

УДК 621.525.5

С. В. Захаров, М. Т. Коротких

## Электролитно-плазменное полирование сложнопрофильных изделий из алюминиевого сплава Д16

Проанализированы научные источники, собрана статистика по составам растворов электролитов для электролитно-плазменной обработки алюминиевого сплава Д16. Разработана методика определения потенциальных компонентов раствора электролита, составлен раствор электролита, исключаящий травление поверхности и обеспечивающий требуемое качество поверхностного слоя, определены рациональные технологические режимы.

**Ключевые слова:** пресс-формы, алюминиевый сплав Д16, электролитно-плазменное полирование, травление поверхности, методика разработки электролита, рациональные режимы.

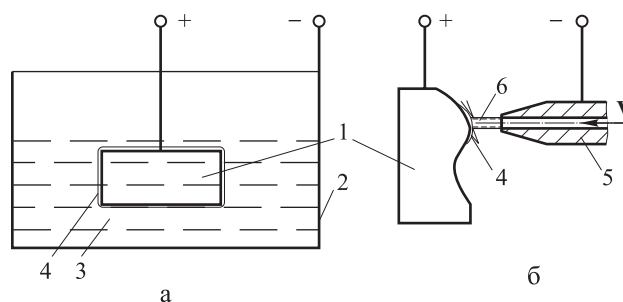
Полирование штампов и пресс-форм для обработки давлением – крайне актуальная проблема в машиностроении на сегодня. Требования к качеству поверхностного слоя штампов и пресс-формы высоки, и достичь такого качества невозможно без больших энергозатрат. Как правило, штампы и пресс-формы имеют сложный профиль формообразующей поверхности, к тому же могут подвергаться термообработке. Кроме того, машиностроительный парк современных предприятий по производству штампов и пресс-форм позволяет получать поверхности любой сложности, однако при обработке резанием не достигается требуемая шероховатость.

Одним из производительных методов отделочной обработки поверхностей является электролитно-плазменное полирование (ЭПП). Электролитно-плазменная обработка (ЭПО) применяется в промышленности с 1980-х гг. Электролитно-плазменное полирование позволяет обрабатывать металлические изделия с целью снижения шероховатости поверхности, оксидирования, очистки, снятия заусенцев, обезжиривания, удаления ранее нанесенных покрытий, подготовки поверхности под покрытия. Основными преимуществами этого метода, по сравнению с ранее известными, являются:

- быстрота полирования или оксидирования (2...5 мин), снятия заусенцев (менее 1 мин);
- отсутствие абразивного шаржирования поверхности изделия;
- меньшее загрязнение окружающей среды;

- высокая экологичность;
- низкая себестоимость реализации метода.

Метод ЭПП применяется в промышленности при погружении изделия 1 в раствор электролита 3 (рис. 1, а), находящегося в ванне 2, и при воздействии на изделие струи электролита 6 (рис. 1, б). В обоих случаях заготовка является анодом. В первом случае катодом является ванна 2, во втором – сопло 5 или специальный электрод, находящийся в электрическом контакте со струей электролита. Для процессов электролитно-плазменной обработки характерно образование пароплазменной прослойки 4 между электролитом и обрабатываемым изделием. Процесс характеризуется высоким (200...1000 В) напряжением между электродами и применяемым обычно подогревом электролита до температуры, близкой к температуре кипения (70...90° С).



**Рис. 1.** Схемы электролитно-плазменной обработки:  
V – вектор скорости потока жидкости

В связи с тем что автоматическое полирование на какой-либо машине или автомате применимо лишь в узком технологическом диапазоне, подавляющее большинство операций полирования пресс-форм до сих пор



выполняются вручную, что не отвечает требованиям современного машиностроительного производства. Временные затраты на производство пресс-формы составляют: фрезерование – 45 %, полирование – 55 %.

Одним из наиболее перспективных методов финишной обработки поверхностей является метод ЭПП, позволяющий с высокой скоростью обрабатывать сложнопрофильные поверхности, к которым предъявляются особые требования по шероховатости.

Данный метод успешно применяется в случаях [1], когда:

- затруднена финишная обработка поверхности со сложной геометрией (пресс-формы);
- требуется гомогенный поверхностный слой (без внедрившихся абразивных частиц);
- требуются высокие декоративные свойства (зеркальный блеск).
- необходимо удалить цвета побежалости с поверхности (декоративные качества).

Теоретически методом ЭПП можно обрабатывать любые токопроводящие металлы, но в данный момент метод применяется в основном для обработки хромоникелевых сталей. Такое положение сложилось ввиду массового использования этих сталей во многих сферах производства, а также в связи с тем, что к качеству поверхности деталей из этих сплавов часто предъявляются высокие требования. Стоит отметить и обширные исследования по ЭПП углеродистых сталей, которые позволяют применять этот метод при финишной обработке стальных штампов и пресс-форм.

В то же время при изготовлении пластмассовых изделий широко применяются пресс-формы из алюминиевых сплавов, к качеству формообразующих поверхностей которых предъявляются высокие требования.

Алюминий и его сплавы имеют меньшую твердость, что позволяет эффективно обрабатывать их резанием. Это обуславливает возрастающий интерес промышленности к данному материалу, но из-за низкой твердости увеличивается трудоемкость и снижается производительность его финишной обработки. При полировании абразивными пастами наблюдается внедрение частиц в поверхностный слой,

что значительно ухудшает эксплуатационные свойства поверхности.

При обработке алюминиевых сплавов методом ЭПП наблюдается эффект травления поверхности при нахождении заготовки в растворе электролита. После обработки поверхности травление ухудшает чистоту обработанной поверхности, а также уменьшает отражающую способность поверхности (блеск). Это связано с высокой активностью металла.

Цель проводимого исследования – подбор электролита для ЭПП алюминиевого сплава Д16, обеспечивающего эффективное полирование, имеющего наибольший ресурс и лишенного эффекта травления поверхностного слоя, а также определение рациональных условий проведения процесса для получения требуемой шероховатости внутренней поверхности пресс-форм ( $Ra = 0,2$  мкм). Исследование проводилось на лабораторной установке УЭПП-100, диапазон регулирования напряжения 150...350 В, номинальная мощность 100 кВт, батарея конденсаторов 350 мкФ.

В научной литературе методика формирования состава электролита для ЭПП того или иного материала не рассматривается, а вся имеющаяся информация на эту тему является эмпирической. Проанализированные в статье [2] известные растворы, режимы и результаты не описывают общей картины, поэтому было принято решение проверить различные соли (табл. 1), рекомендованные в работах [1, 2], на известных рабочих режимах ( $U = 300$  В) для получения статистических данных при ЭПП алюминия.

Оказалось, что полирование сплава Д16 происходит только в растворе  $NaNO_3$ . В остальных случаях наблюдается травление, покрытие или протекание реакции отсутствует полностью (см. табл. 1).

При сравнении результатов с таблицей растворимостей определено, что растворимые соли ( $25^\circ C$ ) алюминия могут создавать и хлориды (451 г/л), и нитраты (689 г/л), и сульфаты (385 г/л). Таким образом, была выявлена возможность применения нитратов в качестве альтернативных солей для ЭПП алюминиевого сплава Д16 с большим ресурсом работы раствора.

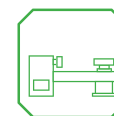
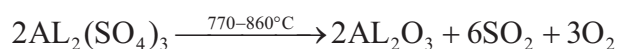


Таблица 1

## Влияние соли в составе электролита

Соль	Концентрация компонента С, %	Время обработки Т, мин	Результат
LiF	3	3	Черное покрытие
NaF	3	3	Белое покрытие
CaF	2	3	Отсутствует
NaHCO <sub>2</sub>	2	2	Травление, серое покрытие
NaOH	2	3	Травление, эрозия
Na <sub>3</sub> C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>7</sub>	3	3	Отсутствует
Трилон Б	2	5	Травление, коричневое покрытие на впадинах
Трилон Б	4	2	Травление, коричневое покрытие, краевые эффекты
NaNO <sub>3</sub>	2	4	Съем материала, блеск
NaNO <sub>3</sub>	4	4	Съем материала
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	2	3	Белое покрытие
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2	3	Серое покрытие
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	3	То же
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	2	5	Белое покрытие
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	4	3	Серое покрытие
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2	4	Белое покрытие
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4	2	То же
Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	2	4	То же
Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	4	7	То же

Покрытия, возникающие в процессе обработки растворами сульфатов, вероятно, образуются в результате разложения сульфата алюминия под действием температуры:



Как видно из рис. 2 [3], NaCl обладает самой большой химической активностью, что является одной из причин травления поверхности. Для снижения активности раствора электролита предложено применение KNO<sub>3</sub>.

В научной литературе описаны двухкомпонентные растворы для ЭПП алюминиевого сплава Д16 [1, 4]. При применении нитратов в качестве электролита вторым компонентом раствора является щавелевая кислота (COOH)<sub>2</sub>. Ее применение также вызывает

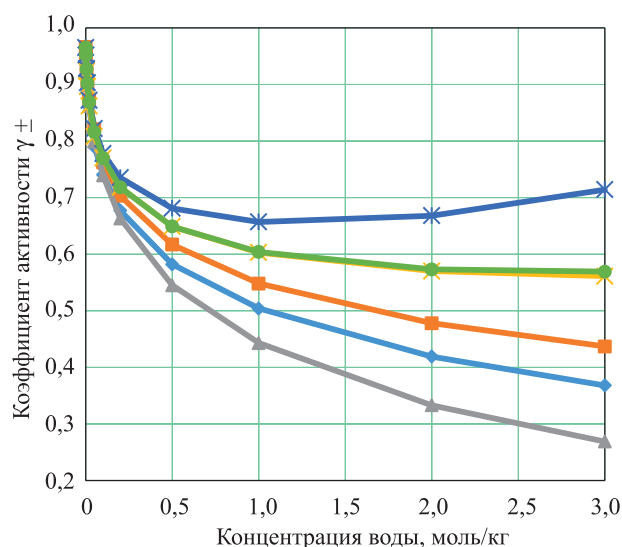


Рис. 2. Коэффициенты активности солей:  
 \* — NaCl; ● — KCl; ✕ — NH<sub>4</sub>Cl;  
 ■ — NaNO<sub>3</sub>; ◆ — NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>; ▲ — KNO<sub>3</sub>

Таблица 2

Режимы обработки и результат ЭПП алюминиевого сплава Д16 с применением нового раствора

№ режима	Исходная шероховатость Ra, мкм	Полученная шероховатость Ra, мкм	Напряжение, В	Концентрация KNO <sub>3</sub> , %	Концентрация C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> , %	Концентрация C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub> , %
1	0,953	0,168	280	5	3	1,0
2	1,137	0,189	320	5	3	1,0
3	1,132	0,210	300	4	2	0,5

травление алюминия, в статье [2] и предложено применение лимонной кислоты C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>.

Для улучшения смачивания поверхности и равномерности обработки [5] в гальванике используются двухатомные (холодные процессы) и трехатомные (горячие процессы) спирты. Поскольку ЭПП является горячим процессом, был применен глицерин (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>). На основании этого был составлен новый состав раствора (KNO<sub>3</sub> 2–5 %; C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> 0,5–3 %; C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub> 0,5–2 %; остальное – вода), который был апробирован на разных режимах в различных концентрациях. Результаты, удовлетворяющие требованиям, сведены в табл. 2.

Наилучшие результаты полирования получены при обработке в предложенном электролите на режиме № 2 (см. табл. 2), они представлены на рис. 3.

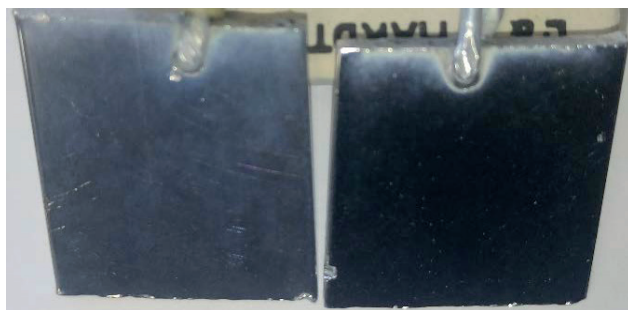


Рис. 3. Вид поверхности после обработки на режимах № 1 (а) и № 2 (б)

Обработанный образец сложнопрофильной поверхности пресс-формы на режиме № 2 (см. табл. 2) представлен на рис. 4.

В результате была разработана методика определения и оценки возможных компонентов раствора электролита для ЭПП, а также новый состав раствора электролита, имеющий минимальную активность и исключая

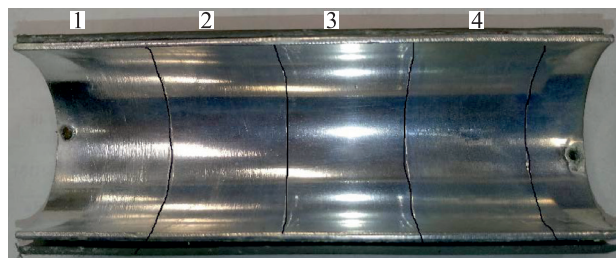


Рис. 4. Обработанный образец с исходной шероховатостью на участках: 1 – Ra 1,8 мкм; 2 – Ra 1,3 мкм; 3 – Ra 0,7 мкм; 4 – Ra 0,2 мкм

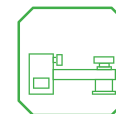
ший травление поверхностного слоя при погружении в него изделий из алюминиевого сплава Д16.

Предложенный состав имеет бóльший ресурс работы по сравнению с представленными в научной литературе и не требует частых замен.

Определены рациональные режимы обработки деталей из алюминиевого сплава Д16. Для получения требуемой при изготовлении пресс-форм шероховатости поверхности (Ra = 0,2 мкм) после обработки методом ЭПП за один цикл (120 с) рационально использование следующих технологических параметров: исходная шероховатость не более Ra = 1,2 мкм, напряжение  $U = 280 \dots 320$  В; концентрация нитрата калия KNO<sub>3</sub> 4–5 %; концентрация лимонной кислоты C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> 2–3 %; концентрация глицерина C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub> 0,5–1 %.

#### Список литературы

- Куликов И. С., Ващенко С. В., Каменев А. Я. Электролитно-плазменная обработка материалов. Минск: Беларуская навука, 2010. 232 с.
- Захаров С. В., Коротких М. Т. Совершенствование технологии электролитно-плазменного полирования алюминиевого сплава Д16. Неделя науки СПбПУ, Санкт-Петербург, 14–19 ноября 2016. С. 162–165.



3. Краткий справочник физико-химических величин. Изд. 8-е, перераб. / Под ред. А. А. Равделя, А. М. Пономарёвой. Л.: Химия, 1983. 232 с.

4. Патент РБ № 7291. Электролит для плазменно-электролитного полирования изделий из алюминия и его сплавов / И. С. Куликов,

А. Я. Каменев, В. Л. Ермаков, С. В. Ващенко, Л. А. Климова. Оpubл. 30.09.2005. 4 с.

5. Грилихес С. Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов. Л.: Машиностроение, 1977. С. 113.

Поступила 23.05.17

---

**Захаров Сергей Владимирович** – аспирант кафедры «Технология конструкционных материалов и материаловедение» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург.  
Область научных интересов: электролитно-плазменные методы обработки.

**Коротких Михаил Тимофеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология конструкционных материалов и материаловедение» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: обработка резанием труднообрабатываемых материалов, плазменные, плазменно-механические и электролитно-плазменные методы обработки, специальные режущие инструменты.

## **Electrolytic plasma processing of complex products from aluminum alloy D16**

The study analyzed scientific resources, collected statistics on composition of electrolytic solutions for electrolytic plasma processing of aluminum alloy D16. Moreover, a procedure for determining the potential components of the electrolytic solution has been found and there has been developed an electrolytic solution that excludes surface etching and provides the required quality of the surface layer. Finally, rational technological regimes have been determined.

*Keywords:* molds, aluminum alloy D16, electrolytic plasma processing, surface etching, electrolyte development technique, rational regimes.

**Zakharov Sergey Vladimirovich** – post-graduate student, Department of Constructional Materials Engineering and Materials Science, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg.  
Science research interests: electrolyte-plasma processing methods.

**Korotkikh Mikhail Timofeevich** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Constructional Materials Engineering and Materials Science, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg.  
Science research interests: machining of hard-to-cut materials, plasma, plasma-mechanical and electrolytic plasma processing methods, special cutting tools.