

УДК 621.9048.7:62.2.226.2-192

М. К. СМЫСЛОВА, К. С. СЕЛИВАНОВ, А. Д. МИНГАЖЕВ, В. Ю. ГОРДЕЕВ

## ПОВЕДЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЛОПАТКАХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК ПРИ КАПЛЕУДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Рассмотрены подходы, описывающие поведение материала поверхности деталей при каплеударном воздействии. Проведен анализ механизмов каплеударной эрозии и разработаны принципы создания эрозионнстойких покрытий.  
Покрытие; температура; напряжения; эрозия; стойкость

Лопатки последних ступеней паровой турбины, являясь высоконагруженными деталями, работают в сложных условиях каплеударного воздействия. Практически все заводы, выпускающие паровые турбины, ведут экспериментальные и теоретические исследования механизмов эрозии, эрозионной стойкости конструкционных материалов по оценке эрозионной стойкости различных конструкционных материалов и новых методов защиты их от каплеударной эрозии [3]. Однако, несмотря на большое количество научно-практических работ, в настоящее время еще нет единого подхода, описывающего поведение материала при каплеударном воздействии. Данная работа посвящена анализу механизмов каплеударной эрозии и разработке принципов создания эрозионнстойких покрытий.

В турбине рабочим телом является перегретый водяной пар под большим давлением. Проходя через турбину и совершая полезную работу, он охлаждается и превращается в пар низкого давления. В процессе расширения его температура падает ниже точки росы, при этом образуется влага, так что поток рабочей среды, проходящий через последние ступени низкого давления, может содержать до 10–15% воды по массе. Вначале капли воды конденсируются на неподвижных лопатках статора и далее захватываются потоком пара на движущиеся рабочие лопатки ротора.

Входные кромки вращающихся лопаток соударяются с каплями воды со скоростями, близкими к линейной скорости лопаток. Капли влаги, скорость которых составляет лишь малую долю скорости пара, будут соударяться с движущимися лопатками под малым уг-

лом ( $\angle bcd$ , рис. 1). При этом водяные капли движутся с малой скоростью  $\vec{bc}$  относительно скорости пара  $\vec{ac}$ . Скорость соударения капли с лопаткой изображена вектором  $\vec{bd}$ .

В этих условиях работает небольшой участок входной кромки лопатки, но изменение его геометрии значительно влияет на изменение эксплуатационных свойств и на аэродинамику лопатки и турбины.

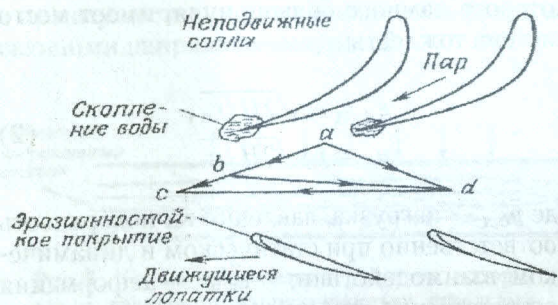


Рис. 1. Схема динамического взаимодействия пара и рабочих лопаток [1]

Через некоторое время на входных кромках образуются многочисленные разрушения от эрозии в виде питтингов или раковин на поверхности. Повреждения особенно значительны в среде влажного пара, содержащего капли воды.

В результате динамического взаимодействия капли с поверхностью в упругом полупространстве материала распространяются три типа волн напряжений: продольные (растяжения), имеющие в стали скорость распространения  $v_1 = 6000$  м/с; поперечные (искажения) со скоростью  $v_2 = 3100$ –3300 м/с и волны Рэлея, распространяющиеся вдоль



поверхности со скоростью, приблизительно 3000 м/с [2].

При соударении капли с полупространством точки его поверхности вне пятна контакта получают цикл напряженного состояния, величина которого меняется синфазно по симметричному циклу. Закон изменения напряжений в точке полупространства в этом случае принимает вид

$$\Delta\sigma(x) = \sigma_0 \exp(-\delta t) \cos(\omega t - kx), \quad (1)$$

где  $\Delta\sigma$  — изменение напряжения по координате  $x$  в единицу времени  $t$ ;  $\sigma_0$  — максимальное действующее напряжение, его амплитуда;  $\omega = 2\pi/T$  — частота колебаний;  $T$  — период колебания, обратный частоте возмущающего воздействия;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $\lambda$  — длина волны;  $\delta$  — декремент затухания, обусловленный структурно-фазовыми свойствами материала рабочей поверхности и определяющий скорость затухания возникающих напряжений в результате внутреннего трения.

Из [4] можно оценить максимальную действующую нагрузку при соударении материальной частицы с поверхностью. При условии, что вся запасенная энергия частицы переходит в энергию взаимодействия, скорость которого намного больше нуля, имеет место система тождеств:

$$\begin{aligned} \varepsilon_d &= \varepsilon_c \sqrt{2H/\varepsilon_c}, \\ p_d &= p_c \sqrt{2H/\varepsilon_c}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $p_{c,d}$  — нагрузка, давление на поверхность соответственно при статическом и динамическом взаимодействии;  $\varepsilon_{c,d}$  — деформация соответственно при статическом и динамическом приложении нагрузки, ударе;  $H$  — высота падения частицы, здесь выступает в роли меры ее кинетической энергии, переходящей в энергию удара.

Выразим введенные переменные следующим образом. Деформация материала поверхности от статического давления частицы ввиду малого веса последней будет вызывать только упругие деформации, определяемые законом Гука:

$$\varepsilon_c = (p_c/E)L = (mg/SE)L, \quad (3)$$

где  $m$  — масса воздействующей частицы;  $E$  — модуль упругости первого рода деформируемого материала;  $g$  — константа;  $L$  — линейный размер рабочей поверхности, вдоль

которого происходит взаимодействие;  $S = \pi r^2$  — площадь взаимодействия при условии, что форма частицы близка к сферической;  $r$  — радиус площадки контакта.

Далее, из условия полного перехода кинетической энергии капли  $U_k$  в потенциальную энергию взаимодействия  $U_n$  имеем  $H = U_n/mg$ , при условии  $U_n = U_k = mv^2/2$  выразим

$$H = v^2/2g. \quad (4)$$

После подстановки выражений (3) и (4) в формулу (2) и упрощения получаем зависимость давления на поверхности  $p_d$  от удара частицы с массой  $m$ , размером  $r$ , движущейся со скоростью  $v$ :

$$p_d = v \sqrt{\frac{Em}{\pi r^2 L}}. \quad (5)$$

Масса водяной капли (принимая во внимание ее сферическую форму и единичную плотность) определяется как  $m = 4\pi r^3/3$ . Отсюда выражение давления (5) при ударе капли  $p_{dk}$  переписывается в виде

$$p_{dk} = 2v \sqrt{\frac{Er}{3L}}. \quad (6)$$

Как видно из полученных формул, давление на входных кромках лопаток при их взаимодействии с твердыми частицами рабочей среды прямо пропорционально их скорости, а также зависит от геометрических размеров частиц, толщины кромок и упругих свойств материала. Согласно статистике [1], разрушение поверхности 90% осмотренных лопаток паровых турбин происходит каплями диаметром 5 мм. Давление  $p$  при ударе такой капли о стальную поверхность со скоростью  $v = 600$  м/с составит более 420 МПа в зависимости от толщины входной кромки. Его необходимо учитывать при выборе материала деталей и покрытия.

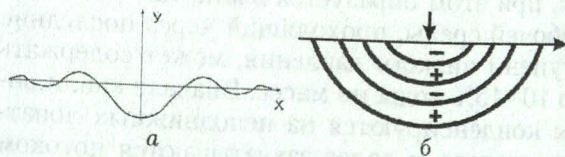


Рис. 2. Гармонические волны, распространяющиеся от центра площадки контакта по поверхности (а) и области растяжения-сжатия (б)

После удара в материале возникает волна переменных гармонических колебаний напряжений, которые сопровождаются возникновением зон растяжения и сжатия (рис. 2, б).



При этом появившиеся напряжения дополнительно накладываются на напряженное состояние материала, обусловленное остаточными поверхностными напряжениями и эксплуатационными нагрузками. При определенном значении  $\Delta\sigma$  в некоторой точке в материале начинают накапливаться структурные дефекты, приводящие к зарождению усталостной трещины.

В результате ударов множества капель о поверхность лопатки образуется деформированный слой материала, изменяется его структурно-фазовое состояние, что приводит к изменению параметров распространения волны (скорости, длины, периода). Последнее обстоятельство определяет различие в условиях распространения продольных волн вдоль поверхностного слоя, рис. 3.



Рис. 3. Схема возникновения растягивающих напряжений в поверхностном слое материала

Кроме распространения поперечных волн напряжений, возникшие продольные волны также накладывают свою картину напряжений на материал лопатки. После прохождения сквозь всю толщину материала они отражаются от противоположной стороны и накладываются сами на себя. При этом в материале лопатки могут образовываться стоячие волны. Для их возникновения должно выполняться условие [3]

$$n = L/\lambda = Lf/v, \quad (7)$$

где  $n = 1, 2, \dots$ ;  $L$  — линейный размер рабочей области лопатки;  $f$  — частота возбуждения колебаний;  $v$  — скорость волны. Ввиду сложной геометрии и переменной толщины по профилю лопатки возникновение таких волн весьма вероятно. Рассмотрим их подробнее.

При возникновении продольной стоячей волны в материале образуются области с максимальной и минимальной, равной нулю, амплитудой смещения частиц, которые соответственно носят названия пучности и узлы, рис. 4. Стоячая волна описывается уравнениями

$$\Delta\sigma(x) = 2\sigma_0 \exp(-\delta t) \cos(kx) \cos(\omega t), \quad (8)$$

координата пучности:

$$x_{\text{пучн.}} = \pm n\lambda/2; \quad (9)$$

координата узла:

$$x_{\text{узла}} = \pm(n + 1/2)\lambda/2, \quad (10)$$

при этом амплитуда колебаний в точках пучностей увеличивается до значения  $\Delta\sigma_{\text{max}} = 2\sigma_0 \exp(-\delta t) \cos(kx)$ , а в узлах изменение напряжений не происходит, т. е.  $\Delta\sigma_{\text{max}} = 0$ .

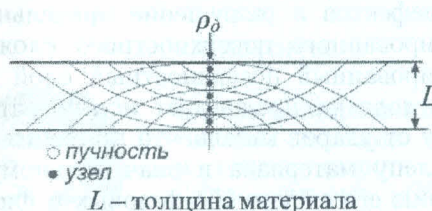


Рис. 4. Схема образования стоячей волны, областей растяжения и сжатия

При работе лопатки многочисленные удары по поверхности будут инициировать и поддерживать некоторую совокупность стоячих волн. Ввиду однородности динамического воздействия, которое обуславливает когерентность возникающих волн, материал по глубине поверхности будет характеризоваться некоторой «слоистостью» в виде участков с преимущественно сжимающими и растягивающими напряжениями, рис. 5.

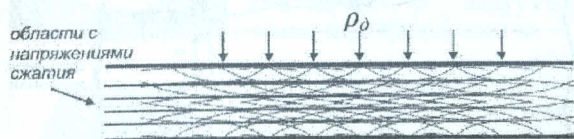


Рис. 5. Схема образования участков материала с различной напряженностью; стрелками обозначено приложение внешней динамической нагрузки  $p_d$

Обобщая все вышесказанное, процесс эрозийного разрушения лопатки в результате ударно-капельного воздействия можно условно поделить на этапы:

1. Первый этап — образование деформированного поверхностного слоя, приводящего к изменению параметров и характера распространения волн. В процессе непрерывного ударно-капельного воздействия в поверхности возникает разнородная по напряженно-деформированному состоянию структура. В слоях, где действующие напряжения превышают предел усталости, начинается процесс усталостного разрушения, возникновение наклепа, рис. 6.



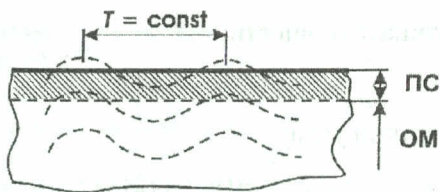


Рис. 6. Первый этап разрушения — образование деформированного поверхностного слоя: пс — поверхностный слой; ом — основной материал

2. Второй этап — накопление усталостных дефектов и разрушение предельно деформированного поверхностного слоя. Деформированный поверхностный слой материала лопатки продолжает испытывать нагрузку от ударов капель, что приводит к перенаклепу материала и значительному изменению его структурно-фазовых и физико-химических свойств. При этом скорости распространения волны в основном материале и в наклепанном поверхностном слое материала лопатки будут различны. В результате этого в деформированном поверхностном слое возникают дополнительные растягивающие напряжения, действующие вдоль него. Возникшие продольные растягивающие напряжения, в свою очередь, обуславливают процесс отслоения материала поверхностного слоя, рис. 7.

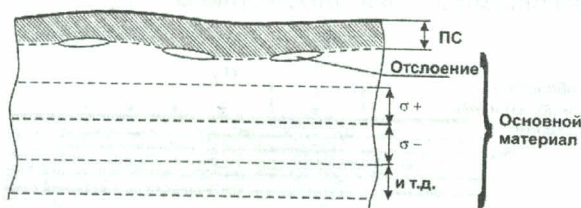


Рис. 7. Второй этап разрушения — предельная деформация материала поверхности и его отслоение: пс — поверхностный слой

3. Третий этап — катастрофическое разрушение поверхности лопатки в результате деградации структуры материала поверхности и лавинообразного образования повреждений. Происходит интенсивное отслоение поверхностного слоя, эрозионное разрушение основного материала, рис. 8.

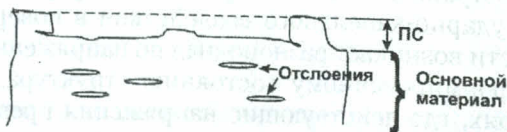


Рис. 8. Третий этап разрушения — катастрофическое разрушение поверхности: пс — поверхностный слой

В соответствии с изложенной моделью эрозионного разрушения поверхности лопатки паровой турбины при ударно-капельном нагружении можно выделить следующие основные причины, вызывающие эрозию лопатки:

- знакопеременное ударное нагружение материала при эксплуатации лопатки;
- образование предельно деформированного поверхностного слоя с отличными от основного материала свойствами;
- возникновение областей растягивающих напряжений в поверхности лопатки в результате различных условий распространения волн в наклепанном поверхностном слое и основном материале;
- образование участков (слоев) в основном материале с различной напряженностью в результате возникновения стоячих волн напряжения при непрерывном внешнем воздействии.

Практика разработки и эксплуатации эрозионностойких покрытий для защиты лопаток паровых турбин, а также вышеизложенный механизм эрозионного разрушения при воздействии высокоскоростных ударов капель позволили сделать предположение о свойствах, которыми должны обладать эрозионностойкие покрытия, работающие в указанных условиях:

- противостоять быстрому накоплению дефектов и разрушению в результате наклепа;
- рассеивать ударную волну;
- соответствовать по защитным (конструктивно-механическим) характеристикам характеру распространения волны, с точки зрения оптимальности защитных свойств;
- иметь максимальную автономность слоев при высокой адгезионной прочности;
- использовать эффекты, связанные с дискретностью покрытия.

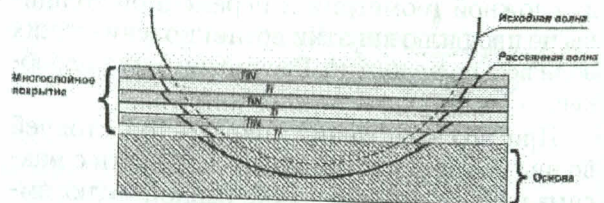


Рис. 9. Изменение характера распространения ударной волны в многослойном покрытии

Согласно приведенным принципам, была создана и практически испытана многослойная конструкция эрозионностойкого покры-



тия. При этом оценивалась следующая модель эксплуатационного поведения такого покрытия. Многослойное покрытие, слои которого имеют различные физические свойства, например плотность  $\rho$ , обладают различной скоростью перемещения волн в этих слоях. Это приводит к рассеиванию энергии волны в покрытии, а следовательно, к уменьшению ее разрушающего эффекта (рис. 9).

Для оценки влияния количества слоев в покрытии на его эрозионную стойкость был разработан и испытан ряд эрозионно-стойких покрытий системы Ti-TiN, 4(Ti-TiN), 4(Ti-Ti<sub>2</sub>N-TiN), 10(Ti-Ti<sub>2</sub>N-TiN). Нанесение покрытий осуществлялось с использованием вакуумных ионно-плазменных и ионно-имплантационных технологий.

Испытания на эрозионную стойкость проводили на стенде Московского энергетического института (МЭИ), результаты испытаний приведены на рис. 10, 11.

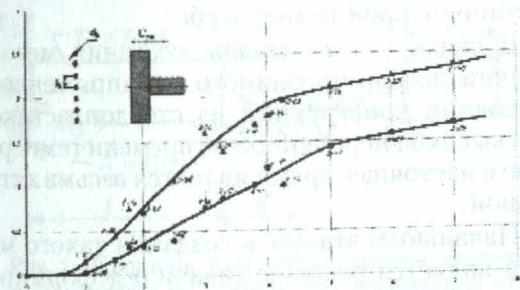


Рис. 10. Кривые кинетики эрозионного износа без покрытия (▲) и с многослойным покрытием (●)

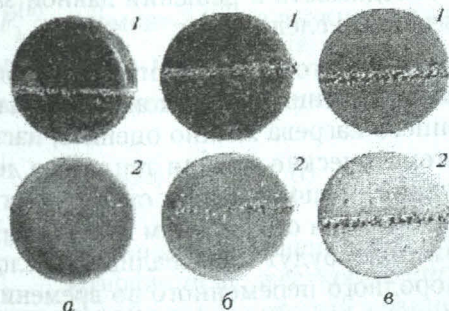


Рис. 11. Образцы после эрозионных испытаний: 1 — без покрытия, 2 — с многослойным покрытием; а — инкубационный период, б — период максимальной скорости износа, в — период установившейся скорости износа

Результаты испытаний показали, что с увеличением количества слоев в эрозионно-стойком покрытии происходит увеличение длительности инкубационного периода эрозионного разрушения (рис. 10), уменьшается скорость эрозии на участке ускоренного развития, а участок стабильного режима разру-

шения протекает при меньшем эрозионном уносе материала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прис К. Эрозия. М.: Мир, 1982. 463 с.
2. Перельман Р. Г., Пряхин В. В. Эрозия паровых турбин. М.: Энергоатомиздат, 1986. 184 с.
3. Элементарный учебник физики / Под ред. Г. С. Ландсберга. М.: Наука, 1986.
4. Тимошенко С. П. Сопrotивление материалов. В 2-х т. М.: Наука, 1965. 480 с.

#### ОБ АВТОРАХ



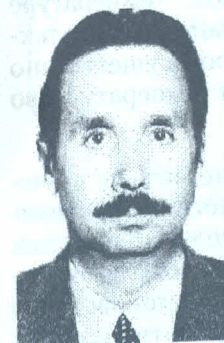
**Смыслова Марина Константиновна**, доц. каф. оборуд. и технол. сварочн. пр-ва. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1978). Канд. техн. наук по технол. электроракетн. двигателям и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 1992). Иссл. в обл. повышения прочн., долговечн. и надежн. деталей.



**Селиванов Константин Сергеевич**, ст. науч. сотр. каф. технол. машиностр. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по технол. машиностр. (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. ионно-имплантац. и вакуумно-плазм. модифицирования.



**Мингажев Аскар Джамилевич**, доц. той же каф. Дипл. инж.-мех. (УНИ, 1977). Канд. техн. наук по нанесению жаростойких покрытий с ДФН на детали ГТД. Иссл. в обл. многослойных вакуумно-плазменных покрытий.



**Гордеев Вячеслав Юрьевич**, вед. инж. той же каф. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1977). Иссл. в обл. многослойных вакуумно-плазменных покрытий.