

УДК 599.538

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

К. К. ШАЛЬНЕВ, А. Ф. ДЕРЕНДОВСКИЙ,  
академик АН МССР Б. Р. ЛАЗАРЕНКО, Ю. Н. ПАУКОВ, М. К. БОЛОГА

# О МЕХАНИЗМЕ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ МОНОКРИСТАЛЛА NaCl И НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

1. В теоретических работах о механизме кавитационной эрозии рассматривают модель зоны кавитации в виде единичного пузырька. В экспериментальных исследованиях кавитационной эрозии испытываемые материалы подвергаются действию всей зоны кавитации, состоящей из совокупности газо-паровых пузырьков. Иногда на участке эрозии обнаруживают отдельные язвыны (<sup>1-3</sup>), но ни форма, ни микроскопическая структура их поверхности не исследовались. Между тем, такие исследования важны для понимания механизма эрозии.

2. В качестве объекта исследования были взяты монокристаллы NaCl; образцы из чугуна с хромированной рабочей поверхностью, толщина покрытия 90 м; образцы из отожженной стали с хромированной рабочей поверхностью, толщина покрытия 30 м. В опытах использовалась ультразвуковая кавитация, возбуждаемая концентратором колебаний от магнито-стрикционного аппарата с частотой 20 кГц и постоянной амплитудой.

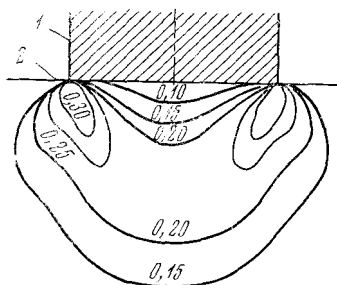


Рис. 1. Схема максимальных скалывающих напряжений при ударе штампа 1 на поверхность металла 2 (<sup>4</sup>)

Испытания проводились по методу облучения, т. е. испытываемый образец в опытах оставался неподвижным и соприкасался с зоной кавитации на расстояниях  $h = 0,5 \div 8$  мм от излучающей поверхности концентратора. Образцы NaCl изготовлялись из монокристаллов скалыванием по плоскостям спайности и имели размеры  $15 \times 10$ ,  $15 \times 15$  и  $15 \times 20$  мм<sup>2</sup>, толщина образцов была в пределах 15—20 мм. Металлические образцы имели размеры  $30 \times 30 \times 8$  мм<sup>3</sup>. Время облучения для образцов из NaCl изменялось в пределах  $\tau = 5$  сек.—5 мин., для металлических образцов  $\tau = 8$  час. Рабочими жидкостями для испытания образцов из NaCl были керосин, бензол и трансформаторное масло, для металлических образцов — вода. Для выявления

субмикроструктуры образцов NaCl они протравливались концентрированной уксусной кислотой, промывались бензином и этиловым спиртом.

3. Результаты опытов представлены на рис. 1, 2. На рис. 2а показана фотография одной язвыны эрозии на поверхности монокристалла, полученная за время облучения  $\tau < 5$  сек. при расстоянии  $h \approx 5$  мм, вероятно, в результате действия единичного пузырька. Диаметр аналогичных язвын колеблется в пределах 0,071—0,113 мм, глубина — в пределах 0,27—1,0 м. На поверхности дна язвыны видны линии скольжения в результате накопления дислокаций. В центральной части язвыны линии скольжения аналогичны сдвиговым деформациям пластического тела при ударе цилиндрического штампа (<sup>4</sup>) (рис. 1). Ближе к краям язвыны линии скольжения искривляются, что объясняется расположением максимальных напряжений подобно в упомянутом опыте со штампом (рис. 1).

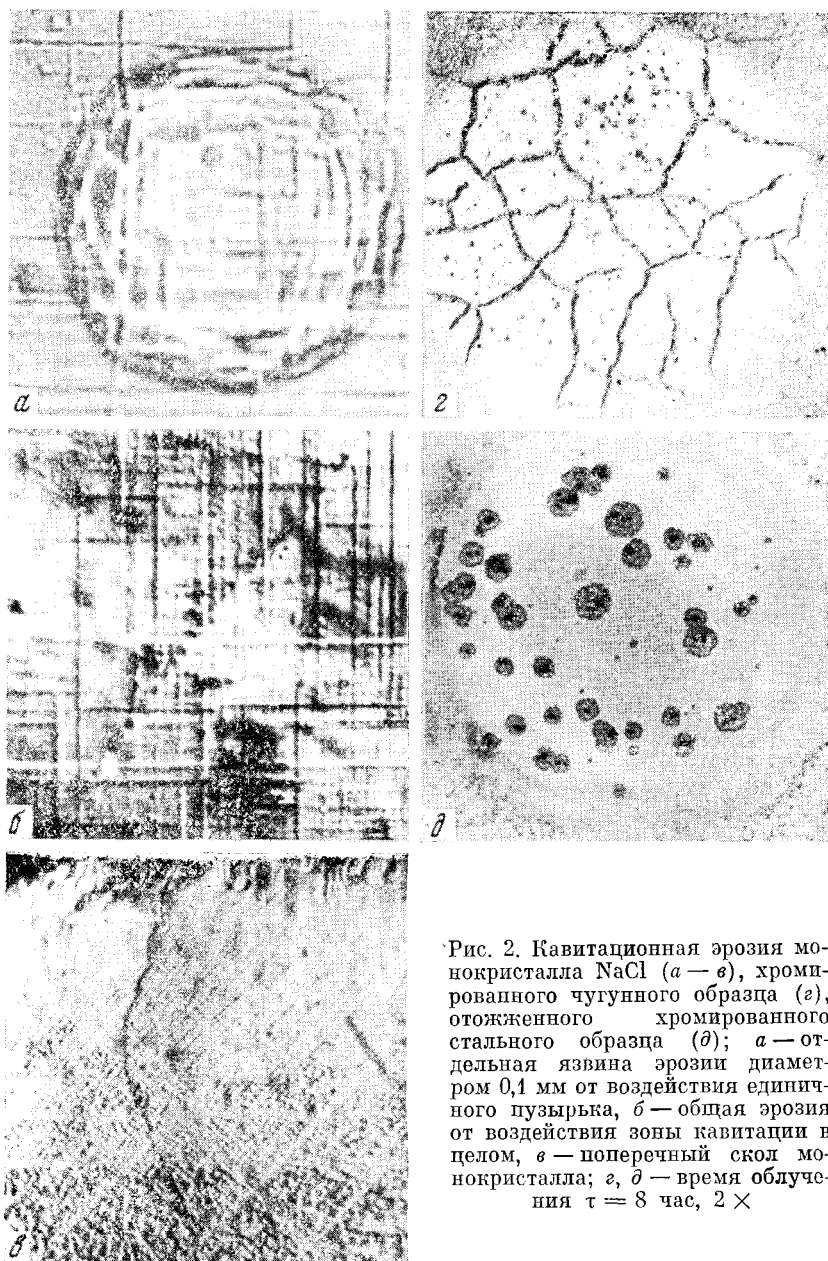


Рис. 2. Кавитационная эрозия монокристалла NaCl (а — в), хромированного чугуна (б), хромированного стального образца (г); а — отдельная язвина эрозии диаметром 0,1 мм от воздействия единичного пузырька, б — общая эрозия от воздействия зоны кавитации в целом, в — поперечный скол монокристалла; г, д — время облучения  $\tau = 8$  час,  $2 \times$

На рис. 2б показана поверхность образца монокристалла NaCl после облучения в течение 30 сек. при  $h = 0,5$  мм. Поверхность покрыта линиями скольжения и отдельными розетками дислокационных скоплений. Повсеместное распределение линий скольжения свидетельствует, что деформации возникли вследствие равномерно распределенной нагрузки. Такая нагрузка возникает при пульсации зоны кавитации в целом, следовательно, и пульсаций гидромеханического давления.

На рис. 2в показана деформация монокристалла по глубине. Она обнаруживается на поверхности скола, нормальной плоскости, подвергающейся кавитационному воздействию. Виден особо уплотненный слой глубиной 150  $\mu$ , в котором произошло торможение дислокаций. Образование особо уплотненного слоя предшествует хрупкому разрушению поверхности.

В особо уплотненном слое обнаруживаются микротрещины, которые зарождаются на поверхности материала в местах скопления дислокаций. Ниже особо уплотненного слоя замечается постепенное уменьшение плотности дислокаций на глубину не менее 10 мм.

В опытах с чугунными образцами процесс разрушения различен. Образцы, не покрытые слоем хрома, разрушаются, начиная с графитовых включений и феррита. Сетка трещин на хромированной поверхности свидетельствует о больших внутренних напряжениях в чугуне, которые обнаруживаются в результате воздействия зоны кавитации в целом (рис. 2г).

На рис. 2д показана хромированная поверхность отожженного стального образца. Внутренние напряжения в этом случае сняты и эрозия развивается на локальных участках от воздействия единичных пузырьков в первые моменты опыта. Впоследствии локальные язвины разрушаются от гидравлического удара кумулятивных струй, проникающих в язвины при пульсации зоны кавитации в целом.

Таким образом, в процессе развития эрозии действуют различные силы. Величина и род сил зависят от структуры и местоположения зоны кавитации относительно разрушаемой поверхности, от качества обработки поверхности твердого тела и его прочностных свойств. Такими разрушающими силами могут быть: силы от переменного гидромеханического давления вследствие периодического образования зоны кавитации; силы, возникающие от воздействия единичных пузырьков; силы от гидравлического удара в язвинках, природных или образующихся в результате действия пузырьков и зоны кавитации в целом. Образование единичных язвин может быть объяснено релаксационной гипотезой эрозии, которая может происходить при возникновении или пульсации пузырька вблизи твердой поверхности. В случае объяснения эрозии ударными волнами от захлопывания пузырьков<sup>(5)</sup> нельзя было бы объяснить четкую границу отдельных язвин эрозии. В пользу релаксационной гипотезы эрозии говорят обнаруженные в данной работе эффекты, свойственные явлению релаксации при ударе малогабаритных масс жидкости о твердое тело<sup>(6)</sup>: 1) тождественность деформаций поверхности упругопластичных тел при воздействии единичного пузырька и твердого штампа; жидкость на некоторое время «отвердевает» согласно релаксационной гипотезе; 2) несмотря на малогабаритные объемы жидкости, участвующие в ударе о твердое тело при кавитации, могут образовываться пластические и упругие деформации, свойственные большим нагрузкам, только вследствие малого времени релаксации.

Институт проблем механики  
Академии наук СССР  
Москва

Поступило  
9 IX 1970

Институт прикладной физики  
Академии наук МССР  
Кишинев

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Н. Nowotny, Werkstoffzerstörung durch Kavitation, Berlin, 1942, p. 12.  
<sup>2</sup> Н. Kutttruff, U. Radek, Acustica, 21, № 5 (1969). <sup>3</sup> J. Varga, G. Sebestyen, Houille blanche, № 8 (1966). <sup>4</sup> К. Б. Броберг, Упругие волны в упругой и упругопластической среде, М., 1960. <sup>5</sup> L. Rayleigh, Phil. Mag., 34, № 200 (1917). <sup>6</sup> С. П. Розырев, Р. К. Шальнев, ДАН, 192, № 3 (1970).