steel-wire-reinforced aluminum and its influence on material fracture / A. Morasch, A. Reeb, H. Baier, K.A. Weidenmann, V. Schulze // Engineering Fracture Mechanics. – 2015. – 141. – P. 242-259.

81. Heinrich, W. Die Faser- und Fadenverstärkung von plastischen und spröden Matrixmaterialien / W. Heinrich, J. Nixdorf // Journal of Materials Technology. – 1971. – № 8. – P. 398-405.

82. ДСТУ ISO 6361-2:2007 «Алюміній і алюмінієві сплави здеформовані. Листи, штаби та плити. Частина 2. Механічні властивості».

83. Стандарт DIN EN 573-3. Алюминий и алюминиевые сплавы. Химический состав и форма деформированных изделий. Часть 3. Химический состав и форма изделий.

84. 5056 (A95056) Aluminum [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/5056-A95056-Aluminum>.

85. Фролов, Я.В. Учет упрочнения металла теплообменных труб из аустенитных сталей при периодической прокатке на станах ХПТ / Я.В. Фролов, А.А. Терещенко, С.С. Дудка // Бюллетень научно-технической и экономической информации. «Черная металлургия». – 2009. – № 9. – С. 61-63.

86. 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.

87. 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: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0941>

88. EN ISO 6892-1: 2017 Metallic materials -- Tensile testing -- Part 1: Method of test at room temperature

89. EN ISO 179/2D Determination of Charpy impact properties

90. Моменти інерції деяких простих перерізів. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://budmex.com.ua/node/20>.

91. Коржуев М.А., Прочность армированных и неармированных монокристаллов Bi_2Te_3 / Коржуев М.А., Кулакова Е.А. // Журнал технической физики. – 1997. – т. 62. – №2. – С. 50-54

92. Manesh, H.D. Effective parameters on bonding strength of roll bonded Al/St/Al multilayer strips / H.D. Manesh, H.Sh. Shahabi // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – 476. – P. 292–299.

93. Chaudhari, P. Cold roll bonding of multi-layered bi-metal laminate composites / P. Chaudhari, V. Acoff // Composites Science and Technology. – 2009. – 69(10). – P. 1667-1675.

94. Yan, H. A study of warm and cold roll-bonding of an aluminum alloy / H. Yan, G. Lenard // Materials Science and Engineering. – 2004. – 385(12). – P. 419-428.

95. Bogatov, A. Deformation, stress and fracturing of steel in the process of flat rolling / A. Bogatov, H. Dyja, D. Nukhov // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2016. – 51. – 4. – P. 379-384.

96. Bogatov, A. FEM-simulation of plate rolling process, analysis of inhomogeneous deformation and indexes of stress state in the deformation zone / A. Bogatov, D. Nuknov, K. Pyankov // International Scientific Journal published monthly by the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering. – 2014. – Volume 66. – Issue 1. – P.31-38.

97. Frolov, Ya.V. The heat conditions of the pilger rolling / Ya.V. Frolov, I. Mamuzic, V. N. Danchenko // Metallurgia. – 2006. – 3. – P. 179-184.

98. Strain parameters at hot rolling of aluminum strips reinforced with steel netting [Електронний ресурс] / М. Stolbchenko, H. Makeieva, O. Grydin, Ya. Frolov, M. Schaper // Journal of Sandwich Structures and Materials. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1177/1099636218792539>.

99. 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.

100. 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.

101. 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.

102. 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.

103. ASTM A478 - 97(2013) Standard Specification for Chromium-Nickel Stainless Steel Weaving and Knitting Wire

104. Зильберг, Ю.В. Определение напряжения текучести по экспериментальным значениям среднего давления / Ю.В. Зильберг, Я.В. Фролов // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ : «Системні технології», – 2002. – Т. 5. – С. 186-190.

105. 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.

106. Huagui, Huang Mechanical properties and reinforced mechanism of the stainless steel wire mesh-reinforced Al-matrix composite plate fabricated by twin-roll casting / Huang Huagui, Wang Jichao, Liu Wenwen // Advances in Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 9(6). – P. 1–9.

107. DIN EN ISO 11339 Adhesives - T-peel test for flexible-to-flexible bonded assemblies (ISO 11339:2010); German version EN ISO 11339:2010

108. Макеєва, Г.С. Вплив параметрів деформації на формозміну сталевий 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.

109. Influence of strain parameters at rolling on the properties of wire-reinforced aluminium composites / Y. Frolov, M. Stolbchenko, O. Grydin, H. Makeeva, M. Tershakovec, M. Schaper // International Journal of Material Forming. – 2018. – vol. 11. – №50. – <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1431-6>

110. On the formation and growth of intermetallic phases during interdiffusion between low-carbon steel and aluminum alloys / H. Springer, A. Kostka, E.J. Payton et al. // Acta Mater. – 2011. – 59(4). – P. 1586–1600.

111. Development of Pipe Cold Pilger Rolling Mode Computation Method with Account of Metal Properties Change / V. N. Danchenko, Y. V. Frolov, V. S. Dekhtyarev [etc.] // Metallurgical and mining industry. – 2011. – Vol. 3. – No. 3. – P. 110-113.

112. Shah, L.H. Review of research progress on aluminum-steel dissimilar welding / L.H. Shah, M. Ishak // Mater Manuf Process. – 2014. – 29(8). – P. 928-933.

113. Wohletz, S. Temperature influence on bond formation in multimaterial joining by forging / S. Wohletz, P. Groche // Procedia Eng. – 2014. – 81. – P. 2000-2005.

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

115. 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 НМетАУ. – № u201800144; заявл. 03.01.2018; опубл. 10.07.2018, Бюл. 13.

Додатки

Додаток А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Статті у фахових виданнях України та інших держав:

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

3. Investigation of the bimetals 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. – 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. Tershakovec, 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. Макеева**, 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 сталевій сітці в складі армованого алюмінієвого матричного композиту / **Г.С. Макеєва**, Я.В. Фролов // Наука і металургія: ІІ Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених. - Дніпро: ІЧМ НАН України. - 2018. – С.36.

Інші публікації:

11. Макеєва, Г. С. Исследование деформация 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. Макеева**, М.Ю. Столбченко, А.К. Андреев, В.Д. Коваленко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. – №3. – С. 57-65.

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

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 металургія» (м. 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.).

Додаток Б



"Затверджую"

Перший проректор

Національної металургійної
академії України

д.т.н., проф. Іващенко В.П.

" 12 " 06 2018 р.

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи Макеєвої Г.С.

Отримані аспіранткою кафедри обробки металів тиском ім. О.П. Чекмарьова Макеєвою Ганною Сергіївною у рамках дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук нові теоретичні дані, що підтверджені експериментально, щодо розрахунку теоретичної межі міцності та плинності прокатаних армованих сталевую сіткою алюмінієвих композитів для визначення формозміни сітки в складі композиту знайшли використання в навчальному процесі на кафедрі обробки металів тиском ім. О.П. Чекмарьова.

Вказані вище наукові результати використовуються при викладанні дисциплін «Обробка металів тиском», «Процеси та машини обробки тиском» і «Зварювання тиском та процеси з'єднання» для бакалаврів та магістрів спеціальності 136 Металургія (спеціалізація - обробка металів тиском), а також при виконанні студентами курсових проектів і випускних кваліфікаційних робіт.

Завідувач
кафедри ОМТ
д.т.н., проф.

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and strokes.

Я. В. Фролов

Додаток В

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Головний інженер

ПрАТ Дніпровський завод
«АЛЮМАШ»

Данченко Ю. В.

« 19 » 06 2018 г.

АКТ

**про передачу для використання наукових результатів дисертаційної роботи
Макеєвої Ганни Сергіївни
в умовах ПрАТ Дніпровський завод «АЛЮМАШ»**

Для можливого використання у технологічному процесі, а також планування виробництва в умовах ПрАТ Дніпровський завод «АЛЮМАШ» передані наступні результати дисертаційної роботи аспірантки кафедри Обробки Металів Тиском Національної Металургійної Академії України Макеєвої Ганни Сергіївни:

1. Дані про зміну геометрії сітки між шарами алюмінієвої матриці сплавів EN AW-5056 та EN AW-6063 під час гарячої повздовжньої прокатки, зокрема кути викривлення вічка сітки, які становлять 12-16% при 30 % деформації, а також параметри овалізації та витяжки дротів сітки при різних ступенях деформації;

2. Кількісні дані про зміну механічних властивостей алюмінієвого матричного композиту зі сплавів EN AW-5056, EN AW-6063 та EN AW-5083 та отриманих на його основі за допомогою гарячої прокатки алюмінієвих армованих матричних композитів. Зокрема передані дані про результати статичних та динамічних випробувань.

Главный технолог

С. В. Артеменко

Главный механик

В. П. Метелин



Главный специалист КО

С. Е. Подольский

Додаток Г



UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

UNIVERSITÄT PADERBORN | 33095 PADERBORN

FAKULTÄT FÜR MASCHINENBAU



LWK
Lehrstuhl
für Werkstoffkunde

Lehrstuhl für Werkstoffkunde

Dr. tech. n. Olexandr Grydin
Raum E5.105
Fon 0 52 51 60-42 28
Fax 0 52 51 60-38 54
E-Mail grydin@lwk.upb.de

Paderborn, den 21.06.18

Reference letter

for results of dissertation thesis of Ms. Hanna Makeieva from the Chair of Metal Forming
of the National Metallurgical Academy of Ukraine

With this letter, I would like to confirm that the Chair of Materials Science of the Paderborn University has successfully implemented some results of dissertation work prepared by Ms. Hanna Makeieva in the lectures and practical exercises for regular and postgraduate students. The following listed below results obtained by Ms. Hanna Makeieva have been used in our research work:

- Optimal parameters of hot roll bonding of steel net-reinforced aluminum strips utilizing the two-high rolling stand of the LWK;
- Data on the mechanical properties of hot-rolled steel net-reinforced aluminum matrix composites;
- Fracture mechanism of the layered composites during quasi-static loading.

The results obtained by Ms. Hanna Makeieva are on a high scientific level and have good practical applicability.

I would like to thank Ms. Hanna Makeieva for the successful scientific collaboration and to wish good luck in her future life and career.

Paderborn, 21.06.18


Lehrstuhl für Werkstoffkunde,
Universität Paderborn

Chief engineer, Dr. tech. n. Olexandr Grydin
Werkstoffkde, Str. 100
D-33098 Paderborn

Переклад додатку Г

Університет Падерборну
Факультет машинобудування
Кафедра матеріалознавства

д.т.н., проф.. Олександр Гридін
кім. E5.105
+49 5251 60 3855
+49 5251 60 3854
grydin@lwk.upb.de
Падерборн, 21.06.2018

Рекомендаційний лист

за результати дисертаційної роботи пані Ганни Макєєвої
від кафедри обробки металів тиском Національної металургійної академії
України

Цим листом, я хотів б підтвердити, що Кафедра матеріалознавства Університету Падерборн успішно впровадила деякі результати дисертаційної роботи, підготовленої пані Ганні Макєєвої, на лекціях та практичних заняттях для студентів та аспірантів. Наведені нижче результати, отримані пані Ганною Макєєвою, були використані в нашій дослідницькій роботі:

- Оптимальні параметри з'єднання гарячою прокаткою армованих сталеву сіткою алюмінієвих полос, що прокатані на двошвидкісному прокатному стані кафедра матеріалознавства;
- Дані про механічні властивості гарячекатаних армованих сталевими сітками алюмінієвих матричних композитів;
- Механізм розриву шарів композитів під час квазістатичного навантаження.

Результати, отримані пані Ганною Макєєвою, знаходяться на високому науковому рівні та мають хорошу практичну придатність.

Я хотів би подякувати пані Ганні Макєєвій за успішне наукове співробітництво та побажати успіху у майбутньому житті та кар'єрі.

Падерборн, 21.06.2018

Ведучий інженер, д.т.н., Олександр Гридін

Переклад з англійської мови
на українську виконав

Переклад з англійської мови
на українську вірний

 Макєєва Г.С.

 Кощинко А.А.