

# ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ И ОСОБЕННОСТЕЙ КОРРОЗИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В СЕРОВОДОРОДСОДЕРЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

© 2017 г. Г.В. Клевцов, Р.З. Валиев, В.М. Кушнарченко, Н.А. Клевцова,  
Е.Д. Мерсон, И.Н. Пигалева

Тольяттинский государственный университет (ТГУ)

Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ)

Оренбургский государственный университет (ОГУ)

*Статья поступила в редакцию 08.10.15 г., доработана 12.02.16 г., подписана в печать 16.02.16 г.*

Определяли скорость коррозии и исследовали особенности коррозионного повреждения в сероводородсодержащем растворе NACE образцов из алюминиевого сплава АК4-1. Сплав изучали в ультрамелкозернистом состоянии в сравнении с крупнозернистым состоянием, полученным после стандартной обработки Т6 (закалка + старение). Наноструктурирование сплава проводили путем равноканального углового прессования (РКУП). Показано, что скорость коррозии сплава после РКУП в 1,9 раза выше, чем после обработки Т6. При этом в сплаве после РКУП имеет место общая коррозия, а в сплаве в состоянии Т6 помимо общей коррозии наблюдается и язвенная. Коррозионное воздействие оказывает большее влияние на параметры шероховатости поверхности образцов из сплава АК4-1 после РКУП по сравнению с образцами после обработки Т6.

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав, наноструктурирование, равноканальное угловое прессование (РКУП), сероводородсодержащий раствор, скорость коррозии, коррозионное воздействие, шероховатость поверхности.

**Клевцов Г.В.** — докт. техн. наук, профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика» (НММ) ТГУ (445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14). E-mail: Klevtsov11948@mail.ru.

**Валиев Р.З.** — докт. физ.-мат. наук, проф., директор Института физики перспективных материалов УГАТУ (450063, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12). E-mail: RZValiev@mail.ru.

**Кушнарченко В.М.** — докт. техн. наук, профессор кафедры машиностроения ОГУ (460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13). E-mail: vmkushnarenko@mail.ru.

**Клевцова Н.А.** — докт. техн. наук, профессор кафедры НММ, ТГУ. E-mail: inshtet@mail.ru.

**Мерсон Е.Д.** — аспирант кафедры НММ, ТГУ. E-mail: mersoned@gmail.com.

**Пигалева И.Н.** — инженер кафедры НММ, ТГУ. E-mail: irinal.985@mail.ru.

**Для цитирования:** Клевцов Г.В., Валиев Р.З., Кушнарченко В.М., Клевцова Н.А., Мерсон Е.Д., Пигалева И.Н. Исследование скорости и особенностей коррозии образцов из наноструктурированного алюминиевого сплава в сероводородсодержащей среде // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 1. С. 76–83.  
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-76-83.

*Klevtsov G.V., Valiev R.Z., Kushnarenko V.M., Klevtsova N.A., Merson E.D., Pigaleva I.N.*

## **Study of corrosion rate and features of nanostructured aluminum alloy samples in hydrogen sulfide medium**

The study determines corrosion rate and covers corrosion damage specifics of AK4-1 aluminum alloy samples in the NACE hydrogen sulfide solution. The alloy was studied in an ultrafine state as compared to the coarse-grained state obtained after standard T6 treatment (hardening + ageing). The alloy was nanostructured by equal-channel angular pressing (ECAP). It was shown that the alloy corrosion rate after ECAP was 1,9 times higher than after T6 treatment. Thus, general corrosion occurred in the alloy after ECAP, while in the T6 state pit corrosion occurred in the alloy in addition to general corrosion. The corrosive effect had a greater impact on surface roughness of samples made of AK4-1 alloy after ECAP as compared to samples after T6 treatment.

**Keywords:** aluminum alloy, nanostructuring, equal-channel angular pressing (ECAP), hydrogen sulfide solution, corrosion rate, corrosive effect, surface roughness.

**Klevtsov G.V.** — Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of nanotechnologies, materials science and mechanics (NMSM), Togliatti State University (TSU) (445667, Russia, Togliatti, Belorusskaya str., 14). E-mail: Klevtsov11948@mail.ru.

**Valiev R.Z.** — Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof., head of Research Institute of Physics of Advanced Materials, Ufa State Aviation Technology University (450063, Russia, Ufa, K. Marks str., 12). E-mail: RZValiev@mail.ru.

**Kushnarenko V.M.** — Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of mechanics, Orenburg State University (460018, Russia, Orenburg, Pobedy pr., 13). E-mail: vmkushnarenko@mail.ru.

**Klevtsova N.A.** — Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of NMSM, TSU. E-mail: inshtet@mail.ru.

**Merson E.D.** — postgraduate student, Department of NMSM, TSU. E-mail: mersoned@gmail.com.

**Pigaleva I.N.** — engineer, Department of NMSM, TSU. E-mail: irinal.985@mail.ru.

**Citation:** Klevtsov G.V., Valiev R.Z., Kushnarenko V.M., Klevtsova N.A., Merson E.D., Pigaleva I.N. Issledovanie skorosti i osobennostei korrozii obraztsov iz nanostrukturirovannogo alyuminievogo splava v serovodorodsoderzhashchei srede. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 1. P. 76–83. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-76-83.

## Введение

Объемные наноструктурированные металлические материалы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, полученные путем интенсивной пластической деформации [1, 2], обладают высокими прочностными характеристиками и твердостью при статическом и циклическом нагружении [1–4]. Поэтому они считаются перспективными для изготовления конструкций и деталей машин, работающих в экстремальных условиях [4–6].

Развитие нефтегазового комплекса связано с широким использованием не только специальных марок сталей, но и легких сплавов, в том числе и алюминиевых. Внедрение в данную отрасль алюминиевых сплавов с УМЗ-структурой в качестве конструкционных материалов видится перспективным. Однако такие важные характеристики наноструктурированных алюминиевых сплавов, как коррозионные свойства и механизмы коррозии в сероводородсодержащей среде, изучены пока крайне слабо [1, 2, 5–7].

Согласно современным теоретическим представлениям [8, 9], коррозия наноструктурированных материалов должна ускоряться в активных средах. Однако на примере Al с УМЗ-структурой [10], а также Cu, Ni, Ti с УМЗ-структурой [11–13] показано, что в таких условиях основные электрохимические характеристики изменяются незначительно по сравнению с крупнозернистым состоянием. С другой стороны, УМЗ-структура, как правило, способствует более равномерному коррозионному повреждению материалов [10–14] по сравнению с крупнозернистой структурой, что, безусловно, способствует минимизации влияния коррозии на механические свойства материалов с УМЗ-структурой.

Целью настоящих исследований являлось определение скорости и особенностей коррозии образцов из наноструктурированного алюминиевого сплава АК4-1 в сероводородсодержащем растворе NACE.

## Материал и методики исследования

В качестве исследуемого материала был использован термически упрочняемый алюминиевый сплав АК4-1. Его химический состав следующий, мас. %: Cu — 2,32, Mg — 1,65, Ni — 1,04, Si — 0,06, Fe — 0,10, Mn — 0,047, Cr — 0,003, Zn — 0,017, Ti — 0,020.

Алюминиевый сплав АК4-1 в исходном горячекатаном состоянии (пруток диаметром 40 мм) имел средний размер зерна 40 мкм. Данный сплав исследовали в двух состояниях: после равноканального углового прессования (РКУП) и после стандартной обработки Т6 (закалка + старение).

Для получения УМЗ-состояния была проведена РКУП-обработка сплава при температуре 160 °С, 6 проходов ( $\phi = 90^\circ$ ). После этого средний размер зерна составил 300 нм [15].

Стандартная обработка Т6 включала в себя: нагрев до  $t = 530$  °С, выдержку при этой температуре длительностью 1 ч, закалку в воде и старение при  $t = 190$  °С в течение 7 ч, охлаждение на воздухе, после чего средний размер зерна составил 40 мкм [15].

Механические свойства сплава после стандартной обработки Т6 и после РКУП представлены в табл. 1.

Перед коррозионными испытаниями поверхности образцов размером  $10 \times 10 \times 25$  мм из сплава АК4-1 (как в состоянии Т6, так и после РКУП) подвергали шлифованию. Затем с поверхности образцов стравливали слой металла толщиной  $300 \pm 10$  мкм для удаления деформированного в про-

Таблица 1  
Механические свойства  
алюминиевого сплава АК4-1 [15]

Состояние	<i>HV</i>	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
После Т6	122	370	320	16
После РКУП	126	460	420	8

цессе шлифовки слоя. Травление образцов проводили в концентрированном растворе NaOH с последующим ополаскиванием в 25 %-ном растворе HNO<sub>3</sub>. Толщину стравленного слоя оценивали с помощью микрометра путем измерения толщины образца до и после травления.

Коррозионные испытания проводили по ГОСТ 9.913-90 «Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий, магний и их сплавы. Методы ускоренных коррозионных испытаний». В качестве коррозионной среды применяли водный раствор NACE: 5 % NaCl + 0,5 % CH<sub>3</sub>COOH, насыщенный H<sub>2</sub>S, pH ≤ 3,5, температура раствора составляла 24±3 °C, время выдержки в нем — 96 ч. Сероводород получали из сернистого натрия и соляной кислоты (1:1). Для приготовления коррозионной среды использовали дистиллированную воду (pH = 5,4÷6,6), хлористый натрий (ГОСТ 4233) и уксусную кислоту (ГОСТ 19814) марки ХЧ, газообразный азот не ниже 1 сорта и сероводород, содержащий не более 0,5 % примесей.

При испытаниях в сероводородсодержащей среде коррозионные камеры, систему подачи раствора и сероводорода продували азотом в течение 5—10 мин для удаления кислорода. После этого камеры заполняли коррозионным раствором и продували азотом в течение 1 ч при расходе азота не менее 100 см<sup>3</sup>/(мин·л<sub>раств</sub>). Затем через раствор пропускали сероводород с расходом в течение первого часа испытаний не менее 200 см<sup>3</sup>/(мин·л<sub>раств</sub>), а в течение остального времени испытаний — не менее 10 см<sup>3</sup>/(мин·л<sub>раств</sub>).

Рабочую часть образцов обезжиривали органическими растворителями, ацетоном, промывали дистиллированной водой и высушивали фильтровальной бумагой (по ГОСТ 12026), после чего брали их только за нерабочую часть. Перед постановкой на испытания образцы осматривали и протирали марлевым тампоном, смоченным этиловым спиртом марки А (по ГОСТ 17299). Затем образцы помещали в ячейки и подводили раствор. Объем испытательного раствора составлял 10 см<sup>3</sup> на 1 см<sup>2</sup> поверхности образца.

Перед испытаниями, а также после их окончания и удаления продуктов коррозии с поверхности, промывки дистиллированной водой и высушивания в сушильном шкафу при  $t = 100 \pm 2$  °C в течение 3—5 мин, выдержки 24 ч в эксикаторе над осушителем образцы взвешивали на аналитических весах с погрешностью ± 0,0001 г и определяли потерю массы:

$$\Delta m = (m_0 - m_1)/S, \quad (1)$$

где  $m_0$  — масса образца до испытания, кг;  $m_1$  — масса образца после испытания и удаления продуктов коррозии, кг;  $S$  — площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>.

Массовый показатель скорости коррозии рассчитывали по формуле

$$K = \Delta m/\tau, \quad (2)$$

где  $\tau$  — продолжительность испытаний, сут.

Глубинный показатель скорости коррозии ( $\Pi$ ), характеризующий глубину коррозионного поражения в единицу времени, определяли следующим образом (ГОСТ 13819-68 «Единая система защиты от коррозии и старения»):

$$\Pi = 8,76K/\gamma, \quad (3)$$

где  $K$  — массовый показатель, кг/(м<sup>2</sup>·год);  $\gamma$  — плотность металла, кг/м<sup>3</sup>.

После проведения коррозионных испытаний и вычисления скорости коррозии по стандартной методике проводили исследование поверхности образцов визуально и с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа (КЛСМ) «Lext OLS4000» (Olympus, Япония).

В настоящей работе для анализа поверхностей с коррозионными повреждениями был выбран ряд 3D-параметров поверхностной шероховатости, представляющих собой интегральные характеристики поверхности заданной площади (площади снимка при данном увеличении). В качестве таких параметров использовали среднее арифметическое значение высоты профиля ( $R_a$ ) и среднеквадратичное отклонение профиля ( $R_q$ ).

Следует, однако, отметить, что данные параметры также учитывают любые другие несовершенства поверхности, имеющие не коррозионную природу, в том числе риски и бороздки, появление которых вызвано механическим воздействием на образец. Тем не менее все образцы были одинаково отшлифованы перед коррозионными испытаниями, а затем одинаково зачищены для удаления продуктов коррозии, поэтому погрешность, связанную с механическим воздействием на образец, можно считать одинаковой для всех образцов. Кроме того, оценивали изменение площади поверхности вследствие коррозионного воздействия. Поскольку развитие коррозионного поражения поверхности сопровождается увеличением развитости ее рельефа, данный параметр также

может служить для оценки степени коррозионного повреждения. Для корректного сравнительного анализа в работе использовали значения площади поверхности, вычисленные с данного кадра и приведенные к площади этого кадра.

Съемку производили при помощи объектива  $20\times$  с результирующим увеличением  $400\times$ ; шаг сканирования составлял 0,8 мкм. На каждом образце была выбрана область съемки размером  $640 \times 640$  мкм, для которой впоследствии вычисляли значения относительной площади поверхности (площади поверхности, приведенной к площади снимка) и 3D-параметров шероховатости поверхности, указанных выше.

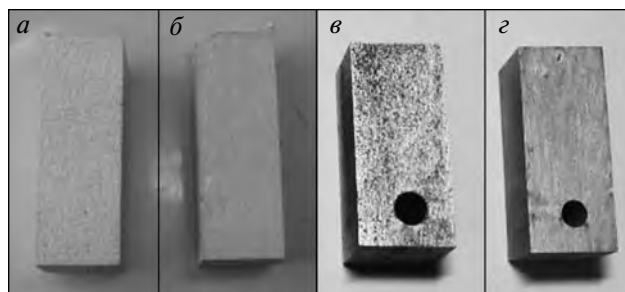
## Результаты и их обсуждение

Результаты испытаний образцов в сероводородсодержащей среде (табл. 2) показали, что средняя скорость коррозии сплава АК4-1 после РКУП в 1,9 раза выше, чем в состоянии Т6. Данный факт связан, по-видимому, с образованием в процессе РКУП, приводящего к повышению твердости и прочности сплава (см. табл. 1), большого количества дефектов и остаточных напряжений [1, 16]; это совпадает с ранее упомянутыми теоретическими представлениями [8, 9].

На рис. 1 показана поверхность образцов до и после коррозионных испытаний. До испытаний средняя шероховатость поверхности образцов из сплава в состоянии Т6 составляла 10 мкм, РКУП-обработанных — 5,7 мкм (рис. 1, а, б), а после (рис. 1, в, г) — соответственно 8,4 и 3,7 мкм. Таким образом, видно, что шероховатость поверхности образцов из сплава АК4-1 в состоянии Т6 больше, чем после РКУП, как до коррозионных испытаний, так и после них. Причем во всех случаях шероховатость поверхности была выше в образцах до коррозионного воздействия.

Чтобы понять природу таких закономерностей, поверхность образцов исследовали с помощью КЛСМ в форматах 2D (рис. 2) и 3D (рис. 3).

Как показали исследования, до коррозионных испытаний поверхность образцов из сплава АК4-1



**Рис. 1.** Образцы из сплава АК4-1 до коррозионных испытаний (а, б) и после (в, г) в состоянии сплава Т6 (а, в) и после РКУП (б, г)

в состоянии Т6 имела ямочный микрорельеф с вытянутыми перемычками (см. рис. 2, а; рис. 3, а), напоминающий вязкий излом [17]. Такой микрорельеф поверхности сформировался после травления образцов в растворе NaOH. Схожий ямочный микрорельеф поверхности образцов имеет место и в сплаве после РКУП. Однако в последнем случае размер ямок меньше (рис. 2, в), а гребни ниже (рис. 3, в).

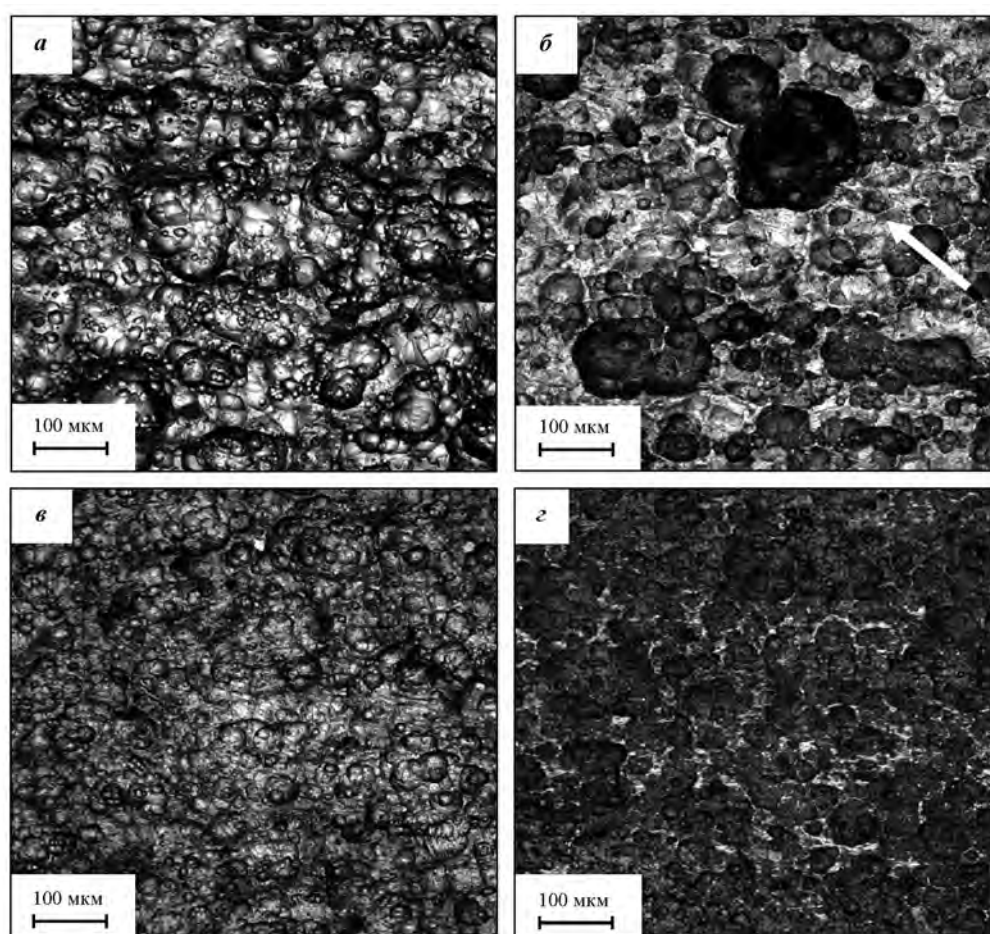
В процессе коррозионного воздействия сероводородсодержащей среды высота гребней на поверхности образцов уменьшилась. Поэтому после коррозионных испытаний поверхность всех образцов выглядит более сглаженной. Уменьшение высоты гребней свидетельствует о том, что скорость коррозии сплава на гребнях была выше, чем в ямках. Это обусловлено, по-видимому, возникновением в процессе коррозии электрохимического потенциала на гребнях поверхности. Кроме того, на поверхности образцов из сплава в состоянии Т6 видны отдельные коррозионные язвы (см. рис. 2, б и рис. 3, б, отмечено стрелкой), площадь которых занимает около 6 %. На поверхности образцов из сплава после РКУП, в отличие от предыдущего случая, крупных коррозионных язв практически не наблюдается (см. рис. 2, г и рис. 3, г). Такое изменение микрорельефа поверхности образцов свидетельствует о том, что в случае воздействия сероводородсодержащей среды в сплаве после РКУП имеет место общая коррозия, а в сплавах в состоянии Т6 помимо общей коррозии наблюдается небольшое количество язвенной коррозии.

Отсутствие язвенной коррозии на поверхности образцов из сплава после РКУП и незначительное количество язв на поверхности образцов из сплава в состоянии Т6 позволили рассчитать не только массовый показатель усредненной по всей поверх-

Таблица 2

### Средняя скорость коррозии сплава АК4-1

Состояние	$K, 10^{-7} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$	$P, 10^{-10} \text{ м}/\text{год}$
После Т6	$1,81 \pm 0,8$	$0,67 \pm 0,3$
После РКУП	$3,48 \pm 0,8$	$1,30 \pm 0,3$



**Рис. 2.** Поверхность образцов (КЛСМ) в состоянии Т6 (*а, б*) и после РКУП (*в, г*) до (*а, в*) и после (*б, г*) коррозионных испытаний

ности скорости коррозии образцов ( $K$ ), но и глубинный ( $\Pi$ ) (см. табл. 2).

Эффект сглаживания поверхности образцов после коррозии хорошо иллюстрируют результаты количественной оценки относительной площади поверхности («развернутой поверхности») образцов в различном состоянии сплава (рис. 4). Видно, что самая большая «развернутая поверхность» образцов имеет место в случае сплава в состоянии Т6 до коррозионного испытания; чуть меньше — для сплава после РКУП тоже до испытания (см. рис. 4). После воздействия коррозионной среды, независимо от состояния сплава, «развернутая поверхность» образцов становится меньше.

На рис. 5 представлены параметры шероховатости поверхности образцов — такие, как среднее арифметическое значение

высоты профиля ( $R_a$ ) и среднеквадратичное отклонение профиля ( $R_q$ ), до и после коррозии образцов. Относительное изменение вышеуказанных параметров показано в табл. 3.

Анализируя рис. 4, 5 и табл. 3, можно отметить, что до коррозионных испытаний шероховатость поверхности образцов из сплава АК4-1 после РКУП была в 1,8 раза меньше, чем после обработки Т6 (см. табл. 3), причем «разветвлен-

**Таблица 3**

**Отношение параметров шероховатости поверхности образцов из сплава АК4-1 после различных обработок**

Т6 РКУП	Т6 + коррозия РКУП + коррозия	Т6 Т6 + коррозия	РКУП РКУП + коррозия
$R_q : R_q$			
1,7	2,1	1,2	1,5
$R_a : R_a$			
1,8	2,0	1,3	1,5

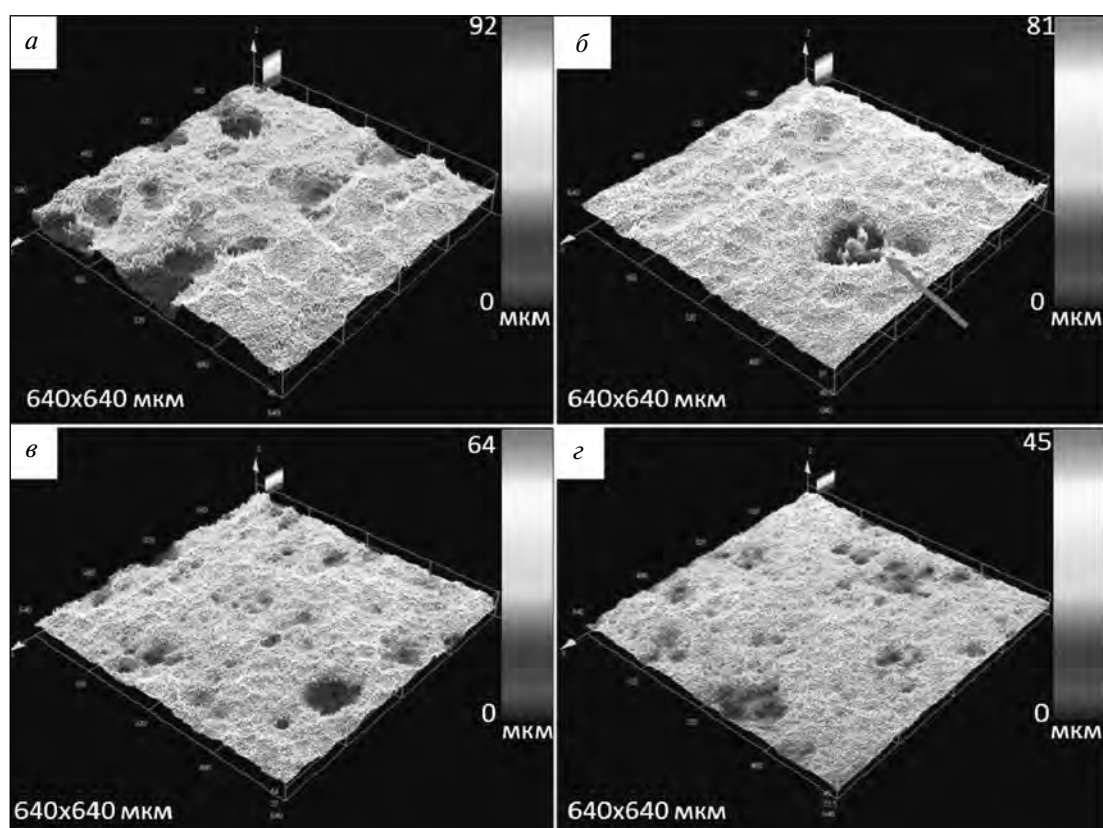


Рис. 3. Снимки в 3D-формате поверхности образцов (КЛСМ) в состоянии Т6 (а, б) и после РКУП (в, г) до (а, в) и после (б, г) коррозионных испытаний

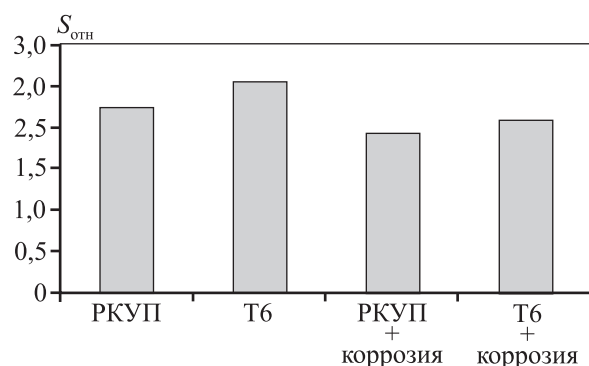


Рис. 4. Относительная площадь поверхности («развернутой поверхности») образцов сплава в различном состоянии

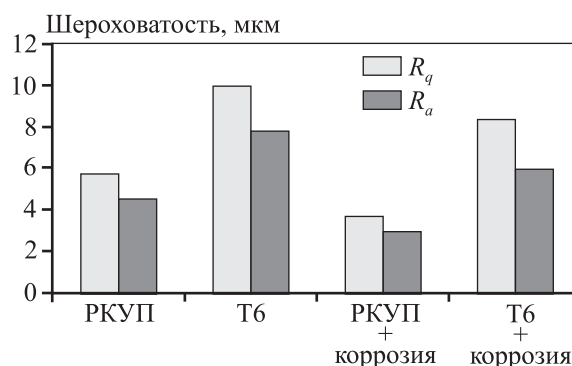


Рис. 5. Параметры шероховатости поверхности образцов сплава в различном состоянии

ная поверхность» отличалась только в 1,2 раза (см. рис. 4). Это, безусловно, связано с различными размерами и формой ямок травления, возникших после травли деформированного слоя металла с поверхности образцов. Примерно во столько же раз (1,7) была меньше величина среднеквадратичного отклонения профиля  $R_q$  (см. табл. 3).

После коррозионных испытаний значение  $R_a$  у образцов из сплава после РКУП сократилось в 1,5

раза, а после Т6 — только в 1,3 раза (см. табл. 3). При этом «разветвленная поверхность» уменьшилась соответственно в 1,2 и 1,3 раза (см. рис. 4). Значение  $R_q$  после коррозионного воздействия также снизилось — в 1,5 раза в случае сплава после РКУП и только в 1,2 раза — для сплава в состоянии Т6 (см. табл. 3). Таким образом, после коррозионных испытаний шероховатость поверхности образцов из сплава после РКУП, по сравнению с Т6-обработкой,

танными, стала меньше в 2,0 раза, а «развернутая поверхность» — только в 1,1 раза. Следовательно, сглаживание поверхности в образцах из сплава после РКУП произошло более интенсивно, а наличие коррозионных язв на поверхности образцов из сплава в состоянии Т6 после коррозии не оказало существенного влияния на величину «развернутой поверхности» ввиду небольшого их количества.

На основании вышеизложенного можно заключить, что сероводородсодержащая коррозионная среда оказывает большее влияние на шероховатость поверхности образцов из сплава АК4-1 после РКУП по сравнению с состоянием Т6. Это хорошо согласуется с данными о более высокой скорости коррозии сплава после РКУП (см. табл. 2).

## Заключение

Массовый и глубинный показатели скорости коррозии в сероводородсодержащей среде образцов из сплава АК4-1 после РКУП в 1,9 раза выше, чем в состоянии Т6 (закалка + старение). Однако отсутствие язвенной коррозии в образцах из сплава после РКУП, с практической точки зрения, может быть рассмотрено как положительное явление.

До коррозионных испытаний поверхность всех образцов после химического травления имела ямочный микрорельеф с вытянутыми перемычками, однако в образцах из сплава после РКУП размер ямок был меньше, а гребни ниже. После коррозионного воздействия во всех случаях наблюдалось сглаживание шероховатости поверхности образцов за счет более интенсивной коррозии сплава на гребнях, чем в ямках. Причем из-за более высокой скорости коррозии шероховатость поверхности в образцах из сплава после РКУП уменьшилась в 1,5 раза, а в состоянии Т6 — только в 1,3 раза.

Таким образом, сероводородсодержащая коррозионная среда оказывает большее влияние на сплав АК4-1 после РКУП, нежели после обработки Т6, снижая шероховатость поверхности образцов, что хорошо согласуется с данными о более высокой скорости коррозии сплава после РКУП.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-48-02119 р\_поволжье\_а).*

## Литература

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.
2. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk nanostructured materials: Fundamentals and applications. Hoboken, New Jersey: TMS, Wiley & Sons, Inc., 2014.
3. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. М.: Физматлит, 2000.
4. Валиев Р.З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации // Росс. нанотехнологии. 2006. Т. 1. No. 1—2. С. 208—216.
5. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы — состояние разработок и перспективы // Персп. материалы. 2001. No. 6. С. 5—11.
6. Белоглазов И.Н., Сырков А.Г. Наноструктурированные металлы и материалы: актуальность проблематики и перспективность исследований // Цвет. металлы. 2005. No. 9. С. 4—5.
7. Hadzima B., Janeček M., Estrin Y., Kim H.S. Microstructure and corrosion properties of ultrafine-grained interstitial free steel // Mater. Sci. Eng. A. 2007. Vol. 462. P. 243—247.
8. Ralston K.D., Birbils N., Davies C.H.J. Revealing the relationship between grain size and corrosion rate of metals // Scr. Mater. 2010. Vol. 63. P. 1201—1204.
9. Liu L., Li Y., Wang F.H. Electrochemical corrosion behavior of nanocrystalline materials: A review // J. Mater. Sci. Technol. 2010. Vol. 26. P. 1—14.
10. Song Dan, Ma Ai-bin, Jiang Jing-hua, Lin Pin-hua, Yang Dong-hui. Corrosion behavior of ultra-fine grained industrial pure Al fabricated by ECAP // Trans. Nonferr. Met. Soc. China. 2009. Vol. 19. P. 1065—1070.
11. Vinogradov A., Mimaki T., Hashimoto S., Valiev R. On the corrosion behaviour of ultrafine-grained copper // Scr. Mater. 1999. Vol. 41. P. 319—326.
12. Rofagha A., Langer R., El-Sherik A.M., Erb U., Palumbo G., Aust K.T. The corrosion behaviour of nanocrystalline nickel // Scr. Metall. Mater. 1991. Vol. 25. P. 2867—2872.
13. Balyanov A., Kutnyakova J., Amirkhanova N.A., Stolyarov V.V., Valiev R.Z., Liao X.Z., Zhao Y.H., Jiang Y.B., Xu H.F., Lowe T.C., Zhu Y.T. Corrosion resistance of ultra fine-grained Ti // Scr. Mater. 2004. Vol. 51. P. 225—229.
14. Dan Song, Aibin Ma, Jinghua Jiang, Pinghua Lin. Overview on the corrosion behavior of ultra-fine grained materials fabricated by equal-channel angular pressing // Mater. Sci. Forum. 2011. Vols. 667—669. P. 1131—1136.
15. Клевцов Г.В., Валиев Р.З., Исламгалиев Р.К., Клевцова Н.А., Хафизова Э.Д., Мерсон Е.Д., Пигалева И.Н. Прочность и механизм разрушения алюминиевого сплава АК4-1 в субмикрокристаллическом состоянии при статическом и ударном нагружении // Фундам. исследования. 2013. No. 8 (2). С. 281—285.

16. Исламгалиев Р.К., Нестеров К.М., Хафизова Э.Д., Ганев А.В., Голубовский Е.Р., Волков М.Е. Прочность и усталость ультрамелкозернистого алюминиевого сплава АК4-1 // Вестн. УГАТУ. Машиностроение. 2012. Т. 16. No. 8 (53). С. 104—109.
  17. Клевцов Г.В., Мерсон Е.Д. О возможности использования конфокального лазерного сканирующего микроскопа для исследования микрорельефа поверхности разрушения металлических материалов // Фундам. исследования. 2012. No. 11 (5). С. 1185—1189.
- ## References
1. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. Ob'emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svoistva [Volume nanostructured metallic materials: receiving, structure and properties]. Moscow: Akademkniga, 2007.
  2. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk nanostructured materials: Fundamentals and applications. Hoboken, New Jersey: TMS, John Wiley & Sons, Inc., 2014.
  3. Gusev A.I., Rempel' A.A. Nanokristallicheskie materialy [Nanocrystalline materials]. Moscow: Fizmatlit, 2000.
  4. Valiev R.Z. Sozdanie nanostrukturnykh metallov i spлавov s unikal'nymi svoistvami, ispol'zuya intensivnye plasticheskie deformatsii [Creation of nanostructured metals and alloys with unique properties using intensive plastic deformation]. *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2006. Vol. 1. No. 1—2. P. 208—216.
  5. Andrievskiy R.A. Nanostrukturnye materialy — sostoyaniye razrabotok i perspektivy [Nanostructured materials — state and prospects of development]. *Perspektivnye materialy*. 2001. No. 6. P. 5—11.
  6. Beloglazov I.N., Syrkov A.G. Nanostrukturirovannye metally i materialy: aktual'nost' problematiki i perspektivnost' issledovaniy [Nanostructuring metals and materials: relevant issues and advanced studies]. *Tsvetnye metally*. 2005. No. 9. P. 4—5.
  7. Hadzima B., Janeček M., Estrin Y., Kim H.S. Microstructure and corrosion properties of ultrafine-grained interstitial free steel. *Mater. Sci. Eng. A*. 2007. Vol. 462. P. 243—247.
  8. Ralston K.D., Birbils N., Davies C.H.J. Revealing the relationship between grain size and corrosion rate of metals. *Scr. Mater.* 2010. Vol. 63. P. 1201—1204.
  9. Liu L., Li Y., Wang F.H. Electrochemical corrosion behavior of nanocrystalline materials: A review. *J. Mater. Sci. Technol.* 2010. Vol. 26. P. 1—14.
  10. Song Dan, Ma Ai-bin, Jiang Jing-hua, Lin Pin-hua, Yang Dong-hui. Corrosion behavior of ultra-fine grained industrial pure Al fabricated by ECAP. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China*. 2009. Vol. 19. P. 1065—1070.
  11. Vinogradov A., Mimaki T., Hashimoto S., Valiev R. On the corrosion behaviour of ultrafine-grained copper. *Scr. Mater.* 1999. Vol. 41. P. 319—326.
  12. Rofagha A., Langer R., El-Sherik A.M., Erb U., Palumbo G., Aust K.T. The corrosion behaviour of nanocrystalline nickel. *Scr. Metall. Mater.* 1991. Vol. 25. P. 2867—2872.
  13. Balyanov A., Kutnyakova J., Amirkhanova N.A., Stolyarov V.V., Valiev R.Z., Liao X.Z., Zhao Y.H., Jiang Y.B., Xu H.F., Lowe T.C., Zhu Y.T. Corrosion resistance of ultra-fine grained Ti. *Scr. Mater.* 2004. Vol. 51. P. 225—229.
  14. Dan Song, Aibin Ma, Jinghua Jiang, Pinghua Lin. Overview on the corrosion behavior of ultra-fine grained materials fabricated by equal-channel angular pressing. *Mater. Sci. Forum*. 2011. Vols. 667—669. P. 113—1136.
  15. Klevtsov G.V., Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Klevtsova N.A., Khafizova E.D., Merson E.D., Pigaleva I.N. Prochnost' i mekhanizm razrusheniya aluminievogo splava AK4-1 v submikrokristallicheskom sostoyanii pri staticheskom i udarnom nagruzheniyakh [Strength and fracture mechanism of aluminum alloy AK4-1 in sub microcrystalline state under static and impact loadings]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013. No. 8 (2). P. 281—285.
  16. Islamgaliev R.K., Nesterov K.M., Khafizova E.D., Ganeev A.V., Golubovskii E.R., Volkov M.E. Prochnost' i ustalost' ul'tramelkozernistogo alyuminievogo splava AK4-1 [Strength and fatigue of ultra-fine grained aluminum AK4-1 alloy]. *Vestnik UGATU. Mashinostroenie*. 2012. Vol. 16. No. 8 (53). P. 104—109.
  17. Klevtsov G.V., Merson E.D. O vozmozhnosti ispol'zovaniya konfokal'nogo lazernogo skaniruyushchego mikroskopa dlya issledovaniya mikrorel'efa poverkhnosti razrusheniya metallicheskih materialov [On the possibility of using confocal laser microscope to study the micro relief of the fracture surface of metallic materials]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2012. No. 11 (5). P. 1185—1189.