

Передачу электромагнитного сигнала (ЭМ) излучения от источника СВЧ-излучения – магнетрона к деформируемому образцу осуществлялась при помощи волновода прямоугольного сечения. ЭМ энергия излучалась магнетроном с антенной в виде электрода, который входил в волновод и располагался на расстоянии примерно в четверть длины волны λ . Прямоугольный волновод с одной стороны был ограничен металлической стенкой. В экспериментах магнетрон излучал электромагнитные волны (ЭМВ) во всех направлениях – прямые в направлении нагрузки (деформируемого образца) и обратные в противоположном направлении к стенке волновода, которые после отражения складывались (рисунок 3а). Для стандартных волноводов необходимо выполнять соотношение $b/a < 0,5$. Так как $\lambda/a < 2$ в волноводе распространяется единственный вид волн типа Н₁₀, которые рекомендованы к использованию. По длине волны можно подобрать размеры сторон a и b . Расстояние от штока установки до оси деформируемого образца было кратным длине волны λ . В этом случае значение напряженности электрического поля E на образце максимально (рис.3б). За образцом на расстояние $\lambda/4$ волновод ограничивался стенкой. Длина волновода варьировалась от одной стандартной стенки до другой и составила $\lambda + \lambda/2$. Короб волновода выполнялся из нержавеющей стали с окнами во взаимно перпендикулярных плоскостях для размещения испытуемого образца (рис.4). В экспериментах применялось дистанционное механическое управление магнетроном. Ориентацию вектора напряженности E электрического поля СВЧ-излучения изменяли поворотом корпуса волновода относительно деформируемого образца на 90° . Температуру образцов измеряли термопарой во время действия СВЧ-излучения и одиночных импульсов тока, которая не превышала $60^\circ\text{C} - 80^\circ\text{C}$.

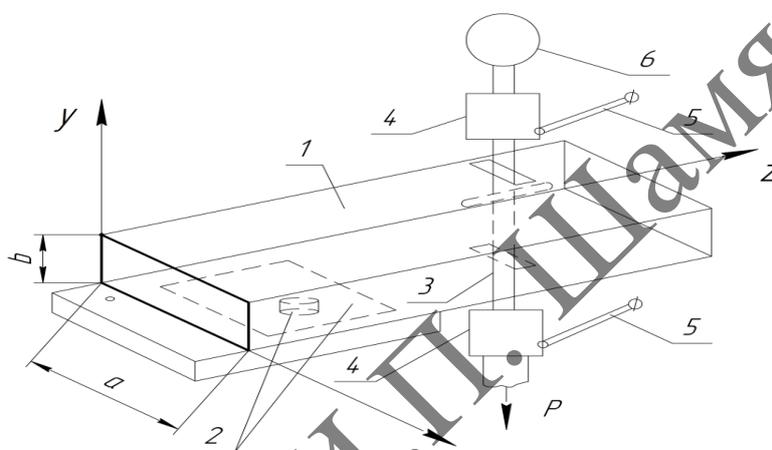


Рисунок 4 – Схема коробки волновода (1) с магнетроном (2) для подведения СВЧ-излучения к деформируемому образцу (3), находящегося в захватах (4) с токоподводом (5) и датчиком измерения усилий (6)

Список использованных источников

1. Савенко, В. С. Вклад пинч-эффекта в реализацию электропластической деформации / В. С. Савенко, О. А. Троицкий, А. Г. Силивонец // Известия НАН РБ. Серия физико-технических наук. – 2017. – № 1. – С. 85–91.
2. Savenko, V. S. Calculation of current density and magnetic field strength inside a conductor under conditions of electroplasticity./ V. S. Savenko, A. G. Silivonets, A. V. Gunenko.// Bulletin of the Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences. - 2017. – No.4. – pp.72-78.

УДК 669.2.620

В. С. САВЕНКО, М. В. ПРИБОРА

УО «Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина» (г. Мозырь, Беларусь)

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В РАСЧЁТАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Пинч-эффект вызывает вибрацию кристаллической решетки, подобно ультразвуку, и стимулирует пластическую деформацию металла через решеточную подсистему [1]. При деформации кристалла с помощью импульсов тока продолжительность действия пинч-эффекта длится от 10^{-5} до 10^{-4} секунды, что можно сравнить с эффектом быстрого действия, происходящего на фоне протекания скачков деформации от 10^{-3} до 10^{-2} секунды. В то же время вибрация решетки, вызванная пинч-эффектом на фоне нарастания и спада импульса тока, длится значительно меньше и является триггером для пластической деформации металлов.

Процесс пластической деформации протекает под воздействием одиночных импульсов тока и можно разделить на два этапа [2]. Первый этап, активный, происходит под прямым влиянием импульса тока и связанного с ним пинч-эффекта. Второй этап, пассивный, начинается после прекращения действия тока и магнитного поля, и пластическая деформация продолжается инерционно. Однако пинч-эффект имеет некоторые особенности. Магнитное поле, индуцированное током, и связанные с ним механические напряжения $\sigma_p(r,t)$ сохраняются в течение некоторого времени после окончания импульса. Поэтому влияние следующего импульса тока в течение времени t_p может вызвать усиление механических напряжений от пинч-эффекта за счет суперпозиции магнитных полей.

Для импульса противоположной полярности ситуация обратная: магнитные поля вычитаются и уровень механических напряжений от пинч-эффекта снижается [3]. Таким образом, при отсутствии интервала между униполярными и биполярными импульсами тока, вклад пинч-эффекта в пластическую деформацию металла будет больше в первом случае и меньше во втором. Данный вывод был подтвержден в ходе экспериментов с использованием встречных импульсов тока для релаксации напряжений. В отличие от «электронного ветра», который воздействует на дислокационную структуру металла только один раз в течение действия импульса тока, пинч-эффект влияет на процессы перестройки структуры дважды – как на фронте импульса, так и на его спаде, вызывая упругие механические напряжения и вибрацию решетки. Поэтому при определенных условиях и оптимальных геометрических формах образцов влияние пинч-эффекта может стать преобладающим в суммарном эффекте действия импульсного тока.

С учетом важности понимания механизма действия пинч-эффекта при применении технологии электропластической деформации металла, особенно при волочении проволоки, становится целесообразным рассмотреть физические условия создания пинч-эффекта для конкретных технически значимых металлов, а также связь его с диффузией магнитного поля в металле и скин-эффектом. При рассмотрении пинч-эффектов в металлических проводящих проводниках стоит обратить внимание на другие побочные эффекты, включая вопрос о допустимой плотности тока через образец. Этот вопрос уже рассматривался другими авторами и имеет общезначимый интерес. Нарушение закона Ома в металлах следует ожидать при плотностях тока от 10^7 до 10^8 А/мм², а критические плотности тока в сверхпроводящих соединениях составляют около 10^5 А/мм² при критической напряженности поля от 10^4 до 10^5 Э. Ток через проводник должен протекать за время, меньшее времени заметного разогрева проводника, поэтому был использован импульсный ток. Если время импульса мало по сравнению с временем проникновения тока на значительную глубину, то должен наблюдаться скин-эффект и неравномерный разогрев образцов. Однако в рассматриваемых экспериментах, аналогично другим работам, связанным с проведением токов большой плотности, например, при электрическом взрыве, скин-эффект практически отсутствовало [3].

Применяемые режимы импульсного тока и удельное электрическое сопротивление ($\rho = 6 \cdot 10^{-5}$ Ом·см) обеспечивали толщину скин-слоя $\delta \approx \sqrt{c^2 \rho / 2 \pi \omega}$ порядка 10^{-1} см при комнатной температуре и $0.3 \cdot 10^{-1}$ см при 78 К. Поскольку 95% энергии в использованных импульсах сосредоточены в низкочастотном спектре, высокочастотные компоненты спектра, которые могли бы вызвать скин-эффект, не играли особой роли. В связи с этим, скин-эффект не имел существенного влияния на эти эксперименты, и ток практически равномерно протекал по всему сечению образцов.

Пусть $B_m(x, t)$ – собственное магнитное поле в образце. Рассмотрим уравнение вида:

$$B_m(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(x, x', t) f(x') dx', \quad (1)$$

где $F(x, x', t) = (4\pi Dt)^{-1/2} \exp\left[-\frac{(x' - x)^2}{4Dt}\right]$.

Перепишем (1) в виде:

$$B_m(x, t) = (4\pi Dt)^{-1/2} \int_0^{\infty} \left\{ f(x') \exp\left[-\frac{(x' - x)^2}{4Dt}\right] + f(-x') \exp\left[-\frac{(x' + x)^2}{4Dt}\right] \right\} dx'. \quad (2)$$

Удовлетворяя граничному условию, будем иметь:

$$B_m(0, t) = (4\pi Dt)^{-1/2} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{x'^2}{4Dt}\right] \cdot \{f(x') + f(-x')\} dx'. \quad (3)$$

Условие будет выполнено, если $f(-x') = -f(x')$ ($0 \leq x' \leq \infty$).

Подставим (3), с учётом условия, в (2) и получим:

$$B_m(x, t) = (4\pi Dt)^{-1/2} \int_0^{\infty} f(x') \left\{ \exp\left[-\frac{(x' - x)^2}{4Dt}\right] - \exp\left[-\frac{(x' + x)^2}{4Dt}\right] \right\} dx'. \quad (4)$$

Подставим (3) в (4):

$$B_m(x, t) = \frac{B_0}{\sqrt{4\pi Dt}} \int_0^{\infty} \left\{ \exp\left[-\frac{(x' - x)^2}{4Dt}\right] - \exp\left[-\frac{(x' + x)^2}{4Dt}\right] \right\} dx'. \quad (5)$$

Разобьём интеграл на два слагаемых и введём новые переменные интегрирования:

$$\alpha = \frac{x' - x}{\sqrt{4Dt}}, \quad \beta = \frac{x' + x}{\sqrt{4Dt}} \quad (6)$$

получим:

$$B_m(x, t) = \frac{B_0}{\sqrt{\pi}} \left[\int_{-\frac{x}{\sqrt{4\pi Dt}}}^{\infty} e^{-\alpha^2} d\alpha - \int_{\frac{x}{\sqrt{4\pi Dt}}}^{\infty} e^{-\beta^2} d\beta \right] = \frac{B_0}{\sqrt{\pi}} = \int_{-\frac{x}{\sqrt{4\pi Dt}}}^{\frac{x}{\sqrt{4\pi Dt}}} e^{-\alpha^2} d\alpha = \frac{2H_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{4\pi Dt}}} e^{-\alpha^2} d\alpha$$

или

$$B_m(x, t) = B_0 \theta \left(\frac{x}{\sqrt{4\pi Dt}} \right), \quad (7)$$

где $\theta(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\alpha^2} d\alpha$.

Тогда (7) – вещественное магнитное поле в образце.

Список использованных источников

1. Савенко, В. С. Вклад пондеромоторных факторов в реализацию электропластической деформации / В. С. Савенко, О. А. Троицкий, А. Г. Силивонец // Известия НАН РБ. Серия физико-технических наук. – 2017. – № 1. – С. 85–91.
2. Батаронов, И. Л. О механизме влияния электрического тока на пластическую деформацию металлов / И. Л. Батаронов, А. М. Рощупкин // Физика прочности и пластичности металлов и сплавов: тез. докл. 11 Всесоюз. конф. – Куйбышев, 1986. – С. 87–88.
3. Савенко, В. С. К расчету плотности тока и напряженности магнитного поля в условиях электропластичности / В. С. Савенко, О. А. Троицкий // Электромагнитное поле и материалы: материалы 26-й Междунар. конф. – М.: НИУ «МЭИ», 2018. – С.134–138.

УДК 538.945

Г. К. САВЧУК, Н. П. ЮРКЕВИЧ

УО «Белорусский национальный технический университет» (г. Минск, Беларусь)

ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С НИЗКИМИ ТЕМПЕРАТУРАМИ СПЕКАНИЯ

Изучение физических свойств пьезокерамических материалов продолжается до настоящего времени, так как обладают широким спектром практического применения. На сегодняшний день исследовано большое количество материалов на основе систем: $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ (PZT), $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ (PNN-PT-PZ), $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PNN-PT), $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PMN-PT). Указанные материалы имеют высокие значения пьезопараметров, при этом спекаются при высоких температурах (1200°C и выше). До настоящего времени актуальны разработки керамик для ультразвуковых преобразователей, пьезоэлектрических приводов и датчиков акустической эмиссии [1; 2]. Пьезоматериалы для этих устройств должны обладать высокими значениями пьезоэлектрических характеристик и низкими температурами спекания, которые обеспечат снижение энергетических затрат и возможность нанесения контактов одновременно со спеканием, что значительно снизит себестоимость изделий.

В [1] на основе системы PNN-PT, модифицированной оксидом Sb_2O_5 , были получены при температуре спекания 910°C керамики с коэффициентом механической связи $k_p = 0,64$; диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 1120$; пьезомодулем $d_{33} = 379 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н. Авторы работы [2], при допировании системы PNN-PT-Pb(Mg,W)O₃ оксидом самария, добились высоких значений параметров ($k_p = 0,67$; $\epsilon_r = 2824$; $d_{33} = 630 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н), при температуре спекания 980°C.

Целью данной работы являлось изучение условий получения керамических материалов на основе системы $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$, модифицированной оксидами меди и цинка, с низкими температурами спекания и высокими значениями пьезоэлектрических параметров.

Исследования проводились на образцах, полученных по двухстадийной керамической технологии [3]. Для изучения были приготовлены составы, имеющие, согласно фазовой диаграмме системы PNN-PT-PZ, кубическую структуру с наиболее высокими значениями пьезопараметров.

В синтезированные твердые растворы PNN-PT-PZ на стадии процесса спекания керамик вводились оксиды меди CuO и цинка ZnO. Наличие CuO формирует жидкую прослойку (рисунок 1) и изменяет механизм спекания с твердофазного на жидкофазный и, как следствие, снижает температуры спекания ($T_{\text{спек}}$). При этом со снижением $T_{\text{спек}}$ происходит уменьшение всех параметров материалов (рисунок 2а; рисунок 2б). С целью улучшения пьезоэлектрических свойств образцов одновременно с CuO использовалась добавка оксида цинка. Полученные образцы с наиболее высокими параметрами имели состав 0,41PNN-0,36PT-0,23PZ+3масс.% ZnO+1масс.% CuO,