

УДК 620.193.1:621.165.51:669.018

ПРОЧНОСТЬ И МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ ВЫСОКОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДИСКРЕТНОГО ВОДНО-КАПЕЛЬНОГО ПОТОКА*

В.Н. ВАРАВКА, О.В. КУДРЯКОВ

(Донской государственный технический университет)

Представлены результаты экспериментальных исследований изнашивания аустенитной стали в условиях каплеударной эрозии. Рассмотрены стадии зарождения и развития эрозионного износа. Методами сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения показана ведущая роль боковых трещин в процессе формирования и роста эрозионных кратеров разрушения в соответствии с моделью Маршалла-Лоуна.

Ключевые слова: поверхность металла, аустенитная сталь, прочность, разрушение, упруго-пластический контакт, каплеударная эрозия, механизмы эрозионного износа.

Цели, условия и постановка эксперимента. Объектом исследований настоящей работы является кинетика начальных стадий (инкубационного и переходного периодов) каплеударной эрозии, а её субъектом – закономерности поведения и разрушения материала под воздействием циклических ударных воздействий водяных капель. Исследования проводили на модельном материале, в качестве которого была выбрана высокопластичная аустенитная сталь 08X18H10T с крупно- и мелкозернистой структурой. Средний размер зерна аустенита составлял соответственно 110 и 18 мкм. Испытания проводились на эрозионном стенде НИУ МЭИ «Эрозия-М», входящем в реестр уникальных стендов и установок РФ [1, 2]. Стенд позволяет моделировать различные условия взаимодействия дисперсных жидких частиц с поверхностью материалов. Испытания проводили при следующем режиме соударений: радиус капель водяного конденсата $R=500$ мкм; скорость соударения образцов с каплями $V_0=250$ м/с. Максимальное время воздействия дисперсного водно-капельного потока на образцы – 80 минут. Такой режим моделирует, например, условия работы рабочих лопаток последних ступеней мощных паровых турбин. По результатам испытаний построены кинетические кривые капле-эрозионного изнашивания, представленные на рис.1, а.

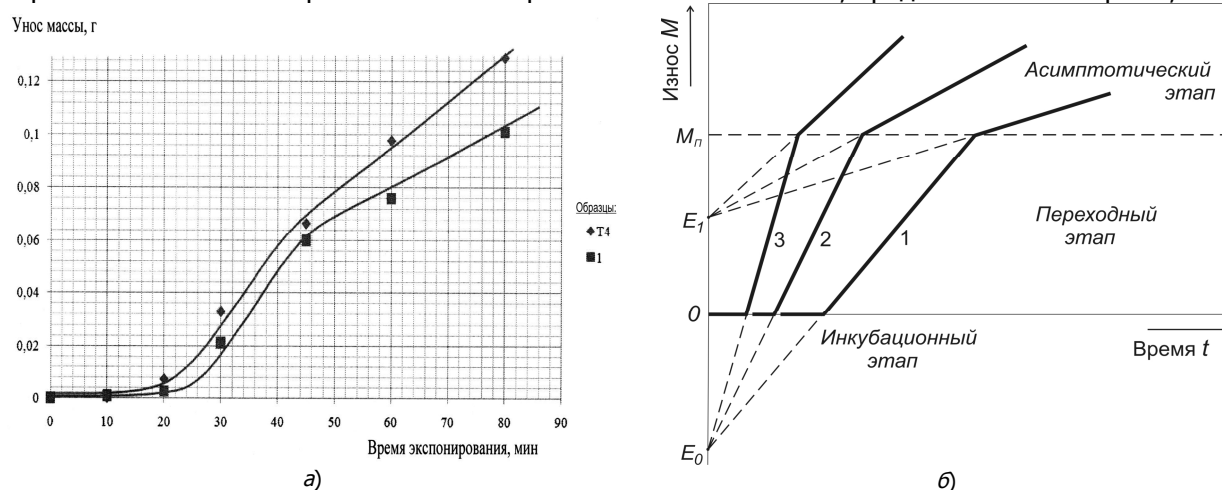


Рис.1. Экспериментальные кривые каплеударного эрозионного износа стали 08X18H10T для образцов мелкозернистого «Т4» и крупнозернистого «1»: аустенита (а) и схематическое изображение семейства кривых (1,2,3) эрозионного износа одинаковых образцов при различных режимах соударений – скорости полета капли V_0 и её радиуса R (б)

Результаты экспериментов. Сравним результаты испытаний по продолжительности испытаний в течение 5 и 20 минут, что составляет примерно $7 \cdot 10^3$ и $27 \cdot 10^3$ циклов нагружения (удары каплей, приходящиеся в одну точку) и отвечает инкубационной и началу переходной стадий каплеударной эрозии соответственно.

После 5 минут испытаний в зонах, подверженных каплеударному воздействию, не обнаруживается следов износа (эрозионных кратеров), наблюдаются только следы пластической де-

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

формации. Причем, развитие пластической деформации в мелкозернистом аустените значительно сильнее, чем в крупнозернистом, что характеризуется значительно большим количеством зон с двойниками деформации и следами скольжения.

Характерные зоны микропластической деформации мелкозернистого аустенита представлены на рис.2. Учитывая ударный характер нагружения и тот факт, что хром существенно снижает энергию дефектов упаковки, пластическая деформация в рассматриваемом материале должна преимущественно осуществляться двойникованием. Однако мелкозернистость способствует деформации по механизму скольжения, поэтому в мелкокристаллическом аустените наиболее вероятен смешанный характер деформации (на поверхностном рельефе не всегда возможно отличить полосы скольжения от узких двойников деформации).

Обобщая можно сказать, что на инкубационной стадии после 5 минут испытаний (когда эрозионный износ в виде потери массы образца ещё не начался) пластическая деформация развивается неоднородно, в основном, в наиболее благоприятно ориентированных кристаллитах (по отношению к вектору нагрузки). Вероятность встречи таких кристаллитов на площади удара капли обратно пропорциональна размеру зерна, поэтому в мелкозернистом аустените следов деформации всегда будет больше, чем в крупнозернистом.

Следы деформации, выявленные на инкубационной стадии каплеударной эрозии после 5 минут испытаний (см. рис.2), характерны для стадии пластического течения ГЦК-кристаллов. Об этом свидетельствуют тонкие параллельные линии скольжения (или двойники), расположенные с относительно небольшой плотностью в одной (первичной) системе скольжения (в пределах одного зерна). Поперечных следов скольжения, расположенных во вторичных системах скольжения – коротких линий, плотно расположенных друг к другу и под углом к первичным линиям скольжения, не наблюдается.

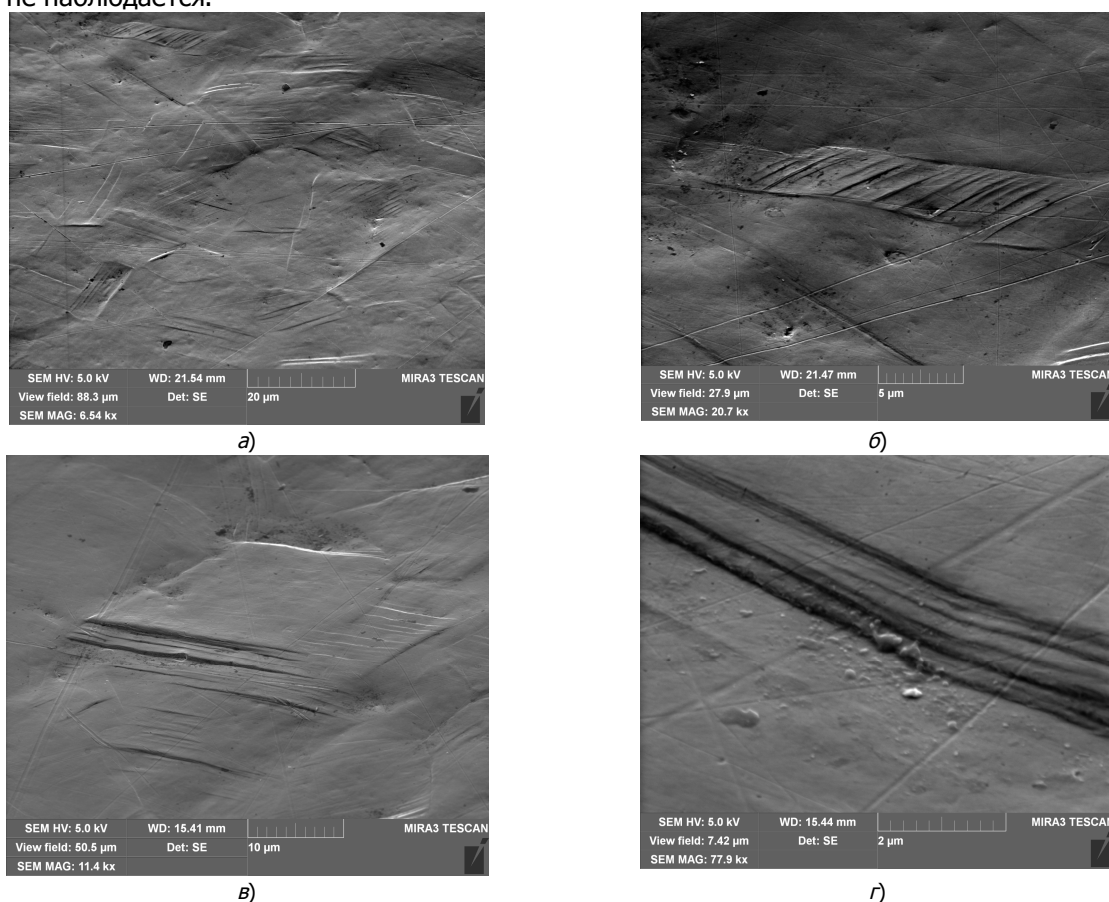
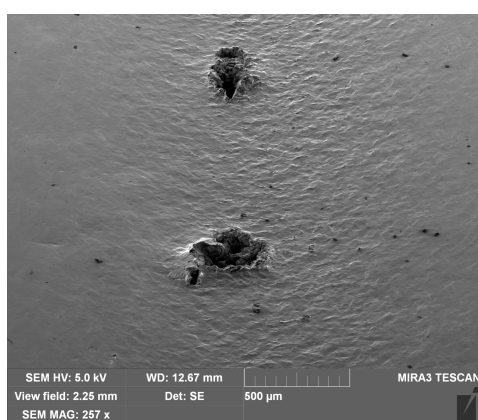


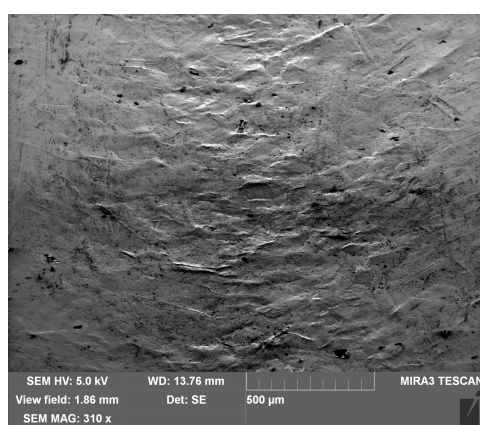
Рис.2. Пластическая деформация мелкозернистого аустенита на инкубационной стадии каплеударной эрозии стали 08X18H10T: а – характерный деформационный рельеф; б – двойники деформации внутри благоприятно ориентированного двойника отжига; в – полосы скольжения (переориентации) и двойники деформации; г – следы деформации усталостного характера

Таким образом, инкубационная стадия эрозионного износа стали 08X18H10T после 5 минут испытаний соответствует стадии пластического течения, которая достаточно быстро переходит в стадию упрочнения. Учитывая преимущественно двойниковый характер деформации, упрочнение должно происходить весьма резко в локальных зонах с высокой плотностью двойников деформации (или линий скольжения, если аустенит мелкозернистый). Развитие этого процесса резкого микролокального упрочнения приводит к зарождению трещин. Трещина критического размера инициирует разрушение, т.е. начинается переходная стадия каплеударной эрозии.

При 20-ти минутном испытании образцов на стенде были выявлены первые кратеры эрозионного разрушения и потеря массы, что характеризует начало переходной стадии. На рис.3 представлены два эрозионных следа таких образцов с мелко- и крупнозернистым аустенитом. Видно, что потеря массы мелкозернистого образца будет больше из-за наличия двух развитых эрозионных кратеров с диаметрами ~350 и ~200 мкм (см. рис.3, а), тогда как кратеры крупнозернистого образца весьма малы и наибольший из них не превышает $\varnothing 50$ мкм (см. рис.3, б).



а)



б)

Рис.3. Общий вид эрозионного следа образцов после испытаний:
а – мелкозернистый аустенит; б – крупнозернистый аустенит

Кинетические закономерности развития каплеударной эрозии проявляются по мере выявления механизма формирования эрозионных кратеров на переходной стадии. Характерные черты этого механизма представлены на рис.4-7.

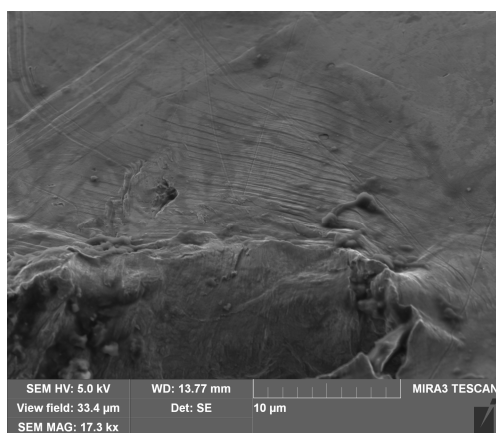


Рис.4. Образование эрозионного кратера в зоне упрочнения мелкозернистого аустенита: передний план – стенка кратера, дальний – зона упрочнения с высокой плотностью линий скольжения

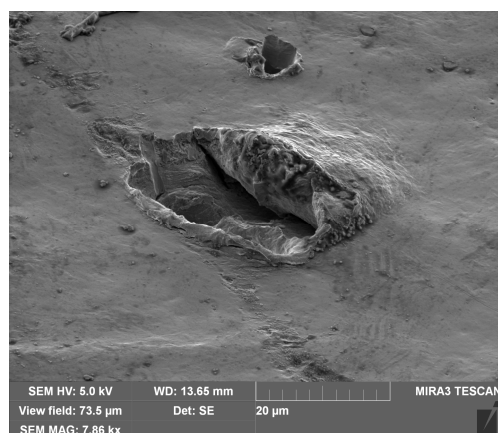


Рис.5. Образование первичного эрозионного кратера в зоне упрочнения крупнозернистого аустенита – боковая трещина и откалываемый ею расширяющийся кратер

Наиболее показателен рис.6, на котором представлены сразу несколько характерных элементов формирования эрозионного рельефа. У края кратера хорошо просматривается зона упрочнения с высокой плотностью полос скольжения (рис.6, а); в стенке кратера на глубине 8...15 мкм четко видна боковая трещина, состоящая из двух частей. Берега боковых трещин гладкие и представляют собой фасетки скола (горизонтальные поверхности на рис.6, а, б), что говорит о большой скорости их зарождения и продвижения в направлении, параллельном поверхности. Вертикальные же стенки кратера имеют вязкий волокнистый излом усталостного типа. Особенно наглядно различия в характере разрушения видны на фрактографическом рельефе эродированного микрообъема верхней части кратера на рис.6, б.

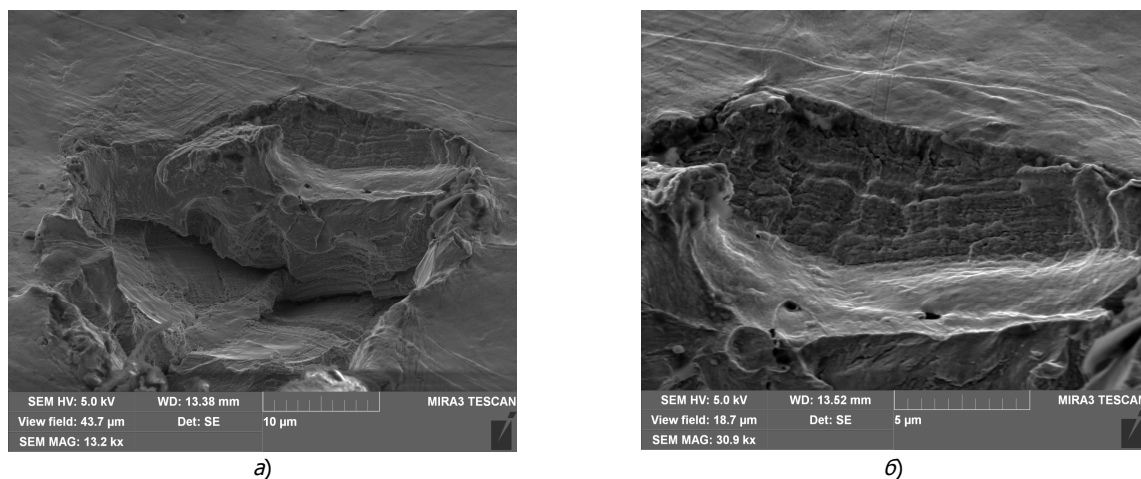


Рис.6. Эрозионный кратер в мелкозернистом аустените (а) и увеличенное изображение его верхней части (б)

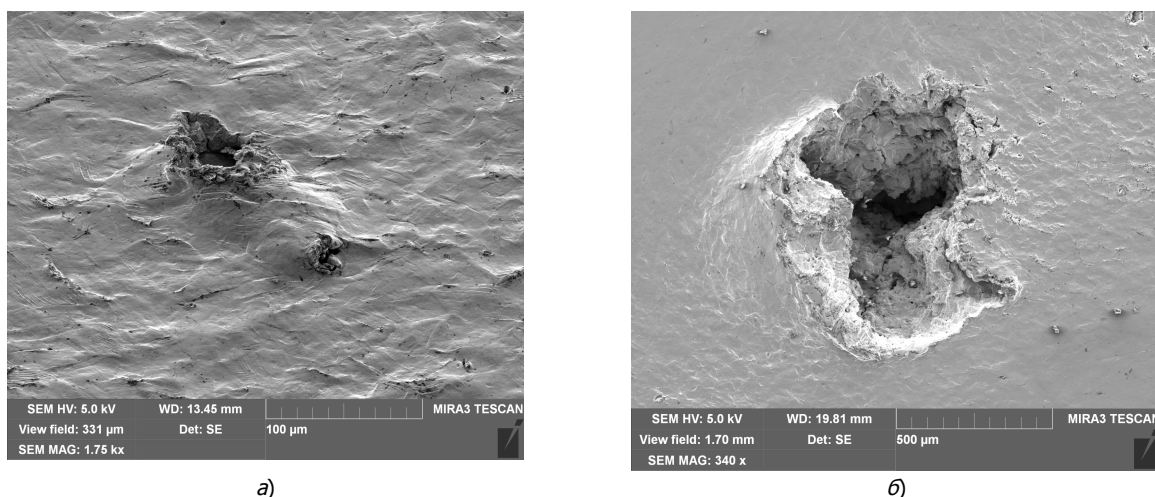


Рис.7. Различные стадии формирования эрозионных кратеров в мелкозернистом аустените: а – «подрыв» поверхностного микрообъема при продвижении боковой трещины; б – многоярусное строение развитого эрозионного кратера

Увеличение кратера при каплеударном эрозионном воздействии происходит за счет образования и продвижения боковых трещин, зарождающихся на некоторой глубине, сначала хрупко продвигающихся в наклепанной зоне параллельно поверхности, а затем (скорее всего при встрече с вязким микрообъемом) по усталостному механизму, выходящих на поверхность. Такой путь трещины прослеживается на рис.7, а, где темное дно большого кратера представляет собой скольный берег трещины (фасетку скола) боковой трещины, проходящей параллельно поверхности и выходящей на поверхность в виде малого кратера. Вздутие материала между большим и

малым кратерами на рис.7, а представляет собой эродированный микрообъем, под которым проходит боковая трещина. При следующих нескольких попаданиях каплей этот микрообъем скорее всего будет отделен от поверхности и размер кратера увеличится. Этот процесс многократно последовательно реализован при образовании кратера на рис.7, б: каждый из отделяемых (эродированных) микрообъемов связан со своей боковой трещиной, залегающей на разной глубине; поэтому кратер имеет ярусное строение и ярусов на рис.7, б можно выделить, как минимум, три. Полученные результаты нуждаются в обобщении в виде некоторой оценочной модели, позволяющей рассчитывать и прогнозировать эрозионный процесс на ранних стадиях.

Обсуждение результатов. Ударно-усталостное изнашивание, в том числе и каплеударное, происходит при многократном соударении поверхностей, не имеющих первоначально в зоне контакта частиц, более твердых, чем исходные поверхности. Оно развивается за счет накопления усталостных повреждений и может быть описано известной схемой циклического нагружения, приведенной на рис.8, где: 1 – зона упругих деформаций, не приводящих к структурным изменениям материала; 2 – зона пластичности (циклической текучести); 3 – зона упрочнения; 4 – зона зарождения усталостных микротрещин; заштрихована зона распространения усталостных трещин, которая заключена между линиями Френча (левая линия необратимых усталостных повреждений) и Велера (правая линия АБ усталостного разрушения); σ_R – предел выносливости.

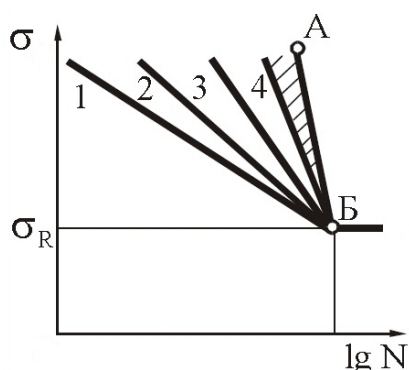


Рис.8. Схематическое изображение областей диаграммы усталости пластичных материалов: σ – действующее напряжение, N – количество циклов нагружения

Все перечисленные стадии процесса усталости наблюдались в представленных выше в экспериментальных данных. Однако думается, что каплеударную эрозию как чисто усталостный процесс рассматривать нельзя. Например, с позиций механики динамического контактного разрушения [3] каплеударную эрозию следует классифицировать как смешанный вид ударного и эрозионного видов изнашивания. Это позволяет определить область закономерностей каплеударной эрозии как пограничную, включающую характерные черты и механизмы ударного (с нежестким индентором), эрозионного и усталостного изнашивания. Основываясь на известных теориях ударного износа Энгеля [4, 5] и Эванса [6, 7], эрозионного износа Шелдона–Финни [8, 9] и Маршалла–Лоуна [10], а также используя подходы теорий усталости [11–16], исследуемый процесс начальных стадий каплеударной эрозии можно представить следующим образом (рис.9).

Все перечисленные стадии процесса усталости наблюдались в представленных выше в экспериментальных данных. Однако думается, что каплеударную эрозию как чисто усталостный процесс рассматривать нельзя. Например, с позиций механики динамического контактного разрушения [3] каплеударную эрозию следует классифицировать как смешанный вид ударного и эрозионного видов изнашивания. Это позволяет определить область закономерностей каплеударной эрозии как пограничную, включающую характерные черты и механизмы ударного (с нежестким индентором), эрозионного и усталостного изнашивания. Основываясь на известных теориях ударного износа Энгеля [4, 5] и Эванса [6, 7], эрозионного износа Шелдона–Финни [8, 9] и Маршалла–Лоуна [10], а также используя подходы теорий усталости [11–16], исследуемый процесс начальных стадий каплеударной эрозии можно представить следующим образом (рис.9).

Это позволяет определить область закономерностей каплеударной эрозии как пограничную, включающую характерные черты и механизмы ударного (с нежестким индентором), эрозионного и усталостного изнашивания. Основываясь на известных теориях ударного износа Энгеля [4, 5] и Эванса [6, 7], эрозионного износа Шелдона–Финни [8, 9] и Маршалла–Лоуна [10], а также используя подходы теорий усталости [11–16], исследуемый процесс начальных стадий каплеударной эрозии можно представить следующим образом (рис.9).

Поперечное сечение

Вид в плане (сверху)

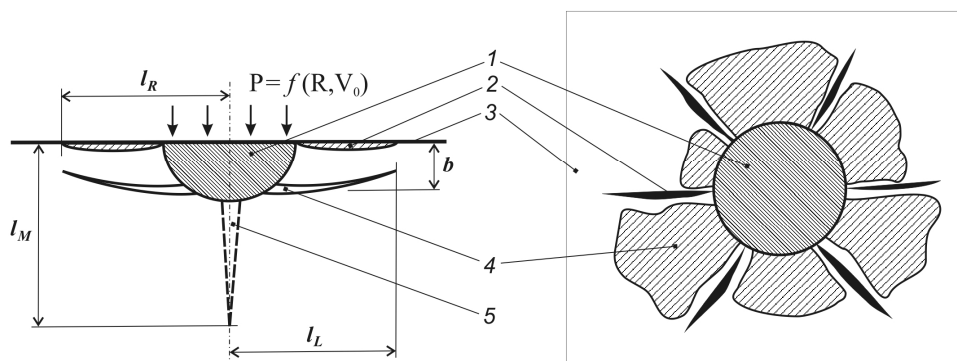


Рис.9. Схема образования эрозионного кратера при каплеударном воздействии на пластичный материал (аустенитная сталь 08X18H10T): 1 – пластическая зона на стадии максимального упрочнения; 2 – радиальные трещины; 3 – поверхность материала; 4 – боковые трещины; 5 – медианная трещина; P – нагрузка

При циклическом нагружении под действием силы P образуются радиальные l_R , боковые l_L и медианные l_M трещины. Они подрастают с каждым новым ударом: радиальные растут при нагружении, а боковые преимущественно при разгрузке. При количестве израсходованного эродента, определяемого временем инкубационной стадии t_{in} (рис.1, б), боковые трещины достигают критического размера l_C . В этот момент начинается эрозионный износ в виде отделения от поверхности частицы эродированного материала и инкубационная стадия сменяется переходной стадией эрозии. Каплеударное эрозионное изнашивание представляет собой фрагментацию материала, удаление фрагментов с поверхности в виде эродированных частиц износа, возникающих при развитии боковых трещин. Частица износа представляет собой дискообразный фрагмент с радиусом (или диаметром) l_L и высотой b (см. рис.9). Из экспериментальных данных, приведенных выше, хорошо видно, что частица износа при каплеударной эрозии формируется под влиянием именно боковых трещин. Это одно из важных отличий, например, от абразивного эрозионного изнашивания под действием твердых частиц, где ведущими являются радиальные (или медианные) трещины.

Когда развитая боковая трещина l_L , зародившаяся на глубине b , достигает поверхности материала, происходит откол дискообразного фрагмента размером l_L и толщиной b , тогда объем отделяемого материала равен:

$$V_i = \pi \cdot b \cdot l_L^2 \quad (1)$$

Теория Маршалла и Лоуна, исходя из свойств эродированного материала (E – модуль упругости; H – твердость; K_{IC} – коэффициент интенсивности напряжений), дает следующее выражение для расчета V_i :

$$V_i \sim \left[\left(\frac{E}{H} \right)^{5/4} \cdot \frac{1}{K_{IC} \cdot H^{1/6}} \right] \cdot U_k^{7/6}, \quad (2)$$

которое дает хорошие корреляции с экспериментом. Здесь U_k – кинетическая энергия удара, что согласуется с теорией ударного износа Эванса [7], где максимальная контактная нагрузка P , приводящая к зарождению радиальных l_R и боковых трещин l_L , определяется как:

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

где ρ – плотность частиц эродента (в нашем случае – водяных капель).

Аппарат механики контактного разрушения позволяет рассчитать размеры трещин и их критические значения. Так, по теории Маршалла-Лоуна длина радиальной трещины l_R определяется выражением:

$$l_R \sim \left(\frac{V_0^2 \cdot R^2 \cdot \rho}{K_{IC}} \right)^{2/3}. \quad (4)$$

Длина боковой трещины l_L может быть определена как:

$$l_L = A_L \cdot P^{5/3} \cdot \sqrt{\frac{E^{3/4}}{H \cdot K_{IC}}}, \quad (5)$$

где A_L – эмпирический множитель.

Для определения критических размеров трещин l_C используется обычно закон Ирвина, который связывает размер трещины l_C с критическим напряжением σ_C , его формирующим:

$$\sigma_C \sim \frac{K_{IC}}{\sqrt{2\pi \cdot l_C}}. \quad (6)$$

Глубина залегания b боковой трещины, при достижении критического размера l_C которой, происходит отделение дискообразного фрагмента износа V_i , определится как:

$$b = A_b \cdot R \cdot \sqrt{\frac{V_0 \cdot \sqrt{\rho}}{\sqrt{H}}}, \quad (7)$$

где A_b - эмпирический множитель.

Тогда, рассчитав значения V_i и b , мы можем определить значение $l_L = l_C$ из выражения (1) и по этой величине, используя выражение (6), вычислить σ_C . Физический смысл величины напряжения σ_C , исходя из (6), заключается в том, что она представляет собой тот уровень напряжений, который необходимо преодолеть, чтобы образовать трещину размером l_C . Специфика каплеударной эрозии в том, что это явление поверхностное, поэтому и напряжение σ_C также должно быть связано с поверхностью. Следовательно, напряжение σ_C можно оценить по твердости H изнашиваемого материала, которая как раз и характеризует сопротивление упруго-пластической деформации или хрупкое разрушение при нагружении индентором поверхностного слоя. При возникновении трещины критическое напряжение σ_C , в соответствии с выражением (6), зависит от свойств материала (H , K_{IC}) и не зависит от параметров соударения V_0 и R .

Для прикладного использования расчетной модели, состоящей из выражений (1)-(7), необходимо учитывать то, что каплеударная эрозия – процесс динамический. Как было показано на образцах аустенитной стали 08X18H10T, при циклическом капельном воздействии на поверхность стали происходит её упрочнение. Затем, именно, в наиболее упрочненных микрообъемах развиваются боковые трещины, вызывающие эрозионный износ – появление кратеров. Поэтому величины H и K_{IC} в процессе каплеударного воздействия не остаются постоянными: твердость повышается, а вязкость разрушения снижается. Исходя из уравнения (6), общий эффект упрочнения можно выразить изменением величины $k = H/K_{IC}$. Для практических расчетов необходимо оценить эффект упрочнения, а также определить эмпирические константы A_L и A_b . Это можно сделать на основе полученных экспериментальных данных.

Эмпирические исходные данные для исследованных образцов аустенита стали 08X18H10T составляют: $E=200$ ГПа, $H=1950$ МПа, $K_{IC}=127$ МПа·м^{1/2}, $k_0=15,35$ м^{-1/2}. Расчеты, выполненные по выражениям (1)-(7) при $\rho=1000$ кг/м³, $R=500$ мкм, $V_0=250$ м/с, дают следующие значения: $P=24,5$ Н, $E_0=675$ мкм, $l_C=l_L=338$ мкм. Расчетные значения l_L существенно расходятся с экспериментом. По представленным фотографиям (см. рис.5-7) видно, что размеры боковых трещин l_L значительно меньше. Очевидно, что точные измерения этой величины провести весьма затруднительно, но по приведенным данным $l_C=l_L$ не должна превышать 100 мкм. Для этого должен обеспечиваться уровень упрочнения аустенита стали 08X18H10T $k_I=H/K_{IC} \approx 40$ м^{-1/2}.

В теории циклической прочности [12, 16] считается, что для металлических материалов размер трещин на линии Френча (см. рис.8) составляет 10-40 мкм. Переход через линию Френча ведет к резкому росту длины трещины, а разрушение начинается, когда трещина достигает длины ~100 мкм. Полученные данные показывают, что для каплеударной эрозии аустенитной стали 08X18H10T эти границы смещены в меньшую сторону.

Значительно проще измерить глубину залегания боковых трещин b , хорошо видимую на боковых стенках эрозионных кратеров. Интервал экспериментально наблюдаемых значений составил $b \approx 10 \dots 50$ мкм. По этим данным при уровне упрочнения k_I для выражений (5) и (7) получаем значения эмпирических множителей $A_L=0,008 \dots 0,015$ и $A_b=0,06 \dots 0,25$. Тогда интервалы расчетных значений составят: для критического размера боковой трещины $l_C=l_L=60 \dots 100$ мкм, а для глубины её залегания b совпадет с экспериментально наблюдаемым.

Выводы. 1. Выполненные испытания образцов модельного сплава с высокой пластичностью (аустенитная сталь 08X18H10T с мелким и крупным зерном) показали, что на ранних стадиях каплеударной эрозии (инкубационной и переходной) в поверхностном слое металла последовательно происходят стадии: неоднородной пластической деформации (с относительно небольшой степе-

нию деформации), упрочнения деформированных микрообъемов и образования в них эрозионных кратеров износа.

2. Размер зерна аустенита влияет на развитие эрозии. В мелкозернистом аустените деформационные процессы проходят более интенсивно и эрозия развивается быстрее за счет большего количества благоприятных ориентировок зерен, попадающих в зону соударения.

3. Степень упрочнения аустенита, определяемая в работе как отношение твердости к вязкости разрушения $k=H/K_{IC}$, на инкубационной стадии эрозии увеличилась с 15,35 до $40 \text{ м}^{-1/2}$.

4. Развитие эрозии на переходной стадии происходит путем зарождения и роста эрозионных кратеров. Ведущую роль в этих процессах выполняют боковые трещины, распространяющиеся на определенной глубине параллельно поверхности. При достижении ими критического размера и выхода на поверхность формируется (и затем выкрашивается) частица эрозионного износа.

5. Большинство эрозионных кратеров, сформированных на переходной стадии, имеют ярусное строение. Каждый ярус инициирован индивидуальной боковой трещиной и образуется при откалывании эродированной частицы износа.

6. Полученные экспериментальные данные позволяют предложить выражения (1)-(7) в качестве расчетной модели для оценки критического размера боковой трещины $l_c=l_L$ и глубины её залегания b , исходя из свойств материала и параметров соударения. Эмпирические и расчетные данные показывают, что традиционные стадии развития усталостных трещин в материале при каплеударной эрозии смещены в меньшую сторону по сравнению объемным циклическим нагружением. Для исследованного в работе аустенита стали 08X18H10T это касается длины трещин в точках Френча и Велера.

Библиографический список

1. Селезнев Л.И. Оценка длительности инкубационного периода эрозионного износа конструкционных материалов / Л.И. Селезнев, В.А. Рыженков // Теплоэнергетика. – 2005. – №4. – С.61-63.
2. Селезнев Л.И. Эрозионный износ конструкционных материалов / Л.И. Селезнев, В.А. Рыженков // Технология металлов. – 2007. – №3. – С.19-24.
3. Колесников Ю.В. Механика контактного разрушения / Ю.В. Колесников, Е.М. Морозов. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 224 с.
4. Engel P.A. Analysis and design for zero impact wear // Trans. ASME: J. Lubric. Technol. – 1974. – V.96, N 3. – P.171-183.
5. Engel P.A. Impact Wear of Materials. – Amsterdam, Oxford, New-York: Elsevier Scientific publishing company, 1976. – 340 p.
6. Evans A.G. Impact damage in ceramics // Fracture Mechanics of Ceramics / Ed. by Brandt R.C. e. a. – New York: Plenum Press, 1978. V.3. P.303-331.
7. Evans A.G., Guiden M.E., Rosenblatt M. Impact damage in brittle materials in the elastic-plastic response regime // Proc. Roy. Soc., Lond., Ser.A. – 1978. V.361. N 1706. P.343-365.
8. Sheldon G.L., Finnie I. On the ductile behavior of nominally brittle materials during erosive cutting // Trans. ASME: J. Eng. Ind. – 1964. – V.86, N 4. P.387-392.
9. Sheldon G.L., Finnie I. The mechanism of material removal in the erosive cutting of brittle materials // Trans. ASME: J. Eng. Ind. – 1964. – V.86, N 4. P.393-400.
10. Marshall D.B., Lawn B.R., Evans A.G. Elastic-plastic indentation damage in ceramics: the lateral crack system // J. Amer. Ceram. Soc. – 1982. – V.65, N 11. P.561-566.
11. Иванова В.С. Природа усталости металлов / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. – 454 с.
12. Горицкий В.М. Структура и усталостное разрушение / В.М. Горицкий, В.Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1980. – 280 с.
13. Троценко В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник. Ч.1 и 2.: / В.Т. Троценко, Л.А. Сосновский. – Киев: Наукова думка, 1987. – 1324 с.

14. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособие. В 4-х т.; под общ. ред. В.В. Панасюка. Т.1. Основы механики разрушения / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, В.З. Партон. 1988. – 488 с. – Киев: Наукова думка, 1988.
15. Синергетика и усталостное разрушение металлов: сб.; под ред. В.С. Ивановой. – М.: Наука, 1989. – 246 с.
16. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов / С. Коцаньда; под ред. С.Я. Яремы; пер. с польск. – М.: Metallurgiya, 1990. – 623 с.

Материал поступил в редакцию 17.11.2011.

References

1. 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.
2. Seleznyov L.I. E'rozionny'j iznos konstrukcionny'x materialov / L.I. Seleznyov, V.A. Ry'zhenkov // Teknologiya metallov. – 2007. – #3. – S.19-24. – In Russian.
3. Kolesnikov Yu.V. Mexanika kontaktnogo razrusheniya / Yu.V. Kolesnikov, E.M. Morozov. – M.: Izd-vo LKI, 2007. – 224 s. – In Russian.
4. Engel P.A. Analysis and design for zero impact wear // Trans. ASME: J. Lubric. Technol. – 1974. – V.96, N 3. – P.171-183.
5. Engel P.A. Impact Wear of Materials. – Amsterdam, Oxford, New-York: Elsevier Scientific publishing company, 1976. – 340 p.
6. Evans A.G. Impact damage in ceramics // Fracture Mechanics of Ceramics / Ed. by Brandt R.C. e. a. – New York: Plenum Press, 1978. V.3. P.303-331.
7. Evans A.G., Guiden M.E., Rosenblatt M. Impact damage in brittle materials in the elastic-plastic response regime // Proc. Roy. Soc., Lond., Ser.A. – 1978. V.361. N 1706. P.343-365.
8. Sheldon G.L., Finnie I. On the ductile behavior of nominally brittle materials during erosive cutting // Trans. ASME: J. Eng. Ind. – 1964. – V.86, N 4. P.387-392.
9. Sheldon G.L., Finnie I. The mechanism of material removal in the erosive cutting of brittle materials // Trans. ASME: J. Eng. Ind. – 1964. – V.86, N 4. P.393-400.
10. Marshall D.B., Lawn B.R., Evans A.G. Elastic-plastic indentation damage in ceramics: the lateral crack system // J. Amer. Ceram. Soc. – 1982. – V.65, N 11. P.561-566.
11. Ivanova V.S. Priroda ustalosti metallov / V.S. Ivanova, V.F. Terent'ev. – M.: Metallurgiya, 1975. – 454 s. – In Russian.
12. Gorickij V.M. Struktura i ustalostnoe razrushenie / V.M. Gorickij, V.F. Terent'ev. – M.: Metallurgiya, 1980. – 280 s. – In Russian.
13. Troshhenko V.T. Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov: spravochnik. Ch.1 i 2 / V.T. Troshhenko, L.A. Sosnovskij. – Kiev: Naukova dumka, 1987. – 1324 s. – In Russian.
14. Mexanika razrusheniya i prochnost' materialov: sprav. posobie. V 4-x t.; pod obshh. red. V.V. Panasyuka. T.1. Osnovy' mexaniki razrusheniya / V.V. Panasyuk, A.E. Andrejkiv, V.Z. Parton. 1988. – 488 s. – Kiev: Naukova dumka, 1988. – In Russian.
15. Sinergetika i ustalostnoe razrushenie metallov: sb.; pod red. V.S. Ivanovoj. – M.: Nauka, 1989. – 246 s. – In Russian.
16. Koczan`da S. Ustalostnoe rastreskivanie metallov / S. Koczan`da; pod red. S.Ya. Yaremy` ; per. s pol'sk. – M.: Metallurgiya, 1990. – 623 s. – In Russian.

STRENGTH AND HIGH-PLASTICITY MATERIALS FRACTURE MECHANISMS UNDER DISCRETE WATER-DROPLET FLOW

V.N. VARAVKA, O.V. KUDRYAKOV
(Don State Technical University)

The field research results of the austenitic steel wear under the droplet impact erosion are presented. The stages of the erosive wear origin and development are considered. The leading part of the side cracks in the forming and growth of the erosion fracture craters, as specified in Marshall–Lawn model, is shown by the high-resolution scanning electron microscopy technique.

Keywords: metal surface, austenitic steel, strength, fracture, elastoplastic contact, droplet impact erosion, erosive wear mechanisms.