

УДК 669.715
PACS number(s): 81.05

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ АЛЮМІНІУ З ПЕРЕХІДНИМИ МЕТАЛАМИ ОТРИМАНІХ ЕКСРУЗІЄЮ ШВИДКО ЗАГАРТОВАНИХ ФОЛЬГ

О. Лисенко¹, О.Якунін², Л. Сілка², Т. Калініна¹

¹Дніпродзержинський державний технічний університет
вул. Дніпробудівська, 2, 51918 Дніпродзержинськ, Україна
e-mail: ablysenko@bigmir.net

²Дніпропетровський національний університет
вул. Наукова, 13, 49050 Дніпропетровськ, Україна

Досліджено фазовий склад, мікроструктури та механічних властивостей сплавів алюмінію з перехідними металами (ПМ - Mn, Cr, Fe, V), отриманих загартуванням з рідкого стану зі швидкістю охолодження $\sim 10^5$ – 10^6 К/с і подальшою гарячою екструзією продуктів швидкого загартування. Показано, що в структурі швидко охолоджених сплавів Al-ПМ фіксуються перенасичені тверді розчини на основі алюмінію та квазіевтектичні суміші твердого розчину з дисперсними частками первинних алюмінідів. Структурні зміни, які є наслідком нерівноважної кристалізації, супроводжуються підвищенням міцності сплавів Al-ПМ до рівня 400–600 МПа. З'ясовано, що важливіші морфологічні ознаки мікроструктури швидко загартованих сплавів та їх високі міцнісні властивості (325–370 МПа) зберігаються у прутках діаметром 10 мм, які були отримані за такими режимами екструзії: температура 623–673 К, тиск 883–1079 МПа, коефіцієнт витягування 50–52%. Результати досліджень свідчать про перспективність використання швидко охолоджених сплавів Al-ПМ як напівфабрикатів для створення нових матеріалів з високою питомою міцністю.

Ключові слова: загартування з рідкого стану, гаряча екструзія, механічні властивості, метастабільні структурні стани.

Як відомо, комплексне легування Al-сплавів перехідними металами спричиняє позитивний вплив на міцнісні характеристики за кімнатної та підвищених температур. Однак рівноважна розчинність ПМ в Al є незначною [1], а перевищення межі розчинності супроводжується утворенням у структурі грубих первинних кристалів надлишкових фаз, які призводять до різкого погіршення механічних властивостей. З іншого боку, згідно з численними експериментальними даними, при загартуванні з рідкого стану (ЗРС) зі швидкостями охолодження понад 10^5 К/с у сплавах Al-ПМ фіксуються аномально пересичені тверді розчини, а також ультрадисперсні фазові конгломерати [2–4]. Означені метастабільні структурні стани зумовлюють не лише

значне підвищення міцнісних характеристик швидко загартованих сплавів Al-ПМ, але й збереження їх у досить широкому інтервалі температур [5]. Це дає підстави для розробки технології виготовлення високоміцних та жароміцних Al- сплавів, у якій продукти ЗРС використовуються, як напівфабрикати, що зазнають подальшого брикетування та гарячого пресування або екструзії [5]. У статті наведені результати порівняльного аналізу структури та механічних властивостей швидко охолоджених та виготовлених з них масивних сплавів Al-ПМ, які є узагальненням досліджень співробітників кафедри металофізики Дніпропетровського національного університету та кафедри фізики твердого тіла Дніпродзержинського державного технічного університету.

Об'єктами досліджень були сплави Al з ПМ (Mn, Cr, Fe, Zr, V тощо), котрі отримували у вигляді фольг товщиною 20–60 мкм, шляхом прокатування струменя розплаву між масивними сталевими валками. Зразки для металографічних досліджень полірували в електроліті H_3PO_4 810 мл, H_2SO_4 134 мл, Cr_2O_3 156 мл і далі травили розчином HF 10 мл, HCl 15 мл, H_2O 30 мл. Рентгенографічні дослідження проводили на дифрактометрі ДРОН-3 у монохроматизованому $Co_{K\alpha}$ - випромінюванні. Швидко охолоджені напівфабрикати, що слугують для переробки у масивні вироби, готували шляхом подрібнення струменя розплаву на окремі краплі діаметром 1–3 мм. Зіштовхуючись з поверхнею бронзового барабану, який обертається, краплі перетворювалися у луски завтовшки від 30 до 150 мкм. Швидкість охолодження V отриманих лусок оцінювали за їх товщиною, використовуючи методику роботи [6]. Згідно з цією методикою, у разі зміни товщини лусок у зазначених вище межах V зменшується від $1,6 \cdot 10^6$ до $2,4 \cdot 10^5$ К/с. Далі швидко загартовані луски піддавали холодному брикетуванню, короткочасному нагріванню брикетів до 623–673 К та гарячій екструзії за вказаних температур. Так отримували прутки діаметром 10 мм, котрі досліджували методами металографічного та рентгенофазового аналізу, а також використовували для механічних випробувань за ГОСТом 3248-60.

Результати металографічного та рентгенофазового аналізу швидко охолоджених фольг бінарних сплавів Al-ПМ (ПМ- Mn, Cr, Fe, Ni, V) засвідчують, що зі збільшенням концентрації ПМ у їх структурі формуються метастабільні перенасичені тверді розчини і далі дисперсні квазіевтектичні суміші твердого розчину з первинними кристалами надлишкових фаз. За даними вимірювань періоду кристалічної ґратки максимальна насиченість α -розчину у швидко загартованих зразках товщиною ~ 30 мкм становить 14,5 Mn, 5,7 Cr, 0,2 Fe, 0,05 Ni, 1,2%V, що у 5–6,5 разів перевищує рівноважну розчинність ПМ у досліджуваних сплавах. Роль надлишкових фаз у бінарних сплавах грають алюмініди Al_4Mn , Al_7Cr , Al_6Fe , Al_3Ni і Al_3V . На рис. 1 показані концентраційні залежності межі міцності (σ_B) сплавів алюмінію з перехідними металами, які були отримані загартовуванням з рідкого стану зі швидкостями охолодження $\sim 10^6$ К/с.

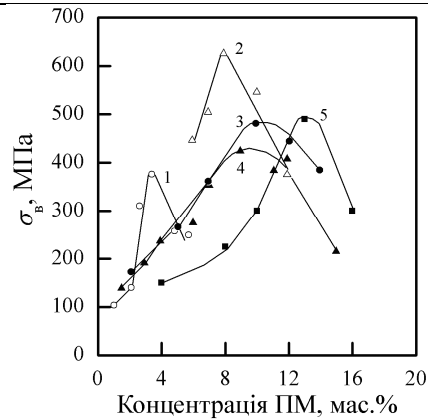


Рис. 1. Концентраційні залежності межі міцності швидко охолоджених сплавів: 1 – Al-V (○), 2 – Al-Fe (Δ), 3 – Al-Ni (●), 4 – Al-Cr (▲), 5 – Al-Mn (■)

Усі графіки є кривими з максимумами. На висхідних гілках залежностей можна виділити дві ділянки з різним нахилом, розташування яких корелює з концентраційними інтервалами формування перенасичених твердих розчинів та квазіевтектичних конгломератів фаз. Максимальні значення σ_v для різних сплавів досягаються за різних концентрацій ПМ і становлять $\sim 400\text{--}600$ МПа. Ці значення є у 3,5–5 разів вищими порівняно із властивостями литих сплавів таких саме складів. Спадаючі гілки залежностей відповідають структурам, у яких присутні грубі первинні алюмініди ПМ.

Міцнісні властивості швидко охолоджених бінарних сплавів Al-ПМ можуть бути суттєво поліпшені через введення до їхнього складу невеликих домішок (0,5–1 мас.%) третього компонента. Найбільший позитивний ефект додаткового легування зафіксовано у сплавах на основі базових систем Al-Fe і Al-Cr (таблиця).

Як видно з табличних даних, при легуванні сплаву Al-8мас.%Fe кобальтом, нікелем і молібденом межа міцності швидко загартованих фольг зростає на 23–30%, досягаючи рівня 750–790 МПа. Додаткове легування сплавів Al-Cr Fe і Zr супроводжується менш суттєвим (приблизно на 12%) підвищенням міцності за кімнатної температури. Однак при цьому збільшуються значення короточасної міцності при температурах 573 К (на 9–22%) і 673 К (на 9–14%). З метою вибору оптимальних режимів переробки продуктів ЗРС у масивні вироби досліджували вплив температури ізохрональних (1 год.) відпалів на міцнісні властивості (σ_v , H_u) швидко охолоджених сплавів Al-Cr, Al-Cr-Fe, Al-Cr-Zr (рис. 2). Показано, що вихідні значення міцності та мікротвердості зберігаються в інтервалі температур від кімнатної до 650–723 К, після чого починаються процеси знеміцнення. Найстійкішим щодо цих процесів виявився сплав Al-9%Cr-1%Zr, зменшення твердості якого починається лише при температурах відпалу понад 723 К. Зазначимо, що, незважаючи на суттєве зменшення міцнісних характеристик швидко охолоджених зразків на стадії високотемпературних відпалів, значення σ_v та H_u , навіть після відпалу при 823 К, залишається приблизно удвічі вищими, ніж у зразках, які були виготовлені литтям розплаву у кокіль.

Міцність швидко закристалізованих і промислових сплавів на основі алюмінію

Вміст легуючих елементів % по масі								Межа міцності σ_B , МПа
Fe	Cr	Co	Ni	Mo	V	W	Zr	293 К
8								610
8		0,5						793
8				0,5				720
8			0,5					759
8					0,5			630
8						0,5		690
	9							416
1	8							465
	9						1	447

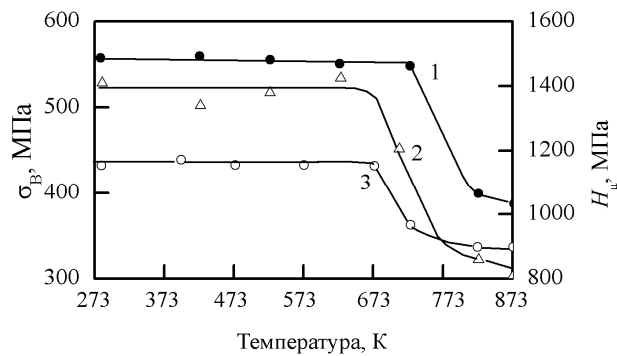


Рис. 2. Залежність межі міцності σ_B (3) та мікротвердості H_{μ} (1, 2) швидко охолоджених сплавів від температури ізохрональних відпалів: (●) – Al-9% Cr-1% Zr, (Δ) – Al-8% Cr-1% Fe, (○) – Al-9% Cr

У технологічній частині роботи зі швидко охолоджених лусок сплавів Al-ПМ методом брикетування і наступної гарячої екструзії виготовляли прутки діаметром 10 мм та вивчали їх структуру і механічні властивості. З'ясовано, що прутки без газових пухирців і задирав, які зберігають основні морфологічні особливості мікроструктури продуктів швидкого загартування, можуть бути отримані за умов таких режимів екструзії: температура 623–673 К, тиск 883–1079 МПа, коефіцієнт витягування 50–52%. Результати рентгенофазового аналізу сплавів, отриманих екструзією засвідчили, що періоди кристалічної ґратки твердих розчинів у пресованих сплавах близькі до значень, які відповідають рівноважній розчинності при температурі пресування. Окрім твердого розчину, до фазового складу прутків здебільшого входять рівноважні інтарметаліди, такі як Al_7Cr , Al_4Mn , Al_3Fe та інші. І лише в окремих зразках, отриманих при мінімальній температурі екструзії, виявлені сліди метастабільних фаз Al_6Mn , Al_6Fe , які фіксуються надшвидким загартуванням.

На мікрошліфах повздовжних розрізів пресованих прутків добре видно, що як окремі фольги, так і частки інтерметалідів, орієнтовані в одному напрямку – вздовж напрямку витягування (рис. 3, *a*).

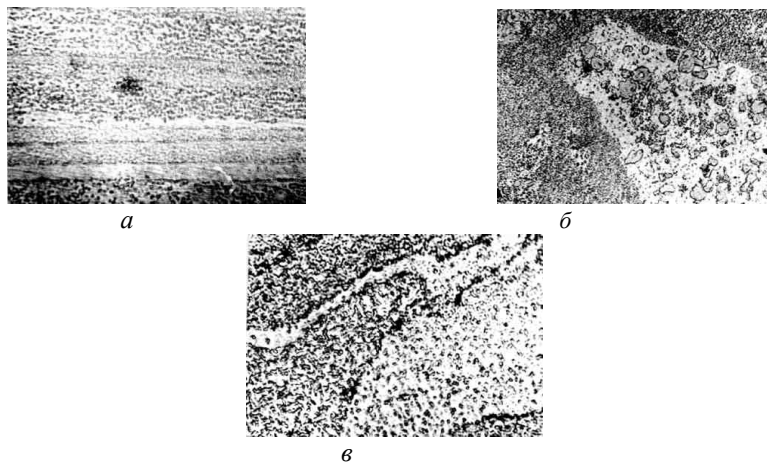


Рис. 3. Мікроструктури прутків, отриманих екструзією швидко охолоджених фольг, $\times 500$:
Al-6 мас.% Fe (*a*, *в*), Al- 11 мас.% Mn (*б*)

На мікроструктурах прутків чітко відрізняються поля, зайняті окремими фольгами. З'єднання окремих фольг у процесі пресування відбувається добре: по межах фольг не видно розривів, окисних плівок чи перехідних шарів. Це дає підстави зробити висновок, що між окремими фольгами виникло дифузійне тужавлення.

В усіх сплавах у процесі технологічних нагрівів виник частковий чи повний розпад сильно пересичених твердих розчинів, унаслідок чого у структурі з'являються дисперсні виділення надлишкових фаз. У деяких зонах мікроструктури пресованих сплавів, які переважно зайняті відносно товстими лусками, виявляються достатньо крупні (2–4 мкм) частки первинних інтерметалідів. Це свідчить про те, що швидкість охолодження таких лусок була недостатньою для формування сильно пересиченого твердого розчину і кристалізація переохолодженого розплаву здійснювалася з утворенням збідненого твердого розчину і проміжної фази, яка характеризується найбільшою конкурентною здатністю у заданих умовах загартування. Оскільки ступінь пересичення твердого розчину у таких ділянках низький, то і густина виділень, які утворюються у процесі його розпаду під час технологічних нагрівань, є нижчою ніж у місцях розташування тонших лусок.

Результати дослідження механічних властивостей сплавів Al-ПМ, що були виготовлені гарячою екструзією швидко охолоджених фольг, показані на рис. 4.

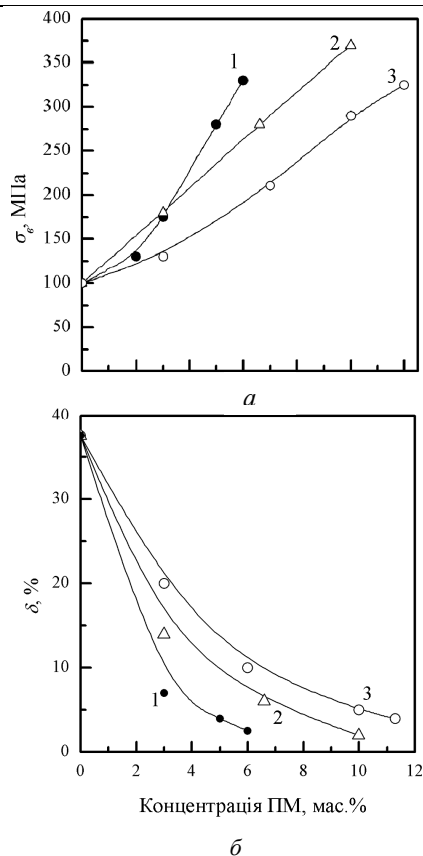


Рис. 4. Залежності межі міцності (а) та відносного подовження (б) сплавів, отриманих екструзією швидко охолоджених фольг, від концентрації ТМ: 1 – Al-Fe (●), 2 – Al-Cr (Δ), 3 – Al-Mn (○)

Як видно, для всіх досліджених сплавів, з підвищенням концентрації перехідного елемента межа міцності прутків, збільшується у 3–3,5 раза, досягаючи значень 325–370 МПа. При цьому пластичність сплавів знижується від ~37 до 2%. Найбільший темп зміцнення (40 МПа на 1мас.%) простежено у сплавах Al-Fe, найменший (20 МПа на 1мас.%) – у сплавах Al-Mn.

Межа міцності сплавів Al-Cr зростає майже лінійно, сягаючи рівня 370 МПа у сплавах 10 мас.%Cr. Показово, що наведене значення σ_y майже удвічі перевищує властивості сплавів аналогічного складу, отриманих компактуванням гранул [1]. Звідси робимо висновок, що для створення високоміцних алюмінієвих сплавів за допомогою технології гарячої екструзії швидкозагартовані луски є більш перспективним напівфабрикатом порівняно з гранулами, які отримують розбрикуванням розплаву з таким охолодженням крапель у воді. Важливим результатом виконаних досліджень є також те, що високі міцнісні властивості продуктів швидкого загартування значною мірою зберігаються у пресованих прутках, незважаючи на досить високі (623–673 К) температури технологічних нагрівів. Швидше за все цей ефект є наслідком процесів

виділення з перенасиченого твердого розчину надлишкових фаз, які відбуваються безпосередньо у ході гарячої екструзії. З цього погляду є доцільними подальші поглиблені дослідження початкових стадій розпаду твердих розчинів у швидко загартованих сплавах Al-ПМ, які дають змогу оптимізувати термічні режими екструзії та покращити комплекс механічних властивостей масивних виробів.

Виконані структурні дослідження та механічні випробування сплавів Al - (ПМ - Mn, Cr, Fe, Ni, V), які отримували методом ЗРС та подальшою гарячою екструзією швидко охолоджених напівфабрикатів. Показано, що загартування розплавів зі швидкостями $\sim 10^6$ К/с призводить до підвищення межі міцності у 3,5–5 разів порівняно з литими сплавами відповідних складів, що пояснюється формуванням аномально пересичених твердих розчинів та квазіевтектичних сумішей фаз.

Визначені технологічні режими (температура, тиск, коефіцієнт витягування) гарячої екструзії, які забезпечують добру якість прутків та механічні властивості за кімнатної температури ($\sigma_b = 325\text{--}370$ МПа, $\delta = 2\text{--}4\%$), котрі є сумірними з відповідними характеристиками високоміцних Al – сплавів серійного виробництва.

З'ясовано, що причинами високої міцності сплавів Al-ПМ, отриманих гарячою екструзією, є зберігання основних морфологічних особливостей мікроструктури продуктів швидкого загартування, а також ефект дисперсійного зміцнення на ранніх стадіях розпаду пересичених твердих розчинів.

1. *Елагин В.И.* Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами / В.И. Елагин. – М. : Metallurgiya, 1975. – 239 с.
2. *Мирошниченко И.С.* Закалка из жидкого состояния / И.С. Мирошниченко. – М. : Metallurgiya, 1982. – 162 с.
3. *Якунин А.А.* Влияние закалки из расплава и термической обработки на структуру и свойства сплавов Al-Mn / А.А. Якунин, И.И. Осипов, В.И. Ткач, А.Б. Лысенко // Физ. мет. и металловед. – 1977. – Т. 43. – 140 с.
4. *Силка Л.Ф.* Влияние закалки из жидкого состояния на структуру и свойства сплавов алюминия с переходными металлами / Л.Ф. Силка, А.Б. Лысенко, А.А. Якунин // Вопросы формирования метастабильной структуры сплавов. Межвуз. сборн. науч. трудов. – Днепропетровск, 1984. – С. 89–95.
5. *Силка Л.Ф.* Кинетика изменения свойств при нагреве быстро охлажденных сплавов на основе системы Al – Fe / Л.Ф. Силка, А.Б. Лысенко, Н.И. Варич, Н.Н. Прасол // Вопросы формирования метастабильной структуры сплавов. Межвуз. сборн. науч. трудов. – Днепропетровск, 1983. – С. 180–184.
6. *Лысенко А.Б.* Расчет скорости охлаждения при закалке сплавов из жидкого состояния / А.Б. Лысенко, Г.В. Борисова, О.Л. Кравец // Физика и техника высоких давлений. – 2004. – Т. 14, № 1. – С. 44–53.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOYS WITH TRANSITION METALS OBTAINED BY EXTRUSION OF FAST-QUENCHED FOILS**A. Lysenko¹, A. Yakunin², L. Silka², T. Kalinina¹**

¹*Dneprodzerzhinsk State Technical University Metalurgical Department
Dneprostroeskaya Str., 2, 51918 Dneprodzerzhinsk, Ukraine
e-mail: ablysenko@bigmir.net*

²*Dnipropetrovsk National University
Naykova Str., 13, 49050 Dnipropetrovsk, Ukraine*

Investigations of phase composition, microscopic structure and mechanical properties of alloys of aluminium with transition metals (TM-Cr, Fe, V, Ni, etc.) which have been obtained by quenching from a liquid state with cooling rates $\sim 10^5$ – 10^6 K/c with the subsequent hot extrusion of rapid quenched yields are fulfilled. It is shown, that in structure rapid quenched alloys Al-TM are fixed supersaturated solid solutions on the basis of aluminium and semi-eutectic mixtures of a solid solution with dispersion particles of primary aluminides. Structural modifications which are a consequence of nonequilibrium crystallisation, are accompanied a fortification of alloys Al-TM to level MPa. It is established, that the most important morphological indications of a microscopic structure of rapid quenched alloys and their high mechanical properties (325–370 MPa) remain in bars with diameter of 10 mm which have been obtained on such conditions of an extrusion: temperature 623–673 K, pressure 883–1079 MPa, factor of an extraction of 50–52%. Results of investigations indicate the perspectivity of use rapid cooled alloys Al-TM, as semimanufactured materials for creation of new materials with high specific strength.

Key words: quenching from liquid, extrusion, metastable structural states, mechanical properties.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ С ПЕРЕХОДНЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСТРУЗИЕЙ БЫСТРО ЗАКАЛЕННЫХ ФОЛЬГ**О. Лысенко¹, О. Якунин², Л. Силка², Т. Калинина¹**

¹*Днепродзержинский государственный технический университет
ул. Днепробудивська, 2, 51918 Днепродзержинск, Украина
e-mail: ablysenko@bigmir.net*

²*Днепропетровский национальный университет
ул. Научная, 13, 49050 Днепропетровск, Украина*

Проведены исследования фазового состава, микроструктуры и механических свойств сплавов алюминия с переходными металлами (ПМ – Mn, Cr, Fe, V), полученных закаливанием из жидкого состояния со скоростью охлаждения $\sim 10^5$ – 10^6 К/с и дальнейшей горячей экструзией продуктов быстрого закаливания. Показано, что в структуре быстро охлажденных сплавов Al–ПМ фиксируются перенасыщенные твердые растворы на основе алюминия и квазиэвтектические смеси твердого раствора с

дисперсными частицами первичных алюминидов. Структурные изменения, которые являются следствием неравновесной кристаллизации, сопровождаются повышением прочности сплавов Al-ПМ до уровня 400-600 Мпа. Установлено, что важнейшие морфологические признаки микроструктуры быстро закаленных сплавов и их высокие свойства прочности (325-370 Мпа) сохраняются в прутках диаметром 10 мм, которые были получены при следующих режимах экструзии: температура 623–673 К, давление 883–1079 Мпа, коэффициент вытягивания 50–52%. Результаты исследований свидетельствуют о перспективности использования быстро охлажденных сплавов Al-ПМ как полуфабрикатов для создания новых материалов с высокой удельной прочностью.

Ключевые слова: закаливание из жидкого состояния, горячая экструзия, метастабильные структурные состояния, механические свойства.

Стаття надійшла до редколегії 29.05.2009

Прийнята до друку 07.06.2010