УДК 620.1 https://doi.org/10.15407/itm2019.04.119

В. П. ПОШИВАЛОВ, А. І. КУЗМИЦЬКА, І. І. ТЕЛЕГІНА

ПОЛІПШЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВІВ СИСТЕМИ Al-Mg ДЛЯ КОНСТРУКТИВНОГО ЗАХИСТУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: vposhivalov@gmail.com

Досліджено фізико-механічні властивості сплавів системи Al-Mg, які використовуються в ударопоглинаючих елементах конструкції транспортного засобу. Відповідно до ГОСТ 1497-84 в результаті експериментальних досліджень на зразках зі сплаву АМг6 були визначені його гранично досяжні за допомогою нагрівання та прискореного охолодження механічні характеристики. Для визначення фізико-механічних характеристик великогабаритних елементів протиударних конструкцій з цього сплаву, а також відпрацювання промислових технологічних процесів термічної обробки використовувалися зразки з розмірами 300 мм ×250 мм × 30 мм. Нагрівання здійснювалося в електричних печах типу СНО з повітряною атмосферою, охолодження – в гартувальних баках. Зразки завантажувалися у холодну піч. Температура у робочому просторі печі доводилася до розрахункової, температура зразків контролювалася хромель-копелевими термопарами. Витримка при розрахунковій температурі 450 °С тривала 90 хвилин. В якості охолоджуючого середовища використовувалася проточна вода з температурою від 6 °С до 25 °С та непроточна кипляча вода 100 °С.

Результати випробувань показали, що така обробка приводить до зростання значення ударної в'язкості в поперечному напрямку на (8 – 10) % та зменшення в повздовжньому напрямку на (2 – 4) % після прискореного охолодження у порівнянні з відпаленим матеріалом. Показано, що прискорене охолодження з температури 450 °С до кімнатної температури алюмінієвих сплавів системи Al-Mg дозволяє збільшити розрахункове значення їхньої ударної в'язкості на (10 – 15) % та відносне видовження з одночасним зменшенням межі плинності на (18 – 23) % та збереженням значення межі міцності. Після нагрівання до 80 °С і охолодження на повітрі у прискорено охолоджених зразків ударна в'язкість зменшується на 5 %, але все одно перевершує її значення у відпалених і підданих аналогічному нагріванню відпалених зразків на 12 %.

Ключові слова: *сплав системи Al-Mg, фізико-механічні властивості матеріалу, нагрівання, охолодження, відпал, протиударні конструкції.*

Исследованы физико-механические свойства сплавов системы Al-Mg, которые используются в ударопоглощающих элементах конструкции транспортного средства. Согласно ГОСТ 1497-84 в результате экспериментальных исследований на образцах из сплава АМг6 были определены его предельно достижимые с помощью нагрева и ускоренного охлаждения механические характеристики. Для определения физико-механических характеристик крупногабаритных элементов противоударных конструкций из этого сплава, а также отработки промышленных технологических процессов термической обработки использовались образцы с размерами 300 мм × 250 мм × 30 мм. Нагрев осуществлялся в электрических печах типа СНВ с воздушной атмосферой, охлаждение – в закаливающих баках. Образцы загружались в холодную печь. Температура в рабочем пространстве печи доводилась до расчетной, температура образцов контролировалась хромель-копелевыми термопарами. Выдержка при расчетной температуре 450 °С длилась 90 минут. В качестве охлаждающей среды использовалась проточная вода с температурой от 6 ° до 25 °С и непроточная кипящая вода 100 °С.

Результаты испытаний показали, что такая обработка приводит к росту значения ударной вязкости в поперечном направлении на (8 – 10) % и уменьшению в продольном направлении на (2 – 4) % после ускоренного охлаждения по сравнению с отожженным материалом. Показано, что ускоренное охлаждение от температуры 450 °С до комнатной температуры алюминиевых сплавов системы Al-Mg позволяет увеличить расчетное значение их ударной вязкости на (10 – 15) % и относительное удлинение с одновременным уменьшением предела текучести на (18 – 23) % и сохранением значения предела прочности. После нагревания до 80 °С и охлаждения на воздухе в ускоренно охлажденных образцах ударная вязкость уменьшается на 5 %, но все равно превосходит ее значение в отожженных и подлежащих аналогичном нагреву отожженных образцов на 12 %.

Ключевые слова: *сплав системы Al-Mg, физико-механические свойства материала, нагревание, охлаждение, отжиг, противоударные конструкции*.

The physical and mechanical properties of Al-Mg alloys employed in shock-absorbing structural components of vehicles were studied. Specimens of AMg6 alloy were studied experimentally according to Standard GOST 1497-84 to determine its ultimate mechanical characteristics attainable by heating and accelerated cooling. To determine the physical and mechanical characteristics of large-size components of shock-proof structures made of this alloy and to develop industrial heat treatment processes, 300 mm × 250 mm × 30 mm specimens

were used. The specimens were heated in air-filled SNV electric furnaces and cooled in hardening tanks. The specimens were loaded into a cold furnace. The furnace laboratory temperature was brought to a specified one, and the specimen temperature was measured with chromel-copel thermocouples. The specimens were hold at a specified temperature of 450 °C for 90 minutes. The cooling medium was 6 °C to 25 °C running water and 100 °C still boiling water.

The test results showed that this treatment increases the lateral impact strength by (8 – 10) % and reduces the longitudinal impact strength by (2 – 4) % on accelerated cooling in comparison with an annealed alloy. It was shown that accelerated cooling of Al-Mg alloys from 450 °C to a room temperature increases their impact strength by (10 – 15) % and their unit elongation while reducing their yield point by (18 – 23) % and keeping their ultimate strength intact. On heating to 80 °C and air cooling, the impact strength of specimens treated by the accelerated cooling, while decreasing by 5 %, is 12 % higher than the impact strength of annealed specimens and annealed specimens heated as indicated above.

Keywords: *Al-Mg alloy, physical and mechanical properties of a material, heating, cooling, annealing, shockproof structures.*

Вступ. Для сучасних транспортних засобів, таких як автомобілі, локомотиви і вагони швидкісних поїздів, літаки і вертольоти, актуальним є захист від ударної дії в аварійних ситуаціях [1]. Ударна дія є одним з різновидів ударно-хвильової дії. В цілому, ударно-хвильова дія може бути таких видів:

– удар двох твердих тіл сумірної маси, розміру і швидкості;

– удар твердого тіла з нерухомою перешкодою;

– зіткнення високошвидкісного пенетратора з умовно нерухомою перешкодою;

– вплив фронту підвищеного тиску пружного середовища (ударна або вибухова хвиля) на умовно нерухому перешкоду або на рухоме тверде тіло [2].

Для транспортних засобів основне значення мають перші два види ударно-хвильової дії. Третій і четвертий види в основному розглядаються при проектуванні озброєння і військової техніки. Забезпечити безпеку водія і пасажирів, а також стійкість транспортного засобу до ударно-хвильової дії можливо такими способами:

– поглинання енергії удару за рахунок пластичної деформації основних або спеціально призначених для цього елементів конструкції;

– розсіювання енергії удару за рахунок пружної деформації елементів конструкцій;

– руйнування пенетратора або перешкоди [2].

Крім того, заходи із забезпечення безпеки водія та пасажирів при ударно-хвильовій дії на транспортний засіб можливо розділити на такі групи:

– заходи із забезпечення цілісності корпусу транспортного засобу;

– заходи для зменшення навантажень на пасажирів та екіпаж;

– заходи зі забезпечення цілісності корпусу та зменшення навантажень на пасажирів та екіпаж.

Руйнування перешкоди або пенетратора можливе лише за умов бронювання корпусу, що притаманне військовій техніці, а для цивільних транспортних засобів є нераціональним через значне зниження ефективності використання за основним призначенням.

В сучасних транспортних засобах для індивідуального захисту водія і пасажирів широко застосовуються різноманітні поглинаючі елементи, які дозволяють розсіювати енергію удару за рахунок пружної деформації.

Для захисту військової та спеціальної техніки від ударної (вибухової) дії при підриві на мінно-вибуховому пристрої використовуються пружні протимінні екрани [3]. Поглинання енергії удару також може здійснюватися за

рахунок пластичної деформації спеціально для цього призначених елементів конструкції [1].

Слід зазначити, що для цивільних транспортних засобів будь-яка ударно-хвильова дія є аварійними умовами експлуатації, а для військової техніки така дія є штатними умовами. Відповідно, захист від ударно-хвильової дії для цивільного транспортного засобу може бути одноразовим, що набагато легше забезпечити технічно.

Для сучасних транспортних засобів, таких як швидкісні поїзди, дуже важливим є розгінні характеристики. Виходячи з цього, вагони і локомотиви таких поїздів виготовляються з широким застосуванням алюмінієвих та титанових сплавів, а також композиційних матеріалів. Відповідно, елементи протиударного захисту повинні бути якомога легшими. Найбільш доцільно використовувати для їх виготовлення алюмінієві сплави.

Мета роботи. Метою даної роботи є:

– вибір алюмінієвих сплавів, найбільш придатних для виготовлення елементів протиударного захисту;

– розробка способів підвищення фізико-механічних характеристик алюмінієвих сплавів, що забезпечують ефективне спрацювання протиударного захисту в разі необхідності.

Основний матеріал дослідження. Фізико-механічні властивості матеріалу ударопоглинаючого елемента конструкції повинні забезпечити такі характеристики:

– необхідну конструкційну міцність за умов повсякденної штатної експлуатації – достатню для штатної експлуатації величину границі плинності;

– мінімальний проміжок часу від удару до початку деформації конструктивного елемента – мінімальне можливе значення границі плинності;

– максимально можливу пластичність – відносне видовження та звуження;

– максимальну роботу руйнування – максимально можливі значення границі міцності та ударної в’язкості.

Серед алюмінієвих сплавів найбільш пластичними є сплави системи Al-Mg. Ці сплави мають максимальну пластичність після відпалу.

У таблиці 1 наведено фізико-механічні характеристики сплавів системи Al-Mg [4]. Тут σ_B – границя міцності, $\sigma_{0,2}$ – границя плинності, δ – відносне подовження, НВ – твердість, σ_{-1} – границя втоми, для АМг3М, АМг5М границі втоми відсутні.

Таблиця 1 – Фізико-механічні характеристики сплавів системи Al-Mg

Сплав	Обробка	σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	НВ	σ_{-1}, МПа
АМг2М	Відпал	200	100	23	45	110
АМг3М		220	110	20	50	–
АМг5М		300	150		65	–
АМг6М		350	170		70	130

З даних, наведених у таблиці 1, видно, що у відпаленому стані зі зменшенням вмісту магнію у складі сплаву зростають пластичність та ударна в’язкість, але разом з цим зменшуються межі міцності і плинності. Відповід-

но, необхідно проводити таку обробку деталей або заготовок зі сплавів системи Al-Mg, яка б забезпечила збільшення пластичності й ударної в'язкості з одночасним зменшенням границі плинності, але без зменшення границі міцності. Найбільш поширеним способом зміни фізико-механічних характеристик металевих матеріалів є термічна обробка.

Сплави системи Al-Mg відносяться до термічно незміцнюваних алюмінієвих сплавів [4]. Причиною є виділення інтерметалідів по границях зерен в разі нагрівання до (340 – 400) °С та повільного охолодження. Результатом такого перерозподілу інтерметалідів є окрихчування заготовок, напівфабрикатів, деталей. Ключовим етапом у цьому явищі є повільне охолодження.

В [5], [6] було показано, що після нагрівання до 450 °С, часової витримки, тривалість якої залежить від товщини зразка, та прискореного охолодження у воді або у низькотемпературному середовищі (етиловий спирт плюс сухий лід), суттєво збільшується ударна в'язкість зразків зі сплаву АМг6, незначним чином зростає пластичність (відносне видовження та звуження), зменшується межа плинності та практично незмінною залишається границя міцності.

В ході попередніх досліджень спочатку виготовлялися зразки, які потім піддавалися термічній обробці та випробовувалися з метою визначення фізико-механічних характеристик відповідно до ГОСТ 1497-84. Таким чином були визначені гранично досяжні за допомогою нагрівання та прискореного охолодження механічні характеристики сплаву АМг6. Проте у протиударних конструкціях використовуються елементи з різними розмірами. Для визначення фізико-механічних характеристик великогабаритних елементів протиударних конструкцій, а також відпрацювання промислових технологічних процесів термічної обробки використовувалися зразки з розмірами 300 мм ×250 мм × 30 мм зі сплаву АМг6.

Нагрівання здійснювалося в електричних печах типу СНО з повітряною атмосферою, охолодження – в гартувальних баках. Зразки завантажувалися у холодну піч. Температура у робочому просторі печі доводилася до розрахункової, температура зразків контролювалася хромель-копелевими термопарами. Витримка за розрахункової температури 450 °С тривала 90 хвилин. В якості охолоджуючого середовища використовувалася проточна вода з температурою від 6 °С до 25 °С та непроточна кипляча вода 100 °С.

Після пробних робіт від використання низькотемпературного охолоджуючого середовища відмовилися через високу токсичність, пожежну небезпеку та високу ціну. Наступні експерименти показали, що охолодження у воді з температурою від 6 °С до 25 °С та 100 °С дає аналогічні результати.

Випробування проводилися за трьома схемами.

Схема 1 – простий відпал зразків.

Схема 2 – відпал зразків, подальше їх нагрівання до 450 °С, часова витримка при цій температурі і остаточне охолодження у воді кімнатної температури (6 – 25) °С.

Схема 3 – відпал зразків, подальше нагрівання до 450 °С, часова витримка при цій температурі, охолодження у киплячій воді від 100 °С до кімнатної температури.

Результати випробувань наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Фізико-механічні характеристики зразків сплаву АМг6 після термічної обробки

№	№ серії	№ зразка	Напрям вирізання зразка	Механічні властивості			Ударна в'язкість, МДж/м^2	Твердість, НВ
				σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Схема 1	1	0	350	165	22,2	–	84,9
		2			160	21,2		
		3			160	20,2		
		1		–	–	–	0,540	
		2					0,490	
		3					0,510	
		Середнє		**350**	**162**	**21,2**	**0,513**	
		1	1	345	155	21,8	–	
		2		350	160	22,2		
		3		355	160	21,8		
		1		–	–	–	0,790	
		2					0,710	
		3					0,760	
		Середнє		**350**	**158**	**21,93**	**0,753**	
	Схема 2	1	0	345	155	23,4	–	
		2		350		22,0		
		3		350		23,0		
		1		–	–	–	0,600	
		2					0,550	
		3					0,540	
		Середнє		**348**	**155**	**22,8**	**0,563**	
		1	1	350	150	21,4	–	
		2			155	24,6		
		3			155	20,4		
		1		–	–	–	0,710	
		2					0,750	
		3					0,760	
		Середнє		**350**	**153**	**22,1**	**0,740**	
	Схема 3	1	0	350	155	23,2	–	
		2		350	160	20,2		
		3		345	155	21,8		
		1		–	–	–	0,530	
		2					0,530	
		3					0,500	
		Середнє		**348**	**156**	**21,73**	**0,520**	
		1	1	355	155	24,0	–	
		2		350		23,2		
		3		355		23,6		
		1		–	–	–	0,710	
		2					0,710	
		3					0,740	
		Середнє		**353**	**155**	**23,6**	**0,720**	

Результати випробувань свідчать про зростання значення ударної в'язкості в поперечному напрямку на (8 – 10) % та зменшення в повздовжньому напрямку на (2 – 4) % після прискореного охолодження у порівнянні з відпаленим матеріалом.

Саме мінімальне значення ударної в'язкості і буде розрахунковим при проектуванні конструкції, особливо складної форми.

Як видно з таблиці 2, при обробці зразків за схемами 2 – 3 відбувається зменшення різниці між ударною в'язкістю у поздовжньому (напрям прокатування) і поперечному напрямі. Відносне видовження зростає на (0,2 – 0,5) %, границя плинності зменшується на (10 – 15) %, а границя міцності залишається майже незмінною.

В процесі експлуатації ударопоглинаючі конструкції піддаються дії низьких та високих температур. За температури нижче 0 °С відбувається зворотне зниження пластичних та деяке збільшення властивостей міцності матеріалу. Слід зазначити, що за температури повітря нижче 0 °С температура елемента конструкції не може бути нижчою за температуру повітря. В разі дії підвищених температур від 30 °С до 50 °С температура металевих деталей може сягати (70 – 80) °С, чого достатньо для незворотної зміни властивостей матеріалу і деталі з нього. Для виявлення ступеня зміни властивостей матеріалу ударопоглинаючих елементів були проведені додаткові дослідження, в ході яких зразки, що попередньо оброблялися за схемами 1 – 3, знову піддавали нагріванню до (80 ± 10) °С. Зразки завантажували у холодну піч типу СНО, нагрівали разом з нею, після досягнення розрахункової температури давали часову витримку тривалістю 90 хвилин, вивантажували з печі і охолоджували на повітрі. Температура зразків контролювалася термопарами. Результати випробувань наведено у таблиці 3.

Таблиця 3 – Фізико-механічні властивості зразків зі сплаву АМг6 після відпалу, нагрівання, прискореного охолодження та наступного нагрівання до 80 °С

№	№ серії	№ зразка	Напрям вирізання зразка	Механічні властивості			Ударна в'язкість, МДж/м^2	Твердість, НВ
				$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Схема 1	1	0	355	170	20,0	–	80,4
		2		360		20,6		
		3		360		23,0		
		1		–	–	–	0,350	
		2					0,360	
		3					0,360	
		Середнє		**358**	**170**	**21,2**	**0,356**	
		1	1	360	170	21,5	–	
		2			165	21,8		
		3			170	23,6		
		1		–	–	–	0,530	
		2					0,510	
		3					0,510	
		Середнє		**360**	**168**	**22,3**	**0,516**	

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Схема 2	1	0	355	165	23,5	–	80,4
		2		355		22,2		
		3		360		24,0		
		1		–	–	–	0,380	
		2					0,400	
		3					0,380	
		Середнє		**356**	**165**	**23,2**	**0,386**	
		1	1	350	160	21,6		
		2				21,8		
		3				21,0		
		1		–	–	–	0,510	
		2					0,510	
		3					0,530	
		Середнє		**350**	**160**	**21,4**	**0,516**	
	Схема 3	1	0	355	160	22,6	–	
		2				22,0		
		3				21,6		
		1		–	–	–	0,400	
		2					0,410	
		3					0,400	
		Середнє		**351**	**160**	**22,0**	**0,403**	
		1	1	355	160	23,2	–	
		2				23,6		
		3				21,8		
		1		–	–	–	0,530	
		2					0,500	
		3					0,530	
		Середнє		**355**	**160**	**22,8**	**0,520**	

Як видно з таблиці 3, результати випробувань свідчать про те, що більші значення ударної в’язкості після дії температури 80 °С зберігають зразки зі сплаву АМг6, охолоджені у воді з температурою 100 °С. Ударна в’язкість прискорено охолодженого металу зменшується, але все одно перевищує значення для відпаленого металу в середньому на (5 – 11) %.

Висновки. Прискорене охолодження з температури 450 °С до кімнатної температури алюмінієвих сплавів системи Al-Mg дозволяє збільшити розрахункове значення їхньої ударної в’язкості на (10 – 15) % та відносне видовження з одночасним зменшенням межі плинності на (18 – 23) % та збереженням значення межі міцності.

Після нагрівання до 80 °С і охолодження на повітрі у прискорено охолоджених зразків ударна в’язкість зменшується на 5 %, але все одно перевершує її значення у відпалених і підданих аналогічному нагріванню відпалених зразків на 12 %.

Проведені випробування дозволяють перейти від робіт із забезпечення властивостей матеріалу до проектування ударопоглинаючих конструкцій з нього.

Дослідження виконані за рахунок фінансування по бюджетній програмі "Підтримка розвитку пріоритетних напрямків наукових досліджень (КПКВК 6541230).

1. *Богомаз Г. И., Гудрамович В. С., Соболевская М. Б., Сирота С. А., Хрущ И. К., Горобец Д. В., Демешко М. Ф.* Экспериментальная отработка жертвенных элементов для защиты пассажирских вагонов в аварийной ситуации. Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка. 2007. Т. 2. Вип. 11. С. 19–28.
2. *Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортов В. Е.* Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: «Янус-К», 1996. 408 с.
3. *Бісик С. П.* Дослідження конструкції захисного протимінного екрана // Військово-технічний збірник / Академія сухопутних військ ім. П. Сагайдачного. 2015. № 12. С. 110–117.
4. *Богуслаев В. А., Качан А. Я., Калинина Н. Е. и др.* Авиационно-космические материалы и технологии: справочник. Запорожье: Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2009. 351 с.
5. *Кузьмицкая А. И., Жданов В. С., Пошивалов В. П.* Влияние мгновенного охлаждения на физико-механические свойства алюминиевого сплава АМг6 после высокотемпературной выдержки. Техническая механика. 2016. № 2. С. 128–136.
6. *Санін А. Ф., Пошивалов В. П., Бісик С. П., Кузмицька О. І., Жданов В. С., Загреба О. І.* Виготовлення деталей протимінних захисних екранів з алюмінієвих сплавів системи AL-MG. Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки. V Міжн. наук.-практ. конф.: тези доп. (Київ, 11-12 жовтня 2017 року). Київ: ДНУ УкрІНТЕІ. 2017–191 с.

Отримано 04.11.2019,
в остаточному варіанті 22.11.2019