

DOI: 10.34185/1991-7848.2023.01.05

УДК 621.771.01:621.771.8

Д.В. Коноводов, В.І. Наконечний

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ШАРІВ АЛЮМІНІЮ ТА МАГНІЮ ПРИ ПРОКАТЦІ ТРИШАРОВИХ ШТАБ

**Анотація.** Сучасні сплави магнію, які застосовуються у автомобільній та аерокосмічній промисловості, схильні до корозії, що обмежує їх використання. Одним з варіантів підвищення стійкості до корозії є використання штаб зі сплавів магнію всередині тришарових штаб, зовнішні шари яких складаються зі штаб іншого металу або сплаву. В роботі розглянуто тришарові штаби зі сплаву алюмінію та магнію, які були отримані методом спільної гарячої пластичної деформації на прокатному стані. Дослідження поведінки шарів різних металів в середині тришарової штаби було виконано з використанням оптичного мікроскопу. Встановлено, що зовнішні шари зі сплаву AW-2017A при прокатці тришарових штаб, обтискаються інтенсивніше, ніж внутрішні шари зі сплаву AZ31. При деформації заготовок із загальною початковою товщиною 12,8 мм зі ступенем деформації по висоті 50%, відносна деформація шарів зі сплаву алюмінію в середньому складає 50 – 52 %, а шарів зі сплаву магнію – 44%. Для штаб з початковою товщиною заготовки 8 мм, спостерігається подібне співвідношення у висотній деформації шарів.

**Ключові слова:** біметалева штаба, гаряча прокатка, алюміній, магній, шар, товщина, деформація.

### Постановка проблеми

Застосування нових конструкційних матеріалів у машинобудівній промисловості має за мету зменшення ваги виробів та габаритів конструкцій. Одним з перспективних напрямків впровадження нових матеріалів, є застосування біметалевих композитів, які мають підвищені експлуатаційні властивості та задовольняють сучасним потребам машинобудування.

Вироби з магнієвих сплавів мають великі перспективи застосування в аерокосмічній та автомобілебудівній промисловості [1]. Але широкому

застосуванню сплавів магнію перешкоджає їх низька стійкість до корозії. Застосування біметалевих композитів зі сплавів магнію та алюмінію, де сплав алюмінію виступає у ролі захисного шару, дозволяє підвищити корозійну стійкість сплаву магнію.

### **Аналіз останніх публікацій**

Достатньо простим у реалізації є спосіб спільного лиття для отримання біметалів [2]. Недоліком литого матеріалу є його відносно низькі механічні властивості. Ефективним способом отримання біметалів є спільна пластична деформація різних сплавів [3]. Найбільш продуктивним є процес пластичної деформації у прокатних валках. Відоме застосування процесу прокатки для отримання біметалевих, зокрема тришарових штаб зі сплавів алюмінію та магнію [4, 5]. Процес деформація може відбуватися при попередньому нагріванні заготовок до високих температур [4] або здійснюватися при кімнатній температурі [5].

Для отримання листового біметалевого прокату свою ефективність показав процес інтенсивної пластичної деформації, який отримав назву «Accumulative Roll Bonding» (ARB) [6]. При реалізації даного процесу заготовки з різних матеріалів складують пакетом та прокатують з високими ступенями деформації за різну кількість проходів. При цьому після кожного проходу заготовка поділяється навпіл та складується у новий пакет. Ступень деформації в кожному проході досягає 50%.

В роботі [7] наведено дані щодо прокатки тришарових штаб зі сплавів алюмінію та магнію при початковій температурі заготовки 360 та 410 °C з різними ступенями деформації. Їх аналіз свідчить про те, що застосування ступеня деформації на рівні 50% забезпечує надійність з'єднання шарів магнію та алюмінію.

Захист штаби зі сплаву магнію штабою з алюмінієвого сплаву, є одним з методів підвищенні корозійної стійкості магнію, адже алюмінієві сплави має високу стійкість до корозії. Легкий магній, обгорнутий стійким до корозії алюмінієм, знижує загальну вагу конструкцій. Але на сьогодні недостатньо досліджено деформацію шарів магнію та алюмінію при спільній пластичній

деформації. Тому **метою** роботи є експериментальне дослідження деформації шарів зі сплавів магнію та алюмінію при гарячій прокатці тришарових штаб.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження.**

Експериментальне дослідження поведінки шарів алюмінію та магнію при прокатці тришарових штаб проводили на лабораторному стані дуо 210. Для дослідження використовували заготовки-пакети, які склалися з двох алюмінієвих та однієї магнієвої штаби довжиною 180 мм. Штаби були виготовлені зі сплаву магнію AZ31 (ASTM) та алюмінію AW-2017A (EN573). Штабу зі сплаву AZ31 товщиною 2 мм розміщували між двома штабами зі сплаву алюмінію AW-2017A. За рахунок використання алюмінієвих штаб різної товщини, отримали заготовки-пакети товщиною 8,0 та 12,8 мм. Ширина пакетів складала 70 мм.

З метою видалення оксидних плівок з поверхні, перед складенням у пакет, всі штаби були знежирені. Передній кінець пакету з'єднувався заклепками по кромкам штаб та заточувався для покращення захоплення заготовок прокатними валками. Задні кінці заготовок-пакетів не були зафіксовані для можливості вільної деформації металів. Тому, при прокатці, спостерігалось деяке відносне зміщення шарів магнію та алюмінію на задньому кінці прокатаного пакету. В подальшому ці кінці обрізалися.

Перед початком прокатки поверхні нижнього ті верхнього валків зачищалися наждачним папером та знежирювались етиловим спиртом. Перед прокаткою на стані 210 заготовки-пакети нагрівалися в камерній електричній печі протягом приблизно 20 хвилин до температури 450 °С. Температура зразків та печі контролювалася за допомогою термопар. Одна з термопар була встановлена безпосередньо у сплав магнію, тобто температура вимірювалася в середині пакету. Приймальний стіл прокатної кліти був вкритий керамікою для запобігання витратам тепла заготовки.

Після нагрівання пакетів до необхідної температури проводилась їх прокатка на стані дуо 210 зі ступенем деформації 50%. Швидкість прокатки складала 0,26 м/с. Зображення вихідних заготовок та прокатаних композитів представлено на рис. 1.

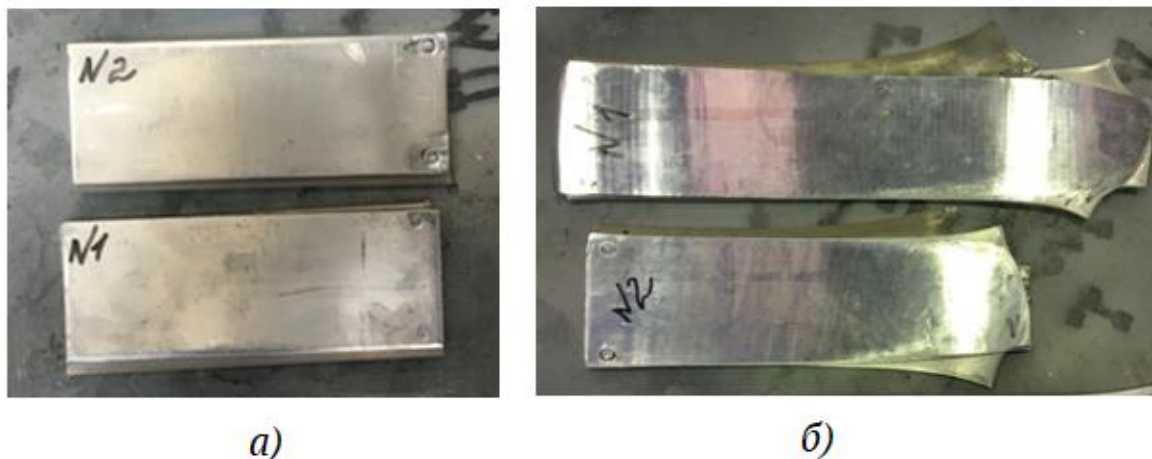


Рисунок 1 – Заготовки-пакети до (а) та після (б) прокатки

Для дослідження поведінки шарів зі сплавів алюмінію та магнію при прокатці тришарових штаб, було відрізано зразки з кожного пакету. Зразки вирізалися з середини пакета шириною 35 мм, так як прикромкові та кінцеві ділянки штаби мали певні дефекти. Відібрані зразки після шліфування та поліровки поверхні розміщувалися вертикально в контейнерах та заливалися струмонепровідним полімером. Один з торців зразка співпадав з верхньою площиною контейнера (рис. 2).



Рисунок 2 –Зразок, підготовлений для дослідження на мікроскопі

Для детального вивчення поведінки шарів з різних сплавів у біметалевому пакеті, було використано оптичний мікроскоп. За допомогою мікроскопа були зроблені знімки поверхні та виміряна товщина кожного шару. Фотографії було виконано у світлому та темному полі оптичного мікроскопу.

З оптичного мікроскопу отримували зображення при 10 та 20-ти кратному збільшенні. По зображенням з десятикратним збільшенням досліджували зразки на наявність макродефектів. Вимірювання проводили у п'яти перерізах по ширині зразка з кроком 100 мм від середини (рис. 3).

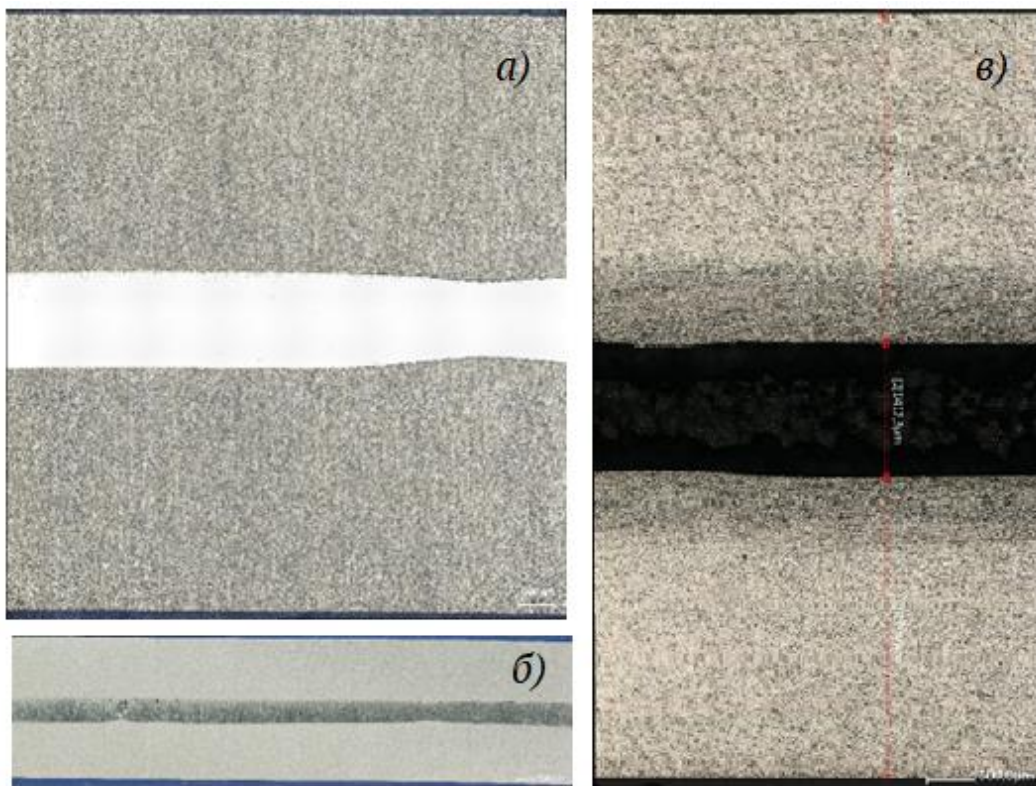


Рисунок 3 – Поперечний переріз тришарової штаби:  
*a* – двадцятикратне збільшення; *б* - десятикратне збільшення;  
*в* – десятикратне збільшення у темному полі мікроскопу з розмірами шарів

В деякий випадках спостерігалось руйнування шарів магнію в середині тришарової штаби. Більша вірогідність руйнування спостерігалась при прокатці пакетів з меншою початковою товщиною (рис. 4).

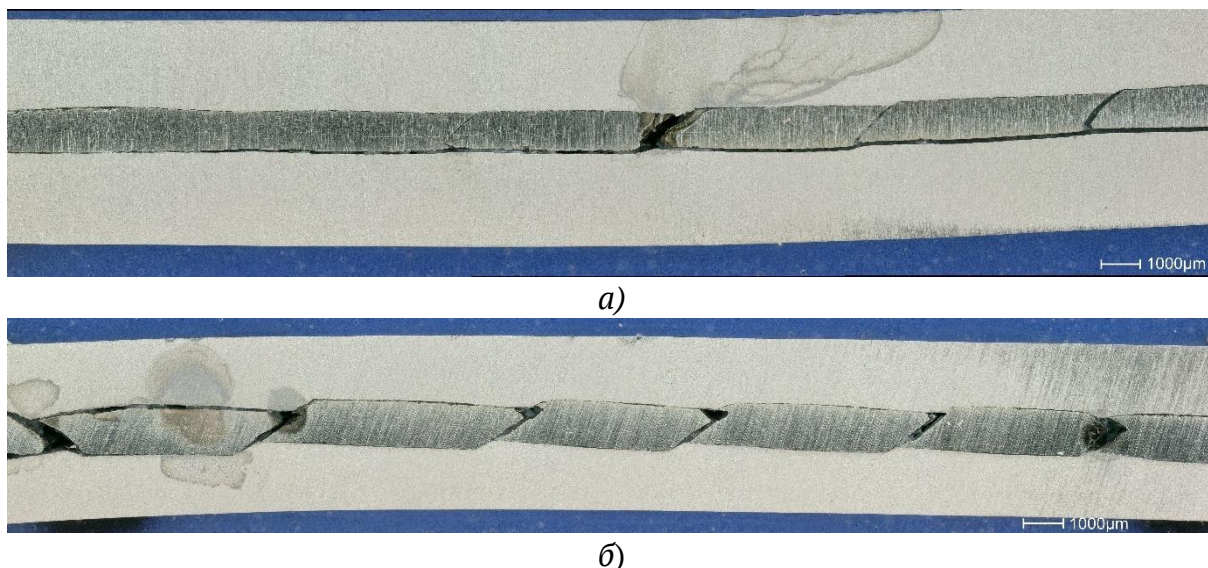


Рисунок 4 – Руйнування шарів зі сплаву магнію всередині тришарової штаби:  
а – початкова товщина пакету 12,8 мм; б – початкова товщина пакету – 8,0 мм

Дослідження поведінки шарів зі сплавів магнію та алюмінію в середині тришарової штаби при гарячій пластичній деформації показало, що при заданому ступеню деформації 50%, шари зі сплаву магнію отримали меншу відносну деформацію ніж шари зі сплаву алюмінію. Причому така залежність встановлена як для пакетів з початковою товщиною 8 мм, так і для пакетів з товщиною 12,8 мм. При прокатці пакетів з початковою товщиною 12,8 мм, ступень деформації шару зі сплаву алюмінію складала 50 – 52%, а ступень деформації шару зі сплаву магнію - 44%.

Для випадку прокатки пакетів з початковою товщиною 8 мм, фактична висотна ступень деформації пакетів складала 45 %. В цьому випадку відносна деформація шару зі сплаву алюмінію коливалася на рівні 45 – 49 %, а відносна деформація шару зі сплаву магнію складала 39 %.

Деформація шарів у поперечному напрямку потребує додаткового дослідження, так як на точність визначення розширення штаби впливає багато факторів. Зокрема на точність визначення поперечної деформації може негативно вплинути зсув штаб з різних сплавів при прокатці заднього кінця пакету.

### Висновки

При гарячій прокатці тришарових штаб, які складаються з двох зовнішніх штаб зі сплаву алюмінію AW-2017A та внутрішньої штаби зі сплаву магнію AZ31, спостерігалася різниця у відносній деформації шарів з різних сплавів. Зовнішні шари зі сплаву AW-2017A при прокатці тришарових штаб обтискаються інтенсивніше, ніж внутрішні шари зі сплаву AZ31. При деформації заготовок із загальною початковою товщиною 12,8 мм зі ступенем деформації по висоті 50%, відносна деформація шарів зі сплаву алюмінію в середньому складає 50 – 52 %, а шарів зі сплаву магнію – 44%. Для штаб з початковою товщиною заготовки 8 мм, спостерігається подібне співвідношення у висотній деформації шарів зі сплавів магнію та алюмінію.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Jia-fei Deng, Jing Tian, Yancai Zhou, Yuanying Chang, Wei Liang, Jinyao Ma. Plastic deformation mechanism and hardening mechanism of rolled Rare-Earth magnesium alloy thin sheet. *Materials and Design*. 2022. V.218. pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110678>
2. Daisuke Kikuchi, Yohei Harada, Shinji Kumai. Surface quality and microstructure of Al-Mg alloy strips fabricated by vertical-type high-speed twin-roll casting. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. V.37. pp. 332-338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.12.007>
3. Karsten, E.; Gerstein, G.; Golovko, O.; Dalinger, A.; Lauhoff, C.; Krooss, P.; Niendorf, T.; Samsonenko, A.; Maier, H. J. Tailoring the Microstructure in Polycrystalline Co-Ni-Ga High-Temperature Shape Memory Alloys by Hot Extrusion. *Shape Memory and Superelasticity*. 2019. V. 5. I. 1. P. 84-94. - ISSN 2199-384X. – DOI: 10.1007/s40830-019-00208-7
4. Changzeng Luo, Wei Liang, Zhiqiang Chen, Jianjun Zhang, Chengzhong Chi, Fuqian Yang. Effect of high temperature annealing and subsequent hot rolling on microstructural evolution at the bond-interface of Al/Mg/Al alloy laminated composites. *Materials characterization*. 2013. 84. pp. 34-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.07.007>
5. Changa H., Zheng M.Y., Xub C., Fanb G.D., Brokmeier H.G., Wu K. Microstructure and mechanical properties of the Mg/Al multilayer fabricated by accumulative roll bonding (ARB) at ambient temperature. *Materials Science and Engineering: A*. 2012. 543. pp. 249-256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.083>
6. Saito Y., Tsuji N., Utsunomiya H., Sakai T., Hong R.G. Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process. *Scripta Materialia*. 1998. 39. pp. 1221-1227. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(98\)00302-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(98)00302-9)
7. Коноводов Д.В., Сиваш В.І. Моделювання процесу гарячої прокатки тришарових штаб зі сплавів алюмінію та магнію. *Обработка материалов давлением*. 2020. №1(50). С. 259-265.

### REFERENCES

1. Jia-fei Deng, Jing Tian, Yancai Zhou, Yuanying Chang, Wei Liang, Jinyao Ma. Plastic deformation mechanism and hardening mechanism of rolled Rare-Earth magnesium alloy thin sheet. *Materials and Design*. 2022. V.218. pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110678>

2. Daisuke Kikuchi, Yohei Harada, Shinji Kumai. Surface quality and microstructure of Al-Mg alloy strips fabricated by vertical-type high-speed twin-roll casting. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. V.37. pp. 332-338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.12.007>
3. Karsten, E.; Gerstein, G.; Golovko, O.; Dalinger, A.; Lauhoff, C.; Krooss, P.; Niendorf, T.; Samsonenko, A.; Maier, H. J. Tailoring the Microstructure in Polycrystalline Co-Ni-Ga High-Temperature Shape Memory Alloys by Hot Extrusion. *Shape Memory and Superelasticity*. 2019. V. 5. I. 1. P. 84-94. - ISSN 2199-384X. – DOI: 10.1007/s40830-019-00208-7
4. Changzeng Luo, Wei Liang, Zhiqiang Chen, Jianjun Zhang, Chengzhong Chi, Fuqian Yang. Effect of high temperature annealing and subsequent hot rolling on microstructural evolution at the bond-interface of Al/Mg/Al alloy laminated composites. *Materials characterization*. 2013. 84. pp. 34-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.07.007>
5. Changa H., Zheng M.Y., Xub C., Fanb G.D., Brokmeier H.G., Wu K. Microstructure and mechanical properties of the Mg/Al multilayer fabricated by accumulative roll bonding (ARB) at ambient temperature. *Materials Science and Engineering: A*. 2012. 543. pp. 249-256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.083>
6. Saito Y., Tsuji N., Utsunomiya H., Sakai T., Hong R.G. Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process. *Scripta Materialia*. 1998. 39. pp. 1221-1227. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(98\)00302-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(98)00302-9)
7. Konovodov D.V., Syvash V.I. Modeling of the process of hot rolling of three-layer aluminum and magnesium alloys. *Materials working by pressure*. 2020. No.1(50). pp. 259-265. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2020-1\(50\)259](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2020-1(50)259)

Received 01.02.2019.

Accepted 11.02.2019.

UDC 621.771.01:621.771.08

D. Konovodov, V. Nakonechnyi

## **AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF BEHAVIOR OF ALUMINUM AND MAGNESIUM LAYERS DURING THE ROLLING OF THREE-LAYER STRIPS**

Modern magnesium alloys have prospects for wide application in the automotive and aerospace industries, where the maximum weight reduction of the structure is of great importance. These alloys have a sufficiently high specific strength. But the magnesium alloys that are used are prone to corrosion, which limits their use. One of the options for increasing corrosion resistance is the use of magnesium alloy strips inside three-layer strips, the outer layers of which consist of strips of another metal or alloy. The non-uniformity of the deformation of the strip during rolling affects the formation of the adhesion zone of the layers of different alloys. Therefore, it is relevant to study the deformation of the layers inside such a composite. The purpose of the work is to study the behavior of the layers during the rolling of three-layer bimetallic strips. Three-layer strips made of aluminum alloy AW-2017A and magnesium AZ31, which were obtained by the method of joint hot plastic deformation on a rolling mill, were considered. During hot rolling of three-layer strips, a difference in height relative deformation of layers from different alloys was observed. The

study of the behavior of the layers of different metals inside the three-layer strip was performed using an optical microscope. It was established that the outer layers of the AW-2017A alloy are deformed more intensively than the inner layers of the AZ31 alloy when rolling three-layer strips. When deformation of billets with a total initial thickness of 12.8 mm with a degree of deformation of 50%, the relative deformation of aluminum alloy layers is on average 50-52%, and magnesium alloy layers is 44%. For the billet with the initial thickness of the workpiece of 8 mm, a similar ratio is observed in the height deformation of the layers.

**Keywords:** bimetallic strip, hot rolling, aluminum, magnesium, layer, thickness, deformation.

*Кошоводов Дмитро Володимирович*, канд. техн. наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова Українського державного університету науки і технологій.

*Наконечний Владислав Ігорович*, магістр.

*Konovodov Dmytro*, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Metal Forming Department named after acad. O.P. Chekmariov, Ukrainian State University of Science and Technologies.

*Nakonechnyi Vladyslav*, Master.