

УДК 621.793.7

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПО РЕМОНТУ, ВОССТАНОВЛЕНИЮ И УПРОЧНЕНИЮ ДЕТАЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

© 2011 И.А. Докукина, В.А. Барвинок, В.И. Богданович, В.И. Фролов, Е.К. Савич

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 12.05.2011

В работе представлены результаты применения плазменной технологии для восстановления при ремонте и упрочнения деталей энергетических агрегатов. Показано, что нанесение плазменных покрытий на лопатки высоконагруженных ступеней ротора паровых турбин ТЭЦ показано лучшие защитные свойства по сравнению со стеллитовыми пластинами.

Ключевые слова: плазменная технология, ремонт, лопатка.

Энергетические агрегаты большинства ТЭЦ в настоящее время близки к исчерпанию ресурса, требуют замены или дорогостоящего ремонта. Эксплуатация таких станций может приводить к возникновению техногенных катастроф, серьезных социальных и экономических последствий для регионов России.

Основная причина исчерпания ресурса заключается в эрозионном и контактном износе передних кромок лопаток турбины, опорных поверхностей валов, деталей запорной арматуры и других поверхностей, находящихся под воздействием высокоскоростного потока, высоких скоростей вращения (более 3000 об/мин) и нагрузок. Резкое увеличение интенсивности изнашивания деталей паровых турбин, наблюдаемое в последние годы при плановых ремонтах агрегатов, во многом связано с изменением режимов эксплуатации ТЭЦ.

Существующий метод восстановления ресурса заключается в замене деталей, выработавших свой ресурс на новые, что требует больших экономических затрат, обусловленных стоимо-

стью заменяемых деталей, больших объемов работ, связанных с разборкой и транспортировкой агрегатов. Это приводит также к большим экономическим потерям из-за простоя оборудования в течение длительных сроков ремонта и ведет к определенной социальной напряженности.

Сотрудниками НИИ Технологий и проблем качества Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева установлена возможность восстановления деталей таких агрегатов и существенного повышения их ресурса методом плазменного напыления [1, 2, 3]. При этом процесс восстановления рабочих размеров лопаток, валов, запорной аппаратуры и других деталей и упрочнение их поверхностей может проводиться прямо на ТЭЦ, а в большинстве случаев и без полного демонтажа агрегата.

Нанесение плазменных газотермических покрытий проводится на установках типа УПУ с существенными конструктивными доработками. Нами разработаны новые агрегаты установки улучшенной конструкции (дозаторы, плазмотроны и манипуляторы, защищенные патентами) позволяющие наносить покрытия на детали сложной формы (в том числе на внутренние поверхности) с использованием компьютерной системы управления процессом напыления [3, 4, 5].

Для упрочнения и восстановления деталей различного оборудования на месте эксплуатации путем нанесения покрытия толщиной до 1 мм из порошков металлов, карбидов, оксидов и их соединений нами разработана мобильная малогабаритная установка и технология плазменного напыления (рис. 1).

Установка укомплектована сменными плазмотронами, дозаторами, манипуляторами собственной конструкции и позволяет проводить напыление равномерного покрытия на поверх-

Докукина Ирина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. Богданович Валерий Иосифович, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: bogdanovich@ssau.ru

Барвинок Виталий Алексеевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: barvinok@ssau.ru. Фролов Василий Иванович, аспирант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

Савич Екатерина Константиновна, аспирант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.



Рис. 1. Мобильная малогабаритная установка плазменного газотермического напыления

ности сложной формы (лопатки), в том числе без демонтажа и разборки энергетических турбин и других агрегатов.

Применение установки обеспечивает: увеличение долговечности наиболее напряженных деталей энергоустановок в 2-3 раза; снижение затрат на ремонт деталей и агрегатов энергоустановок в десятки раз; снижение простоев энергооборудования в связи с ремонтом и отказами в десятки раз; существенное снижение вероятности отказов и аварий оборудования.

Так например, с помощью мобильного плазменного оборудования проведено восстановление ротора электродвигателя насоса мощность 2 МВт на Безымянской ТЭЦ (г. Самара) (рис. 2), ресурс эксплуатации которого к настоящему времени составляет десятки тысяч часов.

В статье члена-корреспондента РАН Барвинка В.А. в настоящем сборнике трудов приведены и некоторые другие примеры промышленного применения этой технологии, в частности на лопатках ротора и статора газотурбинной уста-

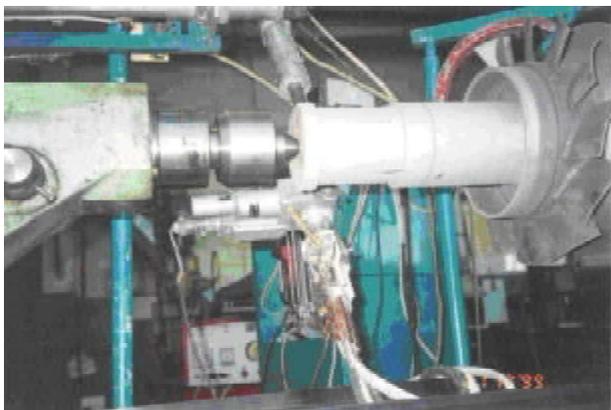


Рис. 2. Восстановление ротора электродвигателя насоса мощность 2 МВт на Безымянской ТЭЦ (г. Самара) с помощью мобильного плазменного оборудования

новки для перекачки газа НК-36СТ и НК-38СТ, деталях горячего тракта привода электрогенератора, изготавливаемого ОАО «Металлист» с др.

В период капитального ремонта паровой турбины ПТ 60-130/13 ст. №7 Новокуйбышевской ТЭЦ-2 в ноябре 1994 года при ее наработке 186000 часов было установлено, что на 90 % лопаток 29 ступени ротора турбины полностью отсутствуют стеллитовые пластины, на 10 % лопаток стеллитовые пластины остались в виде отдельных фрагментов и на всех лопатках по месту отсутствия стеллитовых пластин имеются частичные эрозионные разрушения входной кромки. С целью уменьшения дальнейшего эрозионного износа входной кромки лопаток было принято решение об очистке поверхностей лопаток 29 ступени от остатков фрагментов стеллитовых пластин и напыления на входные кромки этих лопаток, находящихся в сборе в составе ротора турбины, двухслойного защитного покрытия плазменным газотермическим методом на мобильном оборудовании, разработанном в Самарском государственном аэрокосмическом университете на кафедре производства летательных аппаратов. Технология напыления и материал покрытий также разработан в ОНИЛ №7 (рис. 3).

В период следующего капитального ремонта турбины в июле 1999 года при ее наработке 218544 часа был проведен визуальный осмотр рабочих лопаток 29 ступени при вскрытой крышке цилиндра низкого давления. Осмотр показал, что плазменное покрытие в межремонтный период 32544 часа выполнило свои защитные функции поверхности материала основы лопаток, то есть эрозии поверхности материала основы ло-



Рис. 3. Восстановление рабочих лопаток 29 ступени ротора паровой турбины на ТЭЦ (г. Новокуйбышевск) плазменным напылением на мобильной установке. Восстановление проводится на лопатках ротора без разборки турбины при вскрытой крышке цилиндра низкого давления

патов не было обнаружено, а износ проходил по покрытию. При этом внешний защитный слой покрытия был сработан во всех местах кроме «спинки» лопаток, а первый защитный слой был сработан не полностью. Поверхность сохранившегося слоя на лопатках была гладкой, без следов, характерных для эрозионного износа материала основы. В связи с этим лопатки 29 ступени были оставлены в составе турбины для их эксплуатации до следующего капитального ремонта.

В результате осмотра проведенного в мае 2004 г. при наработке турбины 280686 час выявлено, что поверхность лопаток по месту нанесения покрытия по-прежнему являются гладкой без следов, характерных для эрозионного износа материала основы. На «спинке» лопаток по-прежнему остались сохраненными участки внешнего слоя защитного покрытия. То есть эти поверхности имеют внешний вид такой же или близкий к тому, который был при осмотре на предыдущем капитальном ремонте (рис. 4, 5). Для сравнения на рис. 6 приведены следы эрозии и механических разрушений лопатки 27 ступени, работавшей без покрытия в условиях менее жестких, чем лопатки 29 ступени, а на рис. 7 – эрозия стеллитовых пластин лопаток 30 ступени после наработки 29598 часов, то есть в два раза меньшей, чем у лопаток 29 ступени.

Таким образом плазменное покрытие на лопатках 29 ступени турбины ПТ 60-130/13 ст. №7 НК ТЭЦ-2 выполнило свои защитные функции материала основы лопаток от эрозии входной кромки в зоне фазового перехода и воздействия двухфазного высокоскоростного парогазового потока в период наработки 62142 часа (срок службы 10 лет). При этом лопатки предыдущих ступеней (28 и 27) без покрытия имеют более существенный эрозионный износ по входной кромке, который отсутствует на лопатках 29 ступени. Покрытие также показало лучшие защитные свойства по сравнению со стеллитовыми пластинами.

Необходимо отметить, что полученные результаты по защите лопаток паровых турбин



Рис. 4. Общий вид лопаток 29 ступени с покрытием после 62142 часов наработки

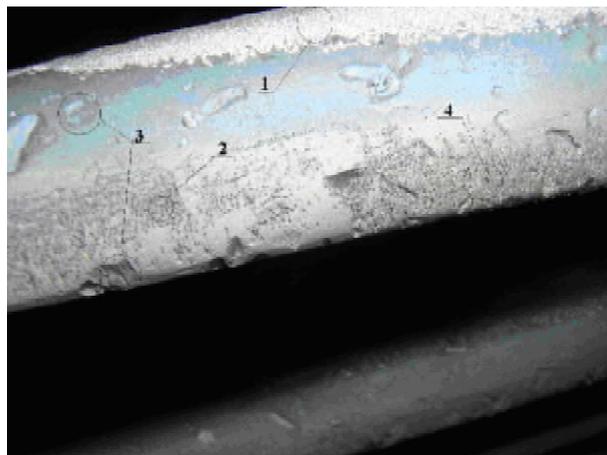


Рис. 5. Вид лопатки 29 ступени с покрытием со стороны «спинки» и входной кромки лопатки при после 62142 часов наработки: 1 – фрагмент двухслойного покрытия, 2 – фрагменты остатков внутреннего слоя покрытия, 3 – следы механических повреждений поверхности, 4 – следы начала эрозионных разрушений основы лопатки

плазменными покрытиями и накопленных положительных опыт их эксплуатации в течении более 10 лет (ресурс более 62000 часов) являются пионерскими и не имеют аналогов в мировой практике машиностроения паровых турбин.

Полученные результаты позволяют не только перейти к нанесению плазменных покрытий на лопатки других ступеней ротора (в настоящее время на ТЭЦ-2 Новокуйбышевска организована и проводится работа по напылению покрытий на лопатки 30 ступени и восстановлению покрытия на лопатках 29 ступени), но и предложить существенно более экономически эффективных режим эксплуатации лопаток ротора паровой турбины – по фактическому состоянию. При таком режиме эксплуатации на очередном плано-



Рис. 6. Общий вид повреждений и эрозии лопаток 27 ступени, которые эксплуатировались без покрытия

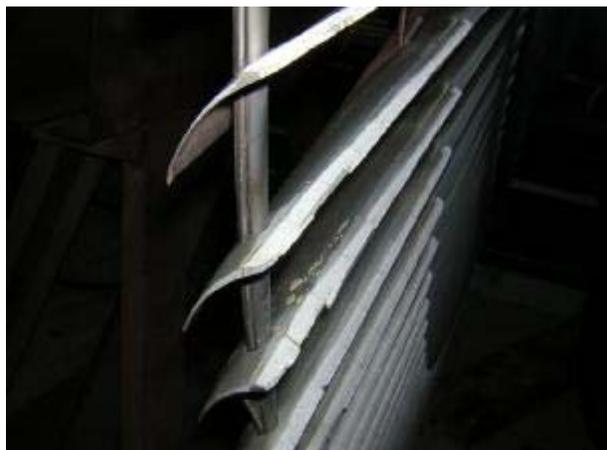


Рис. 7. Общий вид повреждений и эрозии лопаток 30 ступени, на которой использована защита в виде стеллитовых пластин

вом ремонте турбины проводится упрочнение лопаток плазменным покрытием без разборки ротора турбины. Стоимость таких работ не превышает 10 % стоимости нового комплекта лопаток напыляемой ступени ротора. На очередном плановом ремонте проводится дефектация состояния поверхности покрытия лопаток и принимается решение либо о продолжении их эксплуатации либо восстановлению покрытия. Главным элементом применения эксплуатации по фактическому состоянию является отсутствие существенных повреждений материала основы детали перед нанесением покрытий, так как эти повреждения являются концентраторами для развития усталостных разрушений материала основы лопаток и требуют дорогостоящей их замены на новые. Оценка такого режима эксплуатации по фактически полученным экспериментальным результатам позволяют прогнозировать повышение ресурса наиболее изнашиваемых лопаток 29 и 30 ступеней не менее чем в 3 раза.

Подтверждением этого являются результаты осмотра 29 и 30 ступеней ПТ 60-130/13 ст. № 7 Новокуйбышевской ТЭЦ-2 при плановом ремонте в 2009 году. Все лопатки сохранили пригодность для дальнейшей эксплуатации. На поверхности входных кромок сохранились следы нанесенного покрытия, которое было восстановлено с использованием плазменного метода.

Авторы настоящей статьи в течение более 20 лет на практических работах доказывают необходимость именно такого режима применения плазменных покрытий на ремонтируемых (восстанавливаемых) изделиях.

Действительно, задача покрытия защитить материал основы дорогостоящих деталей изделий от изменения геометрии за счет износа или разрушения из-за развития глубоких повреждений в материале основы. При этом ставить зада-

чу о поиске “абсолютно” стойкого материала покрытия не рационально, экономически не оправдано, а технически скорее всего невозможно. Задача покрытия обеспечить защиту материала основы на определенный межремонтный период изделия при допустимом износе самого покрытия, а задача технологии нанесения такого покрытия – обеспечить его восстановление при отсутствии существенных термических влияний на материал основы (которые, например, возникают при наплавке, пайке, сварке и т.д.) и стоимости работ, существенно более низкой, чем стоимость замены изношенной детали на новую.

В приведенных результатах на лопатках ротора паровой турбины износ покрытия толщиной 0,3 мм произошел за наработку более 62000 часов (более 10 лет эксплуатации) без повреждения материала основы лопаток, что позволяет провести на этих лопатках восстановление покрытия и обеспечить следующие 62000 часов (не менее) наработки. При этом стоимость технологии плазменного напыления составила около 10% от стоимости новой детали без учета стоимости необходимой для демонтажа, последующей сборки и балансировки ротора при установке нового комплекта лопаток. При этом надо отметить, что в данном случае первое нанесение покрытий было проведено на лопатках 29 ступени ротора, которые были в эксплуатации и уже имели повреждения материала основы и вопрос стоял о том, что на следующем капитальном ремонте (через примерно 30000 часов наработки) их необходимо заменять на новые. То есть, чисто технический эффект повышения ресурса данного комплекта лопаток на этом этапе составляет 2 раза. При этом стоимость часа эксплуатации лопаток с покрытием, по сравнению со стоимостью часа эксплуатации лопаток без покрытия с учетом из замены уменьшена в 2,2 раза. Для примера, после трехкратного такого восстановления ресурса этих лопаток нанесением покрытия стоимость часа их эксплуатации будет уменьшена более чем в 7 раз.

Такое существенное снижение стоимости эксплуатации паровых турбин должно представлять большой интерес, как для эксплуатирующей организации, так и производителя, заинтересованного в повышении конкурентоспособности продукции.

В связи с этим в настоящее время авторы данной работы проводят активные консультации с разработчиками и изготовителями лопаток паровых турбин с целью введения технологии плазменного напыления на вновь изготавливаемые лопатки и директивного введения предложенного режима из эксплуатации по фактическому состоянию.

Данная работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
2. Барвинок В.А., Богданович В.И., Докукина И.А., Плотников А.Н. Математическое моделирование и физика процессов нанесения плазменных покрытий из композиционных плакированных порошков. М.: Международный центр научной и технической информации, 1998. 96 с.
3. Барвинок В.А. Плазма в технологии, надежность, ресурс. М.: Наука и технологии, 2005. 452 с.
4. Барвинок В.А. Термомеханика формирования напряжений и тепловых полей в телах с изменяемой геометрией. М.: Наука и технологии, 2007. 316 с.
5. Богданович В.И., Барвинок В.А., Лисянский А.С., Маринин С.Д., Докукина И.А., Ивашин А.С., Ананьева Е.А., Симин О.Н. Восстановление работоспособности и повышение ресурса лопаток паровых турбин / Материалы 6-ой международной практической конференции «Технология ремонта, восстановления, упрочнения, обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций» СПб, 2006. Ч.1. С.120-127.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF PLASMA SPRAYING REPAIR, RENEWAL AND WORK-HARDENING OF DETAILS OF POWER AGGREGATES

© 2011 I.A. Dokukina, V.A. Barvinok, V.I. Bogdanovich, V.I. Frolov, E.K. Savich

Samara State Aerospace University

The paper presents the results of the application of plasma technology to recover the repair and hardening of the energy units. It is shown that the deposition of plasma coatings on the blades heavily stages of the rotor of steam turbine of TEC showed the best protective properties as compared with stellite plates.

Key words: plasma technology, maintenance, paddle

Irina Dokukina, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.

Valery Bogdanovich, Doctor of Technics, Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department. E-mail: bogdanovich@ssau.ru.

Vitaly Barvinok, Corresponding Member of RAS, Doctor of Technics, Professor, Head at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department. E-mail: barvinok@ssau.ru.

Vasily Frolov, Graduate Student at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.

Ekaterina Savich, Graduate Student at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.