



## Some Features of the Effect of Local Current Density Increase on the Destruction of Flat Conductors

Yury E. ADAMYAN, Dmitrii I. ALEKSEEV, Ludmila V. CHERNENKAYA,  
Sergey I. KRIVOSHEEV, Sergey G. MAGAZINOV, Vasiliy V. TITKOV

Peter the Great Polytechnic University; St.Petersburg, Russia  
e-mails: [ksi.mgd@gmail.com](mailto:ksi.mgd@gmail.com)

### Abstract

A numerical simulation and experimental study of a defect formation on the edge of flat busbars during impulse current application are carried out. It is shown that the growth of defects can be described with the use of the magnetohydrodynamic approach, typical for describing the destruction of solenoids in strong pulsed magnetic fields.

**Keywords:** crack, fracture, destruction, pulsed magnetic field, pulsed current

## Некоторые особенности влияния увеличения локальной плотности тока на разрушение плоских проводников

Юрий Э. АДАМЬЯН, Дмитрий И. АЛЕКСЕЕВ, Людмила В. ЧЕРНЕНЬКАЯ,  
Сергей И. КРИВОШЕЕВ, Сергей Г. МАГАЗИНОВ, Василий В. ТИТКОВ

### 1. Введение

В настоящее время сильные импульсные магнитные поля находят достаточно широкое применение в решении технологических и научно-исследовательских задач. В силу высокой плотности энергии, характерной для сильных импульсных магнитных полей и спецификой их взаимодействия с проводящими материалами решаются задачи импульсного формообразования, см. например труды International Conferences on High Speed Forming [1], сварки разнородных сплавов и металлов [2] и пр.

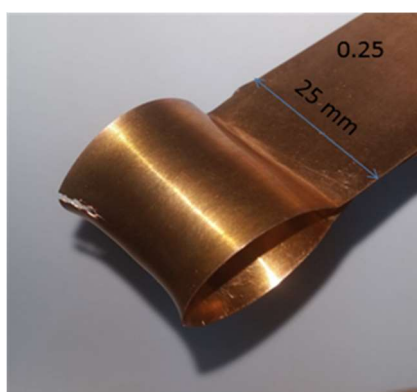
Генерация магнитных полей с индукцией до 50-70 Т (технологический уровень) осуществляется с использованием толстостенных одновитковых соленоидов из материалов, механическая прочность которых превышает действующее магнитное давление. При этом не наблюдаются характерных для полей с индукцией более 100 Т эффектов, связанных с нелинейной диффузией [3,4], электрическим взрывом поверхностного слоя [5] и формированием ударно-волнового течения [6,7]. При однократной генерации полей технологического уровня магнитная система обычно не разрушается и может быть использована многократно. Ограничивающим ресурс таких систем фактором является развитие локальных дефектов, развивающихся поперек линий тока, обусловленных термонапряжениями и накоплением пластических деформаций вблизи поверхностного слоя – эффект пилы [7]. Причем, как отмечается в [8], термонапряжения, возникающие в поверхностном слое приводят к образованию дефектов в материале в виде микротрещин уже после первой генерации поля с индукцией 40 Т. Появление этих дефектов при последующих воздействиях приводит к ускоренному росту этих дефектов, обусловленному усилением локальной плотности тока в зоне дефекта и, как следствие, увеличению локального нагрева и роста термонапряжений.

Однако при плотностях тока, меньших реализуемых при генерации магнитных полей возможен обратный эффект – расплавление металла вблизи вершин трещин и их «залечивание» [9, 10], что приводит к снижению концентрации напряжений и увеличению прочности материала.

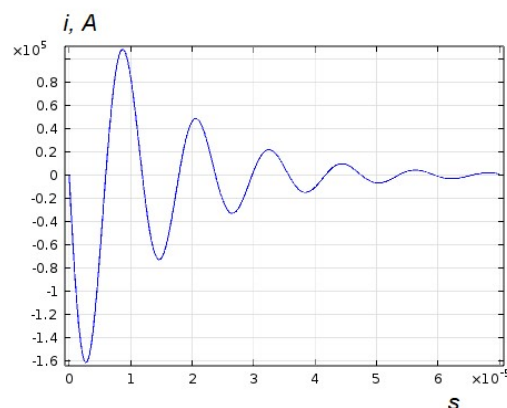
Для решения некоторых задач могут быть использованы магнитные системы в виде тонкостенных соленоидов [11] или в виде системы плоских шин [12, 13, 14] при этом требования к этим магнитным системам связаны не столько с ресурсом, сколько с однозначностью распределения магнитного поля и магнитного давления. Типичным для таких систем является возникновение дефекта на краю системы и его дальнейшее прорастание даже в процессе генерации импульса [15, 16, 17] при воздействии импульса тока миллисекундного диапазона. В некоторых работах рассматривается возможность использование эффекта пилы (magneticsaweffect) [18] для резки листовых металлов.

## 2. Оценка условий возникновения начального дефекта

Как отмечено выше, первичная трещина может возникать в результате накопления остаточной деформации в результате многократного нагружения металла умеренными нагрузками. При достижении критической остаточной деформации, величина которой зависит от материала и формы образца возникает трещина, которая существенно видоизменяет картину разрушения и растекания тока. Опыты, демонстрирующие накопление остаточной деформации до критического уровня за 10-20 импульсов нагружения, были проделаны с тонкостенными (0.25 мм) одновитковыми соленоидами, выполненными из бронзы БрОФ 6.5-0.15 (Рис. 1).



а)



б)

Рис. 1 а) вид соленоида после серии импульсов; б) осциллограмма тока соленоида

Рис. 1 в частности демонстрирует появление трещин на краю соленоида, где имеет место наибольшая остаточная деформация, обусловленная краевым эффектом распределения магнитного поля и тока, создающего большие усилия нагружения по сравнению с его центральной частью. Для оценки справедливости критерия образования начальной трещины выполнено моделирование электромагнитных и механических процессов в условиях описанного эксперимента в приближении осевой симметрии и использованием уравнений квазистационарного уравнения электромагнитного поля для векторного потенциала, нестационарного уравнения теплопроводности и уравнения динамики деформируемого твердого для модели упругопластической деформации с упрочнением Рис. 2.

Принимая во внимание высокую среднюю скорость пластической деформации, реализуемую в данных экспериментах порядка  $10^3 \text{ c}^{-1}$ , следует учесть возрастание сопротивления деформации для этих условий. Для указанной скорости деформации эмпирическая зависимость предела текучести меди Johnson-Cook [19] показывает возрастание предела текучести порядка 20 %. Учитывая относительно небольшой рост предела текучести в данном скоростном диапазоне скорости деформации, можно без значительных погрешностей применить данную оценку и для материала исследуемого соленоида (оловянистая бронза). Таким образом, в расчетах вместо табличного предела текучести 350 МПа [20] использовалось увеличенное на 20% значение.

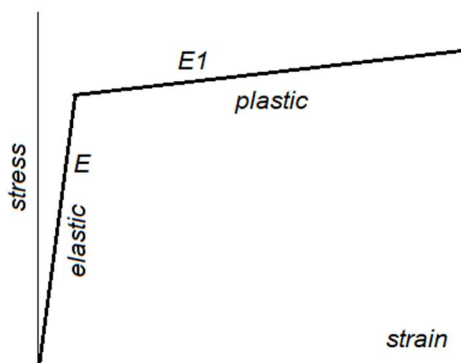


Рис. 2 Аппроксимация диаграммы растяжения

Модуль упрочнения в зоне пластической деформации для оловянистых бронз был выбран согласно [20] равным  $E_1=0.46 \text{ ГПа}$ .

Некоторые результаты моделирования остаточной деформации представлены на Рис. 3. Из которого видно, что деформация края соленоида после окончания первого импульса достигает 6 %. Приращение остаточной деформации при последующих деформации импульсах меняется незначительно до 5% за импульс. Небольшое снижение приращения связано с изменением формы края соленоида, приводящее к меньшим значениям электромагнитных сил. Предельное значение пластической деформации для использованной в данных экспериментах бронзы составляет около 40 % [20].

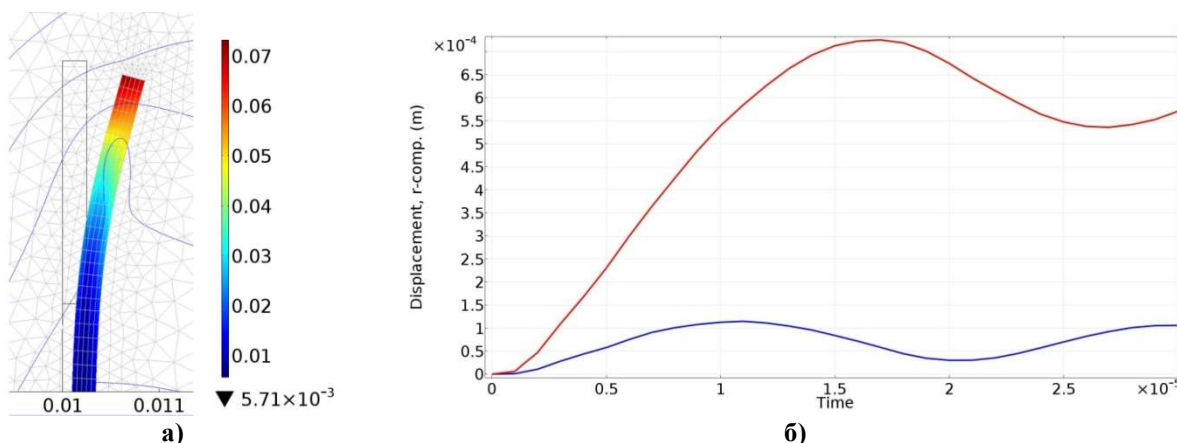
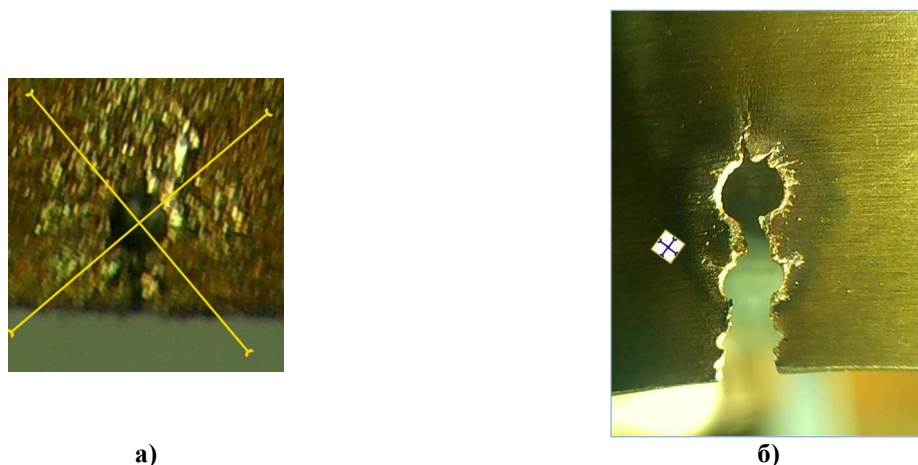


Рис. 3. Деформация тонкостенного соленоида в процессе приложения первого импульса тока: а) финальная пластическая деформация; б) перемещение стенки соленоида

Поэтому появление первых трещин следует ожидать после приложения 6-7 импульсов тока, показанных на Рис. 1 б. В данных экспериментах визуально наблюдаемая трещина на краю соленоида была обнаружена после седьмого импульса тока. На Рис. 4 приведена фотография края соленоида после приложения 7 и 12 импульсов тока. Трещина края соленоида при этом получила значительное развитие из первичного состояния в результате отмеченного выше эффекта «пилы», действие которого началось после ее раскрытия, Рис. 4.



**Рис. 4. Начальный дефект кромки соленоида, зафиксированный после 7-кратного пропускания тока (а) и его вид после 12-го импульса (б). Размер маркера 0.25×0.25 мм×мм**

Ниже более подробно рассматриваются результаты экспериментального исследования влияния начальной длины дефекта на характер разрушения в режимах микросекундной длительности.

### 3. Особенности разрушения дефекта в виде трещины

Локальное усиление тока в вершине дефекта приводит к разрушению этой зоны. Разрушение имеет типичный характер и проявляется в виде кругового кратера со следами течения или выброса расплавленного металла. В ряде работ отмечается, что определяющим фактором в развитии разрушения при сравнительно медленных (сотни микросекунд) токовых воздействиях [14, 15] является интеграл действия:

$$J = \int_0^t j^2 dt. \quad (1)$$

В микросекундном интервале воздействий развитие дефектов исследовано при пропускании импульсного тока вида:

$$i(t) = I_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2)$$

при этом менялась амплитуда и длительность импульса, а интеграл действия достигал значения существенно ниже критического для использованного материала (бронза БрОФ6,5-0,15) значения  $3.72 \cdot 10^{15} < J_{sm} = 4.75 \cdot 10^{16} \text{ [A}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-4}\text{]}$ , по среднему сечению шин оставался одинаковым и достигал значения 0.087 от критического. При этом параметры импульса тока для 1 режима имели значения:  $I_m = 1.95 \cdot 10^5 \text{ А}$ ,  $T = 11.9 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ ,  $\tau = 14.9 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ , а для 2 режима –  $I_m = 3.53 \cdot 10^5 \text{ А}$ ,  $T = 6.25 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ ,  $\tau = 4.35 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ .

Как видно из Рис. 2, размер разрушения в режиме 1 существенно превышает соответствующую характеристику при воздействии более коротким, но с большей амплитудой, импульса тока во 2-ом режиме. И, следовательно, интеграл действия не может рассматриваться как единственный действующий фактор, определяющий процесс формирования кратера.

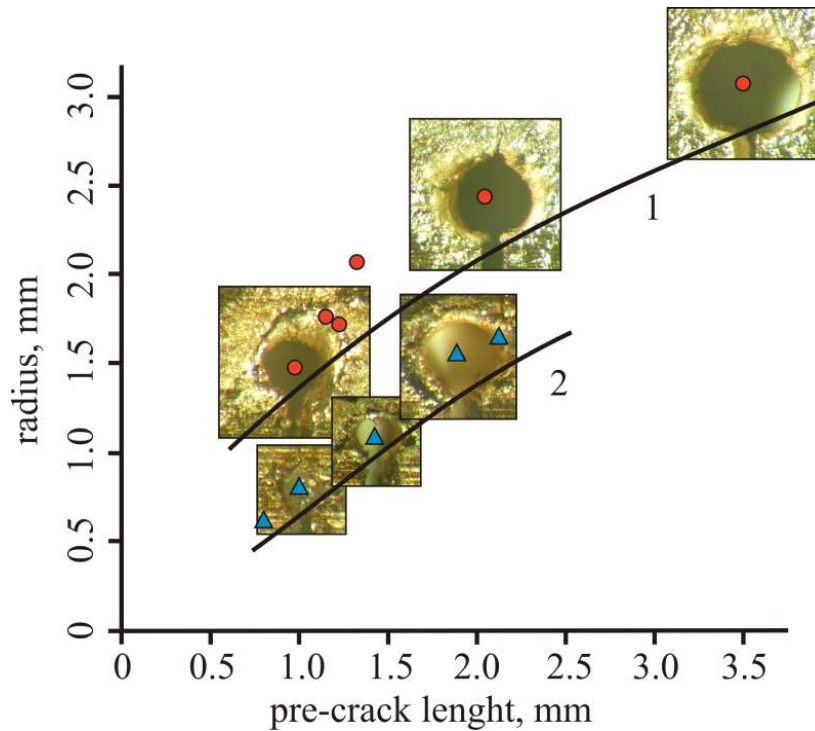


Рис. 5. Вид вершины дефекта и его размер при 1 и 2 режимах нагружения (красные, круглые точки – режим 1; синие, треугольные – режим 2). Сплошные линии 1, 2 – расчетные зависимости по модели «медленного» взрыва для режимов 1 и 2 соответственно.

Моделирование показывает, что на поверхности дефекта в процессе протекания тока возможна генерация магнитных полей, амплитуда индукции которых в исследуемом диапазоне параметров может достигать 15-35 Т. К описанию процессов в таких полях возможно привлечение простой модели, описывающей разрушение одновиткового соленоида в результате пластического течения [21, 7].

Будем полагать, что на внутреннюю поверхность соленоида действует магнитное давление, превышающее предел пластичности материала. В результате этого давления, формируется течение, при котором, смещаясь в сторону от поля, материал выносится вдоль силовых линий – модель «медленного» взрыва. При этом скорость смещения границы определяется следующим выражением

$$V = Va \sqrt{1 - \frac{B_s^2}{B_m^2}}, \quad (3)$$

где  $Va = B_m / \sqrt{\gamma_0 \mu_0}$ ,  $B_s$  – индукция, при которой магнитное давление превышает предел пластичности,  $\gamma_0$  – плотность среды,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

Интегрируя (3) в пределах, когда  $B_m > B_s$ , можно для обоих режимов нагружения получить зависимости смещения границы поле-проводник, вид которых приведен на

Рис. 5 (кривые 1 и 2). Эти зависимости демонстрируют качественное совпадение с экспериментальными данными, при этом проходят несколько ниже экспериментальных. Отличие может быть связано с тем, что в процессе разрушения, особенно при больших длинах трещины (при больших значениях индукции) возможна реализация и других механизмов разрушения материала, приводящих к росту кратера, например «быстрый» взрыв.

#### 4. Заключение

Начальное разрушение одновиткового бронзового соленоида в виде микротрещин наблюдается при накоплении критических пластических деформаций. Последующее пропускание тока приводит к развитию разрушения в виде расплавления материала в вершинах микротрещин и появление новых микротрещин, распространяющихся из кратера.

#### Благодарности

Численные расчеты выполнены в средах Comsol Multiphysics и ANSYS autodyn на суперкомпьютере «Политехнический» – РСК Торнадо. Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 8-19-00230.

#### Список литературы

1. International Conference on High Speed Forming (<http://ichsf.com/>).
2. Lee J.-G., J.-J. Park, M.-K. Lee, C.-K. Rhee, T.-K. Kim, A. Spirin, V. Krutikov, S. Pararin, End closure joining of ferritic-martensitic and oxide-dispersion strengthened steel cladding tubes by magnetic pulse welding. Metallurgical and materials transactions A, Vol. 46A, 2015, pp. 3132-3139.
3. Krivosheev S.I., V.S. Pomazov, G.A. Shneerson. Specific features of shock wave formation in superstrong magnetic field. Tech. Phys. Let., Vol. 37, 2011, pp. 877-880.
4. Chaikovsky A.A., V.I. Oreshkin, I.M. Datsko, N.A. Labetskaya, D.V. Rybka, N.A. Ratakhin. Experimental study of the nonlinear diffusion of a magnetic field and skin explosion of cylindrical conductors. Phys. Plasmas, 22(11), 2015, Art. No. 112704.
5. Oreshkin V.I., S.A. Chaikovsky, K.V. Khishchenko, E.V. Oreshkin. Numerical simulation of electrical explosions in megagauss magnetic fields. J. Phys.: Conf. Ser., 830(1), 2017, Art. No. 012029.
6. Krivosheev S.I., S.G. Magazinov, D.I. Alekseev. On the impact of the elastic-plastic flow upon the process of destruction of the solenoid in a super strong pulsed magnetic field. J. Phys.: Conf. Ser., 946(1), 2018, Art. No. 012040.
7. Shneerson G.A., M.I. Dolotenko, S.I. Krivosheev. Strong and superstrong pulsed magnetic fields generation. Berlin: Walter de Gruyter GmbH, 2014, 429 p.
8. Spirin A.V., V.I. Krutikov, D.S. Koleukh, A.S. Mamaev, S.N. Pararin, N.V. Gavrilov, A.S. Kaigorodov. Effect of structural steel ion plasma nitriding on material durability in pulsed high magnetic fields. J. Phys.: Conf. Ser., 830(1), 2017, Art. No. 012080.
9. Finkel' V.M., Y.I. Golovin, A.A. Sletkov. Possibility of braking rapid cracks by pulses of current. Soviet Physics. Doklady, 21(4), 1976, pp 216.
10. Hosoi A., T. Kishi, Y. Ju. Healing of fatigue crack treated with surface-activated pre-coating method by controlling high-density electric current. Proc of the 13th Int. Conf. on Fracture 2013, ICF 2013, Beijing, China, 16-21 June 2013, Vol 2, pp. 1686-1695.

11. Selemir V.D., G.A. Shneerson, S.I. Krivosheev, O.M. Tatsenko, V.V. Platonov, A.V. Filippov, E.A. Bychkova. Studying magneto-induced iodine sorption at dielectric surface. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 43(2), 2015, Art. No 70055111, pp. 688-691.
12. Krivosheev S.I. Pulsed magnetic technique of material testing under impulsive loading. *Technical Physics*, 50(3), 2005, pp. 334-340.
13. Krivosheev S.I., S.G. Magazinov. Irreducible specific energy of new surfaces creation in materials with crack-type macro defects under pulse action. *Journal of Physics: Conf. Series*, 774(1), 2016, Art. No. 012049, DOI: 10.1088/1742-6596/774/1/012049.
14. Krivosheev S.I., S.G. Magazinov, D.I. Alekseev. High-speed deformation of copper samples with the use of magnetic pulse method. *MATEC Web of Conferences, NCTAM 2017*, Vol. 145, 2018, Art. No. 05006.
15. Golovin Y.I., V.M. Finkel', A.A. Sletkov. Crater formation at the tip of a crack due to a powerful local electromagnetic field. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, No 3, 1977, pp. 18-23.
16. Gallo F., S. Satapathy, K. Ravi-Chandar. Melting and crack growth in electrical conductors subjected to short-duration current pulses. *International Journal of Fracture* 167(2), 2011, pp. 183-193.
17. Jiang Z., H. Li, B. Wang, W. Wang, H. Li, J. He, F. Lin. Fracture behavior of metallized electrode for capacitor under pulsed current. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(5), 2016, Art. No 7736808, pp. 2517-2525.
18. Sitzman A.J., F. Stefani, D.L. Bourell, E. Treviño. Use of the magnetic saw effect for manufacturing. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 42(5), 2014, pp. 1173-1178.
19. Johnson G.R., W.H. Cook. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Eng. Fracture Mech.*, 21(1), 1985, pp. 31–48.
20. Логинов Ю.Н. Медь и деформируемые медные сплавы: учебное пособие. 2-е изд., стер. Екатеринбург: ГОУВПОУГТУ-УПИ, 2006, 136 с.
21. Гордиенко В.П., Г.А. Шнеерсон. Электрический взрыв скин-слоя. *ЖТФ*, 34(2), 1964, pp. 376-378.