

УДК 620.193.1:621.165.51:669.018

Прогнозирование эрозионного износа титановых сплавов в условиях длительного каплеударного воздействия

В. Н. Варавка, О. В. Кудряков, А. Ф. Медников

(Донской государственный технический университет)

На основе сравнительного анализа данных стендовых испытаний образцов, изготовленных из титанового сплава ТС-5, построена аппроксимационная модель для определения величины износа рабочих лопаток паровых турбин в условиях длительной эксплуатации при каплеударной эрозии.

Ключевые слова: каплеударная эрозия, усталость металла, износ, лопатки турбин, титановый сплав, аппроксимация, моделирование.

Введение. Исследованию эрозионного износа лопаток паровых турбин посвящено множество научных публикаций. Однако среди них очень непросто обнаружить исследования прогностического плана, которые моделировали бы поведение материала лопаток при длительных сроках эксплуатации [1–6]. Трудность построения расчётных оценочных моделей обусловлена рядом обстоятельств, главным из которых является большое число параметров, которые влияют на износ и которые необходимо учитывать при моделировании. Среди параметров, формирующих износ лопаточного аппарата, такие разнородные характеристики, как конструктивные особенности и режим работы турбины, наличие и устойчивость жидких плёнок на различных элементах проточной части турбин, включая поверхности лопаток, геометрия лопаток, кинетические параметры двухфазного потока, состав и дисперсность жидкой фазы потока и её распределение по поверхности лопатки, структура и свойства материала лопаток. Следует также добавить такие трудно поддающиеся учёту динамические явления, как вибрация, динамические напряжения в конструкции, постоянно меняющийся рельеф разрушающихся функциональных поверхностей. Дополнительная сложность заключается в том, что эмпирические данные об износе лопаток мощных паровых турбин не находятся в свободном доступе. Их можно получить только при плановых осмотрах и ремонтах турбин, промежутки между которыми составляют достаточно длительные сроки, регламентированные нормативными документами Минэнерго.

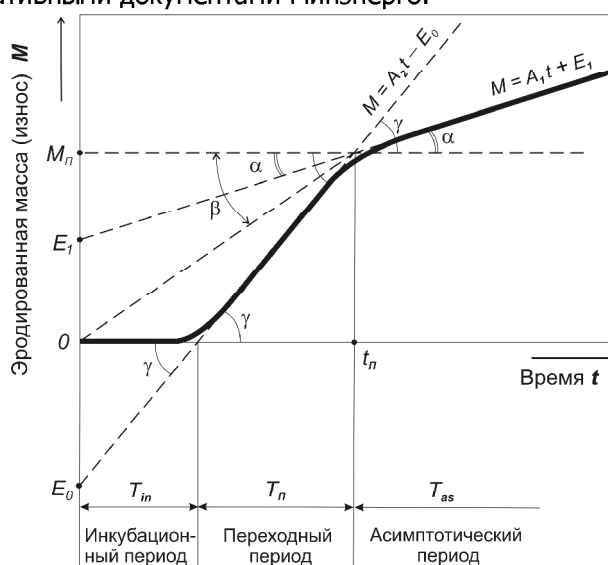


Рис. 1. Общий вид кривой эрозионного износа и её основные параметры

При перечисленных сложностях основным источником опытных данных по каплеударной эрозии служат обычно стендовые испытания специальных образцов. Результатом таких испытаний является кривая эрозионного изнашивания, типичный вид которой приведён на рисунке 1.

Каплеударный эрозионный износ имеет три характерных периода: инкубационный, переходный и асимптотический. При относительно небольшом количестве ударов капель, которое возможно получить на стенде, каждый из них является практически линейным. Если для инкубационного и переходного периодов линейное приближение вполне корректно [7—9], то данные по длительной эксплуатации лопаток показывают, что кривая износа на асимптотической стадии далека от линейной. Каплеударный эрозионный износ формируется под действием локальных циклических ударных нагрузок, поэтому в значительной степени является усталостным процессом и описывается сложной степенной функцией [10—12]. В силу этого обстоятельства, а также из-за специфики проведения испытаний (фронтальный характер соударений, фиксированный размер капли, плоская поверхность образцов и т. д.) и ограниченного ресурса времени работы испытательного стенда, которое не превышает нескольких часов, по полученным кривым износа трудно делать прогнозы о долгосрочном износе лопаток.

Таким образом, *цель настоящей работы* может быть определена как построение модели для оценки эрозионного износа материала лопаток при длительной эксплуатации (десятков тыс. часов) на основе данных стендовых испытаний образцов из этих материалов. Причём из множества приведённых ранее параметров, формирующих износ, модель основывается на свойствах материала и параметрах соударений. Наиболее корректным её использованием представляется сравнительная оценка износа различных материалов по отношению к наиболее типичному материалу, эрозионный износ которого принимается за единицу.

Экспериментальная часть. Для испытаний использовали образцы особой грибовидной формы из титанового сплава ТС-5 (в двухфазном $\alpha+\beta$ -состоянии с твёрдостью 2565 МПа). Каплеударная эрозия моделировалась на уникальном эрозионном стенде НИУ-МЭИ «Эрозия-М» [7] в виде воздействия на образец монодисперсного водно-капельного потока, схема которого показана на рис. 2. Параметрами соударения капель с мишенью (поверхностью образца) являются диаметр d_k (или радиус R) капли и скорость образца V_0 .

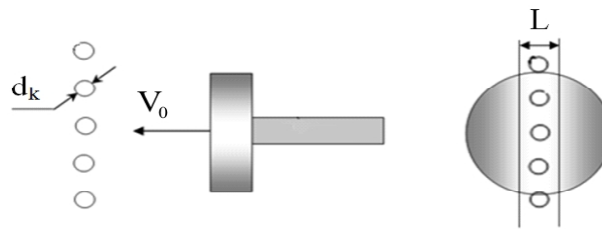


Рис. 2. Схема взаимодействия образцов с каплями жидкости: L — ширина эрозионного следа-дорожки

Результаты проведённых испытаний представлены на рисунке 3 в виде кривых эрозионного изнашивания. Величины, расположенные по осям абсцисс на графиках, характеризуют интенсивность воздействия капель эродента (воды), выраженную в различных взаимопереводимых единицах. Аналогичным образом по осям ординат расположена по-разному выраженная интенсивность износа образцов. Важным результатом экспериментов является то, что переходный и асимптотический периоды эрозионного износа характеризуются каждый своим семейством линий, начинающихся в собственном «полюсе» — E_0 для переходного и E_1 для асимптотического периодов, а скорость изнашивания, характеризуемая наклоном соответствующей линии к оси абсцисс, определяется параметрами соударения V_0 и d_k . При этом положение каждого из «полюсов» E_0 и E_1 определяется структурой и свойствами материала [13, 14].

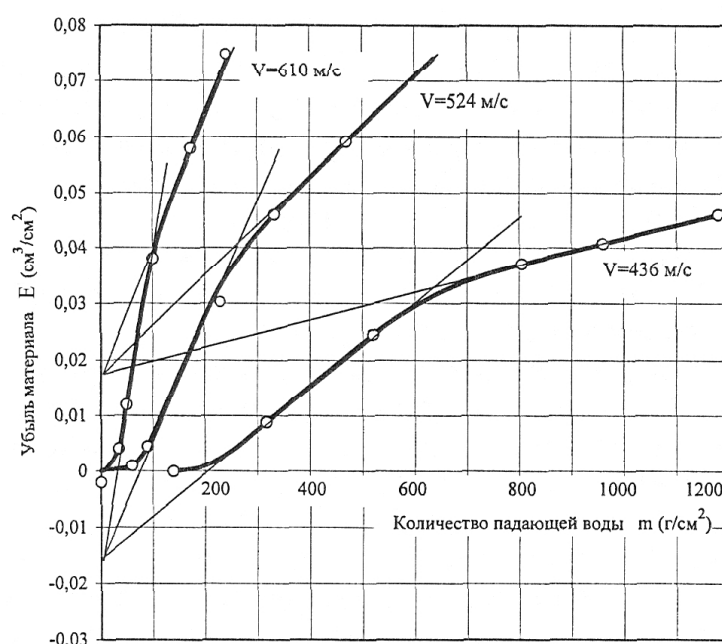


Рис. 3. Зависимости каплеударного эрозионного износа образцов титанового сплава TC-5 по данным стендовых испытаний при $d_k = 270$ мкм и $V \equiv V_0$

Аналитическая часть. В общем виде закон ударно-усталостного изнашивания обычно выражается в дифференциальной форме [10]:

$$dW = (\partial W / \partial N) \cdot dN + (\partial W / \partial \sigma) \cdot d\sigma \quad (1)$$

где W — объёмный износ (в дальнейшем экспериментальные значения объёмного износа обозначаются буквой E , а расчётные — буквой W); σ — нормальное напряжение; N — число циклов.

Если износ не зависит от геометрии контакта, то правая часть уравнения (1) становится малой. Линейная зависимость W от N имеет место, например, при ударно-абразивном изнашивании [11]. В более общем случае эта зависимость нелинейна [10, 12]:

$$W = k \cdot N^n \cdot \sigma^m \quad (2)$$

где k , n , m — коэффициенты.

Нормальное напряжение σ (как и максимальное контактное давление) определяется максимальной силой удара P_m , которая в свою очередь зависит от скорости соударения V_0 , геометрии контакта и свойств материала.

Максимальная контактная нагрузка P_m в зоне соударения определяется по Эвансу [15] из выражения, фактически эквивалентного кинетической энергии капли:

$$P_m = 0,5 \cdot \pi \cdot V_0^2 \cdot R^2 \cdot \rho \quad (3)$$

Для вычисления давления, развиваемого силой P_m на поверхности материала в пределах площади контакта капли, отнесём P_m к площади среднего сечения капли $S = \pi \cdot R^2$. Получим соответствующее напряжение на поверхности материала Q_m в момент соударения:

$$Q_m = 0,5 \cdot V_0^2 \cdot \rho \quad (4)$$

Ранее уже говорилось, что полностью описать какую-либо кривую эрозии (из представленных на рисунках 1 или 3) с помощью одной математической функции невозможно, поэтому каждую стадию эрозии необходимо рассматривать по отдельности и для каждой определить свою функцию.

1. Для инкубационной стадии примем следующую усталостную модель: под действием давления, развиваемого каждой каплей Q_m , происходит микропластическая деформация или даже (возмож-

но) образуется радиальная субмикротрещина длиной l_R ; она имеет размер, не превышающий линию Френча на кривой усталости данного материала; каждый удар капли по гипотезе Пальмгрена — Майнера накапливает деформацию, напряжения и увеличивает трещину; в какой-то момент это приводит к зарождению боковой трещины l_L ; к моменту начала эрозионного износа T_{in} (окончание инкубационной стадии; см. рисунок 1) должна сформироваться боковая трещина критического размера $l_L = l_C$, вызывающая разрушение в виде дискообразного фрагмента — первой частицы износа объёмом V_i (для хрупких материалов типа стекла эта частица может иметь форму конуса Герца); количество циклов нагружения (ударов капли) к этому моменту известно — это количество эродента T_{in} на графике, $[кг/м^2]$, соответствующее началу процесса потери массы при соответствующем значении V_0 . Чтобы выразить T_{in} в числе циклов усталостного нагружения N_e (то есть в числе капель, попавших в одну точку к моменту T_{in}) и тем самым окончательно перейти на язык моделей усталости и циклического нагружения, воспользуемся выражением:

$$N_e := \frac{3 \cdot T_{in}}{4 \cdot \rho \cdot R} \quad (5)$$

Экспериментальные (из рисунка 3) и расчётные (по выражениям, приводимым далее в тексте) значения характерных точек всех кривых изнашивания сплава ТС-5, сведены в таблицу 1 (см. далее).

Известно, что любая кривая усталости в логарифмических координатах $\lg \sigma — \lg N$ представляет собой наклонную прямую (линейная функция), в том числе и *линия начала эрозионного износа* T_{in} . В логарифмических координатах для определения такой функции достаточно знать координаты двух точек, через которые она проходит. С другой стороны, в линейных координатах $\sigma — N$ функция является степенной (см. выражение (2)). То есть, зная координаты двух точек каждой кривой износа, можно определить показатель наклона m_e линии начала эрозионного износа T_{in} на графике усталости (т. е. при износе $E = 0 \text{ см}^3/\text{см}^2$ для различных значений V_0 на рисунке 3).

Так, показатель наклона m_e линии начала эрозионного износа T_{in} на диаграмме усталости можно рассчитать по выражению (6), где (σ_{e1}, N_{e1}) — координаты точки на кривой усталости (для определения m_e необходимо знать координаты, как минимум, двух таких точек, рисунок 3 даёт нам три таких точки — для каждого значения V_0 , а в качестве σ_e принимается значение Q_m для соответствующего V_0):

$$m_e := \frac{\lg \left(\frac{N_{e1}}{N_{e2}} \right)}{\lg \left(\frac{\sigma_{e2}}{\sigma_{e1}} \right)} \quad (6)$$

Вычисления дают следующее значение показателя наклона линии начала эрозионного износа T_{in} на диаграмме усталости титанового сплава ТС-5: $m_e = 2,75$. Тогда сама линия напряжений начала износа σ_{eF} в зависимости от количества циклов нагружения N_e будет задана выражением:

$$\sigma_{eF}(N_e) := 10^{\Omega(N_e)},$$

где

$$\Omega(N_e) := \lg(\sigma_{eR}) - \frac{\lg \left(\frac{N_e}{N_{eR}} \right)}{m_e} \quad (7)$$

где $N_{eR} = 3,3 \cdot 10^5$ — предельное число циклов малоциклового нагружения, в пределах которого применима данная расчётная модель для инкубационной стадии; σ_{eR} — значение предела капельно-ударной усталости, $[МПа]$, оно соответствует минимальному значению внешнего на-

пряжения, необходимого для начала пластической деформации (для начала скольжения дислокаций под действием касательного напряжения τ^* в плоскости скольжения); для титана значение σ_{eR} составляет 28 МПа [16].

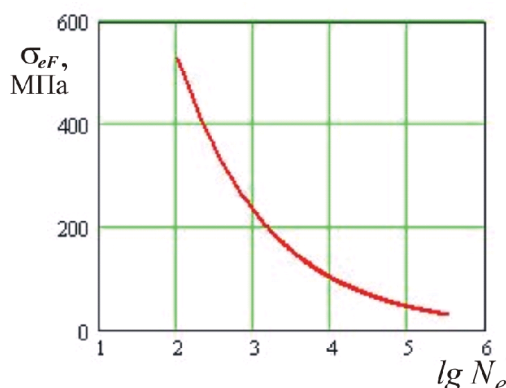


Рис. 4. Зависимость напряжений σ_{eF} начала эрозионного износа сплава ТС-5 в зависимости от количества циклов нагружения N_e (ударов капель)

Расчётный график линии старта эрозионного износа σ_{eF} показан на рисунке 4. График характерен тем, что при значении $N = 1$ (в точке пересечения графика с осью напряжений) даёт значение напряжения $\sigma_{eF} = 2826$ МПа, что соответствует уровню твёрдости сплава ТС-5 (измеренная твёрдость составляла $H = 2565$ МПа). На обычных кривых усталости (получаемых при испытаниях по методикам ГОСТ) эта точка соответствует обычно пределу прочности σ_B . Для эрозионного же износа получается значение почти в 3 раза выше σ_B , что вполне отвечает теоретическим положениям о поверхностном характере явлений эрозионного изнашивания и необходимости преодоления барьера напряжений уровня твёрдости материала для начала эрозионного износа.

Для определения начальной точки эрозионного износа, лежащей на горизонтальной оси $E = 0$ на рисунке 3, можно воспользоваться выражением (8), в соответствии с которым рассчитывается, сколько понадобится эродента, $[кг/м^2]$, для того, чтобы стартовал процесс износа:

$$T_{in}(R, V_0) := \frac{4}{3} \cdot \rho \cdot R \cdot N_{eR} \cdot \left(\frac{\sigma_{eR}}{Q_m(R, V_0)} \right)^{m_e} \quad (8)$$

где все значения уже определялись ранее, а T_{in} и Q_m выражены как функции от параметров соударения R и V_0 .

То же самое можно определить в циклах нагружения (в количестве ударов капель, попавших в одну точку к моменту начала износа):

$$N_{in}(R, V_0) := N_{eR} \cdot \left(\frac{\sigma_{eR}}{Q_m(R, V_0)} \right)^{m_e} \quad (9)$$

Как показывают расчётные данные, приведённые в таблице 1, выражение (8) обеспечивает высокую степень соответствия результатов расчёта с экспериментальными данными рисунка 3.

2. Для асимптотической стадии в соответствии с моделью малоциклового усталости выполнены аналогичные (как и для инкубационной стадии) расчёты по определению показателя наклона кривых усталости.

Следует отметить, что, как свидетельствуют данные таблицы 1, кривые эрозионного износа, представленные на рисунке 3, практически полностью лежат в области малоциклового нагружения. Это объясняется тем, что они получены в лабораторных условиях на испытательном стенде. Рабочие же лопатки паровых турбин должны служить не один год, поэтому асимптотическая

стадия таких изделий должна рассчитываться по моделям многоциклового усталости. Принципиальная разница состоит в том, что кривые износа в малоциклового области близки к линейной функции (или к степенной, но с показателем степени, близким к единице), как это и следует из рисунка 3, а износ при многоциклового усталости описывается степенной функцией с показателем, далёким от единицы (из-за чего, собственно, эта стадия и называется асимптотической).

Таблица 1

Числовые значения экспериментальных и расчётных параметров кривых эрозионно-капельного износа сплава TC-5 (рис. 3, радиус капель $R = 135$ мкм)

Скорость соударения V_0 , м/с	610	524	436
Напряжение удара $Q_m = \sigma_{ef}$, МПа	186	137	95
Окончание инкубационной стадии: расход эродента $T_{in} \equiv m_{in}$, г/см ² (при $E = 0$ см ³ /см ²)	32	75	203
То же в количестве соударений N_{in} при $E = 0$ см ³ /см ² , циклов	1778	4166	11278
Начало асимптотической стадии: расход эродента $T_{AS} \equiv m_{AS}$, г/см ²	100	265	637
То же в числе соударений N_{AS} , циклов	5556	14722	35388
То же в потерях металла E_{AS} , см ³ /см ²	0,04	0,013	0,03267
Переходная стадия: расход эродента $m_{0,02}$ при $E = 0,02$ см ³ /см ² , г/см ²	62,5	162	458
То же в числе соударений $N_{0,02}$, циклов	3472	9000	25440
Асимптотическая стадия: расход эродента $m_{0,04}$ при $E = 0,04$ см ³ /см ² , г/см ²	100	252	923
То же в числе соударений $N_{0,04}$, циклов	5556	14000	51280
Асимптотическая стадия: расход эродента $m_{0,044}$ при $E = 0,044$ см ³ /см ² , г/см ²	121	330	1177
То же в числе соударений $N_{0,044}$, циклов	6722	18330	65390

Поэтому здесь мы рассматриваем асимптотическую стадию эрозионного изнашивания в соответствии лабораторными данными рисунка 3 на основе малоциклового модели. Далее же, рассматривая эрозию рабочих лопаток, воспользуемся многоциклового моделью (см. п. 4).

Итак, на базе малоциклового модели по аналогии с методикой расчёта инкубационной стадии, рассмотренной выше, выполнены расчёты для трёх точек кривых эрозионного износа (по одной на каждой кривой рисунка 3), соответствующих значению износа материала $E = 0,04$ см³/см², и трёх точек при $E = 0,044$ см³/см² (см. таблицу 1). Получено значение *показателя наклона линии асимптотической* стадии эрозионного износа в малоциклового области на диаграмме усталости титанового сплава TC-5: $m_e = 3,38$.

3. Для эрозионной кривой на переходной стадии используем линейную аппроксимацию, что для достаточно короткого участка, находящегося в малоциклового области, вполне допустимо. В расчётной модели ставилась задача нахождения расчётным путём точки начала асимптотической стадии (значения T_{AS} , N_{AS} , m_{AS} , E_{AS} в таблице 1 и на рисунке 3). Поскольку эта точка для любой скорости соударений лежит в области малоциклового усталости, она вычислялась как точка пересечения линейных аппроксимационных функций переходной и асимптотической стадий. Эти функции даны на рисунке 1, там они пересекаются в точке с координатами (t_{π}, M_{π}) . В качестве расчётных выражений использованы:

- функция износа на переходной стадии в зависимости от числа соударений N_e :

$$W_p(N_e) := \frac{E_0}{N_{in}(R, V_0)} \cdot N_e - E_0 \quad (10)$$

- то же на асимптотической стадии вблизи точки (t_{π}, M_{π}) :

$$W_{ASL}(N_e) := \frac{E_0}{N_{in}(R, V_0) \cdot k_{dr}} \cdot N_e + E_1 \quad (11)$$

где $k_{dr} = \tan \gamma / \tan \alpha$ — коэффициент дробления капель (углы γ и α см. на рисунке 1); величина N_{in} входит в выражения (10) и (11) как функция от параметров соударения (R, V_0); функция W эквивалентна E на рисунке 3; индекс L у функции W_{AS} означает линейную аппроксимацию.

Пример расчёта для значений $R = 135$ мкм; $V_0 = 436$ м/с; $E_0 = 160$ мкм; $E_1 = 177$ мкм; $k_{dr} = 3,07$ представлен на рисунке 5. График показывает, что слева от точки пересечения эрозия развивается по линии переходной стадии 1, а справа — по линии асимптотической стадии 2.

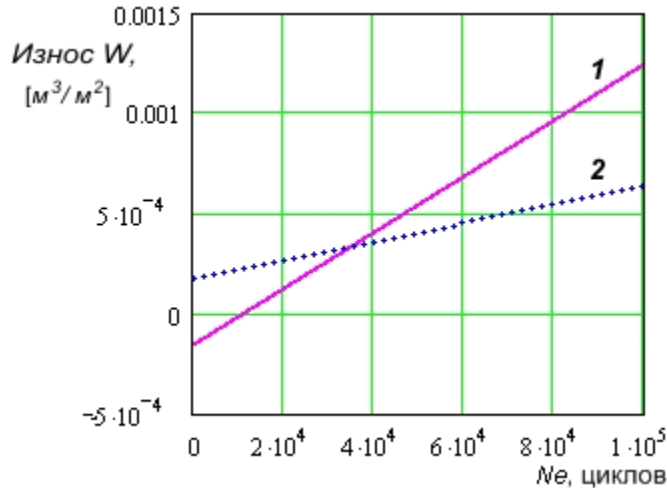


Рис. 5. Зависимость износа W , $[м³/м²]$, сплава ТС-5 при скорости соударений $V_0 = 436$ м/с на переходной 1 и на асимптотической 2 стадиях эрозии от количества циклов нагружения N_e (ударов капель)

Точка начала асимптотической стадии при линейной аппроксимации эрозионной кривой представляет собой точку пересечения двух прямых переходной и асимптотической стадий на рисунке 5. Условием для нахождения этой точки является равенство $W_p(N_e) = W_{ASL}(N_e)$, из которого находятся:

- абсцисса точки в циклах нагружения (в ударах капель):

$$N_{AS}(R, V_0) := N_{in}(R, V_0) \cdot \frac{1 + \frac{E_1}{E_0}}{1 - \frac{1}{k_{dr}}} \quad (12)$$

- абсцисса точки в единицах массы эродента, $[кг/м²]$:

$$T_{AS}(R, V_0) := T_{in}(R, V_0) \cdot \frac{1 + \frac{E_1}{E_0}}{1 - \frac{1}{k_{dr}}} \quad (13)$$

Ордината точки находится простой подстановкой значения N_{AS} , полученного из выражения (12), в выражение (11) в качестве N_e . Так, для исходных данных, при которых получен график (5), точка начала асимптотической стадии имеет следующие расчётные координаты: $N_{AS} = 35610$ циклов; $T_{AS} \equiv m_{AS} = 6410$ кг/м² = 641 г/см²; $W_{ASL} \equiv V_{AS} = 3,4 \cdot 10^{-4}$ м³/м² = 0,034 см³/см². Сравнение с данными таблицы 1 даёт высокую степень совпадений расчётных и экспериментальных значений.

Физическая сущность рассматриваемой точки начала асимптотической стадии состоит в формировании эрозионно-стойкого рельефа, приводящего к дроблению капель и замедлению скорости эрозии [13].

4. Для асимптотической стадии основная задача работы была сформулирована как нахождение математической функции для описания величины эрозионного износа в соответствии с моделью многоциклового усталости. Сложность задачи состояла в том, чтобы единая функция максимально точно описывала как малоциклового этап асимптотической стадии в районе точки (t_n, M_n) рисунка 1, так и многоциклового этап в приближении к эксплуатационному пределу лопатки.

Линейная аппроксимация асимптотической стадии эрозии, которой мы воспользовались ранее (см. п. 2), возможна только на самом раннем этапе этой стадии, когда эрозия находится в малоциклового области, например, в окрестности точки (t_n, M_n) рисунка 1. Это допущение мы и использовали при вычислении координат точки начала асимптотической стадии (t_n, M_n) . Для прогнозирования многоциклового эрозии рабочих лопаток линейная аппроксимация невозможна. В этом можно легко убедиться, просчитав потерю массы (или объёма) лопатки по выражению (11). Даже для минимального ресурса работы лопатки 50000 часов, предусмотренного ГОСТом (при рассматриваемых скоростях соударения $V_0 = 250...613$ м/с это составляет около 5,7 лет непрерывной работы), эрозионный износ, вычисленный по линейному закону, превышает толщину лопатки в несколько раз.

В результате исследований для прогнозирования износа титановых сплавов в модели многоциклового нагружения предложена следующая аппроксимационная функция для величины эрозионного износа W_{AS} в зависимости от количества соударений N_e (числа циклов нагружения):

$$W_{AS}(N_e) := \frac{E_1 \cdot (Q_m(R, V_0))^{k_{dr}} \cdot N_e^{\frac{1}{m_{eAS}}}}{\sigma_{eR}^{k_{dr}} \cdot N_{eR}^{\frac{1}{m_{eAS}}}} - E_0 \quad (14)$$

где все величины встречались ранее в тексте, пояснения требуют лишь m_{eAS} и N_{eR} ; первая из них $m_{eAS} = 3,38$ — показатель наклона линии асимптотической стадии эрозионного износа в малоциклового области на диаграмме усталости сплава ТС-5, был определён ранее (см. п. 2); $N_{eR} = (2...3) \cdot 10^{10}$ — предельное число циклов («база») многоциклового нагружения, в пределах которого применима данная расчётная модель для асимптотической стадии; в данном случае за «базу» принимается срок эксплуатации лопаток в 50000 часов непрерывной работы; величина N_{eR} встречалась в формуле (7), но там она представляла собой «базу» малоциклового усталости.

Аппроксимационная функция W_{AS} по выражению (14) определяет объём эродированного материала, $[м^3/м^2]$, в зависимости от количества ударов капель N_e в предположении, что удаление материала происходит под циклическим действием напряжения Q_m , а глубина эрозионной повреждаемости определяется свойствами материала (E_0) и сформированным рельефом (E_1), который определяет степень дробления капель на асимптотической стадии (k_{dr}). Функция W_{AS} начинается в точке E_0 (в области отрицательных значений E), проходит максимально близко к точке начала асимптотической стадии (точка (t_n, M_n) на рисунке 1) и даёт устойчивую корреляцию с линейной функцией W_{ASL} в области малоциклового нагружения (т. е. в начале асимптотической стадии). Прогностическая функция W_{AS} не обеспечивает совпадения с кривой эрозионного изнашивания на начальных (инкубационной и переходной) стадиях, но хорошо коррелирует с эмпирическими данными износа лопаток при длительной эксплуатации.

В качестве расчётного примера на рисунке 6 представлена аппроксимационная функция W_{AS} сплава ТС-5, полученная для тех же исходных данных, что и функции W_P и W_{ASL} на рисунке 5.

В хорошем соответствии расчётных и экспериментальных результатов можно убедиться из сравнения данных рисунка 6 б и таблицы 1.

В заключение приведём результаты (см. рисунок 7) аппроксимации величины эрозионного износа сплава ТС-5 в районе точки начала асимптотической стадии (точка (t_n, M_n) на рисунке 1),

выполненные с помощью различных функций. Из сравнения графиков на рисунке 7 ясно, что для оценки величины эрозионного износа рабочих лопаток паровых турбин в пределах срока эксплуатации линейная аппроксимация не годится из-за непомерно высоких значений износа, получаемых при большом числе циклов нагружения. Линейные функции могут быть использованы только в области малоциклового нагружения (главным образом, для переходной стадии), степенная же аппроксимационная функция W_{AS} может быть рекомендована для прогнозирования эрозионного износа в многоцикловой области вплоть до ресурса лопаток 70...100 тыс. часов эксплуатации.

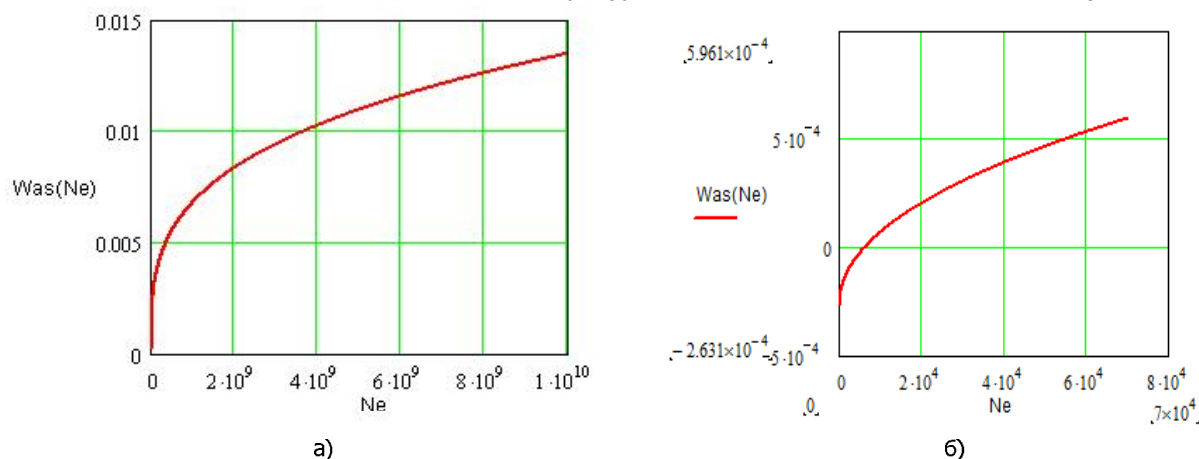


Рис. 6. Зависимость износа W_{AS} [$\text{м}^3/\text{м}^2$], от количества циклов нагружения N_e (ударов капель) на асимптотической стадии каплеударной эрозии сплава ТС-5 при скорости соударений $V_0 = 436$ м/с:
а — в интервале многоциклового усталости; б — в пределах зоны малоциклового усталости

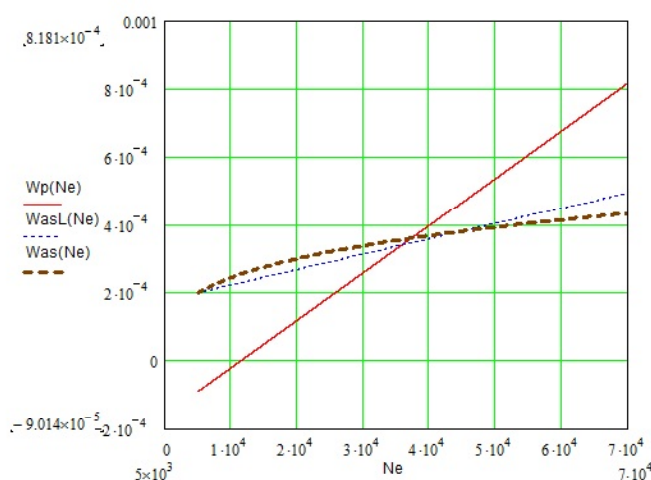


Рис. 7. Аппроксимация величины износа W , [$\text{м}^3/\text{м}^2$], сплава ТС-5 при скорости соударений $V_0 = 436$ м/с в условиях каплеударной эрозии с помощью различных функций: линейных W_P и W_{SL} — для переходной и асимптотической стадий соответственно, а также сложной степенной функции W_{AS} — для асимптотической стадии

Заключение. Поставленная в работе цель реализована в виде аппроксимационной функции W_{AS} , позволяющей на основе усталостной модели с достаточной степенью точности определять износ материала турбинных лопаток при длительных сроках эксплуатации, опираясь на данные кратковременных стендовых испытаний. Задача решена в программной оболочке MathCAD, предназначенной главным образом для исследовательских целей. Для решения прикладных задач на базе выполненных исследований целесообразно методики стендовых эрозионных испытаний дополнить специализированной компьютерной программой по прогнозированию величины эрозионного

износа рабочих лопаток турбин при длительных сроках эксплуатации. В этом направлении в настоящее время авторы и продолжают свою работу.

Представленные результаты получены в рамках выполнения научно-исследовательских работ по Государственному контракту № 02.740.11.0813.

Библиографический список

1. Бараненко, В. И. Использование программных средств для расчёта эрозионно-коррозионного износа элементов оборудования трубопроводных систем АЭС / В. И. Бараненко, М. Б. Бакиров, Ю. А. Янченко и др. // Теплоэнергетика. — 2003. — № 11. — С. 21—24.
2. Варавка, В. Н. Закономерности и параметры каплеударной эрозии титановых сплавов / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков, Ал. Ф. Медников, В. А. Ирха // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2011. — № 6. — С. 92—98.
3. Варавка, В. Н. Прочность и механизмы разрушения высокопластичных материалов при воздействии дискретного водно-капельного потока / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков // Вестник ДГТУ. — 2011. — Т. 11. — № 8 (59). — Вып. 2. — С. 1376—1384.
4. Виноградов, В. Н. Изнашивание при ударе / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, А. Ю. Албагачиев. — М.: Машиностроение, 1982. — 192 с.
5. Дергачёв, К. В. Вычислительный комплекс для математического моделирования кинетики эрозионных процессов во влажнопаровых турбомашинах / К. В. Дергачёв, С. Р. Симонян, А. В. Лагерев // Математическое моделирование в научных исследованиях: Материалы Всероссийской научной конференции. — Ставрополь, 2000. — Ч. 1. — С. 194—197.
6. Дергачёв, К. В. Электронная система прогнозирования эрозии рабочих лопаток турбин атомных станций / К. В. Дергачёв // Изв. вузов. Ядерная энергетика. — 2001. — № 3. — С. 3—13.
7. Лагерев, А. В. Вероятностное прогнозирование эрозии в системах технической диагностики влажнопаровых турбомашин / А. В. Лагерев // Изв. РАН. Энергетика. — 1997. — № 2. — С. 134—143.
8. Поваров, О. А. Исследование эрозионного износа рабочих лопаток паровых турбин / О. А. Поваров, Б. Станиша, В. А. Рыженков // Теплоэнергетика. — 1988. — № 4. — С. 66—69.
9. Рыжов, Э. В. Контактное взаимодействие твёрдых тел при статических и динамических нагрузках / Э. В. Рыжов, Ю. В. Колесников, А. Г. Сулов. — Киев: Наукова думка, 1982. — 172 с.
10. Селезнёв, Л. И. Эрозионный износ конструкционных материалов / Л. И. Селезнёв, В. А. Рыженков // Технология металлов. — 2007. — № 3. — С. 19—24.
11. Селезнёв, Л. И. Феноменология эрозионного износа материала конструкционных сталей и сплавов жидкими частицами / Л. И. Селезнёв, В. А. Рыженков, А. Ф. Медников // Теплоэнергетика. — 2010. — № 9. — С. 12—16.
12. Селезнёв, Л. И. Оценка длительности инкубационного периода эрозионного износа конструкционных материалов / Л. И. Селезнёв, В. А. Рыженков // Теплоэнергетика. — 2005. — № 4. — С. 61—63.
13. Томаров, Г. В. Моделирование физико-химических процессов эрозии-коррозии металлов в двухфазных потоках / Г. В. Томаров, А. А. Шинков // Теплоэнергетика. — 2002. — № 7. — С. 7—17.
14. Фрост, Г. Дж. Карты механизмов деформации: пер. с англ. / Г. Дж. Фрост, М. Ф. Эшби. — Челябинск: Металлургия, 1989. — 328 с.
15. Engel, P. A. Impact Wear of Materials. — Amsterdam, Oxford, New-York: Elsevier Scientific publishing company, 1976. — 340 p.
16. Evans, A. G. Impact damage in brittle materials in the elastic-plastic response regime / A. G. Evans, M. E. Guiden, M. Rosenblatt // Proc. Roy. Soc., Lond., Ser. A. — 1978. V. 361. N 1706. P. 343—365.

Материал поступил в редакцию 01.12.2011.

References

1. Baranenko, V. I. Ispol'zovanie programmny'x sredstv dlya raschyota e'rozionno-korrozionnogo iznosa e'lementov oborudovaniya truboprovodny'x sistem AE'S / V. I. Baranenko, M. B. Bakirov, Yu. A. Yanchenko i dr. // *Teploe'nergetika*. — 2003. — # 11. — S. 21—24. — In Russian.
2. Varavka, V. N. Zakonomernosti i parametry' kapleudarnoj e'rozii titanovy'x splavov / V. N. Varavka, O. V. Kudryakov, Al. F. Mednikov, V. A. Irxa // *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Texnicheskie nauki*. — 2011. — # 6. — S. 92—98. — In Russian.
3. Varavka, V. N. Prochnost' i mexanizmy' razrusheniya vy'sokoplastichny'x materialov pri vozdejstvii diskretnogo vodno-kapel'nogo potoka / V. N. Varavka, O. V. Kudryakov // *Vestnik DGTU*. — 2011. — T. 11. — # 8 (59). — Vy'p. 2. — S. 1376—1384. — In Russian.
4. Vinogradov, V. N. Iznashivanie pri udare / V. N. Vinogradov, G. M. Sorokin, A. Yu. Albagachi-ev. — M.: Mashinostroenie, 1982. — 192 s. — In Russian.
5. Dergachyov, K. V. Vy'chislitel'ny'j kompleks dlya matematicheskogo modelirovaniya kinetiki e'rozionny'x processov vo vlazhnoparovy'x turbomashinax / K. V. Dergachyov, S. R. Simonyan, A. B. Lagerev // *Matematicheskoe modelirovanie v nauchny'x issledovaniyax: Materialy' Vserossijskoj nauchnoj konferencii*. — Stavropol', 2000. — Ch. 1. — S. 194—197. — In Russian.
6. Dergachyov, K. V. E'lektronnaya sistema prognozirovaniya e'rozii rabochix lopatok turbin atomny'x stancij / K. V. Dergachyov // *Izv. vuzov. Yadernaya e'nergetika*. — 2001. — # 3. — S. 3—13. — In Russian.
7. Lagerev, A. B. Veroyatnostnoe prognozirovanie e'rozii v sistemax texnicheskoy diagnostiki vlazhnoparovy'x turbomashin / A. V. Lagerev // *Izv. RAN. E'nergetika*. — 1997. — # 2. — S. 134—143. — In Russian.
8. Povarov, O. A. Issledovanie e'rozionnogo iznosa rabochix lopatok parovy'x turbin / O. A. Povarov, B. Stanisha, V. A. Ry'zhenkov // *Teploe'nergetika*. — 1988. — # 4. — S. 66—69. — In Russian.
9. Ry'zhov, E'. V. Kontaktirovanie tvordy'x tel pri staticheskix i dinamicheskix nagruzkax / E'. V. Ry'zhov, Yu. V. Kolesnikov, A. G. Suslov. — Kiev: Naukova dumka, 1982. — 172 s. — In Russian.
10. Seleznyov, L. I. E'rozionny'j iznos konstrukcionny'x materialov / L. I. Seleznyov, V. A. Ry'zhenkov // *Texnologiya metallov*. — 2007. — # 3. — S. 19—24. — In Russian.
11. Seleznyov, L. I. Fenomenologiya e'rozionnogo iznosa materiala konstrukcionny'x stalej i splavov zhidkimi chasticzami / L. I. Seleznyov, V. A. Ry'zhenkov, A. F. Mednikov // *Teploe'nergetika*. — 2010. — # 9. — S. 12—16. — In Russian.
12. Seleznyov, L. I. Ocenka dlitel'nosti inkubacionnogo perioda e'rozionnogo iznosa konstrukcionny'x materialov / L. I. Seleznyov, V. A. Ry'zhenkov // *Teploe'nergetika*. — 2005. — # 4. — S. 61—63. — In Russian.
13. Tomarov, G. V. Modelirovanie fiziko-ximicheskix processov e'rozii-korrozii metallov v dvuxfazny'x potokax / G. V. Tomarov, A. A. Shinkov // *Teploe'nergetika*. — 2002. — # 7. — S. 7—17. — In Russian.
14. Frost, G. Dzh. Karty' mexanizmov deformacii: per. s angl. / G. Dzh. Frost, M. F. E'shbi. — Chelyabinsk: Metallurgiya, 1989. — 328 s. — In Russian.
15. Engel, P. A. Impact Wear of Materials. — Amsterdam, Oxford, New-York: Elsevier Scientific publishing company, 1976. — 340 p.
16. Evans, A. G. Impact damage in brittle materials in the elastic-plastic response regime / A. G. Evans, M. E. Guiden, M. Rosenblatt // *Proc. Roy. Soc., Lond., Ser. A*. — 1978. V. 361. N 1706. P. 343—365.

PREDICTION OF TITANIUM ALLOYS EROSIVE WEAR UNDER LONG-TERM DROPLET-IMPACT EFFECT

V. N. Varavka, O. V. Kudryakov, A. F. Mednikov

(Don State Technical University)

The approximating model for the definition of the steam turbines blades wear rate under the continuous operation through the droplet-impact erosion is built on the ground of the comparative analysis of the stand test data of the titanium alloy samples.

Keywords: *droplet-impact erosion, fatigue of metal, wear, turbine blades, titanium alloy, approximation, modeling.*