

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ АЛЮМИНИЕВО-КРЕМНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ МДО ДЛЯ РАБОТЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ ТРЕНИЯ

© 2011 М.М. Криштал, П.В. Ивашин, А.В. Полуниин, Д.А. Павлов

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

Поступила в редакцию 10.11.2011

Представлены результаты исследований, посвященных формированию методом микродугового оксидирования износостойких оксидных слоев на поверхности алюминий-кремниевых сплавов. Показана перспективность использования технологии МДО для упрочнения деталей из алюминий-кремниевых сплавов в энергомашиностроении.

Ключевые слова: 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. При этом зачастую затруднена смазка трущихся деталей. Поэтому вопросы износостойкости приобретают определяющее значение для ресурса, стоимости сервисного обслуживания машин, и, в итоге, себестоимости продукции.

Широкое использование алюминиевых сплавов в конструкции современной машиностроительной и энергетической техники обуславливает необходимость повышения износостойкости деталей из этих сплавов. Основная доля алюминиевых 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 черными 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. При этом важно повышение износостойкости именно пары трения, например «поршневое кольцо – зеркало цилиндра ДВС». Вообще цилиндропоршневая группа ДВС – типичный пример работы пары трения в неблагоприятных условиях, связанных с высо-

кими циклическими нагрузками, высокими температурами и циклическими температурными перепадами. Решение проблем износостойкости этого узла позволит использовать разработанные подходы в решении сходных проблем других энергетических и технологических машин, например насосов для перекачивания агрессивных сред, где смазка трущихся поверхностей отсутствует.

Традиционно рабочие поверхности алюминиевых блоков цилиндров упрочняются установкой чугунной гильзы или специальными упрочняющими покрытиями типа Nikasil и ему подобными. Защитные покрытия в отличие от чугунных гильз позволяют более полно использовать массогабаритные, технологические и эксплуатационные преимущества применения алюминиевых сплавов для изготовления корпусных деталей. Однако методы нанесения покрытий на поверхности алюминиевых сплавов отличаются дороговизной, сложностью и иногда экологической вредностью технологии (например, Nikasil).

Альтернативой покрытиям является технология микродугового оксидирования (МДО) алюминиевых сплавов. Микродуговое оксидирование – эффективный и экологически чистый способ обработки алюминиевых 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 твердостью до 1400HV. Оксидные МДО покрытия, благодаря своим механическим, тепловым, электроизоляционным свойствам, а также возможности получения покрытий большей толщины, выгодно отличаются от оксидных пленок, полученных традиционным анодированием. Однако до проведения наших работ не был решен вопрос оксидируемости алюминиевых сплавов с высоким (более 3 %) содержанием кремния, которые традиционно считаются плохо поддающимися МДО. Качество МДО слоев на силуминах нестабильно, особенно при обработке

Криштал Михаил Михайлович, доктор технических наук, профессор, ректор E-mail: krishtal@tltu.ru

Ивашин Павел Валентинович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: krishtal@tltu.ru

Полуниин Антон Викторович, инженер,

E-mail: krishtal@tltu.ru

Павлов Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: krishtal@tltu.ru

крупногабаритных отливок корпусных деталей, типа блок цилиндров ДВС.

Проведенные к настоящему времени под руководством М.М.Криштала исследования [2,3,4] позволили заложить основы решения проблемы микродугового оксидирования силуминов, обеспечивая стабильно высокое качество МДО на образцах с содержанием кремния до 22% (исследования проведены на сплавах доэвтектического, эвтектического и заэвтектического составов) в лабораторных условиях без оптимизации режимов МДО. В основе подхода лежит понимание и обоснование того, что исходная структура силуминов при одном и том же химическом составе сильно влияет на качество оксидных слоев, получаемых методом МДО. При этом обнаружен ряд неизвестных ранее эффектов и явлений, в том числе:

явление торможения частицами кремния роста оксидного слоя при МДО алюминивно-кремниевых сплавов;

эффект наследования от исходной структуры силуминов химической неоднородности распределения кремния в оксидных слоях;

технологический эффект залечивания сквозной пористости и раковин при МДО силуминов, что делает этот процесс технологически устойчивым к качеству отливки, обеспечивая возможность проведения МДО без специальных требований к пористости отливок (необходимое качество МДО достигается при 2 балле пористости).

То есть, если ранее качество МДО слоя связывали в основном с составом электролита и режимами МДО, то нашими работами показано значительное влияние структуры силумина на качество МДО слоя. Например, на рис. 1 показано влияние модификации структуры сплава АК9 на качество МДО слоя.

Технология успешно апробирована для сплавов АК6М2, АК9, В124, АК10М2Н, АК12ММгН, АК18, АК21 в условиях лабораторных трибологических испытаний образцов.

Также технология была апробирована в условиях реального ДВС. Проведены стендовые моторные испытания двигателя ВАЗ-2108 с блоком

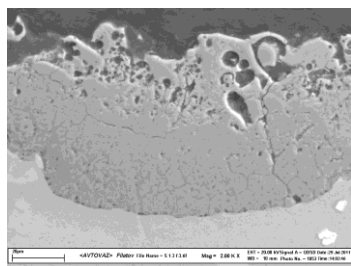
цилиндров со специально подготовленными по разработанной технологии алюминиевыми гильзами (сплав АК6М2) с микродуговым оксидированием. Испытания в объеме 300 часов на режиме полной нагрузки показали, что разработанная технология обеспечивает износостойкость рабочей поверхности алюминиевого блока цилиндров, поршневых колец и поршней на уровне не ниже, чем для двигателя с чугунным блоком. При этом не требуется замена материала поршней и поршневых колец. Таким образом, для сплава АК6М2 проведен практически полный цикл испытаний технологии упрочнения методом МДО от лабораторных до натуральных на двигателе внутреннего сгорания.

Создан прототип промышленной установки для обработки крупногабаритных изделий (рис.2), в том числе блоков цилиндров в циркуляционном режиме (рис. 3).

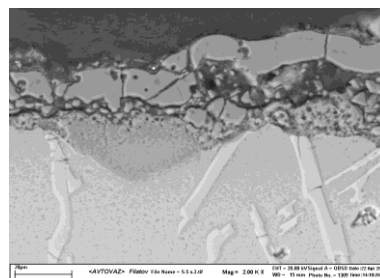
В настоящее время проводится доводка технологического процесса МДО в части оптимизации качества покрытия и снижения затрат электроэнергии.

Дальнейшая работа ведется для сплава АК9. Предварительно механические свойства МДО слоев были исследованы на предмет адгезии по покрытию при воздействии температурных перепадов. Исследования начаты с анализа адгезии, поскольку, если данное свойство неудовлетворительно, дальнейшие испытания покрытия не имеют смысла. Воздействие температурных перепадов при этом моделирует жесткие условия работы энергетических машин.

С целью определения склонности МДО покрытия, полученного на сплаве АК9, к отслоению от основы при действии резких температурных перепадов были проведены эксперименты. Методика эксперимента заключалась в нагреве образца с покрытием до температуры 170°C, выдержке его при этой температуре не менее 20 минут с последующим резким охлаждением до 15 °С. Скорость охлаждения поверхности образца по оценочным расчетам составила величину порядка 1000°C/с.



а



б

Рис. 1. Оксидный слой на сплаве АК9, полученный в ТГУ методом МДО: а – структура основы модифицирована термообработкой, б – без термообработки.



Рис. 2. Установка микродугового оксидирования ТГУ.

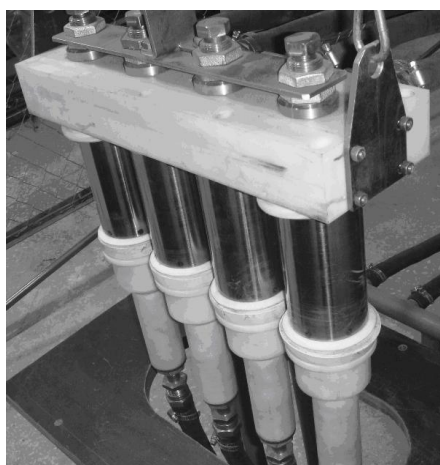


Рис. 3. Технологическая оснастка для оксидирования блоков цилиндров в проточном режиме.

Данные режимы соответствуют наиболее жестким температурным градиентам на поверхностях деталей цилиндропоршневой группы ДВС [5] и подобных энергетических установок. В проведенном эксперименте образец сплава АК9 с МДО покрытием, обработанный перед оксидированием по режиму Т6, до 70 раз подряд повергался воздействию температурных перепадов «термошоков». После 10, 24, 46 и 70 циклов производилась оценка склонности покрытия к сколообразованию.

Такое количество испытаний позволило провести предварительный анализ и определить, является ли данное свойство МДО слоя критическим при подготовке технологии МДО силуминов к промышленному внедрению.

Склонность покрытия к сколообразованию оценивалась следующим образом. Образцы 1 исследуемых сплавов с МДО покрытием 2 устанавливали на опору 3 (рис. 4а). Затем со стороны подложки производили сверление с применением кондукторной втулки (диаметр сверла 1 мм, частота 500 об/мин) при постоянном усилии подачи инструмента (1 кгс). На каждом этапе производилось не менее трех свер-

лений. После сверления (рис. 4б) на поверхности образца образуется область повреждений которую можно охарактеризовать численным значением её площади.

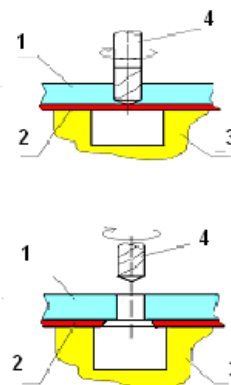


Рис. 4. Схема оценки склонности МДО покрытия к сколообразованию: 1 – алюминиевая подложка; 2 – МДО покрытие; 3 – опора; 4 – сверло; а - сверление алюминиевой подложки образца до образования области повреждений; б - образование области повреждений на МДО покрытии.

Причем, площадь сколов со стороны входа сверла и со стороны выхода сверла различна. Если со стороны входа сверла площадь сколов обусловлена качеством инструмента и технологической оснасткой, определяющей биение сверла на этапе засверливания, то со стороны выхода – свойствами покрытия. Отношение площадей сколов со стороны входа и со стороны выхода $S_{\text{ПО}}/S_{\text{ОТ}}$ является безразмерным параметром, позволяющим оценить склонность покрытия к сколообразованию, причем не зависящим от качества инструмента, так как за один проход по алюминиевой пластине толщиной 3 мм сверло не успеет затупиться. Кроме того, использование площади позволит уменьшить влияние на результат ошибок определения абсолютных размеров областей сколов. Для определения площади использовались фотографии отверстий, сделанные с помощью микроскопа, и далее область скола обрисовывалось с помощью графического редактора и определялось отношение площадей отверстий на входе и выходе сверла. В результате показано, что начальное соотношение площадей выхода и входа сверла составляет около 1,7, при воздействии термошоков оно повышается, причем после 46 циклов соотношение стабилизируется в районе 2,35 и остается постоянным (рис. 5). В целом характер зависимости отношения площадей входа и выхода сверла от числа термошоков позволяет сделать вывод, что после определенного числа циклов тенденции к сколообразованию ослабевают и на теплоперепад покрытие перестает реагировать с точки зрения своих прочностных адгезионных качеств, т.е. способно к дли-

тельной и устойчивой работе в условиях постоянных теплоперепадов. Кроме механических свойств, предварительно оценены тепловые свойства покрытий, полученных на образцах сплава АК9. Оценка теплофизических свойств МДО покрытия осуществлялось методом постоянного теплового потока. Для этого была создана специальная экспериментальная установка, позволяющая определять термическое сопротивление оксидного слоя. Результаты экспериментов показывают, что МДО покрытие значительно увеличивает термическое сопротивление. Коэффициент теплопроводности покрытия составил величину порядка 0,08 – 1,5 Вт/м*К, что говорит о возможности создания теплостойких покрытий на деталях энергетических машин, выполненных из силуминов.



Рис. 5. Зависимость отношения $S_{по}/S_{от}$ от числа термоциклов для МДО-покрытия сплава АК9.

После проведения вышеописанных испытаний было проведено оксидирование блока цилиндра, изготовленного на Ульяновском моторном заводе (УМЗ) из сплава АК9 без применения чугунных гильз. В результате на зеркале цилиндра получен равномерный оксидный слой, то есть показана возможность создания качественного оксидного слоя методом МДО на крупногабаритной отливке из алюминиево-кремниевого сплава. Двигатель УМЗ с блоком цилиндров с МДО упрочнением рабочих поверхностей в настоящее время готовится к стендовым испытаниям.

Таким образом, серия экспериментов на лабораторных образцах и реальном транспортном ДВС показала возможность применения метода микродугового оксидирования для упрочнения поверхностей алюминиево-кремниевых сплавов, работающих в условиях трения с высокими нагрузками и при высоких температурах. Кроме того, обработка достаточно крупных отливок, типа блока цилиндра ДВС, позволяет сделать вывод о перспективности технологии МДО для энергомашиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Силумины*. Атлас микроструктур и фрактограмм промышленных сплавов: Справ. Изд./ Под редакцией Ю.Н.Тарана и В.С.Золотаревского. М.: «МИСИС», 1996.
2. *Криштал М.М.* Наследственная химическая неоднородность в оксидных слоях, получаемых методом микродугового оксидирования на заэвтектических силуминах. [Текст] // М.М. Криштал, М.О. Рюмкин // МиТОМ. 2007. -№ 3. -С. 23-27.
3. *Криштал М.М.* Влияние исходной структуры Al-Si сплавов на свойства получаемых методом микродугового оксидирования оксидных слоев и торможение частицами кремния роста оксидного слоя. [Текст] // М.М. Криштал, М.О. Рюмкин // Материаловедение. 2008. -№ 12. -С. 50-61.
4. *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 // M.M. 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.
5. *Krishtal M.M.* Oxide Layer Formation by Micro-Arc Oxidation on Structurally Modified Al-Si Alloys and Applications for Large-Sized Articles Manufacturing // M.M. Krishtal // Advanced Materials Research, 2009, Vol. 59, 204-208.
6. *Krishtal M.M.* A Wear-Resistant Coating for Aluminium-Silicon Alloys using Microarc Oxidation and an Application to an Aluminium Cylinder Block // Krishtal M.M., Chudinov B.A., Pavlikhin S.E., Polunin V.I. // SAE tech. paper 2002-01-0626, (SP-1683).
7. *Кавапандзе П.З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. - 592 с.

DURABILITY OF PARTS FROM ALUMINIUM-SILICON ALLOYS IMPROVEMENT USING MICRO ARC OXIDATION FOR FUCTIONING IN EXTREMAL FRICTION CONDITIONS

© 2011 M.M. Krishtal, P.V. Ivashin, A.V. Polunin, D.A. Pavlov

Togliatty state university

Review of researches of wear resistant coatings formation on aluminium-silicon alloys surfaces using micro arc oxidation is presented. Great potential of silumin micro arc oxidation method was displayed.

Key words: silumin, micro arc oxidation, durability, heat-resistance, adhesion, power machine building.

Michail Michailovich Krishtal, Profesor, Dr. Sci. Tech., Rector of Togliatty State University. E-mail: krishtal@tltu.ru

Ivashin Pavel Valentinovich, Cand.Tech.Sci., Docent of Togliatty State University. E-mail: krishtal@tltu.ru

Polunin Pavel Valeninivich, engineer of Togliatty State University. E-mail: krishtal@tltu.ru

Pavlov Denis Alecsandrovich, Cand.Tech.Sci., Docent of Togliatty State University. E-mail: krishtal@tltu.ru