

УДК 621.002.3-419; 620.22-419

## ОБ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ И ИЗНОСОСТОЙКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

© 2013 М. М. Криштал, П. В. Ивашин, А. В. Полунин,  
Д. А. Павлов, К. Н. Никеров

Тольяттинский государственный университет

Представлены результаты исследований, посвящённых определению адгезионной прочности, склонности к сколообразованию упрочнённого методом МДО износостойкого теплоизоляционного слоя на алюминий-кремниевых сплавах. Показана возможность использования технологии МДО для упрочнения деталей из алюминий-кремниевых сплавов, работающих в условиях высоких температур и значительных тепловых деформаций в энергомашиностроении.

*Силумины, микродуговое оксидирование, износостойкость, теплостойкость, адгезия, энергомашиностроение.*

Работа современных энергетических машин (двигателей внутреннего сгорания (ДВС), газотурбинных двигателей, паровых турбин, компрессоров, насосов и т.д.) сопряжена с трением в условиях высоких температур и агрессивных сред.

Широкое использование алюминий-кремниевых сплавов в конструкции современной машиностроительной и энергетической техники обуславливает необходимость повышения износостойкости деталей из этих сплавов. Основная доля алюминий-кремниевых сплавов, используемых в энергомашиностроении, – это литейные сплавы, среди которых наиболее широкое распространение получили алюминий-кремниевые сплавы (силумины). Как отмечается в работе [1], они успешно конкурируют с чёрными металлами, заменяя или полностью вытесняя их из традиционных сфер использования благодаря хорошей технологичности, достаточно высокому уровню физических, механических свойств и коррозионной стойкости. Поэтому вопросы повышения износостойкости поверхности силуминов особенно актуальны.

В значительной мере требованиям по износостойкости, способности воспринимать значительные температуры, высоким механическим свойствам и ресурсу

отвечают различные покрытия, наносимые на рабочие поверхности деталей. Традиционно рабочие поверхности изделий из алюминий-кремниевых сплавов упрочняют различными покрытиями, как, например, Cromal, Nikasil, Locasil и им подобными. Защитные покрытия позволяют более полно использовать массогабаритные, технологические и эксплуатационные преимущества применения алюминий-кремниевых сплавов для изготовления различных деталей. Однако некоторые методы нанесения покрытий на поверхности алюминий-кремниевых сплавов отличаются высокой себестоимостью, сложностью реализации технологического процесса и иногда экологической вредностью технологии.

Альтернативой применяемым покрытиям является технология микродугового оксидирования (МДО) алюминий-кремниевых сплавов. Микродуговое оксидирование – эффективный и экологически чистый способ обработки алюминий-кремниевых сплавов, в результате которого на поверхности изделия под действием хаотически перемещающихся электрических дуг с характерным размером  $10^2$ – $10^4$  нм формируется керамический оксидный слой на основе оксида алюминия с твёрдостью до 1400 HV<sub>0,1</sub>. МДО-покрытия благодаря своим механическим, тепловым, электроизоляционным

свойствам, а также возможности получения покрытий большей толщины, выгодно отличаются от оксидных плёнок, полученных традиционным анодированием [2, 3] и позволяют применять их как защитные антифрикционные, износостойкие и теплоизоляционные.

Одной из важнейших характеристик любого покрытия является его адгезионная прочность, определяющая качество и силу соединения покрытия и подложки. В работах [4, 5] была дана предварительная экспериментальная оценка эксплуатационным свойствам, адгезионной прочности и склонности к сколообразованию защитных покрытий, полученных методом МДО на силуминах. Исследования плоских образцов с МДО-покрытием на сплаве АК9 [5] показали, что при циклическом воздействии температурных перепадов на упрочнённый МДО-слой с пиковой скоростью охлаждения около  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  склонность к сколообразованию не усиливалась и тенденций к отслаиванию покрытий не наблюдалось.

Тем не менее, при работе в реальных конструкциях энергетических машин может существовать проблема отслаивания упрочнённого МДО-слоя от материала основы вследствие значительной разности коэффициентов термического расширения материалов покрытия и подложки, приводящей к возникновению значительных температурных напряжений между покрытием и основой.

Для анализа состояния реальных узлов энергетических машин были проведены расчёты напряжённого состояния между упрочняющим слоем и подложкой для гильзы ДВС, выполненной из алюминиевого сплава с МДО упрочнением рабочей поверхности. Было смоделировано тепловое состояние гильзы цилиндра. За основу температурного распределения на рабочей поверхности цилиндра принято эмпирически определенное температурное поле, полученное фирмой AVL в процессе доводочных испытаний двигателя ВАЗ 11194. Схема рассчитываемой гильзы представлена на рис.1.

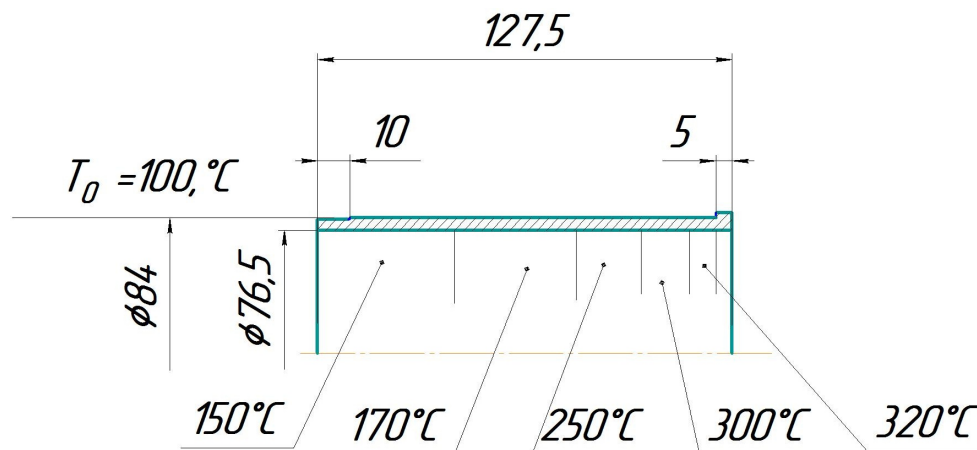


Рис. 1. Схема рассчитываемой гильзы

Материал гильзы цилиндра – алюминиевый литейный сплав (силумин) АК6М2. Материал покрытия – корунд,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Толщина покрытия составляет 100 мкм. Внутренняя поверхность с упрочнённым слоем имеет температурное распределение, указанное на рис. 1. Наружная среда гильзы – охлаждающая жидкость, условно принимаемая с равномер-

ным и постоянным температурным распределением.

Для определения напряжений между упрочнённым слоем и подложкой использован метод конечных элементов, заложенный в программный пакет ANSYS v.13.

Результаты расчёта показали, что наибольшие напряжения возникают в зоне

жарового пояса и в районе верхнего (первого компрессионного) поршневого кольца (соответствует температурам 300–320 °С на рис. 1), то есть упрочнённый слой испытывает максимальные напряжения в зоне максимального температурного градиента. Расчётные значения напряжений в этих зонах составили до 940 МПа, что при совмещении с рабочими напряжениями в гильзе цилиндра ДВС может приводить к отслоению покрытия от подложки. Однако результаты расчёта требуют экспериментального уточнения, поскольку нет достоверных данных об удельных усилиях, необходимых для отрыва МДО-слоя данной толщины от основы алюминиевого сплава. Кроме того, расчёт показывает, что наиболее значительно разница коэффициентов теплового расширения будет сказываться при минимальном температурном перепаде между внутренними и внешними волокнами. Такой режим соответствует значительному перегреву ДВС, что само по себе является аварийной ситуацией. Поэтому проведён экспериментальный анализ адгезии защитного МДО-слоя к внутренним цилиндрическим поверхностям.

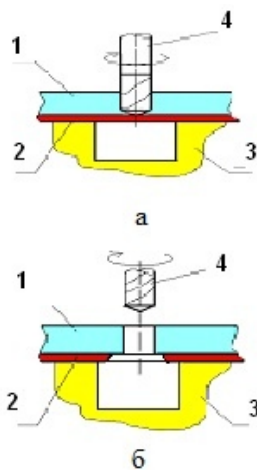


Рис. 2. Схема оценки склонности МДО-покрытия к сколообразованию:

а - сверление алюминиевой подложки образца до образования области повреждений;

б - образование области повреждений на МДО-покрытии;

1 – алюминиевая подложка; 2 – МДО-покрытие; 3 – опора; 4 – сверло

Для экспериментальной оценки адгезии МДО-слоя изучена склонность покрытия к сколообразованию при воздействии торможения тепловых деформаций формой изделия. На покрытие воздействовали одновременно и тепловые напряжения, связанные со значительной разницей коэффициентов теплового расширения покрытия и основы, и механические напряжения отрыва покрытия от поверхности.

Испытания проведены на кольцевых образцах из сплава АК6М2 наружным диаметром 30 мм, шириной 10 мм и толщиной стенки 3 мм с внутренним МДО-слоем толщиной 95-100 мкм.

Такая конфигурация кольцевого образца позволяет создать значительные тепловые напряжения между подложкой и покрытием при равномерном прогреве образца. Благодаря значительной разнице коэффициентов теплового расширения ( $6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  для покрытия и  $22 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  подложки) между покрытием и основой при нагреве образца возникают напряжения, составляющие 1000–1050 МПа (расчитаны по методике, изложенной в [6]), что сопоставимо с полученными ранее расчётными значениями напряжений для гильзы цилиндра ДВС.

Эксперимент заключался в нагреве двух (один с термообработкой по Т6, другой без термообработки) образцов из четырёх до температуры 200 °С, выдержке каждого образца при этой температуре не менее 20 минут с последующим сверлением 4 радиальных отверстий в боковых поверхностях в горячем состоянии. Два других образца (один с термообработкой по Т6, другой без термообработки) подвергались сверлению в базовом, “холодном” состоянии как эталонные для сравнения.

Склонность покрытия к сколообразованию оценивалась следующим образом. Образцы колец 1 исследуемых сплавов с МДО-покрытием 2 устанавливали на опору 3 (рис. 2, а). Затем с внешней стороны кольца (со стороны подложки) сверлили отверстие с применением кондукторной втулки (диаметр сверла 1,5 мм,

частота вращения шпинделя 500 об/мин) при постоянном усилии подачи инструмента (5 Н). После сверления (рис. 2, б) на поверхности образца образуется область повреждений (пояс отслаивания, рис. 3), которую можно охарактеризовать численным значением её диаметров.

Величины  $D_{ОТВ}$  и  $D_{ПО}$  (рис. 3) измеряли на микроскопе Carl Zeiss Axiovert 40 MAT в программном продукте Thixomet Pro 2010 с точностью 5 мкм. Количество измерений – не менее 4 на каждое отверстие у каждого образца.

На рис. 4 и 5 представлены примеры фотографий отверстий для двух образцов: одного после сверления без предварительного нагрева, второго – после сверления при температуре 200 °С.

Для каждого образца были измерены 4 отверстия, величина диаметра области повреждений каждого отверстия определялась 4 раза, после чего были вычислены средние значения отношений  $D_{ПО}/D_{ОТВ}$ .

Таким образом, сравнительная оценка склонности покрытия к сколообразованию заключалась в сравнении отношений диаметра пояса отслаивания к диаметру сверления ( $D_{ПО}/D_{ОТВ}$ ) у различных образцов для каждого из отверстий. Полученные результаты приведены на диаграмме (рис. 6).

Как видно из рис. 6, величины средних значений  $D_{ПО}/D_{ОТВ}$  у образцов, подвергнутых сверлению в горячем состоянии, не выше, чем у образцов, подвергнутых сверлению в холодном состоянии.

Таким образом установлено, что тепловые напряжения не приводят к усилению тенденции к сколообразованию.

Результаты эксперимента показывают, что при моделировании теплового напряжённого состояния покрытия, в частности на алюминиевом зеркале цилиндра, необходимо учитывать специфические особенности свойств МДО-покрытий, получаемых на силуминах, и характер их сцепления с подложкой.

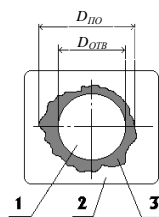


Рис. 3. Пояс отслаивания:  
1 – отверстие; 2 – покрытие;  
3 – пояс отслаивания



Рис. 4. Выходное отверстие образца без нагрева



Рис. 5. Выходное отверстие образца с нагревом до 200 °С

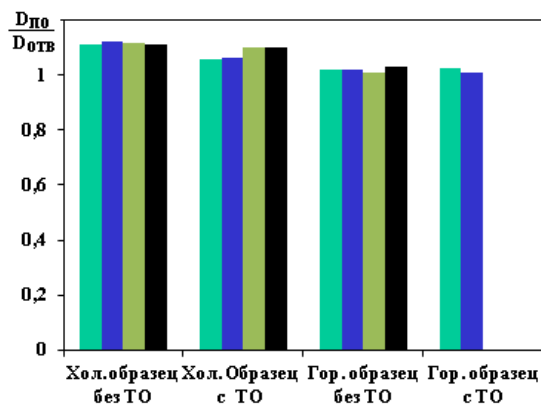


Рис. 6. Величины средних значений отношения  $D_{ПО}/D_{ОТВ}$  для каждого из отверстий образцов

В результате исследований показано, что адгезионные свойства защитных покрытий, полученных методом МДО, являются удовлетворительными при повышенных температурах. Это позволяет применять упрочняющие МДО-покрытия как износостойкие и теплоизоляционные на алюминиевых сплавах в конструкциях энергетических машин и установок, где имеют место значительные тепловые деформации и напряжения.

### Библиографический список

1. Силумины. Атлас микроструктур и фактограмм промышленных сплавов: справ. изд. [Текст] / под ред. Ю.Н. Тарана и В.С. Золотаревского. – М.: «МИСИС», 1996. – 175 с.

2. Krishtal, M.M. The effect of the initial structure of Al-Si alloys on chemical uniformity and quality of layers hardened by micro-arc (plasma electrolytic) oxidation [Текст] / М.М. Krishtal // Surface Modification Technologies, Vol.21 (Proceedings of the XXI international Conference on Surface Modification Technologies. Paris, France,

September 24-26, 2007): Edited by T.S. Sudarshan and M. Jeandin, USA.

3. Krishtal, M.M. Oxide Layer Formation by Micro-Arc Oxidation on Structurally Modified Al-Si Alloys and Applications for Large-Sized Articles Manufacturing [Текст] / М.М. Krishtal // Advanced Materials Research, 2009, Vol. 59, 204-208.

4. A Wear-Resistant Coating for Aluminium-Silicon Alloys using Microarc Oxidation and an Application to an Aluminium Cylinder Block [Текст] / М.М. Krishtal, В.А. Chudinov, S.E. Pavlikhin [et al] // SAE tech. paper 2002-01-0626, (SP-1683).

5. Повышение износостойкости деталей алюминиево-кремниевых сплавов методом МДО для работы в экстремальных режимах трения [Текст] / М.М. Криштал, П.В. Ивашин, А.В. Полунин [и др.] // Известия ШЦ РАН, 2011. – Т.13. – №4 (3). – С. 765-768.

6. Орлов, П.И. Основы конструирования [Текст]: справ.-метод. пособие: в 2 кн. Кн.1 / П.И. Орлов; под ред. П.Н. Учайва. –3-е изд. испр. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с.

## ADHESION STRENGTH OF HEAT- INSULATING AND WEAR-RESISTANT CERAMIC COATINGS ON ALUMINUM ALLOYS

© 2013 M. M. Krishtal, P. V. Ivashin, A. V. Polunin, D. A. Pavlov, K. N. Nikerov

Togliatti State University

The paper presents a review of research devoted to the determination of adhesion strength and tendency to cleavage of a wear-resistant heat-insulating layer on aluminum-silicon alloys strengthened by the microarc oxidation method. The possibility of using the microarc oxidation technology for the strengthening of parts made of aluminum-silicon alloys operating under high-temperature conditions and significant thermal deformations in power plant engineering.

*Silumin, microarc oxidation, durability, heat resistance, adhesion, power plant engineering.*

### Информация об авторах

**Криштал Михаил Михайлович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика», ректор, Тольяттинский государственный университет. E-mail: [krishtal@tltsu.ru](mailto:krishtal@tltsu.ru). Область научных интересов: физика прочности, металловедение, физика поверхности.

**Ивашин Павел Валентинович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические машины и системы управления», Тольяттинский государственный



университет. E-mail: [ivashinpv@rambler.ru](mailto:ivashinpv@rambler.ru). Область научных интересов: прикладные аспекты механики газа, жидкости и плазмы, конструкция и рабочие процессы ДВС.

**Полунин Антон Викторович**, ведущий инженер НИО-4 НИЧ ТГУ, аспирант кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика», Тольяттинский государственный университет. E-mail: [polfam@mail.ru](mailto:polfam@mail.ru). Область научных интересов: микродуговое окисление, прочность, износостойкость деталей машин.

**Павлов Денис Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические машины и системы управления», Тольяттинский государственный университет. E-mail: [Pavlov-DA@mail.ru](mailto:Pavlov-DA@mail.ru). Область научных интересов: теплотехника, прочность, конструкция и рабочие процессы ДВС.

**Никеров Константин Николаевич**, инженер кафедры «Энергетические машины и системы управления», Тольяттинский государственный университет. E-mail: [vorekin@yandex.ru](mailto:vorekin@yandex.ru). Область научных интересов: численное моделирование рабочих процессов энергетических машин.

**Krishtal Michail Michailovich**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department “Nanotechnologies, Physical Metallurgy and Mechanics”, Rector of Togliatti State University. E-mail: [krishtal@tltu.ru](mailto:krishtal@tltu.ru). Area of research: physics of strength, surface physics, physical metallurgy.

**Ivashin Pavel Valentinovich**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department “Power Plants and Control Systems”, Togliatti State University. E-mail: [ivashinpv@rambler.ru](mailto:ivashinpv@rambler.ru). Area of research: application aspects of fluid and plasma mechanics, construction and work processes of internal combustion engines.

**Polunin Anton Victorovich**, engineer, postgraduate student of the Department “Nanotechnologies, Physical Metallurgy and Mechanics”, Togliatti State University. E-mail: [polfam@mail.ru](mailto:polfam@mail.ru). Area of research: microarc oxidation, durability and wear resistance of machine elements.

**Pavlov Denis Alecsandrovich**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department “Power Plants and Control Systems”, Togliatti State University. E-mail: [Pavlov-DA@mail.ru](mailto:Pavlov-DA@mail.ru). Area of research: heat engineering, durability, construction and work processes of internal combustion engines.

**Nikerov Konstantin Nikolaevich**, engineer of the Department “Power Plants and Control Systems”, Togliatti State University. E-mail: [vorekin@yandex.ru](mailto:vorekin@yandex.ru). Area of research: numerical modeling of work processes of energy-converting machinery.