

Н. Ю. Дударева, Н. Х. Мусин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния режимов искрового упрочнения на прочностные свойства сплава алюминия АЛ30. В качестве факторов, определяющих режим обработки, выбраны: емкость конденсаторов, индуктивность и межэлектродный зазор. *Искровое упрочнение; предел прочности; сплав алюминия; надежность ДВС*

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование двигателей внутреннего сгорания (ДВС) идет по пути повышения их мощности, надежности и долговечности, уменьшения массы и габаритов, что приводит к повышению эксплуатационных характеристик: давления в камере сгорания, числа оборотов коленчатого вала, удельной мощности на единицу массы двигателя. Все это в различной мере повышает механические и тепловые нагрузки на детали ДВС. По этой причине особую актуальность приобретают проблемы повышения надежности деталей.

Как известно, наиболее нагруженными деталями ДВС являются детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ). В процессе эксплуатации эти детали испытывают воздействие высоких температур, динамических нагрузок, возникающих при сгорании газов, и сил трения. Детали, находящиеся в сопряжении, подвержены различным видам износа: механическому, абразивному, окислительному, коррозионному, изнашиванию при заедании, а также комбинированному воздействию перечисленных видов износа [1]. Кроме того, в процессе работы детали ЦПГ испытывают вибрации, которые возрастают в результате изнашивания трущихся поверхностей поршня, поршневых колец и стенок цилиндра. Вибрации существенно ухудшают работу двигателя и приводят к усталостному разрушению деталей [2].

Достаточно тяжелые условия работы деталей ЦПГ осложнены еще и тем, что высокие

температуры и скорости скольжения способствуют частичному разрушению масляной пленки, что, в свою очередь, ведет к возникновению режима сухого трения, увеличению коэффициента трения и интенсивности изнашивания. Большое влияние на износ оказывают продукты сгорания и воздух, который содержит пыль. Частицы продуктов сгорания и пыли являются причиной абразивного изнашивания поршневых колец и поверхности цилиндров. Но наиболее разрушительным абразивом являются сами продукты износа, находящиеся в зоне трения.

Несмотря на то, что детали ЦПГ подвержены повышенному износу, в современном двигателестроении наблюдается тенденция к применению алюминиевых сплавов при производстве ДВС. Из алюминиевых сплавов традиционно изготавливают поршни, а также блоки цилиндров, известны также и двигатели с гильзой из алюминиевых сплавов [3]. Основные достоинства алюминиевых сплавов, имеющие особое значение при использовании их в ДВС, – это их высокая теплопроводность и низкая плотность. Однако один существенный недостаток – низкая износостойкость – сдерживает масштабное использование этих сплавов в двигателестроении.

Для снижения износа деталей ДВС из алюминиевых сплавов активно используются различные технологические и конструкторские приемы. В качестве наиболее эффективных способов повышения износостойкости и долговечности деталей ДВС из алюминиевых сплавов можно выделить специальные покрытия, либо методы модификации рабочих поверхностей.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С конца 1950-х гг. прошлого века многие автомобильные компании используют сплавы алюминия для изготовления блоков цилиндров. Среди них такие фирмы, как Citroen, Renault,

Контактная информация: 8(347)273-06-35

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.1659 «Конструкционные наноструктурные покрытия для повышения надежности деталей в объектах машиностроения».

Peugeot, Rolls-Royce, Jaguar, Volkswagen, Opel, Audi и др. Заволжский, Ульяновский и Уфимский моторостроительные заводы также производят алюминиевые блоки цилиндров. В настоящее время в мире примерно половина всех блоков изготавливается из алюминиевых сплавов, но только 10% из них без чугунной гильзы [4]. Это связано с тем, что до сих пор не найдено эффективного решения по созданию надежной рабочей поверхности алюминиевого блока цилиндра.

В современном двигателестроении для повышения ресурса поверхности зеркала алюминиевого цилиндра широко используются различные упрочняющие покрытия, например «Cromal», «Nikasil», «Alusil», «Lokasil» и др. Но все эти покрытия имеют определенные недостатки: либо отслаиваются при высоких температурах и механических нагрузках, либо разрушаются в результате агрессивного воздействия топлив [4–6].

С точки зрения авторов, одним из перспективных методов повышения надежности рабочей поверхности алюминиевого блока (или втулки цилиндра) является метод искрового упрочнения (ИУ). Он разработан на кафедре двигателей внутреннего сгорания Уфимского государственного авиационного технического университета. Суть метода ИУ заключается в импульсном воздействии на поверхность заготовки искрового разряда, параметры которого таковы, что происходит проникновение атомов и ионов газовой среды вглубь материала заготовки. В результате чего формируется модифицированный слой, состоящий из оксидов или нитридов материала подложки. Такие поверхностные слои обладают микротвердостью более 24 ГПа, а их толщина достигает 300 мкм [7].

В рамках исследования возможности применения ИУ для повышения работоспособности рабочей поверхности алюминиевых блоков и втулок цилиндров была сформулирована гипотеза о том, что ИУ способно не только увеличивать микротвердость и износостойкость алюминиевых сплавов, но и повышать прочностные свойства деталей. По своей сути высказанная гипотеза не является очевидной. Это связано с тем, что в процессе искрового упрочнения на поверхность детали воздействует искровой разряд, который представляет собой совокупность сложных физических явлений. При искровом воздействии поверхность образца подвергается влиянию высоких температур, ионизированных частиц и ударных волн [8]. Такое комплексное

воздействие приводит к повышению микротвердости поверхности за счет формирования высокотвердых кристаллов оксида алюминия (Al_2O_3). Обычно повышение твердости поверхности приводит и к повышению прочности образцов в среднем на 10%. Однако в данном случае повышение микротвердости не является гарантией повышения прочности образцов. Это связано с тем, что некоторые режимы процесса ИУ могут приводить к активному появлению поверхностных концентраторов напряжения, что в свою очередь может привести к снижению прочности.

Необходимо отметить тот факт, что качество поверхностного слоя, получаемого при ИУ, в значительной степени зависит от режимов процесса. От них зависит мощность искровых разрядов и соответственно энергия воздействия на упрочняемую поверхность.

Целью данной работы является исследование влияния режимов искрового упрочнения на прочность сплава АЛ30, который традиционно используется для производства блоков цилиндров ДВС.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При планировании экспериментов были определены факторы процесса искрового упрочнения, которые оказывают существенное влияние на свойства формируемого поверхностного слоя. Такими факторами, определяющими характеристики упрочненного слоя (УС) являются: емкость конденсатора C , мкФ (X_1); индуктивность катушки L , Гн (X_2) и величина межэлектродного зазора d , мм (X_3). Для каждого фактора были взяты два уровня значений в диапазоне:

- 0,22...2,2 нФ для емкости;
- 0,5...2,0 мм для межэлектродного зазора;
- 20...40 Гн для индуктивности.

На выбранном промежутке значений емкости формируется УС толщиной от 5 до 295 мкм, с шероховатостью R_a от 0,3 до 3,2 мкм и микротвердостью H_c от 1,5 до 32 ГПа. Выбор значений индуктивности обоснован имеющимся оборудованием и возможностью формирования искрового разряда, при увеличении общего сопротивления цепи. Выбор максимального значения межэлектродного зазора также продиктован условиями образования искрового разряда с требуемыми характеристиками.

Исследования проводились в соответствии с теорией планирования эксперимента для пол-

ного трехфакторного эксперимента с количеством опытов, равным восьми. Матрица планирования представлена в табл. 1 [9].

Образцы из сплава АЛ30 ГОСТ 2685-75 вырезались электроискровой резкой согласно эскизу, который представлен на рис. 1. Далее поверхность образцов полировалась механически. Перемычка образца обрабатывалась методом ИУ с двух сторон по всей длине. Электрод был изготовлен из проволоки марки АПВ диаметром 1 мм. Продолжительность упрочнения составляла 3 часа/мм². В связи с тем, что при обработке поверхности образцов использовалось несколько установок, то их синхронизация проводилась путем установки частоты искровых разрядов в 4 Гц при работе на режиме 1 (табл.1).

Таблица 1

Матрица планирования
полнофакторного эксперимента

Режим	X_0	X_1	X_2	X_3
1	+	-	-	+
2	+	-	+	+
3	+	+	-	+
4	+	+	+	+
5	+	-	-	-
6	+	-	+	-
7	+	+	-	-
8	+	+	+	-

После упрочнения производилось измерение микротвердости поверхности с помощью микротвердомера HVS-1000 при нагрузке на индентор $P = 200$ г. Измерение толщины и ширины перемычки образцов производилось с помощью цифрового штангенциркуля.

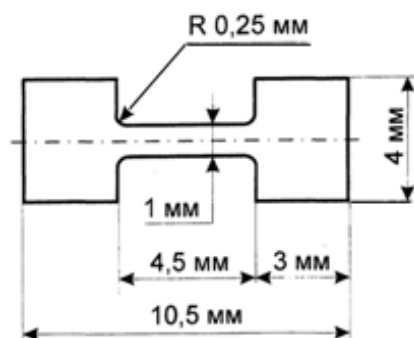


Рис. 1. Эскиз образцов

Испытания на прочность проводились на машинах для растяжения малых образцов с вертикальным (рис. 2) расположением траверсы (Институт физики перспективных материалов). Скорость перемещения траверсы составляла 0,01 мм/мин. Измерение усилия осуществ-

лялось датчиком с верхним пределом 200 кг при точности регистрации усилий 1%. Данные записывались в файл отчета с шагом времени записи 1 с. Экспериментально полученные значения перемещения и усилия использовались в компьютерной программе для автоматического построения диаграммы «усилие – перемещение», а затем также записывались в файл [10].

На основе полученных в результате экспериментов данных была построена эмпирическая модель влияния режимов ИУ на предел прочности образцов. При планировании экспериментов сделано допущение, что модели описываются линейными зависимостями.



Рис. 2. Машина с вертикальным расположением траверсы, где 1 – траверса, 2 – захваты, в которых закрепляется образец, 3 – датчик усилия

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В соответствии с матрицей планирования (табл. 1) было проведено восемь экспериментов на образцах из сплава АЛ30 по ГОСТ 2685-75. Так же был испытан образец без упрочнения. В результате для каждого образца получены файлы данных, содержащие значения усилий (кН), перемещений (мм), напряжений (МПа) и относительного удлинения (%). Полученные данные обрабатывались в соответствии с существующей методикой [9].

Как известно, предел прочности определяется как отношение максимальной нагрузки, предшествующей разрушению к начальной площади сечения. Перед началом испытаний для каждого образца измерялась площадь поперечного сечения. После испытаний на растяжение вычислялись значения напряжений на каждом шаге времени. В результате были получены диаграммы растяжения в координатах «напряжение – относительное удлинение». На рис. 3–5 представлены диаграммы растяжения для обра-

ботанных образцов, с максимальным и минимальным значением предела, и образца без упрочнения соответственно.

По данной диаграмме и определялся предел прочности образца. Перед испытаниями на разрывной машине проводилось измерение микротвердости упрочненного слоя. Значения микротвердости, максимального растягивающего усилия и предела прочности для образцов, соответствующих конкретным опытам, приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что почти на всех режимах предел прочности выше, чем у исходного образца. Прочностные свойства образцов, обработанных на режимах 7 и 8, оказались ниже, чем у исходного. Максимальная величина предела прочности, достигнутая при минимальных значениях емкости и индуктивности, и максимальном значении межэлектродного зазора составила 198 МПа. На рис. 6 приведен образец, обработанный на указанном режиме, после испытаний.

Микротвердость возросла на всех режимах обработки. Максимальная микротвердость достигнутая при режиме 1, составляет 4,54 ГПа, что в 5 раз выше, чем у исходного материала. Несмотря на то, что максимальная микротвердость и предел прочности получены на одном режиме, из табл. 2 видно, что явная корреляция между этими двумя показателями отсутствует.

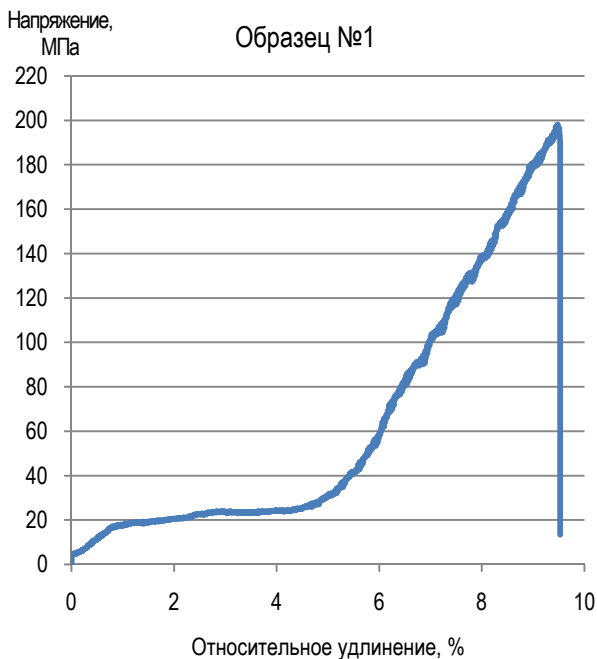


Рис. 3. Диаграмма растяжения для образца с максимальным значением предела прочности

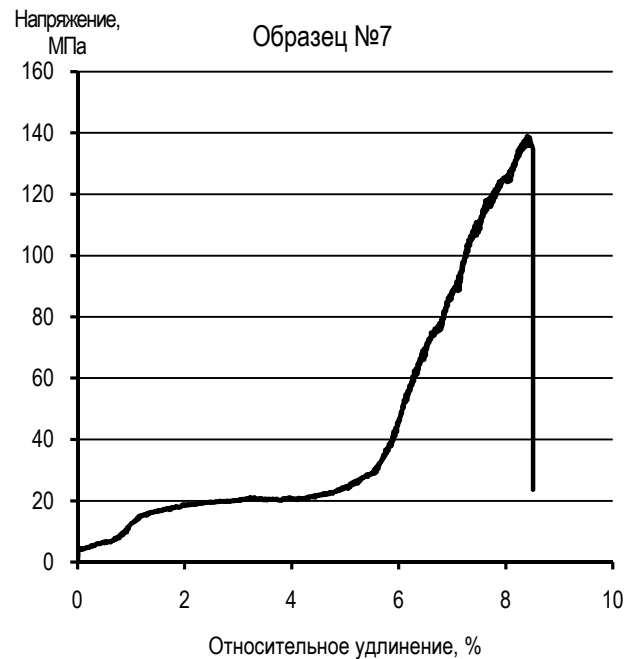


Рис. 4. Диаграмма растяжения для образца с минимальным значением предела прочности

По полученным экспериментальным значениям предела прочности была выведена эмпирическая модель:

$$\sigma_s = 159,115 - 6,89 \cdot C + 0,343 \cdot L + 16,548 \cdot d,$$

где C – емкость батареи конденсаторов (нФ), L – индуктивность (Гн), d – межэлектродный зазор (мм).



Рис. 5. Диаграмма растяжения для необработанного образца

Таблица 2
Результаты экспериментов

Режим	Микротвердость, ГПа	Максимальное растягивающее усилие, кН	Предел прочности σ_b , МПа
1	4,54	0,06060	198,03
2	4,12	0,04990	188,31
3	3,83	0,06101	195,10
4	1,92	0,06317	195,94
5	2,23	0,05211	181,27
6	3,91	0,05836	186,64
7	4,32	0,04477	138,86
8	3,82	0,05498	170,55
Без ИУ	0,92	0,05399	181,74

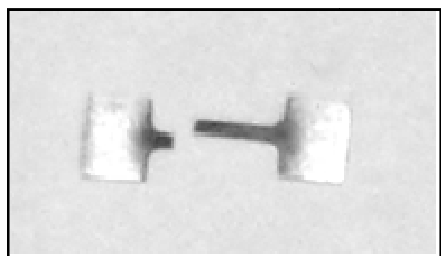


Рис. 6. Образец из сплава АЛ30 с максимальной прочностью

Анализируя эффект снижения прочности у образцов, обработанных на режимах 7 и 8, можно сказать, что эти режимы характеризуются максимальной емкостью и минимальным зазором. По-видимому, условия обработки при этих режимах таковы, что способствуют формированию, параллельно с упрочненным слоем, таких поверхностных дефектов, которые в дальнейшем, при испытаниях на прочность, выступают в роли концентраторов напряжений, в результате чего и происходит снижение прочности.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные эксперименты показывают, что искровое упрочнение на определенных режимах приводит к увеличению прочностных свойств алюминиевых сплавов до 10%. В то же время при определенных комбинациях входных факторов наблюдается снижение предела прочности.

2. Увеличение емкости оказывает негативное влияние на прочностные свойства сплава АЛ30. Это связано с тем, что с увеличением емкости происходит возрастание энергии искрово-

го разряда, что в свою очередь приводит к увеличению количества поверхностных концентраторов напряжения. Как показали проведенные ранее однофакторные эксперименты, увеличение емкости конденсаторов приводит к росту шероховатости поверхности.

3. Индуктивность оказывает незначительное положительное влияние на предел прочности.

4. Увеличение межэлектродного зазора приводит к увеличению прочности образцов из сплава АЛ30 и является наиболее весомым фактором.

5. Максимальные значения микротвердости и предела прочности получены при минимальных значениях емкости и индуктивности, и максимальном значении межэлектродного зазора.

6. Несмотря на это между полученной микротвердостью и пределом прочности образца отсутствует явная корреляция. В частности, образец № 7 с близкой к максимальной микротвердостью обладает пределом прочности ниже, чем у исходного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трение, изнашивание и смазка: справочник. В 2-х кн. Кн. 2 / под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисына. М.: Машиностроение, 1979. 358 с.
2. Гинцбург Б. Я. Теория поршневого кольца. М.: Машиностроение, 1979. 247 с.
3. Соловых Е. К. Тенденции повышения работоспособности гильз цилиндров ДВС // Проблемы трибологии. 2009. № 2. С. 47–57.
4. Гончаров В. С., Гончаров М. В. Повышение долговечности деталей трансмиссии и двигателей внутреннего сгорания // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 6. С. 34–37.
5. Enomoto Y., Yamamoto T. New materials in automotive tribology // Tribology Letters. 1998. № 5. P. 13–24.
6. A wear-resistant coating for aluminium-silicon alloys using microarc oxidation and an application to an aluminium cylinder block / М. М. Krishtal [et al.] // Society of Automotive Engineers. 2002. № 1. P. 153–162.
7. Пат. 2176682 РФ, МПК 7 С 23 С 14/40, В 23 Н 1/02, В 23 Н 9/00. Способ упрочнения поверхностей деталей / Б. П. Рудой [и др.]. № 99110333/02; заявл. 17.05.1999; опублик. 10.12.2001.
8. Физические основы электрического пробоя газов / А.Ф. Дьяков [и др.]. М.: Издательство МЭИ, 1999. 400 с.

9. **Адлер Ю. П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.

10. Методика работы на установке для проведения механических растяжений малых образцов: методические указания к лабораторной работе № 5 по курсу «Физика прочности и пластичности наноматериалов» / составители: О. Б. Кулясова, Г. В. Нурисламова, Р. К. Исламгалиев. Уфа, 2007. 13 с.

ОБ АВТОРАХ

Дударева Наталья Юрьевна, доц. каф. двигателей внутреннего сгорания. Дипл. инженер по технологии машиностроения (УГАТУ, 1994). Канд. техн. наук по тепл. двигателям (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. износостойких покрытий деталей двигателей

Мусин Нияз Хамитович, асп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологии по энергомашиностроению (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. износостойких покрытий деталей двигателей