

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**МАТЕМАТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра загальної та прикладної фізики**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

**на тему: «Розробка технології отримання біметалевих композитів зі
сплавів алюмінію та магнію»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1059-з
спеціальності 105 прикладна фізика
(шифр і спеціальність)

Д.В. Коноводов
(ініціали та прізвище)

Керівник: професор кафедри загальної та прикладної фізики,
професор, д.т.н. Міщенко В. Г.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент: декан інженерно-фізичного факультету Національного
університету «Запорізька політехніка»,
доцент, к.т.н. Климов О. В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет математичний
Кафедра загальної та прикладної фізики
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 105 прикладна фізика
(шифр і назва)
Освітня програма Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
загальної та прикладної фізики
А.М. Андреев
2020 року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну роботу магістра

студенту Коноводову Дмитру Володимировичу
(назва атестаційної роботи)
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи Розробка технології отримання біметалевих композитів зі сплавів алюмінію та магнію.

керівник роботи Міщенко Валерій Григорович, д.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом ЗНУ від " " 2020 року № _____

2. Строк подання студентом роботи 18.11.2020

3. Вихідні дані до роботи 1) Постанова задачі
2) Перелік літератури

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Постанова задачі.

2. Основні теоретичні відомості. Методи дослідження.

3. Основна частина.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

презентація

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Міщенко В.Г., професор		
2	Міщенко В.Г., професор		
3	Міщенко В.Г., професор		

7. Дата видачі завдання _____ 2020 року _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів атестаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розробка плану роботи		
2	Збір вихідних даних		
3	Обробка методичних та теоретичних джерел		
4	Розробка першого і другого розділу		
5	Розробка третього розділу		
6	Оформлення і нормоконтроль кваліфікаційної роботи		
7	Захист кваліфікаційної роботи	10.12.2020	

Студент _____ Д. В. Коноводов
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ В.Г. Міщенко
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ В. І. Меняйло
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра «Розробка технології отримання біметалевих композитів зі сплавів алюмінію та магнію»: 60 с., 23 рис., 11 табл., 37 джерел.

АЛЮМІНІЙ, БІМЕТАЛЕВІ КОМПОЗИТИ, ІНТЕРМЕТАЛІДИ, МАГНІЙ, ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ, ПРОКАТКА, ТРИШАРОВІ ШТАБИ

Об'єкт дослідження – процес отримання біметалевих композитів.

Мета роботи: визначення впливу процесу інтенсивної пластичної деформації на міцність з'єднання тришарових штаб з алюмінієвих та магнієвих сплавів та розробка технології отримання біметалевих композитів зі сплавів алюмінію та магнію.

Метод дослідження: - аналітичний та експериментальний.

У кваліфікаційній роботі розглядається процес пластичної деформації штаб зі сплавів магнію та алюмінію. Розглянуто властивості та застосування сплавів магнію та алюмінію, методи отримання біметалевих композитів. Виконано дослідження механічних властивостей тришарових штаб зі сплавів магнію та алюмінію, зокрема міцності з'єднання. Досліджено хімічний склад та структуру зони з'єднання між шарами алюмінію та магнію.

Результати роботи можуть бути використані при розробці технології отримання біметалевих штаб з кольорових металів методами пластичної деформації.

SUMMURY

Master's qualifying paper "Development of technology for manufacturing bimetallic composites from aluminum and magnesium alloys": 60 pages, 23 figures, 11 tables, 37 references.

ALUMINUM, BIMETALLIC COMPOSITES, INTERMETALLIC COMPOUND, MAGNESIUM, PLASTIC DEFORMATION, ROLLING, THREE-LAYER STRIPS

The object of the study is process of obtaining bimetallic composites.

The aim of the study is to determination the influence of the process of intensive plastic deformation on the bond strength of three-layer strips of aluminum and magnesium alloys and development of technology for manufacturing bimetallic composites from aluminum and magnesium alloys.

The methods of research – analytical and experimental.

In the qualification work, the process of plastic deformation of strips from magnesium and aluminum alloys is considered. The properties and application of magnesium and aluminum alloys, methods of obtaining bimetallic composites are considered. A study of the mechanical properties of three-layer strips of magnesium and aluminum alloys, in particular the bond strength, has been carried out. The chemical composition and structure of the connection zone between the layers of aluminum and magnesium have been investigated.

The results of the work can be used in the development of technology for manufacturing bimetallic strips from non-ferrous metals by plastic deformation methods.

ЗМІСТ

Завдання на кваліфікаційну роботу.....	2
Реферат.....	4
Summary.....	5
Вступ.....	7
РОЗДІЛ 1. Аналіз методів отримання біметалевих композитів.....	9
1.1 Властивості та застосування сплавів магнію.....	9
1.2 Властивості та застосування алюмінієвих сплавів	15
1.3 Методи отримання біметалевих композитів.....	20
1.4 Цілі та задачі дослідження.....	28
РОЗДІЛ 2. Методи дослідження.....	29
2.1 Гаряча прокатка тришарових штаб зі сплавів магнію та алюмінію	29
2.2 Випробування тришарових штаб на розтягання та триточковий вигін.....	34
Висновки до Розділу 2.....	37
РОЗДІЛ 3. Отримання композитів зі сплавів алюмінію та магнію методом спільної пластичної деформації.....	38
3.1 Вплив гарячої деформації на міцність з'єднання шарів магнію і алюмінію та механічні властивості отриманих композитів.....	38
3.2 Дослідження хімічного складу та структури зони з'єднання шарів магнію та алюмінію.....	47
3.3 Розробка рекомендацій для отримання композитів зі сплавів алюмінію та магнію методом спільної пластичної деформації.....	53
Висновки до Розділу 3.....	54
Висновки.....	56
Перелік посилань.....	57

ВСТУП

Шаруваті металеві композити складаються з двох або декількох шарів різних металів. В основі їх практичного застосування полягає можливість створення металевих композитів з наперед заданими властивостями.

Використання шаруватих металів дозволяє підвищити ефективність виробництва широкого спектру деталей та устаткування для авіаційної, хімічної, сільськогосподарської, автомобільної, енергетичної та інших областей машинобудування [1].

Дослідженню процесів виробництва шаруватих композитів методами пластичної деформації присвячені роботи таких вчених, як О.С. Гельман, М.С. Гільденгорн, С.О. Глованенко, П.І. Полухін та ін. Більшість робіт цих авторів стосується процесів отримання біметалевих штаб, труб та профілів на основі сталі. Однак в сучасному машинобудуванні все більш значну частку займають біметалеві металовироби на основі сплавів алюмінію та інших кольорових металів.

Залишаються недостатньо вивченими деякі питання, що ускладнюють використання багатошарових біметалевих виробів для потреб машинобудування. Одними з таких факторів є якість з'єднання шарів, значення максимальної деформації за одну операцію, складність використання матеріалів з великою різницею в температурах пластичної деформації, необхідність попередньої підготовки заготовки. Тому розробка методів отримання багатошарових біметалевих виробів є актуальною задачею.

Метою роботи є визначення закономірностей впливу процесу інтенсивної пластичної деформації на міцність з'єднання тришарових штаб з алюмінієвих та магнієвих сплавів та розробка технології отримання біметалевих композитів зі сплавів алюмінію та магнію.

Об'єкт дослідження є процес отримання тришарових біметалевих композитів методами пластичної деформації, зокрема прокаткою.

Предмет дослідження – вплив гарячої деформації на міцність з'єднання та механічні властивості біметалевих алюмінієво-магнієвих штаб.

Робота присвячена розробці режимів гарячої пластичної деформації сплавів на основі алюмінію та магнію з метою отримання тришарових штаб. В рамках роботи виконано експериментальне дослідження процесу отримання тришарових штаб гарячою повздожньою прокаткою на двовалковому лабораторному стані. Обґрунтовано деформаційні параметри процесу прокатки та обрано температуру нагріву вихідних заготовок перед прокаткою.

Виконано дослідження механічних властивостей отриманих тришарових штаб, а саме межі плинності, межі міцності та відносного подовження. Встановлено вплив термічної обробки на міцність та пластичність тришарових штаб. Показано, що термічна обробка (відпал) дозволяє зменшити зміцнення штаб після прокатки.

Досліджено міцність з'єднання отриманих біметалевих штаб шляхом випробування на триточкових вигін. За результатами випробувань встановлено, що зразки зі штаб без термічної обробки, руйнувалися при певному значенні сили навантаження. Зразки зі штаб після термічної обробки витримували без руйнування увесь цикл випробування.

За допомогою енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії, в отриманих біметалевих композитах, досліджено хімічний склад та структуру зони з'єднання шарів зі сплавів магнію та алюмінію. Встановлено довжину цієї зони.

Наукову новизну мають отримані в роботі результати зміни умовного модуля пружності отриманих багатшарових штаб зі сплавів магнію та алюмінію у порівнянні з модулем пості сплавів магнію. Підвищення модуля пружності дозволить підвищити жорсткість деталей та конструкцій зі сплавів магнію.

Практичну цінність має запропонована в роботі технологія отримання багатошарових штаб зі сплавів магнію та алюмінію шляхом гарячої поздовжньої прокатки.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОТРИМАННЯ БІМЕТАЛЕВИХ КОМПОЗИТІВ

1.1. Властивості та застосування сплавів магнію

Основними перевагами магнію є порівняно низька щільність ($1,74 \text{ г/см}^3$), задовільна стійкість у повітрі та деяких інших середовищах, висока активність у якості відновника у хімічних процесах, а також добра здатність сплавлятися з іншими металами [2].

Магній найлегший з конструкційних металів. Технічно чистий магній володіє невисокою механічною міцністю, однак введення в нього у невеликій кількості інших елементів (алюмінію, цинку, марганцю) значно поліпшує його механічні властивості практично без збільшення щільності [3].

Магній використовується в основному у якості добавки в сплавах на основі алюмінію, титана та інших металів. У чорній металургії магній широко застосовується для глибокої десульфурації чавуну та сталі, а також для поліпшення властивостей чавуну шляхом сфероїдизації графіту. Крім того, магній є відновником, насамперед у виробництві титанової губки [4].

Розроблені в останні роки промислові сплави магнію в яких є літій, мають щільність $1,35\text{-}1,6 \text{ г/см}^3$ при достатньо високих властивостях та високому модулі пружності. Крім того, сплави магнію хімічно стійкі у лугах, мінеральних мастилах, газових середовищах, які вміщують флуор [5].

Магній має низький коефіцієнт поглинання теплових нейтронів та слабку взаємодію з ядерним паливом, відносно дешевий, що разом з високою теплопровідністю обумовлює його застосування у якості оболонок елементів ядерних реакторів [5].

Магній та його сплави погано опираються корозії, володіють зниженою рідкотекучістю при литті, пластично деформуються лише при підвищених температурах ($225 \text{ }^\circ\text{C}$ і більше). Останнє обумовлено тим, що зсуви в

гексагональній решітці магнію при низьких температурах здійснюється лише по площині базису (основа шестигранної призми). Нагрівання до 200-300 °С призводить до появи додаткових площин ковзання та, відповідно, підвищення пластичності. Мала дифузійна рухливість атомів в магнієвих сплавах призводить до уповільнення фазових перетворень в них. Тому термічна обробка (дифузний або рекристалізаційний відпал, загартування, старіння) вимагає великих витримок (до 24 год) [6].

Підвищення температури до 320 – 430 °С призводить до появи нових площин ковзання та двійникуванню. Тому обробку тиском здійснюють саме в цьому діапазоні температур максимальної пластичності [7].

У той же час магнієві сплави характеризуються високою питомою міцністю, добре поглинають вібрації, не взаємодіють з ураном. Вони добре обробляються різанням і задовільно зварюються аргонодуговим та контактним зварюванням. Основними легуючими елементами в магнієвих сплавах є Mn, Al і Zn [6, 7].

Марганець підвищує корозійну стійкість і зварюваність сплавів магнію. Алюміній і цинк дуже впливають на міцність і пластичність магнієвих сплавів: максимальні значення механічних характеристик досягаються при введенні в сплав 6-7% алюмінію або 4-6% цинку. Ці елементи утворюють з магнієм зміцнюючі фази, що виділяються в дрібнодисперсному вигляді після загартування зі старінням [6].

Цирконій, титан, лужноземельні (Ca) і рідкоземельні (Ce, La) метали і торій подрібнюють зерно, розкисляють сплав, підвищують його жароміцність. Особливо ефективно впливає цирконій. Його добавка 0,5-0,7 % зменшує розмір зерна сплаву магнію у 80-100 разів [7].

Так, для усунення ліквациї в литих сплавах проводять дифузний відпал (гомогенізацію) фасонних виливків і злитків (400-490 °С, 10-24 ч). Наклеп знімають рекристалізаційним відпалом при 250-350 °С, в процесі якого зменшується також анізотропія механічних властивостей, що виникла при пластичній деформації [6].

В останнє десятиліття на світовому ринку магнію помітно зріс попит на магнієві сплави для лиття під тиском. Відомо, що 80-85% світового виробництва первинних магнієвих сплавів доводиться на сплави систем Mg-Al-Mn і Mg-Al-Zn-Mn. Магнієві сплави стали також широко використовувати в електронних та оптичних виробках з метою зменшення маси при збереженні жорсткості і міцності їх корпусів. застосування магнієвих сплавів доцільно і з технологічної точки зору, так як дозволило отримувати з високою продуктивністю тонкостінні вироби складної конфігурації [4].

Магнієві сплави в залежності від складу можуть зміцнюватися загартуванням (часто з охолодженням на повітрі) і подальшим старінням при 150-200 °С (режим Т6). Ряд сплавів гартується вже в процесі охолодження виливків або поковок і може відразу зміцнюватися штучним старінням (минаючи загартування). Але в більшості випадків обмежуються тільки гомогенізацією (загартуванням) при 380-540 °С (режим Т4), так як наступне старіння, підвищує на 20-35% міцність та призводить до зниження пластичності сплавів [6].

За технологією виготовлення виробів магнієві сплави поділяють на ливарні (маркування «МЛ») та сплави, що деформуються («МА»). Деформований (пресований) магній має вищий комплексом механічних властивостей, ніж литий [6].

Сплави, що деформуються виробляють у вигляді поковок, штампових заготовок, гарячекатаних штаб, прутків і профілів. Температурні інтервали технологічних процесів обробки тиском магнієвих сплавів знаходяться в наступних межах: пресування при 300 – 480 °С, прокатка при 440 – 225 °С та штампування (у закритих штампах) при 480 – 280 °С [6].

Умовно магнієві сплави можна поділити на декілька груп згідно основним легуючим елементам: Mg-Li, Mg-Al, Mg-Zn та Mg-РЗМ, де РЗМ - рідкоземельні метали [8].

У межах вказаних груп сплави поділяються на класи згідно додатковим легуючим елементам. Наприклад, за специфікацією ASTM:

- у межах Mg-Al-групи – це сплави типу AM (Mg-Al-Mn), AZ (Mg-Al-Zn), AE (Mg-Al-PЗМ);

- у межах Mg-Zn-групи – це сплави типу ZK (Mg-Zn-Zr), ZE (Mg-Zn-PЗМ);

- у межах Mg-PЗМ-групи найбільш відомі сплави WE (Mg-Y-Nd-Zr);

В багатьох патентах описані сплави більш складного складу, які неможливо однозначно віднести до конкретного класу за специфікацією ASTM. Мета створення таких сплавів – поліпшення тих чи інших характеристик [8].

В таблиці 1.1 наведено дані про механічні та корозійні властивості деяких розповсюджених магнієвих сплавів при кімнатній температурі [8].

Таблиця 1.1 – Властивості магнієвих сплавів [8, с. 27]

Сплав	σ_T , Мпа	σ_B , Мпа	δ , %	Швидкість корозії	Стан**
WE43	195	280	10	0,1 мг/см ² /день (занурення, морська вода) 0,1-0,2 мг/см ² /день (тест ASTM В 117 – в парах морської води)	Екструзія, Т5
WE43	180	300	10		Ковка, Т5
AZ91D	160	230	3	<013 мг/см ² /день (тест ASTM В 117)	Лиття, F
AM60B	130	220	6-8	<013 мг/см ² /день (тест ASTM В 117)	Лиття, F
AZ61	230	310	16		Деформован, Т5
AZ60	295	360	12		Деформован, Т5
AM160	130	220	8		Лиття, F
Mg-11Li	-	104	39		Лиття, F

** F – у стані після отримання; Т5 – після охолодження та старіння

Як видно з таблиці 1.1, різні магнієві сплави мають різні набори механічних та корозійних характеристик. Наприклад, для медичних стентів які застосовуються при коронарної ангіопластики, бажано мати високу міцність та високу пластичність [8].

Букви у назвах сплавів позначають: А – алюміній, Е – рідкоземельні метали, Н – торій, К – цирконій, L – літій, М – Марганець, W – ітрій, Z – цинк, а цифри – округлений до цілого числа вміст елементів у відсотках.

Самими пластичними сплавами магнію є Mg-Li евтектичні сплави. При вмісті літію до 5-7% у сплаві присутня ГПУ- α -фаза, притаманна чистому магнію. При вмісті літію більше 10% у сплаві переважає ОЦК- β -фаза, яка є більше пластичною. Недоліком магнієвих сплавів з літієм є їх низька корозійна стійкість. Додаток в такі сплави алюмінію (4-10 %) та цинку (до 2%), призводить до оптимальної міцності та пластичності Mg-Li-Al-Zn-сплавів [8].

Найбільш розповсюдженою групою магнієвих сплавів є Mg-Al-сплави (класи AM, AZ та AE). Вони більш стійкі до корозії, більш міцні, але менш пластичні [8]. Фазова діаграма Mg-Al наведено на рисунку 1.1 [9].

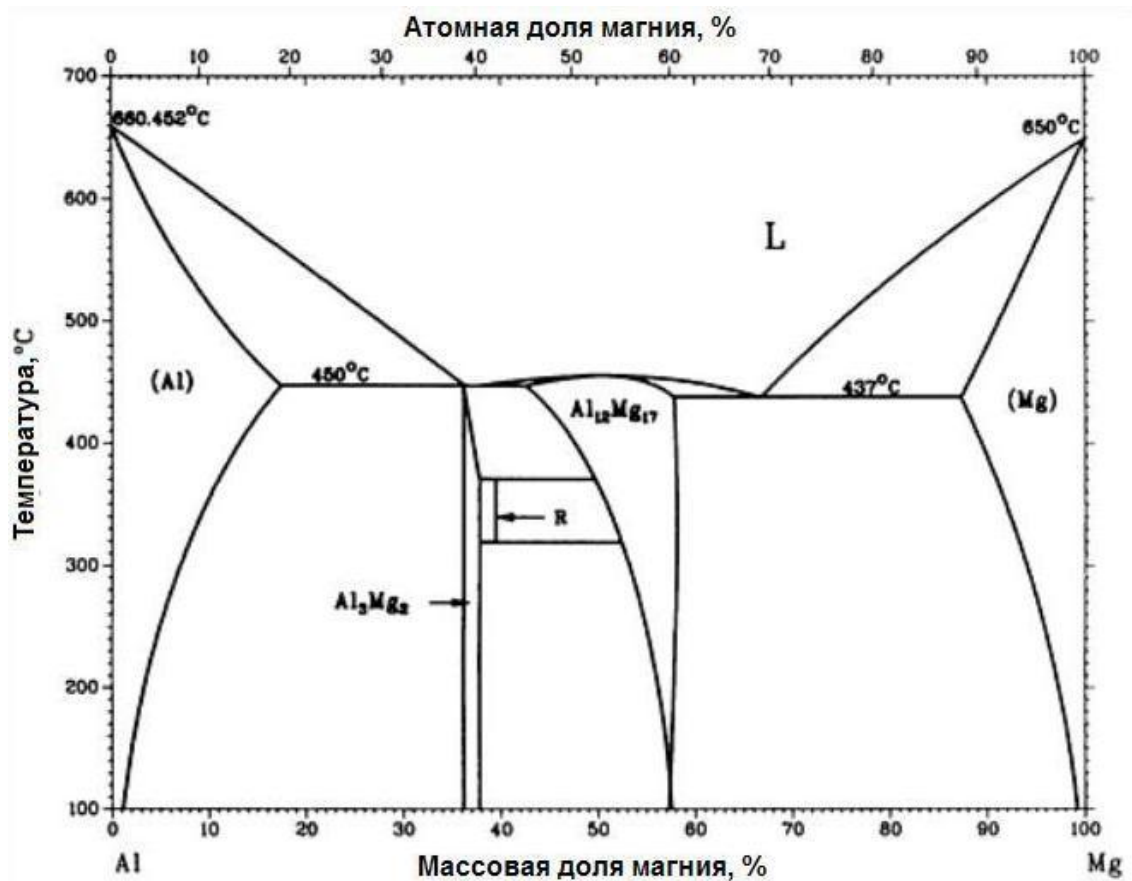


Рисунок 1.1 – Діаграма стану системи Al-Mg [9, с. 551]

Фази, які спостерігаються на діаграмі, за даними J. L. Murray, представлені в таблиці 1.2 [9].

Таблиця 1.2 – Склад фаз діаграми стану системи Al-Mg [9, с. 551]

№ п/п	Фаза	Склад, % Mg
1	(Al) α	0 – 17,1
2	β (Al_3Mg_2)	36,1 – 37,8
3	R	39,0
4	γ ($\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$)	42,0 – 58,0
5	(Mg)	87,1 – 100
Метастабільні фази		
6	Al_2Mg	31,0
7	γ	38,0 – 56,2

Вітчизняний аналог сплаву AZ31 – сплав MA2-1. Він уміщує в собі оптимальний комплекс механічних та технологічних властивостей (добре зварюється та штампується), але піддається корозії під напруженням.

Серед сплавів магнію з рідкоземельними металами найбільш відомі сплави типу WE (магній-ітрій-неодим-цирконій). Сплав WE43 має непогану здатність до деформування та задовільний опір корозії. Але для більшості практичних задач пластичність даного сплаву недостатня [8].

Деформування магнієвих сплавів при кімнатній температурі з деформаціями більш ніж 10-15 % супроводжується незворотнім зменшенням пластичності, а при високих температурах відбувається зростання розміру зерна в процесі обробки тиском та знижуються механічні властивості. Підвищити характеристики пластичності можна при застосування відпалу для зняття внутрішніх напружень.

Вироби з магнієвих сплавів мають великі перспективи застосування в аерокосмічній та автомобілебудівній промисловості. Це пов'язано з їх високою питомою міцністю та демпфуючою здатністю, простотою розливки та обробки.

Зі сплавів магнію виготовляють корпуси ракет, насосів, приладів, паливні та кисневі баки, рами двигуна, кожухи. Так, сплави МЛ5 та МЛ6 використовуються для лиття тормозних барабанів, коробок передач, МЛ10 – деталей приладів високою герметичності. Арматури, бензо– та мастильні системи, а також зварні деталі виготовляють зі сплавів, що деформуються MA1, високонавантажені деталі – зі сплаву MA14.

Незважаючи на безумовні переваги, магнієві сплави за масштабами промислового застосування значно поступаються алюмінієвим, які є основними конкурентами магнію у класі найважливіших легких конструкційних матеріалів. Головна причина – більш висока, при інших рівних умовах приблизно у 1,5 рази, вартість магнію у порівнянні з алюмінієм. Також широкому застосуванню сплавів магнію перешкоджає їх низька стійкість до корозії.

1.2. Властивості та застосування алюмінієвих сплавів

Алюміній та його сплави знайшли широке застосування у промисловості. Це пов'язано з їх відносно низькою щільністю, високою корозійною стійкістю та широким різноманіттям властивостей. Порівняння властивостей деяких кольорових металів наведено в табл. 1.3 [10].

Таблиця 1.3 – Фізичні властивості кольорових металів [10, с. 7]

Властивості	Метал			
	Al	Mg	Ti	Cu
Щільність при 20 °С, кг/м ³	2698	1737	4507	8940
Температура плавлення, °С	660,24	650	1668	1083
Питома теплопровідність, 20 °С, Вт/(м*К)	221,5	167	21,9	387
Модуль зсуву, ГПа	27	17,854	39,2	46,4
Модуль нормальної пружності, ГПа	70,6	44,1	103	125

На початку ХХ століття алюміній застосовували тільки у чистому вигляді. Історія алюмінієвих сплавів починається з відкриття у 1906 році німецьким вченим Альфредом Вільмом першого термічно зміцненого сплаву. Запропонований ним сплав дуралюмін містив 4% Cu, 0,5% Mg і 0,5% Mn [10].

У теперішній час, в якості легуючих домішок з алюмінієм найчастіше використовують Mg, Si, Mn, Cu та Zn, рідше застосовують Li. Іноді алюміній легується Ni, Fe, Ti, V, Be. Усього відомо біля трьох десятків домішок до 55 промислових алюмінієвих сплавів [11].

Всі алюмінієві сплави можна класифікувати за такими ознаками:

- за способом отримання виробів;
- за можливістю піддаватися термічній обробці;
- за хімічним складом.

За способом отримання виробів розрізняють ливарні та сплави, що деформуються. Як різновид сплавів, що деформуються розглядають спечені

алюмінієві порошки і спечені алюмінієві сплави, оскільки заготовки з них піддають обробці тиском.

За другою ознакою і ливарні, і сплави, що деформуються, можна розділити на ті, що термічно зміцнюється та термічно не зміцнюються. Алюмінієві сплави термічно зміцнюється загартуванням з наступним природним або штучним старінням (або їх поєднанням) [11].

За хімічним складом всі алюмінієві сплави поділяють на системи за вмістом основних легуючих добавок. Сплави однієї системи мають схожі фізичними і хімічними властивостями. Добавки до сплаву інших елементів, які не змінюють його базові властивості, а тільки надають нові, не є основними і не переводять сплав в іншу систему [11].

Ливарні алюмінієві сплави мають в своїй назві літеру «Л», наприклад, АЛ2, АЛ4, ВАЛ1, ВАЛ14. Цифра після літери позначає порядковий номер сплаву і не несе корисної інформації про самий сплав. За класифікацією Алюмінієвої Асоціації ливарні сплави позначаються трьома цифрами, перша з яких позначає систему. В даній роботі ливарні сплави не розглядаються.

Системи алюмінієвих сплавів, що деформуються, які найчастіше використовують у промисловості, наведено в табл. 1.4 [11].

Таблиця 1.4 – Системи алюмінієвих сплавів та їх позначення за стандартами (Алюмінієвої Асоціації (АА), ISO) та ГОСТ [11, с. 12]

Система сплаву	АА	ISO	ГОСТ 4784-74
Технічно чистий Al	1xxx 1050 1070 1200 1100	A199,5 A199,7 A199,0 A199,0	АД0 АД00 АДС АДС
Al – Cu (Al – Cu – Mg)	2xxx 2014	AlCu4SiMg	АК8
(Al – Cu – Mn – Li)	2017 2219 2117 2024 2618 2020	- - - - - -	Д1 Д18П Д20 Д16 АК4-1 -
Al – Mn (Al – Mg – Mn)	3xxx 3003 3004	AlMn1Cu AlMn1Mg1	Амц ¹⁾ Д12

Система сплаву	АА	ISO	ГОСТ 4784-74
	3005	AlMnMg0,5	АМЦ ¹⁾
Al – Si	4xxx 4045 4032	- -	АЛ2 -
Al – Mg	5xxx 5005 5052 5083 5086 5754 5056	AlMg1 AlMg2,5 AlMg4,5Mn0,7 AlMg4 AlMg3 -	АМг1 АМг2 ¹⁾ АМг4,5 АМг4 АМг3С АМг5
Al – Mg – Si	6xxx 6005 6060 6061 6063 6082 6101 6351 6463 6151	AlSiMg AlMgSi AlMg1SiCu AlMg0,7Si AlSi1MgMn E-AlMgSi0,5 AlSi1Mg0,5Mn AlMg0,7Si -	АД-31 АД-31 АД-33 ¹⁾ АД-31 АД-35 ¹⁾ АД-31 АД-35 ¹⁾ АД-31 ¹⁾ АВ
Al – Zn (Al – Zn – Mg) (Al – Zn – Mg – Cu)	7xxx 7010 7020 7021 7075	AlZn6MgCu AlZn4,5Mg1 AlZn5,5Mg1,5 AlZn5,5MgCu	В95 ¹⁾ 1915 ¹⁾ 1925С ¹⁾ -
Інші системи Al – Ni – Fe Al – Cu – Sn Al – Si – Cu – Sn	8xxx 8001 8081 8280	- - -	- А020-1 -

Як уже згадувалося вище, всі алюмінієві сплави, що деформуються, поділяються на дві великі групи – сплави, що термічно не зміцнюються та термічно зміцнюється.

До сплавів, які термічно не зміцнюються відносяться такі сплави:

- технічний алюміній (серія 1xxx за класифікацією АА) [12]. Технічний алюміній чудовий своєю корозійною стійкістю та високою електропровідністю. Зміст алюмінію в сплавах серії 1xxx змінюється від 98,6 до 99,99% [13].

- сплави системи Al – Mn (серія 3xxx). Сплави цієї системи мають гарну міцність, пластичність і технологічність, високу корозійну стійкість і гарну зварюваність. Присутність достатньої кількості марганцю забезпечує стабільність структури нагартованого металу при кімнатній і підвищеній температурах [14].

- сплави системи Al – Mg (серія 5xxx). Сплави системи Al – Mg характеризуються поєднанням задовільної міцності, гарної пластичності, дуже хорошою зварюваністю та корозійною стійкістю. Крім того, ці сплави відрізняються високою вібростійкістю. У сплавах цієї системи, що містять до 6% Mg, утворюється евтектична система з'єднання Al_3Mg_2 з твердим розчином на основі алюмінію. Найбільш широке поширення в промисловості отримали сплави з вмістом магнію від 1 до 5% [14].

- сплави серії 8xxx. Між властивостями сплавів цієї серії існують значні відмінності, зумовлені їх складом. Наприклад, сплави системи Al-Sn-Ni-Cu мають високі антифрикційні властивості через наявність в них олова, а сплави системи Al-Ni-Fe набули поширення в атомній промисловості, де потрібна висока корозійна стійкість у воді при високому тиску і температурах. При цьому високою міцністю вищезгадані сплави не відрізняються [11].

До сплавів, що термічно зміцнюються відносяться такі сплави:

- сплави системи Al-Cu (Al-Cu-Mg) (серія 2xxx). Механічні властивості сплавів цієї системи після термообробки досягають, а іноді і перевищують, механічні властивості низьковуглецевих сталей. Ці сплави високотехнологічні. Однак у них є і істотний недолік – низький опір корозії, що призводить до необхідності використовувати захисні покриття.

- сплави системи Al-Mg-Si (серія 6xxx). Сплави системи Al-Mg-Si забезпечують відмінне поєднання міцності і пластичних характеристик, мають високу технологічність і корозійну стійкість, гарну зварюваність. Завдяки цьому, на сплави цієї системи доводиться майже 75% всіх виробів з деформованих алюмінієвих сплавів. Вітчизняним фахівцям ці сплави добре відомі під назвою «Авіа».

- сплави системи Al-Zn-Mg (Al-Zn-Mg-Cu) (серія 7xxx). Сплави цієї системи мають дуже високу міцність і хорошу технологічність. Представник системи – сплав 7075 є найміцнішим з усіх алюмінієвих сплавів. Ефект такого високого зміцнення досягається завдяки високій розчинності цинку

(70%) і магнію (17,4%) при підвищених температурах, яка різко зменшується при охолодженні. Однак суттєвим недоліком цих сплавів є вкрай низька корозійна стійкість під напругою [11].

На початку 50-х років під керівництвом С. М. Воронова було розроблено та впроваджено у промисловість сплав Амгб системи Al-Mg. Цей сплав має високу міцність, добру корозійну стійкість та зварюваність. Однак цей сплав термічно не зміцнюється, тому його суттєвий недолік – низька межа текучості (160-180 Мпа) [15]. Підвищення вмісту магнію не дало результату, так як при збільшенні вмісту магнію спостерігається різке зниження стійкості проти корозії під напруженням.

Розвитком сплавів типу Амгб стало створення сплавів, легованих скандієм, цирконієм та інші [16].

Додавання таких елементів змінюють властивості алюмінієвих сплавів, що значно підвищує їх експлуатаційні характеристики, але потребує розробки відповідних технологій їх обробки [17].

1.3. Методи отримання біметалевих композитів

Поєднання основних переваг сплавів магнію та алюмінію можливо у їх біметалевих композиціях. Адже алюміній має високу стійкість до корозії, а магній та його сплави мають високі демпфуючі властивості. Це дозволяє використовувати такий багат шаровий матеріал у конструкціях, де наявні вібрації та агресивні середовища.

Застосування біметалевих композицій на основі алюмінію отримало розповсюдження при будівництві сучасного транспорту та літальних апаратів, в суднобудуванні та хімічному машинобудуванні. Біметали також використовуються в приладобудуванні та радіоелектроніці, в інструментальній промисловості та на підприємствах, що виробляють споживчі та господарчі товари [1, 3].

Біметалом є дво- або багат шаровий матеріал, що складається з декількох різних металів або сплавів, міцно з'єднаних між собою по всій площині контакту. В більшості випадків біметал є сполученням двох металів або сплавів; значно рідше з трьох і більше. При цьому біметал має специфічні властивості, відмінні від властивостей його компонентів [18].

За призначенням існуючі біметали поділяють на такі види: корозійностійкі, антифрикційні, електротехнічні (провідники і контакти), зносостійкі, термо-біметалеві, композиції для споживчих товарів. Сортамент біметалевих виробів включає листи, смуги, стрижні, труби та профілі [19].

Відомо багато різних способів виробництва багат шарових виробів. Більшість цих способів мають загальні ознаки, що дозволяє їх систематизувати.

В роботі [20] запропоновано класифікувати існуючі способи з'єднання різних металів в залежності від наявності або відсутності пластичного деформування. Таким чином, всі способи виготовлення багат шарових виробів пропонується розбити на дві великі групи:

- 1) отримання зварного з'єднання із застосуванням пластичного деформування (хоча б одного з компонентів);
- 2) отримання сполуки без пластичного деформування.

Якісно іншими способами отримання багат шарових виробів є ті, при здійсненні яких не потрібно спільне пластичне деформування для утворення металевих зав'язків.

До таких методів слід віднести: зварювання наплавленням, пайку, лиття і занурення в розплав. Зазначені способи широко застосовують в промисловості як при виготовленні заготовок для подальшої спільної пластичної деформації, так і для отримання готових багат шарових виробів.

Найбільш широкий діапазон можливостей має зварювання вибухом, яке дозволяє з'єднувати метали, в тому числі ті, що неможливо з'єднати іншими методами. Наприклад, сталь + срібло, сталь + свинець, мідь + молибден і т.п. Зварювання вибухом дозволяє отримати біметалеві вироби складної форми, наприклад, лопатки турбін [19].

Суттєвим недоліком зварювання вибухом є складність механізації та автоматизації технологічних операцій, необхідність створення потужних вибухових камер та особливі вимоги до техніки безпеки [19].

Сполуки металів, отримані шляхом спільного пластичного деформування або з рідкого стану, відрізняються тим, що товщина покриття може становити від 1-2 до 50%, в той час як товщина покриття, отримана, наприклад, електрохімічним способом, вимірюється зазвичай в мікронах.

Спільним пластичним деформуванням металів можна отримувати багат шарові листи, стрічки, смуги, труби, профілі, прутки, дріт і ін. Майже всі відомі способи пластичного деформування металів в даний час застосовують і для виробництва багат шарових довгомірних виробів. Основними з них є: прокатка, пресування і волочіння. Шляхом спільної пластичної деформації металів можна отримати різне співвідношення товщини шарів в багат шаровому виробі [21].

Товщина шарів визначається станом металу в момент його пластичного деформування (фізико-хімічними властивостями і напруженим станом), формою заготовки і потужністю обладнання.

Відповідно до цього вибирають спосіб і режим спільного пластичного деформування (з попереднім нагріванням багат шарової заготовки або без нього). При можливості вибору того чи іншого способу деформування слід враховувати ще одну дуже важливу сторону – економічність обраного технологічного процесу [22].

Існує кілька теорій, що пояснюють механізм їх зчеплення. За однією з них в металах здійснюється так званий металевий зв'язок, коли при достатньому зближенні атомів металів їх вільні електрони утворюють електронну хмару, яка, взаємодіє з іонізованими атомами та створює між ними міцне зчеплення [23]. Однак при такому зчепленні в момент зняття навантаження і охолодження металу можуть виникнути великі залишкові напруги, що вимагає застосування спеціальної термічної обробки спільно отриманих виробів.

Існує ряд інших теорій, що пояснюють зчеплення двох металевих поверхонь на основі «рекристалізаційної», «плівкової», «дифузійної», «енергетичної», «дислокаційної» та інших гіпотез [24].

Утворення з'єднань при зварюванні тиском зазвичай складається з трьох стадій [23]:

- утворення фізичного контакту, коли при зближенні атомів контактна поверхня активується в результаті виходу дислокацій;
- утворення активних центрів на поверхні більш твердого зі зварювальних матеріалів;
- розвиток об'ємної взаємодії матеріалів, що з'єднуються. Ця стадія закінчується в площині – злиттям дискретних зон взаємодії, а в об'ємі – релаксацією напружень.

Існують випадки, коли реологічні властивості матеріалів, які спільно деформуються, істотно відрізняються. В цьому випадку, обробку тиском слід

проводити з диференційованим нагрівом матеріалу окремих шарів до різних температур [25].

Згідно «дифузійної» гіпотези схоплювання відбувається завдяки дифузії атомів з'єднаних металевих поверхонь незалежно від того, відбувається з'єднання при кімнатній або високій температурах.

На думку авторів цієї гіпотези, тільки шляхом дифузії атоми двох з'єднаних металевих поверхонь можуть бути перемішані так, щоб утворився безперервний перехід між ними і тим самим був забезпечений тісний контакт.

Місцевий розігрів двох дотичних і деформованих поверхонь сприяє, на думку авторів даної гіпотези, утворенню в місцях безпосереднього контакту міцних «містків» за рахунок дифузії атомів. Пластична деформація необхідна також і для зближення поверхонь і створення тісного контакту. Схоплювання при досягненні певної деформації пояснюється, як і «плівковою» гіпотезою, утворенням достатньої кількості «містків» зчеплення, міцність яких здатна протистояти дії пружних напружень після зняття навантаження [24].

Дифузійна гіпотеза, ґрунтуючись на вирішальній ролі теплових процесів, передбачає залежність міцності схоплювання від швидкості прикладання навантаження і від роздрібненості деформації, наприклад від величини обтиску за прохід. При цьому стверджується, що зі збільшенням швидкості деформування або величини обтиску за прохід схоплювання поліпшується [24].

В роботі [26] показано, що міцне з'єднання між металами утворюється тільки при розташування між ними матеріалу – проміжного шару у вигляді металевої фольги, напиленого абр гальванічного покриття, а також порошоків металів.

Здатність до схоплювання взаємно нерозчинних металів, яка спостерігається в практиці, на думку Н. Ф. Лашко не спростовує «дифузійної» гіпотези, так як, по-перше, швидкість дифузії зростає зі зменшенням розчинності, а, по-друге, в деякому малому обсязі можлива

взаємна дифузія і тих металів, які вважаються нерозчинними одна в одній. При цьому наголошується, що процеси дифузії при зварюванні в умовах звичайних температур проходять «в дуже тонкому шарі і на порівняно невеликій поверхні металу» [24].

Дифузія по межах зерен проходить швидше, ніж об'ємна дифузія. Велика протяжність кордонів в сталі з дрібнозернистою структурою, сприяючи інтенсивної дифузії, забезпечує підвищення міцності зчеплення [24].

Автори роботи [27] відмічають вирішальну роль точкових дефектів кристалічної решітки у процесах дифузії в металах при високих температурах.

При низьких температурах зростає роль дифузії по лінійним (дислокаціям) та двомірним дефектам (границі зерен, фаз, дефекти упаковки, поверхні кристала) [27].

Однією з основних труднощів виготовлення та експлуатації багатошарових з'єднань з різнорідних металів, таких як магній-алюміній, є зниження опору відриву шарів після термічної обробки композита або його зварювання. Проміжні шари, які утворюються на лінії з'єднання, зазвичай складаються з однієї або декількох інтерметалідних фаз, будова та товщина яких визначає властивості композитів [27].

В роботі [28] було розглянуто отримання тришарових штаб з частого алюмінію та сплаву магнію з літієм. З'єднання відбувалося шляхом холодної прокатки. Було досліджено вплив температури відпалу на механічні властивості тришарових штаб. Зроблено висновки, що оптимальна температура відпалу 423-473 °К. С підвищенням температури до 523 °К и вище спостерігається многократне розтріскування у фазі Al_3Mg_2 [28].

Крім питань з'єднання багатошарових штаб, деякі автори приділяють увагу зміні деформаційної структури тришарових композитів під час плакування. Так в роботі [29] автори дослідили зміну деформаційної структури по товщині при прокатці тришарових штаб з алюмінієвих сплавів.

Було показано, що після прокатки плакувальні шари мають рівномірну структури по товщині, яка складається з повернутих кубічних компонентів.

На відміну від поверхневих шарів, базовий внутрішній компонент мав чітко виражену текстуру деформації, яка складалася з плоско-деформованих структурних компонентів [29]

Найбільш поширеними видами біметалевих матеріалів, які застосовуються в автомобілебудівній та аерокосмічній промисловості є листи та штаби. Прокатка є найбільш простим та продуктивним способом отримання багатшарових металевих композитів. Для листових виробів найбільш зручними у застосуванні є асиметрична холодна та гаряча прокатка і процес інтенсивної пластичної деформації, який отримав назву «Accumulative Roll Bonding» (ARB) [30].

В процесі ARB матеріали складують пакетом та прокатують з високими ступенями деформації за різну кількість проходів. При цьому після кожного проходу заготовка поділяється навпіл та складається у новий пакет. Ступень деформації в кожному проході досягає 50%. Процес ARB застосовують як для з'єднання штаб зі сплавів алюмінію та магнію [31] (рис. 1.2) так і для алюмінієвих сплавів різного хімічного складу [32, 33].

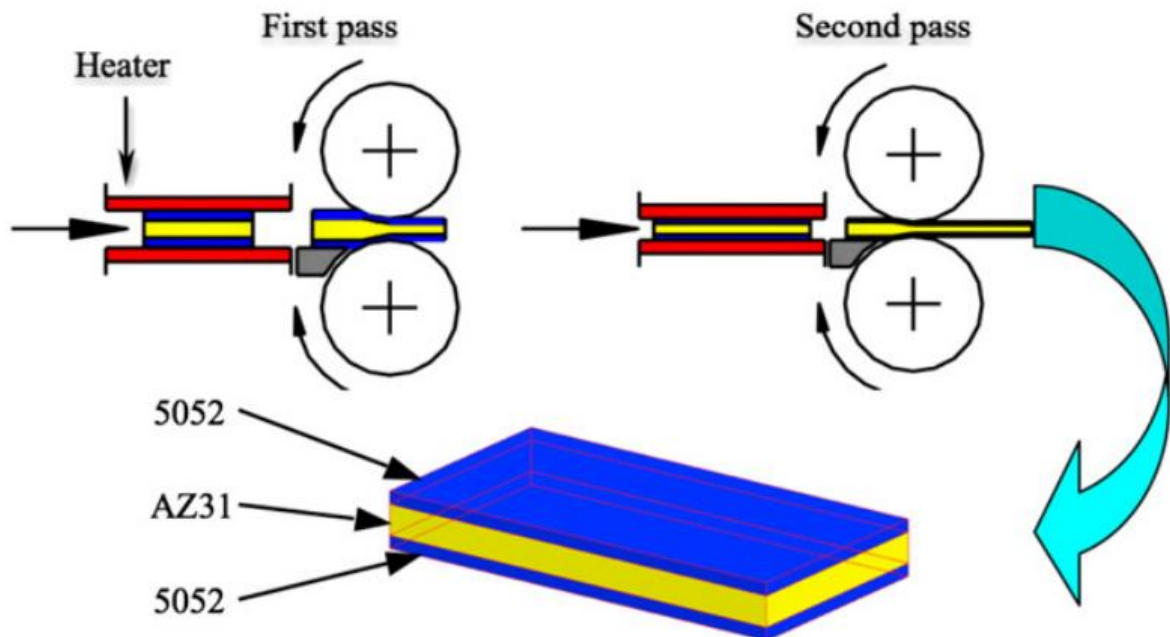


Рисунок 1.2 – Схема процесу гарячої прокатки ламінованих композитів Al/Mg/Al [31, с. 35]

Застосування процесу ARB дозволяє одночасно використовувати такі складові механізми керування властивостями біметалевих композицій, як розмір зерна, градієнт властивостей по висоті виробу та зміцнення перехідної зони інтерметалідами. Крім того, як показано в роботі [31], на властивості отриманого композиту впливає термообробка. Ступень деформації штаби та режим наступної термічної обробки формують кінцеві механічні властивості через зміну структури металу та рівня напружень в ньому. В роботі [31] для отримання тришарової штаби зі сплавів алюмінію 5052 та магнію AZ31, застосовували прокатку у два проходи з проміжним відпалом. Товщина листів з алюмінію складала 0,5 мм, а товщина листа магнію – 2,5 мм. Варіювали часом витримки та температурою відпалу. При цьому ступені деформації по проходам складали 42,9% та 35% відповідно. Авторами була відмічена залежність товщини зони інтерметалідів на границі алюмінію та магнію, від часу термічної обробки (рис. 1.3).

У якості фінальної обробки, для отримання біметалевих штаб може застосовуватися холодна прокатка. В роботі [34] було досліджено вплив холодної деформації на мікроструктуру та механічні властивості біметалевих штаб Al-Mg. При цьому прокату вели з високими ступенями деформації, які досягали 50%.

У якості матеріалів для дослідження були обрані технічно чистий магній (99,8 мас.%) та сплав алюмінію 1050 (99,5 мас.%). Пластини з чистого магнію з розмірами $120 \times 50 \times 4$ мм були вирізані з виливки та потім прокатані на листи товщиною біля 1 мм при температурі $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ з обтисками біля 15% за прохід. Технічно чистий сплав 1050 був отриманий у вигляді листового прокату товщиною 0,42 мм. Початкові листи розмірами $120\text{ мм} \times 50\text{ мм}$ були вирізані з гарячекатаного листа чистого магнію та листа алюмінію 1050 відповідно.

Після обезжирювання в ацетоні протягом 15 хвилин та очищення дротовою щіткою, два листа алюмінію 1050 та один лист магнію були покладені друг на друга та міцно з'єднані сталевим дротом. Підготовлений пакет був розрізаний на дві половини та складений разом. Після цього він був прокатаний за 3 проходи без мастила на стані з діаметром валків 110 мм [34].

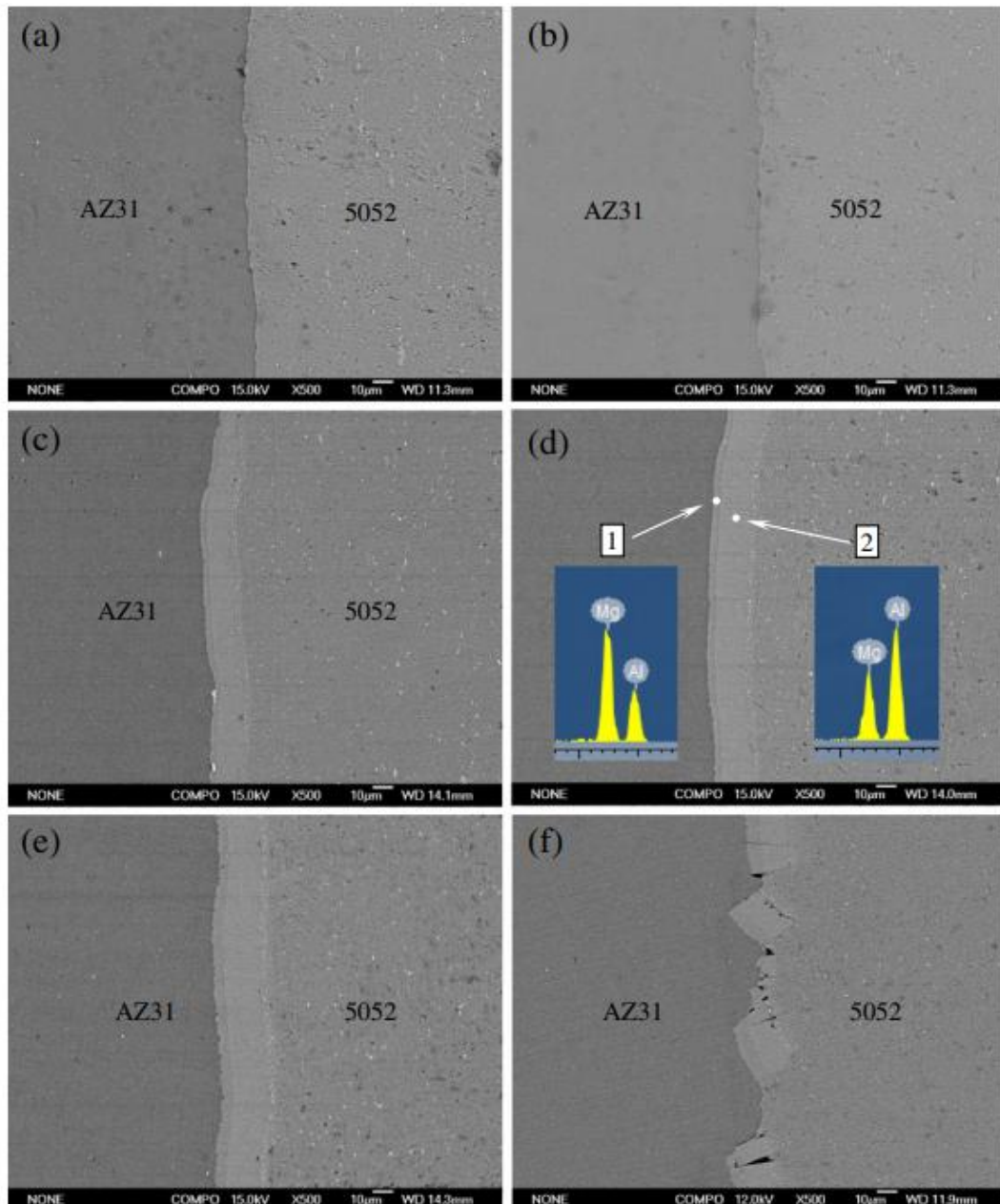


Рисунок 1.3 – Вид поперечного перерізу границі з'єднання у різних станах: а – після першого проходу у поперечному напрямку; б – після першого проходу в напрямку прокатки; в – у поперечному напрямку після відпалу при 400 °С протягом 10 хвилин; результати електронної мікроскопії

для точки 1: Mg – 59,07%, Al – 40,93%; результати мікроскопії для точки 2: Mg – 39,95%, Al – 60,05%; e- після другого проходу в поперечному напрямку; f – після другого проходу у напрямку прокатки [31, с. 35]

Аналіз мікроструктури та хімічного складу зони з'єднання показав, що навіть при холодній прокатці на границі алюмінію та магнію виник шар $Mg_{17}Al_{12}$ товщиною 150 нм, що обумовлено взаємною дифузією між шарами магнію та алюмінію. Також була встановлена значна нерівномірність властивостей пакетів у поперечному напрямку та напрямку прокатки.

Аналіз наукових публікацій показав, що матеріали та параметри процесу прокатки, який застосовується для отримання багат шарових композицій, мають велику різноманітність. При цьому процес здійснюється з високими ступенями деформації за прохід, що досягають 50%. Такі деформації обумовлюють високі контактні напруження та енергосилові параметри при прокатці.

1.4. Цілі та задачі дослідження

Метою роботи є визначення впливу процесу інтенсивної пластичної деформації на міцність з'єднання тришарових штаб з алюмінієвих та магнієвих сплавів і розробка технології отримання біметалевих композитів зі сплавів алюмінію та магнію. Це дозволить поєднати високі демпфуючі властивості магнію та міцність і корозійну стійкість алюмінієвих сплавів.

Для досягнення поставленої мети, в роботі були сформульовані такі задачі:

- проаналізувати сучасні технологічні схеми отримання багат шарових штаб зі сплавів магнію та алюмінію, визначити температурно – швидкісні та деформаційні параметри деформації;
- отримати тришарові штаби зі сплавів алюмінію та сплаву магнію AZ31 гарячою прокаткою на лабораторному стані;

- виконати випробування отриманих біметалевих штаб на триточковий вигін та розтягання, оцінити модуль пружності отриманих штаб;
- за допомогою електронної мікроскопії дослідити склад та структуру границі з'єднання шарів.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Гаряча прокатка тришарових штаб зі сплавів магнію та алюмінію

У якості способу пластичної деформації для отримання тришарових штаб, було обрано процес гарячої прокатки, як такий, що має високу продуктивність та добре підходить для отримання листових матеріалів.

Експериментальні дослідження процесу прокатки тришарових штаб проводились у лабораторії на кафедрі обробки металів тиском НметАУ. Для їх виконання використовувався лабораторний прокатний стан Дуо 180 з гладкою бочкою валків (рис. 2.1).

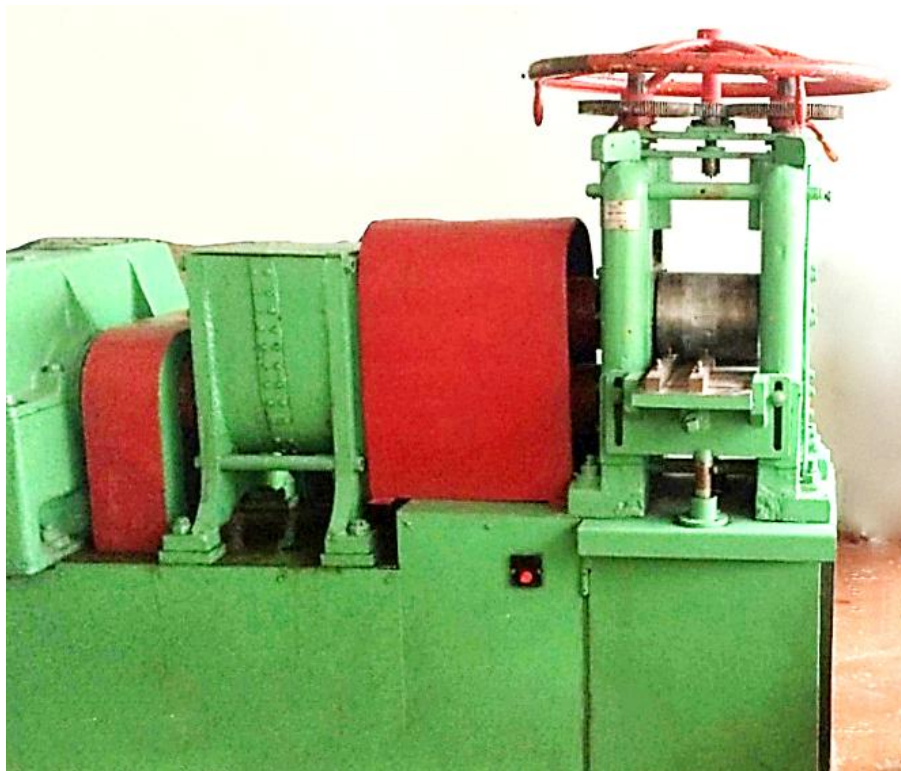


Рисунок 2.1 – Лабораторний двовалковий прокатний стан 180

Вміст основних легуючих елементів сплавів алюмінію, які досліджуються в роботі, наведено в табл. 2.1 [35, 36]

Таблиця 2.1 – Основні легуючі елементи алюмінієвих сплавів, що досліджуються

Позначення сплаву	Вміст хімічних елементів, %							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
EN AW-2017A	0,2-0,8	0,7	3,5-4,5	0,4-1,0	0,4-1,0	0,1	0,25	-
EN AW-5083	0,2	0,35	0,15	0,15	4,0-5,0	0,05-0,25	0,25	0,15
EN AW-6082	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	0,25	0,2	0,1

Хімічний склад сплаву магнію AZ31 наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Хімічний склад сплаву магнію AZ31

Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ca	Fe	Ni	Mg
3,0	1,0	0,2	0,1	0,05	0,04	0,003	0,001	остаток

Зразки перед прокаткою вирізалися з листів сплаву магнію AZ31 (ASTM) товщина яких складала 1,8 та 4,0 мм і листів зі сплавів алюмінію AW-2017A, AW-6082 (T6), AW-5083 (EN 573-3:2009), товщина яких складала 1,0 мм. Ширина зразків складала 25 мм та 50 мм. Довжина зразків магнію складала 200 мм, довжина зразків алюмінію складала 200 та 410 мм (рис. 2.2).

Після порізки зразки магнію піддавалися відпалу в електричній печі при температурі 330 °C протягом 30 хвилин.

Отримані зразки магнію піддавалися піскоструминевій обробці для видалення окислів з поверхні металу. Після обробки, зразки зберігалися без доступу повітря до часу зборки пакетів з метою зменшення окислення.

Зразки алюмінію перед складанням пакетів промивалися в ацетоні.

Тришарові пакети шириною 50 мм збиралися за допомогою заклепки на передньому кінці заготовки (рис. 2.3).



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд зразків з алюмінієвого та магнієвого сплавів перед збиранням пакетів

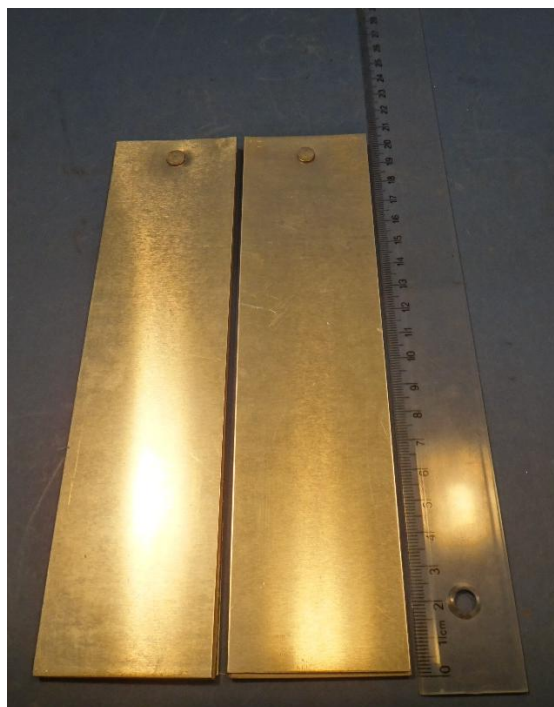


Рисунок 2.3 – Пакети-заготовки зібрані перед прокаткою за допомогою заклепки

Пакети шириною 25 мм збиралися шляхом обернення зразка з алюмінію довжиною 400 мм навколо зразка магнію довжиною 200 мм. Загальна схема прокатки таких зразків показана на рисунку 2.4.

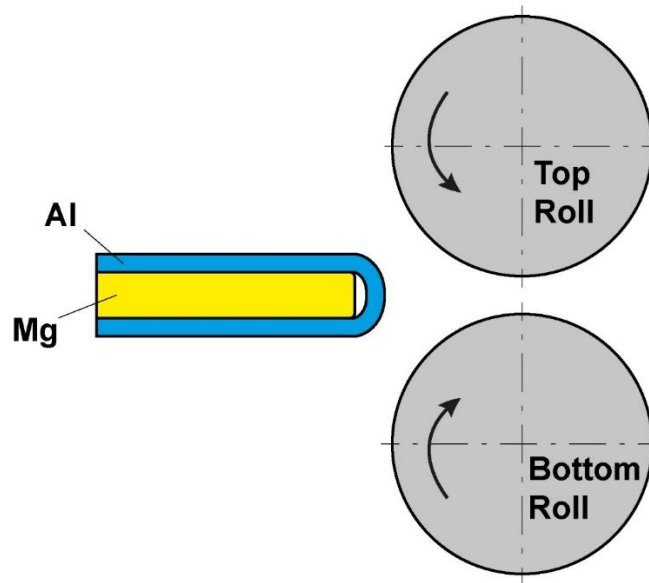


Рисунок 2.4 – Схема прокатки тришарових пакетів на прокатному стані

Пакети перед прокаткою нагрівали в електричній печі з діапазоном нагрівання 50-800 °С. Піч була встановлена біля прокатного стана задля мінімізації часу охолодження зразків на повітрі. Температура у печі визначалася завдяки встановленим термопарам. Одна термопара контролювала температуру повітря в печі. Інша термопара була встановлена на контрольній зразок – сталеву пластину, яка знаходилась в печі. Температура зразка вимірювалась термопарою, яка була вставлена у середину зразка між шарами магнію та алюмінію. Показання термопар контролювалися шестиканальним приладом для вимірювання температури USB TC-08 фірми Pico Technology (рис. 2.5)

Час нагріву пакетів складав 10 хвилин. Для спостереження та фіксації температури штаби в процесі дослідження, використовувався ноутбук з

встановленим програмним забезпеченням від компанії Pico Technology. Це дозволяє одночасно вести запис значень температури з усіх трьох термопар.



Рисунок 2.5 – Пристрій для реєстрації температури заготовки

Температура нагріву складала 400 ± 5 °С. При цьому, для запобігання втрати тепла заготовкою перед прокаткою, приймальний стіл стана був ізолюваний шляхом накладання керамічного термостійкого матеріалу.

Для спостереження зміни температури при прокатці використовували термокамеру. Застосування термокамери для визначення температури при прокатці тонких пакетів ($h_0 = 3,8$ мм) було проблематично тому, що товщина штаби на виході з валків після обтиснення на рівні 50% буде складати приблизно 2 мм. У такому випадку термокамеру необхідно максимально приблизити до зони деформації, а це важко зробити тому, що подушки валків обмежують мінімальну відстань від камери до валків. З цієї причини надійні дані по температурі були отримані при прокатці «товстих» пакетів ($h_0 = 6,0$ мм).

Аналіз даних термокамери дозволив визначити максимальну та мінімальну температуру заготовки, а також розподіл і зміну температури в процесі прокатки. На рис. 2.6, у якості прикладу, показано фото зразка при

прокатці. На рисунку напрямок прокатки показано справа наліво. Температура прокатних валків значно нижче температури штаби. Тому вони окрашені у чорний колір.

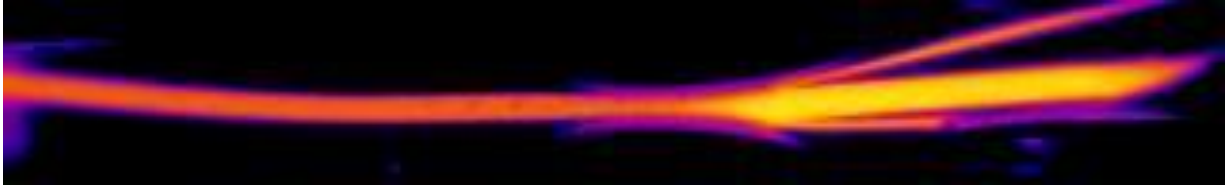


Рисунок 2.6 – Термографічне зображення штаби при прокатці

Товщини і ширина зразків, до та після прокатки, вимірювалися за допомогою штангенциркуля з точністю вимірювання $\pm 0,01$ мм. Довжина зразків вимірювалася лінійкою з точністю $\pm 0,5$ мм.

Для полегшення правильного завдання металу в зону деформації, перед валками були встановлені направляючі лінійки. Їх відстань одна від одної були обрані з урахуванням невеликого зазору для вільної подачі заготовки в валки з урахуванням температурного розширення металу після нагріву.

Для запобігання налипанню шарів алюмінію на валки, після кожного проходу, поверхні валків зачищали наждачним папером Р240 приблизно 30-40 секунд, потім промивали ацетоном та наносили тонкий шар води.

Швидкість прокатки складала 0,26 м/с.

2.2. Випробування тришарових штаб на розтягання та триточковий вигін

Частина пакетів після прокатки піддавали відпалу з витримкою в печі протягом 30 хвилин при температурі 300°C . Відпал застосовувався для зняття залишкових напружень в пакеті.

Для оцінки механічних властивостей отриманих пакетів, були проведені випробування на одноосне розтягнення. Випробування проводили

на розривній машині Zwick/Roell Z100 інституту матеріалознавства університету міста Ганновер (ФРН).

Зразки для випробувань вирізали з середини пакетів. Нерівні кінці та бокові кромки штаб відрізалися. Товщина зразків становила $2,0 \pm 0,1$ мм; ширина зразків – 12,5 мм. Випробування проводили згідно DIN EN ISO 6892-1. Даний стандарт для випробувань на розтягнення металевих матеріалів був опублікований у лютому 2017 року. Він стандартизує випробування на розтягання при кімнатній температурі та визначає механічні властивості [37]. Зовнішній вигляд розривної машини зображено на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 – Розривна машина Zwick/Roell Z100

Під час випробувань визначали межу текучості, межу міцності та відносне подовження.

Для оцінки жорсткості отриманих тришарових штаб були проведені випробування на триточковий вигин (рис. 2.8).

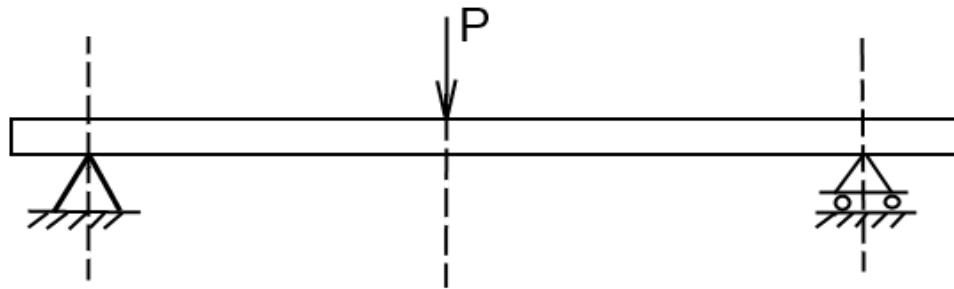


Рисунок 2.8 – Схема випробування на триточковий вигин

Випробування проводили на розривній машині Zwick/Roell Z10 інституту матеріалознавства університету міста Ганновер (ФРН) (рис. 2.9).

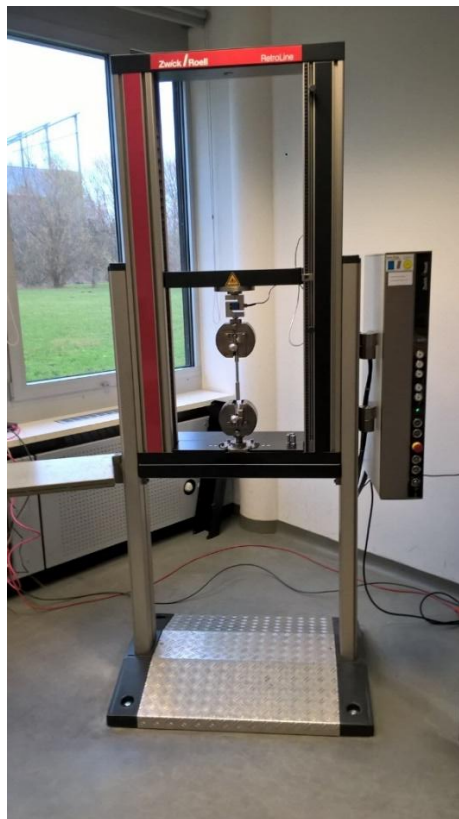


Рисунок 2.9 – Розривна машина Zwick/Roell Z10

Товщина зразків становила від 1,9 до 3,3 мм; ширина зразків – 16 мм. Спочатку відстань між крайніми опорами було обрано 100 мм. Потім ця відстань була змінена до 40 мм, так як зразки в процесі випробування вигиналися на кут більший 90° та своїми кінцями упиралися у верхню траверсу.

Навантажування зразка проводили до величини прогину 30 мм або до руйнування зразка (різке падіння навантаження).

За результатами випробувань розраховували умовний модуль пружності пакета:

$$E = \frac{Pl^3}{4fbs^3}; \quad (2.1)$$

де P – сила навантаження, Н; l – робоча довжина зразка, мм; f – стріла прогину зразка, мм; b – ширина робочої поверхні зразка, мм; s – товщина пакета, мм.

Висновки до РОЗДІЛУ 2

1. У якості вихідних матеріалів обрано деформовані штаби зі сплаву магнію AZ31 (ASTM) і сплавів алюмінію AW-2017A, AW-6082 (T6), AW-5083 (EN 573-3:2009). Запропоновано способи складання штаб у пакети.

2. Запропоновано отримання тришарових штаб зі сплавів алюмінію та магнію шляхом гарячої пластичної деформації. У якості способу пластичної деформації обрано прокатку, як найбільш розповсюджений процес обробки тиском металів і сплавів.

3. Запропоновано процес гарячої прокатки вести за один прохід зі ступенями деформації 50% при температурі початку деформації 400°C .

4. Для оцінки механічних властивостей тришарових штаб після пластичної деформації, обрано випробування на одноосне розтягнення. За

результатами випробувань будуть визначені межа текучості, межа міцності та відносне подовження тришарового металу.

5. Для оцінки умовного модуля пружності отриманих тришарових штаб, запропоновано випробування на триточковий вигин.

РОЗДІЛ 3. ОТРИМАННЯ КОМПОЗИТІВ ЗІ СПЛАВІВ АЛЮМІНІЮ ТА МАГНІЮ МЕТОДОМ СПІЛЬНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

3.1. Вплив гарячої деформації на міцність з'єднання шарів магнію і алюмінію та механічні властивості отриманих композитів

Як було показано в п. 2.1, заготовки перед прокаткою складали з двох зовнішніх штаб зі сплавів алюмінію товщиною 1,0 мм кожна та внутрішнього шару зі сплаву магнію AZ31 товщиною 1,8 мм або 4,0 мм. Тришарові пакети-заготовки мали умовне позначення В, С, D, G. До складу пакету В входили штаби алюмінію AW-6082 ($h_{0Al} = 1,0$ мм; $h_{0Mg} = 1,8$ мм; $h_{0Al} = 1,0$ мм). У пакет С входили штаби зі сплаву алюмінію AW-2017A ($h_{0Al} = 1,0$ мм; $h_{0Mg} = 1,8$ мм; $h_{0Al} = 1,0$ мм), а в пакет D – зі сплаву алюмінію AW-5083 ($h_{0Al} = 1,0$ мм; $h_{0Mg} = 1,8$ мм; $h_{0Al} = 1,0$ мм). Пакет G так само складався зі штаб алюмінієвого сплаву AW-6082 і штаб магнієвого сплаву AZ31 товщиною 4,0 мм ($h_{0Al} = 1,0$ мм; $h_{0Mg} = 4,0$ мм; $h_{0Al} = 1,0$ мм).

Таким чином, співвідношення товщини шарів становило 1: 1,8: 1 для пакета меншої товщини, і 1: 4: 1 для пакетів з більшою товщиною.

Ширина пакетів усіх типів складала 25 мм. Довжина пакетів складала 400 мм.

Для отримання надійних результатів було прокатано по 15 зразків кожного типу. Пакетів типу G, тобто з товщиною магнію 4,0 мм, було прокатано менше – 5 зразків. Це пов'язано з проблемами захоплення валками при прокатці.

Прокатку здійснювали за один прохід. Значення відносного обтиски при прокатці становило 45% - 50%. Менше значення відносного обтиску може не забезпечити схоплювання шарів алюмінію і магнію. Значення обтиснень за прохід вище 50% в експериментальних дослідженнях не

використовували, так як їх важко досягти на реальних прокатних станах. При обтиску більше 50% важко забезпечити умови захоплення штаби з валками.

Швидкість обертання валків складала 0,26 м/с. Після прокатки вимірювали товщину, ширину і довжину зразків. За результатами вимірювань розраховували абсолютний Δh і відносний ε обтиск, розширення пакету Δb і коефіцієнт витяжки λ . Коефіцієнт витяжки розраховували як відношення площ початкового та кінцевого (після прокатки) поперечного перерізу штаби.

Середнє значення ступеня деформації (відносного обтиску) при прокатці склало 47,8%. Середній коефіцієнт витяжки склав 1,81. У якості прикладу, в табл. 3.1 наведені дані про параметри деформації заготовок-пакетів типу В.

Таблиця 3.1 – Температурно-деформаційні параметри прокатки пакетів типу В (AW-6082/AZ31/AW-6082)

№ проходу	$h_{0\Sigma}$, мм	h_1 , мм	Δh , мм	ε , %	$\lambda (F_0/F_1)$	t_{cp} , °C
1	3,80	1,94	1,86	48,9	1,85	400
2	3,80	1,89	1,91	50,2	1,89	403
3	3,80	1,95	1,85	48,6	1,84	408
4	3,80	1,93	1,87	49,2	1,86	398
5	3,80	1,96	1,84	48,5	1,83	397
6	3,80	1,91	1,89	49,6	1,87	408
7	3,80	1,94	1,86	48,9	1,85	400
8	3,80	1,98	1,82	48,0	1,81	398
9	3,80	1,95	1,85	48,8	1,84	400
10	3,80	1,95	1,85	48,7	1,84	398
11	3,80	2,03	1,77	46,7	1,77	397
12	3,80	1,98	1,82	48,0	1,81	397
13	3,80	1,96	1,84	48,3	1,83	393

14	3,80	1,99	1,81	47,6	1,80	400
15	3,80	1,98	1,82	48,0	1,81	400

Зображення характерних тришарових штаб отриманих гарячої прокаткою прокатаних композитів представлено на рис. 3.1.

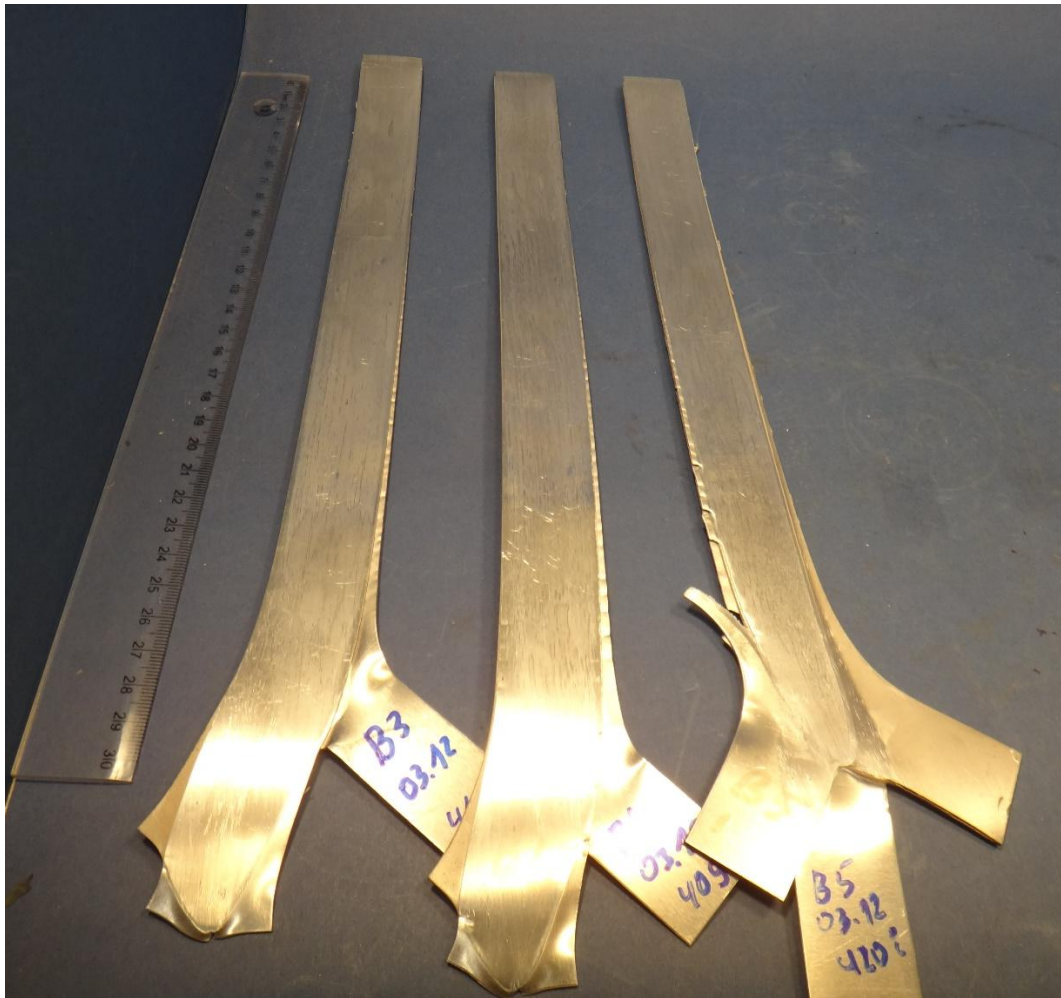


Рисунок 3.1 – Тришарові композити зі сплавів AW-6082 та AZ31 після гарячої прокатки

При прокатці заготовок-пакетів типу G, використовували термокамеру для фіксації температури штаби при прокатці. Аналіз значень температури, отриманих з термокамери, показав, що температура штаби в зоні деформації, внаслідок контакту з валками зменшується приблизно на 140 – 150 градусів (рис. 3.2).

Але такий перепад температур відповідає боковій поверхні штаби. Можливо припустити, що зниження температури в середині зони деформації буде декілька меншим.

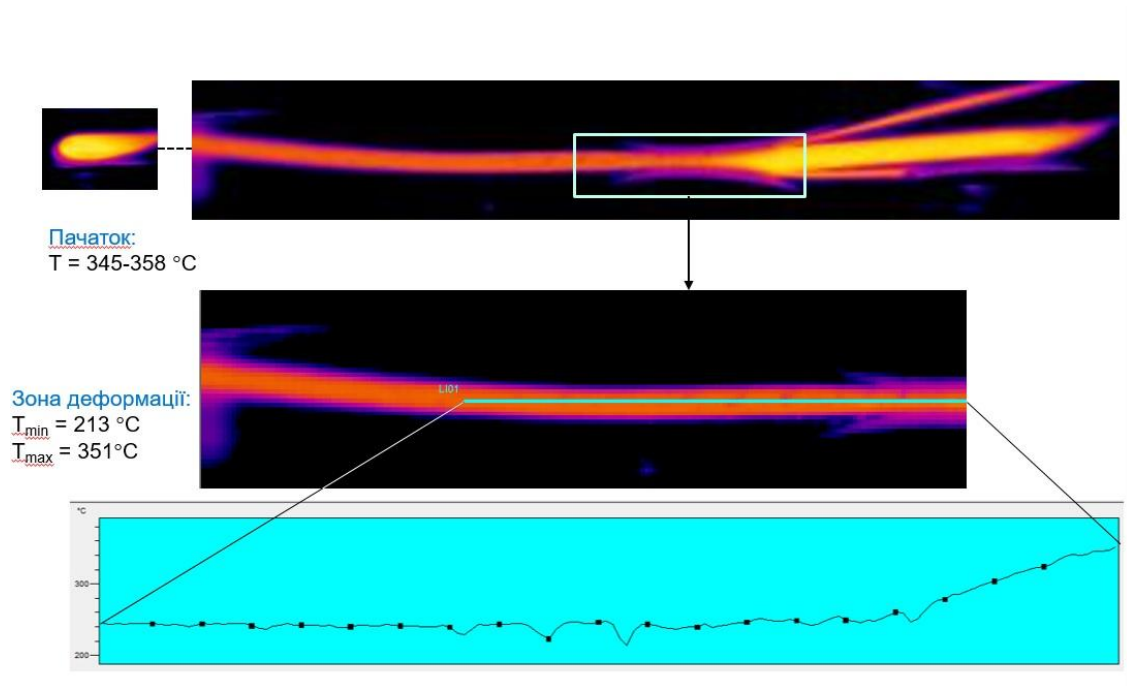


Рисунок 3.2 – Зміна температури штаби в зоні деформації при прокатці

Стабільну прокатку більш широких пакетів шириною 50 мм виконати не вдалося. Це пов'язано з проблемами захоплення широкою штаби робочими валками. Крім того, наявність заклепки в передній частині заготовки, призводило до концентрації напружень в цьому місті, що призводило до відривання переднього кінця штаби після захоплення (рис. 3.3).



а

б

Рисунок 3.3 – Проблеми, що виникли при прокатці пакетів шириною 50 мм: а – прокатані передні кінці пакету с заклепками; б – непрокатаний пакет після відриву переднього кінця

Можливо, для стабільної прокатки товстих та широких пакетів необхідно виключити роль концентратора напружень у початковий момент прокатки. Крім того, необхідно здійснити додаткові заходи щодо підвищення здібності валків до захоплення.

З використанням профілометра Hommel-Elomic W5-Set було досліджено шорсткість поверхні штаб перед прокаткою та шорсткість поверхні пакетів після прокатки. Величина шорсткості для всіх алюмінієвих сплавів була подібною. Значення шорсткості представлено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення шорсткості поверхонь штаб до та після прокатки

Марка сплаву	Вихідна шорсткість Ra, мкм	Шорсткість після контакту з валками Ra, мкм	Шорсткість на контакті шарів, Ra, мкм
EN AW-6082	0,143	0,171	0,222
AZ31	1,673	0,207	

Висока вихідна шорсткість поверхні магнієвих штаб обумовлена попередньої піскоструменевою обробкою. Після деформації, шорсткість магнієвої штаби на контакті з алюмінієм зменшується у 7,5 разів.

Для оцінки механічних властивостей отриманих тришарових штаб, попередньо були визначені механічні властивості штаб з яких склалися пакети перед прокаткою (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Характеристики механічних властивостей сплавів з яких були виготовлені штаби для складання тришарових пакетів

Сплав	σ_T , Мпа	σ_B , Мпа	δ , %
EN AW-6082	67	162	23,4
EN AW-2017	294	433	19,4
EN AW-5083	136	280	24,2
AZ31	161	265	15,8

Як видно з табл. 3.3, сплави EN AW-6082 та EN AW-5083 мають декілька більшу пластичність ніж сплав EN AW-2017. Аналіз співвідношення межі текучості а межі міцності для сплавів, які досліджуються показав, що співвідношення σ_T / σ_B для сплавів EN AW-6082 та EN AW-5083 менше 0,5, а для сплавів AZ31 і EN AW-2017 складають відповідно 0,61 та 0,68. Тобто сплави EN AW-6082 і EN AW-5083 краще використовувати з точки зору подальшої пластичної деформації.

Отримані тришарові штаби піддавалися розтягання на розривній машині для визначення їх механічних властивостей. Оцінку механічних властивостей проводили для зразків без термічної обробки, та для зразків після термічної обробки (см. п.2.2). Результати випробувань для пакетів В і D (без термічної обробки) та пакетів ВW і DW (після термічної обробки) наведено на рисунку 3.4)

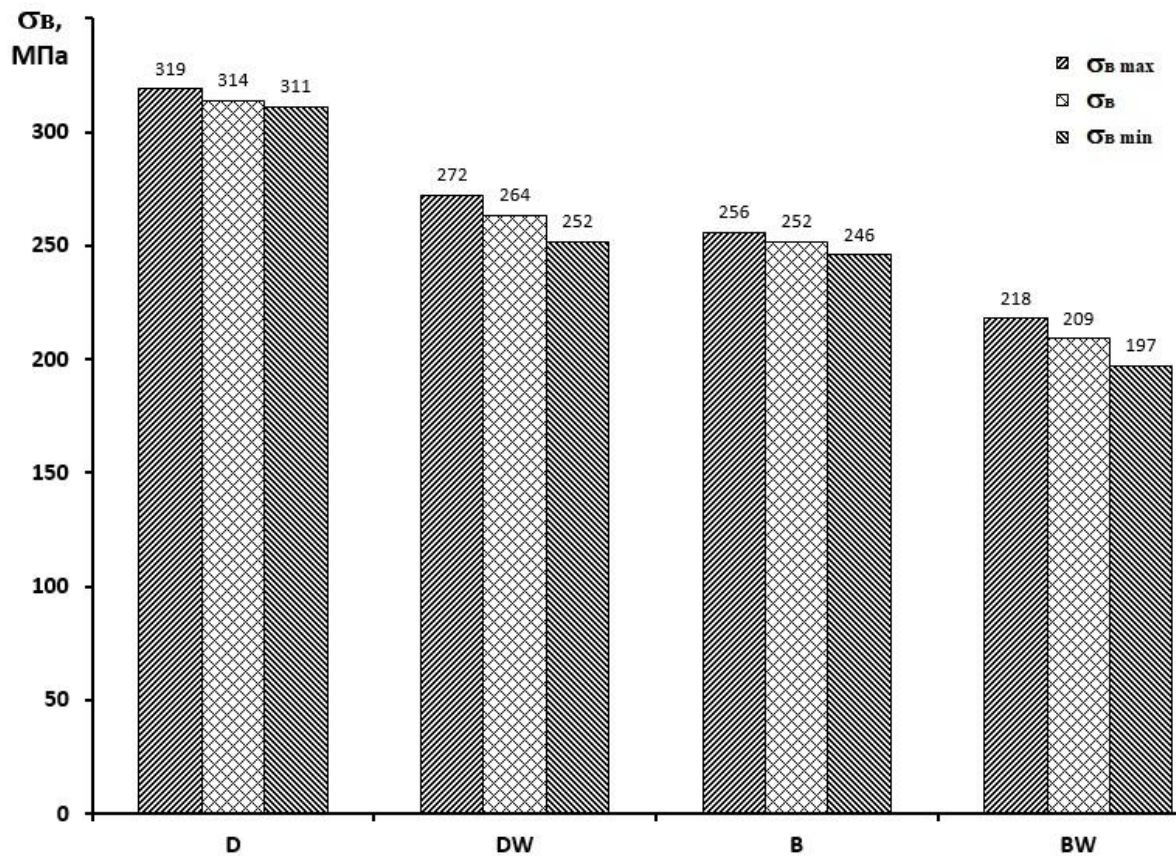


Рисунок 3.4 – Значення межі міцності матеріалу тришарових штаб, які отримані з пакетів типу В та D

Як видно з рисунку 3.4, термічна обробка тришарових пакетів призводить до зниження межі міцності для пакетів типу В та D в середньому на 17 та 16 % відповідно.

Значення показників механічних властивостей матеріалу тришарових пакетів після прокатки та термообробки наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Характеристики механічних властивостей матеріалу тришарових пакетів після гарячої прокатки

Тип пакету	Сплави	σ_T , Мпа	σ_B , Мпа	δ , %
B	6082-AZ31	192	252	12,6
Bw*	6082-AZ31	148	209	14,7
Cw	2017-AZ31	191	262	11,9
D	5083-AZ31	223	314	13,2

Dw*	5083-AZ31	150	264	14,3
G**	6082-AZ31**	180	256	11,5

* - після термообробки (відпал)

** - (Al+Mg+Al) = 1,0 + 4,0 + 1,0 мм

Аналіз результатів механічних випробувань отриманих зразків дозволяє зробити висновок, що пластична деформація пакетів підвищує властивості міцності матеріалів пакетів у порівнянні з властивостями міцності вихідних заготовок. Застосування термічної обробки дозволяє значно зменшити величину зміцнення для пакетів, які складаються зі сплавів AW-2017 та AW-6082. Термообробка пакету зі сплаву AW-5083 помітного ефекту знеміцнення не дає, що є очікуваним тому, що алюмінієві сплави 5-ї серії відносять до таких, що термічно не зміцнюються.

Відносне подовження, тобто пластичні властивості пакетів, зменшуються у порівнянні з пластичними властивостями вихідних штаб. При цьому значення відносного подовження для готового пакету декілька нижче навіть значень відносного подовження вихідних штаб з магнію.

Однією з важливих характеристик багат шарових штаб зі сплавів магнію та алюмінію з огляду сфер їх застосування, є величина модуля пружності E. Як відомо, модуль пружності сплаву магнію AZ31 знаходиться на рівні 44 ГПа, а для сплавів алюмінію – 70 ГПа.

Для оцінки модуля пружності отриманих тришарових штаб було виконано механічні випробування на універсальній машині для випробувань Zeick/Roell Z10 з максимальною силою 10 кН. Швидкість випробування складала 5 мм/хв.

Випробування проводили для плоских зразків шириною 16-0,02 мм. Відстань між опорами для перших 7 зразків складала 100 мм. Для інших зразків – 40 мм. Радіус притискного ребра 2,5 мм, радіус опор – 2,5 мм.

Випробування проводили до моменту руйнування зразка або до заданої величини вигину (30 мм). Характер кривих навантаження при цьому був різним. На рисунку 3.5 показано варіанти характерних діаграм випробування.

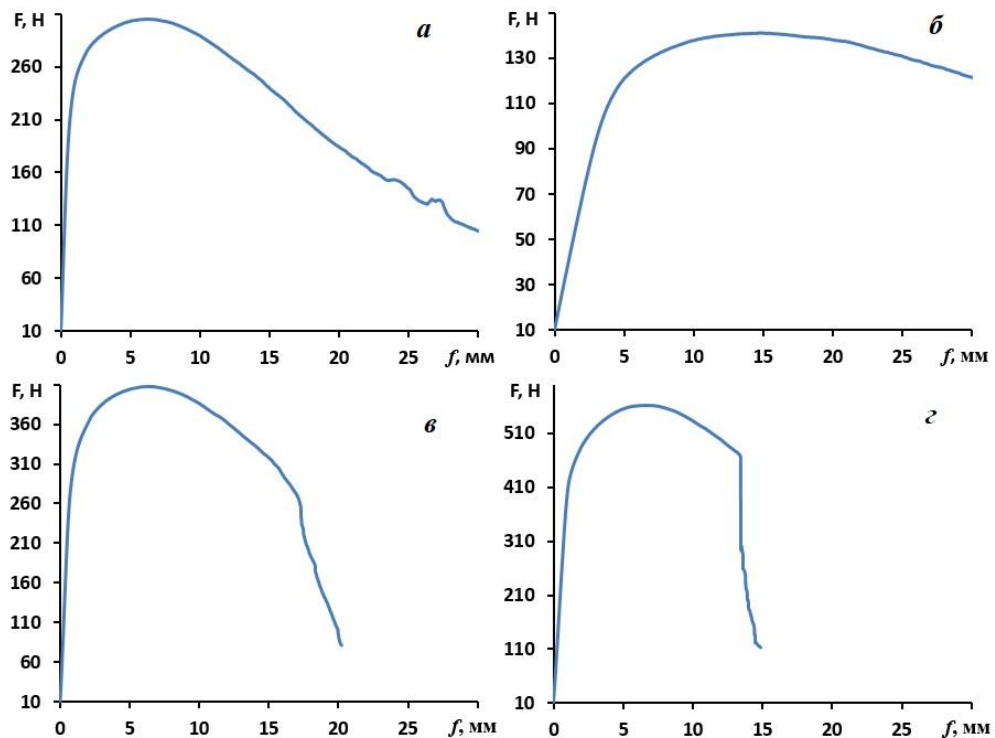


Рисунок 3.5 – Діаграми випробувань зразків на триточковий вигин: *a* – пакет типу Ww; *б* – пакет Cw; *в* – пакет B; *г* – пакет C

Як видно з рис. 3.5, зразки після термічної обробки B2W та C11W під час випробування не руйнувалися. Такий характер кривих характерний для всіх зразків після термічної обробки. Зразки B6 та C15, які не піддавалися термічній обробці, мають характерні криві з руйнуванням під час випробувань. Переважна більшість зразків, яких не піддавали термічній обробці, вигиналися до моменту руйнування.

За отриманими діаграмами випробувань на триточковий вигин, визначали значення сили навантаження P та переміщення f (стрілу вигину), які відповідає кінцю пружної ділянки діаграми. Після цього, знаючі відстань між опорами, ширину та товщину зразків, розраховували значення умовного

модуля пружності за формулою (2.1). Середні значення умовного модуля пружності для отриманих тришарових штаб показано на рисунку 3.6.

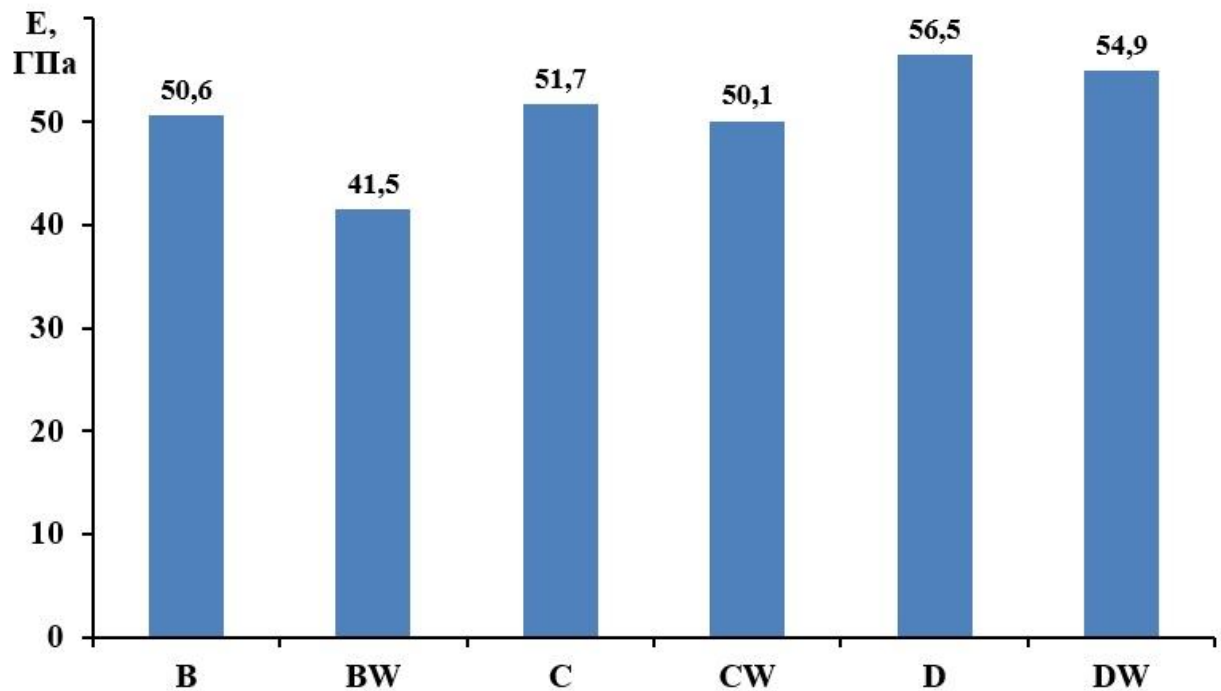


Рисунок 3.6 – Умовний модуль пружності отриманих прокаткою тришарових штаб

Результати випробувань на триточковий вигин показали, що значення умовного модулю пружності отриманих тришарових штаб, знаходиться на рівні 50-56 ГПа, що вище модулю пружності сплаву магнію та нижче модуля пружності алюмінієвих сплавів. Виключенням виявилися тришарові штаби, які було прокатано з пакетів типу В та термічно оброблено. Значення модулю пружності для таких штаб виявилось нижче модуля пружності сплаву магнію.

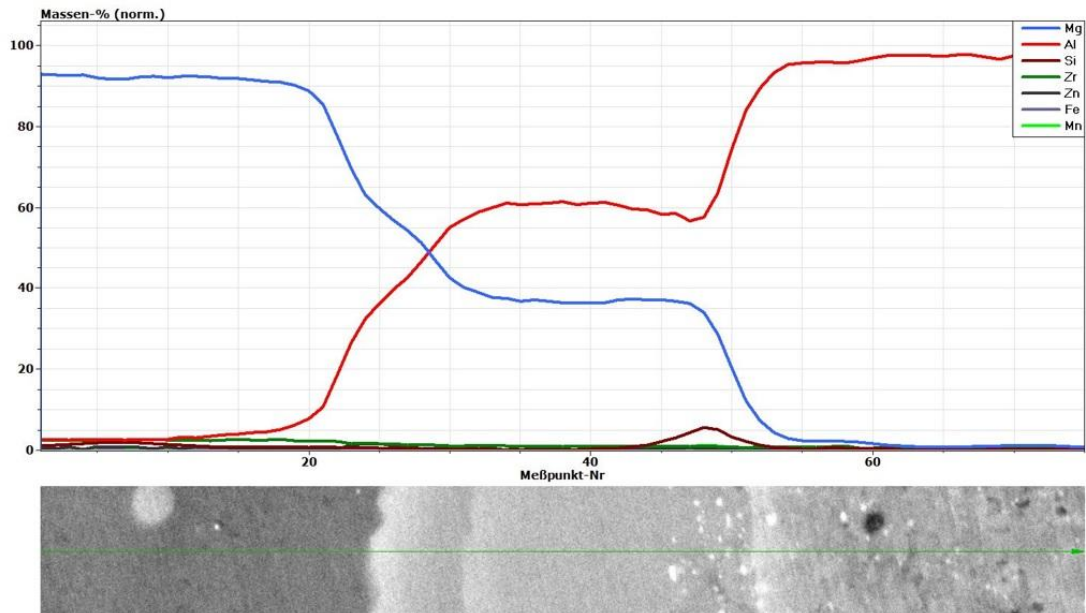
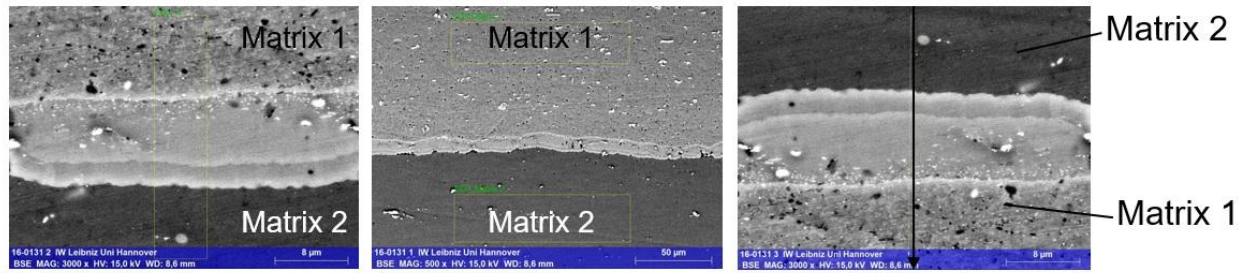
Це може бути пов'язано з якимось внутрішніми дефектами в прокатаних штабах, або з впливом термічної обробки на склад та структуру зони з'єднання. Тобто впливом термічної обробки на інтерметалідні сполуки.

3.2. Дослідження хімічного складу та структури зони з'єднання шарів магнію та алюмінію

Згідно результатів багатьох досліджень, які було показано в розділі 1, в зоні з'єднання двох різнорідних металів утворюються інтерметалідні сполуки, які впливають на міцність з'єднання. Для оцінки хімічного складу зони з'єднання, з тришарових штаб були відрізані та підготовлені зразки для дослідження. Відповідність номерів зразків та типів пакетів: 16-0131 – В, 16-0133 – тип С, 16-0137 – тип D, 16-0140 – тип G.

Дослідження хімічного складу та структури зони з'єднання шарів магнію та алюмінію, проводили з використання растрового електронного мікроскопу ZEISS Supra 55 VP інституту матеріалознавства університету міста Ганновер (ФРН). Роздільна здатність 1,2 нм, максимальний струм пучка 100 нА. Режим низького вакууму – 1-133 Па. Використовували енергодисперсійний (EDX) аналізатор.

На рисунках 3.7 – 3.10 показано хімічний склад та структуру зон з'єднання отриманих тришарових штаб.



	Al	Mg	Mn	Zn	Si	Fe	Zr
Matrix 1	96,12	1,32	0,41	-	0,96	0,31	0,88
Matrix 2	2,96	95,93	0,31	0,80	-	-	-

Рисунок 3.7 – Результати електронної мікроскопії зразка з тришарової штаби AW6082-AZ31-AW6082 (Al/Mg/Al – 1,0/1,8/1,0 мм)

Як видно з рисунку 3.7, в середині зони з'єднання утворюються сполуки, які складаються з різних фаз. Більшість довжини цієї зони складають сполуки, які складаються на 60% з алюмінію та 40% магнію. Згідно діаграми стану системи Al-Mg (см. рис. 1.1), це відповідає γ фазі – інтерметаліду $Al_{12}Mg_{17}$.

Зі сторони сплаву магнію (чорний колір), спостерігається фаза багата магнієм. Імовірно – це β фаза Al_3Mg_2 . Зі сторони алюмінію спостерігаємо фазу багату алюмінієм.

	Al	Mg	Mn	Zn	Si	Fe	Cu
Matrix 1	94,00	1,11	0,68	-	0,41	0,51	3,28
Matrix 2	2,80	96,41	-	0,79	-	-	-

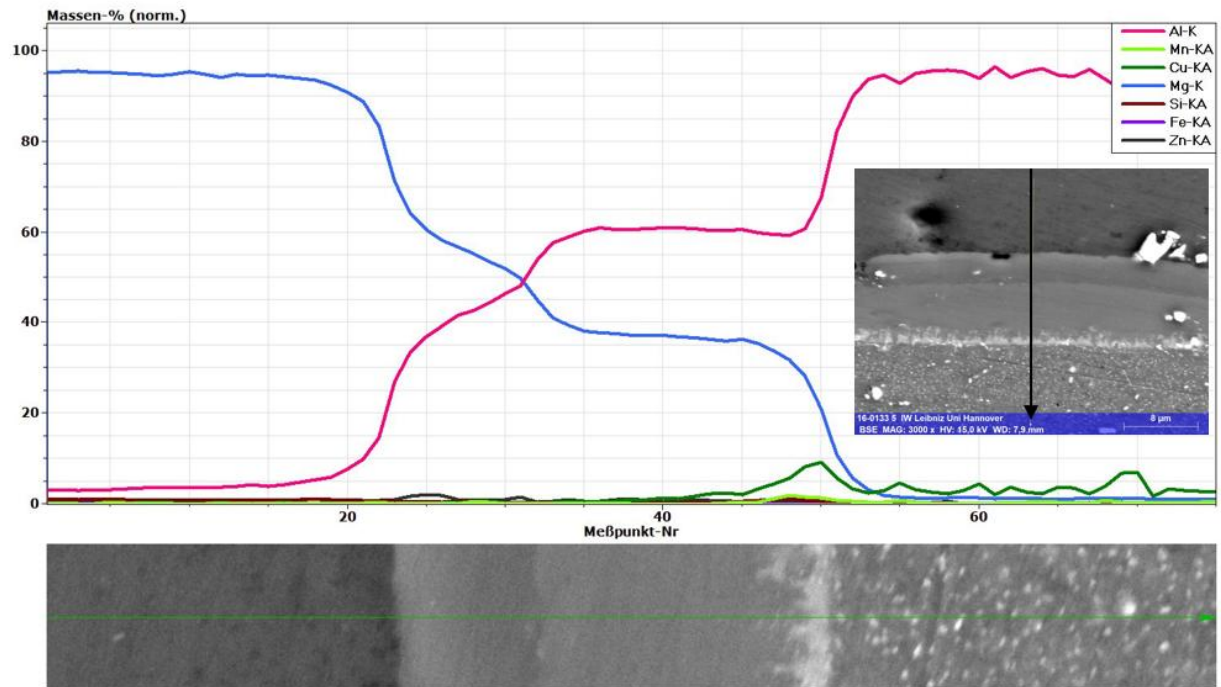
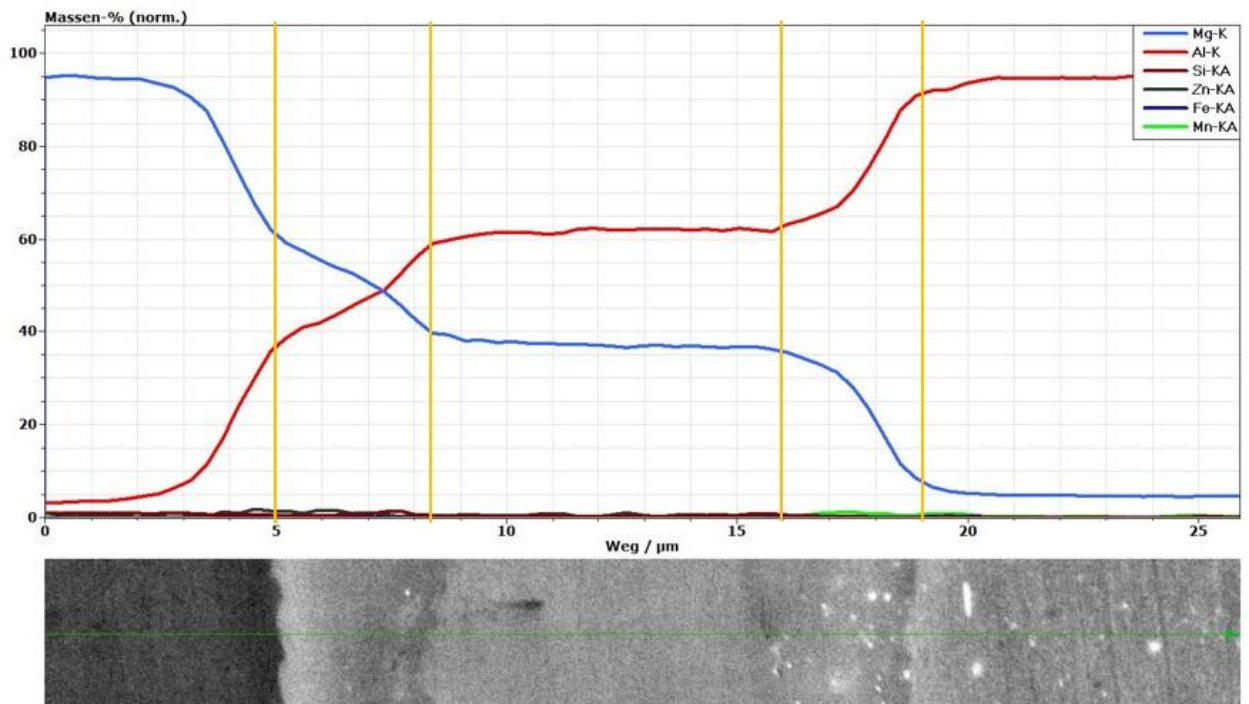
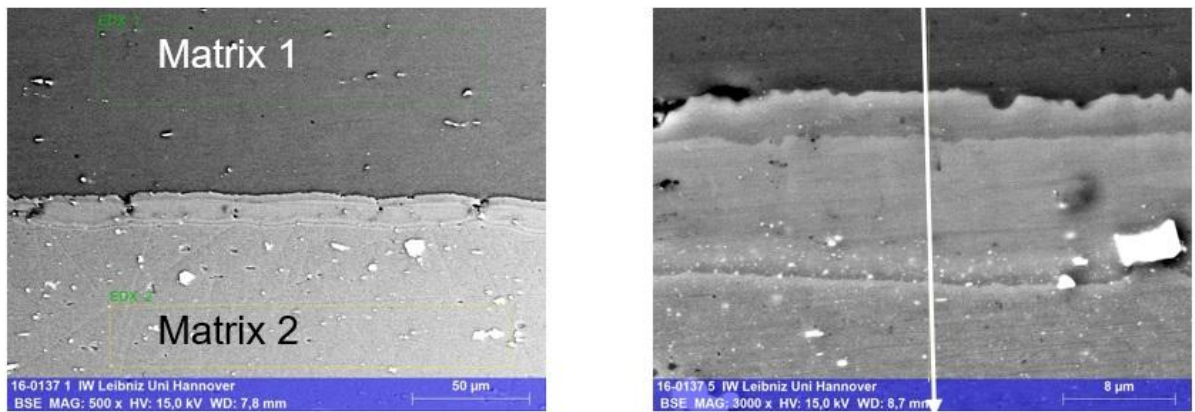


Рисунок 3.8 – Результати електронної мікроскопії зразка з тришарової штаби AW2017-AZ31-AW2017 (Al/Mg/Al – 1,0/1,8/1,0 мм)

З рисунку 3.8 видно, що за характером розподілу Al та Mg, цій зразок подібний до попереднього зразка (см. рис. 3.7).



	Al	Mg	Mn	Zn	Fe
Matrix 1	4,39	94,67	0,52	-	0,42
Matrix 2	96,07	2,84	0,31	0,78	-

Рисунок 3.9 – Результати електронної мікроскопії зразка з тришарової штаби AW5083-AZ31-AW5083 (Al/Mg/Al – 1,0/1,8/1,0 мм)

На рис. 3.9, тонкими вертикальними лініями, показано умовний поділ зони з'єднання сплавів алюмінію та магнію на три зони.

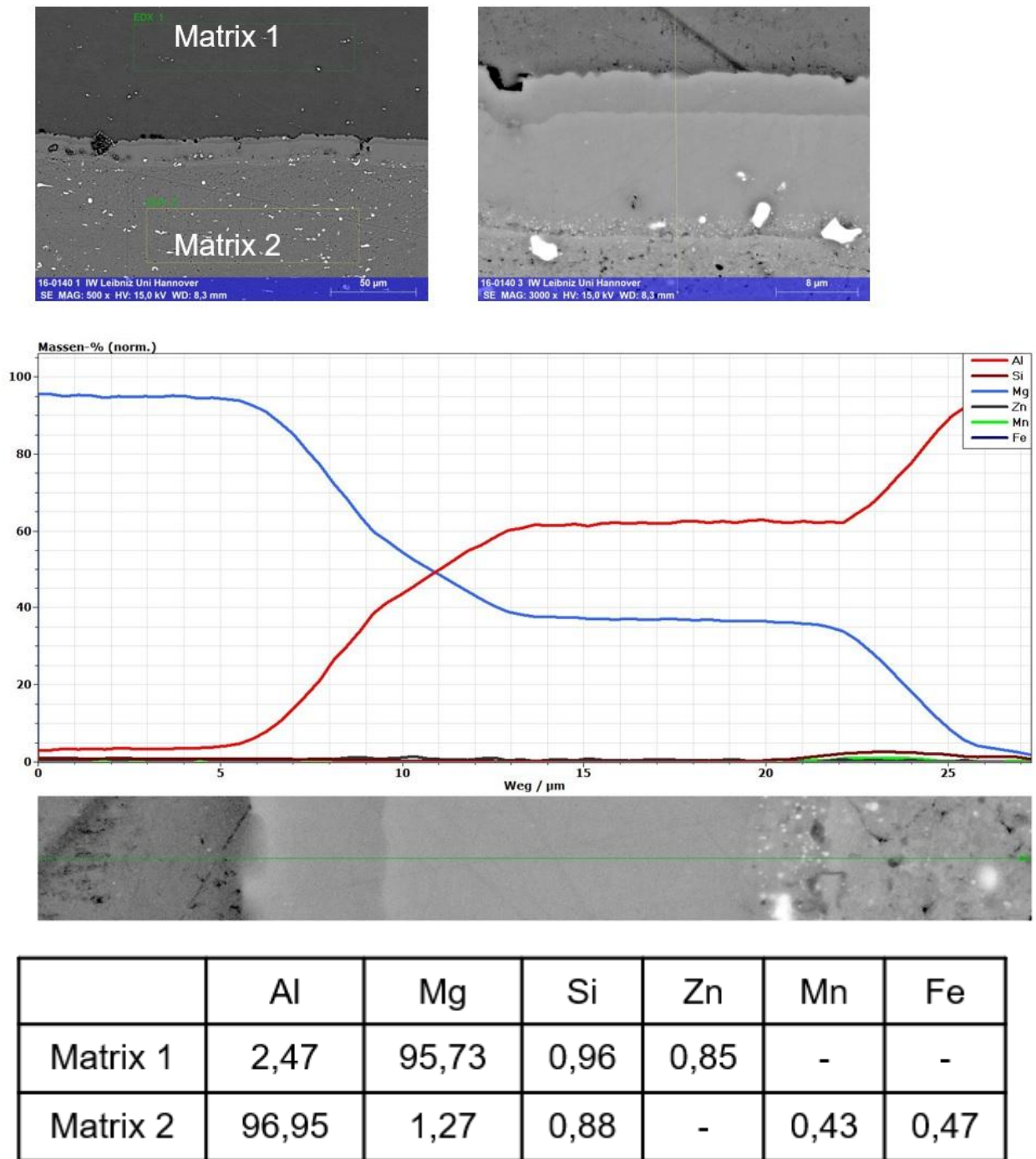


Рисунок 3.10 – Результати електронної мікроскопії зразка з тришарової штаби AW6082-AZ31-AW6082 (Al/Mg/Al – 1,0/4,0/1,0 мм)

Визначення товщини шару інтерметалідів здійснювали шляхом підсумовування середньої товщини трьох зон. Середню товщину зон визначали як середньоарифметичне у трьох перерізах. На рисунку 3.11 зображено шар інтерметалідів та зони, які в ньому розглядалися.

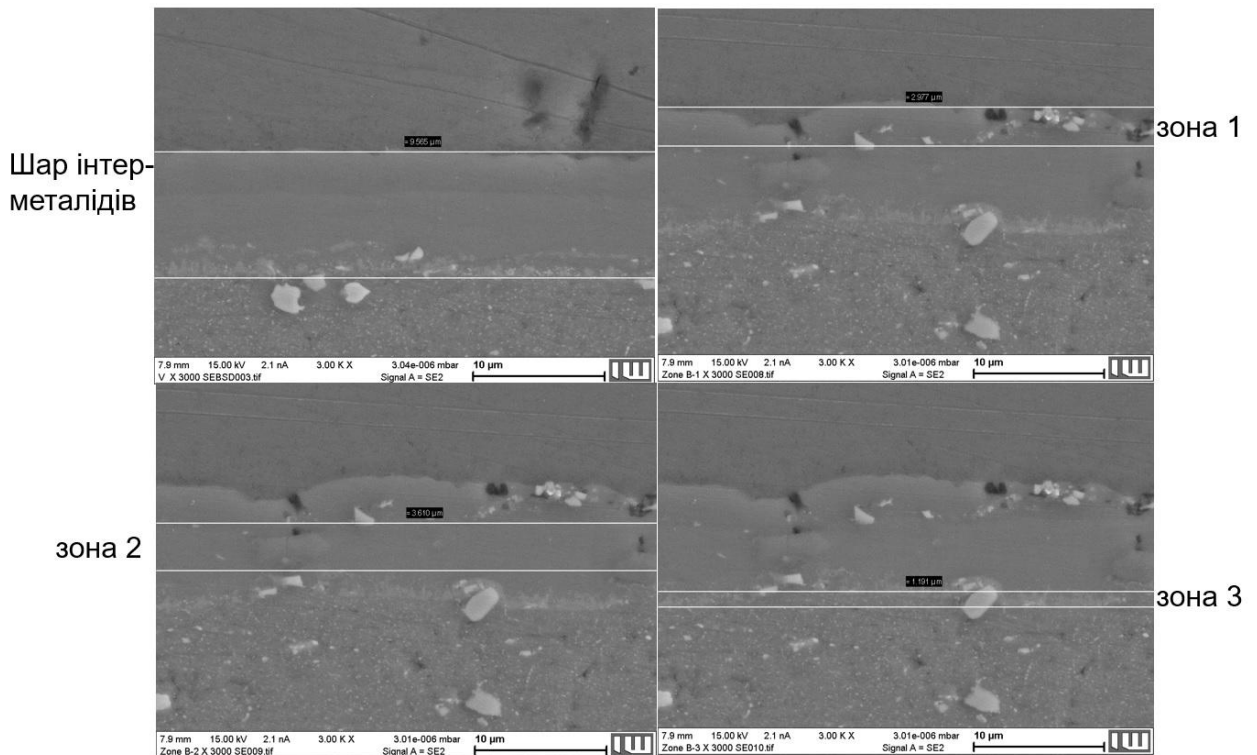


Рисунок 3.11 – Шар інтерметалідів у зоні з'єднання (чорний – сторона магнію, сірий – сторона алюмінію)

Розраховані значення товщин шару інтерметалідів наведено в табл. 3.5

Таблиця 3.5 – Товщина шару інтерметалідів у зоні з'єднання сплавів магнію та алюмінію

Зона	Товщина шару, мкм			
	Тип В	Тип С	Тип D	Тип G
1	2,7	2,9	2,8	3,8
2	4,7	4,5	3,5	9,9
3	1,8	1,2	1,7	1,9
сума	9,2	8,6	8,0	15,6

Аналіз таблиці 3.5 показує, що товщина шару інтерметалідів для більшості тришарових штаб складає 8-9 мкм. Товщина шару інтерметалідів у

тришаровій штабі з вихідною пластиною магнію більшої товщини (4,0 мм), приблизно у два рази більше та складає 15,6 мкм.

3.3. Розробка рекомендацій для отримання композитів зі сплавів алюмінію та магнію методом спільної пластичної деформації

Тришарові штаби зі сплавів алюмінію та магнію, де зовнішні шари формує алюміній, а внутрішній – магній, дозволять поєднати корозійну стійкість алюмінію та здатність магнію поглинати вібрацію. За рахунок меншої щільності магнію, застосування таких штаб дозволить знизити вагу конструкції.

Процес отримання тришарових штаб буде здійснюватися за такою технологічною схемою:

- попередня підготовка складових пакету;
- складання заготовок-пакетів перед прокаткою;
- нагрів заготовок;
- гаряча прокатка за один прохід на прокатному стані;
- правка на пресі при необхідності;
- термічна обробка в залежності від призначення.

Для отримання якісного з'єднання необхідна якісна підготовка поверхонь складових тришарових пакетів. Вона повинна включати видалення окислів з поверхні магнієвих штаб. Доцільно використовувати піскоструменеву обробку.

Складання заготовок-пакетів може здійснюватися шляхом обернення штаби магнію штабою з алюмінієвого сплаву, або складанням з двох штаб алюмінію, та однієї штаби магнію однаковою довжини. У другому випадку необхідно скріпити три штаби між собою. У разі використання з'єднання заклепкою, краще не використовувати заклепку на передньому кінці штаби для уникнення виникнення там концентратора напружень. Використання заклепок з двох сторін може вплинути на якість з'єднання шарів, оскільки

буде перешкоджати вільному подовженню шару алюмінію, який намагається отримати більшу витяжку.

Рекомендована температура нагріву заготовок перед прокаткою 400 – 420 °С. Використання більш низької температури може призвести до зниження пластичних властивостей магнію внаслідок чого може спостерігатися розтріскування шару магнію при прокатці.

Гарячу прокатку здійснювати за один прохід. При цьому ступень деформації за прохід повинна бути 50% та вище. Максимальна ступень деформації обмежена здатністю валків стана по захопленню штаби та пластичними властивостями шару магнію. У випадку прокатки за декілька проходів, необхідно підігрівати заготовку перед кожним проходом. При цьому треба контролювати час нагріву, пам'ятаючи про сполуки інтерметалідів на границі з'єднання шарів металів.

З метою визначення оптимальних технологічних параметрів та устаткування для прокатки доцільно визначити умови захоплення заготовки валками та енергосилові параметри процесу. При виконання цих розрахунків враховувати відмінність механічних властивостей штаб з магнієвих та алюмінієвих сплавів.

У якості термічної обробки може бути використаний відпал при температурі 330 °С протягом 30 хвилин. Інші варіанти термічної обробки потребують додаткових досліджень.

Висновки до РОЗДІЛУ 3

1. Тришарові штаби зі сплавів магнію та алюмінію можливо отримати шляхом гарячої деформації за один прохід на прокатному стані. Для отримання надійного з'єднання шарів, бажано вести процес прокатки зі ступенями деформації 50 % та вище. Були отримані тришарові штаби з використанням заготовок з різних алюмінієвих сплавів (AW-2017, AW-6082,

AW-5083) у якості поверхневих шарів. У якості внутрішнього шару виступав сплав магнію AZ31.

2. Дослідження механічних властивостей отриманих тришарових штаб показало, що значення показників міцності матеріалу тришарових штаб після прокатки збільшується, у порівнянні з показниками міцності складових пакету. Показники пластичності (відносне подовження) тришарових штаб знижуються у порівнянні з показниками пластичності матеріалів заготовок з яких зібрані пакети. Застосування відпалу отриманих тришарових штаб протягом 30 хвилин при температурі 300 °С знижує показники міцності на 16-17%.

3. Випробування на триточковий вигин показало, що модуль пружності більшості отриманих тришарових пакетів знаходиться на рівні 50 – 56 ГПа. Тобто у порівнянні з модулем пружності магнієвих сплавів 44 – 45 ГПа, спостерігається підвищення модуля пружності, яке досягає 25%.

4. Аналіз складу та структури зони з'єднання шарів зі сплавів магнію та алюмінію було виконано методом електронної мікроскопії. Було встановлення наявності у зоні з'єднання шару інтерметалідів. У більшості прокатаних тришарових штаб товщина шару інтерметалідів складає 8 – 9 мкм.

5. Розроблено рекомендації для отримання композитів зі сплавів алюмінію та магнію методом спільної пластичної деформації. Встановлено порядок виконання технологічних операцій які включають попередню підготовку складових пакету, складання заготовок-пакетів перед прокаткою, нагрів заготовок, гарячу прокатку за один прохід на прокатному стані, правку на пресі при необхідності, термічну обробку в залежності від призначення.

При цьому ступень деформації за прохід повинна бути 50% та вище. Рекомендована температура нагріву заготовок перед прокаткою 400 – 420 °С. У якості термічної обробки може бути використаний відпал при температурі 330 °С протягом 30 хвилин.

ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз властивостей та сфер застосування виробів зі сплавів магнію та алюмінію, показано переваги та можливість застосування біметалевих штаб з цих сплавів. Виконано аналіз основних способів отримання багат шарових штаб з різних матеріалів. Встановлено, що одним з масових та відносно простих у реалізації є спосіб спільної гарячої деформації на прокатному стані.

2. Отримано тришарові штаби зі сплаву магнію AZ31 (ASTM) і сплавів алюмінію AW-2017A, AW-6082 (T6), AW-5083 (EN 573-3:2009) шляхом гарячої пластичної деформації. Процес гарячої прокатки здійснювали за один прохід зі ступенями деформації 50% при температурі початку деформації 400°C.

3. Виконано оцінку механічних властивостей тришарових штаб після пластичної деформації випробуваннями на одноосне розтягнення. Встановлено, що значення показників міцності матеріалу тришарових штаб після прокатки збільшується, у порівнянні з показниками міцності складових пакету. Відносне подовження тришарових штаб нижче ніж у матеріалів вихідних заготовок з яких зібрані пакети.

4. Випробування на триточковий вигин показало, що спостерігається підвищення модуля пружності отриманих тришарових штаб у порівнянні з модулем пружності магнієвих сплавів, яке досягає 25%.

5. Електронна мікроскопія зони з'єднання шарів в тришаровому пакеті показала наявність шару інтерметалідів. У більшості прокатаних тришарових штаб товщина шару інтерметалідів складає 8 – 9 мкм.

5. Розроблено рекомендації для отримання композитів зі сплавів алюмінію та магнію методом спільної пластичної деформації. Встановлено порядок виконання технологічних операцій та їх параметри.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ryabov V.R. Welding of Bimetals / V.R. Ryabov, L.D. Dobrushin, Jung-Gi Moon. Kiev: Paton Electric Welding Institute of the National Academy of sciences of Ukraine, 2003. 130 pp.
2. Щеголев В.И. Электролитическое получение магния / В.И. Щеголев, О.А. Лебедев. М.: Руда и металлы, 2002. 368 с.
3. Трыков Ю.П. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов / Ю.П. Трыков, Л.М. Гуревич, В.Г. Шморгунов. Москва : Металлургиздат, 2004. 230 с.
4. Большаков В. И., Шевченко А. Ф., Александров В. А., Башмаков А. М., Троценко Э. А., Поленов А. А. Бураков А.Н., Чжао Динь Юй, Лю Дун Ие, Лю Лай Лун, Чу Шиз Гон, Чен Фузай, Лин Гуо Кинг. Создание и промышленное применение современных аппаратурно-технологических комплексов десульфурации чугуна на меткомбинатах Китая. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. №4. С. 6-11.
5. Стратегические минеральные ресурсы Украины для ядерной энергетики / Е.А. Кулиш, И.Л. Комов, В.Г. Яценко [и др.] К.: Логос, 2010. 287 с.
6. Буслаева Е. М. Материаловедение. Шпаргалка. ВикиЧтение. URL: <https://tech.wikireading.ru/16469> (дата звернення: 25.09.2020).
7. Шипша В.Г. Магний и магниевые сплавы. URL: http://www.naukaspb.ru/spravochniki/Demo%20Metall/3_14.htm (дата звернення 26.09.2020).
8. Материалы медицинских стентов: Обзор / И. И. Папилов, В. А. Шкуропатенко, В.С. Шокуров, А.И. Пикалов. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010. – 40 с.
9. ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys / Edited by J.R. Davis. ASM International, 1993. 784 p.

10. Куцова В. З. Алюміній та сплави на його основі: навч. посібник / В.З. Куцова, Н.Е. Погребна, Т.С. Хохлова, Т.М. Миронова, О.А. Носко. Дніпропетровськ: «Пороги», 2004. 135 с.
11. Данченко В.Н. Производство профилей из алюминиевых сплавов. Теория и технология / В.Н. Данченко, А.А. Миленин, А.Н. Головки. Днепропетровск: ДНВП «Системные технологии», 2001. 448 с.
12. International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys [Електронний ресурс] / The Aluminum Association, Inc. February, 2009. Режим доступу: www.aluminum.org
13. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: Учебник для вузов / Б.А.Колачев, В.И.Елагин, В.А.Ливанов. – 3-е изд., перераб. и доп. М.: МИСИС, 1999. 416 с.
14. Белецкий В. М. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение). Справочник / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов. Под общей редакцией академика РАН И.Н. Фридляндера. К.: «КОМИНТЕХ», 2005. 365 с.
15. Елагин В. И. Структура и свойства сплавов системы Al-Zn-Mg / В.И. Елагин, В.В. Захаров, А.М. Дриц. М: Metallurgiya, 1982. 224 с.
16. Елагин В. И. Конструкционные наноструктурные сплавы на алюминиевой основе. *Цветные металлы*. 2009. № 6. С. 103-111.
17. Андреев В. В., Головки О. М., Бондаренко О. В. Дослідження граничних умов деформації сплаву системи Al-Mg-Sc. *Металургическая и горнорудная промышленность*. 2011. № 7 (272). С. 74-78.
18. Голованенко С. А., Меандров Л. В. Производство биметаллов. Москва: Metallurgiya, 1966. 304 с.
19. Кузнецов Е. В. Методология создания слоистых металлических композиций. *Металургическая и горнорудная промышленность*. 2002. №8-9. С. 42–46.

20. Король В. К., Гильденгорн М. С. Основы технологии производства многослойных металлов. М. : Металлургия, 1970. 237 с.

21. Беляев С. М. Теоретическое обоснование и разработку технологии прессования биметаллических алюминиево-магниевых изделий с прогнозируемым распределением слоев: дис... кандидата техн. наук: 05.03.05 / Национальная металлургическая академия Украины. Днепропетровск: НМетАУ, 2012. 173 с.

22. Кузнецов Е. В., Кобелев А. Г. Биметаллы: современные технологии и применение. *Пластическая деформация сталей и сплавов*: [Сб. науч. тр.] М. : Изд-во МИСИС, 1996. С. 296–300.

23. Гильдергорн М. С. Основы теории совместного прессования разнопрочных металлов и сплавов. М. : Металлургия, 1981.

24. Голованенко С. А., Меандров Л. В. Производство биметаллов. М. : Металлургия, 1966. 304 с.

25. Щерба В. Н. Прессование алюминиевых сплавов. М.: Интермет инжиниринг, 2001. 768 с.

26. Люшинский А. В. Диффузионная сварка разнородных материалов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений М.: Издательский центр «Академия», 2006. 208 с.

27. Диффузия в слоистых композитах: монография / Ю.П. Трыков, Л. М. Гуревич, В.Н. Арисова. Волгоград: РПК «Политехник», 2006. 403 с.

28. Hiroaki Matsumoto, Sadao Watanabe, Shuji Hanada. Fabrication of pure Al/Mg–Li alloy clad plate and its mechanical properties. *Materials processing Technology*. 2005. 169. pp. 9-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.03.005>

29. Eun-Young Kim, JaeHyung Chao, Hyoung-Wook Kim, Shi-Hoon Choi. Evolution of deformation texture in Al/Al–Mg/Al composite sheets during cold-roll cladding. *Materials Science and Engineering: A*. 2011. 530. pp. 244-252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.09.082>

30. 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)

31. 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>

32. Goken M., Hoppel H.W. Tailoring nanostructured, graded, and particle-reinforced Al laminates by accumulative roll bonding. *Advanced Materials*. 2011. 23. pp. 2663–2668. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201100407>

33. Shibayan Roy, Nataraj B.R., Satyam Suwas, Kumar S., Chattopadhyay K. Accumulative roll bonding of aluminum alloys 2219/5086 laminates: Microstructural evolution and tensile properties. *Materials & Design* (1980-2015), 2012. V36. pp. 529-539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.015>

34. 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>

35. Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 3: Chemical composition and form of products: DIN EN 573-3:2009. [Valid from 24.06.2009]. 48 p.

36. Product data sheet AA2017A, EN AW-2017A, EN AW AlCu4MgSi [Elektronный ресурс]: by Leichtmetall Aluminium Giesserei Hannover GmbH. 3p. – Режим доступа:

https://www.leichtmetall.eu/site/assets/files/datenblatt/2017A_Produktdatenblatt_A4-en_us.pdf

37. Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature: DIN EN ISO 6892-1. [Publication date 02.2016]. 94 p.