

Тополянский П.А. Повышение эрозионной стойкости входных кромок лопаток ступеней низкого давления паровых турбин (обзор) // Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. Материалы 4-й Всероссийской практической конференции 16-18 апреля 2002 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГТУ. 2002. - С. 30-49

ПОВЫШЕНИЕ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ВХОДНЫХ КРОМОК ЛОПАТОК СТУПЕНЕЙ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН (ОБЗОР)

ТОПОЛЯНСКИЙ П.А.

НПФ «Плазмацентр», Санкт-Петербург, Россия

Целью данного обзора является обоснование проведения исследований современных плазменных технологий (в том числе интегрированных) для использования их в качестве процессов упрочнения и восстановления лопаток ступеней низкого давления паровых турбин. К новым прогрессивным плазменным технологиям относятся:

- финишное плазменное упрочнение (ФПУ);
- плазменная закалка (ПЗ);
- плазменная модификация (ПМ);
- плазменно-порошковая сварка (ППС);
- плазменная наплавка-напыление (ПНН);
- плазменное напыление (ПН);
- интегрированные плазменные технологии (ПН+ФПУ, ПНН+ФПУ, ПНН+ПМ, ППС+ПНН+ФПУ, ПЗ+ФПУи др.).

Условия работы лопаток паровых турбин

- высокие резонансные колебания, при которых возникают большие напряжения от изгиба;
- подверженность действию высоких температур (в ступенях высокого давления);
- подверженность действию влажного пара, вызывающего эрозию (в ступенях низкого давления);
- коррозионные воздействия солей и кислот (при установке в зоне рабочего пара), а также кислорода просачивающегося вместе с паром в корпус турбины во время стоянки;
- возможность столкновения с солями и другими твёрдыми частицами, заключающимися в паре;
- возможность гидравлических ударов, а также задевания о неподвижные детали турбины при вращении;
- наличие значительных начальных растягивающих напряжений от предшествующих технологических операций изготовления.

Материалы, применяемые при изготовлении лопаток

- коррозионностойкие и жаростойкие стали ферритного класса 08X13;
- коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные стали мартенситно - ферритного класса 12X13;
- коррозионностойкие и жаропрочные стали мартенситного класса 20X13;
- жаропрочные стали мартенситно - ферритного класса 15X12ВНМФ;
- титановые сплавы ВТ5, ВТ6.

Механизмы эрозионного износа лопаток

Основной причиной эрозионного износа лопаток ступеней низкого давления паровых турбин являются кавитационные явления при ударно-капельном воздействии влажного пара на определённые зоны лопаток во время работы турбины.

Механизмы эрозионного износа основаны на возникновении и развитии микро- и макротрещин усталостного разрушения, которое характеризуется последовательным прохождением следующих стадий:

- первого периода, в течение которого происходит накопление дефектов кристаллической решетки, увеличение плотности дислокаций, повышение микротвердости и прочностных характеристик;
- второго периода, начинающегося после достижения критического значения плотности дислокаций и их взаимодействий, приводящих к образованию субмикротрещин и развитию грубых полос скольжения, заметно снижающих упругие, прочностные и пластические свойства;

Первые два этапа усталостного разрушения не имеют видимых следов уноса материала и носят название инкубационного периода износа лопаток.

- третьего периода, характеризующегося переходом субмикротрещин в микротрещины с последующим разрушением материала в целом, наступлением интенсивного равномерного разрушения с образованием каверн по всему поверхностному слою с высоким темпом потери массы;
- четвертого периода, при котором темп процесса эрозии снижается и стабилизируется, так как к этому времени

значительно меняется состояние поверхности, а также условия соударения с ней капель и растекания жидкости.

Вид поверхности лопаток в процессе эрозионного износа условно подразделяется:

- на слабый износ - отдельные точечные мелкократерные образования;
- умеренный износ - без изменения конфигурации лопатки;
- повышенный износ - наблюдаются заметные изменения контуров лопатки;
- сильный износ - форма и конфигурация лопаток изменяются значительно;
- очень сильный износ - степень разрушения, при которой опасно эксплуатировать турбину.

Существующие технологии защиты от эрозионного износа лопаток [1-13]

1. Напайка стеллитовых пластин

Напайка стеллитовых пластин установленных в паз со стороны выпуклой входной кромки осуществляется с зазором между пластинами, равным 1 мм, с использованием серебряного припоя ПСр45, с последующей зашлифовкой переходной зоны. Пластины изготавливаются методом прецизионного литья (размерами 2x12x33, 2x12x28, 2x10x24) из материала ВЗК (Co 60-65%, Cr 25-28%, W 4-5%, Si 2-2,5%, C 1-1,2%) с последующей шлифовкой. Твердость пластин составляет HV 480-500.

Основные недостатки данного метода:

- различие коэффициента линейного расширения напайной пластины и основного металла;
- изменения аэродинамической формы профиля;
- возможность отрыва целиковых пластин;
- возможный эрозионный износ поверхностей лопаток ниже стеллитовых напаяек и в промежуточных зонах между напайными пластинами;
- разброс твердости поверхностного слоя пластинок (различие может достигать HV 100);
- снижение усталостной прочности лопатки;
- невозможность использования стеллитовых пластин в турбинах для АЭС с одноконтурными схемами (в связи с опасностью появления радиоактивного изотопа кобальта), а также для лопаток из титановых сплавов (из-за значительных отличий физических свойств).

Данный метод используется на турбинах выпускаемых в АО «ЛМЗ» (Санкт-Петербург) и АО «ТМЗ» (Екатеринбург) более 40 лет, а также рядом зарубежных фирм.

Исследование эрозионной стойкости стеллитов показали, что она может различаться в 3-6 раз в зависимости от марки применяемого стеллита (например, эрозионная стойкость увеличивается с повышением содержания углерода и вольфрама), а также изменяется в зависимости от термообработки.

Имеется опыт соединения стеллитовых пластин методом диффузионной сварки, что значительно повышает прочностные характеристики соединения и исключает охрупчивание материала в области сварного шва.

2. Напайка пластин из твердого сплава

В качестве материала защитных пластин использовались сплавы Т15К6 (WC-79%, TiC-15%, Co-6%) и Т5К10 (WC-85%, TiC-5%, Co-10%), изготовленные методом порошковой металлургии. Эрозионные испытания, проведенные в АО «Турбоатом» показали повышение эрозионной стойкости пластин Т5К10 на 60% по сравнению со стеллитовыми пластинами. Износ поверхности пластин указанных сплавов происходил без образования развитого пилообразного рельефа поверхности. Повышение эрозионной стойкости объяснялось высокой твердостью входящих в состав сплава компонентов и технологическими особенностями их получения.

3. Электроискровые покрытия

Электроискровое нанесение твердосплавного покрытия (Т15К6) толщиной 0,2-0,35 мм. Обычно упрочнению подвергается входная кромка лопатки, как с выпуклой, так и с вогнутой стороны. Для предупреждения перегрева лопатки во время электроискрового упрочнения ее обдувают сжатым воздухом, направляя струю в зону разряда или с обратной стороны применяют медную водоохлаждаемую прокладку. После упрочнения зачищают поверхности металлической щеткой для снятия нагара. Контроль качества упрочнения производят визуально с использованием лупы с 6-10 - кратным увеличением. Пропуски устраняются повторной обработкой. Твердость упрочненной поверхности составляет HV 870-1020.

Основные недостатки:

- неоднородность, пятнистость слоя, отсутствие сплошности;
- неравномерность толщины;
- уменьшение параметров шероховатости поверхности;

- снижение усталостной прочности лопатки;
- получение растягивающихся остаточных напряжений в упрочненном слое;
- низкая производительность процесса;
- экологические недостатки, вследствие использования ручного вибропистолета.

Данный метод применяется на лопатках турбин выпускаемых в АО «Турбоатом» (Харьков), а также в концерне «Шкода» (Чехия) для упрочнения рабочих лопаток 5-й ступени ЦНД турбин мощностью 200 МВт для ТЭС.

4. Закалка с нагревом токами высокой частоты (ТВЧ)

Процесс закалки ТВЧ входных кромок лопаток из хромистых сталей позволяет создать твердую поверхность со структурой мартенситного типа, которая определяет высокую эрозионную стойкость.

Преимущества технологии:

- возможность автоматизации;
- стабильность процесса;
- высокая производительность;
- неизменность геометрического профиля лопаток;
- отсутствие в упрочненном слое кобальта, как элемента образующего долгоживущие изотопы (тем самым имеется возможность применения данной технологии для упрочнения лопаток турбин АЭС, работающих на активном паре).

Основные недостатки процесса:

- возможность неравномерного объемно - поверхностного нагрева сложной формы лопатки;
- не очень высокая поверхностная твердость HV 420-460, что определяет более низкую противозэрозионную стойкость по сравнению с лопатками со стеллитовыми пластинами. Увеличение твердости до HV 580-620 существенно повышает эту стойкость, даже превосходя стеллит, но ведет к реальному риску возникновения термических трещин.

Как показали сравнительные испытания в течение 10 тысяч часов, лопатки закаленные ТВЧ, по сравнению с лопатками упрочненными электроискровым методом, имели менее развитый и более однородный эрозионный износ.

Данная технология внедрена в АО «Турбоатом» (Харьков) для упрочнения рабочих лопаток последних ступеней турбин АЭС, работающих по одноконтурной схеме, используется фирмой BBC (Швейцария) для упрочнения входных кромок лопаток 15-й ступени ЦНД длиной 950 мм турбины мощностью 1200 МВт для АЭС,

применяется в концерне «Шкода» (Чехия) для закалки лопаток всех ступеней ЦВД турбин мощностью 220 МВт для АЭС.

5. Электронно-лучевая закалка

В ФРГ имеется опыт использования закалки с использованием электронно-лучевого нагрева входных кромок рабочих лопаток последней ступени турбины мощностью 210 МВт. Закалку производят на установке ESA-150-MR с легким оплавлением поверхности, либо без оплавления. При глубине закаленного слоя 0,5 мм микротвердость по сравнению с основным металлом возросла в 2-2,5 раза.

6. Газотермические методы напыления

Имеется опыт газотермического (газопламенного, плазменного, детонационного) нанесения порошкового стеллита ВЗК на лопатки из стали 15X11МФ. Испытания по методике магнитострикционного вибратора на АО «ЛМЗ» показали, что противоэрозионная стойкость лучшего детонационного покрытия примерно в 100 раз хуже, чем литого стеллита ВЗК, за счет низкой адгезионной прочности сцепления (70-80 МПа), повышенной пористости, невысокой когезионной прочности. Эксплуатационные испытания напыленных лопаток турбины К-300-240-1 стан. № 8 Конаковской ГРЭС также показали их низкую эрозионную стойкость.

Имеется положительный опыт использования процесса плазменного напыления в вакууме порошкового материала стеллит-6. Напыление аналогичного материала на воздухе показало низкую эрозионную стойкость.

Известно, что напыленные покрытия для обеспечения высокой эрозионной стойкости должны отвечать следующим требованиям:

- иметь беспористую (минимальную пористость) мелкозернистую гетерогенную структуру;
- обеспечивать получение оптимального комплекса свойств твердость - пластичность с различным содержанием армирующей фазы в разных условиях воздействия потока;
- в случае воздействия инородных частиц, иметь более высокую микротвердость покрытия, чем микротвердость частиц.

7. Напыление покрытия с последующим его оплавлением

Известен опыт плазменного напыления самофлюсующих никелевых сплавов с последующим микроплазменным оплавлением напыленного слоя. Перед оплавлением лопатка подогревалась до температуры 300-400°C, а охлаждение оплавленной лопатки производилось вместе с печью, первоначально подогретой до

температуры 500°C. Металлографические исследования показали отсутствие роста зерна основного металла (сталь 08X13), доля основного металла в оплавленном слое составляла 5-7 %, твердость слоя HRC 42-45. При эксплуатационных испытаниях упрочненных лопаток на паровой турбине Сименс-Шуккерт мощностью 50 МВт Каширской ГРЭС на ступени №30 имелись положительные результаты.

Имеется опыт напыления входных кромок лопаток сплавами X40P6 (типа КБХ) и X80CP3 (типа колманой). Покрытия толщиной 0,3-0,8 мм наносились методом плазменного напыления и оплавливались плазменной дугой перемещаемой вдоль входной кромки с перекрытием на 1/3 ширины оплавленных валиков. Процесс осуществлялся с предварительным и сопутствующим подогревом лопатки до 400-450 °С. Образовавшийся закаленный слой металла, лежащий под покрытием также выполнял защитную функцию в борьбе против эрозионного износа.

Плазменное напыление покрытий Ni-Cr-B-Si (ПГСП4), NiTi (ПН55Т45) и Fe-Cr-Mn-V-C-B-Si толщиной 0,45-0,5 мм с последующим оплавлением на глубину 0,5-0,55 мм с помощью электронно-лучевой установки показало следующие результаты. Электронно-лучевая обработка плазменного покрытия ПГСП4 позволила увеличить его микротвердость с HV 550 до HV 610. Эрозионные испытания на каплеударном стенде показали, что даже после электро-лучевой обработки стойкость покрытия ниже, чем стойкость стеллита. После оплавления плазменного покрытия микротвердость в верхней части оплавленной зоны составила HV 1130-1150, что примерно в два раза выше, чем твердость напыленного покрытия. Уровень эрозионной стойкости данного покрытия несколько превышал стойкость стеллита. Упрочнение, достигаемое при электро-лучевой обработке напыленных покрытий системы Fe-Cr-Mn-V-C-B-Si являющееся результатом измельчения зерна, насыщения матрицы легирующими элементами, формирования ультрамелкодисперсной упрочняющей карбоборидной эвтектики, расположенной по границе дендритов, обеспечило повышение эрозионной стойкости в 3-5 раз. Несмотря на положительные результаты макетных эрозионных испытаний, следует отметить отсутствие натуральных испытаний, сложное аппаратное оформление технологии упрочнения, невозможность проведения процесса без демонтажа лопаток.

8. Плазменная наплавка

При плазменно-дуговой наплавке порошковыми материалами на никелевой и кобальтовой основах с использованием

традиционного отечественного оборудования имели место повышенные деформации и подкалка основы, значительное перемешивание с основным металлом и увеличенная зона термического влияния, что не дало оснований для натуральных испытаний наплавленных лопаток.

9. Алмазное кластерное хромирование

Исследовалось алмазное кластерное хромирование, наносимое гальваническим способом. Этот метод способствует измельчению структуры покрытия и, как следствие, дополнительному увеличению его прочности. Толщина покрытия 25 мкм. С учетом специфики работы лопатки проведены испытания образцов на коррозионную усталость, эрозионный износ, коррозионную стойкость. С увеличением толщины покрытия с 25 до 150 мкм его эрозионная стойкость повышается в 2-4,2 раза. Эрозионная стойкость стали с этим покрытием толщиной 150 мкм лишь на 25-30% ниже, чем со стеллитом, но в 2-3 раза выше, чем у этой же стали с электроискровым покрытием Т15К6. Коррозионные испытания при температуре среды 90°C и pH=6 показали, что зарождение питтингов на стали 12Х3 наблюдается уже при концентрации хлоридов выше 3 мкг/см², тогда как на этой же стали с кластерным хромированием первые признаки коррозионных повреждений появляются при концентрации хлоридов 25 мкг/см². Опытное нанесение защитного покрытия на основе кластерного хромирования выполнено на 104 лопатках последней ступени турбины Т-100-130 АО «ТМЗ» длиной 650 мм. Покрывалось все перо лопаток от корня до периферии кроме хвоста. Покрытие наносилось толщиной 80-100 мкм. В процессе отработки технологии толщина покрытия измерялась вихретоковым методом. Лопатки с этим покрытием были установлены в 1994 г. на одной из турбин в системе Мосэнерго. По результатам эксплуатации замечаний к лопаткам не имеется.

Следует отметить, что технология нанесения кластерных покрытий в связи с неконтролируемостью длительности сохранения работоспособности углеродных кластеров, введенных в электролит при хромировании, а также экологическими проблемами гальванического производства, вызывает сложности при внедрении в производство.

10. Ионно-плазменное напыление

Сообщается о применении технологии ионно-плазменного напыления покрытий хрома, нитрида титана, хром нитрида титана на рабочие лопатки паровых турбин. Испытание образцов проводилось в условиях действия кавитационного износа по

японскому стандарту ASTM-G-32-77. Эксплуатационные испытания в течение трех лет лопаток с покрытием нитрида титана показали отсутствие видимых следов эрозии.

В США запатентована рабочая лопатка паровой турбины с многослойным ионно-плазменным покрытием, в котором первый слой создан из материала противостоящего эрозионным процессам при малых углах удара частиц, а второй - при больших углах атаки.

11. Гидрофильные покрытия

Для создания на поверхности рабочих лопаток устойчивой пленки жидкости, которая в некоторой степени смягчает ударное воздействие капель влаги и тем самым защищает от эрозии предложено на поверхность входной кромки наносить гидрофильное покрытие, состоящее из никелевой сетки, ячейки которой заполнены эластичным эрозионностойким материалом - фенолкаучуковой пленкой. В качестве гидрофильных веществ могут также использоваться материалы с ионными кристаллическими решетками, оксиды, силикаты, карбонаты и т.д. Покрытия повышенной смачиваемости обеспечивают кроме демпфирования ударного воздействия капель, улучшение сепарации жидкости, что уменьшает количество опасной крупнодисперсной влаги в проточной части, увеличение КПД ступени турбины.

12. Гидрофобные покрытия

Для уменьшения количества влаги, сепарирующей на поверхности лопатки, предлагается использовать не смачиваемые покрытия, что также приводит к увеличению эрозионной стойкости.

13. Ионная имплантация

Наиболее распространенными материалами, применяемыми для изготовления рабочих лопаток влажно паровых турбин, являются хромистые стали. Из анализа исследования 59 типов различных сталей выявлено, что увеличение содержания только трех легирующих компонентов стали - хрома, меди и молибдена повышают эрозионную стойкость. Имеются сообщения об упрочнении лопаток паровых турбин с использованием процесса ионной имплантации хрома, который позволил увеличить продолжительность инкубационного периода эрозионного износа в 3 раза по сравнению с не упрочненной сталью.

14. Электролитическое хромирование

Исследования, связанные с разработкой эрозионностойких покрытий на турбинах первого поколения для атомных ледоколов

основывалось на сравнении штатного защитного покрытия всей лопатки электролитическим хромированием с нанесением покрытия толщиной 70-80 мкм, при этом предел усталостной прочности основного металла - стали 20X13 снижался с 560-600 МПа до 100-200 МПа, а также опытных лопаток с нанесением на входную кромку покрытия типа колманой и КБХ методом плазменного напыления с последующим оплавлением, сплава Т15К6, нанесенного электроискровым методом, а также лопаток из стали 20X13Ш, закаленных ТВЧ. Через первые 18 тыс. часов эксплуатации размеры зон разрушения покрытий стабилизировались, через 24 тыс. часов износ лопаток, защищенных покрытием типа колманой был вдвое меньше, чем у штатных хромированных, а с покрытием типа КБХ - в 3-6 раз меньше. Стойкость покрытия типа колманой и Т15К6 оказалась примерно одинаковой. Наиболее стойкими показали себя лопатки с закаленным ТВЧ входными кромками.

15. Ремонтно-восстановительная сварка

Для восстановления лопаток, подверженных значительным эрозионным повреждениям, используется технология ремонта без демонтажа лопаток с ротора (или демонтированных) на основе аргоно-дуговой сварки. По этому способу производят: удаление остатков изношенных стеллитовых пластин, обработку изношенных участков пера лопатки абразивными кругами под последующую их наплавку ручной аргоно-дуговой горелкой; наплавку (или приварку вставки) пера до чертежных размеров специальными приемами сварки с использованием присадочного материала, не склонного к горячим или холодным трещинам, а также к коррозионному растрескиванию сварных соединений; абразивную обработку и шлифование соединения в соответствии с требованиями чертежа при помощи ручных пневматических машинок; контроль сварных соединений цветной дефектоскопией (или травлением раствора хлорного железа); приварку стеллитовых пластин к перу угловыми сварными швами тем же сварочным способом, что и при восстановлении пера лопатки и с использованием специальной проволоки; окончательный визуальный контроль, а также контроль цветной дефектоскопией стеллитовых пластин. При сварке не применяется предварительный и сопутствующий подогревы, а восстановленная лопатка не подвергается отпуску. Данная технология прошла многократную проверку на различных станциях и показала надежность и долговечность восстановленных лопаток, сопоставимых с вновь изготавливаемыми (т.е. не менее 100 тыс. часов). При этом концептуально решается задача только продления службы изношенных лопаток, а не повышение их эрозионной

стойкости. Известно, что сварные соединения, вследствие формирования в зоне сварного шва растягивающих остаточных напряжений, крупнозернистой структуры, обладают низким сопротивлением усталости.

В АО «Турбоатом» разработан способ восстановления изношенных лопаток, который включает: вышлифовку эрозионных зон, аргоно-дуговую наплавку, высокотемпературный отпуск, механическую доводку профиля, закалку ТВЧ входных кромок.

Из зарубежного опыта имеются сведения о ремонте 448 лопаток изготовленных из стали 20X13 последних ступеней двух турбин мощностью 340 МВт. После 10 лет эксплуатации эрозионный износ распространился на длину 300 мм от периферии и сильно поразил стеллитовые пластины общей длиной 170 мм. Технология ремонта включала выборку эрозионной зоны и восстановление геометрических размеров сваркой элемента с использованием присадочного материала инконель FM62. Затем тонкими валиками осуществлялась наплавка защитного пояса на входную кромку с использованием материала стеллит 21. По окончании наплавки проводилась термическая обработка и окончательная механическая обработка. Ремонт продолжался 12 недель, при этом его стоимость оценивалась как 40% от стоимости новых лопаток.

Хорошие практические результаты получены в ФРГ при восстановлении лопаток последней ступени турбин К-200-130. Ремонт производился после 80 тыс. часов наработки. Он включал вышлифовывание эрозионных зон, удаление остатков стеллитовых пластин, дефектоскопию. Исходный профиль восстанавливается одно- или двухслойной наплавкой способом WIG. Эрозионная стойкость восстановленных лопаток повышалась процессом закалки с использованием лазера или электронного луча. Затраты на восстановление лопаток составили порядка 30% стоимости новых.

16. Упрочнение лопаток из титановых сплавов

Лопатки, изготавливаемые из титановых сплавов в настоящее время конструктивно имеют утолщение входных кромок (без защитных накладок и покрытий), которое кардинально не решает задачу защиты их от эрозионного износа. Имеются сведения об использовании накладок из дисперсионно-твердеющих титановых β сплавов типа Ti-15Mo-4Zr, крепящихся к входной кромке сваркой или пайкой, из материала Ti-7Mo-5,5Cr-3Al-3Fe, припаиваемого твердым припоем или привариваемого методом электронно-лучевой сварки; из материала Ti-15Mo-5Zr, Ti-15Mo-5Zr-3Al, которые приваривались методом электронно-лучевой сварки, дающим минимальную зону термического влияния. Эрозионные исследования на различных

стендах последних двух материалов показали свойства, превосходящие литой стеллит. Для повышения усталостной прочности титановых лопаток имеется опыт использования упрочняющей дробеструйной обработки. В качестве одного из приемов, повышающих эрозионную стойкость предлагается проводить пайку защитных накладок через медную фольгу толщиной 0,07-0,15 мм, установленную между лопаткой и пластиной, обеспечивая нагрев лопатки в печи до 900-950 °С, выдержке в течении 30-75 мин и охлаждении до температуры окружающей среды. Имеются сведения об использовании процесса детонационного напыления сплава Ti-6Al-4V на пластину из нержавеющей стали, которую затем приваривали к рабочей лопатке.

Для защиты титановых лопаток отдельных отечественных турбин используются защитные пластины из эрозионностойкого титана и нитинола. Последние применяются на рабочих лопатках длиной 1200 мм из сплава ТС-5.

Требования к эрозионностойким покрытиям

Проведенный анализ используемых технологий повышения долговечности лопаток паровых турбин позволили сформулировать требования к эрозионностойким покрытиям:

- обеспечение большей эрозионной стойкости, чем основной металл в условиях эксплуатации;
- высокая коррозионная стойкость покрытия;
- формирование на поверхности покрытий сжимающих остаточных напряжений;
- создание на поверхности покрытий субмикрорельефа, обеспечивающего регуляризацию параметров качества поверхностного слоя, залечивания микродефектов от предшествующих технологических операций;
- покрытие не должно ухудшать усталостных характеристик основного металла;
- близость коэффициентов линейного расширения материалов покрытия и основы;
- отсутствие повышенных напряжений отрыва на границе покрытие - основной металл;
- напряжения, проходящие через покрытие в основной металл должны уменьшаться за счет рассеяния и поглощения энергии удара в материале покрытия и быть меньше пороговых, повреждающих и разрушающих основной металл под покрытием за время эксплуатации лопатки;

- покрытие должно быть однородным и бездефектным (поскольку эрозионные разрушения сталей мартенситного класса начинаются и развиваются по границам зерен целесообразно использовать наплавленные или оплавленные покрытия, а также обеспечивать комплексное их легирование такими элементами как ванадий, ниобий, титан и др.);
- обеспечение повышенной усталостной прочности покрытия за счет плавного изменения частотных акустических характеристик структуры от покрытия к основному металлу, например, за счет использования промежуточных слоев, диффузионного внедрения частиц покрытия, специальных аморфных покрытий (увеличение эрозионной стойкости материалов, имеющих выраженное кристаллическое строение может быть достигнуто оптимальной направленностью зерен, например, вдоль поверхности материала, измельчением зерна, а также формированием более «округлого» зерна, что в условиях резонансных колебаний обеспечит более затрудненные условия вырыва зерен и возникновения очагов разрушения).

Аспекты технологической наследственности, влияющие на эксплуатационные характеристики лопаток [15-20]

1. Остаточные напряжения

Механизму формирования напряжений в поверхностном слое деталей посвящено достаточно много работ [15, 16]. Известно, что при всех основных способах нагружения поверхностный слой любых деталей оказывается в более тяжелых условиях, чем внутренние слои. В поверхностном слое всегда создаются более благоприятные условия для пластического деформирования и разрушения по сравнению с сердцевиной, поскольку здесь имеют место, неуравновешенные атомные связи, облегчен выход дислокаций и вакансий на поверхность, требуется меньше энергии для генерирования дислокаций внешними источниками. Остаточные напряжения на поверхности формируются в процессе изготовления деталей за счет различных технологических процессов механической обработки, литья, термической обработки, обработки давлением, химико-термической обработки, сварки, нанесения покрытий и др. При действии эксплуатационных нагрузок поверхностный слой оказывается в самых неблагоприятных условиях, поскольку рабочие напряжения складываются с технологическими остаточными напряжениями. Это приводит к принципиальным изменениям напряженности в поверхностном слое, резко возрастают результирующие напряжения, действующие

в процессе эксплуатации, полностью меняется эпюра распределения напряжений по сечению детали. В случае действия знакопеременных нагрузок технологические напряжения приводят к существенной асимметрии цикла, что, как известно, также отрицательно сказывается на работоспособности детали. Знак остаточных напряжений является всегда обратным деформации, их вызывающей: деформация растяжения вызывает остаточные напряжения сжатия, деформация сжатия - остаточные напряжения растяжения. Известно, что путем наведения технологических напряжений противоположного знака по отношению к рабочим напряжениям возможна разгрузка поверхности. Таким образом, с позиции прочности деталей важно, какая будет применена технология обработки детали, обуславливающая напряженное состояние материала поверхностного слоя. Остаточные напряжения при механической обработке возникают в результате деформации при силовом воздействии и от местного нагрева поверхностного слоя. Знак остаточных напряжений после механической обработки зависит от многих факторов. Практически все ответственные детали машин проходят операцию шлифования и многие из них - на заключительной стадии изготовления. Операция шлифования характеризуется высокими мгновенными температурами в зоне контакта, возникшими в результате массового скоростного микрорезания большим числом абразивных зерен, приводит к формированию в поверхностном слое деталей остаточных напряжений растяжения. В то же время известно, что при наличии напряжений растяжения снижается предел выносливости деталей, что может явиться причиной их разрушения. Это относится и к лопаткам.

Таким образом, с точки зрения напряженного состояния поверхности необходимо использовать такую финишную операцию (не изменяющую геометрических характеристик лопаток), которая позволила бы создать сжимающие остаточные напряжения поверхностного слоя и позволяющую существенно повысить усталостную прочность лопатки. К таким технологиям относятся новые плазменные процессы - финишное плазменное упрочнение, плазменная модификация и плазменная закалка.

2. Микрогеометрия поверхности

При изготовлении деталей формируется определенный свойственный каждому методу обработки макро-, микро- и субмикрорельеф обработанной поверхности. Риски и неровности на обработанной поверхности являются своего рода концентраторами напряжений, являющиеся очагами образования и развития трещин

усталости. Серьезным отрицательным фактором, с точки зрения усталостного разрушения, являются и следы от шлифовального круга. В большинстве случаев, применительно к конфигурации лопаток, процесс шлифования ведут поперек лопатки и тем самым дефекты состояния поверхности совпадают остриями своих впадин с действием изгибающих напряжений. В турбинах большой мощности (300 МВт и выше) используются лопатки из титанового сплава (Cr-5 %, Al- 3%, Ti - ост., HV 320), опыт применения, которых уже имеется в авиационной промышленности. Однако, как известно, этот сплав весьма чувствителен ко всяким царапинам и рискам, вызывающим повышенную концентрацию напряжений и снижающим усталостную прочность металла. Принятые стандартные параметры шероховатости поверхности R_a и R_z не всегда позволяют дать объективную оценку эксплуатационным и геометрическим свойствам поверхности, так как не несут информации о форме и распределении неровностей поверхности. На предел выносливости наряду с микронеровностями (шероховатостью) большое влияние оказывает их глубина и радиус закругления впадин микропрофиля, а также углы их подъема. Радиусы закруглений, углы наклона боковых поверхностей профиля уменьшаются со снижением шероховатости. Шаг микронеровностей также зависит от шероховатости и уменьшается с ее снижением. Размеры и форма микронеровностей поверхности могут делать ее однородной и неоднородной, что существенно влияет на усталость деталей. Наименее однородный микропрофиль получается после абразивной обработки. Это объясняется различной ориентацией зерен в инструменте относительно поверхности детали. Известно, что характер микрогеометрии деталей после поверхностного пластического деформирования обеспечивает снижение чувствительности к концентраторам напряжений.

Задача разработки оптимальной технологии и состоит в том, чтобы на финишном этапе создать необходимый рельеф (в том числе субмикрорельеф) поверхности по условиям эксплуатации детали с минимальным количеством технологических концентраторов напряжений.

Известно, что для образования трещин в металле необходима пластическая деформация, которая лишь при плотности дефектов кристаллической решетки большей критической величины приводит к образованию субмикроскопических трещин и развитию не залечивающихся микротрещин. Технология механической обработки предусматривает изготовление детали путем срезания тонких слоев материала с заготовки, при этом срезание осуществляется путем пластической деформации и разрушения

определенного слоя. Однако интенсивной деформации подвергается не только стружка, но и некоторый слой материала, лежащий ниже линии среза, образующий поверхность детали. В результате новая, только что изготовленная деталь, в тонком приповерхностном слое уже имеет очаги разрушения в виде субмикротрещин. Операция полирования не всегда позволяет нейтрализовать поверхностные дефекты. Более того, риски и царапины, оставшиеся после полирования, в свою очередь, являются технологическими концентраторами напряжений и могут стать источниками разрушения при знакопеременном нагружении деталей. Наиболее наглядно эти особенности абразивной обработки проявляются при шлифовании (полировании) тонких кромок лопаток, где в результате низкой теплопроводности материала могут возникать местные высокие температуры, появляться прижоги и мелкие микротрещины на поверхности.

С точки зрения борьбы против образования субмикротрещин и обеспечения регуляризации субмикроструктуры поверхностного слоя также рационально использовать новые плазменные методы обработки (финишное плазменное упрочнение, плазменную модификацию и плазменную закалку), которые благодаря целого комплекса воздействия залечивают возможные дефекты предшествующих технологических операций, не изменяя параметров шероховатости.

3. Наклеп поверхностного слоя

Обработка резанием изменяет физико-механические свойства поверхностного слоя в результате деформаций и выделения в зоне деформирования большого количества тепла. Неравномерность усилий резания, а также температурного поля в зоне резания вызывают неоднородность пластических деформаций поверхностного слоя. Пластическая деформация поверхности характеризуется степенью наклепа N и глубиной наклепанного слоя h_c . Степень наклепа $N = \frac{H_1 - H}{H} \cdot 100\%$, где H_1 - микротвердость, измеренная на поверхности; H - микротвердость сердцевины металла. На наклеп поверхностного слоя влияют режимы резания, геометрические параметры режущего инструмента (степень его износа), свойства материала детали, условия охлаждения. Для каждого материала существует оптимальная степень и глубина наклепа, обеспечивающие максимальное повышение сопротивления усталости.

Механическая обработка не обеспечивает стабильности и однородности степени и глубины наклепанного слоя по поверхности

детали, за счет неравномерности усилий резания и температурного поля в зоне резания.

Известно, что средством стабилизации наклепа и микротвердости поверхности являются, например, методы поверхностного пластического деформирования путем динамического воздействия потоком дроби, которые несущественно изменяют геометрические параметры деталей при значительном изменении механических свойств поверхности.

За счет равномерности неконтактного газодинамического и теплового воздействия плазменных струй, имеющих строго фиксируемые и контролируемые параметры, также возможно получение максимально однородного поверхностного слоя с точки зрения деформационного упрочнения.

Выводы

На основании анализа конструктивных особенностей, условий эксплуатации, возможных дефектов лопаток паровых турбин, используемых упрочняющих технологий, а также физических основ прочности, пластичности и разрушения материалов, причин, определяющих связь между технологиями изготовления лопаток и их эксплуатационными свойствами, можно концептуально определить основные направления повышения эрозионной стойкости входных кромок лопаток ступеней низкого давления паровых турбин, а также рекомендовать для исследований и апробации, современные плазменные технологии (в том числе интегрированные).

Концепция вариантов упрочнения и восстановления основывается на методологическом подходе, что эрозионная стойкость определяется, в основном, свойствами поверхностного слоя, проявляющимися за счет технологической наследственности и формирующимися в процессе эксплуатации. При этом поверхностный слой образуется за счет нанесения эрозионностойкого покрытия нового поколения с использованием технологий плазменного напыления с последующим оплавлением, плазменной наплавки-напыления, плазменной порошковой сварки. Покрытие не снижает сопротивление коррозионной усталости основного металла и имеет высокую коррозионную стойкость в агрессивных средах. В качестве окончательной обработки должны использоваться технологии финишного плазменного упрочнения (ФПУ) или плазменной модификации (ПМ), позволяющие целенаправленно обеспечивать:

- создание в поверхностном слое оптимальных остаточных напряжений сжатия;

- залечивание дефектов кристаллической решетки;
- образование структуры и фазового состава, обладающих высокой твердостью и дисперсностью;
- получение эффективной топографии субмикрорельефа поверхности, сглаживающей направленность и риски от предыдущей операции шлифования.

Тем самым, кардинально могут быть решены проблемы образования усталостных трещин в процессе эксплуатации лопаток, изготовленных с учетом традиционных технологий и материалов.

Кроме того, известно [14], что под действием специальных плазменных струй обрабатываемая поверхность становится коррозионностойкой. Это объясняется тем, что при воздействии плазменной струи всего на глубину 0,1 мкм, из этого тончайшего слоя удаляется кислород (его концентрация падает до 20 раз), и на поверхности образуется пленка полимеризованных углеводородов с высокой адгезией к поверхности. Эта пленка, являясь коррозионностойкой, может даже противостоять воздействию паров смеси соляной и азотной кислот.

С учетом опыта применения различных газотермических покрытий с низкими когезионными и адгезионными свойствами, высокой пористостью целесообразно их использование только с последующим оплавлением. При этом для оплавления могут быть использованы газопламенные, плазменные и лазерные источники теплоты или нагрев ТВЧ.

В качестве материала эрозионностойкого покрытия можно рекомендовать новое поколение стеллитовых покрытий (за рубежом под маркой стеллит выпускается более 15 видов различных материалов на основе кобальта), обеспечивающих качественное их оплавление. Перспективным направлением является также использование порошковых материалов, обеспечивающих получение аморфно-кристаллической или аморфной структуры покрытия, которые существенно отличаются от традиционных покрытий, обладая уникальными эксплуатационными свойствами.

При ремонте лопаток со значительным эрозионным износом существуют предпосылки использования новых процессов плазменной наплавки-напыления, плазменной порошковой сварки, которые обеспечивают сварку (вварку элементов) с применением широкой номенклатуры порошковых материалов без оплавления основного металла, наплавки в любом пространственном положении и при определенных условиях с минимальными деформациями основы.

С учетом опыта применения процесса термической закалки ТВЧ входных кромок лопаток существует принципиальная

возможность использования автоматизированного метода плазменной закалки демонтированных или новых лопаток. Тем самым, дополнительно к вышеназванным положительным эффектам добавляется возможность получения закалочных структур только определенного поверхностного слоя, обеспечивая сохранение вязкой и трещиностойкой сердцевины кромки лопатки. При этом используется малоэнергоемкий процесс.

Использование газотермического напыления, как одного из главных элементов конструирования эрозионностойкого покрытия является необходимым условием, но не достаточным, в связи с обеспечением решения проблем технологической наследственности в борьбе против образования усталостных трещин конечного продукта. При этом встает вопрос о применении интегрированных технологий, позволяющих комплексно решать задачу борьбы против эрозионного износа. В качестве возможного варианта использования одной из интегрированных технологий - газотермического напыления + финишного плазменного упрочнения приведем последовательность операций по ремонту лопаток (со степенью износа - умеренный и слабый):

1. зачистка поверхности входной кромки абразивным инструментом;
2. дефектоскопия на наличие усталостных трещин;
3. абразивно-струйная обработка с использованием беспылевой мобильной установки;
4. газопламенное напыление эрозионностойкого покрытия с использованием ацетилено-кислородного пламени (или плазменное напыление);
5. оплавление покрытия сканирующей плазменной дугой (газовой горелкой, ТВЧ);
6. обработка покрытия абразивным инструментом в соответствии с чертежными размерами;
7. дефектоскопия качества покрытия и его обработки;
8. финишное плазменное упрочнение входной кромки лопатки, в качестве технологии ликвидирующей отрицательные последствия предыдущей операции шлифования.

При отказе от использования напайки стеллитовых пластин на стальные лопатки данный процесс может быть использован и для титановых лопаток.

Кроме того, известно, что распространенным видом повреждения поверхности рабочих лопаток последней ступени паровых турбин, работающих во влажном паре, является эрозионный износ не только входных кромок на периферии пера, но и выходных кромок в прикорневой зоне лопатки (практически, при изготовлении отечественных лопаток упрочнение выходных кромок

не осуществляется). При использовании новых плазменных технологий, в связи с гибкостью технологического процесса, можно проводить упрочнение и выходных кромок лопаток.

Литература.

1. Дорогов Б.С. Эрозия лопаток в паровых турбинах. М.: Энергия, 1965. - 96 с.
2. Фаддеев И.П. Эрозия влажнопаровых турбин. Л.: Машиностроение, 1974. - 206 с.
3. Косяк Ю.Ф. и др. Эксплуатация турбин АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1983. - 256 с.
4. Перельман Р.Г., Пряхин В.В. Эрозия элементов паровых турбин. М.: Энергоатомиздат, 1986. - 184 с.
5. Фаддеев И.П., Лагерев А.В. Влияние защитного покрытия на напряженное состояние поверхностного слоя рабочих лопаток турбомашин. Изв. ВУЗов. Энергетика, 1985, № 9, С. 52-57
6. Фаддеев И.П. и др. Защита от эрозии и восстановление лопаток турбин. ЦНИИТЭИтяжмаш, 1989, вып. 41
7. Резенских В.Ф. и др. Исследование перспективных защитных покрытий для лопаток последних ступеней паровых турбин. Теплоэнергетика, 1996, № 12, С. 28-31
8. Башенко В.В., Децик В.Н., Децик Н.Н. Металлургические особенности модификации газотермических покрытий с использованием электронного луча. Металлургия сварки и сварочные материалы. Материалы международной научно-технической конференции. 1993., СПб, 194-198.
9. Казак М.А., Альфер Б.В., Бочарова З.Г. и др. Исследование средств защиты рабочих лопаток паровых турбин от эрозии. Судостроение, 1977, № 7, С. 29-31
10. Резинских В.Ф., Богачев А.Ф., Лебедева А.И. и др. Исследование перспективных защитных покрытий для лопаток последних ступеней паровых турбин.
11. Гонсеровский Ф.Г. Упрочнение и ремонт стальных паротурбинных рабочих лопаток после эрозионного износа. Электрические станции.- 1988, № 8, с. 37-41
12. Гонсеровский Ф.Г. Особенности ремонта эрозионно-изношенных паротурбинных лопаток и бандажей. Стратегия продления и восстановления ресурса энергооборудования. Отечественные и зарубежные технологии. 1996. СПб, С. 172-175.
13. Киселев А.А., Конкин В.А., Киселев Л.А. Об использовании газотермического напыления при ремонте рабочих лопаток паровых турбин. Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций: Материалы 3-й Всероссийской

практической конференции-выставки. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001, С. 99-101

14. Жолондковский О.И. Бой с пожирателями металла. М.: Знание, 1984. - 144 с.
15. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1963. - 252 с.
16. Сулима А.М., Евстегнеев М.И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1974. - 256 с.
17. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И. Технологические методы повышения надежности деталей машин. М.: Машиностроение, 1992. - 304 с.
18. Мухин В.С., Смыслов А.М., Боровский С.М. Модифицирование поверхности деталей ГТД по условиям эксплуатации. М.: Машиностроение, 1995. - 256 с.
19. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. - М.: Машиностроение, 2000. - 320 с.
20. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. - М.: Машиностроение, 1979. - 176 с.