

Носко М.І., Коноводов Д.В., Самсоненко А.А., Бобух О.С.

## Аналіз формозміни сталевих сіток в алюмінієвому композиті в процесі прокатки-з'єднання.

M. Nosko, D. Konovodov, A. Samsonenko, O. Bobukh

### Analysis of steel meshes deformation inside aluminum matrix during roll bonding.

*Мета.* Порівняти деформацію армованих композитних матеріалів з використанням у якості фази армування плетеної та просічно-витяжної сталеві сітки.

*Методика.* Було виконано експериментальне дослідження впливу величини висотної деформації пакета на деформацію сталеві сітки, що використовується у якості фази для армування, під час прокатки алюмінієвих композитів. В якості фази для армування використовували дротяну та просічно-витяжну сітку з нержавіючої сталі. Після прокатки досліджували вплив деформації на зміну кута комірки сітки в середині композиту.

*Результати.* Встановлено вплив висотної деформації на зміну форми та деформацію сталеві сітки між двома листами алюмінію в процесі спільної прокатки. Показано, що просічно-витяжна сітка є кращим шаром для армування композитів на основі алюмінію, отриманих методом прокатки, оскільки її коефіцієнти подовження нижчі, ніж у дротяної сітки. При цьому встановлено, що раціональне обтиснення при прокатці-з'єднанні становить понад 30%. Більш низьке обтиснення майже не викликає змін в розмірі ґраток, а деформація армованої сітки здійснюється лише за рахунок подовження і стиснення дротів.

*Наукова новизна.* Представлене дослідження є оригінальним, так як вперше проведено порівняння параметрів деформації фази армування під час прокатки композитів на основі сплаву алюмінію AA1050, армованого плетеною та просічно-витяжною сталеві сіткою.

*Практична значущість.* Практична цінність представлених наукових результатів полягає в тому, що вони можуть бути використані для вдосконалення методів розрахунку течії металів з різними значеннями опору деформації при спільній пластичній деформації в умовах високого гідростатичного тиску.

*Ключові слова:* гаряча прокатка, спільна пластична деформація, армування, сталева сітка, композит.

*Abstract.*

*Purpose.* Compare the deformation of reinforced aluminum alloy composite materials using braided and expanded steel mesh as the reinforcement phase.

*Methodology.* An experimental study was made of the effect of the high-altitude deformation of the package on the deformation of the steel mesh used as a phase for reinforcement during the rolling of aluminum composites. Braided and expanded steel mesh was used as a reinforcement phase. After rolling, the effect of deformation on the change in the angle of the mesh cell inside the composite was studied.

*Findings.* The influence of high-altitude deformation on the change in the shape and deformation of the steel mesh between two aluminum sheets during rolling is established. It has been shown that expanded steel mesh is the preferred layer for reinforcing aluminum-based composites obtained by rolling, since its elongation coefficients are lower than those of braided mesh. At the same time, it was found that the rational reduction during roll-bonding is more than 30%. Lower compression causes almost no changes in the size of the grid, and the deformation of the reinforced mesh is carried out only due to the elongation and compression of the wires.

*Originality.* The presented study is original, since for the first time a comparison was made of the deformation parameters of the reinforcement phase during the rolling of composites based on AA1050 aluminum alloy reinforced with braided and expanded steel mesh.

*Practical value.* The practical value of the presented scientific results lies in the fact that they can be used to improve the methods for calculating the flow of metals with different values of resistance to deformation under general plastic deformation under high hydrostatic pressure.

*Key words:* hot rolling, general plastic deformation, reinforcement, steel mesh, composite.

**Вступ.** Сьогодні під час створення низки виробів та вузлів агрегатів у машинобудуванні, авіаційній та ракетно-космічній техніці знаходять широке застосування високоміцні та легкі композиційні матеріали. Є підстави стверджувати, що механічні властивості конструкційних матеріалів, які застосовуються у теперішній час, не є достатніми для деяких перспективних виробів. Тому необхідні композиційні матеріали, в тому числі на основі алюмінію, з більш високим рівнем міцності або інших спеціальних властивостей. Одним з видів таких матеріалів є шаруваті композитні матеріали, зміцнення яких відбувається за рахунок застосу-

вання фази армування.

В даній роботі розглянуто процес гарячої прокатки листового алюмінієвого композиту, зі вставкою із сталеві сітки. Важливим фактором, який визначає якість отриманого композиту, є надійність зварювання двох шарів алюмінієвої матриці між собою у процесі прокатки. Дослідження зосереджено на вивченні поведінки різних видів сіток в алюмінієвому композиті зі зміною деформації під час процесу прокатки-з'єднання. Раціональна варіація наведених параметрів при прокатці може привести до покращення властивостей виробу, таких як зменшення ваги, збільшення міцності при

Носко М.І.,  
Коноводов Д.В.,  
Самсоненко А.А.,  
Бобух О.С.

Nosko M.I.,  
Konovodov D.V.,  
A.A. Samsonenko,  
Bobukh O.S.

ударі та підвищення вогнестійкості. Отримані таким чином композитні матеріали можуть використовуватися як захисні екрани, декоративні елементи та вихідні матеріали для конструкційних елементів.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Багато авторів досліджували вплив прокатки на міцність з'єднання компонентів композиту. Наприклад, відомо, що більш високе обтиснення збільшує міцність на відшарування [1, 2]. Для з'єднання алюмінієвих шарів і сітки з аустенітної сталі сприятливе обтиснення для поліпшення механічних властивостей композиту становить 45% [3], виходячи з режиму руйнування при випробуваннях на розтягнення. У той же час в [4] було показано, що використання твердого сталевого сердечника у холоднокатаному композиті алюміній-сталь, при 10% обтиснення, міцність відшарування можна порівняти з міцністю на відшарування при гарячій прокатці, яка відбувається при обтисненнях 30% [1] і 35 % [5]. В дослідженні [6] описано механізм з'єднання, який названо «zip-bonding». При такому з'єднанні метал матриці оточує твердий дріт внаслідок його постійної овалізації та повороту. Це забезпечує механічну міцність з'єднання навіть при обтисненні всього 25%.

Підвищення температури прокатки покращує здатність до з'єднання більшості металів, як було доведено у [4] для різних комбінацій матриць та елементів армування. Подальший відпал стимулює дифузію між шарами, що, з одного боку, призводить до кращої міцності зв'язку, але, з іншого боку, також сприяє утворенню інтерметалідних фаз на межі поділу, які, в свою чергу, можуть мати різний вплив на властивості композиту в залежності від металів і сплавів [1, 4].

Використання армування високоміцним матеріалом дозволяє досягти підвищення механічних властивостей композиту, але його часткове руйнування в процесі виробництва може значно погіршити властивості готового виробу [7]. Це також обґрунтовує важливість знання та контролю параметрів деформації під час прокатки. На даний час немає надійного способу прогнозування деформації жорстких вставок із сітки, яка виготовлена зі сталі, всередині пакету. Незважаючи на те, що па-

раметри які мають вплив на з'єднання при прокатці плоских виробів та їх діапазон, добре описані в літературі, кількісні дані про прокатку-з'єднання композитів армованих сіткою є достатньо малочисельними.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є порівняння деформації армованих композитних матеріалів з алюмінієвого сплаву з використанням плетеної та просічно-витяжної сітки у якості фази армування.

Для досягнення даної мети у дослідженні були поставлені наступні завдання: 1) визначити деформацію сітки всередині композиту, що має вплив на можливість з'єднання композиту під час прокатки та комплекс кінцевих експлуатаційних параметрів таких композитів, 2) порівняти поведінку різних типів сітки при прокатці армованих матеріалів.

Порівняння параметрів деформації сіток дозволить обґрунтовано обирати тип сітки при виробництві армованого алюмінієвого композиту.

**Матеріали та методи дослідження.** Плоский композит, що складається з двох зовнішніх шарів алюмінієвого сплаву і сітки з нержавіючої сталі в середині, був виготовлений методом прокатки-з'єднання. В якості матриці композиту використовувалися алюмінієвий сплав у вигляді тонких штаб:

Композит, що складається з двох пластин з алюмінієвого сплаву та вкладеною сіткою з нержавіючої сталі, був виготовлений методом прокатки-з'єднання. Матеріалом для матриці слугували тонкі листи з алюмінієвого сплаву AA 1050 з розмірами 3 × 70 × 200 (h × b × l) мм. Хімічний склад сплаву алюмінієвої матриці наведено в табл. 1. В якості фази для армування використовували дротяну та просічно – витяжну сітку з двох марок нержавіючої сталі EN 1.4301 та AISI 304 (рис. 1).

Розміри вічка сітки декілька відрізнялися, але периметр комірки, тобто відносна кількість фази армування були однаковими. Розміри вічка дротяної сітки складала 3×3 мм, а розміри вічка просічно – витяжної сітки зі сталі AISI 304 складала 2×4 мм. Товщина сталевих сіток дорівнювала 0,5 мм. Хімічний склад сталей з яких виготовлено сітки, наведено в табл. 2.

Таблиця 1 – Хімічний склад алюмінієвого сплаву AA 1050

| Найменування сплаву | Хімічний склад, % |         |         |            |        |         |        |
|---------------------|-------------------|---------|---------|------------|--------|---------|--------|
|                     | Fe                | Si      | Ti      | Al         | Cu     | Mg      | Zn     |
| AA1050              | до 0,5            | 0,3-0,7 | до 0,15 | 97,25-99,3 | до 0,1 | 0,4-0,9 | до 0,2 |

Таблиця 2 – Хімічний склад сталевих сіток

| Найменування сплаву | Хімічний склад, % |        |        |           |          |        |      |
|---------------------|-------------------|--------|--------|-----------|----------|--------|------|
|                     | C                 | Si     | Mn     | Cr        | Ni       | N      | Fe   |
| EN 1.4301           | < 0,07            | < 1,00 | < 2,00 | 17,5-19,5 | 8,0-10,5 | < 0,10 | інше |
| AISI 304            | до 0,8            | до 0,8 | до 0,2 | 17 - 19   | 9 - 11   | до 0,2 | ~69  |

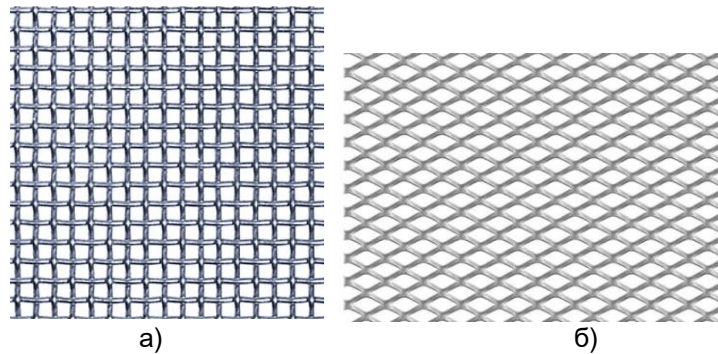


Рисунок 1 – Сітка, яка використовувалася при дослідженні: а – сталь EN 1.4301; б) сталь AISI 304

Було підготовлено два типи заготовок: композит з плетеною сіткою, орієнтованою під кутом 45 (по діагоналі) до напрямку прокатки (тип 1); композит з сіткою просічно-втяжного типу (тип 2).

Для забезпечення більшої стабільності перебігу процесу прокатки, заготовки скріплювались в кутах алюмінієвими заклепками.

Слід зазначити, що оптимальна температура для з'єднання шарів алюмінію у валках складає біля 500 °С, але це також призводить до того, що сталеві сітка з нержавіючої сталі стає крихкою при деформації. Таким чином, було вирішено провести попередню термообробку плетеної та просічно-втяжної сітки для підвищення їх пластичності під час проведення експериментальних досліджень.

Сітку з нержавіючої сталі нагрівали в печі та витримували протягом 5 хвилин при температурі 1050 °С. Потім охолоджували у воді для отримання високої пластичності та усунення зміцнення, яку отримав матеріал сітки в процесі її виготовлення. Потім елементи композитного матеріалу очищали етиловим спиртом, збирали у пакети та скріплювали по краях спереду та ззаду за допомогою алюмінієвих заклепок.

Отримання композитних матеріалів здійснювали на двовалковому прокатному стані. Діаметр робочих валків стана складав 250 мм. Процес прокатки проводили за один прохід, діапазон відносних обтисків складав від 20 до 50%. Перед прокаткою зразки нагрівали до температури 500 °С. Швидкість прокатки становила 0,4 м/с. З метою забезпечення достовірності результатів експерименту, для кожного набору параметрів виконували прокатку трьох зразків.

Після прокатки пакету, алюміній видаляли з використанням розчину гідроксиду натрію і вимірювали дрібнозернисту твердість сітки, а також її параметри деформації.

**Результати дослідження.** Після прокатки на стані дуо 250 складених заготовок-пакетів, отримали штаби армовані сіткою (рис. 2).

В якості основного параметру формозміни вічка сітки було обрано видовження вічка ( $\mu_c$ ). Видовження вічка розраховується як відношення довжини (діагоналі) вічка сітки після прокатки та довжини (діагоналі) вічка сітки до прокатки.

Тобто видовження вічка сітки  $\mu_c$  дорівнює відношенню  $d_1/d_0$ . На рис. 3, на прикладі плетеної сітки, показано розміри вічка, які використовували при розрахунку.

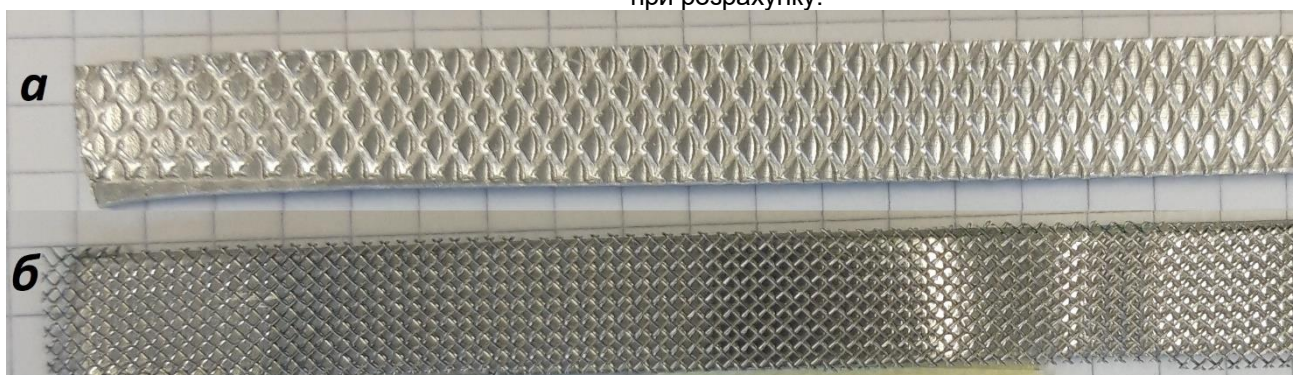


Рисунок 2 – Зовнішній вигляд прокатаних зразків: а – з просічно-втяжною сіткою; б – з плетеною сіткою

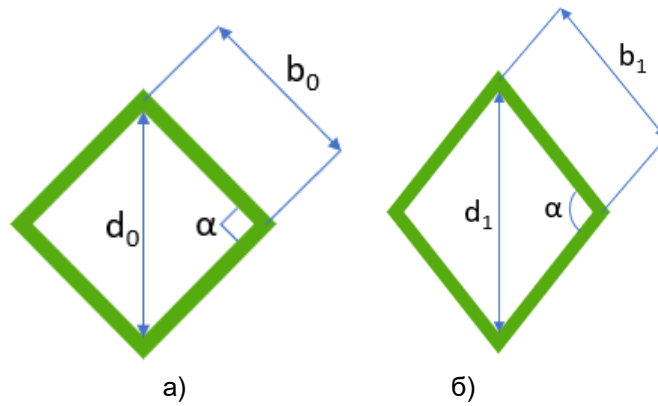


Рисунок 3 – Схема видовження вічка плетеної сітки: а – вічко сітки до деформації; б – вічко сітки після деформації

Довжину вічка  $d_1$  можна розрахувати, знаючі розмір  $b_1$  та кут розкриття сітки  $\alpha$ , який вимірюється до та після прокатки. Отримані данні коефіцієнта  $\mu_c$  та коефіцієнт видовження всього композиту при застосування у якості фази армування плетеної сітки наведено в табл. 3.

Особливість композиту армованого сіткою можна спостерігати при його руйнуванні. Вона полягає у розриві зразка в зонах між вузлами сітки. Завдяки сильному зчепленню між матрицею та дротами, що армують, ці дроти перешкоджають розвитку деформації.

Таблиця 3 - Геометричні параметри елементів сітки плетеного типу

| № серії | Обтиснення, % | Коефіцієнт видовження ґратки | Коефіцієнт видовження всього композиту |
|---------|---------------|------------------------------|--|
| 1       | 20            | 1,68                         | 1,28                                   |
| 2       | 30            | 1,89                         | 1,37                                   |
| 3       | 40            | 1,98                         | 1,35                                   |
| 4       | 50            | 2,30                         | 1,37                                   |

При прокатці композитів без сітки (тип 3) спостерігалось незначне відшарування у двох композитах, тоді як у армованих композитах (тип 1) відшарування не спостерігалось.

Для розрахунку параметрів деформації ґратки просічно-витяжної сітки у складі композиту була використана зазначена вище методика. Схему видовження вічка такої сітки показано на рис. 3.

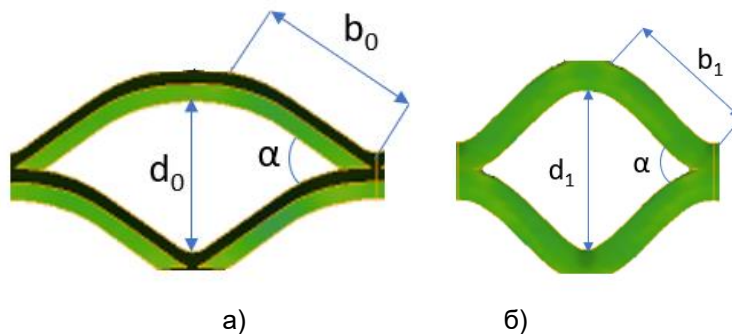


Рисунок 3 – Схема видовження вічка просічно-витяжної сітки: а – вічко сітки до деформації; б – вічко сітки після деформації

Геометричні параметри вічка сітки визначалися за допомогою мікроскопа. Результати розрахунку представлені в таблиці 4.

Візуальне спостереження прокатки пакетів показало, що при величині обтиснення до 30% може не забезпечуватися надійне з'єднання шарів у композитному матеріалі.

Таблиця 4 - Геометричні параметри елементів сітки просічно-витяжного типу

| № серії | Обтиснення, % | Кут між дротами ґратки, ° | Коефіцієнт видовження ґратки | Коефіцієнт видовження всього композиту |
|---------|---------------|---------------------------|------------------------------|--|
| 1       | 20            | 82                        | 1,55                         | 1,25                                   |
| 2       | 30            | 90                        | 1,75                         | 1,40                                   |
| 3       | 40            | 105                       | 1,85                         | 1,65                                   |
| 4       | 50            | 110                       | 2,20                         | 1,83                                   |



**Обговорення результатів.** Експериментальні дані підтвердили, що поріг для ефективного обтиснення під час прокатки-з'єднання, з точки зору міцності з'єднання шарів, знаходиться вище 30 %. Більш низькі значення обтиснення не завжди забезпечують надійне з'єднання шарів, так як у цих умовах сітка деформується тільки за рахунок подовження і стиснення її вічка.

Кут між дротами вічка зі збільшенням обтиснення композиту при прокатці спочатку збільшується лінійно на 10 градусів на кожні 10% обтиснення, а при перевищенні значення обтиснення 40%, збільшення кута стає повільніше.

Зміна кута сітки залежно від тиску при прокатці дозволяє визначити величину обтиснення, необхідне для досягнення оптимального кута (90°) між дротами. Цей параметр становить близько 30% у цих експериментальних умовах. Даний вид орієнтації сітки всередині композитного матеріалу може призводити до зменшення неоднорідності властивостей матеріалу в різних напрямках.

Важливим фактором при прокатці є співвідношення між довжиною зони деформації та середньою товщиною штаби. Це співвідношення називається "фактором форми зони деформації" і використовується для поділу всіх випадків прокатки товстих, середніх та тонких штаб. Для кожного випадку існують характерні закономірності розподілу деформації по висоті штаби. При прокатуванні композитних матеріалів цей чинник дуже важливий при визначенні деформації різних складових пакета. Результати аналізу фактор форми зони деформації для діапазону обтиснень, що використовуються в поточному дослідженні, показали, що значення фактор форми відповідають випадку прокатки середніх та тонких штаб.

При обтисненні 20% та 30% відношення довжини деформаційної зони до середньої товщини штаби відповідно становить 2,2 та 2,8, що відповідає прокатці середніх штаб. При обтисненні 40% та 50% відношення довжини деформаційної зони до середньої товщини штаби становить 3,5 та 4,1, що відповідає прокатці тонких штаб.

Коефіцієнт подовження решітки в експерименті з плетеною сіткою  $\mu_c$  дорівнює 1,68-2,3, що вище, ніж коефіцієнт подовження решітки з просічно-

витажною сіткою 1,55-2,2. Ця відмінність обумовлена способом з'єднання проводів в елементах сіток. У вузлах плетеної сітки дроти накладені і не мають жорсткого з'єднання, в той час як у просічно-витажній сітці вузли суцільні. В результаті плетена сітка має рухомі частини у вузлах і більший коефіцієнт подовження решітки в порівнянні з просічно-витажною сіткою.

Композит із плетеною сіткою має більшу нерівномірність деформації, ніж деформація самого композиту, що ускладнює досягнення бажаних параметрів сітки. Це також може призвести до руйнування сітки. З іншого боку, композит із просічно-витажною сіткою має менший коефіцієнт подовження та більш рівномірну деформацію, що може стати важливою перевагою при виборі типу сітки для армування алюмінієвих композитів.

**Висновки.** Встановлено, що раціональне обтиснення при прокатці-з'єднанні становить більше 30%. Більш низьке обтиснення майже не викликає змін в розмірі вічка сітки, а деформація сітки здійснюється лише за рахунок подовження і стиснення дротів.

Визначено, що зміна кута сітки залежно від обтиснення при прокатці, дозволяє визначити величину обтиснення, яке необхідне для досягнення оптимального кута 90° між дротами. Цей параметр становить близько 30% у представлених експериментальних дослідженнях. Даний вид орієнтації сітки всередині композитного матеріалу може призводити до зменшення неоднорідності властивостей такого матеріалу.

Встановлено, що просічно-витажна сітка за малих обтиснень має менший коефіцієнт видовження вічка ніж плетена сітка. Ці відбувається за рахунок того, що в просічно-витажній сітці не має переплетених дротів, так як її отримують шляхом витягування сталевих листів. Це дозволяє зменшити ризик розриву сітки в місцях перехрещення дротів. Тому просічно-витажна сітка є кращою в якості шару армування композитів на основі алюмінію, отриманих шляхом прокатки-з'єднання. Недоліки плетеної сітки обмежують можливості її промислового застосування в армованих компози-

#### Бібліографічний опис

1. Jamaati, R., Toroghinejad, M., (2010). Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process. *Materials Science and Engineering: A*, 527/9, 2320-2326. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.11.069>
2. Abbasi, M., Toroghinejad, M., (2010). Effects of processing parameters on the bond strength of Cu/Cu roll-bonded strips. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(3), 560-563. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.11.003>
3. Haranich, Y., Y., Frolov, Y., V., (2016) Comprehensive analysis of metal– polymer sandwich composite manufacturing. *Obrabotka Material Davleniem (Treatment of Materials by Pressure)*. 2/45, 136-141.
4. Akramifard, H., Mirzadeh, H., Parsa, M., (2014). Cladding of aluminum on AISI304L stainless steel by cold roll bonding: Mechanism, Microstructure, and Mechanical Properties. *Materials Science and Engineering: A*, 613, 232-239. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.109>

5. Soltani, M., Jamaati, R., Toroghinejad, M., (2012). The influence of TiO<sub>2</sub> nano-particles on bond strength of cold roll bonded aluminum strips. *Materials Science and Engineering: A*, 550, 367-374. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.089>
6. Frolov, Y., Stolbchenko, M. Grydin, O., Makeeva, H., Tershakovec, M., Schaper, M., (2019). Influence of strain parameters at rolling on the properties of wire-reinforced aluminium composites. *International Journal of Material Forming*, 12(4), 505-518. <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1431-6>
7. Grydin, O., Stolbchenko, M., & Schaper, M. (2016). Twin-roll casting of carbon fiber-reinforced and glass fiber-reinforced aluminum strips. In *Light Metals 2016* (pp. 1007-1012). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48251-4\\_168](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48251-4_168)

#### References

1. Jamaati, R., Toroghinejad, M., (2010). Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process. *Materials Science and Engineering: A*. 527/9, 2320-2326. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.11.069>
2. Abbasi, M., Toroghinejad, M., (2010). Effects of processing parameters on the bond strength of Cu/Cu roll-bonded strips. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(3), 560-563. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.11.003>
3. Haranich, Y., Y., Frolov, Y., V., (2016) Comprehensive analysis of metal– polymer sandwich composite manufacturing. *Obrabotka Materials Davleniem (Treatment of Materials by Pressure)*. 2/45, 136-141.
4. Akramifard, H., Mirzadeh, H., Parsa, M., (2014). Cladding of aluminum on AISI304L stainless steel by cold roll bonding: Mechanism, Microstructure, and *Mechanical Properties*. *Materials Science and Engineering: A*, 613, 232-239. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.109>
5. Soltani, M., Jamaati, R., Toroghinejad, M., (2012). The influence of TiO<sub>2</sub> nano-particles on bond strength of cold roll bonded aluminum strips. *Materials Science and Engineering: A*, 550, 367-374. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.089>
6. Frolov, Y., Stolbchenko, M. Grydin, O., Makeeva, H., Tershakovec, M., Schaper, M., (2019). Influence of strain parameters at rolling on the properties of wire-reinforced aluminium composites. *International Journal of Material Forming*, 12(4), 505-518. <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1431-6>
7. Grydin, O., Stolbchenko, M., & Schaper, M. (2016). Twin-roll casting of carbon fiber-reinforced and glass fiber-reinforced aluminum strips. In *Light Metals 2016* (pp. 1007-1012). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48251-4\\_168](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48251-4_168)