

**Тим Фейсс, Джеймс Паркс – Oak Ridge National Laboratory, США**

Основная задача программы Advanced Reciprocating Engine System (ARES) министерства энергетики США – разработка передовых технологий для поршневых двигателей, работающих на природном газе, с целью достижения более высокой мощности, низкого уровня эмиссии и оптимальных эксплуатационных затрат. Oak Ridge National Laboratory (ORNL) работает над многочисленными проектами в рамках ARES по трем основным направлениям: система зажигания, система контроля и система подавления эмиссии.

## Разработки лаборатории ORNL в рамках программы ARES

### IN BRIEF

**Advances in engine technology as a part of the Advanced Reciprocating Engine System (ARES) program at the Oak Ridge National Laboratory (ORNL).**

*The primary task of the US Department of Energy's Advanced Reciprocating Engine System program is the development of advanced natural gas engine technology with improved efficiency, low emissions and optimal operational costs.*

*ORNL is working on multiple projects within the ARES program that fall within three general areas: ignition, controls and emissions reduction.*

*ORNL is also investigating adaptive control techniques and the feasibility of using lean NO<sub>x</sub> trap catalyst technology to reduce the NO<sub>x</sub> emissions.*

Поршневые двигатели продолжают занимать основное место в сфере распределенного производства энергии и являются наиболее надежными в диапазоне мощности от 500 кВт до 5 МВт. Однако существует необходимость совершенствования их эксплуатационных параметров, а именно уровней эмиссии и расхода топлива. В рамках программы ARES проводится совместная работа нескольких американских компаний-производителей газопоршневых двигателей (Caterpillar, Cummins, Waukesha), государственных лабораторий (Argonne National Laboratory, Oak Ridge National Laboratory, National Energy Technology Laboratory) и ряда университетов США (Colorado State University, Purdue University, Massachusetts Institute of Technology и т.д.). В 2000 г. были определены конкретные задачи по модернизации газопоршневых двигателей, решение которых запланировано к 2010 году:

- эффективный КПД не менее 50 %;
- уровень NO<sub>x</sub> не более 0,13 г/кВт·ч, без повышения уровня других загрязняющих компонентов;
- снижение стоимости выработки энергии не менее чем на 10 %;
- надежность, пригодность и удобство обслуживания двигателей;
- возможность использования различных видов топлива.

В рамках программы ARES компании должны разработать прототипы двигателей в три этапа – с уровнем КПД 44%, 47% и 50% соответственно. Исследовательская группа ARES предоставляет производителям оборудования, а также широкой общественности всю необходимую информацию и результаты своих разработок.

### Основные направления исследований ORNL

Деятельность исследовательской лаборатории Oak Ridge National Laboratory сконцентрирована на трех основных направлениях:

1. Система зажигания – повышение срока службы свечей зажигания за счет применения новейших электродных сплавов;
2. Система контроля – выявление причин нестабильной работы двигателя и разработка адаптивной, или нелинейной системы контроля рабочих параметров;
3. Система выхлопа – исследование новой системы контроля выбросов в двигателях, работающих на обедненной топливовоздушной смеси.

ORNL изучает механизмы изнашивания электродов свечей зажигания с целью улучшения их износостойкости в газопоршневых двигателях. Лаборатория проводит исследования по изучению широкого спектра свечей зажигания с применением новых сплавов, разработанных ORNL, совместно с компанией Federal Mogul – ведущим поставщиком запасных частей для двигателей. Свечи разрабатывались с учетом свойств материала с целью повышения их надежности и долговечности.

Испытания, направленные на определение основных механизмов и причин образования эрозии и выявление недостатков используемых материалов, проводились на двигателе Caterpillar G3406. Результаты исследований показывают, что эрозия и выход из строя механизмов являются следствием образования трещин внутри и на поверхности материала. В настоящее время разрабатываются новые материалы, характеризующиеся высокой эрозионной стойкостью.

Лаборатория занимается также вопросами более активного использования обедненной топливной смеси посредством применения системы адаптивного управления двигателем. Такая технология была испытана на небольшом двигателе, работающем на природном газе – в результате было достигнуто значительное улучшение его эксплуатационных характеристик. Испытания системы адаптивного управления были продолжены на стационарном двигателе большей мощности. В настоящее время основное внимание уделяется параметрам циклового распыления топлива с применением искрового зажигания в двигателе с гомогенным зарядом и воспламенением от сжатия – HCCI (Homogeneous charge compression ignition).

С целью значительного сокращения уровня  $\text{NO}_x$  в выхлопных газах двигателя, работающего на обедненной топливной смеси, ORNL разрабатывает передовые технологии каталитической очистки выхлопных газов. Для этого необходимо решить такие задачи, как использование природного газа в качестве восстановителя в процессе регенерации катализаторов LNT (Lean  $\text{NO}_x$  Trap), а также выработать технические решения по продлению срока службы катализаторов, снижению их загрязнения серой, уменьшению стоимости системы и т.д.

Такая каталитическая система подавления выбросов  $\text{NO}_x$  была установлена на двигателе компании Cummins C8.3-G+ на динамометрическом испытательном стенде. В ее состав входит каталитическая камера, выпускные клапаны для отвода потока выхлопных газов из катализаторов во время стадии регенерации, форсунки для нагнетания природного газа в качестве восстановителя, кислородные датчики для регулирования состава топливовоздушной смеси в стадии каталитической регенерации. В результате уровень  $\text{NO}_x$  в выхлопных газах сократился более чем на 90% ( $\text{NO}_x < 0,13$  г/кВт·ч) при минимальном дополнительном расходе топлива. Кроме этого, была отработана технология использования природного газа в качестве восстановителя.

### **Изучение механизмов эрозии свечей зажигания**

Производители газопоршневых двигателей отмечают, что применение системы воспламенения высокого давления позволяет снизить уровень эмиссии выхлопных газов и повысить эксплуатационные качества двигателей, работающих на обедненной смеси, а также на стехиометрической смеси и оснащенных системой рециркуляции отработавших газов. Эрозия свечей зажигания, следствием которой является

выход из строя оборудования, – это результат длительной эксплуатации системы зажигания. Срок службы обычной свечи составляет обычно от 2 до 6 месяцев, после чего эффективность ее работы снижается, и возникает необходимость частой и дорогостоящей замены.

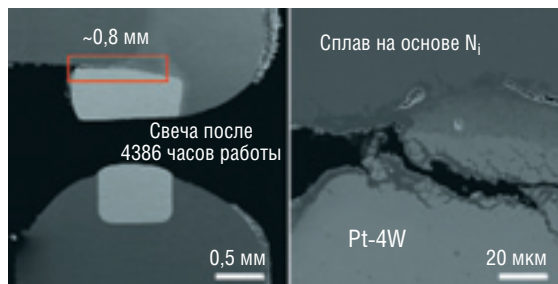
Известно, что в последнее время модернизация двигателей, как правило, связана с повышением давления в цилиндрах, увеличением степени сжатия и интенсивностью воспламенения, а также с использованием обедненной смеси в качестве топлива. Поэтому увеличение сроков службы свечей зажигания необходимо для устойчивой и надежной работы двигателей. Чтобы увеличить срок службы свечей, необходимо применять систему воспламенения более высокого давления.

Основная цель проводимых работ – исследовать причины и механизм износа электродов и разработать новые износостойкие материалы, чтобы вдвое увеличить срок службы свечей. Микроструктурный и спектральный анализ вышедших из строя свечей зажигания модели J показал, что причиной износа явилось окисление и появление трещин на материале во время эксплуатации двигателя.

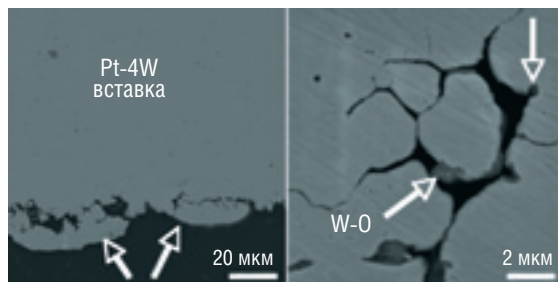
Обычно свечи производятся из легированного никелевого сплава, места искрообразования оснащаются вставками из сплава платины и вольфрама или иридия. В местах сопряжения электрода из никеля со вставкой наблюдались обширные трещины и окисление. Имели место разрушения и в самой структуре вставок, особенно при использовании сплава платины и вольфрама, причиной чего было окисление ванадия в структуре материала и улетучивание образовавшегося оксида ванадия. Данные результаты были неожиданными, так как причиной износа электродов считался в первую очередь износ материала из-за стирания напыления, расплавления, абляции и эрозии частиц во время искрообразования.

В течение всего срока эксплуатации оборудования систематически проводился спектральный анализ свечей зажигания, а также условий работы двигателя. Необходимо было определить, как влияет окисление и образование трещин на износ электродов. Проводились также комплексные исследования существующих электродных сплавов, включая сплавы из благородных и драгоценных металлов, направленные на изучение влияния термических, механических и химических свойств материала на степень его износа. Для сравнения были отобраны обычные свечи модели J и ранее описанные свечи (производство таких свечей зажигания осуществлялось совместно с американской компанией Federal Mogul/Champion).

➤ **Фото 1.** Окисление и образование трещин в местах сопряжения никелевого электрода и покрытия из платины после 6 месяцев эксплуатации



➤ **Фото 2.** Обширные межкристаллические трещины на электроде из сплава платины и вольфрама после нескольких дней эксплуатации. Они образуются в результате окисления ванадиевых добавок в сплаве с платиной при напряжении пробоя, когда улетучивается оксид вольфрама



### Результаты исследований

После 6 месяцев эксплуатации свечей (2000 - 4000 часов) на рабочем конце заземляющего электрода, выполненном из сплава платины и вольфрама, наблюдалось обширное межкристаллическое растрескивание и износ материала. В структуре никелевого сплава и местах сопряжения со сплавом из платины и вольфрама произошло окисление и образование трещин (фото 1). Это в свою очередь негативно отражается на искрообразовании и эксплуатационных характеристиках свечей, сокращается срок их службы.

В процессе эксплуатации двигателя свечи периодически проверялись на наличие разрушений. Уже через 108-188 часов работы наблюдались признаки окисления, появились трещины в сплаве никеля на заземляющем электроде и в местах сопряжения со вставками из сплава платины и вольфрама. Также появилось межкристаллическое растрескивание как в структуре сплава из платины и вольфрама на заземляющем электроде, так и в структуре сплава

иридия на вставке центрального электрода (фото 2), но размеры разрушений были значительно меньше. Это позволяет предположить, что износ происходит на протяжении всего срока эксплуатации свечей.

В испытательной камере сгорания под высоким давлением проводился спектральный анализ для изучения искрообразования ряда тестируемых свечей. На рис. 1 представлены результаты тестирования новых и старых свечей. Данные спектрального анализа использовались для идентификации теплоизлучения в электрической дуге рабочего газа (воздушная смесь из азота и кислорода) и материала на рабочем конце электрода. Напыление новых свечей содержит большое количество никеля, на эксплуатируемых свечах присутствует большое количество кальция и немного никеля. Результаты исследования показали, что через небольшой промежуток времени (около 100 часов) концентрация кальция и других примесей увеличивается.

Не наблюдалось спектральных линий от электродных сплавов иридия, платины и вольфрама – это свидетельствует о том, что эти материалы менее подвержены разрушению. Данные результаты совпадают с металлургическими исследованиями (фото 2), где подтверждается, что образование трещин или окисление являются основными причинами эрозии, в результате которой наблюдается износ электродного материала.

Металлургический анализ поверхности электродного сплава платины и вольфрама и сплава иридия показал наличие оксидов Ni-Pt-O и Ni-Ir-O. Кроме того, в их состав входили кальций, цинк, фосфор и сера, которые появляются в результате использования смазочного масла для двигателей. В электродном сплаве никеля также были обнаружены такие элементы, как хром, магний и кремний. Хотя износ электродов является в первую очередь результатом межкристаллической коррозии рабочего конца электрода из сплава платины и вольфрама и следствием образования трещин или окисления в местах сопряжения сплавов электрода, наличие кальция может значительно понизить температуру размягчения и коэффициент вязкости в стадии окисления, ускоряя процесс износа электродов.

### Разработка и испытания новых электродных сплавов

Изучение механизмов образования трещин и окисления послужило основой разработки новых электродных сплавов с целью повышения долговечности свечей зажигания. В связи с этим ORNL запланировала производство и

➤ **Рис. 1.** Данные спектрального анализа для сравнения новых и использованных свечей зажигания. Хорошо различимы спектральные линии кальция и никеля. Практически незаметны линии азота, кислорода, иридия, платины, железа и вольфрама с наконечника электрода



испытания трех серий свечей модели J, которые будут изготовлены из новых электродных сплавов. Первая серия свечей из экспериментальных сплавов будет характеризоваться повышенной стойкостью к окислению. Чтобы определить основную реакцию, при производстве свечей не будут использоваться благородные металлы.

Вторая серия свечей будет изготовлена с применением электродных материалов с использованием платины и иридия, что повысит стойкость материала к межкристаллической коррозии и износу. Будут использоваться железоникелевые сплавы, имеющие более высокую стойкость к окислению, поскольку они обладают большей совместимостью по термодинамическим свойствам с дополнительными сплавами. Используя такие сплавы, можно снизить уровень окисления и образование трещин в местах сопряжения.

Третью серию свечей зажигания изготовят из экспериментальных сплавов с высокой температурной и коррозионной стойкостью. Такой сплав будет использоваться для изготовления рабочего конца электрода, заменив платину. Это позволит оценить возможности предотвращения износа материала в результате межкристаллического образования трещин с целью усовершенствования самого сплава.

Опробование электродов из сплава  $Cr_2O_3$  с ферритной аустенитной микроструктурой из никеля проходило на опытном двигателе в лаборатории ORNL. Во время исследования проводилось сопоставление с электродами, которые на 95 % состояли из никеля или из сплава Ni-15Cr. В производстве свечей не использовались благородные металлы.

После эксплуатации свечей в течение 67 часов был проведен анализ состояния электродных сплавов. Результаты показали, что сплавы из железа обладают лучшей стойкостью к образованию трещин, чем сплавы из никеля. Было

установлено, что большое значение имеет такое свойство металлов, как теплопроводность. Однако высокое содержание алюминия и хрома, которые применяются с целью улучшения стойкости к окислению, может понизить теплопроводность электродного сплава.

Вторая серия свечей зажигания эксплуатировалась в течение 250 часов. Предварительный микроструктурный анализ показал наличие износа сплава вставки, во многих случаях значительную взаимную диффузию и разрушение в местах сопряжения электрода и вставки. До сих пор не ясно, что является причиной такой реакции – свойства материала или недостаточно отработанная технология производства прототипов свечей. В настоящее время проводится детальный электронно-микроскопический анализ опытных экземпляров свечей, что позволит обосновать причины образования разрушения материала.

### **Дальнейшее совершенствование свечей зажигания**

В перспективе планируется провести повторное испытание свечей, производимых из существующих сплавов, с добавлением благородных и редкоземельных металлов, улучшающих стойкость металла к окислению и образованию трещин. Также проводятся исследовательские работы по разработке и применению новых альтернативных сплавов и материалов для производства вставок (не из группы благородных металлов) с целью повышения износоустойчивости материала. В 2007-2008 гг. осуществлялась разработка новых сплавов с учетом полученных результатов исследования, которые будут использоваться в производстве свечей зажигания.

*Продолжение в следующем номере*

По материалам доклада ORNL №270 на конгрессе CIMAC 2007, Вена, Австрия



### **ГТЭС мощностью 96 МВт построена на Талаканском нефтегазовом месторождении (ОАО «Сургутнефтегаз»).**

Реализация проекта запланирована в три очереди – по 48 МВт каждая. Для этого Сумское НПО поставит 9 газотурбинных энергоблоков на базе двигателей НК-16СТ. В качестве топлива будет использоваться попутный газ.

Электростанция простого цикла построена по типовому проекту: ГТУ расположена в контейнере, редуктор и генератор – в легко-сборном укрытии. Поставку дожимных компрессоров топливного газа производства Enerproject SA обеспечила компания «Энергаз». Генпроектировщиком ГТЭС выступает институт «СургутНИПИнефть».

Станция будет работать в составе локальной энергосистемы и обеспечит потребности инфраструктуры ОАО «Сургутнефтегаз».

Ввод третьей очереди станции планируется в 2010 году.