

PACS numbers: 62.20.M-, 68.35.Gy, 68.37.Hk, 68.47.De, 68.60.Bs, 81.40.Ef, 81.40.Np

Мікрофотограмметричний підхід у дослідженні стопів AlSiMg

А. В. Уль, О. В. Мельник, Ю. А. Мельник*, Л. В. Ільїн

Волинський національний університет імені Лесі Українки,
просп. Волі, 13,

43025 Луцьк, Україна

**Луцький національний технічний університет,*

вул. Львівська, 75,

43018 Луцьк, Україна

Метою даної роботи було отримання інформації про поведінку осадів алюмінієвих стопів залежно від часу та температури відпалу, та їх впливу на механічні властивості. Проведений цикл випробувань дав можливість визначати умови утворення осадів, проте, на практиці, на результати впливають зовнішні фактори, такі як геометрія зразків, умови їх нагріву та охолодження. Тому результати випробувань, проведених згідно із вимогами європейських норм (DIN), можна покращити шляхом проведення попередніх випробувань. Підвищення твердості цих стопів відбувається за рахунок дисперсійного твердіння осадів, а максимальна твердість досягається за частково когерентних осадів. Також проведені РЕМ-дослідження показали, що твердість дослідних зразків стопу AlSiMg залежить від температури і часу відпалу. Після загартування із зростанням часу відпалу зростає твердість до моменту утворення частково когерентних осадів і, таким чином, досягається максимальна твердість. Під час металографічних досліджень поверхні зламів досліджували макро- та мікроскопічно за допомогою стереомікроскопа та сканувального растрового електронного мікроскопа. Порівнюючи поверхні зламів за різних режимів

Corresponding author: Anna Volodymyrivna Uhl

E-mail: prof.annauhl@gmail.com

Lesya Ukrainka Volyn National University,

13 Voli Ave., UA-43025 Lutsk, Ukraine

**Lutsk National Technical University,*

75 Lvivska Str., UA-43018 Lutsk, Ukraine

Citation: A. V. Uhl, O. V. Melnyk, Y. A. Melnyk, and L. V. Ilyin,

Microphotogrammetric Approach in the Study of AlSiMg Alloys, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 2: 255–271 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.02.0255](https://doi.org/10.15407/mfint.43.02.0255).

термообробки можна стверджувати, що зразкам із максимальною твердістю притаманний крихкий злам. Використання фотограмметричних методів у РЕМ-дослідженнях та EDX-аналізу зламів зразків дозволяє з високою точністю орієнтувати досліджувані площини у просторі, що, своєю чергою, сприяє отриманню якісних та достовірних результатів. З метою підтвердження оптимальних умов термічної обробки рекомендується проводити подальші механічні та металографічні дослідження на основі результатів попередніх випробувань.

Ключові слова: алюмінієві стопи, злам, руйнування, термообробка, загартування.

The purpose of this work is to obtain information on the behaviour of the deposits of aluminium alloys depending on the time and temperature of annealing, and their effect on the mechanical properties. The cycle of tests carried out made it possible to determine the conditions for the formation of precipitation, however, in practice, the results are influenced by external factors such as the geometry of the samples, the conditions of their heating and cooling. Therefore, results of tests conducted in accordance with the requirements of the European standards (DIN), can be improved by conducting preliminary tests. The increase in the hardness of these alloys occurs due to dispersed solidification of deposits, and the maximum hardness is achieved with partially coherent deposits. The conducted SEM studies show that the hardness of the prototypes of the AlSiMg alloy depends on the temperature and time of annealing. After quenching, with an increase in the annealing time, the hardness grows until the moment of formation of partially coherent precipitates and the maximum hardness is achieved. During metallographic studies, the fracture surfaces are macro- and microscopically examined using a stereomicroscope and a scanning electron microscope. Due to comparison of the surface of fractures at different modes of heat treatment, it can be argued that the samples with the maximum hardness are characterized by a brittle fracture. The use of photogrammetric methods in SEM studies and EDX-analysis of fracture specimens permit to orient with high accuracy an investigated plane in space and promote to obtain a high quality and reliable result. In order to confirm the optimal conditions of heat treatment, it is recommended to carry out further mechanical and metallographic studies based on the results of preliminary tests.

Key words: aluminium alloys, fracture, destruction, heat treatment, hardening.

(Отримано 14 серпня 2020 р.; остаточн. варіант — 8 грудня 2020 р.)

1. ВСТУП

З моменту відкриття Альфредом Вільмом (Alfred Wilm) процесу «загартування алюмінію» у 1906 році, легкі металеві стопи на основі алюмінію стали частиною стандартного промислового виробництва і перебувають у центрі інноваційного розвитку. Саме тому, особливої уваги заслуговують алюмінієві стопи, які відносять до

«високотехнологічних матеріалів», що володіють високим рівнем функціональності: низькою щільністю, високою корозійною стійкістю та високими показниками питомої міцності [1, 2].

Незважаючи на те, що стопи Al–Mg–Si достатньо досліджені, по відношенню до окремих осадів виникає більше незрозумілостей, ніж для стопів AlCu. У механіці матеріалів недостатньо відомостей про параметри поведінки систем Al–Mg–Si, особливо під дією високих навантажень і під впливом температури. Також для законів матеріалознавства, які описують пластичну поведінку, включно процеси пошкодження під час пластичної деформації, існують лише перші теоретичні підходи щодо можливих критеріїв. Механічні властивості алюмінієвих стопів (стійкість до пластичної деформації, пошкоджень і зламів) визначається їх мікроструктурою. До основних механізмів руйнування алюмінієвих стопів відносять пластичне руйнування та тріщиноутворення. Природу утворення тріщин в алюмінієвих стопах детально викладено у працях [3, 4]. Дослідження морфології та складу осадів алюмінієвих стопів викладено у роботах [5–7] та ін.

Проте, питання дослідження характеристик міцності алюмінієвих стопів за різноманітних умов експлуатації залишається надалі відкритим, тому моделювання процесів пошкоджень, що відбуваються на мікро- та макрорівні є важливою і актуальною задачею механіки руйнувань.

Мікрофрактографічні дослідження є ефективним засобом аналізу причин утворення пошкоджень та забезпечення отримання нової інформації відносно мікромеханізмів руйнування стопів на поверхневому та приповерхневих рівнях [8–10], оскільки вид зламу деталей, певною мірою, є відображенням процесів, які відбувалися під час їхнього руйнування. Растрово-електронно-мікроскопічний аналіз поверхонь зламів металів може дати корисну інформацію про процеси, що відбуваються під час руйнування матеріалів [11–13].

Знання вищевказаних факторів, що впливають на процес руйнування, є важливим як для формування виробів, так і для їх обробки.

Даного роду дослідження започатковано нами у роботах [14, 15], а викладені у роботі дослідження є їхнім логічним продовженням.

2. МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Методика просторової орієнтації досліджуваних поверхонь

Коротко опишемо методику просторового орієнтування досліджуваної площини для здійснення коректного аналізу хімічного складу дослідних зразків за допомогою енергодисперсійного методу (EDX).

Використавши стереоскопічні методи в РЕМ, можна визначити точну орієнтацію локальної поверхні маленької плоскої фасетки на

шорсткому зразку, а потім переорієнтувати її таким чином, щоб ця область була рівнобіжною стандартним положенням. Якщо це виконано, то можна точно визначити кількісний склад [14, 15].

Рішення задачі визначення просторової орієнтації досліджуваної площини у режимі реального часу простіше виконати, скориставшись циліндричною системою координат (r, φ, z) , у якій рівняння площини приймає вигляд

$$z = Ar(\varphi) \cos \varphi + Br(\varphi) \sin \varphi + C. \quad (1)$$

Положення шуканої площини будемо визначати за методом найменших квадратів, мінімізуючи функцію

$$\Phi = \sum_{i=1}^n [Ar(\varphi_i) \cos \varphi_i + Br(\varphi_i) \sin \varphi_i + C - z_i]^2, \quad (2)$$

де z_i, φ_i ($i = \overline{1, n}$) — апліката і полярний кут i -ої точки, визначені стереометодом, n — кількість точок.

Необхідною умовою мінімуму функції є виконання рівностей:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial A} = 0, \frac{\partial \Phi}{\partial B} = 0, \frac{\partial \Phi}{\partial C} = 0. \quad (3)$$

Якщо розв'язок системи відомий, то рівняння шуканої площини має вигляд:

$$z = Ar \cos \varphi + Br \sin \varphi + C. \quad (4)$$

Потім визначають напрямні косинуси:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= A / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}, \\ \cos \beta &= B / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}, \\ \cos \gamma &= C / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Напрямні косинуси (5) використовують для обчислення кутів обертання і нахилу, для встановлення досліджуваної фасетки у стандартне положення. Ці кути легко отримати з простих геометричних співвідношень:

$$\rho_1^\circ = \arctg \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}, \tau_q^\circ = 45^\circ - \varphi^\circ. \quad (6)$$

2.2. Методика експерименту

Мета даного дослідження полягала у дослідженні і вивченні впливу різних режимів теплової обробки на механічні властивості зразків

досліджуваного стопу AlSiMg і визначення змін мікроструктури за допомогою РЕМ-мікрофотограмметричних і металографічних досліджень [14]. У роботі дослідженням підлягали алюмінієві стопи AlSiMg, які відносять до типу стопів, що досягають своєї високої міцності за рахунок утворення когерентних, нанорозмірних осадів із різними режимами термообробки. По завершенню термообробки проведено випробування на розтяг згідно DIN EN 10002 та ударні навантаження за DIN EN 148-3 із подальшими металографічними, мікроскопічними (РЕМ) та енергодисперійсними (EDX) дослідженнями. Для досліджень нами відібрано зразки AlSiMg (EN AW 6082) стопу наступного складу (табл. 1).

Схему експерименту обрано наступну: 1 — підготовка зразків; 2 — термообробка; 3 — випробування на розтяг; 4 — випробування на ударні навантаження; 5 — металографічні, мікроскопічні (РЕМ) та енергодисперійсні (EDX) дослідження.

Для всіх проб стопів було виготовлено експериментальні зразки, креслення яких наведено на рис. 1.

Оскільки експериментальні дослідження проводили у матеріалознавчих та растрово-електронно-мікроскопічних лабораторіях Вищої технічної школи Ост-Вестфалія Ліппе (Німеччина), тому ми керувались чинними європейськими нормативними документами.

Зразки виготовляли відповідно до чинних європейських норм

ТАБЛИЦЯ 1. Хімічний склад дослідного стопу.

TABLE 1. Chemical composition of the experimental alloy.

Хімічна назва/марка	Вміст легувальних елементів, % мас.	Границя		Розтяг A10, %	Твердість по Брінелю HB
		міцності R_m , Н/мм ²	плинності 0,2%, Н/мм ²		
AlSiMg/ EN AW 6082	Mg 0,6–1,2 Si 0,7–1,3 Mn 0,4–1,0	275–300	240–255	6–9	84–91

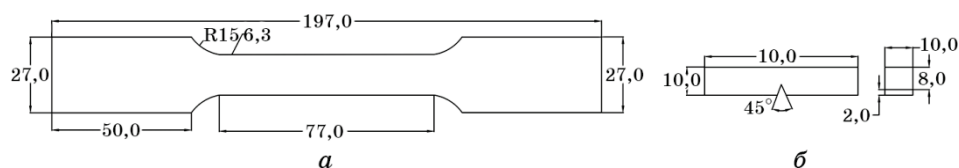


Рис. 1. Види експериментальних зразків: *a* — креслення дослідного зразка для експериментів на розтяг, *б* — креслення дослідного зразка для експериментів на ударну в'язкість.

Fig. 1. Types of experimental samples: *a*—drawings of the prototype for tensile experiments, *b*—drawings of the prototype for experiments on toughness.

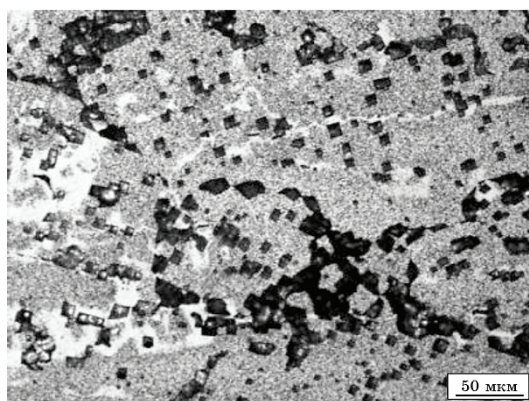


Рис. 2. Кристалічна структура вихідного зразка сплаву AlSiMg.

Fig. 2. Crystal structure of the initial sample of AlSiMg alloy.

DIN 50125 [16], перед початком механічних та металографічних досліджень зразки термічно обробляли згідно DIN 29850 [17] з метою досягнення бажаних властивостей. Кристалічну структуру вихідного зразка сплаву AlSiMg наведено на рис. 2.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Механічні дослідження

Перед початком механічних та металографічних досліджень зразки термічно обробляли з метою досягнення ними бажаних властивостей. Частину зразків досліджуваного сплаву піддавали термообробці (штучно зістарені) за постійної температури 190°C з метою активації дифузних процесів. По мірі збільшення часу відпалу твердість зростала до тих пір, доки зразки не було витримано протягом 2 годин, одночасно досягався максимальний показник твердості — 124 HV_{30} , міцність на розтяг RB у цьому стані становив $362,4\text{ Н/мм}^2$. На поверхні зламу спостерігався інтеркристалічний злам з дрібними стільниками (рис. 3, а).

У зразках, які піддавали термообробці протягом 21 год, твердість поступово зменшувалась і після 21-ї години термообробки досягався найнижчий показник твердості, який залишався незмінним. Під час випробувань на розтяг підтверджено факт, що розтягувальні зусилля значно зменшились і становлять $273,6\text{ Н/мм}^2$. На рисунку 3, б спостерігався транскристалічний стільниковий злам.

За результатами ударних навантажень встановлено, що енергія, необхідна для руйнування зразка, становить $11,4\text{ Дж}$. На поверхні прослідковується інтеркристалічний злам, рис. 3, в. Діаметри

осадів становлять 2–2,5 мкм.

Порівнявши поверхні зламів після 2-х та 22-х год термообробки, можна стверджувати, що для обох випадків стан зразків м'який.

На противагу до міцності, яка зменшується, для руйнування зразка стопу необхідно більше енергії — 12,4 Дж. На рисунку 3, з зображено утворений транскристалічний стільниковий злам. Осади крупніші, їхній орієнтовний діаметр — 3,5–4 мкм.

Залежність зміни твердості від режимів термообробки дослідних

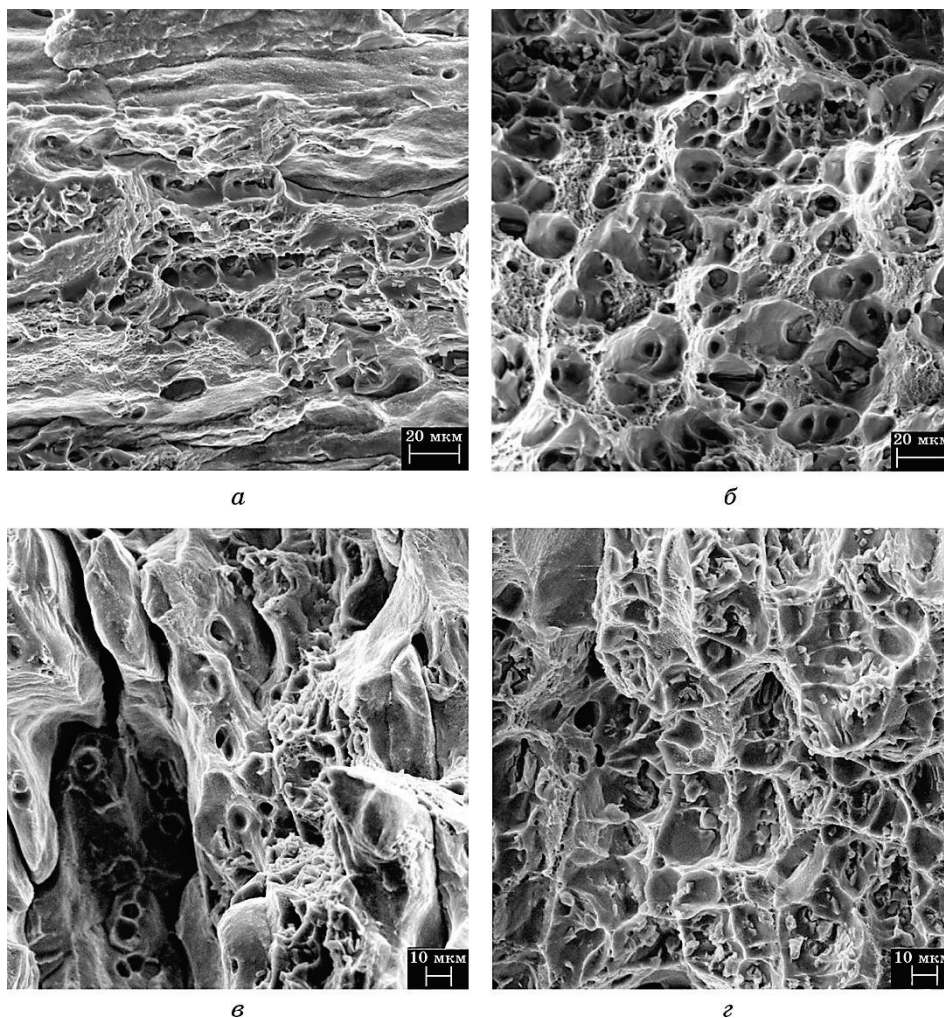


Рис. 3. Мікрофотографії дослідних зразків після термообробки та механічних досліджень.

Fig. 3. Microphotos of prototypes after heat treatment and mechanical studies.

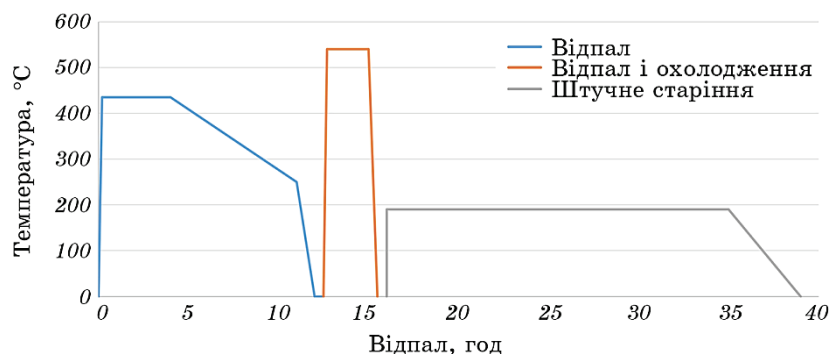


Рис. 4. Залежність зміни твердості від режимів термообробки дослідних стопів AlSiMg.

Fig. 4. Dependence of hardness change on heat treatment modes of experimental AlSiMg alloys.

стопів AlSiMg представлено на рис. 4.

На рисунку 5 зображено залежність значення твердості від тривалості термообробки. Максимальна твердість 124 HV_{30} досягається після 2 годин старіння. Цьому стану відповідають частково когерентні осадки. Після цього міцність знову падає і після 21 години старіння вона становить лише 102 HV_{30} . Одночасно значення твердості залишається постійним. Присутні некогерентні осадки. Можна стверджувати, що міцність збільшується у разі загартування.

Для випробування на розтяг було відібрано 4 зразки після 2 годин термообробки за 190°C ; 4 зразки стопу після 22 годин термооб-

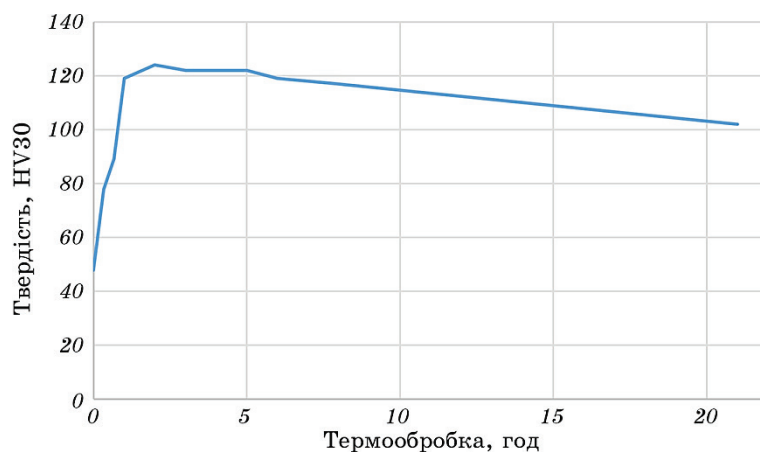


Рис. 5. Крива твердості дослідного стопу AlSiMg.

Fig. 5. The hardness curve of the experimental alloy AlSiMg.

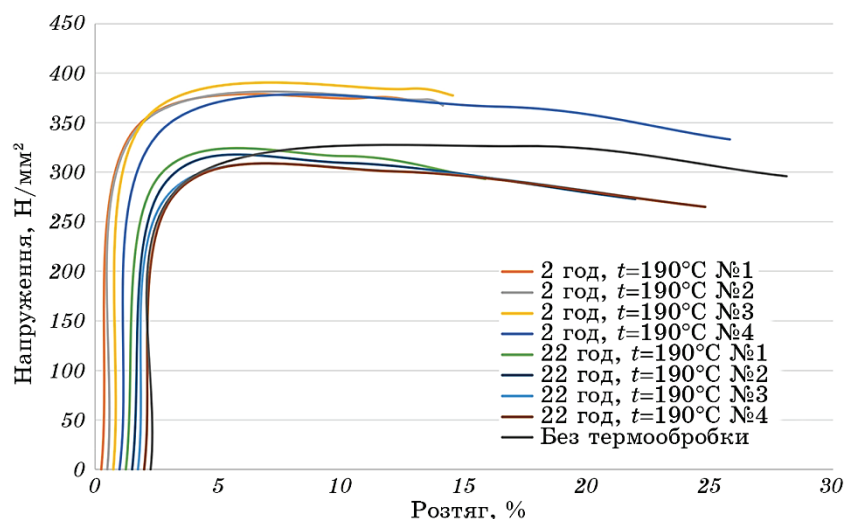


Рис. 6. Діаграми напруження–розтяг для трьох видів зразків.

Fig. 6. Fright–stretch diagrams for three types of samples.

робки за 190°C; та 1 зразок без термообробки. Результати випробувань на розтяг представляють собою діаграму напружень і деформацій (рис. 6) та одержані з неї властивості матеріалу (табл. 2).

У результаті випробувань на розтяг встановлено, що зразкам першого типу притаманне крихке руйнування. Зразкам другого типу, які піддавали найдовшій термообробці, притаманні некогерентні осадки та зменшення твердості. Границі міцності та пластичності у зразків першого типу значно вища за рахунок когерентних осадків, ніж у зразків другого типу.

ТАБЛИЦЯ 2. Механічні властивості досліджуваних зразків.

TABLE 2. Mechanical properties of the studied samples.

Зразок	Твердість, HV30	E_{mod}	$Rp_{0,2}$	Rm	RB	Розтяг	Волокн.
		Н/мм ²				%	
2 год, № 1	125	76895	339,7	374,9	371,6	10,92	13,15
2 год, № 2	124	72933	344,9	373,3	367,2	13,43	14,14
2 год, № 3	132	79809	352,0	384,2	377,6	12,75	14,54
2 год, № 4	127	72559	343,2	366,1	333,0	16,30	25,80
22 год, № 1	102	69929	292,7	316,2	293,2	10,10	15,86
22 год, № 2	105	67360	286,1	309,4	273,0	10,27	21,96
22 год, № 3	101	65414	278,1	300,8	265,2	12,55	24,80
22 год, № 4	101	69041	276,2	299,0	263,1	12,30	24,80
Без обробки	109	81461	286,9	326,3	295,9	17,23	28,10

Випробування на ударні навантаження — це найважливіший тест для оцінки міцності матеріалу, процедура якого стандартизована згідно DIN-EN ISO 148. У результаті тесту на удар вимірюють енергію, необхідну для руйнування зразка.

Для випробування на ударні навантаження використано маятниковий ударний тестер «Wolpert» з двома ударними навантаженнями 300 та 150 Дж за кімнатної температури. Результати експериментальних досліджень представлено у табл. 3.

З даних випробувань видно, що зразки першого типу мають найнижчу ударну в'язкість, але також і найвищу твердість, це пов'язано із старінням протягом 2 годин, що призводить до частково когерентних осадів. У випадку порівняння зразків другого та третього типів видно, що зразки третього типу мають більш високу твердість завдяки холодному загартуванню, проте і нижчу міцність. Зразки другого типу після 22 год термообробки показали не когерентні екскреції (осади).

Після проведення випробувань на ударні навантаження та розтяг можна приступати до досліджень поверхні руйнування. Поверхні руйнування досліджують макроскопічно та мікроскопічно, із застосуванням стереомікроскопа та сканувального електронного мікроскопа з метою аналізу їхньої поведінки і структури руйнування. Для диференціації зламу проведено РЕМ-дослідження експериментальних зразків на SEM LEO XX-L.

На рисунках 7, а, б — поверхні зламів після випробувань на розтяг. На рисунку 7, а — інтеркристалічний поздовжній злам із роз-

ТАБЛИЦЯ 3. Результати досліджень на ударні навантаження.

TABLE 3. The results of studies on the impact load.

Зразок	Твердість <i>HV30</i>	Ударні навантаження, Дж
Результати для зразка після 2 год за 190°C термообробки		
1	133	8,5
2	128	12,5
3	131	11,5
4	131	13
Результати для зразка після 21 год за 190°C термообробки		
1	105	12,5
2	104	13
3	105	13
4	106	11
Результати для зразка без термообробки		
1	110	12
2	110	12

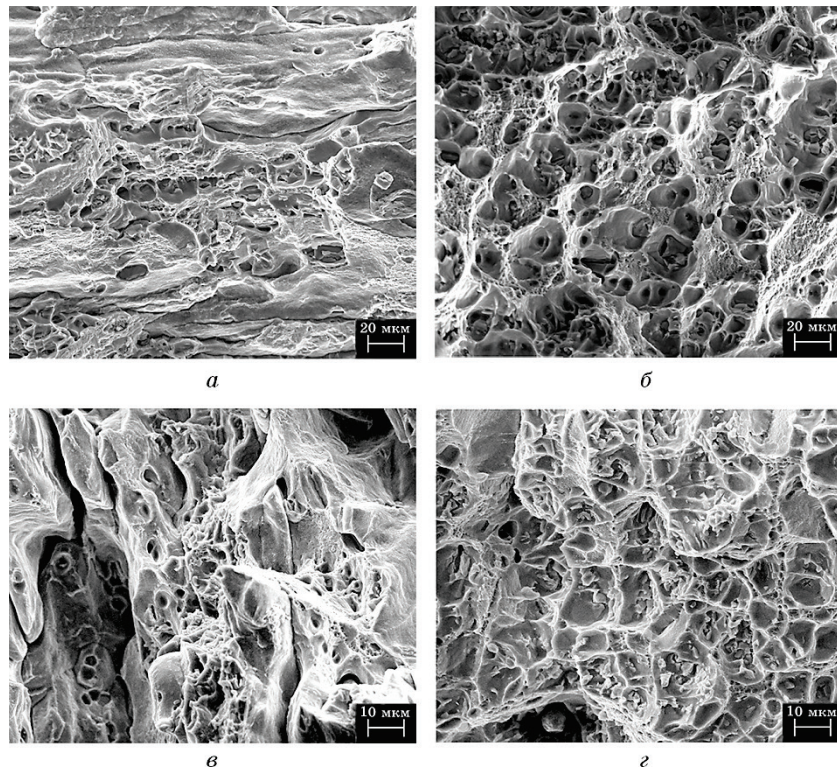


Рис. 7. Мікрофотографії дослідних зразків.

Fig. 7. Microphotos of experimental samples.

шаруванням, твердість стопу максимальна. Через тривалий тепловий вплив (рис. 7, б) стоп пом'якшується, через що після випробування на розтяг розвинувся транскристалічний комірковий лам.

На рисунках 7, в, г — поверхні ламів після випробувань на ударні навантаження. На рисунку 7, в розпізнається інтеркристалічний стільниковий лам, порівняно із рис. 7, г, де очевидна м'яка структура стопу досліджуваного зразка та транскристалічний стільниковий лам.

Початкова твердість зразка становила 109 HV30. Зразок піддавали холодній обробці. Після досліджень за допомогою растрового електронного мікроскопа найбільш деформованою кристалічною структурою виявилась у вигляді «збоку».

Порівнюючи поверхні ламів різних станів видно, що максимально загартовані зразки стопів мають крихкий лам на відміну від зразків, витриманих триваліший час. У цій роботі зразки спочатку піддавали термічній обробці, чим успішно усувалась закостенілість речовин, оскільки твердість зразків стопів за такої обробки значно

зменшувалась. Проте, деформовані зерна не рекристалізувалися, хоча зразки, піддавали температурному відпалу за різних параметрів температури і часу.

Результати проведених експериментів із зразками стопів AlSiMg підтвердили попередні припущення, що частково когерентні осади проявляються у максимально загартованому зразку, а у зразків, які витримували 22 години — некогерентні осади. На поверхнях зламів за ударних навантажень і розтягу чітко видно, що максимально загартовані зразки мають крихкий втомний злам.

Це свідчить про те, що умови рекристалізації залежать від різних факторів, а саме, від ступеня деформації, часу і температури. Щоб встановити наперед задані параметри для рекристалізації, потрібно провести ще низку досліджень з властивостей осадів.

3.2. Аналіз осадів за допомогою РЕМ

З метою визначення фізико-хімічних властивостей осадів у різних станах доцільно проводити РЕМ-дослідження. Складність полягає у тому, що на шліфах складно виявляти осади, тому РЕМ-дослідження осадів здійснюють для випадку зламів.

На РЕМ-зображеннях (рис. 8 та 9) представлено результати досліджень та аналіз осадів на зразках зламів дослідних стопів. Частково когерентні осади виявляють у максимально загартованих зразках, які піддають термообробці за 190°C протягом 2 годин. У цьому стані характерні так звані частково когерентні осади. У нижній частині комірки спостерігаються сферичні осади. Розмір осадів складає приблизно від 2 до 2,5 мкм (рис. 8).

Некогерентні осади (3,5–4 мкм) прослідковуються у зразках, які піддають термообробці за 190°C протягом 21 години. Як описано, осади некогерентного стану вважаються найбільшими. Розмір таких осадів можна визначити на рис. 9, це приблизно 3,5–4 мкм.



Рис. 8. Частково когерентні осади.

Fig. 8. Partially coherent inclusions.



Рис. 9. Некогерентні осади.

Fig. 9. Incoherent inclusions.

3.3. Енергодисперсійні (EDX) дослідження осадів

Можливості використання растрово-електронного мікроскопа у поєднанні із енергодисперсійним рентгенівським спектроскопом (EDX) дає можливість здійснювати якісний та кількісний аналіз поелементного складу зразків або структур. Енергодисперсійний рентгенівський мікроаналіз досліджує елементний склад поверхні на глибину приблизно 1–2 мкм. Ваговий відсоток одного елемента розраховують за допомогою періодичної таблиці.

За допомогою EDX-аналізатора можна визначити не тільки точний хімічний склад легувальних компонентів, а також і наявних осадів. EDX-аналіз дослідженого стопу AlSiMg наведено в табл. 4.

Алюмінієвий стоп AlSiMg може бути загартований виділенням фази Mg_2Si із β -Mg. Вагове співвідношення Mg_2Si : 48,6/28,1. Точний хімічний склад можна визначити, порівнявши теоретично обчислені та аналізовані у роботі значення.

Результати EDX-аналізу осадів за запропонованою методикою по зорієнтованих ділянках наведено у табл. 5, 6 та на рис. 10, 11.

Порівнюючи результати механічних і металографічних досліджень, видно, що бажані властивості зразків можна встановити після проведення дослідів з визначення осадів.

ТАБЛИЦЯ 4. EDX аналіз дослідного стопу AlSiMg.

TABLE 4. EDX analysis of the experimental alloy AlSiMg.

Заявлений склад AlSiMg, % мас.							
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,7–1,3	0,50	0,10	0,40–1,0	0,6–1,2	0,25	0,20	0,10

Таким чином можна стверджувати, що для проб було вибрано оптимальні умови загартування.

Після проведених досліджень з дослідними зразками приходимо до висновку, що, теоретично через температурний вплив можна досягти підвищення стійкості.

ТАБЛИЦЯ 5. Результати EDX-аналізу зразка стопу AlSiMg після 2 годин теплової обробки (штучне старіння).

TABLE 5. The results of EDX analysis of a sample of AlSiMg alloy after 2 hour of heat treatment (artificial aging).

Дослідна ділянка	Mg	Al	Si
Ділянка 1	41,16	34,61	24,23
Ділянка 2	1,08	97,81	1,11

ТАБЛИЦЯ 6. Результати EDX-аналізу зразка стопу AlSiMg після 22 годин теплової обробки (штучне старіння).

TABLE 6. The results of EDX analysis of a sample of AlSiMg alloy after 22 hour of heat treatment.

Дослідна ділянка	Mg	Al	Si
Ділянка 1	50,86	34,57	14,57
Ділянка 2	0,73	97,24	2,03
Ділянка 3	0,98	97,89	1,13

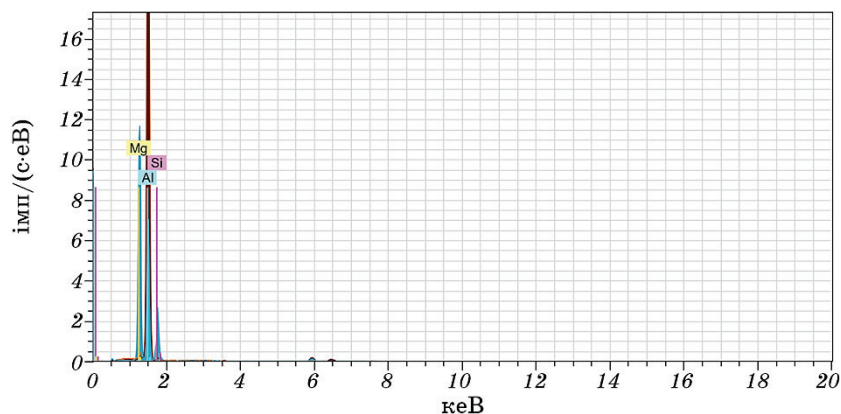


Рис. 10. Результати EDX-аналізу зразка стопу AlSiMg після 2 годин теплової обробки (штучне старіння).

Fig. 10. The results of EDX analysis of a sample of AlSiMg alloy after 2 hour of heat treatment (artificial aging).

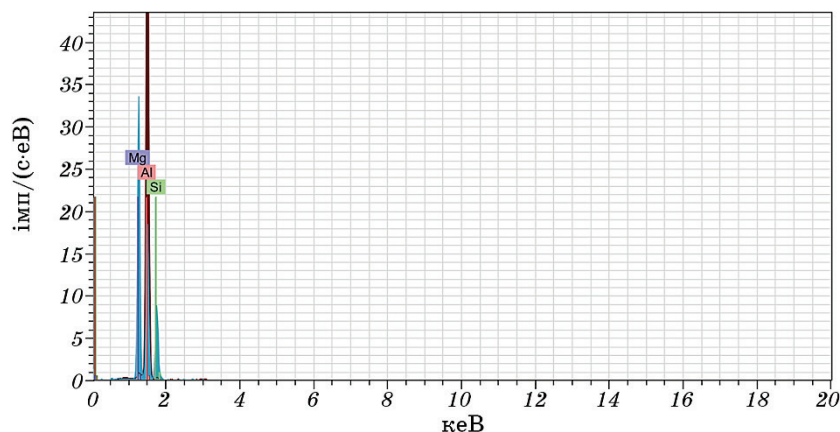


Рис. 11. Результати EDX-аналізу зразка стопу AlSiMg після 22 годин теплової обробки (штучне старіння).

Fig. 11. The results of EDX analysis of a sample of AlSiMg alloy after 22 hour of heat treatment.

Таким чином, наявність ефекту зміцнення алюмінієвих стопів за запропонованих режимів термообробки дають можливість використовувати розроблену методику як ефективний засіб для прогнозування механічних властивостей різноманітних виробів із алюмінієвих стопів.

Поєднання фотограмметричних методів у РЕМ-дослідженнях та EDX-аналізу зламів зразків досліджуваних елементів деталей та конструкцій дає можливість з високою достовірністю встановлювати причини їхнього руйнування.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. H. J. Bargel and G. Schulze, *Werkstoffkunde* (Berlin, Heidelberg: Springer: 2008).
2. G. Drossel, S. Friedrich, C. Kammer, W. Lehnert, W. Thate, M. Ullman, H.-W. Wenglorz, and St. Zeltner, *Aluminium Taschenbuch 2: Umformung, Gießen, Oberflächenbehandlung, Recycling* (Beuth Verlag GmbH: 2018).
3. V. Shyamu, T. Murali, M. Raju, S. Sapthagir, and A. Venkateswarlu, *IJIET*, **5**, Iss. 4: 132 (2015).
4. R. Di Sante, P. Cavaliere, G. L. Rossi, and A. Squillace, *Mater. Sci. Forum.* (2007).
5. G. T. Hahn and A. R. Rosenfield, *Metall. Mater. Trans. A*, **6**: 653 (1975).
6. K. Tanaka and T. Mura, *Metall. Mater. Trans. A*, **13**: 117 (1982).
7. T. Kobayashi, *Mater. Sci. Eng., A*, **280**, Iss. 1: 8 (2000).
8. M. Chen, X. Meng-Burany, T. A. Perry, and A. T. Alpas, *Acta Mater.*, **56**: 5605 (2008).

9. S. K. Dey, T. A. Perry, and A. T. Alpas, *Wear*, **267**, Iss. 1–4: 515 (2009).
10. J. J. I. Mattos, A. Y. Uehara, M. Sato, and I. Ferreira, *Procedia Engineering*, **2**, Iss. 1: 759 (2010).
11. H. R. Ammar, A. M. Samuel, and F. H. Samuel, *Mater. Sci. Eng.: A*, **473**, Iss. 1–2: 65 (2008).
12. A. Nasery Isfahany, H. Saghafian, and G. Borhani, *J. Alloys Compd.*, **509**, Iss. 9: 3931 (2011).
13. M. Warmuzek, *Aluminum-Silicon Casting Alloys Atlas of Microfractographs*. (ASM International: 2004).
14. A. Uhl, Y. Melnyk, O. Melnyk, I. Boyarska, and M. Melnychuk, *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (2019).
15. В. М. Мельник, А. В. Шостак, *Растрово-електронна стереомікрофрактографія* (Луцьк: ВНУ ім. Лесі Українки: 2009).
16. *Prüfung Metallischer Werkstoffe – Zugproben* (Deutsche Norm DIN 50125: 2016).
17. *DIN 29850 Wärmebehandlung von Aluminium-Knetlegierungen* (DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: 1989).

REFERENCES

1. H. J. Bargel and G. Schulze, *Werkstoffkunde* (Berlin, Heidelberg: Springer: 2008).
2. G. Drossel, S. Friedrich, C. Kammer, W. Lehnert, W. Thate, M. Ullman, H.-W. Wenglorz, and St. Zeltner, *Aluminium Taschenbuch 2: Umformung, Gießen, Oberflächenbehandlung, Recycling* (Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH: 2018).
3. V. Shyamu, T. Murali, M. Raju, S. Sapthagir, and A. Venkateswarlu, *IJIET*, **5**, Iss. 4: 132 (2015).
4. R. Di Sante, P. Cavaliere, G. L. Rossi, and A. Squillace, *Mater. Sci. Forum.* (2007).
5. G. T. Hahn and A. R. Rosenfield, *Metall. Mater. Trans. A*, **6**: 653 (1975).
6. K. Tanaka and T. Mura, *Metall. Mater. Trans. A*, **13**: 117 (1982).
7. T. Kobayashi, *Mater. Sci. Eng., A*, **280**, Iss. 1: 8 (2000).
8. M. Chen, X. Meng-Burany, T. A. Perry, and A. T. Alpas, *Acta Mater.*, **56**: 5605 (2008).
9. S. K. Dey, T. A. Perry, and A. T. Alpas, *Wear*, **267**, Iss. 1–4: 515 (2009).
10. J. J. I. Mattos, A. Y. Uehara, M. Sato, and I. Ferreira, *Procedia Engineering*, **2**, Iss. 1: 759 (2010).
11. H. R. Ammar, A. M. Samuel, and F. H. Samuel, *Mater. Sci. Eng.: A*, **473**, Iss. 1–2: 65 (2008).
12. A. Nasery Isfahany, H. Saghafian, and G. Borhani, *J. Alloys Compd.*, **509**, Iss. 9: 3931 (2011).
13. M. Warmuzek, *Aluminum-Silicon Casting Alloys Atlas of Microfractographs*. (ASM International: 2004).
14. A. Uhl, Y. Melnyk, O. Melnyk, I. Boyarska, and M. Melnychuk, *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (2019).

15. V. M. Melnyk and A. V. Shostak, *Rastrovo-Elektronna Stereomikrofraktografiya* [Raster-Electronic Stereomicrofractography] (Lutsk: Lesya Ukrainka VNU: 2009) (in Ukrainian).
16. *Prüfung Metallischer Werkstoffe – Zugproben* (Deutsche Norm DIN 50125: 2016).
17. *DIN 29850 Wärmebehandlung von Aluminium-Knetlegierungen* (DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: 1989).