

## Дослідження структури, механічних властивостей і корозійної стійкості деформованих напівфабрикатів сплавів Al—5Mg, легованих Sc та перехідними і рідкісноземельними металами

Ю. В. Мільман, Н. П. Захарова, М. О. Єфімов, М. І. Даниленко,  
В. А. Гончарук

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,  
Київ, e-mail: milman@ipms.kiev.ua

*Досліджено шляхи підвищення механічних характеристик листів товщиною 3 мм сплавів Al—5Mg при збереженні високої корозійної стійкості за рахунок легування Sc, Zr, Ti, Ce, Nb. Показано, що завдяки наявності когерентних з матрицею частинок  $Al_3(Sc, Zr)$  в листах сплавів, легованих Sc та Zr, не спостерігаються ознаки рекристалізації. На основі дослідження фізичного розширення дифракційних ліній зроблено висновок про вплив скандію на збільшення внутрішніх напружень та збереження деформаційного зміцнення. Дослідні леговані сплави мають характеристики міцності, на 17—47% вищі за такі для стандартних сплавів типу AMg5 без скандію при збереженні задовільної пластичності. Руйнування сплавів, що досліджено, відбувається по в'язкому ямковому механізму. Встановлено, що сплав, легований скандієм, у вихідному стані має швидкість корозії нижчу, ніж в нелегованому. Після відпалу при температурі 175 °C впродовж 10 год він має в два рази вищий рівень опору корозійному руйнуванню, ніж базовий сплав.*

**Ключові слова:** алюмінієві сплави, легування, міцність, пластичність, корозійна стійкість.

### Вступ

Конструктори сучасної техніки висувають до технічних характеристик алюмінієвих сплавів підвищені вимоги, які на даний момент не досягаються при застосуванні вже розроблених і впроваджених у виробництво сплавів. В економічно розвинених країнах, крім літакобудування, алюмінієві сплави широко використовуються для виготовлення залізничних вагонів, кузовів автомобілів, у суднобудуванні. Перспективність алюмінієвих сплавів для будівельних конструкцій підтверджується техніко-економічними розрахунками та багаторічною світовою практикою в області спорудження різних будівельних об'єктів.

Основними вимогами, що висуваються до алюмінієвих сплавів, призначених для транспортного машинобудування, є висока питома міцність, задовільна корозійна стійкість, високий опір крихкому руйнуванню і високі показники зварюваності. Усім цим вимогам відповідають алюмінієві сплави системи Al—Mg. Актуальним в розробці сучасних алюмінієвих сплавів Al—Mg, що деформуються, є підвищення характеристик міцності при збереженні високої корозійної стійкості.

© Ю. В. Мільман, Н. П. Захарова, М. О. Єфімов, М. І. Даниленко,  
В. А. Гончарук, 2014

Як відомо, малі домішки рідкісноземельних металів і скандію (0,2—0,3% (ат.)) модифікують структуру, нейтралізують шкідливий вплив неметалевих домішок, значно підвищують механічні та технологічні властивості сплавів алюмінію [1].

Згідно з класифікацією легуючих елементів по відношенню до "скандієвого ефекту" підвищення механічних властивостей алюмінію, Ti та Nb відносяться до елементів, які підвищують або не знижують суттєво температуру солідуса  $T_s$  алюмінію і застосовуються для додаткового легування алюмінієвих сплавів з метою досягання високого рівня механічних властивостей. Також Zr, Ce та Ti є елементами, які частково заміщують Sc в інтерметалідних частинках  $Al_3Sc$  при збереженні зміцнюючого ефекту цих частинок, що знижують витрати Sc [2]. Крім того, згідно з роботами [3, 4], рідкісноземельні метали та Ti позитивно впливають на корозійну стійкість алюмінієвих сплавів.

Метою даної роботи є дослідження шляхів підвищення механічних характеристик листів сплавів Al—Mg при збереженні високої корозійної стійкості.

### Матеріали та методика дослідження

Зливки масою 50 кг і  $\varnothing 150$  мм з дослідних сплавів системи Al—Mg виготовлено за допомогою вакуумного магнітодинамічного обладнання з регульованим індукційним нагрівом металу, електромагнітним перемішуванням, вакуумуванням розплаву, його фільтрацією та напівбезперервним методом лиття з великою швидкістю охолодження. Домішки присаджували у вигляді лігатур.

Дослідні сплави системи Al—Mg мали наступні склади (% (мас.)): 1 — Al—5Mg—0,6Mn; 2 — Al—5Mg—0,6Mn—0,2Sc—0,1Zr—0,02Ti; 3 — Al—5Mg—0,6Mn—0,2Sc—0,1Zr—0,04Ce—0,05Nb.

Оптимальну температуру екструзії визначено з урахуванням роботи пресового обладнання та високих механічних властивостей здеформованих сплавів, а саме — 350 °C. Гарячу прокатку провадили при нагріві слябів до 300—350 °C. Рівномірність нагріву по всьому перерізу забезпечували витримкою впродовж 1 год. Для зменшення анізотропії механічних властивостей прокатку сляба починали з напрямку, перпендикулярного напрямку екструзії, а після досягнення товщини 20 мм лист повертали на 90°. З цією ж метою прокатування проводили в реверсивному режимі, кожний наступний прохід відбувався в напрямку, протилежному попередньому. В результаті гарячої прокатки отримано листи товщиною 3 мм.

Проводили механічні випробування зразків на розтягування з записом кривої деформації у координатах навантаження  $P$ —подовження  $\Delta l$  на машині 1246 типу INSTRON. Швидкість переміщення захвату зразка — 0,2 мм/хв, що відповідає швидкості деформації  $2,22 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . З кривих деформації розраховували межі міцності  $\sigma_B$  і плинності  $\sigma_{0,2}$  та подовження до руйнування  $\delta$ . Для випробувань на розтягування з листів вирізали пласкі зразки довжиною  $l = 20$  мм та шириною  $b = 3$  мм). Твердість листів визначено на твердомері Віккерса.

Структурні дослідження виконано в металографічному мікроскопі МИМ-9 та у просвічувальному електронному мікроскопі (ПЕМ) JEOL-100CX,

поверхні руйнування вивчали в скануючому електронному мікроскопі Superprobe-733. Фізичне розширення рентгенівських дифракційних ліній вимірювали за допомогою дифрактометра ДРОН-2,0. До розрахунку брали лінію (422) Al.

Корозійну стійкість листів оцінювали гравіметричним методом по швидкості корозії. Випробування провадили при температурі 18—22 °С в розчині, який викликає як загальну, так і міжкристалітну корозію (30 г/л NaCl + 10 г/л HCl) та має густину 1,19 г/см<sup>3</sup>. Підготовку зразків розміром 50 × 15 мм для випробувань стійкості проти загальної корозії здійснювали згідно з ГОСТ 9.913-90.

### Результати дослідження та їх обговорення

Мікроструктура листів базового складу є частково рекристалізованою (рис. 1, *a*). Структура листів зі скандієм є нерекристалізованою з наявністю великої кількості інтерметалідів, рівномірно розташованих по площі зразків (рис. 2, *б*, *в*). За даними дослідження структури в скануючому електронному мікроскопі, розміри частинок у базовому сплаві досягають 6—8 мкм. В листах сплавів, легованих скандієм, розміри зміцнюючих частинок дещо менші і складають 4—6 мкм.

В екструдованих слябах всіх досліджених сплавів в середині витягнутих вздовж напрямку прокатки зерен формуються рівновісні або злегка видовжені дислокаційні комірки з низькою густиною дислокацій та тонкими, досить досконалими межами (рис. 2, *a*). Як у середині, так і в межах дислокаційних комірок видно темні частинки типу MnAl<sub>6</sub>. Після прокатки до товщини 20 мм подовжені межі комірок визначені ще нечітко, на знімку видно багато вигинних контурів (рис. 2, *б*). На рис. 2 зображено такий контур в темному полі. З ростом ступеню обтиску (рис. 2, *з—e*) чіткіше виявляється структура з комірками, витягнутими вздовж напрямку прокатування, збільшуються розорієнтування кристалічних ґраток комірок та густина дислокацій в них, а товщина комірок зменшується.

Дислокаційна структура всіх досліджених сплавів в границях і об'ємі витягнутих у напрямку прокатки зерен є полігонізованою (рис. 3). Полігонізація комірок в більшому ступені пройшла в листах базового складу. Дислокації, що формують комірки, призводять до значних пружних викривлень ґратки. Величина цих викривлень оцінена за розрахунками фізичного розширення β рентгенівських дифракційних ліній (422) алюмінієвої матриці (табл. 1). При порівнянні значень фізичного розширення рентгенівських дифракційних ліній β досліджуваних сплавів встановлено,

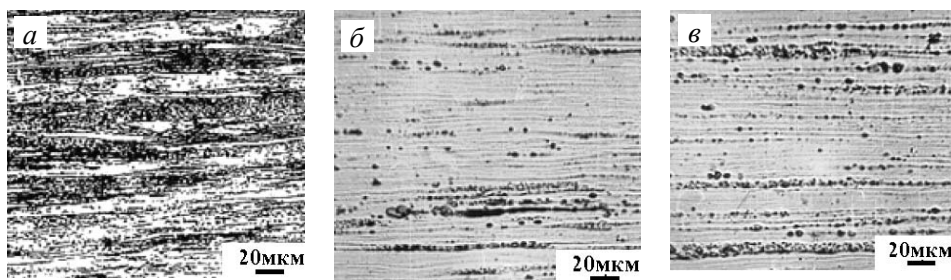


Рис. 1. Мікроструктура прокатаних листів сплавів 1—3 (*a—в* відповідно) у поздовжньому перерізі, травлення у реактиві Келлера.

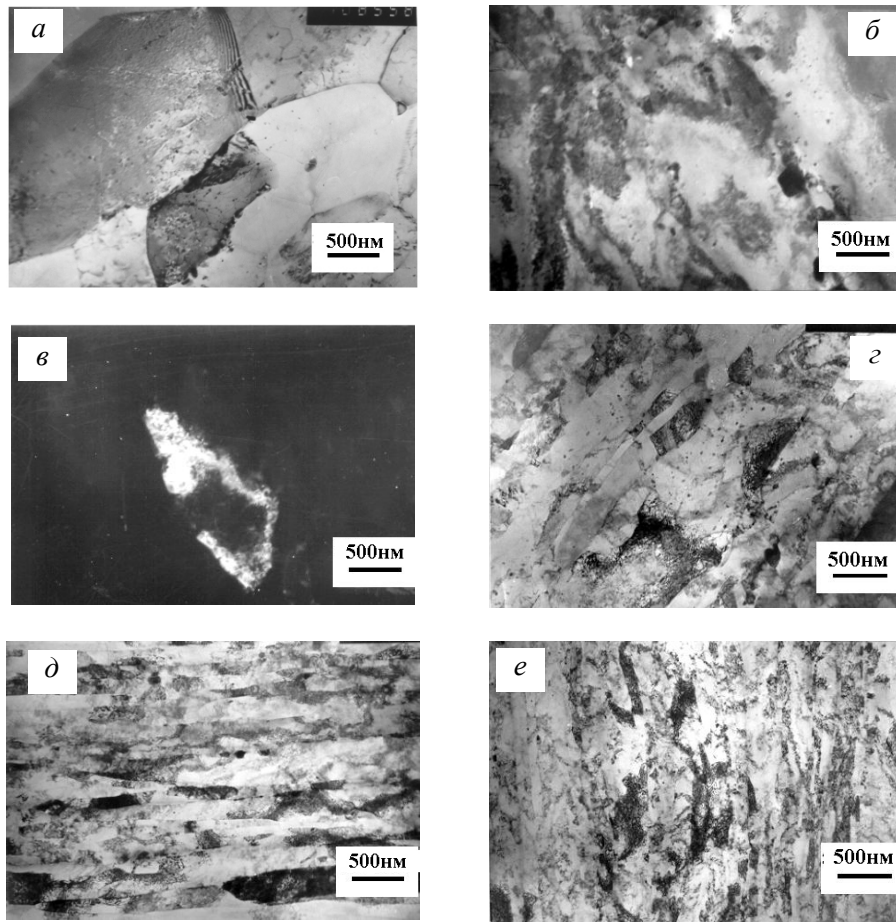


Рис. 2. Розвиток дислокаційної структури при обробці тиском зливка сплаву 3: *a* — екструдований сляб товщиною 35 мм; *б* — прокат до товщини 19,8 мм за 6 проходів, зображення *б* в темному полі рефлекса  $\bar{g} = [2\bar{2}0]$ ; *в* — прокат до товщини 11,3 мм після повороту заготовки на  $90^\circ$ ; *д* — прокат до товщини 6 мм; *е* — лист товщиною 3,4 мм.

що при однакових умовах прокатування у базовому складі  $\beta$  в 2 рази менше. Це зумовлено впливом скандію на збільшення внутрішніх напружень та збереження деформаційного зміцнення.

При дослідженні тонкої структури сплавів 2 та 3 в нагартваному стані не вдалося виявити когерентні інтерметалідні частинки  $Al_3(Sc, Zr)$ . Фаза  $Al_3(Sc, Zr)$  має кристалічну ґратку типу  $L1_2$  та когерентно пов'язана з матрицею алюмінію [1]. Згідно з роботою [5], в деформованих напівфабрикатах з великою густиною дислокацій виявлення когерентних частинок утруднене взаємодією полів пружних напруг біля частинки і дислокації. Наявність дислокацій може спричинити часткове розчинення інтерметалідів під час деформації. Крім того, магній збільшує параметр кристалічної ґратки твердого розчину, наближуючи його до параметра  $Al_3Sc$  і погіршуючи умови контрасту на цих когерентних частинках.

Для виявлення когерентних інтерметалідних частинок  $Al_3(Sc, Zr)$  зразки листів сплавів 2 та 3 піддали відпалу при  $500^\circ C$  1 год. При цьому

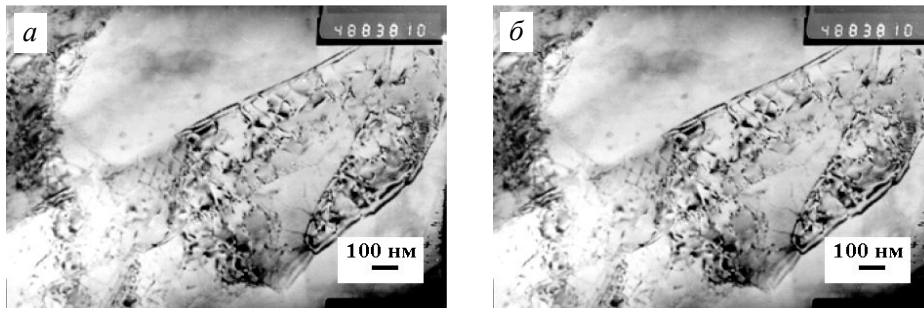
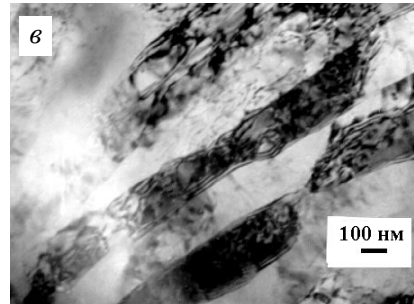


Рис. 3. Дислокаційна структура в комірках прокатаних листів сплавів 1—3 (а—в відповідно), боковий переріз.



збереглася комірчаста структура (рекристалізація листів цих сплавів не відбувається до температур, близьких до температури плавлення).

При цьому виявлено зміцнюючі частинки  $Al_3(Sc, Zr)$ , когерентно пов'язані з матрицею алюмінію. Ці частинки мають характерний контраст (рис. 4, б), їх середній розмір після відпалу складає 50—80 нм.

Руйнування зразків прокатаних листів всіх досліджених складів відбувається за механізмом, який Ешбі назвав "злиття пор зсувом" [6]. Цей механізм описується як результат зародження пор та їх наступної коалесценції шляхом катастрофічного злиття в смузі зсуву. Зразки листів сплавів системи Al—Mg руйнуються при розтягуванні по одній або двох взаємно перпендикулярних площинах, нахилених під кутом  $45^\circ$  до осі розтягування майже без утворення шийки, поверхня руйнування візуально виглядає майже пласкою. Дослідження цієї поверхні в скануючому електронному мікроскопі виявляє її цілком ямковий характер без слідів крихкого руйнування (рис. 5).

Руйнування за ямковим механізмом безпосередньо зумовлено локалізацією пластичної деформації, яка залежить від деформаційного зміцнення [6]: чим нижче цей темп, тим більше схильність до цієї локалізації, і цим визначається величина подовження зразка до руйнування  $\delta$ .

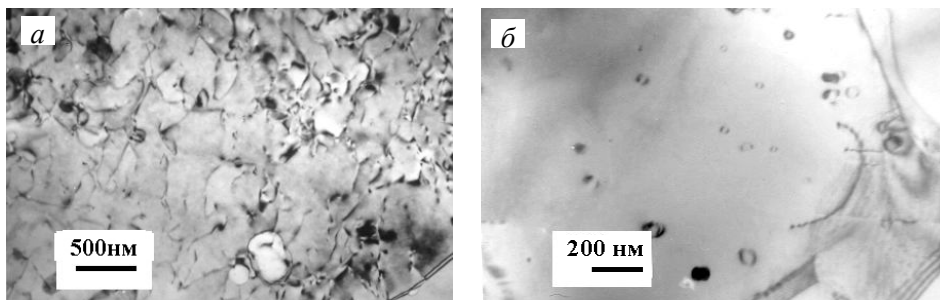


Рис. 4. Тонка структура листів зі сплаву 3, відпалених при  $500^\circ C$ , 1 год.

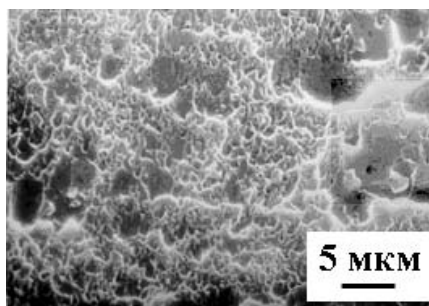


Рис. 5. Поверхня руйнування зразка листа зі сплаву 2.

Результати механічних випробувань, дослідження твердості і фізичного розширення рентгенівських ліній алюмінію наведені в табл. 1. Отримані дані показали, що обране легування позитивно впливає

на підвищення механічних властивостей. Механічні властивості листів зі сплаву 3 перевищують такі для базового сплаву: по границі міцності — на 27% та по границі плинності — на 47%. При цьому легування базового сплаву Sc, Zr, Ti, Ce, Nb суттєво (на 24%) підвищило твердість листів.

Вплив легування скандієм на загальну корозійну стійкість вивчали після обробки листів при температурі, типовій для різних операцій при виготовленні кінцевих виробів (відпал при 175 °С застосовується в промисловості для зняття нагарування та при фарбуванні). Результати випробувань наведені в табл. 2. З даних табл. 2 випливає, що сплав, легований скандієм, у вихідному стані має швидкість корозії нижчу, ніж нелегований. Встановлено, що як для сплаву 1, так і для сплаву 2 швидкість корозії зростає після нагріву при температурі 175 °С впродовж 10 год, але при цьому сплав 2, легований скандієм, має в два рази вищий рівень опору корозійному руйнуванню при цій температурі, ніж сплав 1.

Металграфічні дослідження випробуваних на загальну корозію зразків всіх дослідних сплавів показали, що вони піддаються в основному загальній та розшарувальній корозії.

**Т а б л и ц я 1. Механічні властивості листового прокату при випробуванні на розтягування**

Сплав	Напрямок осі розтягування відносно прокатки	$\sigma_{0,2}$ , МПа	Зростання $\sigma_{0,2}$ , %	$\sigma_B$ , МПа	Зростання $\sigma_B$ , %	$\delta$ , %	$HV$ , МПа	$\beta$ , град
1	Вздовж	327	—	406	—	13,9	1154	0,74
	Поперек	309	—	388	—	19,2		
2	Вздовж	427	31	475	17	10,4	1415	1,45
	Поперек	419	36	478	23	8,9		
3	Вздовж	483	48	513	26	7,8	1431	1,32
	Поперек	454	47	498	28	10,6		

**Т а б л и ц я 2. Корозійна стійкість листів сплавів системи Al—Mg**

Сплав	Середня швидкість корозії, г/м <sup>2</sup> ·год	
	Вихідний стан	Відпал 175 °С, 10 год
1	0,5425	8,9580
2	0,4316	4,3116

## Висновки

В структурі листів сплавів типу АМг5, легованих Sc та Zr, не спостерігаються ознаки рекристалізації за рахунок наявності когерентних з матрицею частинок  $Al_3(Sc, Zr)$ , які стабільні до температури 500 °С і ефективно блокують процеси рекристалізації.

Фізичне розширення рентгенівських дифракційних ліній (422) алюмінію в листах зі сплаву, легованого скандієм, в 2 рази більше, ніж в базовому складі. Це зумовлено впливом скандію на збільшення внутрішніх напружень та збереження деформаційного зміцнення.

Дослідні сплави мають характеристики міцності на 17—47% вищі за характеристики стандартних сплавів типу АМг5 без скандію при збереженні задовільної пластичності.

Руйнування листів сплавів, що досліджене, відбувається по в'язкому ямковому механізму під кутом 45° до напрямку розтягування по площині ковзання.

Додавання до складу дослідних сплавів Се та Nb дозволяє підвищити характеристики міцності.

Встановлено, що сплав, легований скандієм, у вихідному стані має швидкість корозії нижчу, ніж в нелегованому, після відпалу при температурі 175 °С впродовж 10 год — у два рази вищий рівень опору корозійному руйнуванню, ніж базовий сплав.

1. *Milman Yu. V.* Scandium-effect on increasing mechanical properties of aluminum alloys // High Temperature Mater. and Proc. — 2006. — **25**, No. 1—2. — P. 1—10.
2. *Мильман Ю. В.* Скандиевый эффект повышения прочности алюминиевых сплавов / Ю. В. Мильман, Д. В. Лоцко, А. И. Сирко // Научные труды III Междунар. семинара "Современные проблемы прочности" им. В. А. Лихачева. — Старая Русса, 1999. — Т. 1. — С. 277—283.
3. *Савицкий Е. М.* Вопросы теории и применения редкоземельных металлов / Е. М. Савицкий, В. Ф. Терехова. — М. : Наука, 1964. — 270 с.
4. *Вязовикина Н. В.* Новые высокопрочные коррозионно-стойкие сплавы алюминия / Н. В. Вязовикина, Ю. В. Мильман, А. И. Сирко // Проблемы коррозий та протикорозійного захисту матеріалів. — 2002. — Спец. вип. № 3. — С. 554—558.
5. *Лоцко Д. В.* Структура и механические свойства сплава Al—Zn—Mg, легированного скандием и цирконием / [Д. В. Лоцко, Ю. В. Мильман, Н. А. Ефимов и др.] // Металлофиз. новейшие технологии. — 1999. — **21**, № 6. — С. 9—16.
6. *Tierlinck D.* Fracture mechanism maps in itss ipace / [D. Tierlinck, F. Zok, J. D. Embury, M. F. Ashby] // Acta Metal. — 1988. — **36**, No. 5. — P. 1201—1228.

## Исследование структуры, механических свойств и коррозионной стойкости деформированных полуфабрикатов из сплавов Al—5Mg, легированных Sc, переходными и редкоземельными металлами

Ю. В. Мильман, Н. П. Захарова, Н. А. Ефимов, Н. И. Даниленко,  
В. А. Гончарук

*Исследованы пути повышения механических характеристик листов толщиной 3 мм сплавов Al—5Mg при сохранении высокой коррозионной стойкости за счет*

легирования Sc, Zr, Ti, Ce, Nb. Показано, что при наличии когерентных с матрицей частиц  $Al_3(Sc, Zr)$  в структуре листов сплавов, легированных Sc и Zr, не наблюдаются признаки рекристаллизации. На основе исследования физического уширения дифракционных линий сделан вывод о влиянии скандия на увеличение внутренних напряжений и сохранение деформационного упрочнения. Опытные легированные сплавы имеют характеристики прочности, на 17–47% выше таковых для стандартных сплавов типа АМг5 без скандия при сохранении удовлетворительной пластичности. Разрушение исследованных сплавов происходит по вязкому луночному механизму. Установлено, что сплав, легированный скандием, в исходном состоянии имеет скорость коррозии ниже, чем нелегированный. После отжига при температуре 175 °С в течение 10 ч он имеет в 2 раза больший уровень сопротивления коррозионному разрушению, чем базовый сплав.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, легирование, прочность, пластичность, коррозионная стойкость.

### **Investigation of structure, mechanical properties and corrosion resistance of semi-products from Al—5Mg wrought alloys alloyed by Sc, rare earth and transition metals**

Yu. V. Milman, N. P. Zakharova, M. O. Iefimov, M. O. Danilenko,  
V. A. Goncharyk

*The methods for improving the mechanical characteristics of the 3 mm sheets Al—5Mg alloy, with high corrosion resistance due to alloying by Sc, Zr, Ti, Ce, Nb were studied. It is shown that in the structure of sheets are not recrystallization due to coherent with the matrix particles  $Al_3(Sc, Zr)$ . Conclusion about the effect of scandium on the increase of internal stress and saving of strain hardening was made on the basis of studies of the physical broadening of the diffraction lines. Developed alloys have satisfactory plasticity and strength characteristics on 17–47% higher than standard Al—5Mg alloys without scandium. Fracture of these alloys occurs by ductile pit mechanism. It has been established that the alloy with scandium in an initial state has a corrosion rate lower than unalloyed. After annealing at 175 °C during 10 hours alloy with scandium has twice higher level of corrosion resistance than the base alloy.*

**Keywords:** aluminum alloys, alloying, strength, plasticity, corrosion resistance.