

УДК 621.357:669.715

**ОЦЕНКА УПРОЧНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МИКРОДУГОВОЙ  
ОБРАБОТКОЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ  
ИСПЫТАНИЙ**

**В.Н. Малышев,** РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, [ymal@inbox.ru](mailto:ymal@inbox.ru)

**ESTIMATION OF ALUMINUM ALLOYS STRENGTHENING BY MICROARC  
TREATMENT ON RESULTS OF STATIC AND DYNAMIC TESTS**

**V.N. Malyshev,** Gubkin Russian State University of Oil and Gas, [ymal@inbox.ru](mailto:ymal@inbox.ru)

*Проведенные исследования влияния микродуговой обработки алюминиевых сплавов на их механические характеристики показали существенное повышение прочностных характеристик (в первую очередь модуля упругости) в области упругого деформирования. Результаты статических и динамических тестов подтвердили эффект упрочнения алюминиевых сплавов МДО-обработкой.*

*The held investigations of aluminum alloys microarc treatment influence on their strength properties have shown essential increase of strengthening characteristics (first of all of elastic modulus) in the field of elastic deforming. The outcomes of static and dynamic tests have confirmed strengthening effect of aluminum alloys by MAO-treatment.*

**Введение.** Оценка физико-механических свойств покрытий, сформированных микродуговым оксидированием, является необходимым и важным этапом исследования их характеристик, так как физико-механические свойства материала являются, как правило, определяющими при выборе его для тех или иных условий эксплуатации. В частности, для оценки износостойкости и других триботехнических характеристик, знание уровня физико-механических свойств покрытий позволяет, используя существующие зависимости между физико-механическими свойствами и износостойкостью [1,2], прогнозировать работоспособность трущегося сопряжения в зависимости от внешних условий нагружения.

При микродуговом оксидировании (МДО) происходят сложные процессы окисления поверхностного слоя металла с образованием плотного, прочного покрытия. Высокий уровень механических свойств формирующихся покрытий, в первую очередь, обусловлен образованием в процессе МДО высокотемпературной модификации окиси алюминия -  $\alpha$ - $Al_2O_3$ .

Изучение основных физико-механических характеристик МДО-покрытий (модуля упругости, пределов прочности и текучести, степени пористости и рыхлости и т.д.) с использованием обычных методов определения этих характеристик осложняется тем, что

выделить в чистом виде участок покрытия в объеме, достаточном для проведения механических испытаний традиционными методами на растяжение или сжатие, хотя бы на микрообразцах, является исключительно трудной задачей. С другой стороны, свойства покрытия, отделенного от подложки, в особенности его прочностные характеристики, будут значительно отличаться от свойств, определенных в условиях, когда покрытие с подложкой составляют единое целое.

В связи с этим, основная оценка физико-механических характеристик покрытий, сформированных методом МДО, была осуществлена ранее [4] методом кинетической микротвердости [3].

Тем не менее, испытания алюминиевых сплавов со сформированным на их поверхности МДО-покрытием традиционным способом на статический разрыв образцов позволяют получить информацию о степени упрочнения материала и проследить кинетику изменения механических характеристик от прикладываемого разрывного усилия.

**Цель исследования.** Оценить эффект упрочнения алюминиевых сплавов, обработанных методом микродугового оксидирования, используя традиционные методы испытаний на растяжение, сжатие, изгиб и т.п.

**Материалы и методика эксперимента.** Исследования проводили на сплавах алюминия Д16, Д16АТ и АМг6 [5-8]. Плоские образцы стандартной формы (рис. 1) вырезались из листов толщиной 3 и 1,5 мм соответственно. Анодно-катодную обработку микродуговым методом проводили на конденсаторном источнике питания в слабощелочном электролите при плотности анодного тока  $\approx 10 \text{ А/дм}^2$  и соотношении  $I_k/I_a = 0,95$ . При этом получали несколько серий образцов (по 6 - 7 образцов в каждой серии), отличающихся по толщине сформированного покрытия.

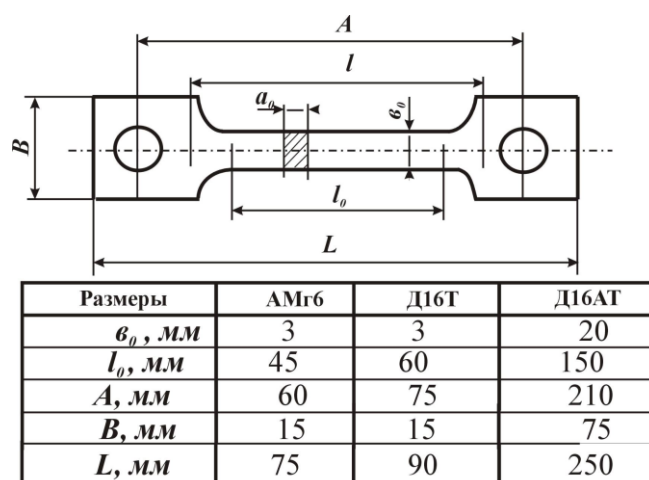


Рис.1 Вид и размеры образцов стандартной формы для испытаний на статическое растяжение (АМг6, Д16Т) и циклическое растяжение-сжатие (Д16АТ).

Кроме того, для выявления характера влияния покрытия на прочностные характеристики алюминиевых сплавов, часть образцов покрывали наполовину рабочей длины  $l$ .

Испытания при статических нагрузках осуществляли растяжением образцов на установке ИМАШ “АЛА-ТОО” при скорости нагружения 4 мм/мин и постоянной нагрузке. Запись диаграмм растяжения проводили на двухкоординатном самописце НЗ06.

Для динамических испытаний использовали образцы, вырезанные из алюминиевого сплава Д16АТ по размерам, указанным на рис.1, с последующей обработкой методом МДО и симметричном нагружении их растяжением-сжатием. Для сравнения результатов испытаний использовали такие же образцы, без обработки МДО, но с концентраторами напряжений в виде отверстий под болтовые соединения, а также при наличии фреттинг-коррозии.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 2 приведены типичные диаграммы растяжения образцов, а на рис. 3 - характерные кривые зависимости напряжения  $\sigma$  от относительной деформации  $\epsilon$ , построенные по диаграммам растяжения. Обработка результатов испытаний показала, что влияние МДО-покрытия на прочностные характеристики алюминиевых сплавов осуществляется двояко. В таблице приведены основные механические характеристики алюминиевых сплавов, упрочненных методом МДО, в сравнении с неупрочненными.

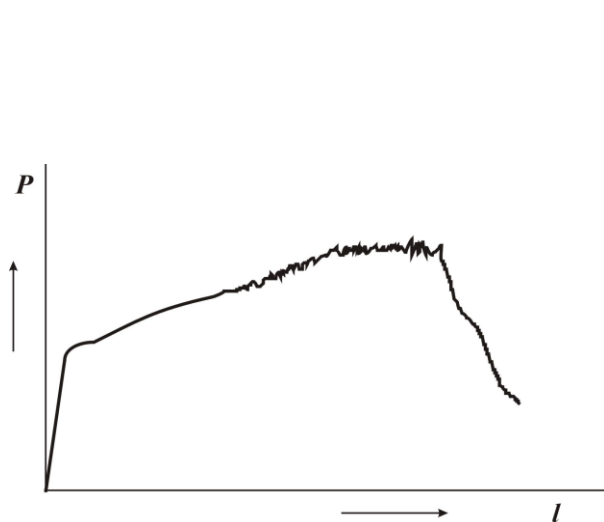


Рис.2 Типичная диаграмма растяжения образцов с МДО-покрытием.

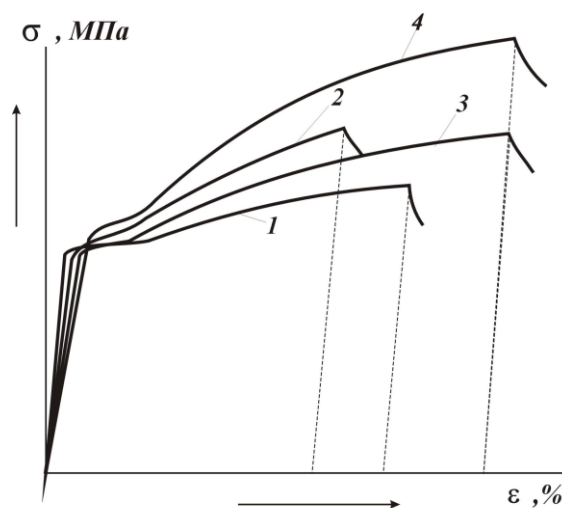


Рис.3 Характерные кривые напряжение – деформация для алюминиевых сплавов с МДО-покрытием: 1 – образцы с покрытием толщиной 240 мкм; 2 – образцы с покрытием толщиной 240 мкм, сформированным на половине рабочей длины образцов; 3 – образцы с покрытием толщиной 120 мкм; 4 – образцы неупрочненного сплава алюминия.

Таблица

Механические характеристики алюминиевых сплавов, упрочненных методом МДО, при статическом испытании растяжением

№ № п/ п	Характеристика образцов	Исходные данные				Механические характеристики					
		$a_0$ , мм	$b_0$ , мм	$l_0$ , мм	$F_0$ , мм <sup>2</sup>	$\sigma_{\sigma}$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_m$ , МПа	$E$ , ГПа	$\delta$ , %	
1	Упрочнение МДО на толщину $\lambda=240$ мкм на длину $l$	АМг6	1,46	3,41	33,6	5,01	193,8	117,8	125,7	229	11,8
		Д16Т	3,3	3,3	45,0	10,9	399	297	329	112	8,84
2	Упрочнение МДО на толщину $\lambda=240$ мкм на длину $l/2$	АМг6	1,45	3,23	35,9	4,74	201,1	117,5	126,5	120	8,9
		Д16Т	3,3	3,3	45,0	10,9	413	306	336	89	7,85
3	Упрочнение МДО на толщину $\lambda=120$ мкм на длину $l$	АМг6	1,40	3,3	33,6	4,55	237,7	140	146,6	212	14,5
		Д16Т	3,2	3,2	45,0	10,3	379	279	303	100	10,6
4	Неупрочненные сплавы	АМг6	1,3	3,23	34,1	4,18	305,4	142,1	157,9	62,6	17,2
		Д16Т	3,15	3,2	45,0	10,1	455	322	374	65,7	9,7

В области упругого деформирования наблюдается эффект упрочнения. Здесь модуль Юнга возрастает до значений  $E = 110 - 220$  ГПа (относительно исходного модуля упругости алюминиевых сплавов  $E = 65 - 71$  ГПа) и приближается к модулю упругости самого материала покрытия ( $E = 120 - 290$  ГПа), определенного из испытаний по методу кинетической микротвердости [4].

Материал упрочненного слоя начинает разрушаться в зоне между пределами упругости ( $\sigma_y$  или  $\sigma_n$ ) и текучести ( $\sigma_m$  или  $\sigma_{02}$ ). Затем нагрузка прикладывается к основному материалу. При этом сопротивление материала уменьшается. Характерно, что упрочняющий эффект имеет место до появления первой трещины, которая отмечается в области предела упругости (см. рис. 4). Визуальное наблюдение в микроскоп в процессе растяжения образцов позволяло фиксировать момент образования первых трещин. После нарушения сплошности покрытия наблюдается повышенная, по сравнению с исходным материалом, пластическая деформация. Как и следовало ожидать, поведение образцов, обработанных наполовину рабочей длины, при растяжении имеет нестабильный характер. Разрушение их происходило чаще по границе обработанной и необработанной поверхностей, однако наблюдались разрушения и в других сечениях. Поэтому сечение по границе обработанной и необработанной поверхностей однозначно нельзя считать концентратором напряжений.

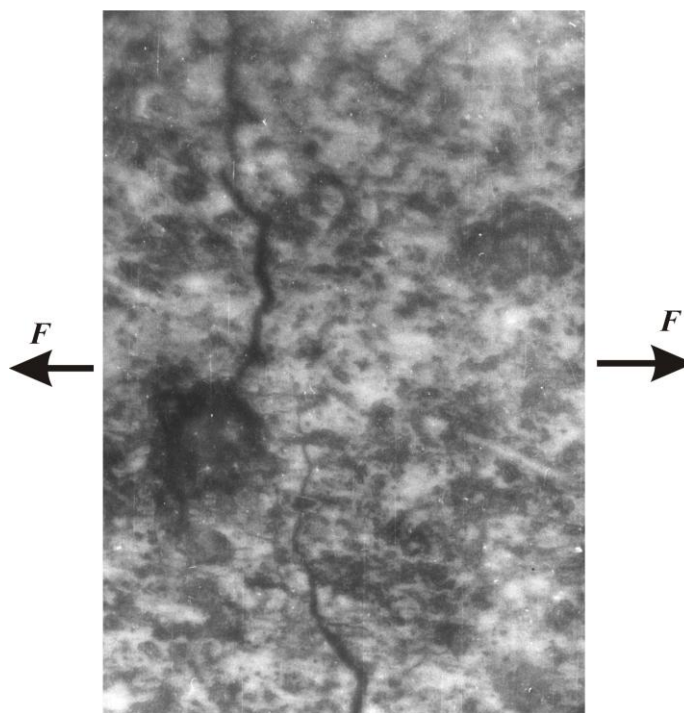


Рис.4 Характерный вид первой трещины, появляющейся при деформации растяжением МДО-покрытий в диапазоне нагрузок выше области упругости.

Повышение модуля Юнга для образцов с покрытием сопровождается некоторым снижением их предела упругости, однако это не должно препятствовать применению этих покрытий в конструкциях, испытывающих растяжение, изгиб, сжатие и т.п., поскольку напряжения, возникающие в процессе их работы, значительно ниже предела упругости.

Кривые в области пластического деформирования (рис.3) располагаются таким образом, что явно указывает на разупрочнение алюминиевого сплава, тем большее, чем большей толщины сформировано покрытие. Это объясняется, очевидно, тем, что с ростом толщины уменьшается площадь поперечного сечения алюминиевого сплава, поскольку покрытие при микродуговом оксидировании на 60 - 90% формируется вглубь материала. При разрушении покрытия и нарушении его сплошности оно уже не оказывает сопротивления деформации растяжения. Аналогичные результаты были получены авторами [9] и на более крупных образцах, при других нагрузках, что подтверждает отсутствие проявления масштабного эффекта. Влияние МДО-обработки сказывается и на пластические характеристики алюминиевых сплавов, а именно - относительное удлинение  $\delta$ , которое уменьшается с ростом толщины покрытия.

При проведении усталостных испытаний образцов с покрытиями, сформированными на сплаве Д16АТ, в условиях симметричного нагружения растяжением-сжатием (при изгибе с заземленным концом), получены данные (рис.5), показывающие на повышение пределов выносливости примерно на 20% относительно образцов с концентраторами

напряжений (отверстия под болтовое соединение) и при наличии фреттинг-коррозии, и примерно на такую же величину ниже относительно исходных образцов, но без концентраторов напряжений.

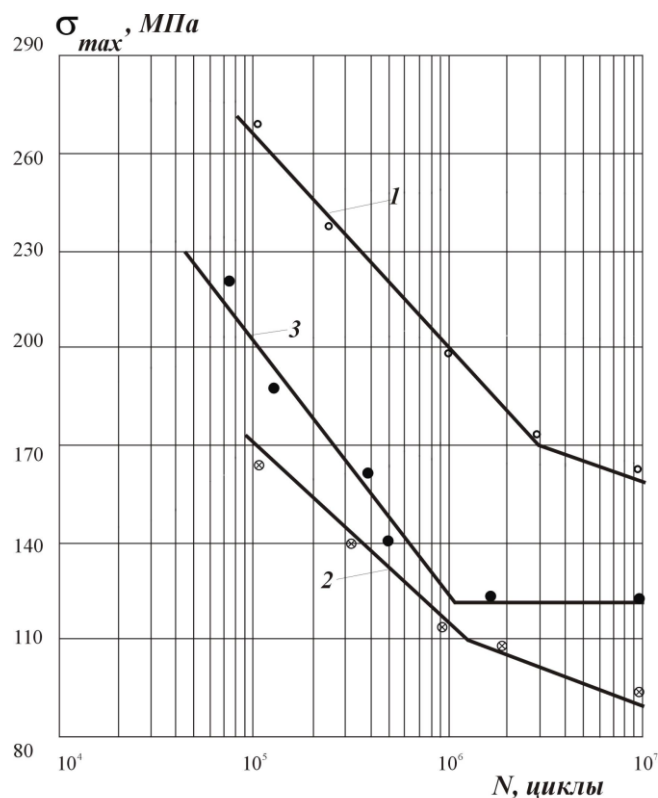


Рис.5 Кривые усталости при растяжении-сжатии с коэффициентом асимметрии цикла  $R=0$ : 1 – исходного сплава Д16АТ; 2 – сплава Д16АТ при наличии фреттинг-коррозии; 3 – сплава Д16АТ, упрочненного методом МДО.

То есть, микродуговая обработка, даже при некотором уменьшении сечения образца, что является, по-видимому, одной из причин более низкой усталостной прочности, в отличие от необработанных образцов, обеспечивает повышение прочности при циклических нагрузках, по сравнению с образцами, имеющими концентраторы напряжений.

**Заключение.** Таким образом, наличие эффекта упрочнения алюминиевых сплавов при их обработке микродуговым оксидированием позволяет использовать метод анодно-катодного МДО как эффективное средство упрочнения различных изделий из алюминиевых сплавов.

#### Список литературы:

1. Крагельский И.В., Камбалов В.С., Добычин М.Н. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1980. - 450 с.
2. Сорокин Г.М. Аналитические критерии оценки износостойкости материалов. // Заводская лаборатория, 1994, № 9, С.42-48.

3. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. М.: Машиностроение, 1990. - 224 с.
4. Малышев В.Н., Булычев С.И., Марков Г.А. и др. Физико-механические характеристики и износостойкость покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования. //Физика и химия обраб. матер., 1985 №1, С.82-87.
5. Малышев В.Н., Малышева Н.В. Влияние анодно-катодной микродуговой обработки на механические характеристики алюминиевых сплавов. //Тез. докл. научно-технич. семинара «Анод-88», г. Казань, 1988, С.88-89.
6. Малышев В.Н. Исследование структуры и износостойкости покрытий, формируемых методом анодно-катодного микродугового оксидирования. // Тез. докл. научно-технич. семинара «Анод-88», г. Казань, 1988, С.82-83.
7. Малышев В.Н., Голуб М.В., Струнец В.И. Упрочнение деталей узлов трения формированием покрытий анодно-катодным микродуговым методом. //Тез. докл. ВНТК «Проблемы современной триботехнологии», г. Николаев, 1988, С. 16-17.
8. Малышев В.Н., Драган В.И. Повышение долговечности соединений при циклических нагрузках. //Тез. докл. научно-техн. конф. БрПИ, г. Брест, 1991, С.36
9. Александров В.С., Кан А.Г., Абдельбаки Н., Федоров В.А. Влияние поверхностной обработки сплава Д16 методом микродугового оксидирования на его прочностные характеристики при статическом нагружении. // Химическое и нефтяное машиностроение, 1988, № 9, С.27-28.