

УДК 666.3.016, 666.3-134.1

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВО-  
МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ЩЕЛОЧИ****Васин Александр Александрович<sup>1</sup>**

Заведующий Лабораторией материаловедения Центра коллективного пользования  
канд. техн. наук  
e-mail: [vasin8989@gmail.com](mailto:vasin8989@gmail.com)

**Хайри Азат Хасанович<sup>1</sup>**

Ведущий научный сотрудник Лаборатории получения материалов Центра коллективного  
пользования  
канд. хим. Наук  
e-mail: [hairi.azat@yandex.ru](mailto:hairi.azat@yandex.ru)

**Резниченко Александр Владимирович<sup>1</sup>**

Научный сотрудник Лаборатории получения материалов Центра коллективного  
пользования  
e-mail: [250871rav@gmail.com](mailto:250871rav@gmail.com)

**Корнюшин Максим Витальевич<sup>1</sup>**

Техник Лаборатории материаловедения Центра коллективного пользования  
e-mail: [maksim.korn0312@yandex.ru](mailto:maksim.korn0312@yandex.ru)

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Московский политехнический университет»  
Московский Политех, Россия, 107023 г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38

**Аннотация**

Получены экспериментальные результаты по кинетике взаимодействия алюминий-магниевого сплава АМг12 и АМг20 с водным раствором щелочи NaOH, KOH и LiOH, а также при диспергировании этих сплавов под действием переменного электрического тока. Проведен сравнительный анализ гранулометрических свойств порошков, полученных при использовании различных растворов щелочи. В результате изучения микроструктуры порошков установлено, что с увеличением содержания магния значительно увеличивается выход округлых частиц, как продукта химического диспергирования, и уменьшаются их размеры. Выявлено, что применения различных растворов щелочей оказывает большое влияние на структурные особенности округлых частиц. Показано, что применение электрохимического диспергирования позволяет увеличить дисперсность порошков и в несколько раз снизить концентрацию растворов щелочей, при сохранении скорости протекания реакции.

**Ключевые слова:** алюминий, алюминиевые сплавы, гидроксид алюминия, водород, алюмомагнезиальная шпинель, шпинельные микросферы, сырье, оксидная керамика, электролиз.

---

## **ELECTROCHEMICAL DISPERSION OF ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOYS IN AQUEOUS ALKALI SOLUTIONS**

**Alexandr A. Vasin<sup>1</sup>**

Head of the Laboratory of Materials Science of the Center for Collective Use  
candidate of Sciences in Technology  
e-mail: [vasin8989@gmail.com](mailto:vasin8989@gmail.com)

**Azat H. Hairi<sup>1</sup>**

Leading Researcher, Laboratory for Collecting Materials, Center for Collective Use  
candidate of Sciences in Chemistry  
e-mail: [hairi.azat@yandex.ru](mailto:hairi.azat@yandex.ru)

**Alexandr V. Reznichenko<sup>1</sup>**

Researcher, Laboratory for Collecting Materials  
Center for Collective Use  
e-mail: [250871rav@gmail.com](mailto:250871rav@gmail.com)

**Maxim V. Korniushev<sup>1</sup>**

Technician Laboratory of Materials Science Center for Collective Use  
e-mail: [maksim.korn0312@yandex.ru](mailto:maksim.korn0312@yandex.ru)

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow Polytechnic University»

Moscow Polytechnic University, Russia, 107023 Moscow, Bolshaya Semenovskaya St., 38

---

### **ABSTRACT**

---

Experimental results have been obtained on the kinetics of the interaction of aluminum-magnesium alloys AMg12 and AMg20 with an aqueous solution of alkali NaOH, KOH and LiOH, as well as upon dispersion of these alloys under the influence of alternating electric current. A comparative analysis of the particle size distribution of powders obtained using various solutions of alkali was carried out. As a result of studying the microstructure of the powders, it was found that with an increase in the magnesium content, the yield of rounded particles as a product of chemical dispersion increases significantly and their size decreases. It was revealed that the use of various solutions of alkalis has a great influence on the structural features of rounded particles. It has been shown that the use of electrochemical dispersion allows one to increase the dispersion of powders and several times lower the concentration of alkali solutions, while maintaining the rate of the reaction.

---

**Keywords:** aluminum, aluminum alloys, aluminum hydroxide, hydrogen, alumino-magnesian spinel, spinel microspheres, raw materials, oxide ceramics, electrolysis.

---

## Введение

Для производства различных материалов и изделий широко используются корундовые, силикатные и алюмосиликатные микросферы. Такое сырье позволяет целенаправленно создавать пористые материалы для применения их в различных отраслях промышленности. На сегодняшний день существуют технологии получения таких микросфер, но не существует способа получения микросфер из алюмомагнезиальной шпинели со значительным выходом готового продукта. Сфера применения порошков из полых алюмомагнезиальных микросфер, в отличие от микросфер из  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$ , шире благодаря высокой химической стойкости, огнеупорным свойствам, термостойкости, теплостойкости, металло- и шлакоустойчивости, твердости, прочности и многим другим свойствам алюмомагнезиальной шпинели, сохраняющимися при высоких температурах. Полые микросферы представляют собой перспективную базу для создания материалов с пористостью выше 90%, которые могут применяться в качестве огнеупоров, теплоизоляции, поглотителей энергии, а также пространственных каркасов при создании высокопористых композитов с полимерной матрицей.

Основным научным заданием работы является разработанный авторами метод химического диспергирования алюминий-магниевого сплава, описанный в работах [1-4]. В них был отработан технологический процесс получения порошков и пористого керамического материала из химически диспергированных алюминий-магниевого сплава с различным содержанием магния. Технологический процесс изготовления порошков включал следующие стадии: химическое диспергирование стружки указанных сплавов в водном растворе щелочи, отмывку осадка методом декантации, фракционирование, сушку и термическую обработку порошка.

При проведении исследований в процессе химического диспергирования сплавов было зафиксировано образование полых сфероидизированных частиц [1-3]. Как и предполагалось, увеличение массовой доли магния в исходном сплаве приводило к повышению выхода алюмомагнезиальной шпинели. Обнаружение в структуре частиц порошка после термообработки и в структуре керамического материала сфероидизированных частиц алюмомагнезиальной шпинели с размером от 1 до 150 мкм стало одним из наиболее интересных результатов проведенных исследований. Увеличение массовой доли магния (от 6 до 20% масс.) в исходном алюминий-магневом сплаве приводило к повышению выхода алюмомагнезиальной шпинели, а сфероидизированные частицы встречались чаще, что и привело к необходимости исследования в данной работе сплавов с высоким содержанием магния АМг12 и АМг20. Также в результате проведенных ранее работ впервые был установлен механизм, объясняющий влияние магния в алюминий-магневых сплавах на процессы формирования структуры порошков.

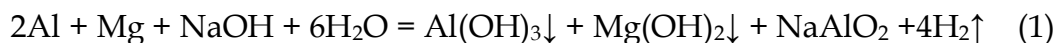
Актуальность настоящей работы заключается в необходимости изучения кинетики взаимодействия алюминий-магниевого сплава с различным содержанием магния (АМг12 и АМг20) с водными растворами щелочей (NaOH, KOH, LiOH), изучения воздействия электрического тока на кинетику диспергирования, с целью отработки и выявления наиболее оптимальных технологических режимов.

Кинетика взаимодействия алюминия и алюминиевых сплавов (АМг3, АМг6, АК7, АК12, Д16 и др.) с водными растворами гидроксидов щелочных элементов исследована в работах [5-11].

В начале исследования процессов диспергирования алюминий-магниевого сплава предполагалось, что в большинстве случаев все едкие щелочи, включая NaOH, осаждают в растворах гидроксид магния  $Mg(OH)_2$ , растворимость которого в воде мала. В ходе реакции крупные частицы магния должны были покрываться нерастворимым в воде  $Mg(OH)_2$ . На поверхности гидроксида магния должен был агломерироваться гидроксид алюминия. При увеличении содержания магния в сплаве скорость реакции должна была

уменьшаться, так как увеличивалось количество гидроксида, осаждаемого на поверхности алюминия, что препятствовало бы доступу щелочи к алюминию.

На основании классических представлений неорганической химии [12] полагали, что химическое диспергирование алюминиевых сплавов достигается благодаря протеканию следующей экзотермической химической реакции (1):



Гидролиз раствора  $\text{NaAlO}_2$ , обеспечивающий дополнительное выделение осадка, должен был достигаться за счет добавления нагретой до 90-95 °С воды (2):



Позже в результате проведения ряда исследований было установлено, что реакция химического диспергирования алюминий-магниевого сплава несколько отличается от первоначально предложенной (1). В получившемся порошке присутствовали основные кристаллические формы гидроксида алюминия: гиббсит, байерит и бемит. Дисперсионные силы, действующие между ними, объединяли их в агломераты. Образование нерастворимого осадка  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  не наблюдалось, а ионы  $\text{Mg}^{+2}$  связывались в твердый раствор  $\text{NaAlO}_2 - \text{NaMgAlOH}$ , в твердый раствор замещения  $\text{Mg}^{+2}$  в  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  и аморфную гидратную фазу благородной шпинели –  $(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .

Это явление было объяснено значительной неравновесностью процесса и образованием промежуточных оксидных и гидроксидных фаз из частиц наноразмерного диапазона с аномально высокой реакционной способностью. Это же и являлось объяснением формирования из указанных промежуточных фаз сложных гидратных форм, включающих одновременно ионы  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ .

В работе [5] волюмометрическим методом исследована зависимость начальной скорости выделения водорода от концентрации раствора гидроксида натрия  $\text{NaOH}$  при его взаимодействии с алюминием и алюминий-магниевыми сплавами при температуре 25 °С. Молярная концентрация водных растворов  $\text{NaOH}$  составляла  $C_{\text{NaOH}} = 2-18$  моль/л. Для проведения экспериментов использовали специально приготовленные образцы из алюминия чистотой 99,4% и изготовленные на заказ двухкомпонентные сплавы  $\text{AlMg}_3$ ,  $\text{AlMg}_6$ ,  $\text{AlMg}_{12}$  и  $\text{AlMg}_{20}$ , содержащие алюминий той же чистоты и магний в массовых долях 3, 6, 12 и 20 процентов соответственно.

При увеличении концентрации раствора щелочи скорость реакции возрастала. Установлено, что начальная скорость реакции проходит через максимальное значение при концентрации раствора  $\text{NaOH}$  4 моль/л. При химическом диспергировании сплавов  $\text{AlMg}_{12}$  и  $\text{AlMg}_{20}$  в растворе  $\text{NaOH}$  увеличение концентрации от 1 до 4 моль/л приводило к увеличению скорости в 1,8 раз, примерно до 6 л/м<sup>2</sup>\*мин. При протекании всех реакций с различной концентрацией реагентов после достижения скоростных максимумов замечено снижение их скоростей. Это явление объяснялось образованием на поверхности твердых алюминатов или продуктов их гидролиза, а также уменьшением термодинамической активности воды, участвующей в процессах гидратации катионов и анионов.

В ходе изучения кинетических особенностей протекания реакций был сделан вывод о том, что уменьшение содержания алюминия в алюминий-магниевого сплавах и их структурные особенности приводят к снижению максимальной скорости реакции. Самое низкое значение максимальной скорости наблюдалось для образца сплава  $\text{AlMg}_{20}$  и составило 0,15 л/м<sup>2</sup>\*мин, зафиксированное значение в 6 раз меньше, чем для сплава  $\text{AlMg}_3$ . Можно предположить, что наибольшее количество алюмината магния в поверхностной пленке образуется в сплаве с наибольшим содержанием магния. Это может приводить к

наименьшим начальным скоростям при взаимодействии водного раствора щелочи со сплавом АМг20.

Сведения о характере взаимодействия алюминиево-магниевого сплава с раствором щелочей представляют большой интерес, так как, изменяя состав сплавов и раствора щелочи, а также температуру, можно управлять скоростью процесса и регулировать процесс формирования частиц. Авторами показано, что одним из способов управления скоростью процесса – может являться воздействие электрическим током на процесс диспергирования.

Целью данной работы является исследование влияния переменного электрического тока на процесс химического диспергирования алюминий-магниевого сплава в растворе различных щелочей и на свойства образующихся продуктов.

### Методика эксперимента

Скорость диспергирования сплавов на основе алюминия растворами NaOH, KOH и LiOH исследовали волюмометрическим методом по объему выделяющегося водорода. Для проведения экспериментов использовали специально приготовленные образцы из алюминия чистотой 99,4% и изготовленные на заказ двухкомпонентные сплавы АМг12 и АМг20, содержащие алюминий той же чистоты и магний в массовых долях 12 и 20 % (масс.) соответственно. Образцы – диски из сплавов (диаметр 18 мм, толщина 5 мм) с резьбовыми отверстиями для соединения с электродом-держателем. Образцы помещали в термостатированный (температура 25 °С) реактор – коническую колбу, содержащую 0,5 л раствора гидроксида натрия концентрацией 1 моль/л. Реактор герметично соединяли с волюмометрической системой.

Предварительно, без пропуска переменного электрического тока, химически диспергировали два образца, соединенные с электродами и находящиеся в растворе гидроксида натрия, и измеряли объем выделяющегося газообразного водорода. Затем аналогичные образцы в таком же растворе диспергировали под действием переменного тока (сила тока 0,5 А, напряжение 6,4 В, частота 50 Гц) и так же измеряли объем выделяющегося водорода.

Скорость реакции  $r$  рассчитывали по уравнению (3):

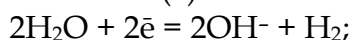
$$r = \Delta V / S \Delta t, \quad (3)$$

где  $\Delta V$  – объем выделившегося водорода за время  $\Delta t$ ;  $S$  – площадь электрода.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

На катоде при электролизе, в первую очередь, протекает восстановительный процесс, характеризующийся наиболее положительным значением электродного потенциала. Рассмотрим процесс на примере NaOH. При электролизе водного раствора гидроксида натрия концентрацией 1 моль/л с электродами, выполненными из сплава на основе алюминия, протекает реакция на электродах:

На катоде (-):

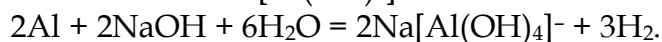


На аноде (+):



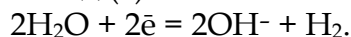
В процессе электролиза (по сравнению с процессом без протекания электрического тока) скорость диспергирования алюминия возрастает, так как он подвергается как электрохимическому диспергированию, так и химическому диспергированию по реакциям:

Анод (+):



Расход ионов  $\text{OH}^-$  при электрохимическом диспергировании полностью компенсируется их образованием по катодной реакции, протекающей на этом же электроде при смене электрического полюса:

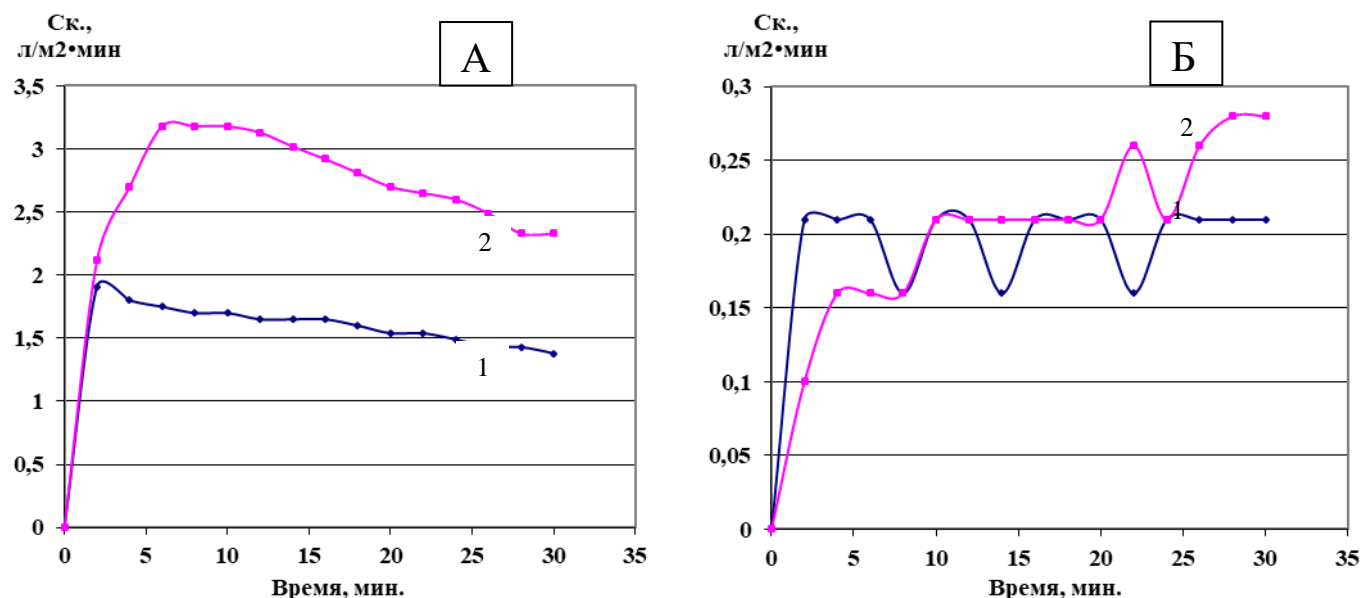
Катод (-):



В при электродном слое не происходит накопления ни ионов  $\text{Al}^{3+}$ , ни ионов  $\text{OH}^-$ . Согласно приведенным реакциям, в процессе электрохимического диспергирования алюминиевого сплава расходуются (кроме электроэнергии) материал электрода – алюминий и вода (в зависимости от значения электрических полюсов).

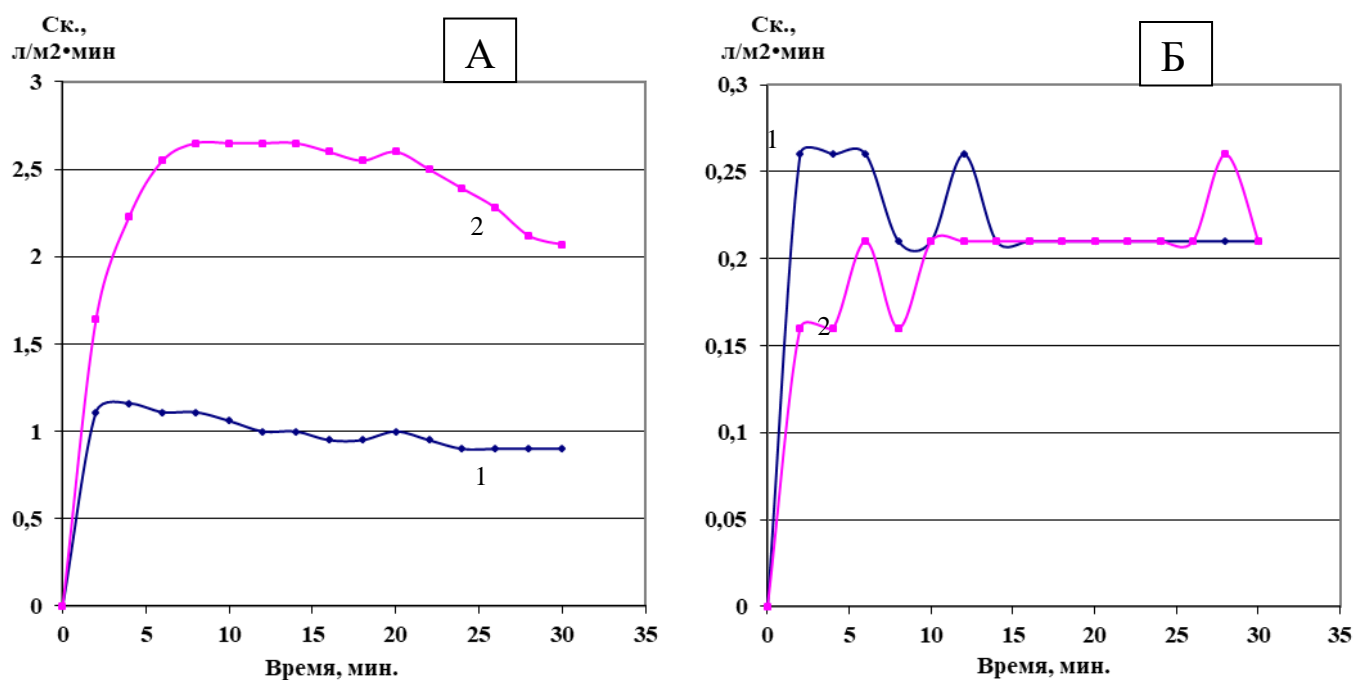
Протекающий катодный процесс восстановления воды на алюминиевом электроде обуславливает дополнительное выделение водорода и возрастание суммарной скорости его выделения. На катоде одновременно с выделением газообразного водорода образуются ионы  $\text{OH}^-$ , что вызывает резкое увеличение их концентрации в приэлектродном слое. В этом же слое за счет протекающей в следующей фазе переменного тока анодной реакции резко возрастает концентрация ионов  $\text{Al}^{3+}$ . Ионы  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{OH}^-$  реагируют с образованием комплексного иона  $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ . Следовательно, при пропускании электрического тока через раствор возрастает не только скорость выделения газообразного водорода, но и скорость электрохимического диспергирования алюминия.

Кинетические кривые выделения водорода при химическом и электрохимическом диспергировании сплавов АМг12 и АМг20 в различных растворах щелочей представлены на рисунках 1 и 2.



**Рисунок 1.** Зависимости скорости выделения водорода (литров на 1 м<sup>2</sup> площади поверхности в минуту) от времени при взаимодействии сплава АМг12 (А) и АМг20 (Б) с раствором  $\text{NaOH}$  ( $C_{\text{NaOH}} = 1 \text{ М/л}$ ) при  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ :

1 – при химическом диспергировании; 2 – при электрохимическом диспергировании



**Рисунок 2.** Зависимости скорости выделения водорода (литров на 1 м<sup>2</sup> площади поверхности в минуту) от времени при взаимодействии сплава АМг12 (А) и АМг20 (Б) с раствором КОН (С<sub>кон</sub> = 1 М/л) при T = 25 °С:

1 – при химическом диспергировании; 2 – при электрохимическом диспергировании

Скорость выделения водорода при взаимодействии сплава АМг20 с раствором NaOH концентрации 1м/л при 25 °С практически постоянна и составляет, примерно, 0,20л/м<sup>2</sup>\*мин.

Скорость взаимодействия сплава АМг20 с раствором КОН при таких же условиях в начале опыта (порядка 6 мин.) составляет 0,25л/м<sup>2</sup>\*мин, но затем становится равной 0,20л/м<sup>2</sup>\*мин. Этот же процесс под действием переменного электрического тока (6,4В; 0,5а) протекает с такой же скоростью.

При диспергировании сплава АМг20 электрическим током в растворе NaOH в начале процесса скорость составляет 0,15л/м<sup>2</sup>\*мин, затем возрастает до 0,20л/м<sup>2</sup>\*мин и в конце становится равной 0,28л/м<sup>2</sup>\*мин. По результатам проведённых опытов можно сделать вывод, что электрический ток не оказывает заметного влияния на процесс диспергирования сплава АМг20.

Диспергирование сплава АМг12 в растворе NaOH концентрации 1м/л протекает монотонным снижением скорости от начального максимального значения 1,90л/м<sup>2</sup>\*мин до 1,38л/м<sup>2</sup>\*мин. Такое же плавное снижение скорости наблюдается при диспергировании сплава АМг12 в растворе КОН от начальной 1,11л/м<sup>2</sup>\*мин до 0,9л/м<sup>2</sup>\*мин.

При электрохимическом диспергировании сплава АМг12 в растворе NaOH с концентрацией 1 моль/л скорость выделения водорода возрастает в 1,7 раз (3,18 л/м<sup>2</sup>\*мин). Сплав АМг12 в растворе NaOH под воздействием электрического тока, достигнув максимальной скорости диспергирования 3,18 л/м<sup>2</sup>\*мин, через 6 минут начинает плавно уменьшаться до значения 2,33л/м<sup>2</sup>\*мин.

Этот же сплав под действием электрического тока в растворе КОН, достигнув максимальной скорости диспергирования 2,55л/м<sup>2</sup>\*мин, продолжает растворяться с такой же скоростью еще 18 минут. Затем только наступает монотонное уменьшение скорости до 2,07л/м<sup>2</sup>\*мин. Максимальная скорость выделения водорода возрастает в 2,3 раза по сравнению с химическим диспергированием.

В растворах LiOH концентрации 1 м/л выбранные образцы практически не диспергируются. Так, образец марки сплава АМг12 за 60 минут выделяет всего 5 мл водорода, а под током – 8 мл.

Изменяя параметры тока, пропускаемого через систему, можно управлять скоростью протекания реакции и количеством выделяющегося водорода. Известно, что при осаждении из растворов большой концентрации образуются очень мелкие и медленно оседающие частицы [13, 14]. В процессе электрохимического диспергирования алюминия и его сплавов концентрация как ионов  $Al^{3+}$ , так и ионов  $OH^-$  в приэлектродном слое значительно возрастает, по сравнению с химическим диспергированием. Проведенные ранее эксперименты показали, что при электрохимическом диспергировании алюминий-магниевых сплавов образовывались продукты с более мелкими частицами.

Влияние водных растворов щелочей (NaOH, KOH, LiOH) на размер частиц порошков после химического диспергирования было исследовано гранулометрическим методом с использованием лазерного анализатора размера частиц FRITSCHE Analysete 22 Nanotecplus с применением ультразвука. Результаты исследований приведены в таблице 1.

*Таблица 1. Гранулометрические характеристики порошков из сплава АМг12 и АМг20\**

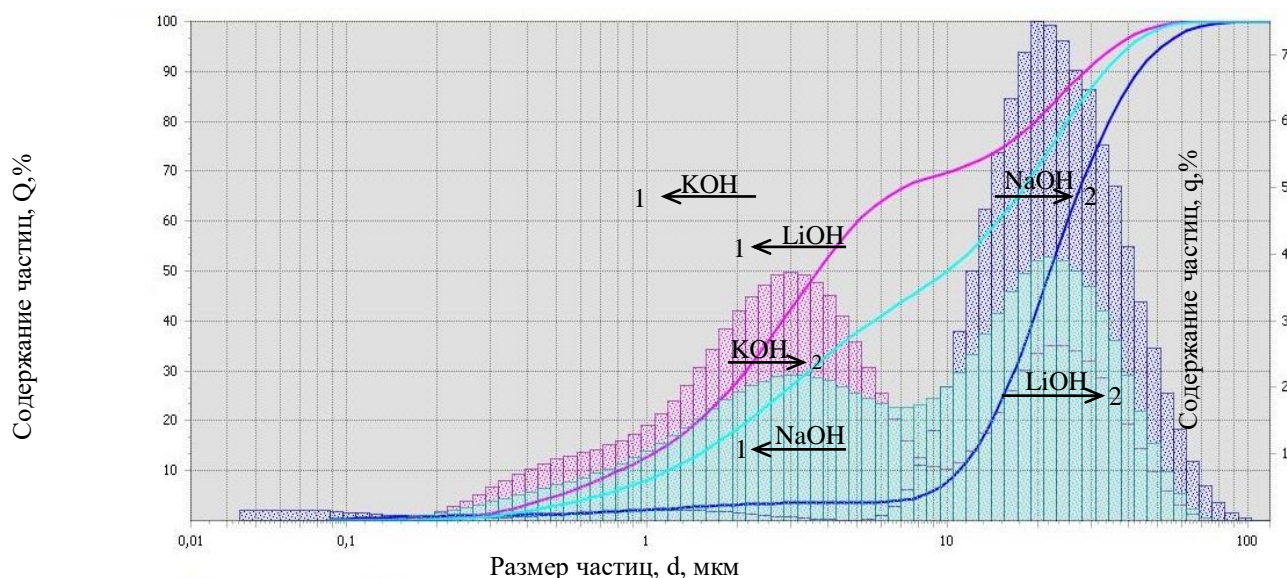
Диспергируемый сплав/щелочь	$d_{10}$ , мкм	$d_{50}$ , мкм	$d_{90}$ , мкм
АМг12 + NaOH	10,9	22,0	43,3
АМг12 + KOH	0,8	3,7	28,7
АМг12 + LiOH	1,2	9,9	33,4
АМг20 + NaOH	6,5	14,4	25,2
АМг20 + KOH	17,7	49,0	92,2
АМг20 + LiOH	13,7	44,2	85,3

\*Здесь величина  $d_n$  такая, что число частиц с характерным размером меньше  $d_n$  составляет n % всех частиц.

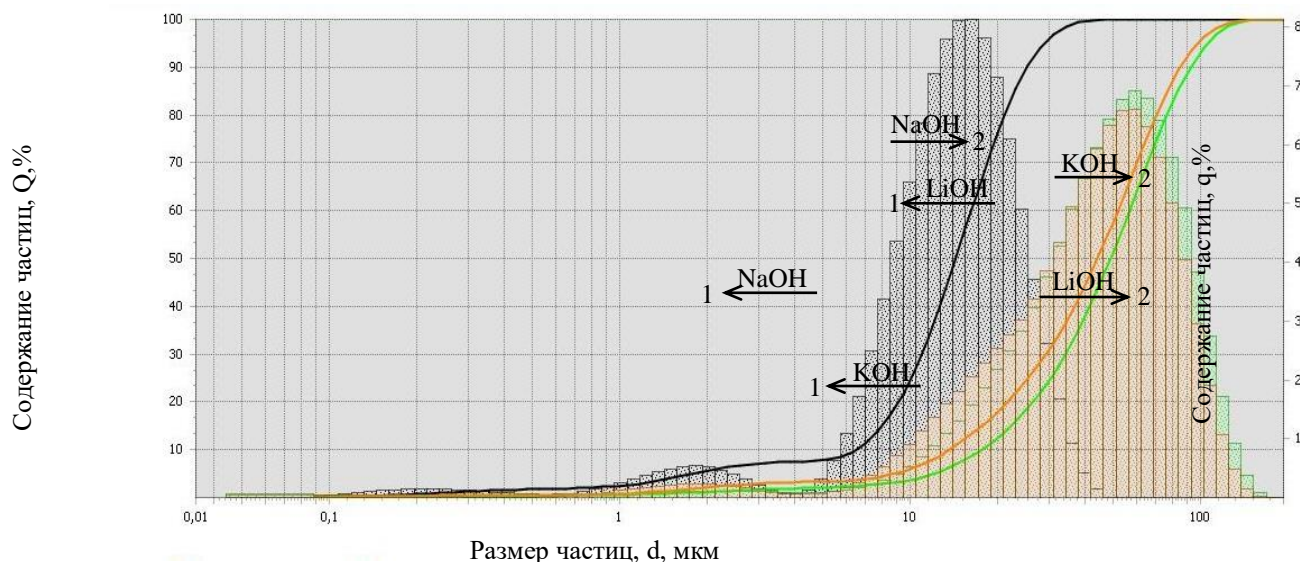
Приведенные данные в таблице показывают, что в порошках, полученных химическим диспергированием АМг12 в растворах KOH и LiOH, 50% составляют частицы с размером меньше 3,7 и 9,9 мкм соответственно.

Более полное представление о гранулометрических свойствах продуктов диспергирования дают рисунки 3 и 4. Здесь изображены интегральные и дифференциальные функции распределения частиц порошков по размерам.





**Рисунок 3.** Интегральное 1 и дифференциальное 2 распределение частиц по размерам порошков, полученных химическим диспергированием сплава АМг12 в различных растворах щелочи



**Рисунок 4.** Интегральное 1 и дифференциальное 2 распределение частиц по размерам порошков, полученных химическим диспергированием сплава АМг20 в различных растворах щелочи

Для порошков из АМг12, полученных с использованием растворов КОН и LiOH характерно бимодальное распределение частиц по размерам с максимумами около 3 и 22 мкм. Наиболее мелкодисперсные порошки из сплава АМг12 получены при химическом диспергировании в растворе КОН, эти порошки на 90% состоят из частиц с размером меньше 28,7 мкм.

Для порошков из АМг20, полученных с использованием растворов КОН и LiOH характерно одномодальное распределение частиц по размерам с максимумами около 60 мкм. Полученные с применением этих растворов порошки на 50% состоят из частиц с размером меньше 92,2 и 85,3 мкм соответственно. Наиболее мелкодисперсные порошки из сплава АМг20 получены при химическом диспергировании в растворе NaOH, эти порошки на 90% состоят из частиц с размером меньше 25,2 мкм. Дифференциальная функция распределения частиц всех полученных в растворе NaOH порошков имеет более

симметричный вид и меньший размах. При электрохимическом диспергировании сплавов алюминия АМг12 и АМг20 получаются порошки с частицами меньшего размера.

Структурные особенности порошков были исследованы с использованием растровой электронной микроскопии. В результате сравнения установлено, что с увеличением содержания магния значительно увеличивается выход округлых частиц, как продукта химического диспергирования, и уменьшаются их размеры. Размерный диапазон округлых гранул составляет 5-20 мкм. Помимо большого количества округлых частиц в порошке присутствуют субмикронная и микронная кристаллическая составляющая, самостоятельная, а также объединенная в отдельные изометричные агломераты.

Для порошка, полученного химическим диспергированием сплавов АМг12 и АМг20 (рис. 5 А) в растворе LiOH, характерно преобладание пластинчатых частичек, преимущественно шестиугольной формы. Толщина данных пластинок составляет от 100 до 300 нм. Специфическая пластинчатая структура по поверхности округлых частиц образуется в результате влияния LiOH.

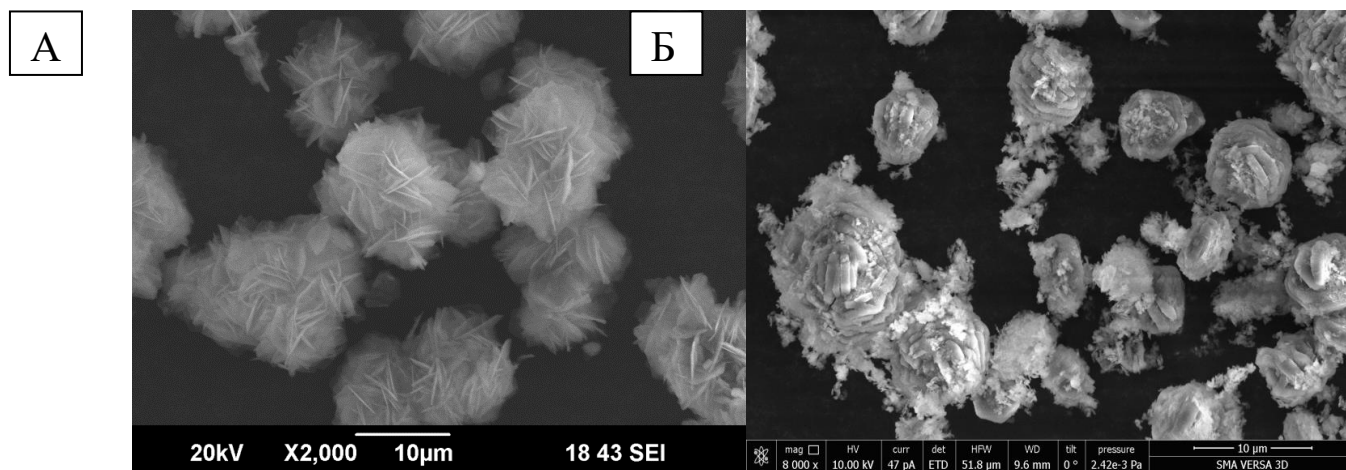


Рисунок 5. Вид частиц порошка, полученного химическим диспергированием сплава АМг12 в растворе LiOH (А) и АМг20 в растворе NaOH (Б)

По поверхности округлых частиц в порошке, полученном химическим диспергированием сплава АМг20 в растворе NaOH (рис.5 Б), распределена мелкодисперсная фаза в виде субмикронных и микронных кристаллов, представляющих собой различные гидратные формы. Округлые частицы обладают слоистой структурой, состоящей из сферических ядер из не прореагировавшего сплава и чередующихся оболочек из различных гидратных форм алюминия.

### Выводы

1. Экспериментально изучена и установлена возможность ускорения процесса диспергирования алюминий-магниевого сплава АМг12 в водном растворе КОН и LiOH с концентрацией 1 моль/л и управления скоростью генерирования газообразного водорода с помощью переменного электрического тока. Максимальная скорость выделения водорода была получена при электрохимическом диспергировании сплава АМг12 в растворе NaOH с концентрацией 1 моль/л – 3,18 л/(м<sup>2</sup>·мин). Для этого же сплава в растворе КОН была зафиксирована самая большая продолжительность процесса диспергирования на максимальной скорости выделения водорода, а также максимальный рост скорости (в 2,3 раза по сравнению с химическим диспергированием). В растворах LiOH концентрации 1 моль/л выбранные сплавы диспергируются с минимальной

скоростью за значительно больший период времени, электрохимическое диспергирование незначительно ускоряет данный процесс.

По результатам проведённых опытов можно сделать вывод, что электрический ток не оказывает заметного влияния на процесс диспергирования сплава АМg20, что может быть обусловлено большим количеством интерметаллидной фазы  $\beta$  ( $Al_3Mg_2$ ) – до 46,4% в исходном сплаве и малым количеством твердого раствора, обладающего хорошей реакционной способностью. Так как скорость такой зернограничной коррозии в значительной степени определяется объёмной долей наиболее мелких зерен, то щелочь наиболее активна должна разъесть сплавы с меньшим содержанием магния, из-за меньшего количества выросшей интерметаллидной  $\beta$ -фазы.

2. Самые мелкодисперсные порошки были получены из сплава АМg12 в растворе КОН (на 90% состоят из частиц с размером меньше 28,7 мкм) и из сплава АМg20 в растворе NaOH (на 90% состоят из частиц с размером меньше 25,2 мкм). Однако, для порошков из АМg20, полученных с использованием растворов КОН и LiOH, характерно одномодальное распределение частиц, они на 50% состоят из частиц с размером меньше 92,2 и 85,3 мкм соответственно. Крупность указанных порошков также может объясняться большим количеством интерметаллидной фазы, которая приводит к выделению в реакционный объём крупных зерен, пассивирующихся по поверхности металлгидроксидной оболочкой. Применение электрохимического диспергирования сплавов алюминия АМg12 и АМg20 позволяет увеличить дисперсность порошков и в несколько раз снизить концентрацию растворов щелочей, при сохранении скорости протекания реакции.

3. В результате сравнения полученных порошков установлено, что с увеличением содержания магния значительно увеличивается выход округлых частиц, как продукта химического диспергирования, и уменьшаются их размеры. Размерный диапазон округлых частиц с использованием переменного электрического тока смещается в область меньших значений и составляет 5-20 мкм. Для порошков, полученных в растворе LiOH, характерно преобладание пластинчатых частичек, распределенных по поверхности округлых частиц. Пластинчатые частицы на поверхности округлых гранул в дальнейшем могут сыграть основную роль в структурообразовании и формировании свойств нового материала, образуя каркас всей структуры. Закрытая пористость будет складываться из внутренних полостей шпинельных микросфер, а пластинчатая форма частичек, в результате укладки, будет образовывать обширное поровое пространство с развитой системой каналов внутри материала.

\*\*\*

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по Гранту Президента № МК-1449.2019.8 (соглашение 075-15-2019-698) на тему «Получение, изучение и применение полых микросфер алюмомагнезиальной шпинели в качестве исходного порошкового сырья для производства керамики с высокими эксплуатационными свойствами» на оборудовании Центра коллективного пользования Московского Политеха.

### Список литературы

1. Трифонов Ю.Г., Омаров А.Ю. Структура и фазовый состав нового керамического материала, получаемого из продукта химического диспергирования сплава АМg12 // Письма о материалах. – 2013. – Том 3, №4. – С. 272-275.
2. Васин А.А., Тарасовский В.П., Рыбальченко В.В., Омаров А.Ю. Пористая керамика из порошков, полученных методом химического диспергирования сплава Al-Mg (20 масс. %) // Новые огнеупоры. – 2014. – № 11. – С. 47-49. 155.

3. Vasin A.A., Tarasovskii V.P., Rybalchenko V.V., Omarov A.Yu. Porous ceramic made from powders prepared by chemical dispersion of alloy Al-Mg (20 wt.%) // *Refractories and Industrial Ceramics*. - 2015. - Vol. 55, №. 6. - P. 532-535.
4. Vasin A.A., Tarasovskii V.P., Rybalchenko V.V., Omarov A.Yu. Study of cermet synthesis from powders prepared by chemical dispersion of Al-Mg (20 wt.%) - alloy // *Refractories and Industrial Ceramics*. - 2015. - Vol. 56, №. 3. - P. 532-535.
5. Бадаев Ф.З., Рыбальченко В.В., Хайри А.Х., Касатова Н.А., Айрих А.И. Определение кинетических параметров взаимодействия алюминиево-магниевых сплавов с водным раствором гидроксида натрия // *Машиностроение и инженерное образование*. - 2013.- №1 (34). - С. 17-20.
6. Badaev F.Z., Tarasovskii V.P., Novoselov R.A. et al. Preparation of Aluminum Oxide Ceramic Precursors by Dispersion of Aluminum Alloy D16 // *Refractories and Industrial Ceramics*. - 2015. - V. 5b, № I. - P. 11-13.
7. Бадаев Ф.З., Хайри А.Х., Касатова Н.А., Айрих А.И. Кинетика взаимодействия алюминиево-кремниевых сплавов с водным раствором гидроксида натрия // *Машиностроение и инженерное образование*. - 2013. - № 2 (35). - С. 44-48.
8. Бадаев Ф.З., Хайри А.Х., Касатова Н.А. Кинетика взаимодействия алюминиево-титановых сплавов с водным раствором гидроксида натрия // *Научные технологии в машиностроении*. - 2014.- № 1 (31). - С. 3-7.
9. Бадаев Ф.З., Хайри А.Х., Новоселов Р.А., Тарасовский В.П. Кинетические особенности взаимодействия алюминиево-медных сплавов с полными растворами гидроксида натрия // *Машиностроение и инженерное образование*. - 2015. - № 2 (43). - С. 34-39.
10. Трифонов Ю.Г., Омаров А.Ю., Шляпин А.Д., Васин А.А. Структура алюмооксидного порошка, полученного химическим диспергированием сплава Al-Ti и спеченной из него керамики // *Инновации и инвестиции*. - 2013. - № 4.
11. Шляпин А.Д., Омаров А.Ю., Тарасовский В.П., Трифонов Ю.Г., Айрих А.И. Физико-механические свойства керамических материалов, полученных при химическом диспергировании алюминиевого сплава марки АК-12 // *Новые огнеупоры*. - 2013. - № 7. - С. 30-33.
12. Лурье Б.А., Чернышов А.Е., Перова Н.Н., Светлов Б.С. Кинетика взаимодействия алюминия с водой и водными растворами щелочей // *Кинетика и катализ*. 1976. Т. 17. № 6. С. 1453-1458.
13. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 90th Ed. 2010.
14. Крешков А.П., Ярославцев А.А. Курс аналитической химии. Количественный анализ. М. Химия, 1982. 312 с.

### References

1. Trifonov Yu. G., Omarov A.Yu. The structure and phase composition of the new ceramic material obtained from the chemical dispersion product of AMg12 alloy // *Material Letters*. - 2013. - Vol.3, № 4. -P. 272-275.
2. Vasin A.A., Tarasovskii V.P., Rybalchenko V.V., Omarov A.Yu. Porous ceramic made from powders prepared by chemical dispersion of alloy Al-Mg (20 wt.%) // *New refractories*. - 2014. - № 11. - p. 47-49. 155.
3. Vasin A.A., Tarasovskii V.P., Rybalchenko V.V., Omarov A.Yu. Porous ceramic made from powders prepared by chemical dispersion of alloy Al-Mg (20 wt.%) // *Refractories and Industrial Ceramics*. - 2015. - Vol. 55, №. 6. - P. 532-535.
4. Vasin A.A., Tarasovskii V.P., Rybalchenko V.V., Omarov A.Yu. Study of cermet synthesis from powders prepared by chemical dispersion of Al-Mg (20 wt.%) - alloy // *Refractories and Industrial Ceramics*. - 2015. - Vol. 56, №. 3. - P. 532-535.

5. Badaev F.Z., Rybalchenko V.V., Hairi A.H., Kasatova N.A., Airih A.I. Determination of the kinetic parameters of the interaction of aluminum-magnesium alloys with an aqueous solution of sodium hydroxide // Engineering and engineering education. - 2013. - №1 (34). - P. 17-20. (In Russian).
6. Badaev F.Z., Tarasovskii V.P., Novoselov R.A. et al. Preparation of Aluminum Oxide Ceramic Precursors by Dispersion of Aluminum Alloy D16 // Refractories and Industrial Ceramics. - 2015. - V. 5b, № I. - P. 11-13.
7. Badaev F.Z., Hairi A.H., Kasatova N.A., Airih A.I. Kinetics of the interaction of aluminum-silicon alloys with an aqueous solution of sodium hydroxide // Engineering and engineering education. - 2013. - № 2 (35). - P. 44-48. (In Russian).
8. Badaev F.Z., Hairi A.H., Kasatova N.A. Kinetics of the interaction of aluminum-titanium alloys with an aqueous solution of sodium hydroxide // High technology in mechanical engineering. - 2014. - № 1 (31). -P. 3-7.(In Russian).
9. Badaev F.Z., Hairi A.H., Novoselov R.A., Tarasovskii V.P. Kinetic features of the interaction of aluminum-copper alloys with complete solutions of sodium hydroxide // Engineering and engineering education. - 2015. - № 2 (43). - P. 34-39. (In Russian).
10. Trifonov Yu. G., Omarov A.Yu., Slyapin A.D., Vasin A.A. The structure of alumina powder obtained by chemical dispersion of an Al-Ti alloy and sintered ceramic // Innovation and Investment. - 2013. - № 4. (In Russian)
11. Slyapin A.D., Omarov A.Yu., Tarasovskii V.P., Trifonov Yu. G., Airih A.I. Physico-mechanical properties of ceramic materials obtained by chemical dispersion of an aluminum alloy grade AK-12 // Novye ognepory. - 2013. - № 7. - P. 30-33. (In Russian)
12. Lur'e B.A., Chernishov A.E., Petrova N.N, Svetlov B.S. Kinetics of the interaction of aluminum with water and aqueous alkali solutions // Kinetics and Catalysis. -1976. - T. 17, № 6. - P. 1453-1458. (In Russian).
13. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 90th Ed. 2010. (In Russian).
14. Kreshkov A.P., Yaroslavcev A.A. Course of analytical chemistry. Quantitative analysis. Chemistry, 1982. 312 p. (In Russian).