

СРАВНЕНИЕ СКЛОННОСТИ К ПИТТИНГОВОЙ КОРРОЗИИ ОТЛИВОК ИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СПЛАВОВ Al6Ca, Al1Fe, Al6Ca1Fe И ПРОМЫШЛЕННОГО СПЛАВА АК12М2

© 2017 г. О.В. Волкова, А.В. Дуб, А.Г. Ракоч, А.А. Гладкова, М.Е. Самошина

Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва

Статья поступила в редакцию 07.02.17 г., доработана 26.04.17 г., подписана в печать 28.04.17 г.

Исследовано электрохимическое и коррозионное поведение 4 сплавов (мас. %): Al–6Ca (далее Al6Ca), Al–6Ca–1Fe (далее Al6Ca1Fe), Al–1Fe (далее Al1Fe), АК12М2. Повышенное содержание железа (до 1 %) в сплавах необходимо для высокой производительности процессов литья под давлением. Электрохимические исследования проводили в 3 %-ном водном растворе NaCl при температуре $26 \pm 0,5$ °C с помощью цифрового потенциостата IPC-Pro 3A (IPC-2000). Анодную поляризацию осуществляли в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 1 мВ/с. Начальный потенциал поляризации составлял –800 мВ (по отношению к стандартному водородному электроду). При «критической» плотности тока $i_{кр} = 10$ мА/см² изменяли направление развертки потенциала на обратное, проводя поляризацию с той же скоростью. О склонности сплавов к питтингообразованию судили по отношению количеств электричества, прошедших через электрод до питтингообразования и до их репассивации ($Q_{\text{прямой}}/Q_{\text{обратный}}$), и значениям базисов питтингостойкости: разности потенциала питтингообразования и стационарного потенциала; разности потенциала репассивации и стационарного потенциала. Коррозионные испытания литейных алюминиевых сплавов проводили, выдерживая образцы в камере соляного тумана и в 3 %-ном водном растворе NaCl в течение 700 ч. После этих выдержек изучали морфологию поверхности образцов с помощью оптического микроскопа «Olympus GX51». Установлено, что экспериментальные сплавы Al6Ca1Fe и Al6Ca, в отличие от Al1Fe и промышленного сплава АК12М2, не подвержены питтинговой коррозии в 3 %-ном водном растворе NaCl. Высказано предположение, что повышенная коррозионная стойкость сплава Al6Ca1Fe обусловлена тем, что железо входит в интерметаллид Al₁₀CaFe₂, который не является эффективным катодом вследствие значительных отрицательных потенциалов у Al и Ca. Благодаря высоким литейным и механическим свойствам сплава Al6Ca1Fe, которые не уступают свойствам эвтектического силумина и превосходят его по коррозионной стойкости, экспериментальный сплав Al6Ca1Fe является перспективным для использования в промышленном масштабе.

Ключевые слова: литейные алюминиевые экспериментальные сплавы, интерметаллиды, склонность к питтинговой коррозии, анодная поляризация.

Волкова О.В. – науч. сотр. кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: expertcorr@gmail.com.

Дуб А.В. – докт. техн. наук, профессор той же кафедры. E-mail: AIVDub@rosatom.ru.

Ракоч А.Г. – докт. хим. наук, профессор той же кафедры. E-mail: rakoch@mail.ru.

Гладкова А.А. – канд. хим. наук, доцент той же кафедры. E-mail: sascha-gladkova@yandex.ru.

Самошина М.Е. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. кафедры обработки металлов давлением НИТУ «МИСиС». E-mail: samoshina@list.ru.

Для цитирования: Волкова О.В., Дуб А.В., Ракоч А.Г., Гладкова А.А., Самошина М.Е. Сравнение склонности к питтинговой коррозии отливок из экспериментальных сплавов Al6Ca, Al1Fe, Al6Ca1Fe и промышленного сплава АК12М2 // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 5. С. 75–81.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-5-75-81.

Volkova O.V., Dub A.V., Rakoch A.G., Gladkova A.A., Samoshina M.E.

Comparison of pitting corrosion tendency for castings made of Al6Ca, Al1Fe, Al6Ca1Fe experimental alloys and AK12M2 industrial alloy

The study covers the electrochemical and corrosion behavior of 4 alloys (wt. %): Al–6Ca (Al6Ca), Al–6Ca–1Fe (Al6Ca1Fe), Al–1Fe (Al1Fe), АК12М2. High Fe content (up to 1 %) in the alloys is required for high productivity of die-casting processes. Electrochemical tests were conducted in the 3 % NaCl aqueous solution at $26 \pm 0,5$ °C using the IPC-Pro 3A (IPC-2000) digital potentiostat. Potentiodynamic anodic polarization was performed at a scan rate of 1 mV/s. The initial polarization potential was –800 mV (SHE). The potential scanning direction was reversed at a «critical» current density $i_{cr} = 10$ mA/cm² with the same scan rate of polarization. The tendency of the alloy for pitting formation was determined by the $Q_{\text{dir}}/Q_{\text{rev}}$ ratio (the amounts of electricity passed through the electrode before pits occur and before repassivation) and the bases of pitting resistance: difference between the pitting potential (E_{pit})

and the equilibrium potential (E_{eq}); difference between the repassivation potential (E_{rep}) and the equilibrium potential (E_{eq}). Corrosion tests of cast aluminum alloys were carried out by holding the samples in a salt spray chamber and in the 3 % NaCl aqueous solution for 700 h. The Olympus GX51 optical microscope was used to assess the morphology of sample surfaces after their holding. It is found that the Al6Ca1Fe and Al6Ca experimental alloys placed in the 3 % NaCl aqueous solution are not susceptible to pitting corrosion as opposed to the AK12M2 industrial alloy and Al1Fe. It is assumed that the higher corrosion resistance of Al6Ca1Fe is due to the entry of Fe into the Al₁₀CaFe₂ intermetallide. The intermetallide is not an effective cathode with respect to Fe due to significant negative potentials of Al and Ca. Al6Ca1Fe is a promising alloy for industrial use due to its high casting and mechanical properties that are not inferior to the eutectic silumin alloy and even surpass it in terms of corrosion resistance.

Keywords: experimental aluminum casting alloy, intermetallides, tendency for pitting corrosion, anodic polarization.

Volkova O.V. – scientific stuff of the Department «Metallurgy of steel, new production technologies and protection of metals» of the National University of Science and Technology (NUST) «MISIS» (119049, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: expertcorr@gmail.com.

Dub A.V. – Dr. Sci. (Tech.), prof. of the same department. E-mail: AIVDub@rosatom.ru.

Rakoch A.G. – Dr. Sci. (Chem.), prof. of the same department. E-mail: rakoch@mail.ru

Gladkova A.A. – Cand. Sci. (Chem.), associate prof. of the same department. E-mail: sascha-gladkova@yandex.ru.

Samoshina M.E. – Cand. Sci. (Tech.), senior researcher of the Department «Pressure metal and alloy treatment» of the NUST «MISIS». E-mail: samoshina@list.ru.

Citation: Volkova O.V., Dub A.V., Rakoch A.G., Gladkova A.A., Samoshina M.E. Sroavnenie sklonnosti k pittingovoi korrozii otlivok iz eksperimental'nykh splavov Al6Ca, Al1Fe, Al6Ca1Fe i promyshlennogo splava AK12M2. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 5. P. 75–81. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-5-75-81.

Введение

Основной группой литейных алюминиевых сплавов являются силумины, которые используются для получения фасонных отливок различными методами литья, в том числе литьем под давлением [1–3]. Этим способом изготавливается большая часть отливок для деталей легковых автомобилей, а также для получения различных корпусных деталей сложной формы, например секций отопительных радиаторов. Специфика сплавов, предназначенных для литья под давлением, заключается в том, что с целью повышения производительности процесса они, как правило, содержат большее количество железа по сравнению со сплавами, получаемыми литьем в кокиль и землю. В частности, в сплавах типа АК12М2 (и зарубежных аналогах: АА380, 383, 384 и др.) среднее содержание железа составляет ~1 % [1–4]. Благодаря добавке железа отливки легче извлекаются из пресс-формы. Вместе с тем медь и железо могут приводить к образованию эффективных катодов в силуминах и, как следствие, к активации коррозионных, в том числе локальных, процессов, которые, в большинстве случаев, начинаются с питтинговой коррозии [5–15], особенно в средах, содержащих хлор-ионы. В отличие от железа и сталей, у которых пассивная пленка является катодом [16–18], на алюминиевых сплавах формируются диэлектрические пассивные пленки [19], а следовательно, механизмы питтинговой коррозии

в значительной степени отличаются у этих металлических материалов.

В [20] на примере экспериментальных сплавов Al–6Ca и Al–6Ca–1Fe (мас.%) обоснована принципиальная возможность применения сплавов на основе алюминиево-кальциевой эвтектики для получения отливок методом литья под давлением. Оценка литейных и механических свойств сплавов Al–6Ca, Al–6Ca–1Fe показала, что они находятся на высоком уровне, не уступая свойствам эвтектических силуминов. Структура экспериментальных сплавов Al–6Ca, Al–6Ca–1Fe имеет более тонкое дисперсное строение по сравнению с силумином АК12М2. Именно этот силумин представляется наиболее подходящим объектом для сравнения, поскольку его получают литьем под давлением, вводя в его состав до 1 % Fe [4]. Фазовый состав сплавов Al–6Ca, Al–6Ca–1Fe образуется, согласно экспериментальным данным [20], с первоначальным выпадением первичных кристаллов алюминия, которые практически не содержат кальция и железа, а затем вследствие протекания эвтектической реакции: $L \rightarrow (Al) + Al_4Ca + Al_{10}CaFe_2$. В сплаве Al–6Ca–1Fe происходит полное связывание железа в тройную фазу Al₁₀CaFe₂. Эта фаза не может являться эффективным катодом ввиду очень отрицательного потенциала у Ca (стандартный электродный потенциал составляет –2,87 В). Следовательно, указанный сплав должен иметь

более отрицательный стационарный потенциал и более высокую стойкость к питтинговой коррозии, чем таковые у силумина АК12М2, содержащего эффективные катоды: интерметаллиды Al_5FeSi и Al_2Cu , а также медь, находящуюся в твердом растворе на основе алюминия [20].

Экспериментальное доказательство низкой склонности к питтинговой коррозии алюминиевых сплавов $Al-6Ca$ и $Al-6Ca-1Fe$ в средах, содержащих хлор-ионы, и их более высокой коррозионной стойкости по сравнению с промышленным силумином АК12М2 является основной целью данной работы.

Методики исследований

Склонность к питтинговой коррозии в средах, содержащих хлорид натрия, исследовали у 4 сплавов (мас.%): $Al-6Ca$ (далее $Al6Ca$), $Al-6Ca-1Fe$ (далее $Al6Ca1Fe$), $Al-1Fe$ (далее $Al1Fe$) и АК12М2. Второй и третий сплавы были приготовлены для того, чтобы сравнить влияние раздельного легирования алюминия кальцием (6 мас.%) и железом (1 мас.%) и совместного легирования этими элементами на склонность алюминиевых сплавов к питтинговой коррозии. В сплаве $Al1Fe$ содержится интерметаллид Al_3Fe , который является катодом и должен активировать процесс коррозии алюминия, а сплав $Al6Ca$ содержит анод — Al_4Ca , вытравливание которого может привести к образованию алюминиевой поверхности и высокой коррозионной стойкости этого сплава.

Сплавы готовили на основе алюминия марки А85 (ГОСТ 11069-2001) в графитошамотном тигле в электропечи сопротивления фирмы LAC (Чехия). Кальций вводили в чистом виде, а железо — в виде лигатуры $Al-10$ мас.% Fe. Разливку осуществляли в чугунные формы при температуре 730–740 °С, получая слитки размером 15×60×200 мм. Слитки основного сплава $Al6Ca1Fe$ расплавляли непосредственно перед получением отливок на машине литья под давлением. Элементный состав сплавов, по данным спектрального анализа, который был

проведен на оптико-эмиссионном анализаторе металлов «Bruker Elemental» (Германия) с точностью до 0,002 мас.%, приведен в таблице.

Образцы, вырезанные из отливок, запрессовывали в шайбы из непроводящей эпоксидной смолы марки ЭДП. Затем рабочую поверхность образцов полировали до шероховатости $R_a \leq 1$ мкм. Таким образом, площадь рабочей поверхности образца (~1 см²) ограничивали одной его стороной. Перед исследованиями эту поверхность образцов обезжировали этиловым спиртом, промывали в дистиллированной воде и сушили фильтровальной бумагой.

Электрохимические исследования проводили в 3 %-ном водном растворе NaCl при температуре $26 \pm 0,5$ °С с помощью цифрового потенциостата IPC-Pro 3A (г. Санкт-Петербург) со встроенным микропроцессором и выходом на персональный компьютер. Управление потенциостатом осуществляется с помощью прилагаемого пакета программ (IPC-2000).

Все электрохимические исследования выполняли в стандартных двух- и трехэлектродной электрохимических ячейках. В качестве вспомогательного электрода и электрода сравнения применяли платиновый и хлорсеребряный (ЭСР-10101) электроды соответственно. Значения потенциалов в настоящей работе приведены по отношению к стандартному водородному электроду (с.в.э.). Анодную поляризацию осуществляли в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 1 мВ/с. Начальный потенциал поляризации составлял –800 мВ (с.в.э.). При «критической» плотности тока $i_{кр} = 10$ мА/см² изменяли направление развертки потенциала на обратное, проводя поляризацию с той же скоростью.

О склонности сплава к питтингообразованию судили по отношению $Q_{пр}/Q_{обр}$ и величинам базисов питтингостойкости. Значение $Q_{пр}/Q_{обр} \geq 1$ соответствует общему или селективному растворению сплава, а $Q_{пр}/Q_{обр} < 1$ — образованию питтингов [21]. Количество электричества (Q), прошедшее через электрод, определяли интегри-

Элементный состав, мас.%, литейных алюминиевых экспериментальных сплавов и сплава АК12М2

Сплав	Al	Ca	Fe	Si	Mg	Cu	Zn	Mn
Al6Ca	Основа	6,1	0,054	0,071	0,005	0,018	0,013	0,002
Al6Ca1Fe	Основа	6,03	1,186	0,069	0,005	0,0046	0,012	0,0063
AK12M2	Основа	0,008	0,5	10,78	0,207	2,26	0,816	0,402
Al1Fe	Основа	0,005	0,98	0,008	0,0012	0,0057	0,0029	0,0046

рованием силы тока по длительностям интервалов — до ($Q_{пр}$) и после ($Q_{обр}$) достижения значения «критической» плотности тока:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt, \quad (1)$$

где t_1 , с — время начала поляризации (для прямого хода) либо время достижения «критической» плотности тока (для обратного хода); t_2 , с — время достижения «критического» тока (для прямого хода) либо время окончания поляризации (для обратного хода).

Питтингостойкость сплавов тем выше [21], чем больше значения базисов питтингостойкости:

$$\Delta E_{по} = E_{по} - E_{ст},$$

$$\Delta E_{рп} = E_{рп} - E_{ст},$$

где $E_{по}$ — потенциал питтингообразования, $E_{рп}$ — потенциал репассивации питтингов, $E_{ст}$ — стационарный потенциал сплава в водном растворе, содержащем 3 % NaCl.

Коррозионные испытания литейных алюминиевых сплавов проводили, выдерживая образцы в камере соляного тумана и в 3 %-ном водном растворе NaCl в течение 700 ч. После этих выдержек изучали морфологию поверхности образцов с помощью оптического микроскопа «Olympus GX51» (Япония).

Результаты экспериментов и их обсуждение

Из данных электрохимических испытаний следует, что в 3 %-ном водном растворе NaCl:

1) наибольшие значения стационарных потенциалов имеют сплавы АК12М2, Al1Fe (–0,48; –0,55 В), а наименьшие — алюминиевые сплавы, легированные кальцием (–0,69 В (Al6Ca); –0,70 В (Al6Ca1Fe)). Катодные включения приводят к смещению потенциалов в положительную сторону. Дополнительное легирование сплава Al6Ca железом, казалось бы, должно сместить потенциал в положительную сторону. Вместе с тем нахождение Fe в соединении Al₁₀CaFe₂ исключает его индивидуальные электрохимические характеристики;

2) наибольшей общей заторможенностью процесса растворения сплавов (меньшей плотностью тока) при анодной поляризации образцов обладает сплав Al1Fe, наименьшей — сплавы Al6Ca и Al6Ca1Fe, а у сплава АК12М2 промежуточная

скорость растворения (рис. 1, а). Вместе с тем из экспериментальных данных (рис. 1, б) и стационарных потенциалов следует, что наибольшую склонность к питтинговой коррозии имеет сплав АК12М2 — $Q_{пр}/Q_{обр} < 1$ (0,61), $\Delta E_{по} = 70$ мВ, $\Delta E_{рп} = -90$ мВ. Эти данные свидетельствуют о невозможности питтингов к репассивации. У сплава Al1Fe также высокая склонность к питтинговой коррозии — $Q_{пр}/Q_{обр} < 1$ (0,22), $\Delta E_{по} = 100$ мВ, $\Delta E_{рп} = 0,00$ мВ. Большая заторможенность процесса растворения этого сплава, оцениваемая по плотности анодного тока с учетом всей поверхности сплава, контактирующего с электролитом, не указывает на степень опасности коррозионного поражения, так как площадь питтингов, как правило [22], является небольшой величиной. Глубина коррозионного поражения у сплавов Al6Ca, Al6Ca1Fe, вероятно, может быть намного меньшей, так как они подвержены общему или селективному растворению эвтектики. Это подтверждает отношение $Q_{пр}/Q_{обр}$, которое больше 1 (1,12; 1,22 соот-

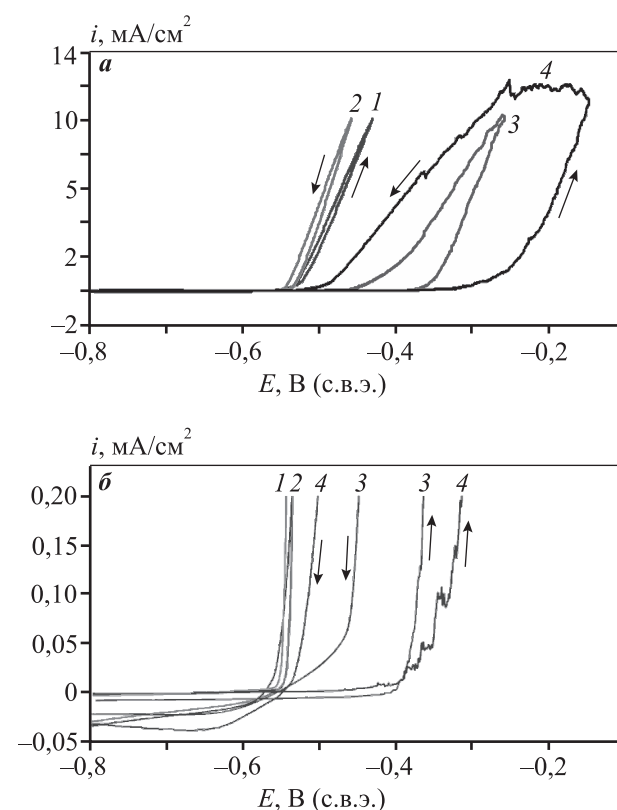


Рис. 1. Анодные поляризационные кривые (а) и их фрагмент при потенциалах, близких к потенциалам питтингообразования и репассивации (б)

Стрелками показано направление развертки потенциалов
Скорость развертки потенциала 1 мВ/с

1 — Al6Ca, 2 — Al6Ca1Fe, 3 — АК12М2, 4 — Al1Fe

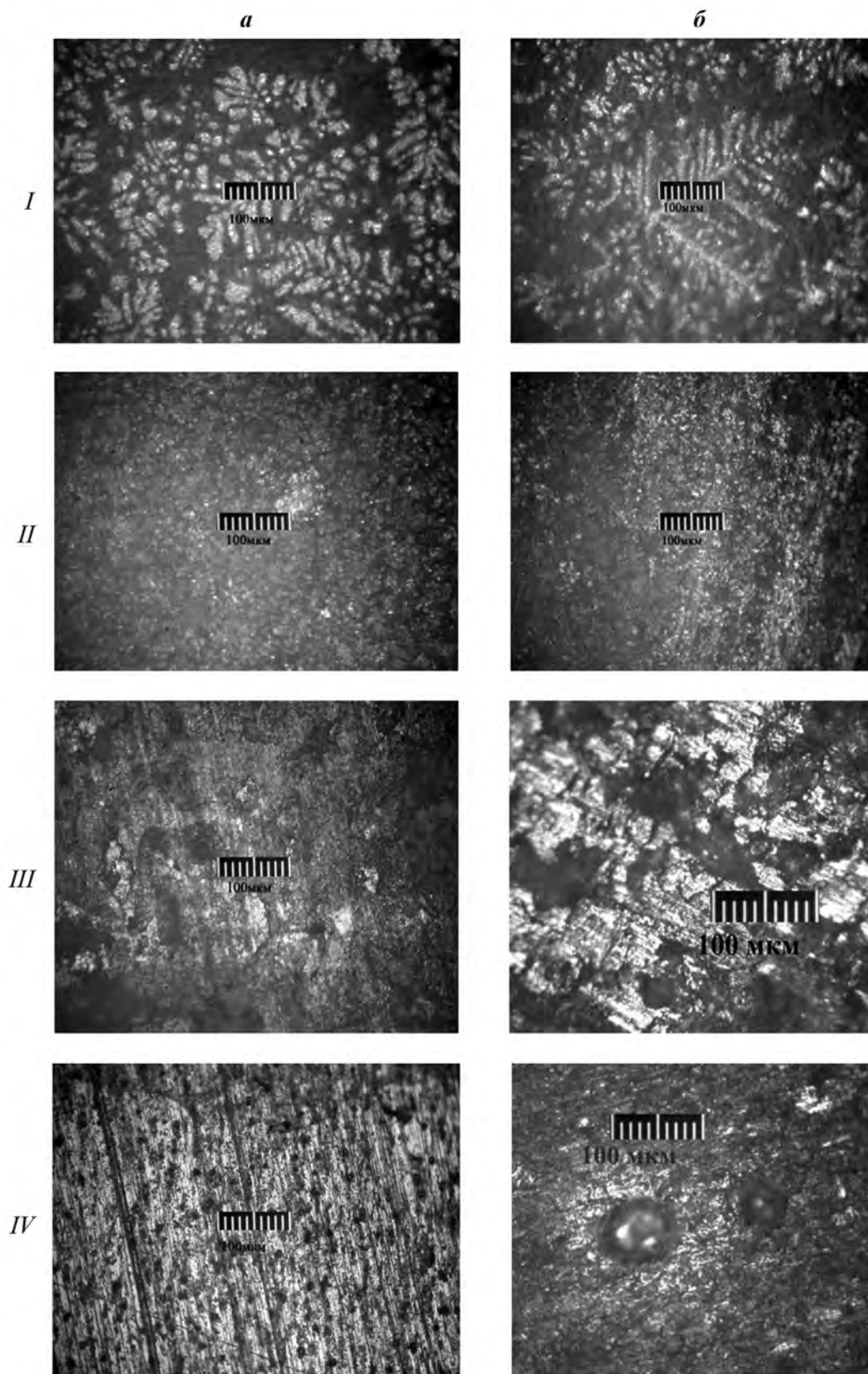


Рис. 2. Морфология поверхности сплавов после их выдержек в камере солевого тумана (*а*) и 3 %-ном водном растворе NaCl (*б*) в течение 700 ч
I – Al6Ca; *II* – Al6Ca1Fe; *III* – AK12M2; *IV* – Al1Fe

ветственно). Вероятно, в первую очередь вытравливается Al_4Ca , который, несомненно, является анодом по отношению к другим фазам, из которых состоят эти сплавы. Тонкое дисперсное строение эвтектики не позволяет образоваться микро- и макродефектам.

Результаты коррозионных испытаний подтвердили вид коррозионных поражений алюминиевых сплавов, установленных по результатам электрохимических исследований. На рис. 2 показана морфология поверхности сплавов после их выдержек в камере соляного тумана и в 3 %-ном водном растворе NaCl. Наиболее отчетливо проявляются сферические питтинги на сплаве Al1Fe. На сплаве АК12М2 развиваются типичные межкристаллитные кристаллографические питтинги [6], отчетливо наблюдаемые после выдержки в 3 %-ном растворе NaCl. Они наиболее опасны, так как усиливается чувствительность сплавов к межкристаллитной коррозии или к межзеренному коррозионному растрескиванию под напряжением [6, 22].

Сплав Al6Ca1Fe, у которого временное сопротивление прочности превышает 200 МПа и высокая стабильность механических свойств, не склонен к питтинговой коррозии (см. рис. 2, II). Дополнительным преимуществом этого сплава является возможность использования для его выплавки относительно дешевых марок алюминия с повышенным содержанием железа. В сплаве Al6Ca1Fe железо находится в тройном соединении $Al_{10}CaFe_2$ и не оказывает существенного влияния на коррозию алюминиевого сплава.

Выводы

1. Сравнение сплавов Al6Ca1Fe, АК12М2, содержащих повышенное содержание железа (до 1 %) для увеличения производительности процессов литья под давлением, по коррозионной стойкости в водных средах, содержащих хлор-ионы, показало, что экспериментальный сплав Al6Ca1Fe превосходит промышленный литейный сплав АК12М2.

2. Выявлено, что вследствие связывания железа в соединение $Al_{10}CaFe_2$, которое не является эффективным катодом, электрохимическое и коррозионное поведение сплава Al6Ca1Fe близко к таковому у сплава Al6Ca. Они не подвержены питтинговой коррозии в 3 %-ном водном растворе NaCl в отличие от бинарного алюминиевого сплава Al1Fe и промышленного сплава АК12М2.

3. Показано, что на сплаве АК12М2 в водных

средах, содержащих хлор-ионы, интенсивно развиваются межкристаллитные кристаллографические питтинги, которые могут являться родоначальниками межкристаллитной коррозии или приводить к межзеренному коррозионному растрескиванию под напряжением.

Статья подготовлена в рамках Соглашения № 14.578.21.0220 (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57816X0220) о предоставлении субсидии Минобрнауки России в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы».

Литература

1. Kaufman J.G., Rooy L.E. Aluminum alloy castings: properties, processes and applications. Materials park: ASM International, 2004.
2. Золоторевский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. М.: Изд. дом МИСиС, 2005.
3. Белов Н.А., Савченко С.В., Белов В.Д. Атлас микроструктур промышленных силуминов. М.: Изд. дом МИСиС, 2009.
4. ГОСТ 1583—93. Сплавы алюминиевые литейные. М.: Изд-во стандартов, 1993.
5. Синяевский В.С., Вальков В.Д., Калинин В.Д. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1986.
6. Синяевский В.С. Закономерности развития питтинговой коррозии алюминиевых сплавов и ее взаимосвязь с коррозией под напряжением // Защита металлов. 2001. Т. 37. No. 5. С. 521—530.
7. Pereira M., Silva J., Acciari H., Codaro E., Hein L. Morphology characterization and kinetics evaluation of pitting corrosion of commercially pure aluminum by digital image analysis // Mater. Sci. Appl. 2012. Vol. 3. P. 287—293. <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2012.35042>.
8. Frankel G.S. Pitting corrosion of metals // J. Electrochem. Soc. 1998. Vol. 145. No 6. P. 2186—2198. DOI: 10.1149/1.1838615.
9. Szklarska-Smmialowska Z. Pitting corrosion of aluminum // Corros. Sci. 1999. Vol. 41. No. 9. P. 1743—1767. DOI: 10.1016/S0010-938X(99)00012-8.
10. McCafferty V. Sequence of steps in the pitting of aluminum by chloride ions // Corros. Sci. 2003. Vol. 45. No. 45. P. 1421—1438. DOI: 10.1016/S0010-938X(02)00231-7.
11. Rao K.S., Rao K.P. Pitting corrosion of heat-treatable aluminium alloys and welds: a review // Trans. Indian Inst. Met. 2004. Vol. 57. No. 6. P. 593—610.
12. Baumgartner M., Käsche H. Aluminium pitting in chloride solutions: morphology and pit growth kinetics // Corros. Sci. 1990. Vol. 31. P. 231—236. DOI: 10.1016/0010-938X(90)90112-1.

13. *Codaro E.N., Nakazato R.Z., Horovistiz A.L., Ribeiro L.M.F., Ribeiro R.B., Hein L.R.O.* An image processing method for morphology characterization and pitting corrosion evaluation // *Mater. Sci. Eng.* 2002. Vol. 334. No. 1-2. P. 298—306. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01892-5.
14. *Angal R.* Коррозия и защита от коррозии / Пер. с англ. А. Калашниковой. Долгопрудный: Изд-во «Интеллект», 2013.
15. *Revie R.W., Uhlig H.H.* Corrosion and corrosion control. A John Wiley & Sons Inc. Publication: Copyright, 2008.
16. *Punckt C., Bolscher M., Rotermund H.H., Mikhailov A.S., Organ L., Budiansky N.* Sudden onset of pitting corrosion on stainless steel as a critical phenomenon // *Science.* 2004. Vol. 305. No. 5687. P. 1133—1136. DOI: 10.1126/science.1101358.
17. *Жук Н.П.* Курс коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия, 1976.
18. *Томашов Н.Д., Чернова Г.П.* Теория коррозии и коррозионно-стойкие конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1986.
19. *Kaesche H.* Die korrosion der metalle. Physikalisch-chemische prinzipien und aktuelle probleme. Springer-Verlag, 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-18428-4.
20. *Белов Н.А., Наумова Е.А., Акопян Т.К.* Эвтектические сплавы на основе алюминия: новые системы легирования. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2016.
21. ГОСТ 9.912-89. ЕСЗКС. Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии. М.: Издательство стандартов, 1993.
22. *Розенфельд И.Л.* Коррозия и защита металлов. М.: Металлургия, 1969.
7. *Pereira M., Silva J., Acciari H., Codaro E., Hein L.* Morphology characterization and kinetics evaluation of pitting corrosion of commercially pure aluminum by digital image analysis. *Mater. Sci. Appl.* 2012. Vol. 3. P. 287—293. <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2012.35042>.
8. *Frankel G.S.* Pitting corrosion of metals. *J. Electrochem. Soc.* 1998. Vol. 145. No 6. P. 2186—2198. DOI: 10.1149/1.1838615.
9. *Szklarska-Smmialowska Z.* Pitting corrosion of aluminum. *Corros. Sci.* 1999. Vol. 41. No. 9. P. 1743—1767. DOI: 10.1016/S0010-938X(99)00012-8.
10. *McCafferty V.* Sequence of steps in the pitting of aluminum by chloride ions. *Corros. Sci.* 2003. Vol. 45. No. 45. P. 1421—1438. DOI: 10.1016/S0010-938X(02)00231-7.
11. *Rao K.S., Rao K.P.* Pitting corrosion of heat-treatable aluminium alloys and welds: a review. *Trans. Indian Inst. Met.* 2004. Vol. 57. No. 6. P. 593—610.
12. *Baumgartner M., Käsehe H.* Aluminium pitting in chloride solutions: morphology and pit growth kinetics. *Corros. Sci.* 1990. Vol. 31. P. 231—236. DOI: 10.1016/0010-938X(90)90112-I.
13. *Codaro E.N., Nakazato R.Z., Horovistiz A.L., Ribeiro L.M.F., Ribeiro R.B., Hein L.R.O.* An image processing method for morphology characterization and pitting corrosion evaluation. *Mater. Sci. Eng.* 2002. Vol. 334. No. 1-2. P. 298—306. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01892-5.
14. *Angal R.* Korroziya i zashchita ot korrozii [Corrosion and corrosion protection]. Dolgoprudnyi: Intellekt, 2013.
15. *Revie R.W., Uhlig H.H.* Corrosion and corrosion control. A John Wiley & Sons Inc. Publication: Copyright, 2008.
16. *Punckt C., Bolscher M., Rotermund H.H., Mikhailov A.S., Organ L., Budiansky N.* Sudden onset of pitting corrosion on stainless steel as a critical phenomenon. *Science.* 2004. Vol. 305. No. 5687. P. 1133—1136. DOI: 10.1126/science.1101358.
17. *Zhuk N.P.* Kurs korrozii i zashchity metallov [Course and corrosion protection of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1976.
18. *Tomashov N.D., Chernova G.P.* Teoriya korrozii i korroziionno-stoikie konstruksionnye splavy [Theory of corrosion and corrosion-resistant structural alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1986.
19. *Kaesche H.* Die korrosion der metalle. Physikalisch-chemische prinzipien und aktuelle probleme. Springer-Verlag, 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-18428-4.
20. *Belov N.A., Naumova E.A., Akopyan T.K.* Evtecticheskie splavy na osnove alyuminiya: novye sistemy legirovaniya [Eutectic alloys based on aluminum, new alloying system]. Moscow: Izdatel'skii dom «Ruda i metally», 2016.
21. ГОСТ 9.912-89. ЕСЗКС. Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии [Corrosion-resistant steels and alloys. Methods of accelerated tests for resistance to the pitting corrosion]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1993.
22. *Rozenfel'd I.L.* Korroziya i zashchita metallov [Corrosion and protection of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1969.

References

1. *Kaufman J.G., Rooy L.E.* Aluminum alloy castings: properties, processes and applications. Materials park: ASM International, 2004.
2. *Zolotarevskii V.S., Belov N.A.* Metallovedenie liteinykh alyuminievykh splavov [Material science of casting aluminum alloys]. Moscow: MISIS, 2005.
3. *Belov N.A., Savchenko S.V., Belov V.D.* Atlas mikrostruktur promyshlennykh siluminov [Atlas of microstructures of industrial silumins]. Moscow: MISIS, 2009.
4. ГОСТ 1583—93. Splavy alyuminievye liteinye [Aluminum casting alloys]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1993.
5. *Sinyavskii V.S., Val'kov V.D., Kalinin V.D.* Korroziya i zashchita alyuminievykh splavov [Corrosion and protection of aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1986.
6. *Sinyavskii V.S.* Zakonomernosti razvitiya pittingovoi korrozii alyuminievykh splavov i ee vzaimosvyaz' s korroziie pod napryazheniem [Characteristics of development of pitting corrosion of aluminum alloys, and its relationship to stress corrosion]. *Zashchita metallov.* 2001. Vol. 37. No. 5. P. 521—530.