

УДК 338.984

**АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС ЛОПАТОК ТУРБИНЫ
ABRASIVE WEAR OF TURBINE BLADES**

В.Р. Бежелев, В.А. Желенков

Научный руководитель – Н.В. Пантелей, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

nvpanteley@bntu.by

V. Bezhelev, V. Zhelenkov

Supervisor – N. Panteley, Senior lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в данной статье рассмотрим проблему абразивного износа первых ступеней ЦВД и ЦСД и подробно опишем динамику развития этого процесса.

Abstract: in this article we will consider the problem of abrasive wear of the first stages of the HPC and MPC and describe in detail the dynamics of the development of this process.

Ключевые слова: лопатка, покрытие, износ, материал.

Key words: blade, coating, wear, material.

Введение

Абразивный износ лопаточного аппарата и других элементов части высокого давления и части среднего давления турбины возникают при контакте двухфазного потока с поверхностями лопаток и с высокой температурой (до 550 градусов), в котором в основном содержатся микрочастицы Fe_3O_4 (магнетит). Магнетит попадает в проточную часть, как правило, из котла или промежуточного пароперегревателя. Это явление очень сложное за счет различной форм частиц и их рода, поведение и траектория движения на поверхности лопатки и т.д.

Основная часть

Абразивный износ, который еще называют эрозия твердыми частицами, наиболее присущ для ступеней (сопловых и рабочих лопаток) части высокого давления и первых лопаток части среднего давления и турбин с п/п. Этот вид износа был впервые задокументирован еще в 1950-х годах прошлого века, когда начальная температура свежего пара превысила отметку в 500 градусов и более. Соответственно постепенно данный вид износа стал оказывать все большее влияние на работу турбины и заставлял все больше обращать на него внимание. На рисунке ниже показан пример абразивного износа [1].

Рассмотрим причины возникновения абразивного износа:

1. Условия работы. Колебания критической температуры и давление перегретого пара еще больше усугубляют и так необратимый процесс износа. Для турбин работающих на твердом топливе этот показатель возрастает.

2. Выбор материалов. Если материал очень мягкий, то он интенсивно изнашивается. Исходя из этого нужно соблюдать определенные пропорции металлов в сплавах для сопротивления износу.

3. Наличие заостренных краев и грубых поверхностей имеют свойство более быстро изнашиваться.

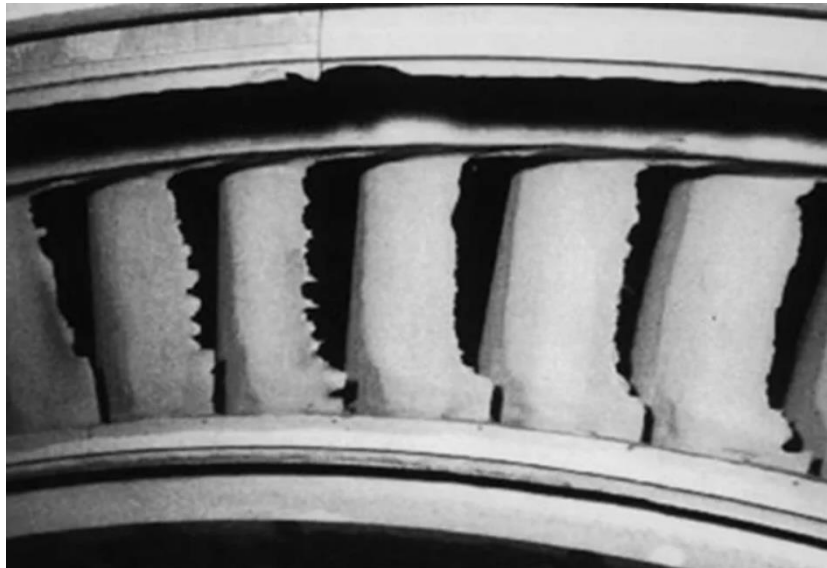
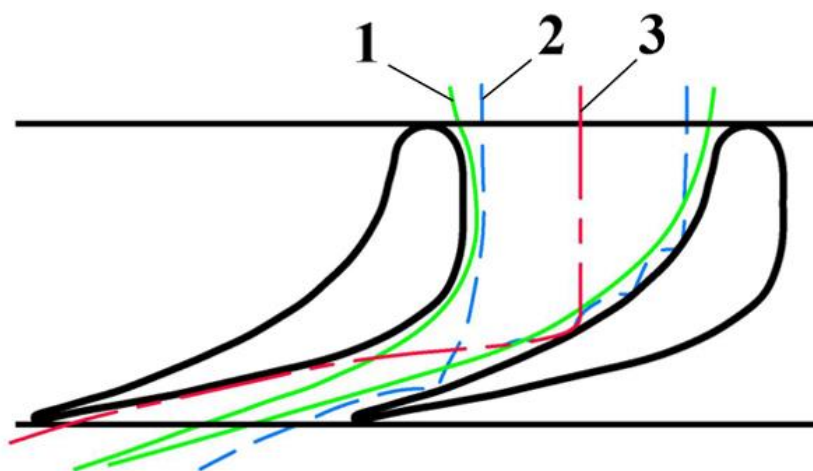


Рисунок 1 – Абразивный износ [1]

Проанализируем интенсивность развития абразивного износа:

С помощью расчетов и новейших компьютерных программ было определено, что при увеличении геометрических размеров твердых частиц их движение перестает соответствовать линиям тока и перестраивается на новую траекторию (рисунок 2). Следовательно, при определенных начальных условиях, их формы и геометрических размеров столкновение этих частиц сопровождается под отличными углами и с различными скоростями [2].



1 – размер частицы до 10 мкм; 2 – от 10 до 50 мкм; 3 – от 50 до 500 мкм.

Рисунок 2 – Траектория столкновения частиц [2]

Согласно расчетам, если размер частицы не будет превышать 10 мкм, то такие частицы способны насквозь проходить ступень, не взаимодействуя с самими лопатками. Однако, при увеличении размеров свыше 10 мкм, наблюдается рост количества самих частиц, которые начинают сталкиваться с вогнутой частью лопатки и менять скорости столкновения и углы атаки. Перемещение частиц показано на рисунке 3 [2].

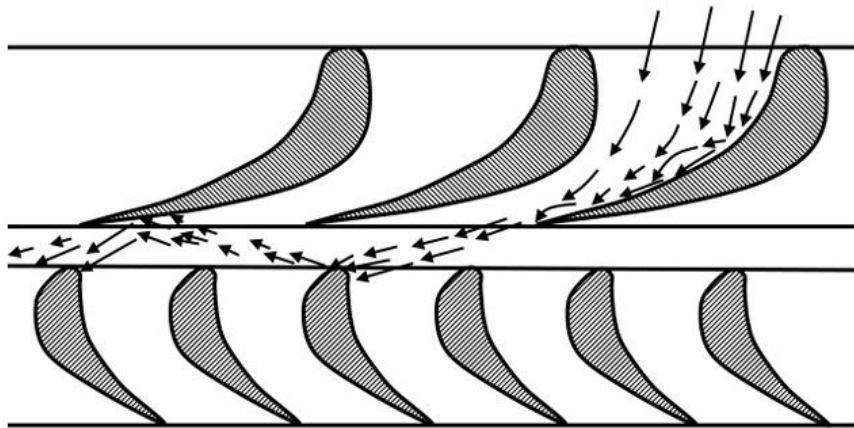


Рисунок 3 – Движение частиц на поверхностях лопаток [2]

Как видно из рисунка 3 некоторые частицы начинают как бы попеременно перескакивать, двигаясь со скоростью 40–80 м/с, по всей вогнутой части лопатки доходя до выходной кромки. Помимо крупных частиц возможны попадания более мелких с размерами 10 мкм и менее, перемещение которых происходит вдоль периферийного обвода. При этом их подхватывает и уносит вторичные течения. Некоторые частицы способны отражаться от поверхности рабочих лопаток и двигаться, под углом относительно начального потока, в сторону направляющей составляющей лопаток, а скорость их варьируется от 50 до 140 м/с.

Движение всех частиц в пространствах между лопатками определяются такими параметрами как скорость и угол выхода из лопаточного аппарата, лежащие в широком диапазоне, не зависимо от размера частиц. Отсюда следует, что скорости частиц, углы выхода и входа потока, а также траектория отражения могут значительно отличаться. Стоит отметить, что все частицы не похожи друг на друга и имеют грубую, случайную форму.

Следовательно, исходя из различных форм и размеров частиц, углов и скоростей нельзя предсказать траектории движения этих частиц в равной степени как и места столкновения с поверхностями рабочих лопаток, а также реакцию материала тех же лопаток на соударения различных частиц. Ввиду всего этого можно сделать вывод, что абразивный износ является непредсказуемым процессом, но может отражаться в виде статистических данных относительно поведения и динамики развития этого процесса.

Мероприятия, позволяющие снизить абразивный износ лопаток:

1. Применение специальных накладок или покрытий. Применение покрытий очень эффективно предотвращает влияние абразивного износа.

Неоднократно применяют покрытия из оксида циркония ZrO_2 (керамика), различные сплавы карбидов (карбид кремния или карбид титана), соединения с нитридом и многие другие сплавы.

2. Уменьшение содержания твердых частиц на входе в турбину. Станции, которые работают на твердом топливе больше всего подвержены абразивному износу, так как в горючей смеси могут содержаться частички золы, песка и другие. Для уменьшения их содержания применяют систему фильтрации, устанавливаются циклоны (разделяющие очищенный и запыленный воздух).

3. Своевременное замена или очистка лопаток турбины от различного рода отложений, а также проверка на балансовую устойчивость снижает влияние абразивного износа.

Рассмотрим износостойкие материалы лопаток газовых турбин.

Основными износостойкими материалами являются сплавы с нитридами, боридами и карбидами. Температура плавления боридов нитридов и карбидов в среднем на 1000–2000 К выше от температуры плавления чистых металлов. Также можно сказать и о твердости этих материалов, которая варьируется от 20 до 30 ГПа, а аналогичный показатель у металлов не превышает 10 ГПа. Температура плавления всех элементов, предназначенных для нанесения покрытий, составляет 1700 К и более, что относит их к классу жаростойких металлов и, соответственно, могут применяться для повышения абразивной стойкости первых ступеней ЦВД и ЦСД, где температура свежего пара достигает 550 °С.

За счет суммирования нескольких слоев покрытия обеспечивается наиболее лучшая абразиво- и жаростойкость. Для создания жаростойких покрытий используются жаростойкие материалы, которые имеют весьма малую толщину. В следствии чего абразивная стойкость будет едва ли обеспечена и зависит от многих причин. Граница раздела (покрытие – основа) является самым незащищенным (уязвимым) местом из-за не цельных связей, толщины покрытия и слоев.

Учитывая все выше сказанное был разработан принцип абразивной стойкости покрытия, который базируется на создании металлической матрицы и которая, в свою очередь, характеризуется жаропрочностными свойствами и высокой прочностью. Наиболее часто для повышения жаростойкости применяют никеливые сплавы, особенно сплав на основе никель – хром ($NiCr - XH70Ю$). Данный сплав активно используется в деталях, применяющиеся для температур от 1100–1200 °С. Благодаря тому, что этот никель – хромовый сплав активно производится промышленностью он широко применяется в энергетике. Для снижения абразивного износа применяют сплавы на основе Ti и Cr . На пример $TiAlN$ (титан – алюминий) и CrC (карбид – хром).

Заключение

По итогу абразивный износ рабочих лопаток турбины является очень важной проблемой, которая влияет не только на общую эффективность, но и на безопасную работу самой турбины. Осознание и понимание причин ее возникновения позволяет уменьшить последствия износа и поддерживать производительность на высоком уровне.

Литература

1. Энциклопедия по машиностроению: [сайт]. – Москва, 2002. – URL: <https://zaorotec.ru> (дата обращения: 05.03.2025).
2. Повышение абразивной стойкости лопаточного аппарата первых ступеней цилиндров высокого и среднего давления мощных паровых турбин: [сайт]. – Москва, 2016. – URL: <https://mpei.ru/diss/Lists/FilesDissertations/169-Диссертация.pdf> (дата обращения: 05.03.2025).