

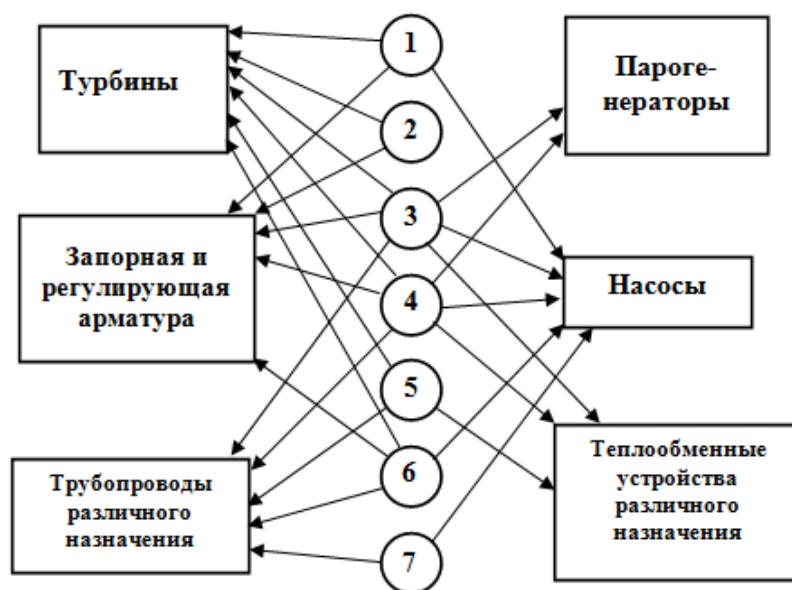
УДК 621.181

ЗАЩИТА ОТ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ВЫСОКОГО И СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Ринейский Е.И.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Качан С.А.

Энергогенерирующее оборудование тепловых электрических станций (ТЭС) подвержено износу различного вида (рисунок 1) [1]. Элементы паровых турбин подвержены разным формам коррозии, каплеударной эрозии, абразивному износу, коррозионному растрескиванию металла под напряжением [1 – 3].



1-эрозия при каплеударном воздействии; 2-абразивный износ; 3-коррозия в процессе эксплуатации; 4-коррозия в период ремонтов и простоев; 5-коррозионное растрескивание под напряжением; 6- эрозия-коррозия; 7-кавитация

Рисунок 1. Основные причины повреждений элементов оборудования ТЭС [1]:

Основной причиной абразивного износа элементов проточной части цилиндров высокого (ЦВД) и среднего (ЦСД) давления мощных паровых турбин с промежуточным перегревом пара является взаимодействие их поверхностей с высокотемпературным (до 550 °С) двухфазным потоком, содержащим твердые частицы магнетита. В основном эти частицы Fe_3O_4 поступают из труб пароперегревателя и паропроводов, соединяющих парогенератор и паровую турбину. Частицы образуются при работе поверхностей нагрева при температурах, превышающие расчетные для используемых марок сталей.

Процесс абразивного износа является весьма сложным явлением и вследствие многообразия характеристик (форм и размеров твердых частиц, скоростей и углов атаки, их траектории и взаимодействия с поверхностью) его следует исследовать на базе статистического анализа.

Особенность абразивного износа - его быстрое развитие. Разрушение лопаточных аппаратов первых ступеней ЦВД и ЦСД, которое требует их ремонта или замены, происходит, зачастую, за несколько лет эксплуатации, что приводит к снижению КПД турбинных ступеней на 8 - 12% (рисунок 2) [1].

Снижение КПД происходит вследствие изменения из-за износа геометрии лопаточного аппарата и, соответственно характеру течения парового потока (рисунки 3 – 5) [1].

Известны разные способы борьбы с абразивным износом [1 – 3]:

- применение сепарационных устройств в паропроводах, клапанах и других элементах с отводом большей части твердых частиц (активные способы),

- формирование покрытий, изменение рабочих поверхностей, химические промывки с целью повышения абразивной стойкости лопаточных аппаратов, которые воспринимают ударное воздействие твердых частиц, прошедших через сепарационные устройства (пассивные способы).

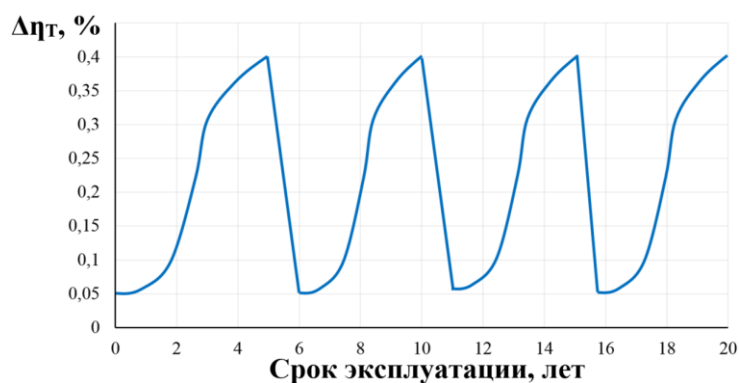
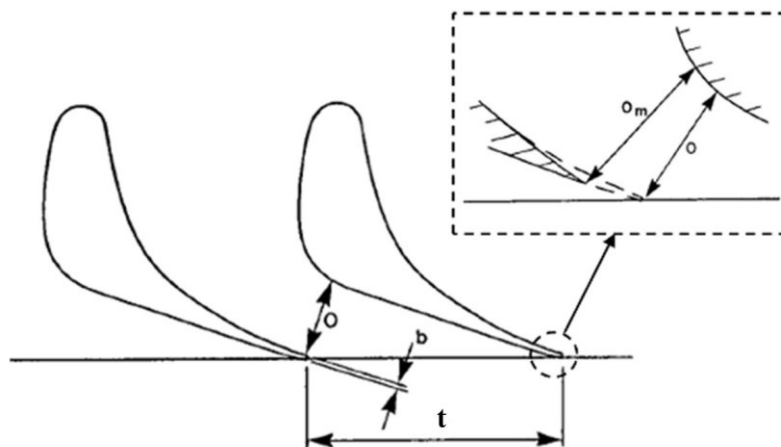


Рисунок 2. Снижение КПД паровых турбин вследствие абразивного износа [1]



O – ширина «горла» канала неповрежденного соплового аппарата; O_m – ширина «горла» канала соплового аппарата, изношенного твердыми частицами; b – толщина выходной кромки сопловой лопатки; t - шаг сопловой решетки

Рисунок 3. Геометрия проточной части канала сопловой решетки и изменение «горла» из-за абразивного износа [1]

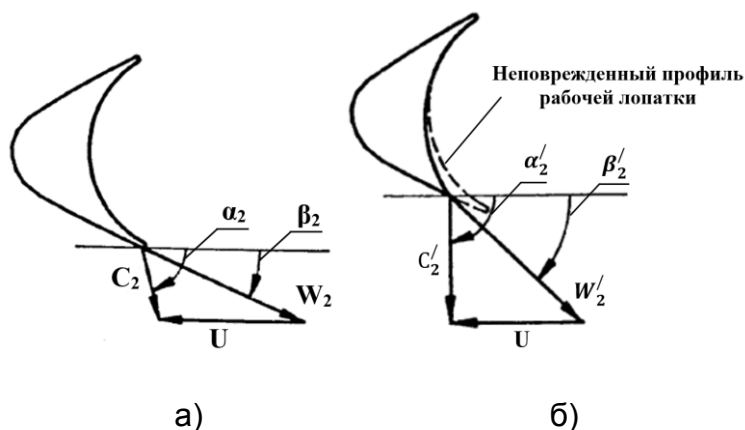


Рисунок 4. Треугольники скоростей для рабочей лопатки с исходным профилем (а) и с измененным вследствие абразивного износа профилем, (б) [1]

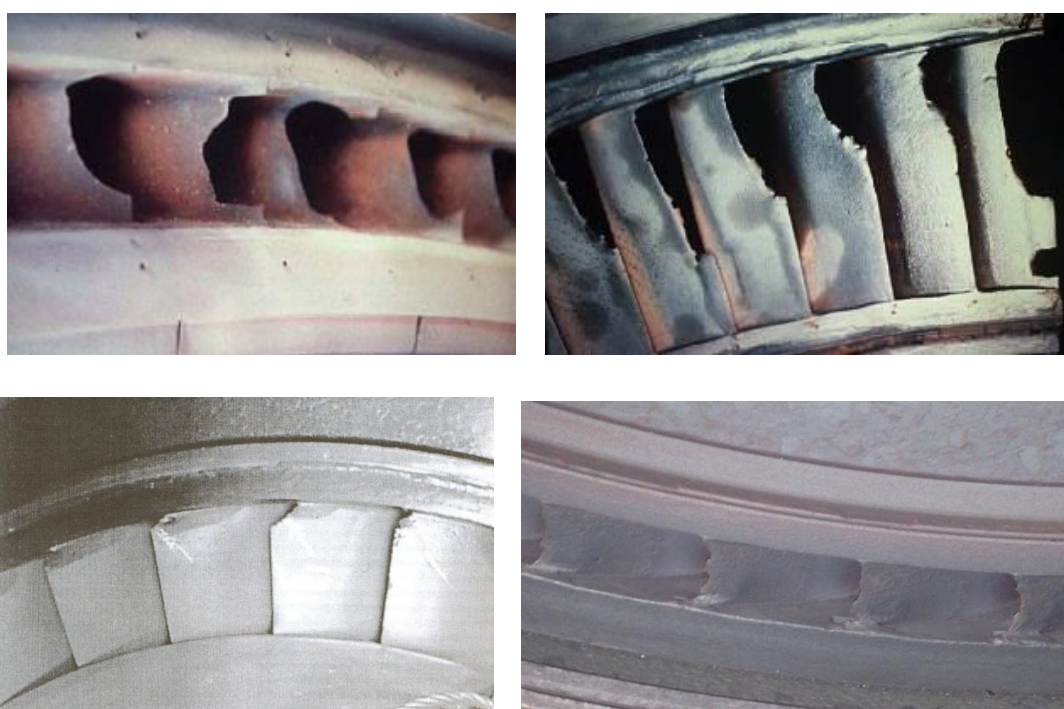


Рисунок 5. Примеры абразивного износа элементов проточных частей паровых турбин [1, 3]

Перспективное направление защиты от абразивного износа – это ионно-плазменные покрытия, которые создаются современными ионно-плазменными методами магнетронного распыления материалов и применяются в том числе для предохранения лопаточного аппарата турбин от каплеударной эрозии и коррозии [1].

Применяемые в промышленности типичные износостойкие покрытия основываются на использовании нитридов, карбидов и боридов металлов.

Температуры плавления этих соединений на 1000 – 2000°К выше по сравнению с чистыми металлами. При этом их твердость может составлять от 20 до 30 10^9 Па, в то время как у чистых металлов – не более 10 10^9 Па).

Большинство элементов, используемые для формирования покрытий, имеют температуру плавления T_m около 1700 °К и более. Соответственно они

являются жаростойкими, что важно для защиты от абразивного износа первых лопаток ЦВД и ЦСД турбин, эксплуатирующихся при совместном воздействии пароабразивного потока и высоких температур (до $550\text{ }^{\circ}\text{C} = 823,5\text{ }^{\circ}\text{K}$).

Многослойные покрытия могут одновременно обеспечить высокую жаростойкость и высокую абразивную стойкость [1].

Жаростойкость многослойного покрытия обеспечивается за счет создания слоя из жаростойкого материала, характеризующегося сплошностью и минимальной толщиной. Более сложно обеспечить требуемую абразивную стойкость покрытия. Так, проблемным местом является граница раздела «покрытие-основа». Качеством их связи, сцепления, суммарной толщиной покрытия, толщиной его слоев и их акустических характеристик существенно определяется прочность системы. Твердость системы покрытие-подложка, а также микротвердость покрытия определяют абразивную стойкость [1].

Наряду с традиционными покрытиями на базе нитридных и карбидных соединений (TiN , TiAlN , TiC , CrN , TiCN , AlCN , ZrN) применяются алмазоподобные углеродные покрытия, а также многофазные и многослойные покрытия (TiN-TiCN-TiN , TiC-TiCN-TiN) с толщиной слоев до нескольких микрон (рисунок 6) [1].

Сегодня особое внимание уделяется исследованиям многослойных покрытий, на базе чередующихся по свойствам наноразмерных (2 – 400 нм) и наноструктурных обладающих повышенной твердостью, износо- и коррозионной стойкостью слоев разного состава [1]. Такая технология позволяет сокращать образование трещин и снижать внутренние напряжения.

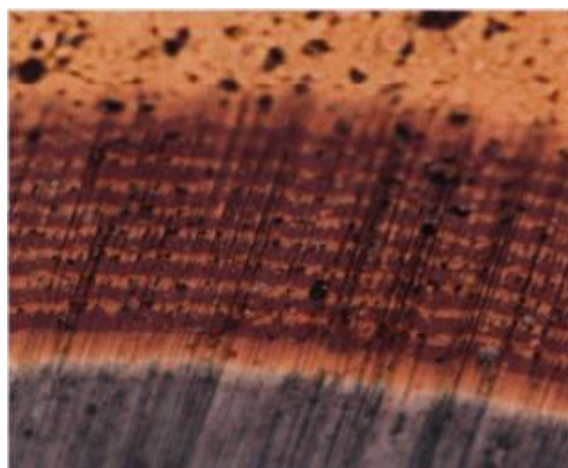


Рисунок 6. Наноструктурированное многослойное покрытие Ti-TiN [1]

Наиболее хорошо зарекомендовали себя покрытия на базе многослойных, наноразмерных, гранецентрированных кубических структур Ti-N , Ti-Al-N , Ti-Cr-B-N , Ti-Si-B , TiCr-B-Si-N (рисунок 7) [1].

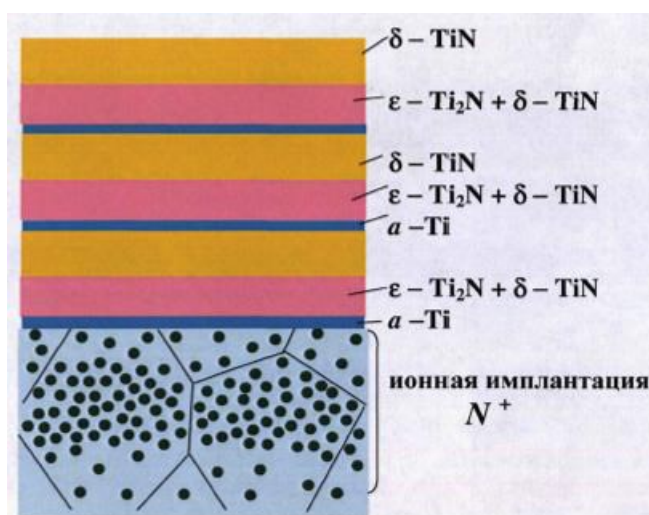


Рисунок 7. Схема комбинированного модифицирования поверхностного слоя детали [1]

Альтернативой нанесения твердых нитридов (карбидов, карбонитридов) одного металла является чередование слоев нитридов разных металлов в одном покрытии [1], имеющих одинаковую кубическую решетку. Это так называемые 2D наноконпозиты, в которых единичные зерна (размером до 100 нм) содержат много разных слоев (каждый толщиной не более 10 нм).

Повышенную прочность обеспечивает то, что микротрещины отражаются и тормозятся на границах слоев. Вместо отслаивания крупных кусков поверхности происходит снятие только части разрушенного слоя (рисунок 8), что значительно повысит стойкость покрытий к износу. Такие покрытия характеризуются принципиально отличным характером разрушения при износе.

На рисунке 8 показана схема износа, в случае сдвигового воздействия на покрытие при абразивной эрозии. Зёрна монолитных покрытий подвергаются существенным пластическим деформациям, и это вызывает их повреждение с достижением глубины поврежденного слоя до 50-75 нм. В случае 2D покрытия происходит скалывание и микроотслоение глубиной около 6-8 нм, поскольку рост трещины прекращается на границах нанослоёв.

На рисунке 9. приведены примеры покрытий, построенных по принципу 2D наноконпозитов [1]. Получаются такие покрытия при послойном формировании двух или более элементов на подложке. Покрытия на основе нитрида титана TiN были одними из первых; затем стали применять карбонитрид титана Ti-C-N, а позже привлек интерес сплав титан-алюминий TiAl (рисунок 9). Преимущества последнего: высокая твердость при сравнительно низких остаточных напряжениях; сохранение высокой твердости вплоть до 800 °С; большая стойкость к окислению по сравнению с Ti-C-N и TiN и пр.

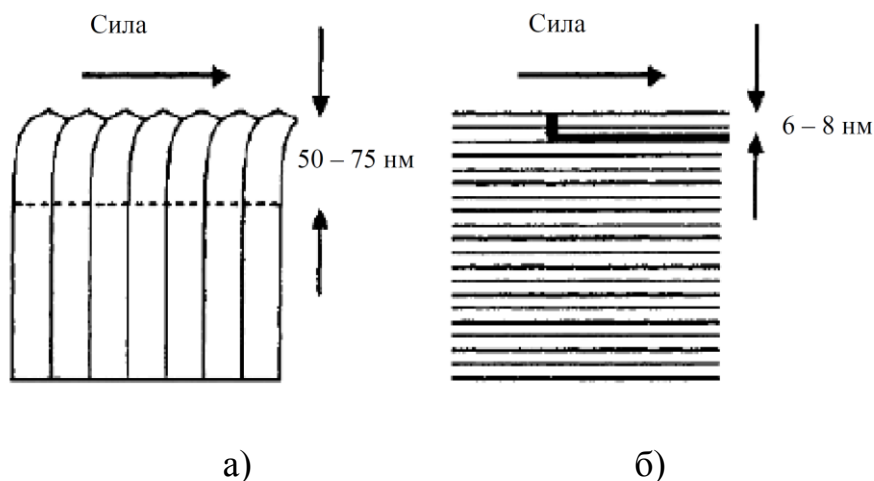


Рисунок 8. Механическое разрушение традиционного (а) и нанослойного (б) покрытий [1]

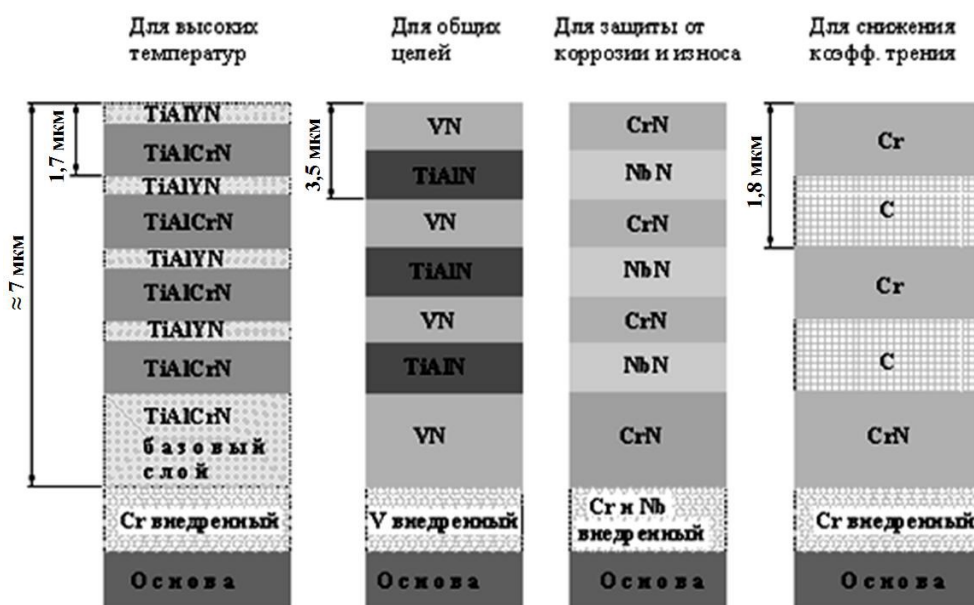


Рисунок 9. Разработанные составы 2D нанокompозитов (Sheffield Hallam University-UK)

В заключение отметим, что в условиях эксплуатации современного оборудования необходимо применять комплексную защиту: разработку более эффективных технологий поверхностного упрочнения и формирования защитных покрытий, и в то же время максимальное снижение концентрации твердых частиц в проточной части паровых турбин.

В рамках такой комплексной защиты в [1] предлагается использовать такие методы активной и пассивной защиты, как:

- применение жаростойких сплавов для труб первичного и вторичного (промежуточного) пароперегревателей;
- установка сепараторов в клапанах, паропроводах и перепускных трубах;
- создание ионно-плазменного покрытия на поверхностях соплового и рабочего аппарата первых ступеней ЦВД и ЦСД паровых турбин.

При использовании такого комплекса активных и пассивных защит возможно многократное повышение как надежности, так и экономичности не только отдельных элементов мощной паровой турбины, но и всей турбоустановки в целом [1 – 3].

Литература

1. Тхабисимов А.Б. Повышение абразивной стойкости лопаточного аппарата первых ступеней цилиндров высокого и среднего давления мощных паровых турбин: дисс... канд. техн. наук: 05.04.12 / Тхабисимов Александр Борисович; [Место защиты: «Национальный исследовательский университет «МЭИ»]. - Москва, 2016
2. Костюк, А.Г., Фролов В.В., Булкин А.Е., Трухний А.Д. Паровые и газовые турбины для электростанций: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. // М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 556 с.
3. Трухний А.Д., Ломакин Б.В. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки: учебное пособие для вузов // М.: Издательство МЭИ. - 2002. – 540 стр.