

## МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОНИКИ

**А.В. Лановая, Т.Н. Плужникова, В.М. Иванов,  
Е.Б. Винокуров, А.А. Лозенков, А.И. Желтов**

*ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»; ГОУ ВПО  
«Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина», г. Тамбов*

**Ключевые слова и фразы:** концентрация электромагнитной энергии; осциллограммы импульсов тока; печатные платы электронных устройств; плоский проводник с током; пондеромоторное взаимодействие токов; сверхскоростной фоторегистратор; электромеханическое разрушение.

**Аннотация:** Рассматриваются два механизма разрушения плоских проводников с током при наличии в них дефекта в виде трещины. При определенных значениях и длительностях действия тока в проводнике преобладает механизм разрушения, вызванный пондеромоторным взаимодействием токов, протекающих вдоль берегов трещины. При увеличении длительности воздействия тока происходит изменение геометрии вершины трещины в результате выплавления металла из этой зоны с образованием кратера. Такое разрушение может быть названо электромеханическим. Математические модели обоих механизмов разрушения подтверждены экспериментальными исследованиями.

Плоские проводники находят применение в различных электротехнических и радиоэлектронных устройствах. В электроэнергетике они используются, например, в распределительных устройствах, в шинпроводах систем цехового электроснабжения и т.п. Наиболее широко они применяются в печатных платах электронных устройств. При определенных условиях в таких проводниках могут возникать весьма значительные токи, которые, взаимодействуя с различного рода неоднородностями, могут вызвать их разрушение. Далее рассматриваются два механизма электромагнитного разрушения плоских проводников с током.

Наличие в плоских проводниках различных дефектов, проводимость которых сильно отличается от массива, приводит к нарушению электромагнитной полевой симметрии. При этом наблюдается искажение электрического поля тока, приводящего к локальному его усилению вокруг дефектной зоны, а, следовательно, магнитного поля и сопутствующих электродинамических напряжений, деформирующих эту зону. При определенных значениях электрического тока концентрация электромагнитной энергии может привести к разрушению дефектной зоны.

Механизм разрушения плоских проводников с трещиной током, протекающим вдоль ее берегов, основанный на *пондеромоторном* взаимодействии встречных токов, показан на рис. 1.

Источник тока подключается непосредственно к берегам трещины. Происходит пондеромоторное взаимодействие встречных токов, при котором берега трещины расходятся. При определенных значениях тока создается благоприятное условие зарождения очага разрушения.

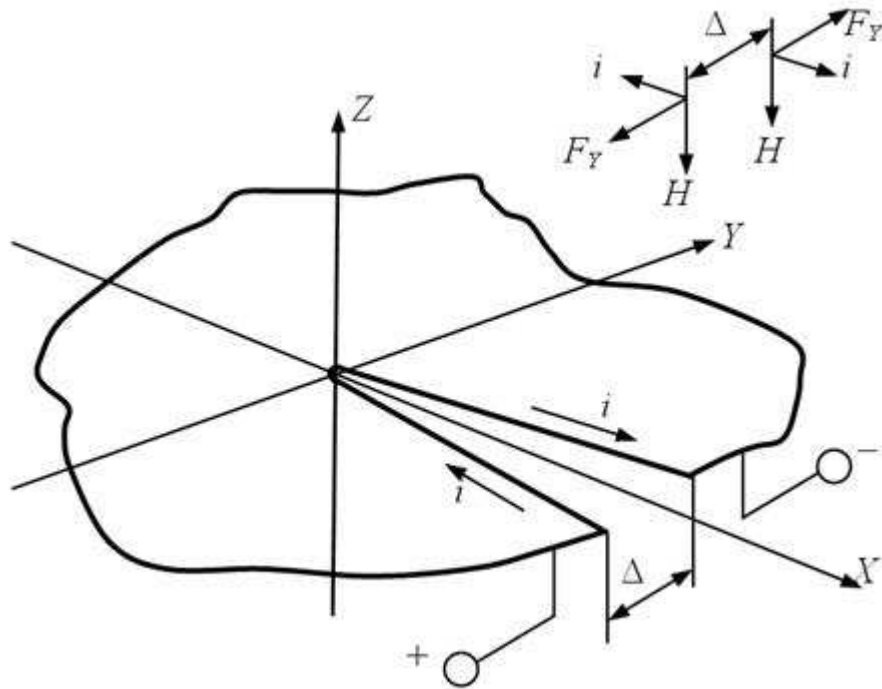


Рис. 1. Электромагнитная ситуация в пластине с трещиной при обтекании ее током

Сила, расщепляющая берега трещины, по закону Ампера равна  $F_y = i\mu_0 H$ , где  $i$  – ток (А),  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная,  $H$  – напряженность магнитного поля (А/м),  $l_T$  – длина трещины (м). С другой стороны, по закону Био-Савара,  $H = i/(2\pi\Delta)$ , где  $\Delta$  – расстояние между берегами трещины или ее вскрытие (м). Из этих выражений получим:

$$F_y = \mu_0 \frac{i}{2\pi\Delta} l_T \quad (1)$$

При неизменном вскрытии трещины и постоянном токе механические напряжения от пондеромоторных сил равномерно распределены по сечению проводника и не зависят от длины трещины. Согласно основному положению механики разрушения [6], трещина начинает расти, когда коэффициент интенсивности напряжений достигает критического значения. При одноосном растяжении тонкой пластины  $K_{1C}$  зависит от протяженности пластической области перед вершиной трещины и предела текучести материала. Полагая, что протяженность пластической зоны соизмерима с радиусом при вершине  $a$ , получим:

$$a = \frac{K_{1C}^2}{\sigma_T^2} \quad (2)$$

Следовательно, начало разрушения возможно при  $K_1 = K_{1C}$ , где  $K_{1C} = \sigma_y (\pi l_T)^{1/2}$ ,  $\sigma_y = \sigma_T$  – механические напряжения от пондеромоторных сил  $F_y$ , равные пределу текучести [5]. Подставляя выражение (1) в (2) при вышесказанных условиях, получим критическое значение плотности тока, свыше которого начинается разрушение:

$$J_{cp} = \frac{\Delta}{hb} \sqrt{\frac{\pi\sigma_T}{\mu_0}} = \frac{1,77\Delta}{hb} \sqrt{\frac{\pi\sigma_T}{\mu_0}} \quad (3)$$

Таким образом, пондеромоторное действие токов вдоль берегов трещины не зависит от ее протяженности, их критическое значение одинаково как для «длинных», так и для «коротких» дефектов в проводниках. Поэтому при незначительных повреждениях или технологических неоднородностях сплошности проводников разрушающее действие тока такое же, как и при наличии в нем трещин.

Экспериментально установлено, что импульс тока длительностью 100 мкс и плотностью  $10^8$  А/м<sup>2</sup> является наименьшим для зарождения трещины в устье надреза. При этом геометрия надреза не нарушается. При больших длительностях, как показано в работе [9], ток успевал нагревать вершину трещины до характерных температур. В результате образовывалась зона термического влияния с изменяющейся структурой и соответствующим упрочнением, а

увеличение плотности тока при  $\tau = \text{const}$  приводило к изменению геометрии вершины трещины и выплавлению металла из этой зоны с образованием кратера [7]. Такое разрушение вершины трещины связано с выдавливанием расплава электродинамическими усилиями и названо *электромеханическим*.

Проанализируем электромагнитную ситуацию в полубесконечной пластине толщиной  $h$  с краевой трещиной  $l_T$  и радиусом в ее вершине  $a$ . (рис. 2), обозначив через  $E_y$  напряженность электрического поля тока плотностью  $j_y$  вдали от трещины;  $E_{y0}$ ,  $H_{z0}$  – напряженности электрического и магнитного полей в вершине трещины. Примем за критерий разрушения объемную плотность энергии  $L$ , при которой происходит плавление металла, и сравним ее с плотностью потока электромагнитной энергии, втекающей через полость трещины со скоростью тепловой волны, где происходит интенсивное тепловыделение:

$$v = \frac{E_{z0}H_{z0}}{L} \quad (4)$$

Используя решения для  $E_{y0}$  и  $H_{z0}$  [2], а именно  $E_{y0} = j_y \rho (l_T/a)^{1/2}$  и  $H_{z0} = j_y l_T$ , где  $\rho$  – удельное сопротивление металла, получим критическое значение плотности тока  $j_y$ , при котором наступает тепловое разрушение области в вершине трещины:

$$j_y^{\text{кр}} = \sqrt{\frac{\chi L}{a l_T \rho \sqrt{l_T/a}}} \quad (5)$$

где  $\chi$  – коэффициент температуропроводности, связывающей скорость проникновения тепла на расстояние, соизмеримое с размером трещины при вершине  $a$ .

Для реальных медных образцов, применяемых в эксперименте,  $j_y^{\text{кр}} = 4 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$  ( $i_{\text{кр}} = 4 \cdot 10^4 \text{ А}$ ). При этом скорость продвижения фронта плавления равна 0,1 м/с.

При пропускании тока меньшей плотности необходимо учитывать теплопроводность металла по причине термодиффузии, так как тепловая волна в этом случае будет опережать фронт разрушения и для достижения критического значения плотности тепловой энергии  $L$  в зоне дефекта на плавление потребуется время:

$$\tau = \frac{RL}{E_{y0}H_{z0}} \quad (6)$$

где  $R$  – размер той области вокруг вершины трещины (преимущественно по оси  $x$ ), которая успевает нагреться до температуры плавления за счет теплопроводности. Поэтому длительность тока должна ограничиваться временем  $\tau = a^2/\chi$ , иначе прогретый локальный объем металла потеряет устойчивость и произойдет образование сквозного отверстия.

При отключении тока процесс разрушения прекратится и вершина трещины затупляется «засверленным» отверстием радиуса  $R$ .

Этот эффект успешно применяется в торможении трещин импульсами тока [8], в снижении концентрации механических напряжений при испытании стальных пластин с краевой и центральной трещинами и, следовательно, увеличении работы разрушения [1].

Рассмотрим механизм разрушения трещины током, пользуясь распределениями магнитных и электрических полей в непосредственной зоне. Наибольшие их значения, как уже отмечалось, были найдены в работах [2, 4]. Для магнитного поля принимаем колокообразное распределение вдоль оси  $y$ , как принято в коротких магнитных линзах [3]:

$$H_{z(y)} = \frac{H_{z0}}{1 + \beta y^2} \quad (7)$$

где  $\beta$  – степень затухания поля по оси  $y$ .

В связи с тем, что локальность усиления поля связана с радиусом при вершине трещины, а на расстоянии  $y = 100a$   $H_{z(y)}$  близка к нулю, получим следующую зависимость:

$$H_{z(y)} = \frac{H_{z0}}{1 + \left(\frac{y}{10a}\right)^2} \quad (8)$$

Также находится распределение электрического поля  $E_{x(y)}$  путем аппроксимации его затухающей экспонентой с показателем  $\alpha$ :

$$E_{x(y)} = E_{x0} e^{-\alpha y} \quad (9)$$

Очевидно  $\alpha$  также связан с размерами при вершине трещины той области, которая нагревается до предплавильных температур, т.е.  $R$ .

Тогда формула (9) примет вид:

$$E_{x(y)} = E_{x0}e^{-y/R}. \quad (10)$$

Необходимо отметить, что распределение  $E_{x(y)}$  симметрично по отношению к оси трещины  $x$ , поэтому в дальнейшем при нахождении усилий, которые выдавливают расплав из вершины трещины и, тем самым, определяют механизм разрушения, распределение полей берется по модулю.

Таким образом, плотность потока электромагнитной энергии, равная  $P(x) = E_{x(y)} \cdot H_{z(y)}$ , рождает годограф усилий, по форме близкий к окружности, повторяющей форму сквозного отверстия (рис. 2).

Таким образом, электромеханическое разрушение вершины трещины наступает при формировании расплава, потери его устойчивости с образованием отверстия.

**Экспериментальные исследования** проводились на медных пластинах толщиной  $h = 10^{-3}$  м с краевой трещиной в виде узкого надреза с радиусом при вершине  $a = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м (вскрытие  $\Delta = 10^{-3}$  м).

Импульсы тока возбуждались сварочным аппаратом для импульсно-контактной сварки и контролировались поясом Роговского, сигнал с которого подавался на осциллограф. Максимальный ток аппарата 10 кА. Процесс электромеханического разрушения снимали на кинокамеру со скоростью 1000 кадр/сек.

Экспериментально установлено, что при токах до 3 кА видимого разрушения вершины трещины нет. Однако на дне дефекта при увеличении наблюдается «сетка» микротрещин по всей поверхности, причем интенсивность их растет в направлении развития разрушения.

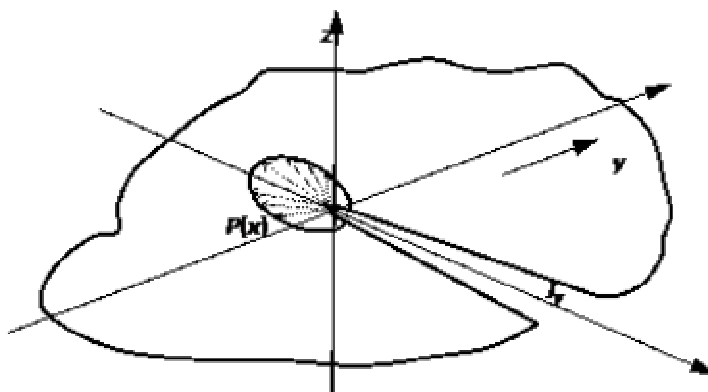


Рис. 2. Электромеханический механизм разрушения

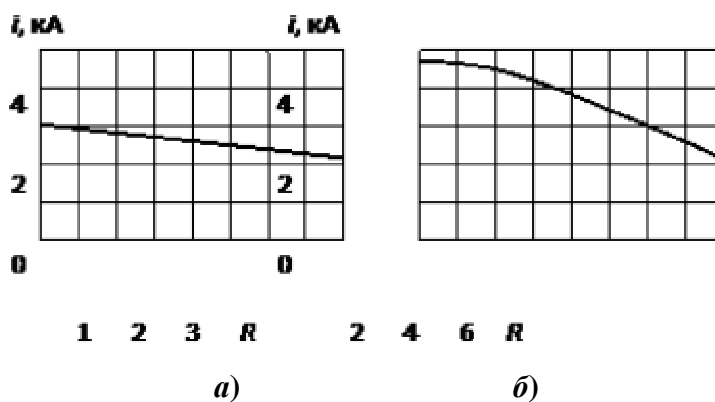


Рис. 3. Осциллограммы тока в проводнике:

а) – пондеромоторный; б) – электромеханический механизмы разрушения

Осциллограммы тока (рис. 3) показали, что при слабо монотонном уменьшении тока не могут произойти явные нарушения сплошности проводника, изменения геометрии живого

сечения и образование микротрещин. Поэтому наличие микротрещин указывает на деформацию активной поверхности преимущественно пондеромоторными усилиями. Роль температурных напряжений в этом случае незначительна из-за небольшого температурного градиента в зоне вершины трещины в силу хорошей теплопроводности меди.

При увеличении длительности воздействия током происходит разогрев металла до предплавильных температур в чрезвычайно малой зоне, прилегающей к вершине надреза, и при достижении температуры плавления вершина трещины разрушается с выплавлением некоторого объема металла и образованием сквозного отверстия. Выплавленный металл осаждается на поверхности веерообразно, что подтверждает распределение электродинамических усилий в активной зоне (рис. 2). Киносъемка процесса разрушения показала, что рост радиуса отверстия носит линейную зависимость (рис. 4), следовательно, скорость разрушения постоянна, что указывает на равномерность распределения усилий в объеме расплава и подтверждает аналитические оценки электромагнитной ситуации в полости трещины.

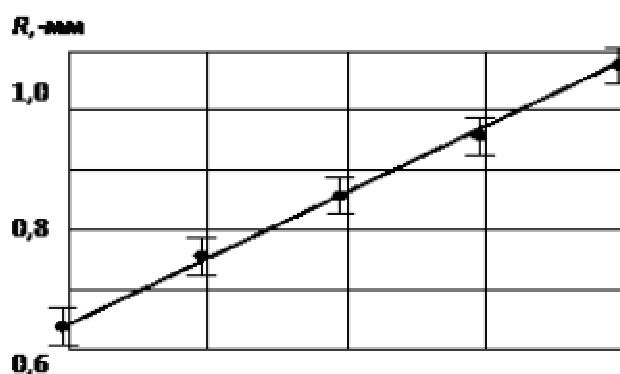


Рис. 4. Кинетика электромеханического разрушения вершины трещины

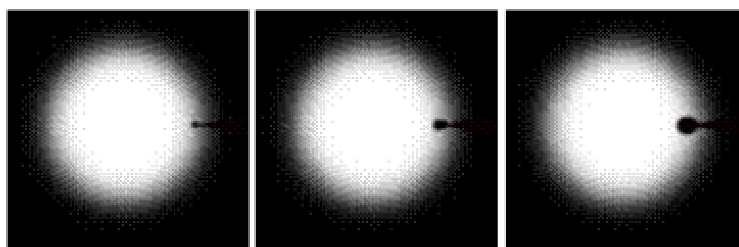


Рис. 5. Кинограмма процесса электромеханического разрушения медной пластины с трещиной

Киносъемка процесса электромеханического разрушения медной пластины с трещиной проводилась с помощью сверхскоростного фоторегистратора (СФР) со скоростью 1000 кадров в секунду.

Киносъемка, три кадра из которой, сделанные с равными интервалами, приведены на рис. 5, показала, что рост радиуса отверстия носит линейную зависимость от времени (рис. 4), следовательно, скорость разрушения постоянна, что указывает на равномерность распределения усилий в объеме расплава и подтверждает аналитические оценки электромагнитной ситуации в полости трещины.

Необходимо отметить, что электромеханическому разрушению предшествовало пондеромоторное с образующейся микротрещиной в вершине имеющегося надреза, поэтому рост радиуса выплавляемого отверстия является продолжением уже начавшегося разрушения.

Таким образом, разрушение вершины трещины током проходит две стадии: электромеханическую и пондеромоторную, которые ограничиваются длительностью токового воздействия и могут контролироваться распределением тока в пластине с дефектом (рис. 3). Поэтому, если локальный нагрев в дефектной зоне не дает видимых изменений в ее геометрии, это еще не означает сохранение работоспособности проводника под током.

### *Список литературы*

1. Борисов, В.Т. Влияние электрического тока на прочность стальных пластин с концентраторами напряжений / В.Т. Борисов, Ю.М. Головин, В.М. Иванов // Проблемы прочности. – 1984. – № 2. – С. 92–45.
2. Головин, Ю.И. Механизмы разрушения металлов с трещинами под действием электромагнитного поля / Ю.И. Головин, В.М. Иванов, В.А. Киперман // Физика и химия обработки материалов. – 1983. – № 6. – С. 48–52.
3. Кельман, В.М. Электронная оптика / В.М. Кельман, С.Я. Явор ; Акад. наук СССР. – М., 1963. – 362 с.
4. Лановая, А.В. О концентрации энергии на отверстиях в плоском проводнике с током / А.В. Лановая, Н.П. Пучков, Г.А. Барышев // Вестн. Тамб. гос. ун-т. Сер. Естественные и технические науки. – Тамбов, 2000. – Т. 5. – Вып. 2–3. – С. 328–330.
5. Механизмы разрушения проводников с трещиной электромагнитным полем / В.М. Иванов, А.В. Лановая, А.А. Лозенков, Т.Н. Плужникова // Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений: материалы IV Междунар. шк.-конф., г. Тамбов, 2–30 июня 2007 г. – Тамбов, 2007. – С. 289–293.
6. Работнов, Ю.Н. Механика деформированного твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М. : Наука, 1979. – 744 с.
7. Финкель, В.М. Об упрочнении в устье трещины, обтекаемой импульсом тока / В.М. Финкель, Ю.И. Головин, А.А. Слетков, В.М. Иванов, В.П. Иванов // Физика и химия обработки материалов. – 1981. – № 2. – С. 31–37.
8. Финкель, В.М. О возможности торможения быстрых трещин импульсного тока. / В.М. Финкель, Ю.И. Головин, А.А. Слетков // Докл. Акад. наук СССР. – 1976. – Т. 227. – № 4. – С. 848–851.
9. Электротермическая резка листового металла электромагнитным полем / В.М. Финкель, Ю.И. Головин, В.М. Иванов, В.А. Киперман // Физика и химия обработки материалов. – 1985. – № 1. – С. 13–19.

© А.В. Лановая, Т.Н. Плужникова, В.М. Иванов, Е.Б. Винокуров,

А.А. Лозенков, А.И. Желтов, 2009