



Features of the Magnetic-pulse Method Deformation of Conducting Samples

Sergey I. KRIVOSHEEV, Yuri E. ADAMYAN, Vasiliy V. TITKOV,
Ludmila V. CHERNENKAYA, Dmitry I. ALEKSEEV, Sergey G. MAGAZINOV

Peter the Great Polytechnic University; Saint Petersburg, Russia
e-mails: ksi.mgd@gmail.com, yuriadamian@gmail.com, titkovprof@yandex.ru,
alexeyev.dmitry@gmail.com, magazinov_sg@mail.ru

Abstract

The paper presents the results of experimental testing by magnetic-pulse method of Cu-ETP samples with crack type macro defect. Three-dimensional modeling of the magnetic field in the loading device -sample system was performed, on the basis of which the magnetic pressure was calculated and mechanical simulation was performed with Johnson Cook plasticity model and fracture criteria. Comparison of the obtained results of residual deformation indicates the applicability of Johnson Cook plasticity model for OFHC copper for describing the behavior of Copper ETP in the deformation rate range up to 10^4 1/s.

Keywords: High speed deformation, magnetic-pulse loading, Johnson Cook plasticity model

Особенности магнитоимпульсного способа деформирования проводящих образцов

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

1. Введение

Магнитно-импульсный способ создания управляемых импульсов давления микросекундной длительности при исследовании импульсной прочности хрупких не проводящих материалов позволил выявить ряд общих закономерностей процесса разрушения [1, 2, 3]. Использованный при анализе результатов термодинамический подход позволил получить характерные зависимости предельных разрушающих нагрузок от их длительности и характерного для каждого материала параметра – времени накопления энергии [4]. Особенностью этого метода является возможность формировать напряженные состояния, при которых отсутствуют режимы предварительного сжатия материала, типичные для откольных схем испытаний. Реализация этой особенности представляется особенно важной при испытании композитных и слоистых материалов, имеющих резко выраженную пространственную анизотропию деформационных характеристик.

Целью работы является обосновать и экспериментально подтвердить возможность испытания проводящих образцов в режимах высокоскоростного деформирования и выявить возможные ограничения, связанных с влиянием наводимого в образце тока на деформационные кривые металла.

2. Формирование давления магнитноимпульсным способом

При генерации магнитного давления, передаваемого на образец, магнитноимпульсным способом, описанным в [4], введение в магнитную систему дополнительного элемента в виде проводящего образца может привести к изменению соотношений параметров импульса тока, протекающего по драйверу, и параметрами передаваемого в образец импульса давления.

Этот вопрос исследовался путем численного моделирования в среде Comsol Multiphysics процесса генерации магнитного поля в системе драйвер-образец с геометрическими размерами, соответствующими использованным в эксперименте.

На Рис. 1 приведен общий вид испытуемого объекта с установленным драйвером и картины распределения магнитного поля для простого и квазиоаксиального магнитноимпульсного драйвера (МИД) и образца при ширине шин драйвера $c_{mpd} = 7.8$ мм для объектов с различной проводимостью. Расчет проведен для драйвера длиной 15 мм.

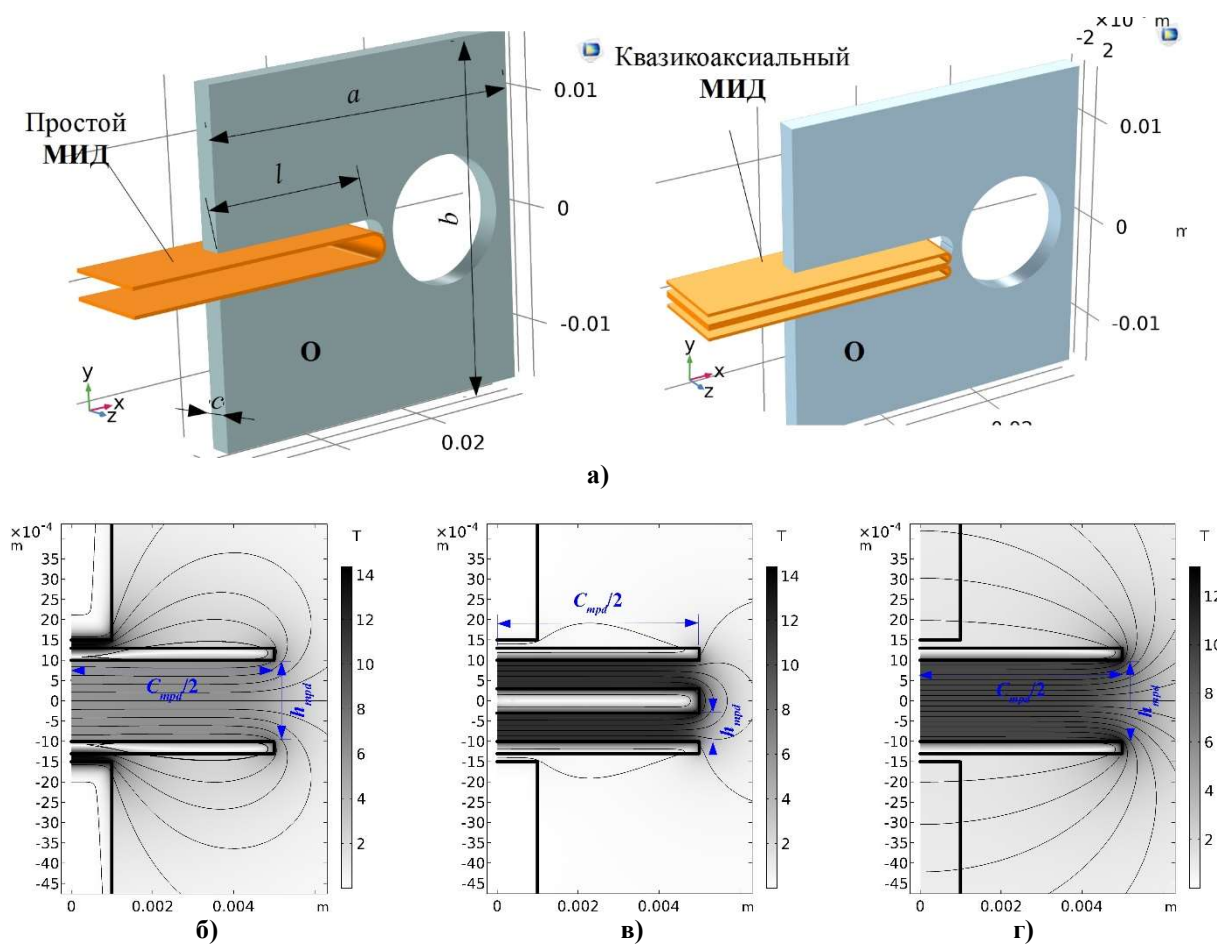


Рис. 1. а) Испытуемый образец (О) с установленным драйвером (изоляция не изображена).

Картина распределения магнитной индукции в момент максимума тока:

б) простой МИД, проводящий образец;

в) квазиоаксиальный МИД, проводящий образец;

г) простой МИД, не проводящий образец

Анализ результатов моделирования выявил некоторое влияние ширины драйвера на параметры действующего на образец давления. Это связано с тем, что в системе

плоских шин, при выполнении условия $c_{mpd} \gg h_{mpd}$, магнитное давление P_m связано с протекающим по драйверу током I простым соотношением:

$$P_m = \mu_0 \cdot (I/c_{mpd})^2 / 2 \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, а в эксперименте это условие не всегда выполняется. Реальные зависимости давления, действующего на берега паза в образце, отнесенного к давлению, рассчитанному по формуле (1), при протекании по МИД импульсного тока $i(t) = I_m \sin(2\pi/T \cdot t)$ с периодом $T = 8$ мкс, близким к экспериментальному, приведены на Рис. 2. Моделирование проведено при варьировании ширины МИД c_{mpd} с сохранением линейной плотности тока $I_m/c_{mpd} = 10$ кА/мм, где I_m - амплитудное значение тока и заданными размерами медного образца - толщиной $c = 2$ мм, шириной и длиной $b = a = 30$ мм, высотой паза $h = 3$ мм, длиной паза $l = 15$ мм (см. Рис. 1).

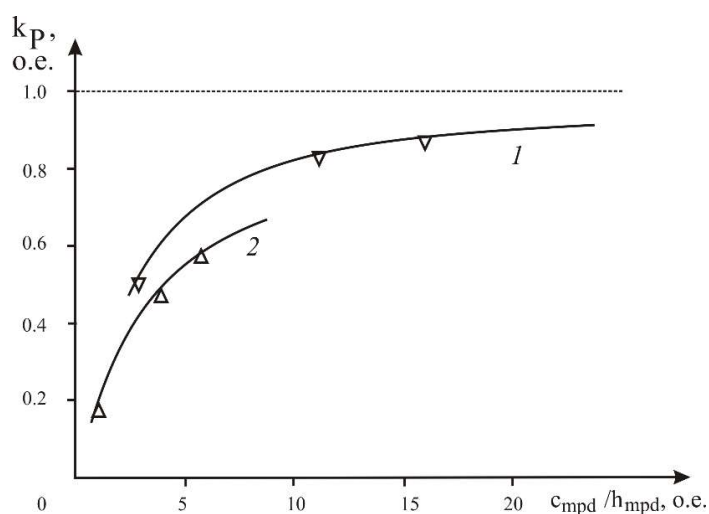


Рис. 2. График зависимости отношения расчетного магнитного давления к давлению P_m , рассчитанному по формуле (1) от отношения ширины шин МИД к расстоянию между ними. 1 - простой МИД, 2 - квазикоаксиальный МИД.

Приведенные на Рис. 2 зависимости показывают, что с увеличением отношения c_{mpd} / h_{mpd} магнитное давление приближается к рассчитанному по формуле (1). Так как расчет произведен для реально используемой в эксперименте конфигурации образца, в которой ширина паза постоянна, то магнитное давление, формируемое квазикоаксиальным МИД, при том же токе в каждом плече драйвера превышает давление, формируемое простым МИД.

3. Деформирование образца под действием приложенного давления

Моделирование упруго-пластического деформирования медной пластинки с макродефектом типа трещины выполнено в среде ANSYS Autodyn [5] в трёхмерной постановке. В качестве расчетной модели деформирования выбрана модель пластичности Джонсона-Кука для бескислородной меди – OFHC copper [6], описывающая деформационный процесс вплоть до разрушения.

Обоснованность использования модели деформирования Джонсона-Кука [6] оправдана хорошим соответствием расчетных и экспериментальных деформационных кривых для различных пластически деформируемых материалов при скоростях

деформирования ~ 2000 1/сек. Достоверность этой модели для различных металлов подтверждается ее внедрением в различные программные среды, например [5]. В [7] показана применимость этой модели для описания процесса высокоскоростного деформирования стали Steel 09G2S при скоростях деформирования до 1500 1/с. Такое поведение деформационных кривых типично практически для всех пластически деформируемых материалов и хорошо описывается моделью Джонсона-Кука, согласно которой изменение предела упругости в зависимости от деформаций, скорости деформаций и температуры определяется соотношением:

$$\sigma = [A + B\varepsilon_p^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*][1 - T^{*m}]$$

где ε_p - эффективные пластические деформации; $\dot{\varepsilon}_p^*$ - нормированная эффективная скорость пластических деформаций; $T^{*m} = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$ - гомологическая температура; $A=90$ МПа, $B=292$ МПа, $n=0,31$, $C=0,025$, $m=1,09$, $T_{melt}=1082,9$ °C – параметры модели.

В качестве критерия разрушения применена модель разрушения Джонсона-Кука. Это модель построена подобно модели пластичности:

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^f},$$

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}][1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}_p^*][1 + D_5 T^*]$$

где ε^f - эффективная деформация разрушения, $D_1=0.54$, $D_2=4.89$, $D_3=-3.03$, $D_4=0.014$, $D_5=1.12$ – параметры модели разрушения. При достижении параметром D значения 1 происходит разрушение материала.

Как показано в [8], характер напряженного состояния определяется соотношением характерного размера образца b и длины волны нагружения $\lambda = c_1 T$, где при $\lambda \ll b$ реализуется ударно-волновой режим, в противном случае квазистатический. При нагружении берегов паза равномерно распределенным импульсным давлением максимальные напряжения по фон Мизесу формируются в зоне, расположенной вблизи вершины паза.

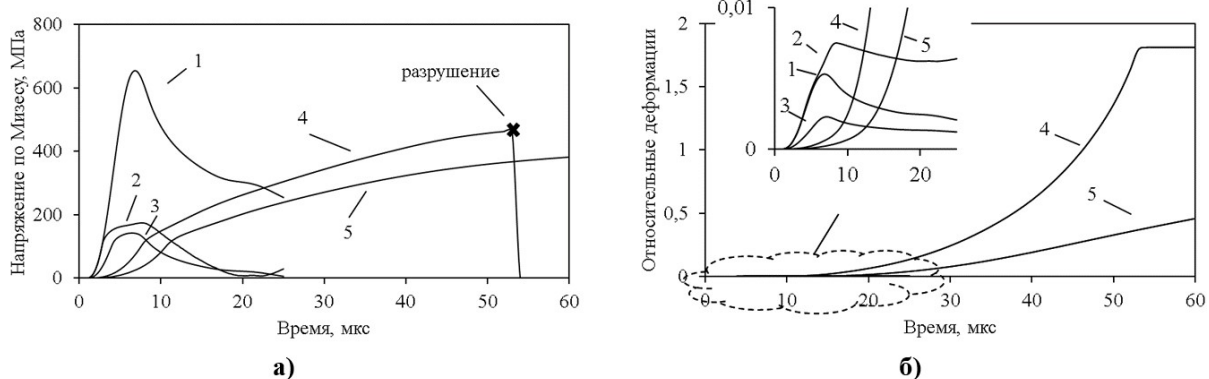


Рис. 3. а) Напряжение по фон Мизесу в вершине паза от времени;

б) Относительные деформации в вершине паза от времени.

1- $P_m=250$ МПа, $T=8$ мкс (без учета пластических деформаций);

2- $P_m=250$ МПа, $T=8$ мкс, $\dot{\varepsilon}_p=1600$ 1/с; 3- $P_m=85$ МПа, $T=8$ мкс, $\dot{\varepsilon}_p=500$ 1/с;

4- $P_m=250$ МПа, $T=50$ мкс, $\dot{\varepsilon}_p=90000$ 1/с; 5 - $P_m=85$ МПа, $T=50$ мкс, $\dot{\varepsilon}_p=14000$ 1/с.

Отклонение деформационной кривой от линейной вследствие пластического течения приводит к существенному снижению достижимых напряжений, что показано на Рис. 3а для случая ударно-волнового нагружения (кривые 1, 2, 3). При этом не удаётся обеспечить высокие скорости деформирования $\dot{\epsilon}_p$ см. Рис. 3. Переход в квазистационарный режим позволяет существенно расширить диапазон изменения как достижимых напряжений, так и обеспечить большие деформации материала в вершине паза, вплоть до разрушения Рис. 3 кривая 4.

Анализ результатов численного моделирования показывает, что при воздействии на образец равномерно распределенным по берегам паза давлением, создаваемым МИД, можно обеспечить деформирование образца со скоростями деформации до 10^5 1/с.

4. Эксперимент

Для геометрии системы образец-простой МИД, представленной на Рис. 1 выполнен эксперимент на установке ГИТ-50/12 [9]. Испытания произведены на 10 медных образцах при применении простого МИД. В ходе эксперимента с помощью пояса Роговского установленного в разрядной цепи генератора импульсного тока фиксировался ток МИД.

Типичный экспериментальный ток для эксперимента соответствующего образцу 4 (Рис. 4) описывается выражением: $i(t) = I_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \exp(-t/\tau)$, где $T = 5.9$ мкс, $\tau = 5.6$ мкс, $I_m = 352$ кА.

За счет изменения отношения амплитуды тока к ширине МИД, испытываемые образцы нагружались давлением разной амплитуды. На Рис. 4 приведен график зависимости относительных значений раскрытия паза -1 и прекрэка -2 к их исходной высоте $D_i = h_e/h_i$, где h_e , h_i -высота паза (прекрэка) после эксперимента и начальная соответственно, от амплитуды давления, прикладываемой к берегам паза, отнесенной к пределу упругости.

По графику Рис. 4 видно соответствие экспериментальных результатов и численного расчета пластического деформирования, при этом средние расчетные скорости деформирования составляют для образца 2 ~ 3 300 1/с, для образца 4 – 10 000 1/с. В эксперименте для образца 5 наблюдается его полное разрушение (оранжевые точки на Рис. 5), расчет по критерию Джонсона-Кука для меди марки ОФНС не приводит к разрушению, что возможно связано с недостаточной точностью счета или не соответствием параметров ОФНС меди по критерию разрушения Джонсона-кука для меди марки М1. При этом наведенная плотность тока в вершине образца 4 имеет вид затухающей синусоиды, амплитудное значение достигает ~ 35 кА/мм², период колебания ~ 5.7 мкс, отношение соседних амплитуд ~ 1.29 . Соответствующей данной плотности тока нагрев составит 18 °С, данный нагрев по модели Джонсона-Кука вызывает снижения предела упругости на ~ 2 %. Амплитуда индукция в вершине образца достигает значения 4.2 Т, что соответствует амплитуде магнитного давления ~ 9 МПа, в то время как на берега паза образца действует магнитное давление 421 МПа. Таким образом магнитное давление, действующее на образец в вершине паза под действием наведенного тока составляет менее 3% от давления передаваемого МИД на берега паза.

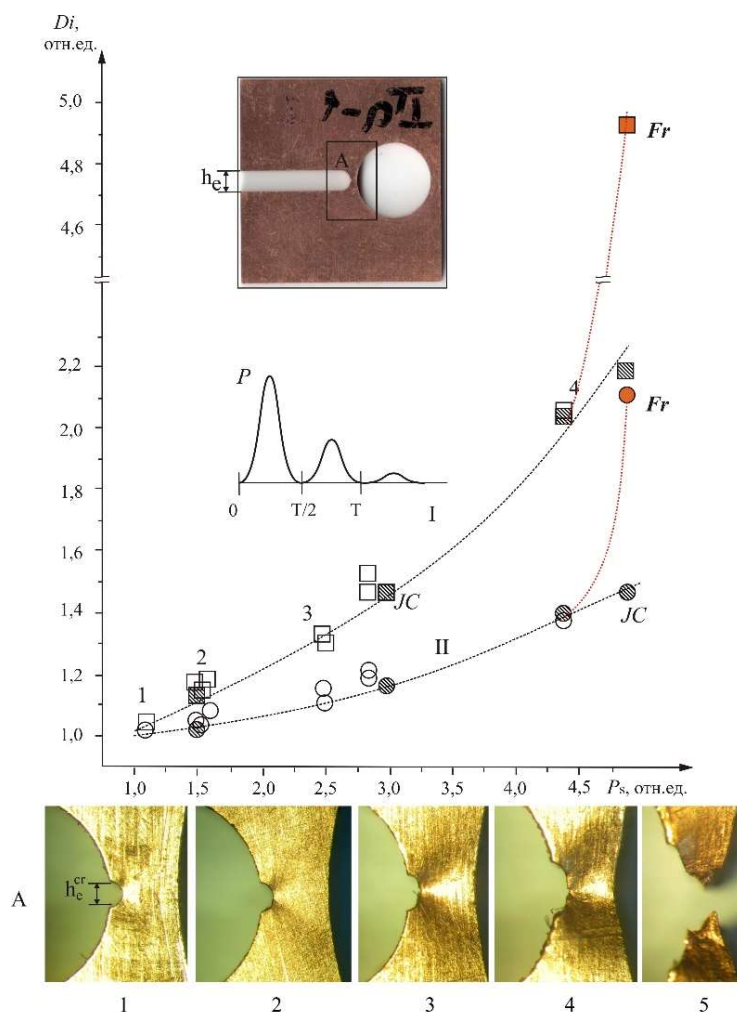


Рис. 4. Зависимости относительного раскрытия трещины -I и берегов паза -II от прикладываемого максимального давления, отнесенного к начальному пределу упругости - $\sigma_y = 90$ МПа. *P*-форма импульса давления. А – фотографии раскрытия трещины экспериментальных образцов. *JC*– расчетные точки.

Анализ полученных экспериментальных результатов для простого МИД выявляет незначительные нагрев и магнитное давление под действием наведенного тока. Однако влияние ЭПЭ, отмеченного в работах [10, 11] для плотности тока 1 кА/мм^2 при длительности импульса 100 мкс, может проявляться в процессе деформирования.

5. Заключение

Анализ результатов моделирования показал возможность использования магнитоимпульсного способа деформирования проводящих материалов со скоростями $\sim 100\,000$ 1/сек.

Модель пластичности Джонсона-Кука для меди OFHC описывает поведение материала со скоростью деформирования до 10^4 1/с. Экспериментальное продвижение в область больших скоростей деформирования позволит получить данные для верификации модели Джонса-Кука в более широком диапазоне воздействий.

Использование квазиоаксиального МИД дает возможность исключить влияние наведенных токов на процесс деформирования.

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. Krivosheev S.I. Pulsed magnetic technique of material testing under impulsive loading. *Technical Physics*, Vol. 50, Is. 3, 2005, pp. 334-340.
2. Krivosheev S.I., N.F. Morozov, Y.V. Petrov, G.A. Shneerson. Problems of fracture of brittle bodies under pulse loading. *Materials Science*, Vol. 32, Is. 3, 1996, pp. 286-295.
3. Krivosheev S.I., G.A. Shneerson. The use of pressure pulses arising from the creation of strong pulsed magnetic fields for the study of the dynamic strength of materials. *International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, including the International Workshop on High Energy Liners and High Energy Density Applications, MEGAGAUSS 2008*, Article number 4530709, 2008, pp 407-412, DOI: 10.1109/MEGAGAUSS.2006.4530709.
4. Krivosheev S.I., N.V. Korovkin, V.K. Slastenko, S.G. Magazinov. Destruction of brittle materials by microsecond pressure pulses at their formation by magnetic pulse method. *International Journal of Mechanics*. Vol. 9, 2015, pp. 293-299.
5. ANSYS Academic Research Customer #00420725 (from 2010), *CompMechLab SPbSPU*, <http://www.compmechlab.ru/>
6. Johnson G.R., W.H. Cook. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Journal Eng. Frac. Mech*, Vol. 21, No. 1, 1985, pp. 31-48.
7. Balandin V.I., V.I. Balandin, A.M. Bragov, L.A. Igumnov, A.Yu. Konstantinov, A.K. Lomunov. High-rate deformation and fracture of steel 09G2S. *Mechanics of Solids*, Vol. 49, No. 6, 2014, pp. 666-672.
8. Krivosheev S.I., S.G. Magazinov, D.I. Alekseev. The peculiarities of the application of magnetic-pulse method for forming controlled pressure to test metal samples. *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 46, No. 4, 2018, pp. 1054-1057.
9. 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*, Vol. 145, 05006, 2018.
10. Troitskii O.A. Electromechanical effect in metals. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, Vol. 10, No. 1, 1969, pp 18-22.
11. Conrad H. Thermally activated plastic flow of metals and ceramics with an electric field of current. *Material Science and Engineering*, Vol. A322, 2002, pp. 100-107.