



ПОШИВАЛОВ
Володимир Павлович —
доктор технічних наук,
заступник директора з наукової
роботи Інституту технічної
механіки НАН України і ДКА
України

КЕРУВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХНІХ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ВИКОРИСТАННЯ У КОНСТРУКЦІЯХ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Стенограма доповіді на засіданні
Президії НАН України 20 вересня 2023 року

У доповіді розглянуто отримані в Інституті технічної механіки НАН України і ДКА України результати наукових досліджень з розроблення нових методів та підходів до поліпшення фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів, зокрема міцнісних властивостей алюмінієвих сплавів, спрямованих на використання їх у захисних конструкціях спеціального призначення.

Шановні члени Президії!

Шановні колеги!

Дослідження, спрямовані на керування фізико-механічними властивостями алюмінієвих сплавів з метою підвищення їхніх міцнісних характеристик для використання у конструкціях спеціального призначення, є сьогодні важливим та актуальним завданням.

Як відомо, під час воєнних дій бойові броньовані машини можуть зазнавати впливу різноманітних засобів ураження. Одними з найнебезпечніших серед них є підриви на мінно-вибухових пристроях фугасної дії, що можуть мати різні конструкції і різну потужність. Для збереження боєздатності екіпажу й техніки зазвичай застосовують комплекс активних і пасивних засобів захисту, найбільш дієвим з яких вважається використання захисного протимінного екрана. До матеріалів, з яких виготовляють сучасні захисні протимінні екрани, висувають низку вимог, зокрема це — висока пластичність, висока ударна в'язкість, відносно знижена границя текучості при збереженні максимально можливої границі міцності.

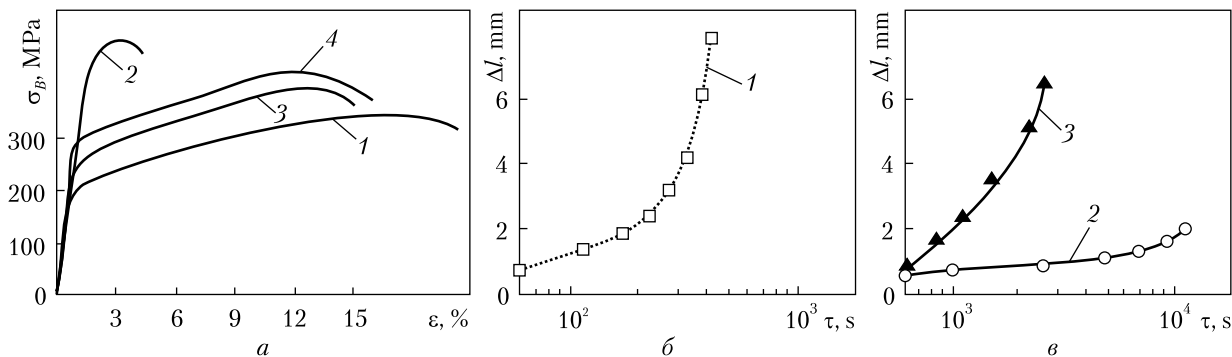


Рис. 1. Діаграми руйнування (а) та криві повзучості (б, в) зразків сплаву АМг6М: 1 – контрольний зразок; 2 – після випробувань за схемою I; 3 – після випробувань за схемою II; 4 – контрольний зразок зі сплаву 01570

Таблиця 1. Порівняння характеристик міцності сплавів АМг6М і 01570

Матеріал	Режим обробки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	W, МДж/м ³	Відносне видовження δ , %	τ , 60 ⁻¹ с	τ_1/τ_0
АМг6М	Контрольний зразок без обробки	167,0	333,0	68,2	20	8	-
	Схема I	440,0	483,0	17,2	4	240	30
	Схема II	250,0	378,0	48,9	14	64	8
01570	Контрольний зразок без обробки	310,0	410,0	57,3	16	—	—

Алюмінієві сплави, особливо сплави системи Al-Mg (5083, 5456, АМг6), значною мірою задовольняють більшість вимог до захисних протимінних екранів, але навіть їхніх досить високих параметрів пластичності та ударної в'язкості недостатньо, щоб ефективно поглинати енергію вибуху. Тому в наших дослідженнях ми поставили собі за мету підвищити фізико-механічні характеристики алюмінієво-магнієвих сплавів АМг6М та АМг6 з позиції синергетичного підходу з використанням проміжної комбінованої енергетичної обробки.

Отже, ми брали зразки деформівного сплаву АМг6М, піддавали їх попередній енергетичній обробці і тестували на установці для термо-механічних випробувань ИМАШ-20-78, оснащеної приладами для забезпечення контролю та автоматичного підтримання режимів навантаження й нагрівання. Попередньо зразки витримували в умовах повзучості впродовж приблизно половини часу до руйнування, а потім здійснювали проміжну енергетичну обробку за

такою загальною схемою: електростимульований нагрів до температури 160 °С; одновісний розтяг у режимі повзучості з подальшою витримкою впродовж приблизно половини часу до руйнування; стискувальне навантаження за температури 300 °С; відпал за T = 320 °С. Вплив ударними ультразвуковими коливаннями здійснювали за допомогою генератора ударного ультразвуку.

Проміжну пластичну деформацію під час випробувань на повзучість забезпечували за двома схемами: *схема I* – на зразки, які витримували впродовж приблизно половини часу до руйнування, після розвантаження і охолодження впливали високотемпературним стискальним навантаженням, а потім здійснювали ударну ультразвукову обробку, після чого зразки знову виводили на режим повзучості до руйнування; *схема II* – після високотемпературного стискального навантаження зразки відпалювали за температури 320 °С впродовж 2 годин і далі на них впливали ударними висо-

кочастотними коливаннями, а потім доводили до руйнування в режимі повзучості.

Аналіз результатів випробувань зразків у вихідному стані та після енергетичної обробки засвідчив, що проміжна пластична деформація за умов повзучості підвищує характеристики короткочасної міцності і час до руйнування сплаву АМг6М (рис. 1). Під час випробувань за першою схемою істотно збільшується час до руйнування за повзучості, однак при цьому різко знижується пластичність матеріалу. Відпалювання зразків за другою схемою дає змогу підвищити час до руйнування сплаву за відносного збереження пластичності.

Для порівняння в табл. 1 наведено характеристики міцності сплаву 01570, який є алюмінієвим сплавом на основі системи Al–Mg, легованим скандієм. Цей сплав містить приблизно 6 % Mg і в металургійному виробництві за технологічними властивостями близький до сплаву АМг6М. На сьогодні сплав 01570 є найміцнішим зварювальним сплавом серед алюмінієвих сплавів, що термічно не зміцнюються. Однак він належить до дорогих сплавів, що обмежує його широке використання.

Як бачимо з рис. 2, в інтервалі температур від 20 до 100 °С границя міцності σ_B становить ~493 МПа. Починаючи з $T = 100$ °С σ_B помітно зменшується. За температури відпалу $T = 400$ °С і вище крива міцності, як і криві текучості та питомої роботи руйнування, виходить на горизонтальну асимптоту. Однак за температур 400–450 °С міцність зразків не відновлюється до вихідного рівня (333 МПа), а залишається на межі 363 МПа. Зміцнення сплаву АМг6М в разі обробки його стискальним навантаженням на 81 % зумовлене зміною щільності дислокацій і лише на 19 % – ефектом заліковування.

Для підвищення ударної в'язкості алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6 ми запропонували застосувати метод високошвидкісного охолодження після високотемпературної витримки. Нагрівання здійснювали в діапазоні температур 350–450 °С, а охолодження – в діапазоні від кімнатної температури до –56 °С. Глибоке охолодження до –56 °С забезпечували з вико-

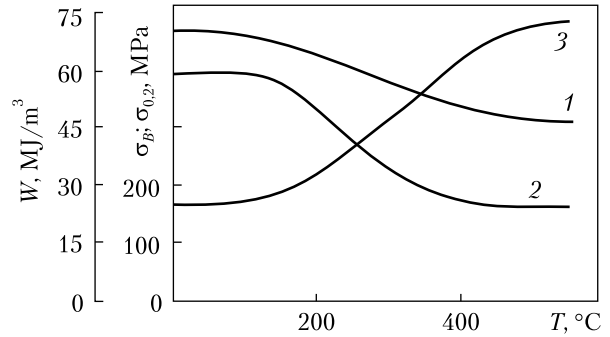


Рис. 2. Залежність границі міцності (1), текучості (2) і роботи руйнування (3) від температури відпалу зразків сплаву АМг6М після високотемпературного стискального навантаження

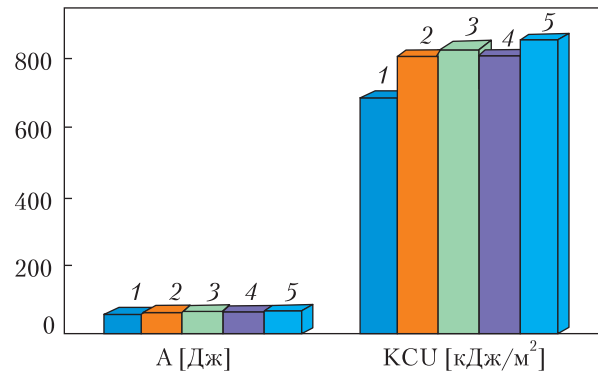


Рис. 3. Результати випробувань на ударну в'язкість зразків сплаву АМг6: 1 – контрольні зразки; 2 – нагрівання до 350 °С, охолодження у воді; 3 – нагрівання до 450 °С, охолодження у воді; 4 – нагрівання до 350 °С, охолодження за $T = -56$ °С; 5 – нагрівання до 450 °С, охолодження за $T = -56$ °С

ристанням твердого діоксиду вуглецю. Після досягнення заданої температури зразка –56 °С його вивантажували на повітря і поступово природним чином прогрівали до кімнатної температури.

Результати випробувань на ударну в'язкість зразків, оброблених за різними схемами, наведено на рис. 3.

Обробка матеріалу за схемою 1 (нагрівання зразка в печі до температури 350 °С та охолодження у воді до кімнатної температури) і схе-

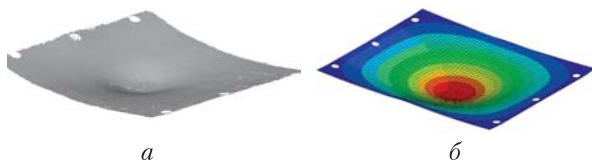


Рис. 4. Порівняння прогинів відсканованого на 3D-сканері макета захисного протимінного екрана після вибухотехнічних випробувань (а) та результатів чисельного моделювання (б)

мою 3 (нагрівання зразка в печі до температури 350 °С та охолодження за температури –56 °С) забезпечує збільшення роботи до руйнування на 16 % (65 Дж) порівняно з контрольним зразком; обробка за схемою 2 (нагрівання зразка в печі до температури 450 °С та охолодження у воді кімнатної температури) приводить до збільшення роботи до руйнування на 19 % (67 Дж); обробка за схемою 4 (нагрівання зразка в печі до температури 450 °С та охолодження за температури –56 °С) зумовлює збільшення роботи до руйнування на 22 % (68 Дж). При цьому значення показника ударної в'язкості КСУ також збільшилися в середньому на 19 %.

Проведені експериментальні дослідження сплаву АМг6 показали, що всі види термообробки підвищують питому роботу руйнування і практично не змінюють межу міцності. Найкращі результати щодо питомої роботи до руйнування отримано з використанням схеми обробки, коли нагрівання зразка здійснюється до температури 450 °С з наступним охолодженням до –56 °С.

Для того щоб перевірити придатність розроблених нами способів і режимів термічної обробки сплаву АМг6 для виготовлення несучих деталей захисних протимінних екранів, у Центральному науково-дослідному інституті озброєння та військової техніки Збройних сил України було проведено вибухотехнічні випробування.

Випробування захисних протимінних екранів проводили на макеті корпусу бойової броньованої машини, виготовленому з броньової сталі товщиною 16 мм. На першому етапі здійснено оцінку прискорення макета корпусу із

захисним протимінним екраном, що не деформується (пластина броньової сталі товщиною 10 мм і масою 10,7 кг).

Для чисельного моделювання було створено скінченноеlementну модель макета корпусу броньованої машини і з її використанням проведено дослідження впливу параметрів вибухового навантаження на прискорення корпусу макета.

Порівняння прогинів, отриманих за допомогою чисельного моделювання та в натурному експерименті, здійснювали з використанням 3D-сканера в науково-випробувальній лабораторії зброї та спеціальних захисних матеріалів Національного університету оборони України. Зразки захисних протимінних екранів після натурних випробувань було відскановано та виміряно значення прогинів у контрольних точках. Відповідні результати наведено на рис. 4.

Отримані значення швидкості та прискорення макета із жорстким захисним протимінним екраном при чисельному моделюванні та в натурному експерименті мали відносну похибку, не більшу за 5,0 %.

Дані щодо швидкості, прискорення та прогинів у центрі пластини, отримані на макеті в разі застосування пластичного захисного протимінного екрана, наведено на рис. 5. Значення відносної похибки між результатами чисельного моделювання і натурного експерименту становлять: для прискорень макета – 4%; для прогинів у центрі пластини – 7 %.

Зведені дані щодо значень прискорень у центрі макета наведено в табл. 2.

Висновки. В Інституті технічної механіки НАН України і ДКА України запропоновано спосіб енергетичної обробки сплаву АМг6М в умовах повзучості, який дає змогу істотно підвищити час до руйнування. Встановлено, що енергетична обробка сплаву АМг6М за схемою II за міцнісними властивостями наближає його до найкращого і водночас найдорожчого в системі Al–Mg сплаву 01570, легованого скандієм.

Проведені експериментальні дослідження сплаву АМг6 показали, що всі види термо-

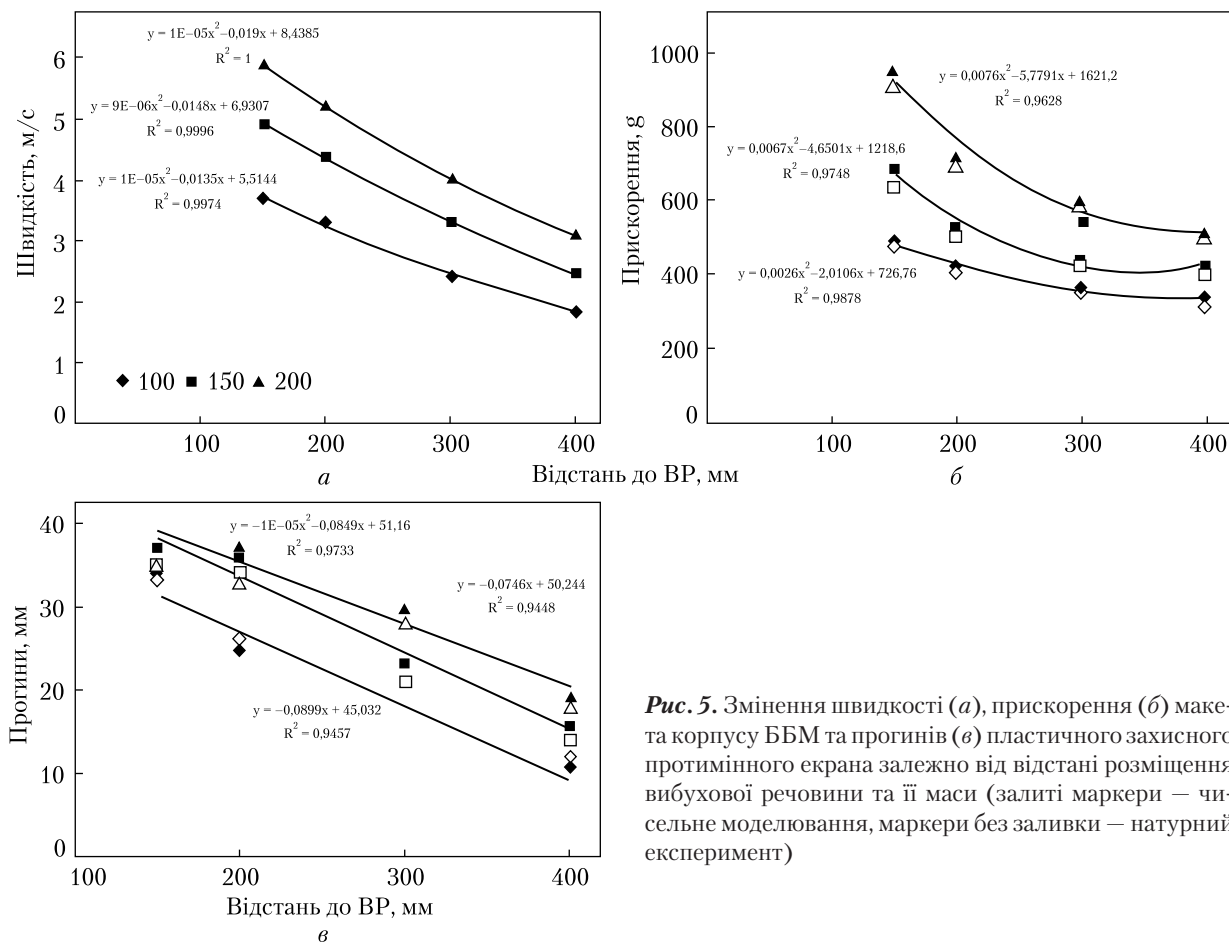


Рис. 5. Змінення швидкості (а), прискорення (б) макета корпусу ББМ та прогинів (в) пластичного захисного протимінного екрана залежно від відстані розміщення вибухової речовини та її маси (заліті маркери — чисельне моделювання, маркери без заливки — натурний експеримент)

Таблиця 2. Зведені дані щодо значень прискорення в центрі макета корпусу (відбивна поверхня під сталеву плиту — бетон)

Матеріал	Маса вибухової речовини, кг	Висота, мм	Товщина екрана, мм	Прискорення, g
Броньова сталь	0,050	150	10	2970,7
Броньова сталь	0,200	400	10	4644,7
Броньова сталь	0,100	150	10	5120,9
Броньова сталь	0,100	150	10	3598,9
Броньова сталь	0,100	150	10	3759,4
АМг6, відпалений	0,100	150	7	156,3
АМг6, прискорено охолоджений	0,100	150	7	214,8
АМг6НПП, нагартований по поверхні	0,100	150	7	205,6

обробки підвищують питому роботу руйнування і практично не змінюють межу міцності. Найкращі результати отримано для схеми обробки, за якою нагрівання зразка здійснювалося до температури 450 °С з наступним охолодженням до –56 °С.

Результати вибухотехнічних випробувань показали, що найвищі показники поглинання енергії вибуху спостерігаються в разі відпалю-

вання деталей зі сплавів системи Al–Mg, зокрема сплаву АМг6. При цьому будь-який із запропонованих захисних протимінних екранів з алюмінієвого сплаву АМг6 забезпечує в 20–25 разів вищі показники поглинання енергії вибуху порівняно із захисними протимінними екранами з броньової сталі.

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

Volodymyr P. Poshyvalov

*Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine
and State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4782-5942>

CONTROL OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES
OF ALUMINUM ALLOYS TO IMPROVE THEIR STRENGTH CHARACTERISTICS
AND USE IN SPECIAL-PURPOSE STRUCTURES

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, September 20, 2023

The report reveals the results of scientific research, which are obtained at the Institute of Technical Mechanics of the NAS of Ukraine and the SSA of Ukraine, on the development of new methods and approaches to improving the physical and mechanical characteristics of structural materials, in particular the strength properties of aluminum alloys, with the aim of using them in special-purpose protective structures.

Cite this article: Poshyvalov V.P. Control of physical and mechanical properties of aluminum alloys to improve their strength characteristics and use in special-purpose structures. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. (11): 87–92. <https://doi.org/10.15407/visn2023.11.087>