

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

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.

Введение

Оценка физико-механических свойств покрытий, сформированных микродуговым оксидированием, является необходимым и важным этапом исследования их характеристик, т.к. 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 α - 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 выделение в чистом виде участка 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 методом кинетической микротвердости [3, 4].

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 ≈ 10 А/дм² 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. Кроме того, для выявления характера влияния покрытия на прочностные характеристики алюминиевых сплавов часть образцов покрывали наполовину рабочей длины l .

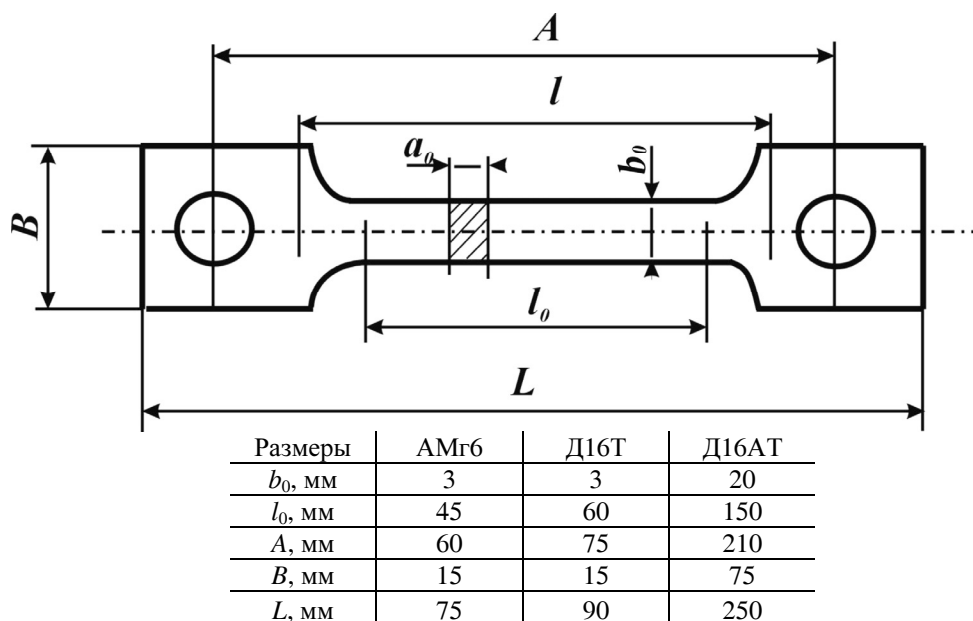


Рис. 1 Вид и размеры образцов стандартной формы для испытаний на статическое растяжение (АМг6, Д16Т) и циклическое растяжение-сжатие (Д16АТ)

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 Н306.

Для динамических испытаний использовали образцы, вырезанные из алюминиевого сплава Д16АТ по размерам, указанным на рисунке 1, с последующей обработкой методом МДО и симметричным нагружением 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 рисунке 2 приведены типичные диаграммы растяжения образцов, а на рисунке 3 – характерные кривые зависи-

мости напряжения σ от относительной деформации ϵ , построенные по диаграммам растяжения. Обработка результатов испытаний показала, что влияние МДО-покрытия на прочностные характеристики алюминиевых сплавов проявляется двояко. В таблице 1 приведены основные механические характеристики алюминиевых сплавов, упрочненных методом МДО, в сравнении с неупрочненными.

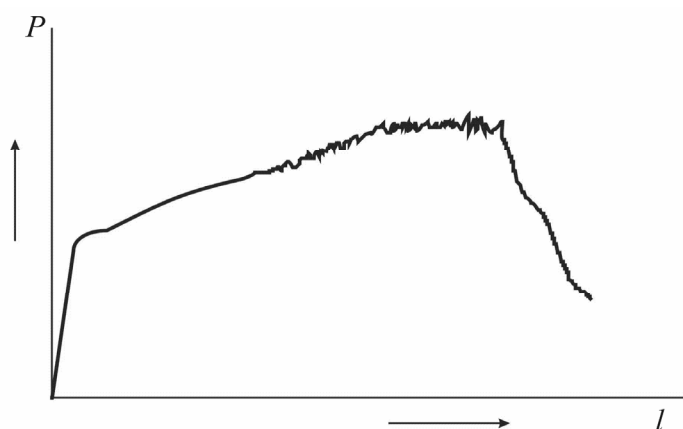


Рис. 2 Типичная диаграмма растяжения образцов с МДО-покрытием

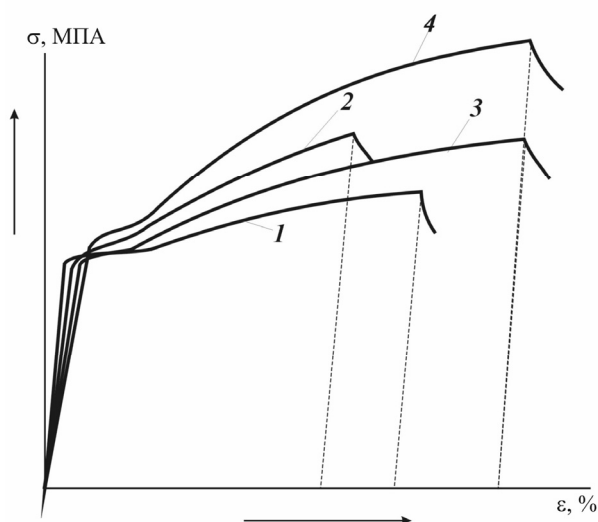


Рис. 3 Характерные кривые напряжение–деформация для алюминиевых сплавов с МДО-покрытием: 1 – образцы с покрытием толщиной 240 мкм; 2 – образцы с покрытием толщиной 240 мкм, сформированным на половине рабочей длины образцов; 3 – образцы с покрытием толщиной 120 мкм; 4 – образцы неупрочненного сплава алюминия

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

Таблица 1

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 ²	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_T , МПа	E , ГПа	δ , %	
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

Материал упрочненного слоя начинает разрушаться в зоне между пределами упругости (σ_y или σ_n) и текучести (σ_T или σ_{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 (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.

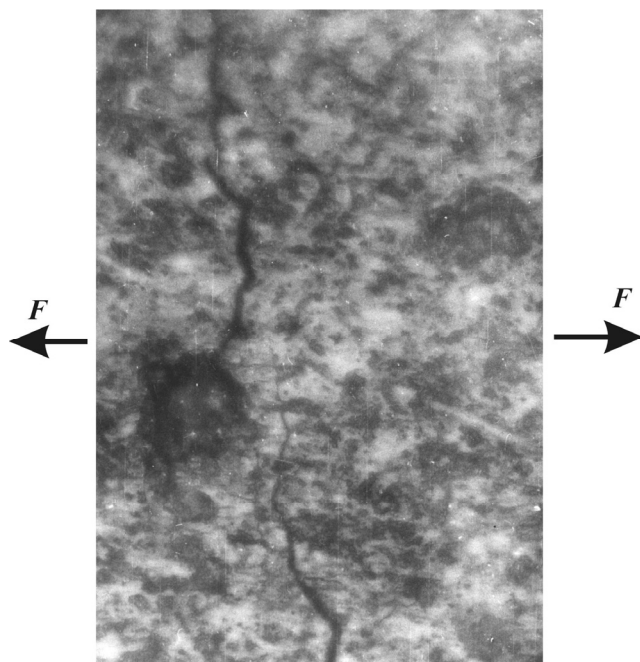


Рис. 4 Характерный вид первой трещины, появляющейся при деформации растяжением МДО-покрытий в диапазоне нагрузок выше области упругости

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.

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.

Расположение кривых в области пластического деформирования (рис. 3) 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 в глубь 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 пластических характеристиках алюминиевых сплавов, а именно на относительном удлинении δ , 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 защемленным концом) получены данные (рис. 5), показывающие 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 понижение относительно исходных образцов, но без концентраторов напряжений. 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.

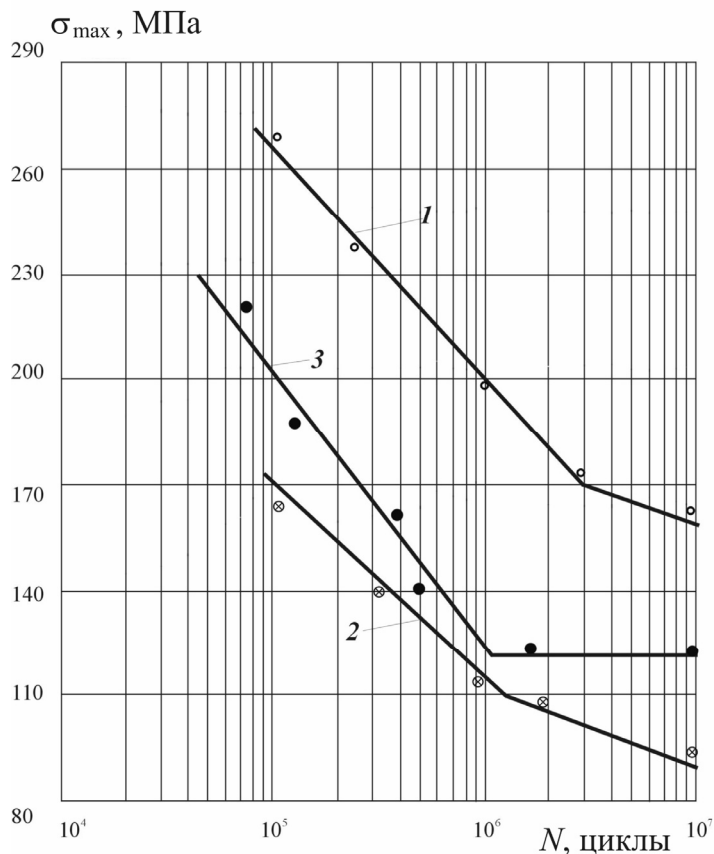


Рис. 5 Кривые усталости при растяжении–сжатии с коэффициентом асимметрии цикла $R = 0$: 1 – исходного сплава Д16АТ; 2 – сплава Д16АТ при наличии фреттинг-коррозии; 3 – сплава Д16АТ, упрочненного методом МДО

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.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, В. С. Камбалов, М. Н. Добычин. – М. : Машиностроение, 1980. – 450 с.
2. **Сорокин, Г. М.** Аналитические критерии оценки износостойкости материалов / Г. М. Сорокин // Заводская лаборатория. – 1994. – № 9. – С. 42–48.
3. **Булычев, С. И.** Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / С. И. Булычев, В. П. Алехин. – М. : Машиностроение, 1990. – 224 с.
4. **Малышев, В. Н.** Физико-механические характеристики и износостойкость покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования / В. Н. Малышев, С. И. Булычев, Г. А. Марков [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1985. – № 1. – С. 82–87.
5. **Малышев, В. Н.** Влияние анодно-катодной микродуговой обработки на механические характеристики алюминиевых сплавов / В. Н. Малышев, Н. В. Малышева // Анод-88 : тезисы докл. научно-технического семинара. – Казань, 1988. – С. 88–89.
6. **Малышев, В. Н.** Исследование структуры и износостойкости покрытий, формируемых методом анодно-катодного микродугового оксидирования / В. Н. Малышев // Анод-88 : тезисы докл. научно-технического семинара. – Казань, 1988. – С. 82–83.
7. **Малышев, В. Н.** Упрочнение деталей узлов трения формированием покрытий анодно-катодным микродуговым методом / В. Н. Малышев, М. В. Голуб, В. И. Струнец // Проблемы современной триботехнологии : тезисы докл. ВНТК. – Николаев, 1988. – С. 16–17.
8. **Малышев, В. Н.** Повышение долговечности соединений при циклических нагрузках / В. Н. Малышев, В. И. Драган // Тез. докл. научно-технической конференции БрПИ. – Брест, 1991. – С. 36.
9. **Александров, В. С.** Влияние поверхностной обработки сплава Д16 методом микродугового оксидирования на его прочностные характеристики при статическом нагружении / В. С. Александров, А. Г. Кан, Н. Абдельбаки, В. А. Федоров // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1988. – № 9. – С. 27–28.