

PACS numbers: 61.72.S-, 62.20.F-, 81.05.Ni, 81.40.Cd, 81.40.Ef, 81.65.Kn, 82.45.Bb

Влияние легирования на механические свойства и коррозионную стойкость высокопрочных эвтектических (α -Al + Mg₂Si) сплавов тройной системы Al–Mg–Si

Л. Г. Щербакова, А. В. Криницкий, Н. П. Коржова, Т. Н. Легкая*,
А. В. Самелюк

*Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины,
ул. Академика Кржижановского, 3,
03142 Киев, Украина*

**Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Академика Вернадского, 36,
03142 Киев, Украина*

Исследовано влияние легирования на механические и коррозионные свойства новых литейных сплавов алюминия. Сплавы были созданы на основе моновариантной (α -Al + Mg₂Si) эвтектики тройной системы Al–Mg–Si и дополнительно содержали цинк и медь для реализации дисперсионного упрочнения после соответствующей термической обработки. По прочностным характеристикам ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_b > 400$ МПа) эти сплавы относятся к группе высокопрочных литейных сплавов алюминия. Электрохимическими (вольт-амперометрическим, хронопотенциометрическим) и гравиметрическим методами было изучено коррозионное поведение этих сплавов в 3% растворе NaCl. Показано, что скорости коррозии легированных сплавов — очень низкие (< 10 мкА/см²) и согласно шкале коррозионной стойкости сплав, легированный цинком, является стойким, а легированный цинком

Corresponding author: Larysa Grygorivna Shcherbakova
E-mail: larisa_c@ukr.net

*I. M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, N.A.S. of Ukraine,
3 Academician Krzhyzhanovsky Str., UA-03142, Kyiv, Ukraine*

**G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Please cite this article as: L. G. Shcherbakova, A. V. Krinitskiy, N. P. Korzhova, T. M. Legka, and A. V. Samelyuk, Influence of Alloying on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of High-Strength Eutectic (α -Al + Mg₂Si) Alloys of the Al–Mg–Si Ternary System, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 9: 1239–1252 (2017) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.39.09.1239.

и медью — весьма стойким. Совокупность высоких механических и коррозионных свойств позволяет утверждать, что новые высокопрочные эвтектические (α -Al + Mg₂Si) сплавы тройной системы Al–Mg–Si способны конкурировать с промышленными литейными сплавами алюминия.

Ключевые слова: тройная система Al–Mg–Si, эвтектические сплавы, термическая обработка, механические свойства, коррозия.

Досліджено вплив легування на механічні та корозійні властивості нових ливарних стопів алюмінію. Стопи створено на основі моноваріантної (α -Al + Mg₂Si) евтектики потрійної системи Al–Mg–Si. Стопи додатково містили цинк і мідь для реалізації дисперсійного зміцнення після відповідного термічного оброблення. Електрохімічними (вольт-амперометричним, хронопотенціометричним) та гравіметричним методами вивчено корозійну поведінку цих стопів у 3% розчині NaCl. Показано, що відповідно до шкали корозійної стійкості стоп, легований Цинком, є стійким, а легований Цинком та Купрумом — вельми стійким ($< 10 \text{ мкА/см}^2$). Сукупність високих механічних і корозійних властивостей уможливує стверджувати, що нові високоміцні евтектичні (α -Al + Mg₂Si) стопи потрійної системи Al–Mg–Si спроможні конкурувати з промисловими ливарними стопами алюмінію.

Ключові слова: потрійна система Al–Mg–Si, евтектичні стопи, термічне оброблення, механічні властивості, корозія.

Effect of alloying on the mechanical and corrosion properties of new casting aluminium alloys is investigated. The alloys are fabricated on the base of monovariant (α -Al + Mg₂Si) eutectics of the Al–Mg–Si ternary system and, in addition, they contain zinc and copper to realize dispersion hardening after appropriate heat treatment. Corrosion behaviour of these alloys in the 3% NaCl solution is studied by electrochemical (voltamperometric, chronopotentiometric) and gravimetric methods. As shown, in accordance with corrosion resistance scale, the alloy doped with zinc is stable, and the alloy doped with zinc and copper is very stable ($< 10 \text{ }\mu\text{A/cm}^2$). The combination of high mechanical and corrosion properties allows us to assert that new high-strength eutectic (α -Al + Mg₂Si) alloys of the Al–Mg–Si ternary system can compete with industrial casting aluminium alloys.

Key words: ternary Al–Mg–Si system, eutectic alloys, heat treatment, mechanical properties, corrosion.

(Получено 12 августа 2017 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Сплавы алюминия благодаря уникальному сочетанию целого ряда свойств (низкая плотность, высокие тепло- и электропроводность, коррозионная стойкость и удельная прочность) незаменимы во многих отраслях техники, в частности, на транспорте они успешно конкурируют со сталью и чугуном. Современное машиностроение

уже невозможно представить без литейных алюминиевых сплавов, лидерами среди которых являются силумины (сплавы на основе двойной системы Al–Si). Несмотря на средний уровень их механических свойств по сравнению со свойствами сплавов других систем, более 90% фасонных отливок изготавливается именно из них [1]. Однако растущие требования к эксплуатационным характеристикам изделий требуют создания новых сплавов алюминия с повышенным уровнем свойств. В этом отношении перспективным направлением является переход от бинарных к более сложным системам, в которых имеются квазибинарные сечения эвтектического типа между твёрдым раствором и интерметаллидной фазой [2]. Например, эвтектические (α -Al + Mg₂Si) сплавы тройной системы Al–Mg–Si имеют по сравнению с силуминами целый ряд преимуществ. Отметим следующие из них: более высокая температура плавления эвтектики (α -Al + Mg₂Si) и достаточно широкая область существования моновариантного двухфазного эвтектического превращения $L \rightleftharpoons \alpha\text{-Al} + \text{Mg}_2\text{Si}$, что позволяет изменять соотношение компонентов сплавов с сохранением их фазового состава [3]. Характер фазовых равновесий в этой системе позволяет в несколько раз увеличить количество магния в твёрдом растворе алюминия по сравнению с традиционными силуминами. Таким образом, часть магния, остающегося в твёрдом растворе сплава после образования Mg₂Si, при дополнительном легировании может пойти на образование дисперсных частиц с его участием, которые будут выделяться в процессе соответствующей термической обработки. Такими элементами могут быть цинк и медь (элементы, обеспечивающие дисперсионное упрочнение наиболее высокопрочных деформируемых сплавов на основе системы Al–Zn–Mg–(Cu)).

С учётом вышеизложенного, авторами работы были разработаны новые литейные сплавы на основе тройной системы Al–Mg–Si, обладающие повышенными прочностными и литейными характеристиками [4, 5].

Отливки из алюминиевых сплавов применяются главным образом как конструктивные элементы, в связи с чем, их эксплуатационную надёжность и ресурс характеризуют, в основном, механические и антикоррозионные свойства [6]. Поэтому целью настоящей работы было изучение влияния легирования (цинка, меди в комбинации с переходными металлами Mn, Zr, Cr и Ti) на механические свойства и коррозионные характеристики эвтектических (α -Al + Mg₂Si) сплавов тройной системы Al–Mg–Si.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выплавку слитков проводили в электропечи сопротивления из чистых шихтовых материалов (алюминий, цинк) и лигатур. Для со-

здания на поверхности расплава химически пассивного слоя использовали флюс из смеси солей LiF и LiCl (в количестве 2% от веса слитка). Расплав выливали в разъемную медную изложницу в форме «треф-пробы», которая позволяет получать в процессе одной плавки слиток для механических и коррозионных испытаний (4 образца) и металлографического анализа. После выплавки и термической обработки слитков изучали их микроструктуру методами световой (Neophot-32) и трансмиссионной (ТЕМ) микроскопии (PHILIPS CM30) и проводили механические испытания на растяжение при температуре 20°C на испытательной машине 1246 типа INSTRON.

Основными методами исследования коррозионно-электрохимических характеристик образцов сплавов были электрохимические методы (вольт-амперометрический, хронопотенциометрический). Электрохимические исследования проводили с использованием компьютеризированного потенциостата-гальваностата PGSTAT 4-10 в 3-х электродной электрохимической ячейке ЯСЭ-2. Потенциалы измерены в растворе 3% NaCl относительно насыщенного хлор-серебряного электрода сравнения и приведены в тексте без пересчёта на стандартный водородный электрод. Испытания проводили в неперемешиваемом аэрированном растворе при температурах 20–25°C. Поляризационные кривые снимали в режиме линейного изменения потенциала со скоростью 1 мВ/с (вольт-амперометрический метод). Вспомогательным электродом служил платиновый электрод. Были получены зависимости изменения потенциала коррозии ($E_{кор.}$) во времени. Гравиметрические испытания проводили в течение 30 суток при полном погружении в 3% раствор NaCl образцов сплавов (размерами 20×5×5 мм³), поверхность которых вначале подвергали механической обработке и обезжириванию, а затем в течение 10 минут выдерживали на воздухе перед погружением в электролит. Результаты обрабатывали статистически с допустимой ошибкой ±5%. Поверхность образцов после коррозионных испытаний изучали на растровом электронном микроскопе Superprobe-733 (JEOL).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве объектов исследования были выбраны 3 сплава, химический состав которых (табл. 1) одинаков по основным химическим элементам (Al, Si, Mg), но отличался легирующими элементами: нелегированный доэвтектический сплав тройной системы Al–Mg–Si (сплав 1), в который в дальнейшем были введены цинк (сплав 2) и цинк с медью (сплав 3). Дополнительно для твёрдорастворного упрочнения в сплав 2 и сплав 3 вводили Cr, Mn, Zr, Ti в количествах, которые не приводят к существенному расширению интерва-

ТАБЛИЦА 1. Химический состав исследованных сплавов.

TABLE 1. Chemical composition of investigated alloys.

| Сплав | Содержание элементов, ат. % | | | | | | | | |
|---------|-----------------------------|------|----|------|-----|------|-----|-----|------|
| | Al | Si | Mg | Cr | Mn | Ti | Zn | Cu | Zr |
| Сплав 1 | 87,24 | 2,76 | 10 | – | – | – | – | – | – |
| Сплав 2 | 85,25 | 2,75 | 10 | 0,05 | 0,2 | 0,05 | 1,7 | – | – |
| Сплав 3 | 84,71 | 2,75 | 10 | 0,05 | 0,5 | 0,05 | 1,7 | 0,2 | 0,04 |

ла кристаллизации сплавов.

Структура этих сплавов (рис. 1) в литом состоянии характеризуется наличием первичных дендритов α -Al, эвтектики (α -Al + Mg_2Si) и небольшого количества неравновесной тройной эвтектики, расположенной по границам бинарной эвтектики.

Существенное влияние на механические характеристики ряда сплавов алюминия оказывают термовременные параметры термической обработки. Известно [1], что предпочтительной для получения высокой пластичности является глобулярная морфология фаз. Однако непосредственно после литья сплавов эвтектического типа получить её практически невозможно, вследствие чего возникает необходимость коагуляционной обработки литых слитков. С учётом этого обстоятельства были разработаны режимы термической обработки, способствующие, с одной стороны, выделению дисперсных частиц упрочняющих фаз, а с другой — коагуляции эвтектической составляющей [7, 8]. В результате таких исследований было определено, что после термической обработки сплавов по режиму Т6 по данным трансмиссионной электронной микроскопии (ТЭМ) и полуколичественного EDX-анализа в матрице сплавов 2 и 3 выделяются дисперсные частицы фаз, содержащих цинк ($T-Al_2Zn_3Mg_3$ и $\eta-MgZn_2$). При этом температура закалки способствовала фрагмента-

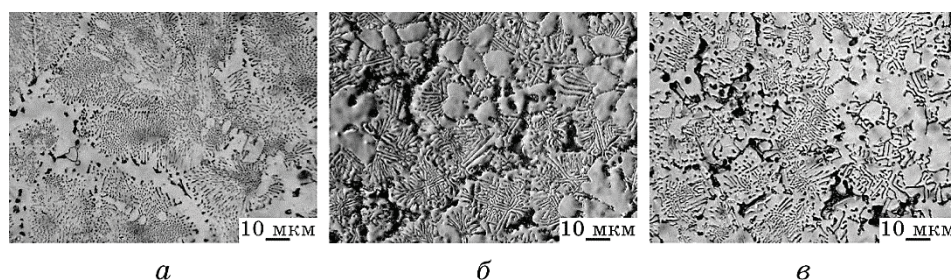


Рис. 1. Микроструктура сплавов 1 (а), 2 (б) и 3 (в) в литом состоянии.

Fig. 1. Microstructure of as-cast alloys 1 (a), 2 (b), and 3 (c).

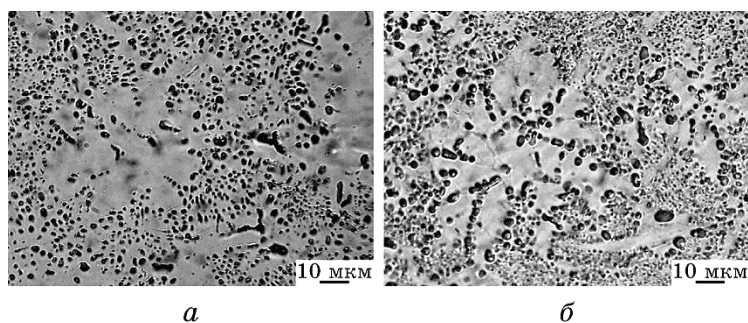


Рис. 2. Микроструктура сплавов 2 (а) и 3 (б) после термической обработки.

Fig. 2. Microstructure of alloys 1 (a) and 3 (b) after heat treatment.

ции и сфероидизации эвтектической составляющей (рис. 2).

Тонкая структура сплавов 2 и 3 подобна и показана на рис. 3 (ТЕМ). Медь, которой был легирован сплав 3, влияет на кинетику процессов образования упрочняющих фаз и входит в состав Zn-содержащих фаз [9].

Благодаря формированию большого числа дисперсных выделений в матрице α -Al (рис. 3) после термической обработки прочностные свойства легированных сплавов 2 и 3 существенно повышаются по сравнению с нелегированным сплавом 1 (рис. 4). Отметим, что механические свойства сплавов в значительной степени определяются как технологическими условиями получения слитков, так и режимами термической обработки (табл. 2).

Значения предела прочности новых сплавов свыше 400 МПа позволяют отнести их к группе высокопрочных литейных сплавов алюминия [10], а приведённые в табл. 2 сведения указывают на их высокий потенциал для замены существующих промышленных

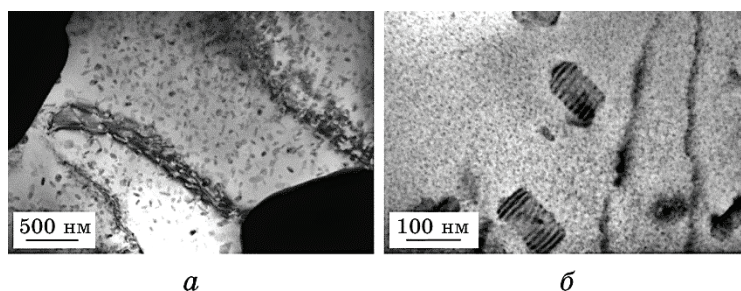


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение сплава 3 после термической обработки.

Fig. 3. Electron microscope image of alloy 3 after heat treatment.

ТАБЛИЦА 2. Механические свойства промышленных высокопрочных литейных сплавов алюминия и новых литейных сплавов тройной системы Al–Mg–Si.**TABLE 2.** Mechanical properties of commercial high-strength casting aluminium alloys and new casting alloys of the Al–Mg–Si ternary system.

| Сплав | Система | Механические свойства | | |
|---------------------------------------|----------------|-----------------------|------------------|--------------|
| | | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_b , МПа | δ , % |
| Промышленные литейные сплавы алюминия | | | | |
| А356 (США) | Al–Si | 165–207 | 220–262 | 2–6 |
| АЛ9 | Al–Si | 140 | 230 | 4 |
| АК8МЗч (ВАЛ8) | Al–Si–Cu | 340 | 400 | 4 |
| Magsimal-59 (Германия) | Al–Mg–Si–Mn | 140–220 | 250–350 | 9–18 |
| АМ4,5Кд (ВАЛ10) | Al–Cu | 360 | 490 | 5 |
| ВАЛ 12 | Al–Zn–Mg–Cu | 500 | 550 | 1,25 |
| АЦ6Н4 (РФ) | Al–Mg–Zn–Ni | 500 | 540 | 3 |
| Новые литейные сплавы алюминия [4, 5] | | | | |
| Сплав 2 | Al–Si–Mg–Zn | 354–502 | 473–552 | 1,6–5,3 |
| Сплав 3 | Al–Si–Mg–Zn–Cu | 448–524 | 554–575 | 1,25–3,7 |

аналогов.

На следующем этапе работы решалась задача определения коррозионных характеристик новых сплавов. Учитывая, что основой (около 90%) исследованных сплавов является алюминий, в работе было исследовано его коррозионное и электрохимическое поведение в 3% растворе NaCl. Начальный потенциал алюминия на 0,6–0,7 В положительнее, чем у исследованных сплавов (рис. 5). При экспозиции в растворе в течение 1,5 часов его потенциал коррозии ($E_{кор.}$) смещается с –0,88 В до –0,79 В, т.е. на 0,1 В. Из рисунка 5 видно, что для всех исследованных сплавов характер изменения потенциалов коррозии от времени экспозиции в растворе практически одинаков, однако за тот же промежуток времени $E_{кор.}$ сплавов смещается на 0,6–0,7 В в область более положительных значений. На базовом и легированном (Zn + Cu) сплавах (сплав 3) устанавливаются близкие по значению $E_{кор.}$ (около –0,75 В). На сплаве, легированном Zn (сплав 2), устанавливается значение $E_{кор.}$ на 0,08 В отрицательнее (–0,83 В) (табл. 3).

Вид зависимости $E_{кор.}$ – τ , полученный на сплавах, характерен для процессов селективного растворения более электроотрицательного, чем матрица, компонента. На участке резкого смещения потенциала ($\tau \leq 15$ мин) происходит селективное растворение Mg из твёрдого

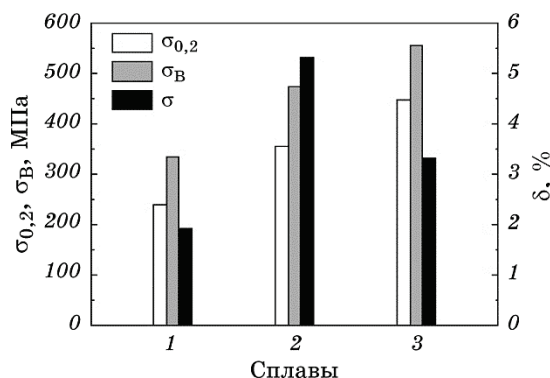
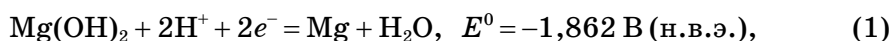


Рис. 4. Механические свойства сплавов 1–3 после термической обработки.

Fig. 4. Mechanical properties of alloys 1–3 after thermal treatment.

раствора и из эвтектики Mg_2Si по реакциям [11]:



Как следствие, при растворении сплавов в условиях коррозии наблюдалось появление в растворе белого коллоидного осадка ($MgSiO_3$). Для сплавов, легированных цинком (сплавы 2 и 3) при потенциалах, положительнее $-1,05$ В происходит также растворение цинксодержащих фаз, в частности, фазы $MgZn_2$, потенциал коррозии которой равен $-1,03$ В, и селективное растворение цинка из твёрдого раствора (рис. 5). Это приводит к некоторому отличию вида зависимости $E_{кор.} - \tau$ для цинксодержащих сплавов, особенно для сплава 2, по сравнению с базовым сплавом.

Несмотря на то, что стандартный потенциал ионизации алюми-

ТАБЛИЦА 3. Сравнительные коррозионные и электрохимические характеристики алюминия и его сплавов 1–3.

TABLE 3. Comparative corrosion and electrochemical characteristics of aluminium and alloys 1–3.

| Сплав | Потенциал коррозии, В | | Ток коррозии, $I_{кор.} \cdot 10^3$, мА/см ² | $E_{пт.}$, В | $\Delta E = (E_{кор.} - E_{пт.})$, В |
|---------|-----------------------|---------------|--|---------------|---------------------------------------|
| | $E_{уст.}$ | $E_{эл-хим.}$ | | | |
| Al | -0,79 | -0,79 | 3,20 | -0,64 | 0,14 |
| Сплав 1 | -0,76 | -0,75 | 6,30 | -0,70 | 0,06 |
| Сплав 2 | -0,81 | -0,82 | 8,00 | -0,81 | 0,01 |
| Сплав 3 | -0,74 | -0,74 | 7,90 | -0,72 | 0,02 |

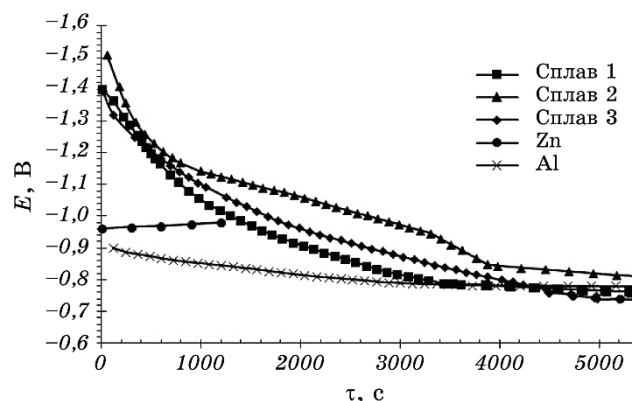
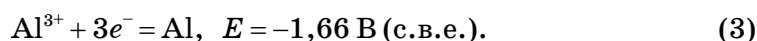


Рис. 5. Изменение потенциалов коррозии алюминия, цинка и сплавов 1–3 при экспозиции в 3% растворе NaCl.

Fig. 5. Changing of corrosion potentials of aluminium, zinc and alloys 1–3 during exposition in 3% NaCl solution.

ния, довольно отрицателен (3), оксидные плёнки на нём проявляют высокое защитное действие, равномерная коррозия алюминия невелика и, как правило, протекает на отдельных дефектах оксидной плёнки:



Селективное растворение Mg и Zn повышает количество вакансий в поверхностном слое и термодинамическую активность в нём алюминия. Кроме того, вследствие такого растворения возможно частичное подщелачивание приповерхностного слоя, способствующее образованию оксигидроксидов алюминия и приводящее к смещению $E_{\text{кор.}}$ в область значений, близких к $E_{\text{кор.}}$ чистого алюминия.

Скорости коррозии сплавов ($I_{\text{кор.}}$) были определены путём экстраполяции начальных линейных участков анодных и катодных поляризационных кривых в координатах $\lg I - E$ до их пересечения (рис. 6).

Значения $E_{\text{кор.}}$ и скорости коррозии алюминия и исследованных сплавов представлены в табл. 3. Видно хорошее совпадение установившихся значений $E_{\text{кор.}}$ и определённых электрохимическим методом. Алюминий, как и следовало ожидать, в условиях коррозии растворяется со скоростями в 2,0–2,5 раза меньшими, чем исследованные сплавы; на легированных сплавах они незначительно выше, чем на базовом сплаве, однако не превышают $1 \cdot 10^{-2} \text{ мА/см}^2$.

Депольризатором в аэрированных нейтральных растворах является кислород. Его восстановление на границе раздела металл–раствор, в конечном счёте, будет существенно влиять на скорость коррозии сплава. Защитная оксидная плёнка на чистом алюминии

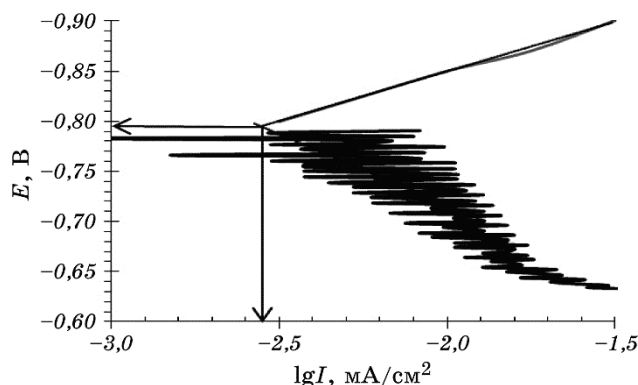


Рис. 6. Определение величин $E_{кор}$ и $I_{кор}$ из начальных участков анодной и катодной кривых, полученных на алюминии в 3% растворе NaCl.

Fig. 6. Determination of the values of E_{cor} and I_{cor} from the initial sections of the anodic and cathodic curves obtained for aluminium in a 3% solution of NaCl.

имеет низкую электронную проводимость, вследствие чего протекание как анодного, так и сопряжённого с ним катодного процесса сильно тормозятся. Оксидные плёнки на легированных алюминиевых сплавах более дефектны и проводимы, что способствует ускорению восстановления кислорода на поверхности, и, как следствие, ускорению коррозии сплавов, по сравнению с чистым алюминием.

На рисунке 7 представлены кривые анодного растворения алюминия и исследованных сплавов в 3% растворе NaCl. На анодной кривой, полученной на алюминии в области потенциалов от $E_{кор}$ до $E = -0,64$ В, наблюдается псевдопассивная область, где происходит репассивация образующихся питтингов, с чем связана наблюдаемая осцилляция анодных токов. При дальнейшем смещении потенциала всего на 0,02–0,03 В анодный ток увеличивается почти на два порядка ($E_{пит.}$), наблюдается устойчивое локальное растворение алюминия. Анодное поведение базового сплава идентично поведению чистого алюминия, однако потенциал резкого увеличения тока растворения сплава примерно на 0,06 В отрицательнее ($E_{пит.} = -0,70$ В), чем у алюминия.

Анодное растворение сплава 2, легированного цинком, происходит в области потенциалов почти на 0,1 В отрицательнее, чем базового сплава. Установлено, что основной характер растворения этого сплава в условиях коррозии локальный ($E_{пит.} = -0,80$ В).

Анодное растворение сплава 3 происходит в той же области потенциалов, что и в случае базового сплава. Однако близость значений $E_{кор.}$ ($-0,74$ В) и $E_{пит.}$ ($-0,72$ В) свидетельствует о возможности образования питтингов в условиях коррозии сплава, т.е. одновременное легирование базового сплава цинком и медью позволяет в

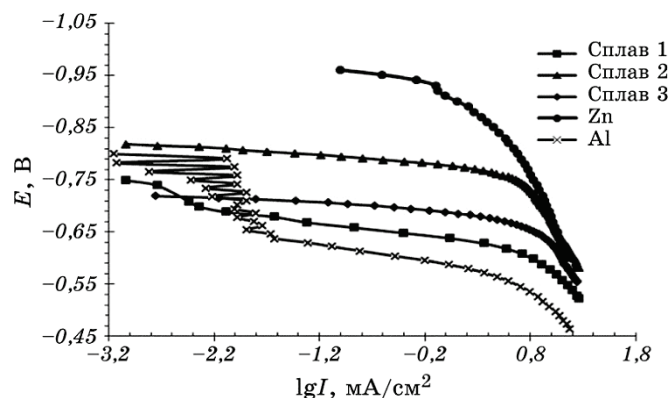


Рис. 7. Анодные кривые растворения алюминия, цинка и сплавов 1–3 в 3% растворе NaCl.

Fig. 7. Anodic dissolution curves of aluminium, zinc and alloys 1–3 in 3% NaCl solution.

некоторой степени уменьшить отрицательное влияние цинка на коррозионное и анодное растворение базового сплава.

В качестве критерия оценки стойкости сплава к локальному разрушению принята разница потенциалов $\Delta E = (E_{\text{кор.}} - E_{\text{пт.}})$. Из полученных данных следует (табл. 3), что устойчивое локальное растворение алюминия и базового сплава в условиях коррозии маловероятно. На легированных сплавах, особенно на сплаве легированном цинком, при $E_{\text{кор.}}$ поверхность будет растворяться преимущественно локально. Активация Al матрицы и её локальное растворение в легированных сплавах в области потенциалов, близких к $E_{\text{кор.}}$, становятся возможными вследствие образования большого количества дефектов в оксигидроксидной плёнке алюминия при растворении наноразмерных фаз, содержащих цинк и магний.

Результаты гравиметрических коррозионных испытаний сплавов (усреднённые по трём образцам) представлены в табл. 4. Рассчитанный массовый показатель скорости коррозии (K) в среднем составляет 0,001–0,0028 г/(м²·ч), что соответствует 0,005–0,01 мм/год. Согласно шкале коррозионной стойкости [12] все исследованные сплавы являются стойкими (сплав 2) или весьма стойкими (базовый сплав и сплав 3) в 3% растворе NaCl.

Исследование поверхности после коррозионных испытаний показало, что на образцах всех сплавов образуются плотные плёнки светло-серого цвета, дефектность которых зависит от состава сплава. В электролите появляется коллоидный осадок белого цвета (MgSiO₃), количество которого меньше при растворении базового сплава и больше при растворении сплава 2.

Изображение поверхности образцов сплавов 2, 3 после экспозиции (коррозии) в 3% растворе NaCl в течение 110 суток показано на рис. 8. Как видно, процессы деградации поверхности и дефектность образующейся плёнки более значительны на образцах сплава 2, ле-

ТАБЛИЦА 4. Результаты гравиметрических коррозионных испытаний алюминиевых сплавов.

TABLE 4. Results of gravimetric corrosion tests of aluminium alloys.

| Сплав | Вес образца, г | | Δ , г* | S, см ² | K | | Балл |
|-------|----------------|---------|-------------------|--------------------|-------------------------|--------|------|
| | до | после | | | г/(м ² ·час) | мм/год | |
| 1 | 0,51605 | 0,51595 | $1 \cdot 10^{-4}$ | 3,11 | $1 \cdot 10^{-3}$ | <0,005 | 2 |
| 2 | 0,56555 | 0,56525 | $3 \cdot 10^{-4}$ | 3,13 | $2,85 \cdot 10^{-3}$ | <0,01 | 3 |
| 3 | 0,53550 | 0,53540 | $1 \cdot 10^{-4}$ | 3,13 | $1 \cdot 10^{-3}$ | <0,005 | 2 |

* — потеря веса образцов при экспозиции в 3% растворе NaCl.

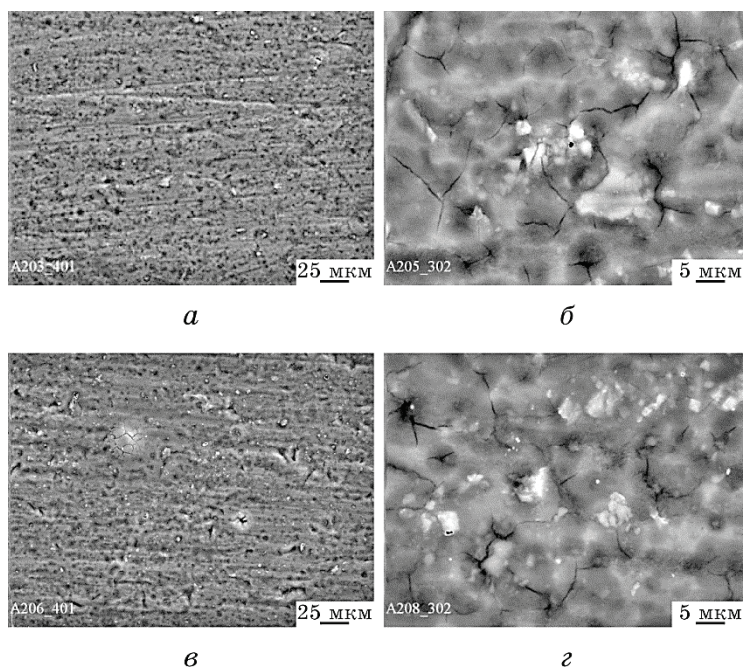


Рис. 8. Изображение поверхности образцов (в отражённых электронах) после экспозиции в 3% растворе NaCl в течение 110 суток: сплав 2 (а, б), сплав 3 (в, г).

Fig. 8. Image of surface of the samples (in reflected electrons) after exposition in 3% NaCl solution during 110 days: alloy 2 (a, б), alloy 3 (в, г).

гированного только цинком.

Таким образом, обнаруженные различия в коррозионном и анодном поведении литейных алюминиевых сплавов на основе тройной системы Al–Mg–Si обусловлены влиянием легирующих элементов.

4. ВЫВОДЫ

Приведённые в работе результаты исследования механических и коррозионных свойств новых высокопрочных эвтектических сплавов тройной системы Al–Mg–Si, легированных Zn и Cu, позволяют сделать следующие выводы.

1. Реализована идея создания высокопрочного литейного сплава на основе эвтектического (α -Al + Mg₂Si) сплава, матрица которого упрочнена дисперсными Zn, Cu-содержащими фазами, выделяющимися в процессе термической обработки. Получен сплав, по уровню механических свойств способный конкурировать с промышленными литейными сплавами алюминия ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_b > 400$ МПа).

2. Установлено, что устойчивое локальное растворение базового сплава в условиях коррозии маловероятно. Легирование базового сплава цинком облегчает анодную активацию Al-матрицы и увеличивает вероятность локального растворения сплава в условиях коррозии, а совместное легирование цинком и медью уменьшает склонность сплава к локальному растворению в условиях коррозии и приближает его по основным характеристикам ($E_{кор.}$, $E_{пит.}$, K) к базовому сплаву.

3. Показано, что в условиях коррозии в 3% растворе NaCl исследованные сплавы являются стойкими (сплав с цинком), или весьма стойкими (базовый сплав и сплав, легированный Zn + Cu).

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. V. S. Zolotarevsky, N. A. Belov, and M. V. Glazoff, *Casting Aluminum Alloys* (Amsterdam: Elsevier: 2007).
2. Т. Н. Легкая, О. М. Барабаш, Ю. В. Мильман, К. Э. Гринкевич, *Металлофиз. новейшие технол.*, **31**, № 4: 545 (2009).
3. O. M. Barabash, O. V. Sulzhenko, T. N. Legkaya, and N. P. Korzhova, *J. Phase Equilibria*, **22**, No. 1: 5 (2001).
4. Т. М. Легка, Ю. В. Мильман, Н. П. Коржова, Ю. М. Подрезов, Н. М. Мордовец, І. В. Воскобойник, К. Е. Гринкевич, В. Н. Мельник, *Високоміцний ливарний сплав на основі алюмінію*: Пат. на корисну модель № 95242 України. МПК (2014.01) С22С 21/00 С22С 21/06. Заявл. 21.07.14. Опубл. 10.12.15, Бюл. № 23.
5. Т. М. Легка, Ю. В. Мильман, Н. П. Коржова, Ю. М. Подрезов, Н. М. Мордовец, І. В. Воскобойник, К. Е. Гринкевич, В. Н. Мельник, *Високоміцний ливарний сплав на основі алюмінію*: Пат. 108965 України. МПК (2014.01) С22С 21/00 С22С 21/06. Заявл. 25.11.14. Опубл. 25.06.15, Бюл. № 12.
6. В. С. Золоторевский, *Металловедение и термическая обработка металлов*,

- № 7: 11 (1993).
7. Н. П. Коржова, Т. М. Легка, Н. М. Мордовець, В. І. Нечипоренко, *Металознавство та обробка металів*, № 2: 43 (2015).
 8. Ю. В. Мильман, Т. М. Легкая, Н. П. Коржова, В. В. Бойко, И. В. Воскобойник, К. В. Михаленков, Н. М. Мордовец, Ю. Н. Подрезов, *Электронная микроскопия и прочность материалов*, вып. 21: 30 (2015).
 9. Л. Ф. Мондольфо, *Структура и свойства алюминиевых сплавов* (Москва: Металлургия: 1979) (пер. с англ.).
 10. А. А. Абрамов, М. Д. Тихомиров, *Литейное производство*, № 5: 29 (2007).
 11. *Справочник по электрохимии* (Ред. А. М. Сухотин) (Ленинград: Химия: 1981).
 12. И. А. Клинов, *Коррозия химической аппаратуры и коррозионностойкие материалы* (Москва: Машиностроение: 1967).

REFERENCES

1. V. S. Zolotarevsky, N. A. Belov, and M. V. Glazoff, *Casting Aluminum Alloys* (Amsterdam: Elsevier: 2007).
2. Т. М. Легка, О. М. Барабаш, Ю. В. Мильман, Н. П. Коржова, and К. Е. Гринкевич, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **31**, No. 4: 545 (2009) (in Russian).
3. О. М. Барабаш, О. В. Сулженко, Т. Н. Легкая, and Н. П. Коржова, *J. Phase Equilibria*, **22**, No. 1: 5 (2001).
4. Т. М. Легка, Ю. В. Мильман, Н. П. Коржова, Ю. М. Подрезов, Н. М. Мордовец, I. V. Voskoboynyk, К. Е. Грынкевич, and V. N. Melnyk, *Vysokomitsnyy Lyvarnyy Splav na Osnovi Alyuminiyu* [High-Strength Cast Aluminium Alloy]: Patent of Ukraine No. 95242. Published December 10, 2015 (in Ukrainian).
5. Т. М. Легка, Ю. В. Мильман, Н. П. Коржова, Ю. М. Подрезов, Н. М. Мордовец, I. V. Voskoboynyk, К. Е. Грынкевич, and V. N. Melnyk, *Vysokomitsnyy Lyvarnyy Splav na Osnovi Alyuminiyu* [High-Strength Cast Aluminium Alloy]: Patent of Ukraine No. 108965. Published June 21, 2015 (in Ukrainian).
6. V. S. Zolotarevsky, *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, No. 7 (1993) (in Russian).
7. Н. П. Коржова, Т. М. Легка, Н. М. Мордовец, and В. І. Нечипоренко, *Металознавство та Обробка Металів*, No. 2 (2015) (in Ukrainian).
8. Ю. В. Мильман, Т. Н. Легкая, Н. П. Коржова, В. В. Бойко, I. V. Voskoboynyk, К. В. Мухаленков, Н. М. Мордовец, and Ю. Н. Подрезов, *Electronnaya Mikroskopiya i Prochnost' Materialov*, Iss. 21: 30 (2015) (in Russian).
9. L. F. Mondolfo, *Aluminum Alloys: Structure and Properties* (London–Boston: Butterworth & Co.: 1976).
10. А. А. Абрамов and М. Д. Тихомиров, *Liteynoe Proizvodstvo*, No. 5 (2007) (in Russian).
11. *Spravochnik po Elektrokhimii* (Ed. А. М. Sukhotin) (Leningrad: Khimiya: 1981) (in Russian).
12. I. A. Klinov, *Korroziya Khimicheskoy Apparatury i Korrozionnostoikie Materialy* [Corrosion of Chemical Equipment and Corrosion-Resistant Materials] (Moscow: Mashinostroenie: 1967) (in Russian).