



In brief

Developing additive manufacturing technology for burner repair.

Siemens industrial gas turbines SGT-800 and SGT-700 are equipped with 3rd generation of DLE burners. These burners demonstrate reliable operation for the duration of their lifetime. The design and shape of the burner tip is of great importance in order to achieve a good fuel / air mixture and at the same time a resistance to the fatigue created by heat radiation input.

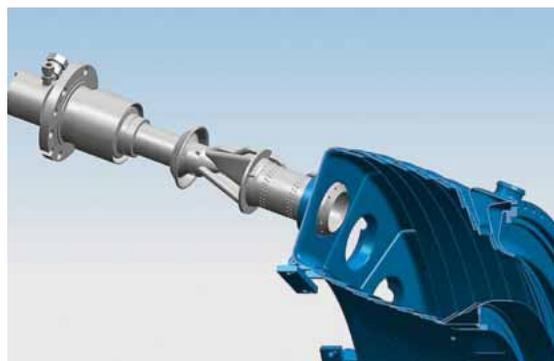
The article describes how Siemens developed and qualified DLE burners repair with the help of additive manufacturing technology and research work performed. The article highlights the challenges faced during design, materials qualification and repair work shop set-up.

➤ **Рис. 1. Стандартная компоновка горелки и КС**

Аддитивное наращивание при ремонте горелок камер сгорания ГТУ

Олов Андрессон, Хакан Бродин, Андреас Грайчен, Владимир Навроцкий – Siemens Industrial Turbomachinery AB

Применение низкоэмиссионной камеры сгорания – одно из наиболее важных требований для промышленных газовых турбин. Газотурбинные установки SGT-700 и SGT-800, использующие технологии сухого низкоэмиссионного горения, оснащены горелками DLE третьего поколения. Они имеют высокие рабочие характеристики и обеспечивают надежную эксплуатацию на протяжении всего срока службы.



Конструкция и форма горелки имеет большое значение для обеспечения оптимального состава топливоздушной смеси, а также устойчивости к напряжениям, вызванным высокотемпературным воздействием. Это определяет основные требования к конструкции горелки, включающей систему охлаждения с внутренними каналами малого диаметра. Было показано, что продлить срок службы горелок можно путем проведения ремонта только периферийной части горелки.

Ранее ремонт горелки проводился традиционным способом: изношенная периферийная часть горелки срезалась и вместо нее приваривалась предварительно изготовленная новая часть. Причем в связи со сложной внутренней конструкцией необходимо было удалять достаточно большую периферийную часть горелки.

С помощью технологий аддитивного наращивания (АН) появилась возможность существенно упростить процесс ремонта и заменить при этом только поврежденную часть горелки.

Для этого была разработана специальная технология, которая предусматривает следующую последовательность:

- механическое удаление поврежденной части горелки;
- расположение горелки в установке аддитивного наращивания;
- аддитивное наращивание новой периферийной части горелки;
- контроль качества материала, включая зону стыковки старого и нового материала;
- оценка механической целостности горелки и контроль всего процесса ремонта.

В статье представлены результаты разработки процесса ремонта горелок DLE газовых турбин SGT-700 и SGT-800 с использованием технологий аддитивного наращивания.

Газовая турбина SGT-800, выведенная на рынок в 1998 г., имеет на данный момент мощность 54 МВт, КПД в простом цикле 39,1 %. Уровень эмиссии NO_x и CO составляет, соответственно, менее 15 и 5 ppm при работе на газообразном топливе. SGT-700, созданная в 2002 г., представляет собой модификацию газовой турбины SGT-600. В ней используются технологии горения, отработанные в составе SGT-800. Обе ГТУ имеют кольцевую камеру сгорания, которая у SGT-800 оснащена 30 горелками, а у SGT-700 – 18 горелками. Конструкция горелок у данных газовых турбин очень похожа, но не идентична. На рис. 1 представлена стандартная компоновка камеры сгорания и горелки.

Периферийная часть горелки направлена в камеру сгорания и подвержена воздействию горячих газов и тепловому излучению от пламени, что вызывает температурные напряжения и окисление поверхности этой части горелки. Основная часть горелки защищена от данных воздействий корпусом камеры сгорания и в целом подвержена меньшим тепловым и механическим нагрузкам. В процессе ремонта изношенная часть горелки удаляется. До настоящего времени данная операция выполнялась традиционным способом: отрезалась старая изношенная часть и приваривалась новая. В этой области компанией Siemens накоплен огромный опыт: за последние десять лет был проведен ремонт более 3000 горелок.

С целью упрощения процедуры ремонта и сокращения его продолжительности была разработана технология ремонта горелок методом аддитивного наращивания. Однако для внедрения этой передовой и недостаточно освоенной технологии необходимо предпринять ряд шагов, чтобы обеспечить механическую прочность отремонтированной конструкции, продлить срок ее службы и сохранить высокие эксплуатационные параметры газовой турбины.



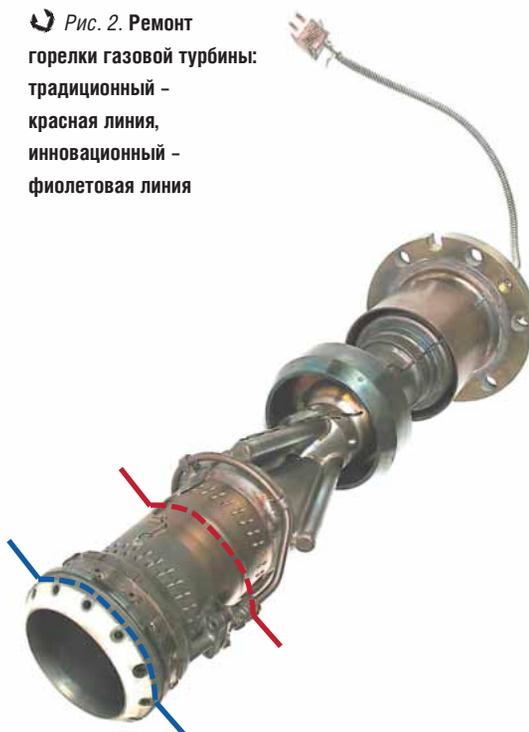
Фото 1. Типичные повреждения периферийной части:
а) отложение нагара;
б) растрескивание направляющего отверстия;
в) коррозия отверстия

Типичные повреждения горелок и объем работ при ремонте

Периферийные части горелок газовых турбин SGT-800 и SGT-700 изготовлены из жаропрочного материала Hastelloy X с термобарьерным покрытием (ТВС), остальные части горелок изготовлены из нержавеющей стали. В процессе эксплуатации горелки подвержены растрескиванию в связи с малоцикловой усталостью, а также образованию трещин, исходящих от направляющих отверстий для подачи пилотного газа.

В ряде случаев направляющие отверстия могут забиваться примесями, содержащимися в топливном газе, что вызывает смещение

Рис. 2. Ремонт горелки газовой турбины: традиционный – красная линия, инновационный – фиолетовая линия



Условные обозначения:
АН – аддитивное наращивание
САД – система компьютерного проектирования
САЕ – система компьютерного моделирования
FPI – контроль люминесцентными частицами
ТВС – термобарьерные покрытия
LCF – малоцикловая усталость
SLM – селективное лазерное сплавление, или DMLS – прямое лазерное спекание металлов как один из видов АН или ALM – послойное аддитивное наращивание
MES – автоматизированная система управления производственными процессами
PMI – стилоскопирование (подтверждающий анализ химического состава сплавов)
EBM – электронно-лучевая плавка
XRF – рентгеновская флуоресценция
ЛОМ – светоптическая микроскопия
SEM – сканирующая электронная микроскопия
EDS – энерго-дисперсионная спектроскопия
NDT – неразрушающий контроль

факела пламени к горелке и в результате приводит к прогару и окислению горелки. Типичные повреждения периферийной части показаны на *фото 1*.

При проведении ремонта горелок газовых турбин SGT-700 и SGT-800 с использованием технологии аддитивного наращивания объем работ включает:

- приемку в ремонт и дефектацию;
- удаление поврежденной части горелки;
- аддитивное наращивание новой периферийной части горелки с учетом последних стандартов;
- механическую обработку внешнего контура для придания окончательной формы;
- нанесение термобарьерного покрытия;
- завершающий контроль, проверку и регулирование расхода топлива через горелку.

Процесс технологии АН и внедрение ее в серийное производство

Для проведения ремонта горелки с использованием инновационной технологии аддитивного наращивания на базе селективного лазерного сплавления (SLM) было разработано специальное оборудование. На *рис. 2* показан традиционный и инновационный процесс ремонта горелки. Традиционный ремонт предусматривает удаление периферийной части горелки (около 120 мм).

Для ремонта горелок с использованием технологии аддитивного наращивания были разработаны дополнительные процессы/технологии, включающие: а) контроль качества изделия; б) хранение и обработку порошка, а также его повторное использование; в) контроль и квалификацию технологических процессов и материалов; г) расчет механической прочности изделия. Схема производственного процесса представлена на *рис. 3*.

Для ремонта горелки была выбрана установка M280 DMLS компании EOS (Германия), поскольку на первых этапах проекта только эта компания смогла предложить оборудование с требуемыми параметрами лазера для применяемого сплава Hastelloy X.

На начальных этапах разработки новой технологии ремонта специалисты компании Siemens столкнулись с отсутствием на рынке необходимого оборудования. И эту задачу необходимо было решить в короткий срок. Ряд возникших проблем был связан с переводом технологии АН в серийное производство.

Во-первых, на этапе технической проработки технологии АН для ремонта горелки существующие SLM-установки не могли определять положение деталей в установке с достаточной точностью. До этого момента такие установки использовались только для быстрого изготовления прототипов. В данной статье представлено техническое решение ремонта горелок.

Позиционирование САД-модели, которая должна быть наращена в требуемом месте на поверхности горелки, в настоящее время осуществляется с помощью специальной системы видеокамер, направленных вниз на поверхность горелки под небольшим углом к вертикальной оси лазерного луча. Для того чтобы во время 3D-печати изготавливаемая деталь оставалась круглой и не приобретала форму эллипса, данный угол математически компенсируется. Система видеокамер может отслеживать особенности основания горелки и выдавать предложения оператору по необходимому смещению осей x и y , а также по угловым координатам. Нужно учитывать, что для надежной работы системы камер большое значение имеет достаточная освещенность в рабочей камере, а также структура поверхности горелки.

Уже сегодня компоненты малых газовых турбин изготавливаются с применением технологии аддитивного наращивания

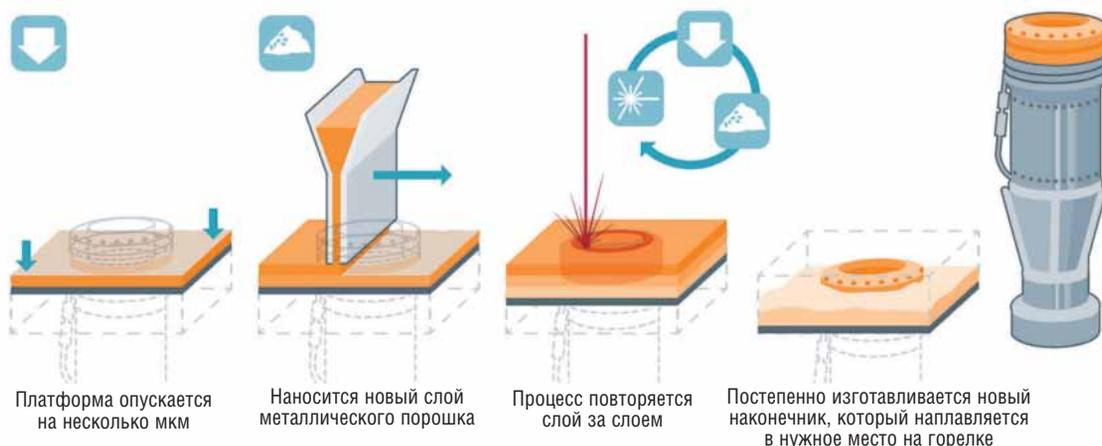


Рис. 3. Изготовление периферийной части с помощью технологии АН на корпусе горелки

Во-вторых, в настоящее время не существует установок SLM, в рабочую камеру которых можно поместить всю горелку (из-за ограничения высоты камеры). Низкоэмиссионные горелки первого и второго поколений имеют высоту около 720 мм.

Для возможности размещения горелки в рабочей камере установка M280 была реконструирована. Необходимо было разработать уникальную оснастку, чтобы обеспечить удобство оператору при загрузке/разгрузке горелки из установки. Проведенная реконструкция обеспечила более удобную работу с порошком, а также оптимальное распределение потоков газа в рабочей камере (рис. 4).

Третьей проблемой стало отсутствие полностью закрытой системы хранения и подачи порошка для данной машины, которая предусматривает просеивание порошка и возвращение неиспользованной части в резервуар рабочей камеры. Новая закрытая система хранения и подачи порошка обеспечивает восстановление использованного порошка с добавлением необходимого количества неиспользованного.

Для создания благоприятных условий для специалистов, находящихся в производственном помещении, на начальном этапе внедрения технологии АН в серийное производство была разработана программа контроля содержания частиц металлического порошка в воздухе. При замерах порошка использовалось различное оборудование – Lighthouse Handheld 3016 IAQ и Aerasense NanoTracer. Предварительные исследования показали, что содержание частиц порошка в воздухе быстро снижается с увеличением расстояния от установки, а также с течением времени с момента закрытия рабочей камеры. Чтобы исключить попадание частиц порошка в организм, оператору не рекомендуется подходить к установке на расстояние менее двух метров в течение 5 минут после того, как была закрыта дверца рабочей камеры. В границах данной зоны и в течение указанного времени необходимо использовать средства индивидуальной защиты.

Для гарантии того, что при аддитивном наращивании используются только подтвержденные порошковые материалы, были разработаны требования по контролю химического состава материала сплавов (PMI). Для проведения анализа используется портативный рентгеновский флуоресцентный блок Niton Analyzer Gold+ XL3t компании Thermo Scientific. Анализ проводится на поверхности отремонтированной части горелки после полного завершения процесса ремонта.

Конструкция специально разработанных приспособлений для ремонта горелки с исполь-

зованием аддитивного наращивания не позволяет одновременно печатать контрольные образцы, что возможно при использовании установок АН со стандартной платформой. Тем не менее, была разработана процедура для выборочного тестирования продукции.

Одна из характеристик процесса ремонта с использованием технологии АН, по которой показатели были низкими, это нестабильность процесса в начале цикла. Решение было найдено путем проведения замеров поверхностной температуры подложки (горелки). При этом использовались программы компьютерного моделирования процессов (CAE).

В соответствии с конструкцией установки предварительный подогрев подложки не применялся. В стандартных установках оптимальная температура предварительного подогрева составляет 80...100 °С. Отсутствие подогрева вызывает нестабильность процесса, что особенно заметно в начале проведения ремонта, до того момента, когда температура основания станет стабильной. Решением в данном случае является применение регулируемого подогрева в основном канале подачи газа горелки, предварительный подогрев и поддержание температуры передней части горелки на уровне более 140 °С в течение всего процесса.

Потенциал технологии АН может быть полностью реализован только в том случае, если изменения в конструкцию продукта или в процессы ремонта будут внесены быстро и с высокой степенью надежности. В частности, правильная геометрия изделия и значения параметров процесса должны быть заложены в систему управления установкой. Это означает, что должно обрабатываться большое количество различных унифицированных файлов заданий в формате .jz-. Основной вопрос в данном случае (который был и остается): как идея конструктора может быть согласована с возможностями и оборудованием SLM при постоянном контроле качества.

Данный вопрос включает, в частности, и изменения, внесенные в последний момент. Решением проблемы стала разработка и внедрение автоматизированной системы управления производственными процессами (MES). Причем данная система должна быть реализована на базе последних стандартов архитектуры системы программного обеспечения Simatic IT «Unified Architecture (UA)» компании Siemens (рис. 5).

На начальных этапах работ сравнительно небольшое количество инженеров, техников и операторов было привлечено к разработке процессов ремонта на базе технологии АН. В то время было достаточно просто организовать

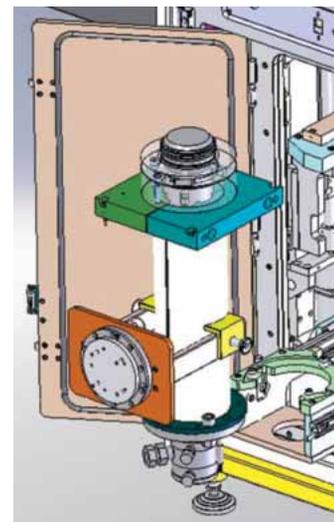


Рис. 4. Конструкция установки АН с новой конфигурацией осей z и модернизированной рабочей камерой



Рис. 5. Архитектура системы MES и ее аппаратная часть, специально адаптированная для процессов ремонта с использованием технологии АН

работу оптимальным образом на основании приобретаемого опыта – сегодня при внедрении технологии в серийное производство привлекается все большее количество специалистов. В связи с этим принято решение о разработке пошагового цифрового руководства для оператора на базе планшета.

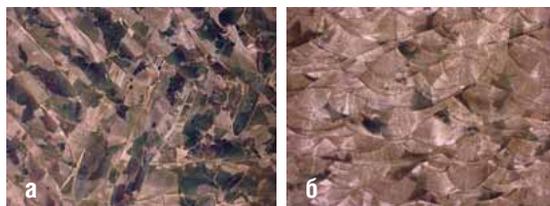
Свойства материалов и контроль их качества

Микроструктура материалов, производимых на лазерной порошковой установке и производимых путем отливки или горячей прокатки с мелкозернистой микроструктурой, содержащей удлиненные зёрна, существенно отличается. Литой материал Hastelloy X стандартно содержит зёрна размером несколько мкм. При отливке зёрна материала не обязательно имеют одинаковую форму, но заметно удлинены. При горячей прокатке они рекристаллизуются в процессе термомеханической обработки, и если процесс деформирования в горячем состоянии осуществляется правильно, то равноосные зёрна имеют размер 200...400 мкм.

Материал, полученный с использованием технологии АН, имеет очень мелкозернистую структуру, с включением столбчатых зерен как и при отливке (фото 2). Разница заключается в том, что столбчатые зёрна в материале, изготовленном путем лазерного плавления в зара-

Фото 2.

Микроструктура материала Hastelloy X, изготовленного путем лазерного плавления в заранее сформированном слое: а) разрез вдоль платформы основания; б) разрез в направлении наращивания



нее сформированном слое, точно ориентированы в направлении наращивания. Это объясняется тем, что процесс охлаждения материала идет только в одном направлении к подложке, которая является теплопоглощающим объектом.

В литературе обычно предполагается, что материалы АН предназначены для высокотемпературной обработки. Более того, часто предлагаются для горячего изостатического прессования (HIP), с тем чтобы снизить или полностью устранить пористость и/или трещины. В данном проекте материал не подвергался тепловой обработке.

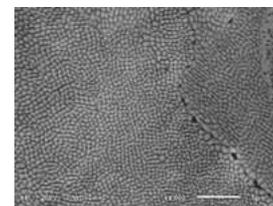
На фото 3 показана стандартная микроструктура материала, полученного с применением технологии АН (лазерного плавления в заранее сформированном слое), при сильном увеличении. Данная специфическая микроструктура существенно повлияла на механическую прочность материала: она значительно выше, чем у материалов, изготовленных традиционными способами. Усталостные характеристики также превышают данные показатели литых материалов. Механические свойства материала определяются как ортотропные, с изотропными свойствами в любом направлении вдоль платформы основания и анизотропическими свойствами в направлении наращивания.

На рис. 6 показан предел текучести материала в зависимости от температуры, а на рис. 7 – предел прочности на растяжение. Параметры ползучести материала при повышении температуры даны на рис. 8.

Очевидно, что мелкозернистая микроструктура дает преимущество по прочности материала в соответствии с законом Холла–Петча. Снижение предела ползучести у материалов АН также можно объяснить с точки зрения микроструктуры, поскольку достаточные границы зерен способствуют процессу ползучести Кобла.

Ремонт периферийной части с использованием технологии АН производится путем наращивания материала Hastelloy X на основную часть, изготовленную из нержавеющей стали. Поскольку наращивание является в целом процессом сварки двух разнородных материалов, необходим контроль микроструктуры стыковочного слоя, а также соответствующих свойств материала. Микроструктурные исследования целостности и прочности материала

Фото 3. Микроструктура материала Hastelloy X, изготовленного с применением технологии АН, при сильном увеличении



(пористость и растрескивание) проводятся на полированном поперечном срезе горелки.

Показано, что стыковочный слой является однородным, без трещин или пористости, если базовый материал чистый (без примесей), без больших вкраплений или отложений. Типичная микроструктура стыковочного слоя показана на *фото 4*, где четко видна переходная зона от нержавеющей стали к суперсплаву. Ширина зоны – 150 мкм, на ней отсутствуют трещины или аномальная пористость.

В сталях всегда содержится определенное количество марганца для минимизации негативного влияния серы на пластичность материала. Добавление в состав марганца приводит к образованию его сульфида. Такие вкрапления, обычно размером 100 мкм, влияют на качество процесса наращивания, если они присутствуют в слое переплавленного базового материала, смежном со стыковочным слоем, который содержит сталь или материалы на основе никеля. Образующиеся в результате дефекты показаны на *фото 5*. Такой тип дефекта не оказывает негативного влияния в силу комбинации таких факторов, как температура, механические нагрузки и форма дефекта. Это было подтверждено результатами анализа отремонтированных горелок после 20 000 часов эксплуатации.

Свойства материала стыковочного слоя были определены по результатам испытаний на растяжение и ресурсных испытаний. Испытание на ползучесть материала стыковочного слоя не проводилось, так как температура переноса материала значительно ниже температуры, которая вызывает его ползучесть. Для механических испытаний использовались гибридные тестовые образцы, которые содержали и базовый материал (сталь), и суперсплав. Стыковочная зона располагалась по центру всей длины испытываемой части для проведения испытаний на растяжение и ресурс. Стандартное размещение усталостной зоны после данных испытаний показано на *фото 6*.

Результаты испытаний на растяжение и на малоцикловую усталость показали, что наиболее слабым звеном является базовый материал (сталь). Разрушение при растяжении обычно происходило на расстоянии 8...12 мм от стыковочной зоны в базовом материале. Соответственно, сама стыковочная зона не создавала каких-либо проблем, за исключением некоторых дефектов в базовом материале.

Контроль рабочих параметров горелки после ремонта

Кроме контроля свойств материала был проведен ряд функциональных тестов для подтвер-

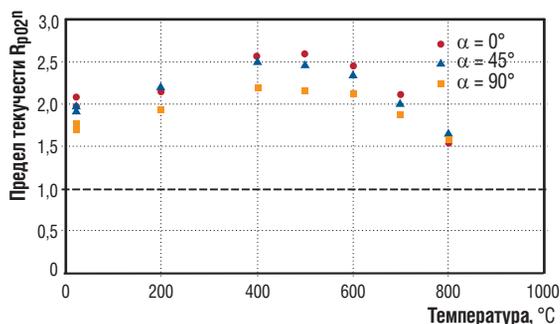


Рис. 6. Предел текучести материала в зависимости от температуры

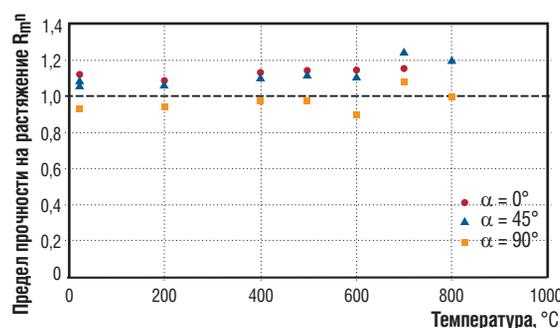


Рис. 7. Предел прочности материала на растяжение в зависимости от температуры

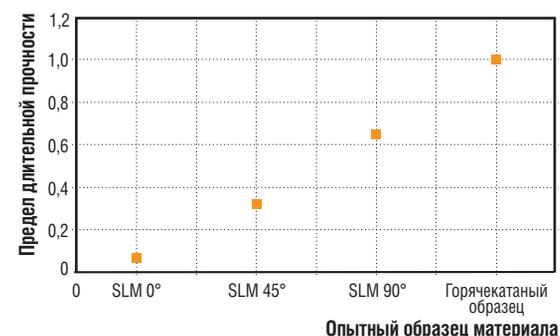


Рис. 8. Предел длительной прочности материала

ждения того, что рабочие параметры горелки находятся на ожидаемом уровне во всем рабочем диапазоне. Надежная работа горелки является важнейшим условием, поэтому проводились различные испытания на лабораторных испытательных стендах, а также в составе двигателя.

Первые испытания проводились в лаборатории компании Siemens в г. Финспонге. Внутренние каналы горелки, в связи с особенностями процесса АН, имеют немного более шероховатую поверхность по сравнению с оригинальными горелками, изготовленными традиционными способами. В связи с этим главной задачей испытаний было определение раз-



Фото 4. Светооптический микрофото-снимок пограничной зоны наконечника горелки

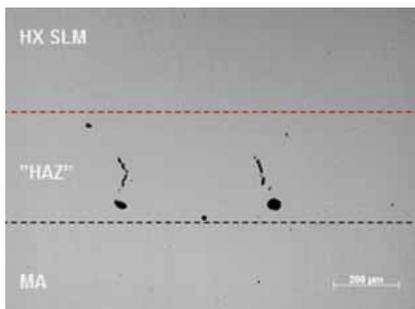


Фото 5. Дефекты в базовом материале, смежном с пограничным слоем, образовавшиеся в связи с переплавкой сульфида марганца



Фото 6. Испытание пограничной зоны между материалом SLM и базовым материалом: испытываемые образцы с образованием трещин



Рис. 9. Сечение потока для отверстий, выполненных механической обработкой и спеканием материала, почти полностью идентично

меров отверстий, чтобы расход подаваемого пилотного газа не снижался по сравнению с оригинальными горелками (рис. 9).

После того как были определены необходимые размеры отверстий, была изготовлена комплектная горелка для проведения испытаний на стенде с целью контроля формы факела и расстояния от наконечника горелки.

Еще одной важной задачей было определение коэффициента теплопередачи шероховатых поверхностей внутренних каналов горелки, так как он существенно влияет на температуру материала горелки при пуске и останове. Как указано ранее, горелка подвержена мало-

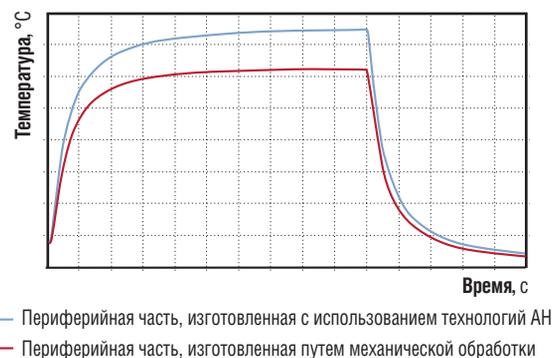


Рис. 10. Результаты испытаний процессов теплообмена в периферийной части горелки

цикловой усталости, главной причиной чему являются напряжения, возникающие при ее неравномерном нагреве. Поверхность горелки нагревается горячими газами и тепловым излучением от факела, а внутренние каналы охлаждаются топливовоздушной смесью. Чтобы рассчитать циклическую долговечность горелки, важно было определить граничные условия в данной зоне. Результаты испытаний процессов теплообмена показаны на рис. 10.

Испытания в составе двигателя и контроль состояния горелок

После всех успешных функциональных и эксплуатационных испытаний (включая валидационные на испытательном стенде и в составе двигателя) проводились длительные испытания в реальных условиях эксплуатации. Несколько комплектов горелок было отремонтировано с использованием технологии SLM и установлено на двигатели, находящиеся в коммерческой эксплуатации. Детальный план валидационных испытаний включал:

- постоянный мониторинг рабочих параметров двигателей с использованием системы дистанционного мониторинга компании Siemens (Siemens Remote Monitoring System);
- неразрушающий контроль всех горелок в течение плановой инспекции оборудования (уровень А) после 10 000 эквивалентных часов эксплуатации;
- контроль с разрушением нескольких горелок с разных двигателей в лаборатории компании Siemens для более детального анализа и изучения. Отобранные для разрушающего контроля горелки были заменены другими при инспекции оборудования (уровень А).

К моменту написания данной статьи первые комплекты горелок имели безотказную наработку более 25 000 эквивалентных часов.

Для проведения дальнейшего детального исследования несколько комплектов горелок направили в лабораторию компании Siemens.



Фото 7. Зона периферийной части горелки, исследуемая методом неразрушающего контроля

Здесь все полученные горелки были подвержены неразрушающему, а часть из них – и разрушающему контролю и изучению. На первом этапе проведены испытания с использованием ультразвукового метода (иммерсионный метод ультразвукового контроля) и проникающим методом (рентгеновская флуоресценция). Исследуемые зоны периферийной части горелки показаны на фото 7.

Результаты исследований

Результаты неразрушающих и разрушающих испытаний показали, что все горелки находились в технически исправном состоянии. Были сделаны следующие выводы:

- Испытания методом проникающего красителя не выявили каких-либо дефектов на поверхности наконечника;
- Появление индикаторных знаков ультразвукового исследования стало результатом образования трещин в базовом материале (ниже наращиваемой части). Данные трещины были обнаружены в базовом материале уже после окончания процесса ремонта (до установки на двигатель) и не увеличились в процессе эксплуатации;
- Уровни пористости и вкраплений были низкими во всех горелках и признаны удовлетворительными. Отмеченный средний уровень пористости составил менее 0,9 %;
- Анализ скоплений вкраплений, выявленных в базовом материале методом энергодисперсионной спектроскопии, свидетельствует о присутствии серы в данной зоне;
- Коррозия наблюдается в некоторых зонах на глубину до 50 мкм, а также незначительная поверхностная коррозия;
- Термобарьерные покрытия находятся в удовлетворительном состоянии;
- Твердость базового материала увеличилась на 100 HV (по Виккерсу). Для сплавов Hastelloy X изменения в твердости материала являются обычными.

Таким образом, мы видим пример успешного внедрения передовой технологии ремонта горелок КС газовых турбин с использованием процесса аддитивного наращивания. Это позволило не только упростить сам ремонт, но также очень существенно сократить сроки его проведения. Мы ожидаем, что по мере совершенствования SLM-оборудования и с появлением новых порошковых материалов будет расширяться номенклатура изделий, которые можно будет ремонтировать (восстанавливать) с использованием данной технологии. **Д**



Siemens представила на рынок новую авиапроизводную газовую турбину мощностью 38 МВт.

На базе научно-технического потенциала, полученного после приобретения бизнеса компаний Dresser-Rand и Rolls-Royce Energy, Siemens разработала новую газовую турбину SGT-A35 RB. Основным сегментом применения новой ГТУ станут морские нефтегазовые платформы, плавучие системы нефтедобычи, хранения и выгрузки.

SGT-A35 RB имеет компактные размеры и сравнительно малый вес, что является одним из наиболее важных требований для оборудования на морских платформах. Мощность ГТУ составляет 38 МВт. Она установлена в компактный пэкидж, разработанный специалистами компании Dresser-Rand, – его массогабаритные показатели на 30 % меньше, чем у пэкиджа ГТУ Industrial RB211.

При разработке SGT-A35 RB использовались технологии и компоненты газовых турбин Industrial RB211-GT30 и Industrial Trent 60, которые проверены и отработаны в ходе 37 млн часов эксплуатации на более чем 800 объектах. Новая ГТУ доступна в двух модификациях – мощностью 34 МВт и 38 МВт. Она может использоваться как в качестве механического привода, так и для выработки электроэнергии. В данной конфигурации газовая турбина может обеспечивать привод двухполюсного электрогенератора переменного тока без использования редуктора.

Термический КПД SGT-A35 RB составляет более 40 % (ISO). Газовая турбина идеально подходит для эксплуатации в регионах с жарким климатом, поскольку даже в таких условиях она сохраняет до 90 % своей мощности. Модульная конструкция позволяет быстро монтировать ГТУ на площадке, а также максимально сократить время простоев при аварийных ситуациях. Пэкидж обеспечивает возможность удобного и быстрого демонтажа всей ГТУ или силовой турбины для замены или ремонта.

