

ОТРИМАННЯ, ВЛАСТИВОСТІ І ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ

В.А. Костін, Ю.В. Фальченко, А.Л. Пузрін, А.О. Махненко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: valerykkos@gmail.com

Наведено літературний огляд сучасного стану технології виробництва магнієвих сплавів, проаналізовані їх властивості і вплив на них легуючих елементів, визначено мікроструктуру та основні фази, що формуються в литих та деформованих магнієвих сплавах, представлена класифікація сучасних магнієвих сплавів закордонного виробництва і сформульовані подальші шляхи їх розвитку, визначено проблеми використання магнієвих сплавів. Легування магнію іншими елементами (Al, Mn, Zn, Si, Re та ін.) або міцними наночастинами дозволяє значно покращити його наявні властивості, щоб розширити сферу застосувань. Існуючі проблеми використання магнієвих сплавів (легкозаймистість, горючість, довговічність поверхні, біорозчинність, корозійна стійкість, зварюваність) вирішуються за рахунок легування, керування хімічним та структурно-фазовим складом, застосування відповідних режимів термомеханічної обробки, зміцнення поверхні. Бібліогр. 27, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: електроліз; металотермічне відновлення; процеси Бунзена та Піджона; литі та деформовані магнієві сплави; корозія; біосумісність; біодеградація

Вступ. Розвиток сучасної промисловості неможливо уявити собі без розробки та використання нових конструкційних матеріалів і насамперед магнієвих сплавів. Магній та його сплави — конструкційні матеріали, що мають унікальний комплекс механічних, фізичних і експлуатаційних властивостей, що дозволяє використовувати їх у передових галузях сучасного виробництва — авіаційній та космічній галузі, енергетичному машинобудуванні, військовій промисловості, медицині та електроніці [1–3].

Магній, як лужноземельний метал, має блискучий або сріблясто-білий вигляд, високу реакційну здатність і ніколи не зустрічається у вільному стані [4, 5]. Легка доступність магнієвих руд (брусит — 69,1 % MgO, форстерит — 57,3 % MgO, магнезит — 47,8 % MgO та ін.) і унікальні технології отримання та відновлення забезпечили цьому металу широке застосування.

З магнієвих сплавів виготовляють корпуси приладів, насосів, ліхтарі та двері кабін. Більшість фіюзеляжів вертольотів, що виготовлено Sikorsky Aircraft (Lockheed Martin Company, США), майже повністю виготовлені з магнієвих сплавів. У ракетній техніці вони йдуть на виготовлення корпусів ракет, обтічників, стабілізаторів, паливних баків у зв'язку з тим, що через високу теплоємність (у 2,5 рази вище ніж у сталі) у короткочасному польоті магнієві сплави не встигають перегрітись, не дивлячись на низьку температуру плавлення (650...680 °C). Магнієві сплави становлять основну масу таких конструкцій, що дозволяє істотно

знижити загальну масу ракет на 20...30 % та відповідно підвищити дальність їх польоту.

Важливою галуззю, де застосовуються магнієві сплави, є атомна енергетика. Завдяки здібності поглинати теплові нейтрони, відсутності взаємодії з ураном та хорошій теплопровідності магнієві сплави використовують для виготовлення оболонок теплоутворюючих елементів в атомних реакторах.

Магнієві сплави широко використовуються у виробництві побутових та спортивних товарів, офісного обладнання [6].

Магній та його сплави відіграють значну роль в органічній хімії та фармацевтиці [7]. Магнієві сплави, що деформуються, успішно використовуються у елементах конструкцій літальних апаратів (літаків, ракет, снарядів та ін.), що забезпечує зниження маси виробів і підвищує їх льотні характеристики.

Завдяки його чудовим біологічним властивостям, особливо його здатності біологічно розкладатися *in vivo* (з лат. «у живому»), магній є перспективним біоматеріалом [8] для лікування, протезування та при хірургічному втручанні.

Ціль цієї роботи — проаналізувати та узагальнити металургійні особливості виробництва магнієвих сплавів, встановити вплив основних легуючих елементів та мікроструктурних складових на їх властивості, визначити основні проблеми та подальші перспективи застосування.

Металургія виробництва магнієвих сплавів. Існує два основних способи отримання магнію: електроліз розплавленого безводного хлориду магнію і металотермічне відновлення оксиду магнію феросиліцієм [9]. Типові процеси виробни-

В.А. Костін — <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>, Ю.В. Фальченко — <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>

А.Л. Пузрін — <https://orcid.org/0000-0003-0625-2113>, А.О. Махненко — <https://orcid.org/0000-0003-2319-2976>

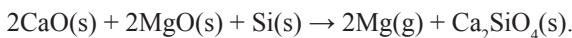
© В.А. Костін, Ю.В. Фальченко, А.Л. Пузрін, А.О. Махненко, 2023

цтва з використанням електролітичного та термічного методів проілюстровано на рис. 1.

У процесі електролізу хлориду магнію спочатку відбувається гідрометалургійна підготовка вихідної сировини (зневодненого хлориду магнію) з подальшою подачею її безпосередньо через електролізери.

У свій час Р. Бунзен удосконалив процес виробництва металевого магнію Фарадея, щоб досягти постійного розділення хлору та магнію. Запобігання рекомбінації хлору та магнію було критично важливим для успіху, оскільки безводний хлорид магнію є гігроскопічним, що може призвести до утворення небажаних оксидів та оксихлоридів під час прямої дегідратації [9]. Зараз технологічною проблемою залишається виробництво безводного хлориду магнію з мінімальною кількістю оксихлоридів [10]. Схема електролітичного процесу Бунзена представлена на рис. 1 [11].

Другий спосіб виробництва металевого магнію — термічне відновлення. На відміну від електролізу інтенсивне нагрівання в процесі термічного відновлення усуває необхідність у складній підготовці вихідної сировини [12]. Термічний процес відбувається при підвищених температурах (понад 1200 °С) по металотермічній реакції відновлення, в якій кремній і/або алюміній видаляють магній у вигляді пари з оксиду. Оксид магнію зазвичай постачають у формі кальцинованого доломіту ($MgO \cdot CaO$), іноді збагаченого кальцинованим магнезитом (MgO). Основна реакція отримання магнію наступна:



Ця реакція є високо ендотермічною і здійснюється в періодичному режимі. Промислові процеси відбуваються під вакуумом при нижчій температурі, щоб обмежити псування матеріалів конструкцій і призупинити небажані побічні реакції в газовій системі.

Існує кілька варіантів теплового процесу. Три основні термічні процеси: Піджена (Pidgeon), в якому використовується реторта з зовнішнім нагріванням; Магнетерм (Magnetherm) — нагрівання електричним опором за допомогою електрода; Больцано (Bolzano), в якому шар брикетів складається з феросиліцію та вапна, а дрібні фракції реагують у печі за допомогою внутрішнього електричного нагріву.

У процесі Піджена доломіт і феросиліцій формуються в брикеті за допомогою реторти із зовнішнім нагріванням для отримання парів магнію. Процес Магнетерм кальцинує суміш доломіту, феросиліцію та глинозему для отримання того самого побічного продукту. Пари магнію, отримані обома шляхами, охолоджуються та конденсуються окремо перед екстрагуванням. Сьогодні процес Піджена є найбільш широко використовуваним завдяки його здатності виробляти магній високої чистоти та великої кількості його сировини — доломіту [13].

Використання вакууму є загальним для вищевказаних термічних процесів і металевий магній конденсується з парової фази. Процес Магнетерм є єдиним, у якому відпрацьовані продукти виводяться з печі як шлак.

Основна перевага термічних процесів перед електролітичними полягає в тому, що основним



Світове виробництво первинного магнію в 2015 р.

Рис. 1. Блок-схема процесів виробництва первинного металевого магнію: а — DSM/VAMI; б — Magcorp; в — Pidgeon; з — Bolzano

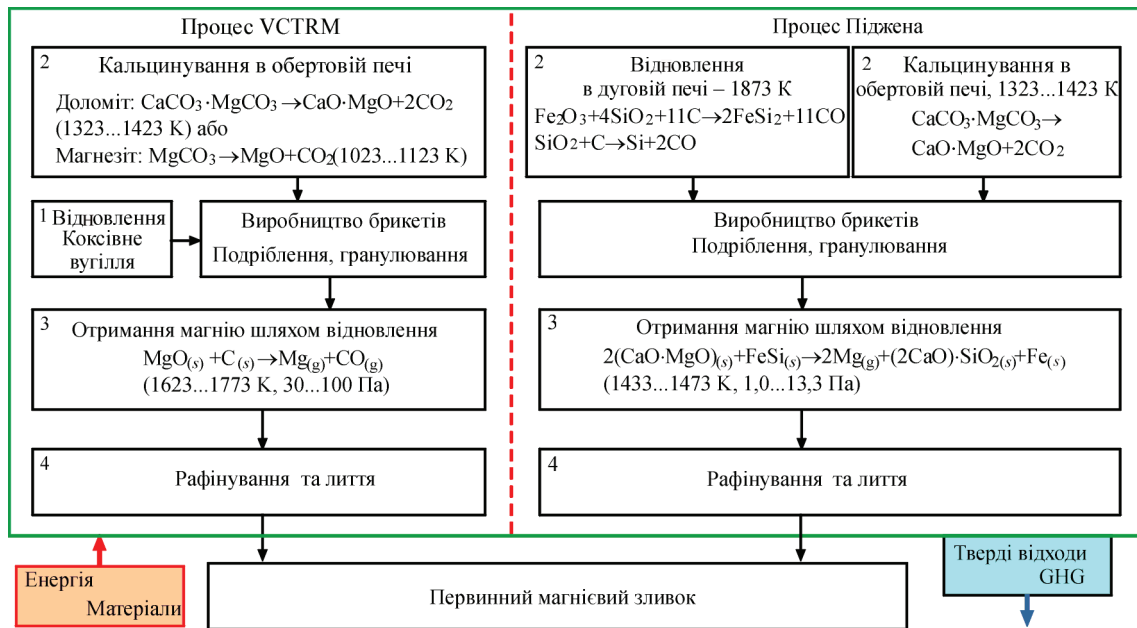


Рис. 2. Схематичне зображення робочих стадій технологічних процесів виробництва магнію Піджена та VCTRM

джерелом магнію є доломіт, який потребує просто кальцинування на відміну від комплексного очищення, яке вимагає електролітичний шлях для виробництва безводного хлориду магнію.

З іншого боку, основні недоліки термічних процесів включають відносно високу вартість відновників феросиліцію і зокрема алюмінію та періодичну роботу, необхідну через вакуум, який спричиняє нижчу продуктивність і призводить до проникнення повітря, що призводить до втрати магнію.

Карботермічне відновлення як нова технологія виробництва. Сучасний технологічний процес Піджена відомий своїм складним управлінням і високими експлуатаційними витратами. Крім того він споживає величезну кількість енергії. Це призвело до пошуку більш ефективних і стійких технологій виробництва. Альтернативним шляхом виробництва є вакуумне карботермічне відновлення магнію (процес VCTRM), коли магnezія реагує з вуглецем з утворенням магнію та пари монооксиду вуглецю [14] (рис. 2).

Незважаючи на те, що цей спосіб виробництва пройшов широкомасштабні промислові випробування в середині ХХ століття, він привернув більше уваги лише в останні десятиліття, оскільки вуглець є дешевшим відновником, ніж феросиліцій, він легкодоступний і у разі успіху загальна вартість виробництва буде значно нижчою, ніж метод Піджена [11]. Тому конденсація парів магнію та їх відділення від монооксиду вуглецю все ще є серйозною проблемою. Крім того, зростає дослідницький інтерес до сонячного карботермічного відновлення (рис. 3) [15]. Дослідження показали, що цей процес споживає менше енергії та

викидає менше вуглецевого газу порівняно з методом Піджена (5,31 проти 15,9 кг CO_2).

Вторинне виробництво магнію. Зі збільшенням використання магнію в усьому світі слід очікувати більш значні обсяги відходів магнію. Магній добре переробляється і його переробка може стати додатковим джерелом постачання для основного виробництва. Сьогодні існують як флюсові, так і безфлюсові технології переробки магнію. Перероблений магній зберігає ті самі хімічні, фізичні та механічні характеристики, які мав вихідний. Крім того, переробка магнію споживає лише 5 % енергії, необхідної для його виробництва. Використання вторинного магнію також зменшує викиди вуглецю і зберігає матеріал у відновлюваній економіці. Однак магнієві сплави можна легко переробити лише в тому випадку, якщо їхній склад стабільний і не містить домішок [16]. Це пояснює чому більшість переробленого магнію отримується із відходів литих під тиском магнієвих сплавів, коли видається майже 30 % магнію під час виробничого процесу. Щоб переробка магнію по-справжньому почала розвиватися необхідно розробити процес переробки, який був би комерційно життєздатним і безпечним для навколишнього середовища. Сьогодні методи переробки магнію включають дистиляцію, переплавлення без солі або на основі солі, переробку в твердому стані та пряму конверсію.

3D друк як новий спосіб виробництва. Адитивне виробництво або 3D друк є новим способом отримання магнієвих сплавів. Загалом інтерес до 3D друку металів зростає завдяки його здатності налаштовувати та оптимізувати склад кожного сплаву відповідно до його застосування та отримувати

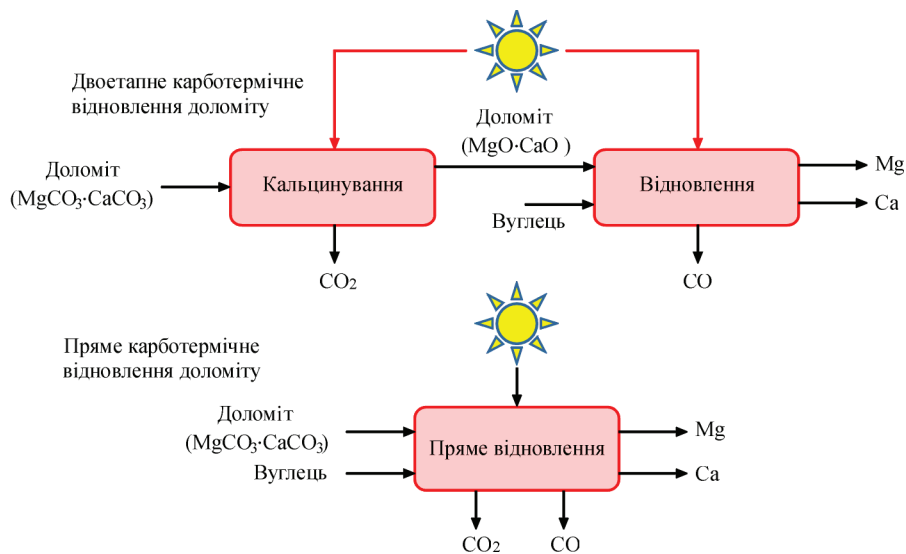


Рис. 3. Блок-схема процесів сонячного карботермічного відновлення магнію

найкращий можливий результат. Прикладом може бути друк сплавів у більш складній конфігурації до анатомічної геометрії тканин пацієнта, щоб сприяти прискореному росту клітин, проліферації та регенерації кісток [17].

Іншим прикладом може бути друк із магнієвих сплавів деталей складної геометрії. Раніше цього не можна було досягти за допомогою традиційного виробництва, що обмежувало його розвиток. Крім того, на відміну від звичайних способів виробництва, виготовлення деталей за допомогою адитивних технологій також може значно зменшити технічну складність і вартість індивідуального виробництва, підвищуючи його ефективність.

Можливості адитивного отримання магнієвих сплавів є перспективними. Однак дослідження того, як магнієві сплави можна надрукувати на 3D принтері досить обмежені, оскільки відомо, що це пов'язано з кількома проблемами [18]. По-перше, магній хімічно реактивний і горючий матеріал. Він має низьку температуру випаровування, що ускладнює змішування та друк магнієвих сплавів із бажаним складом, щільністю, міцністю, біосумісністю та корозійною поведінкою. Підготовка вихідної сировини також є небезпечною, оскільки порошки магнію мають високу схильність до вибуху. Сьогодні двома типовими методами адитивного виробництва для отримання деталей із магнієвих сплавів є дугове адитивне виробництво способом дугового зварювання (WAAM) та селективне лазерне плавлення (SLM), відоме як метод плавлення шару порошку [18].

Легування, структура та властивості магнієвих сплавів. Магній — найлегший інженерний метал. Чистий магній має низьку щільність (1,74 г/см³) і демонструє більш високе співвідношення міцності до ваги та кращу пластичність і

ливарну здатність, ніж алюміній або сталь. Порівняно з іншими металами та полімерними матеріалами магній не токсичний і має кращі показники тепло- та електропровідності, поглинання вібрації та ударів, амортизаційної здатності, а також хорошу оброблюваність і може формуватися будь-яким встановленим методом. Однак недоліком є його схильність до корозії. Він швидко кородує за двох умов: коли сплав складається зі специфічних металевих домішок або під впливом агресивних видів електроліту. Технології нанесення покриттів (електрохімічне, конверсійне, анодування) були розроблені та використані для подолання цієї особливості магнієвих сплавів [19]. Чистий магній (99,8 %) ідеально підходить для металургійних і хімічних цілей, але його необхідно легувати для застосувань у інженерних конструкціях, щоб посилити його властивості без шкоди для ключових характеристик [6].

Плавлення та лиття магнієвих сплавів у вакуумній інертній атмосфері є кращим способом виробництва, оскільки магній твердне краще, ніж інші литі метали. Крім того, хімічно неактивне середовище може запобігти будь-якому забрудненню реакційноздатними газами. Твердорозчинне і дисперсійне зміцнення другою фазою зазвичай використовуються для зміцнення магнієвих сплавів [20]. Компоненти сплаву та їх хімічний склад можуть впливати на покращення фізичних властивостей магнієвих сплавів.

Легуючі елементи. Найбільш поширеними і превалюючими легуючими елементами є алюміній та цинк. Як алюміній, так і цинк достатньо економічні та добре розчинні в магнії. Алюміній можливо використовувати для покращення міцності, твердості і розширення діапазону плавлення сплаву, одночасно зменшуючи його корозійну

здатність. Відповідного діапазону міцності і пластичності можливо досягти шляхом зміни вмісту алюмінію в сплаві [21]. При використанні разом із цинком він може додатково підвищити міцність сплаву при кімнатній температурі.

Додавання цинку саме по собі може збільшити текучість магнієвих сплавів при литті та покращити стабільність розмірів. Коли цинк разом із магнієвими сплавами змішується з такими домішками, як нікель і залізо, це може підвищити стійкість сплаву до корозії. Цинк не утворює самостійних фаз з легуючим компонентом — марганцем. У сплаві МА2-1 утворюється γ -фаза ($Mg_{17}Al_{12}$). При рекристалізації сплаву внаслідок термічної обробки або зварювання, а також у процесі розпаду пересиченого твердого розчину ця фаза виділяється, входячи до складу псевдоевтектики. Псевдоевтектика здебільшого розташовується по границях зерен. Первинна фаза $Mg_{17}Al_{12}$ є зміцнюючою, зберігається у сплаві після деформації та зварювання. Деякими авторами встановлено, що γ -фаза $Mg_{17}Al_{12}$ має здатність збагачуватися цинком і додатково алюмінієм, утворюючи інтерметалідну фазу $Mg_{17}(Al, Zn)_{12}$, яка представлена у вигляді грубих виділень.

Надмірно великі концентрації алюмінію призводять до зниження пластичності і погіршують деформаційні можливості сплавів у гарячому та холодному станах. Цинк не тільки підвищує міцність, але й відносно подовження сплавів з алюмінієм. Однак при вмісті більше 1,5 % Zn оброблюваність тиском сплавів системи Mg–Al–Zn погіршується. Марганець у ці сплави вводиться переважно для підвищення корозійної стійкості.

Проведені останні роки дослідження показали, що легування магнієвих сплавів рідкісноземельними металами (РЗМ) дозволяє суттєво підвищити їх міцнісні властивості.

Леговані магнієві сплави металами РЗМ церієвої (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu) й ітрієвої (Sc, Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb) груп мають переваги та

недоліки, якщо порівнювати їх за властивостями. У сплавах з металами церієвої групи досягаються менші властивості міцності, але для досягнення максимального зміцнення потрібно менший час старіння. У сплавах з металами ітрієвої групи може досягатися більший рівень зміцнення, але після тривалих витримок при старінні і при більшому вмісті кошовних рідкісноземельних металів. У ряді випадків доцільно спільне використання металів РЗМ обох груп для легування магнієвих сплавів.

Мікроструктура магнієвих сплавів у вихідному стані переважно складається з рівновісних зерен розміром від 100 до 1000 мкм у внутрішніх ділянках та границях, на яких розташовуються дисперсні та дисперсоїдні змінюючі фази. Ці фази можуть відігравати важливу роль у властивостях магнієвих сплавів після проведення відповідної термообробки (рис. 4).

Розмір та розподіл фаз, що утворюються під час лиття або під час наступних стадій термічної чи термомеханічної обробки, залежить від відповідних параметрів термічної обробки. Дисперсні частинки протидіють зростанню розміру зерна згідно моделі Зінера–Стро, при якій розмір зерна зростає зі зменшенням розміру частинок та збільшенням їх об'ємної частки. Ефект закріплення границь зерен дисперсоїдами Zr та без них у магнієвому сплаві наведено на рис. 5. У магнієвих сплавах без використання алюмінію у якості дисперсоїдоутворюючого елемента часто використовують цирконій, тоді як у сплавах з алюмінієм системи Mg–Al доцільним є використання марганцю з формуванням інтерметалідів AlMn. Додатки Zr також є ефективними як подрібнювачі зерна під час лиття, що уможливило виробництво дрібнозернистих магнієвих сплавів.

Значна частина виробів із магнієвих сплавів отримується методом екструзії. Внаслідок цього такі магнієві сплави мають відмінності у мікроструктурі, що пов'язане з процесами рекристалі-

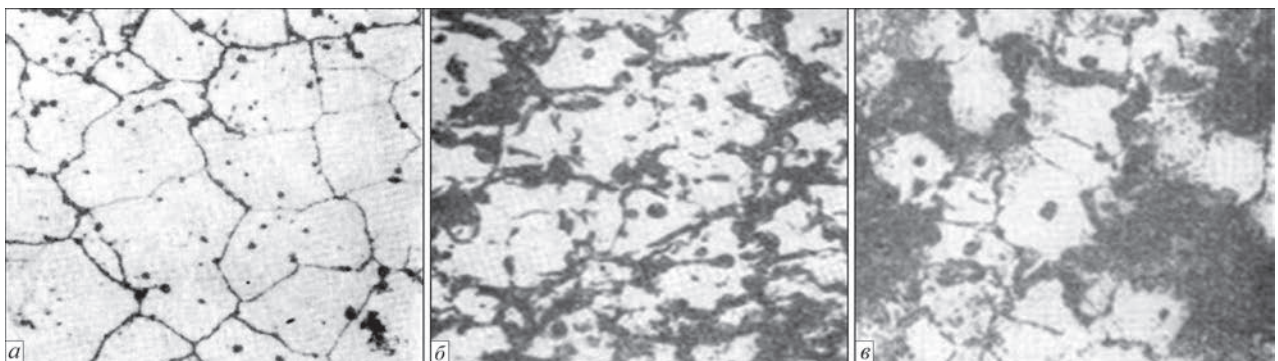


Рис. 4. Мікроструктура ($\times 100$) литого магнієвого сплаву МЛ5 (9 % Al, 0,5 % Mn, 0,8 % Zn) після різних режимів термічної обробки: а — у литому стані; б — після гартування; в — після гартування + старіння

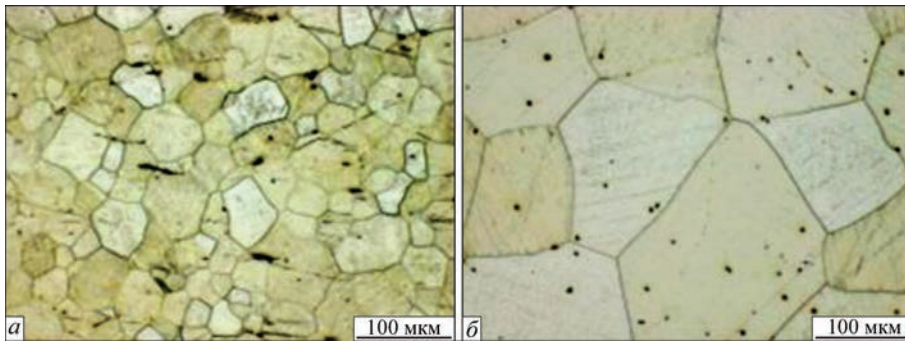


Рис. 5. Мікроструктура магнієвого сплаву, що містить РЗМ, після ковки та термічної обробки: *a* — з цирконієм (~0,4 мас. %); *б* — без цирконію

зації зерен на скупченнях другої фази, екструдованих при підвищених температурах (рис. 6).

Структурно-фазовий склад магнієвих сплавів переважно визначається його системою легування. Існує ряд фаз твердіння, які утворюються в рівноважному стані з твердим розчином магнію, а саме: $Mg_{17}Al_{12}$ (система Mg–Al), Mg_2Ca (система Mg–Ca), Mg_2Sn (система Mg–Sn), Mg_4Ag (система Mg–Ag), Al_2Re та Al_2Ca (система Mg–Al–Ca–Re), $MgCu_2$ (система Mg–Cu–Zn), $Mg_6Ca_2Zn_3$ (система Mg–Ca–Zn), $X_{Mg}MgReZn$ (система Mg–Gd–Zn та Mg–Y–Zn), $PHI_{Al}MgZn$ (система Mg–Al–Zn). Також у магнієвих сплавах можливо формування метастабільних фаз: $MgZn_2$ (система Mg–Zn) та Mg_7Re (система Mg–Re).

Особливістю магнієвих сплавів є знижена швидкість дифузії більшості компонентів у магнієвому твердому розчині. Низькі швидкості дифузії сприяють розвитку дендритної ліквідації, вимагають великого часу витримки при нагріванні, полегшують фіксацію твердих розчинів при гартуванні, але ускладнюють розпад пересичених твердих розчинів при старінні.

Магнієві сплави мають високу пластичність у гарячому стані і добре деформуються при нагріванні. Для деформованих сплавів дифузний відпал зазвичай поєднують з нагріванням для обробки тиском. Магнієві сплави легко ріжуться, шліфуються та поліруються.

Недоліками магнієвих сплавів є погані ливарні властивості, схильність до газонасичення, окис-

лення та займання при литті. Для запобігання утворенню дефектів при виплавці та зварюванні використовують спеціальні флюси, для зменшення пористості застосовують невеликі додатки кальцію (до 0,2 %), а для зниження окиснюваності — добавки берилію (0,02...0,05 %).

Окрім традиційного способу легування останніми роками було досягнуто значного прогресу у застосуванні нанокомпозитів на основі магнієвих сплавів, які додатково зміцнюють сплави [22]. На характеристики цих сплавів впливають як легуючі компоненти, так і наночастинки, що армують сплав [23]. Підвищений дослідницький інтерес у цій області пов'язаний з тим, що зміцнення наночастинками може покращити міцність і пластичність магнію без будь-яких негативних наслідків.

Американським товариством випробувань матеріалів (ASTM) було запропоновано систему позначень для ідентифікації магнієвих сплавів та визначення їх складу (рис. 7) [24].

Всі магнієві сплави розподіляються на дві великі групи — литі та деформовані. Серед литих сплавів виділяється група сплавів, що була отримана способом лиття під тиском (AZ91, AS41, AE42). Деформовані магнієві сплави розподіляються на деформовані ковкою, прокаткою та екструзією.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що розвиток магнієвих сплавів поступово йшов шляхом використання більш складних композицій з метою отримання специфічних властивостей: міцності (суперлегкі, високоміцні), в'язкості (термічно

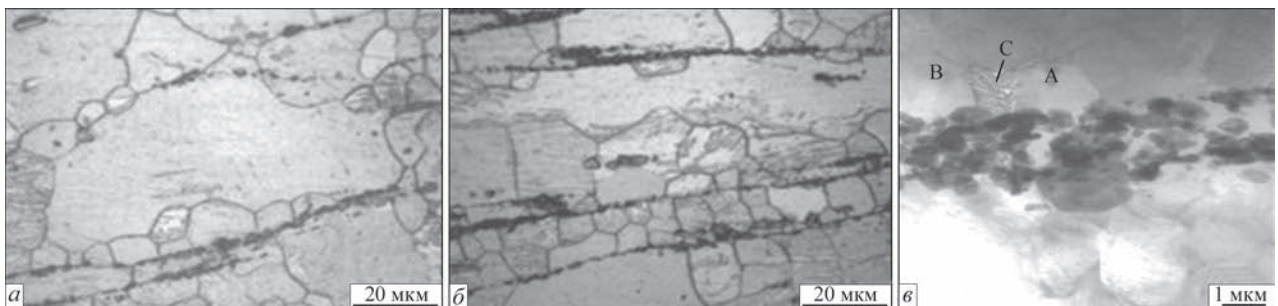


Рис. 6. Мікроструктура магнієвого сплаву AZ31 + 0,8 мас. % Sr, екструдованого при температурах 250 (*a*), 350 °C (*б*) та рекристалізація на частинках Al–Sr фаз (*в*)

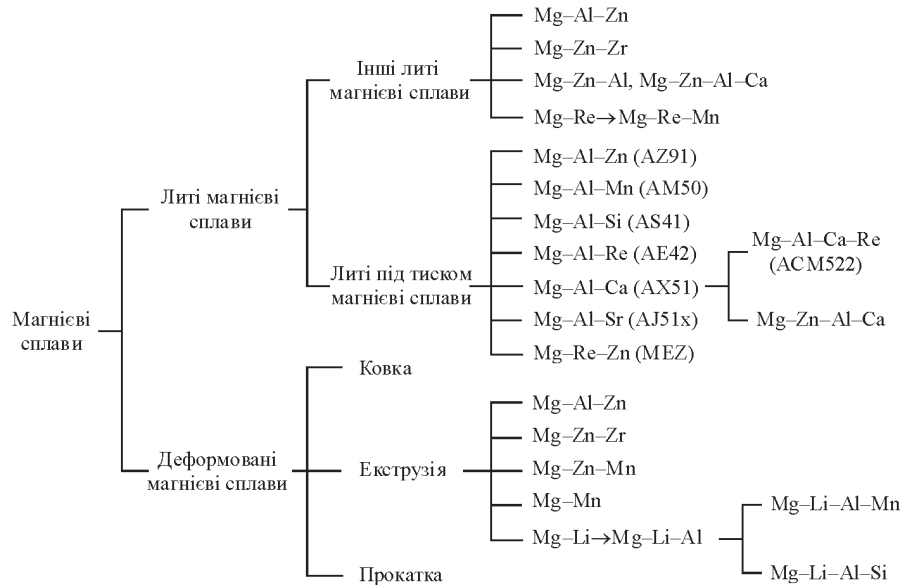


Рис. 7. Класифікація закордонних магнієвих сплавів [24]

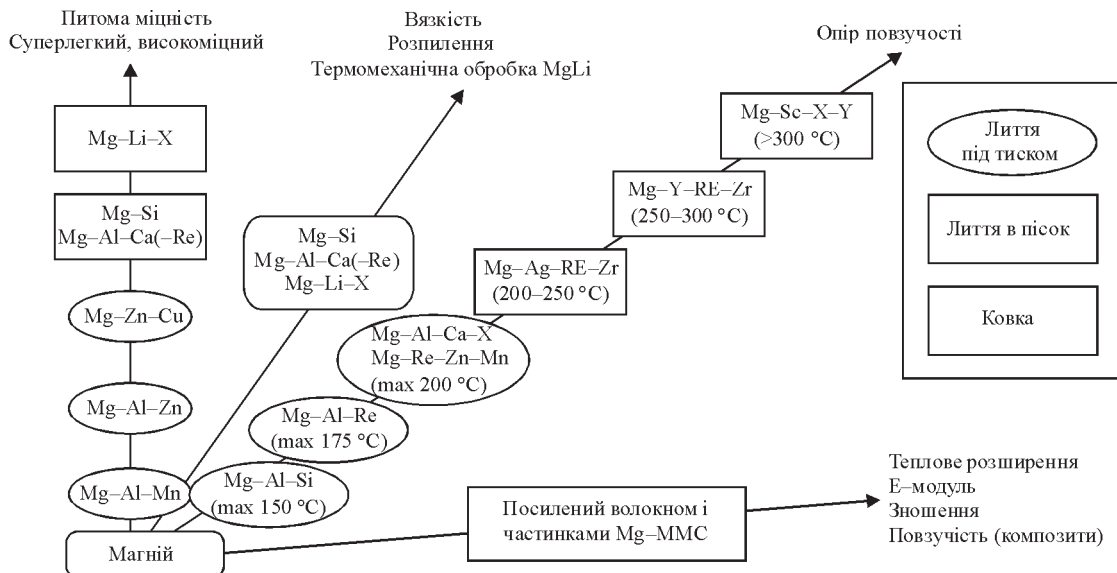


Рис. 8. Напрямки розвитку закордонних магнієвих сплавів [25]

або термомеханічно зміцнені), повзучості, термічно-го розширення, зносу та ін. (рис. 8) [25].

Магнієві сплави з алюмінієм — це AZ31 і AZ91. Сплав AZ31 широко використовується в авіабудуванні завдяки низькій масовій щільності та хорошим механічним властивостям. Водночас сплав AZ91 залишається одним із найпопулярніших ливарних сплавів завдяки своїй високій міцності, відмінній корозійній стійкості та хорошій ливарній здатності. Механічні властивості магнію сплавів AZ31 та AZ91D наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Механічні властивості магнієвих сплавів

Матеріал/сплав	Щільність, г/см ³	Міцність на тиск, МПа	Міцність на розтяг, МПа	Модуль пружності, ГПа
Магній	1,74	20...115	90...190	45
AZ31 (деформований)	1,78	83...97	241...260	—>—
AZ91D (ливарний)	1,81	160	230	—>—

Проведений аналіз літературних джерел показав, що основні проблеми слід очікувати при зварюванні литих магнієвих сплавів (AZ63F, ZE41F, ZK51A, ZK61A) внаслідок розвитку в них дендритної ліквіації, хімічної та структурної неоднорідності, формування пор та несучільностей, сегрегації зміцнюючих фаз (табл. 2). Тоді як деформовані ковкою магнієві сплави (HK31A, ZE10A, ZK21A) мають чудову зварюваність.

Використання магнієвих сплавів. Розрахунки показують, що використання легких

Таблиця 2. Відносна зварюваність магнієвих сплавів

Литі у кокіль та під тиском									
AM100	AZ63A	AZ81A	AZ91AC	AZ92A	EK41A	EZ33A	HK31A	HZ32A	OE22A
B	C	B	B	B	B	A	B	C	B

Закінчення табл. 2

Литі у кокіль та під тиском				Деформовані ковкою				
ZE41A	ZH62A	ZK51A	ZK61A	HK31A	HM21A	HM31A	ZE10A	ZK21A
C	C	D	D	A	A	A	A	B

Примітка. А — дуже добре; В — добре; С — задовільно; D — погано.

магнієвих сплавів замість більш важких (алюмінієвих і титанових сплавів або сталей) може покращити паливну ефективність літака та зменшити шкідливі викиди. Це означає значну економію палива та нижчі експлуатаційні витрати. Заміна алюмінієвих сплавів на магнієві може забезпечити зменшення ваги майже на 60 т, що складає 28 % від ваги літака.

Разом з тим виявились обмеження та критичні аспекти використання магнієвих сплавів в сучасній авіації. Це переважно пов'язане з його горючістю, довговічністю поверхні та корозійною стійкістю.

Сьогодні алюміній та його сплави все ще мають значну перевагу над магнієм та його сплавами для аерокосмічних конструкцій. Але нещодавній прогрес у прикладних дослідженнях займистості магнієвих сплавів призвів до відкриття менш

горючих матеріалів, що дало можливість для їх більш широкого використання у пасажирських літаках та автомобілях. Підвищення механічної міцності магнієвих сплавів, таких як Elektron 21 або Elektron 675, які демонструють вдвічі більшу міцність ніж алюміній, також буде сприяти їх подальшому застосуванню[26].

Хоча перші спроби використання магнію та його сплавів в автомобілях відносяться до початку ХХ століття, загальна частка магнієвих металевих матеріалів в автомобільній промисловості залишається мізерною порівняно зі сталлю та алюмінієм. На рис. 9 представлено ретроспективу використання магнію та його сплавів у автомобілях різних виробників в період 1930–2000 рр.

Основним типом литих магнієвих сплавів в автомобільній промисловості є серія сплавів на

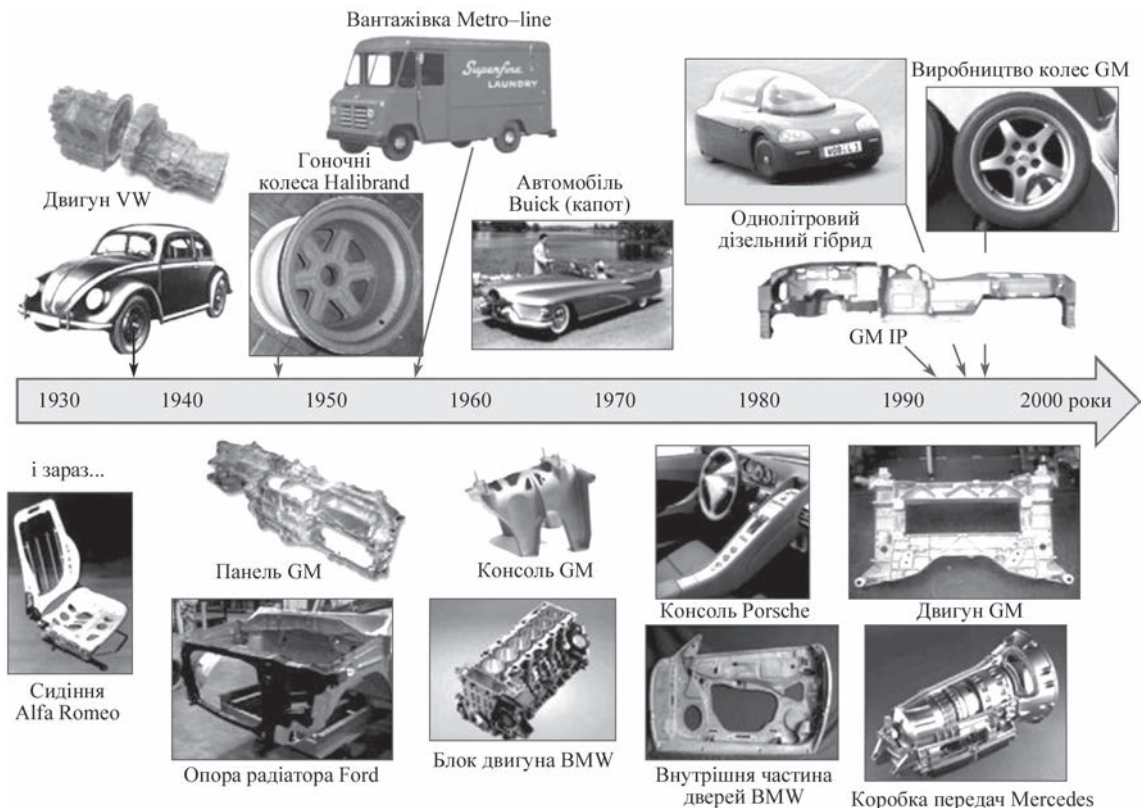


Рис. 9. Ретроспектива використання магнієвих сплавів у автомобільній промисловості

основі: системи Mg–Al (AZ, AM), рідкісноземельних елементів (WE43, E21) і сплавів марки ZK.

Крім того, для застосувань при підвищених температурах розглядається можливість використання високоміцних магнієвих сплавів з нанокompозитами, оскільки вони мають чудову термічну та розмірну стабільність [27]. Однак, окрім литих магнієвих сплавів, інші типи сплавів, наприклад, листовий деформований або екструдований магнієві сплави майже не застосовуються в сучасній автомобільній промисловості.

Магнієві сплави знайшли широке використання в галузі охорони здоров'я та біомедичній промисловості [24]. Магній є природно біосумісним з організмом людини матеріалом. Він підтримує фізіологічні функції в організмі людини, включаючи структурну стабілізацію білків, нуклеїнових кислот, клітинних мембран, а також стимулює специфічні структурні або каталітичні активності білків або ферментів [1]. Крім того, магній не токсичний і не подразнює шкіру, сприяє загоєнню тканин.

Магній також є біорозсмоктуваним і біоактивним матеріалом. У якості імплантатів магнієві сплави мають нижчий модуль пружності, ніж інші аналоги, що є їх перевагою як біоматеріалу. Оскільки модуль пружності магнію ближчий до жорсткості природної кістки при використанні, йому у більшості віддається перевага.

Часто організм потребує лише тимчасової присутності імплантату для підтримки регенерації тканин і відновлення порушених фізичних функцій. Здатність магнію до біологічного розкладання є як його найбільшою перевагою, так і слабкістю. Магній швидко розкладається у фізіологічному середовищі. Така прискорена деградація може поставити під загрозу механічну цілісність і міцність відповідних імплантатів. Також це може призвести до небажаних реакцій та визвати біотоксичність.

Серед недоліків використання магнієвих сплавів є їх слабка корозійна стійкість. В залежності від умов використання у магнієвих сплавах можуть поширюватися різні види корозії: гальванічна, точкова, ниткоподібна, міжкристалітна (IGC), відшарування (EFC), щілинна, корозійне розтріскування під напругою (SCC), корозійна втома (CF) та ерозійно-корозійний знос [5].

Аналіз використаної літератури показав ключові стратегії подолання корозійного руйнування магнієвих сплавів, що складаються з очищення, легування та модифікації поверхні. Ці стратегії використовують принцип уповільнення процесу корозії за рахунок зменшення швидкості накопичення водню та локального підлуження. Незважаючи на значні досягнення у керуванні магнієвою корозією, ця проблема все ще залишається актуальною.

Висновки

1. Доступність магнію та унікальне поєднання властивостей (легка вага, специфічне високе співвідношення міцності до ваги, чудова оброблюваність і здатність до лиття) зробили його дуже привабливим для застосування. Легування магнію іншими елементами (Al, Mn, Zn, Si, Re) або міцними наночастинками дозволяє покращити його наявні властивості, щоб розширити сферу застосувань. Ці фактори дозволили магнію знайти своє місце в аерокосмічній, автомобільній, військовій і атомній промисловостях та медицині.

2. Існуючі проблеми використання магнієвих сплавів (вогнезаймистість, горючість, довговічність, біорозчинність, корозійна стійкість, зварюваність) вирішуються за рахунок його легування, керування його хімічним та структурно-фазовим складом, застосуванням відповідних режимів термомеханічної обробки, використанням зміцнення поверхні.

3. Сучасні способи отримання первинного магнію та його сплавів є достатньо енергоємними та неефективними у виробництві, внаслідок чого поширюються дослідження в галузі адитивного виробництва магнієвих сплавів і використання технологій «зеленої» енергетики. Екологічно безпечний процес переробки магнію та його сплавів також є одним із варіантів отримання необхідної металопродукції.

Список літератури/References

1. Junxiu Chen, Lili Tan, Xiaoming Yu et al. (2018) Mechanical properties of magnesium alloys for medical application. *J. of Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **87**, 68–79.
2. Radha, R., Sreekanth, D. (2017) Insight of magnesium alloys and composites for orthopedic implant applications. *J. of Magnesium and Alloys*, **5(3)**, 286–312.
3. Yan Yang, Xiaoming Xiong, Jing Chen et al. (2021) Research advances in magnesium and magnesium alloys worldwide in 2020. *Ibid.*, **9(3)**, 705–747.
4. Dobrzański, L.A. (2019) The importance of magnesium and its alloys in modern technology and methods of shaping their structure and properties. *Magnesium and its alloys*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 1–28.
5. Song, G.L., Atrens, A. (1999) Corrosion mechanisms of magnesium alloys. *Adv. Eng. Mater.*, **1**, 11–33.
6. Dieringa, H.; Stjohn, D.; Prado, M.T.P.; Kainer, K. (2021) Latest Developments in the field of magnesium alloys and their applications. *Front. Mater.*, **8(July)**, 1–3. DOI: 10.3389/fmats.2021.726297
7. Polmear, I.J. (1994) Magnesium alloys and applications. *Mater. Sci. Technol.*, **10**, 1–16.
8. Tae-Hyuk Lee, Toru H. Okabe, Jin-Young Lee et al. (2021) Development of a novel electrolytic process for producing high-purity magnesium metal from magnesium oxide using a liquid tin cathode. *J. of Magnesium and Alloys*, **9(5)**, 1644–1655.
9. (2001) U.S. Geological Survey. 01-341, Magnesium, Its Alloys and Compounds. <https://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-341/>
10. Gao, F., Nie, Z.-R., Wang, Z.-H. et al. (2008) Assessing environmental impact of magnesium production using pidgeon

- process in China. *Transact. Nonferrous Met. Soc. China*, **18**, 749–754.
11. Durlach, J. (2006) Overview of magnesium research: History and current trends. *New Perspectives in Magnesium Research*. Springer, London, UK, 3–10.
 12. Holywell, G.C. (2005) Magnesium: The first quarter millennium. *JOM*, **57**, 26–33.
 13. Yang Tian, Lipeng Wang, Bin Yang et al. (2022) Comparative evaluation of energy and resource consumption for vacuum carbothermal reduction and Pidgeon process used in magnesium production. *J. of Magnesium and Alloys*, **10(3)**, 697–706.
 14. Hamed Abedini Najafabadi, Nesrin Ozalp, Michael Epstein, Richard Davis (2020) Solar carbothermic reduction of dolomite: direct method for production of magnesium and calcium. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **59(33)**, 14717–14728.
 15. Mendis, C.L., Singh, A. (2013) Magnesium recycling: To the grave and beyond. *JOM*, **65**, 1283–1284.
 16. Karunakaran, R., Orgies, S., Tamayol, A. et al. (2020) Additive manufacturing of magnesium alloys. *Bioact. Mater.*, **5**, 44–54.
 17. Davim, J.P. (2020) *Additive and subtractive manufacturing: Emergent technologies*. De Gruyter, Berlin, Germany.
 18. Kulekci, M.K. (2008) Magnesium and its alloys applications in automotive industry. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **39**, 851–865.
 19. Abbott, T. Casting Technologies, Microstructure and Properties. *Magnesium and its Alloys*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2019, 29–45.
 20. Fujisawa, S., Yonezu, A. (2014) Mechanical property of microstructure in die-cast magnesium alloy evaluated by indentation testing at elevated temperature. *Proc. of Int. Congress on Recent Advances in Structural Integrity Analysis (Apcf/Sif-2014)*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 422–426.
 21. Gupta, M., Wong, W.L.E. (2015) Magnesium-based nanocomposites. *Lightweight materials of the future. Mater. Charact.*, **105**, 30–46.
 22. Moosbrugger, C., Marquard, L. (2017) *Engineering properties of magnesium alloys*. ASM International, Materials Park, OH, USA.
 23. Krishnan K. Sankaran, Rajiv S. Mishra (2017) *Chapt. 7. Magnesium alloys. Metallurgy and design of alloys with hierarchical microstructures*. Elsevier, 345–383.
 24. Jeal, N. (2005) High-performance magnesium. *Advanced Materials & Processes*, **9**, 65–67.
 25. Tekumalla, S., Gupta, M. (2020) Introductory chapter: An insight into fascinating potential of magnesium. In: *Magnesium — the wonder element for engineering/biomedical applications*. IntechOpen, London, UK.
 26. Luthringer, B.J.C., Feyerabend, F., Willumeit-Römer, R. (2014) Magnesium-based implants: A mini-review. *Magnesium Res.*, **27**, 142–154.
 27. Zeng, R.-C., Yin, Z.-Z., Chen, X.-B., Xu, D.-K. (2018) Corrosion types of magnesium alloys. *Magnesium Alloys — Selected Issue*. IntechOpen, London, UK.

PRODUCTION, PROPERTIES AND PROSPECTS OF APPLICATION OF MODERN MAGNESIUM ALLOYS

V.A. Kostin, Yu.V. Falchenko, A.L. Puzrin, A.O. Makhnenko
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: valerykkos@gmail.com

A literature review of the current state of magnesium alloy production technology is given, alloy properties and the influence of alloying elements on them are analyzed, microstructure and the main phases forming in the cast and wrought magnesium alloys are determined, a classification of modern magnesium alloys of foreign production is presented, further paths of their development are outlined, and problems in magnesium alloy application are defined. Magnesium alloying by other elements (Al, Mn, Zn, Si, Re, etc.) or strong nanoparticles allows significant improvement of its existing properties so as to expand its scope of application. Current problems in magnesium alloy application (flammability, combustibility, surface durability, biosolubility, corrosion resistance, weldability) are solved by alloying, controlling the chemical and structural-phase composition, application of the respective modes of thermomechanical treatment and surface hardening. Ref. 27, Tabl. 2, Fig. 9.

Key words: electrolysis, metal-ceramic restoration; Bunsen and Pidgeon processes; cast and wrought magnesium alloys; corrosion; biocompatibility; biodegradation

Надійшла до редакції 26.09.2022

XXII Міжнародна науково-технічна конференція
«ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ»
Присвячена 125-річчю Київського політехнічного інституту
16–17 травня 2023 р., м. Київ, Україна

Приладобудівний факультет КПІ ім. Ігоря Сікорського
03056, м. Київ, пр. Берестейський, 37, корп. 1,
<http://conferences.uran.ua>, <http://conferencepb.kpi.ua/conferencepb2023>

