

ВЛИЯНИЕ НА ДЕФОРМАЦИЮ И ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ ДЕЙСТВИЯ ПИНЧ-ЭФФЕКТА ИМПУЛЬСНОГО ТОКА

Троицкий О. А., Правоторова Е. А.

Институт машиноведения им А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия,
otroitsky@rambler.ru

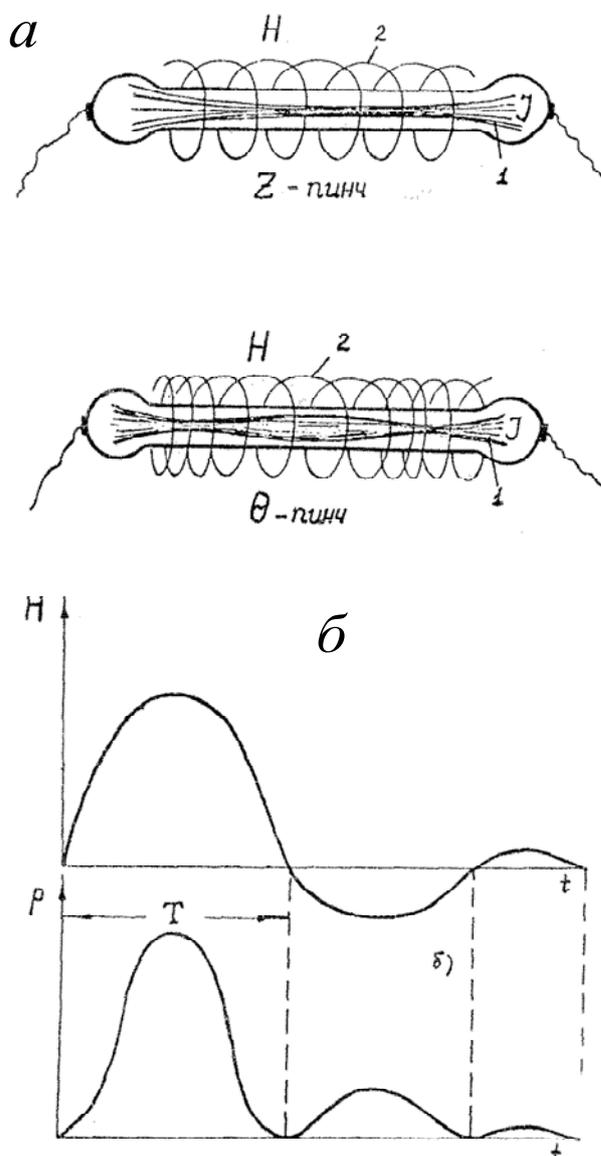


Рис. 1. а – Z- и Θ -пинч-эффекты. 1 – линии тока внутри образца; 2 – линии магнитного поля вокруг образца. б – Изменение напряженности собственного магнитного поля образца с током (а) и сопряженного с ним динамического пинч-эффекта (б)

Пинч-эффект является пондеромоторным электромеханическим явлением. В его основе лежит взаимодействие тока с вызванным им магнитным полем. В проводниках или в элементах машины, по которым проходят импульсы тока длительностью $\tau = 10^{-4} - 10^{-3}$ сек величиной по плотностям тока $J_m = 10^4 - 10^6$ А/см², возникают колебания и вибрации проводника с частотой посылок тока ν (от единиц до сотен и тысяч Гц). Величины возникающих при этом механических напряжений на проводнике в радиальном направлении, пропорциональны квадрату силы тока I^2 или квадрату плотности тока J_m^2 . Возможные технологические применения пинч-эффекта относятся к области силового действия тока и не связаны с тепловыми эффектами действия тока: Джоуля – Ленца, Пельтье, Томсона (смещения зоны нагретости в направлении действия тока) и других. Термин «пондеромоторный» происходит от латинского слова *ponderis* – вес и *motor* – приводящий в движение. На основе пондеромоторных сил тока можно создавать узлы машин и механизмов нового типа, приводимые в движение пинч-эффектом. Кроме того, в состоянии регулируемой вибрации импульсами тока можно интенсифицировать и управлять пластической деформацией металла и прочностью кристаллов. Можно влиять также на фазовые превращения в металлах и сплавах [1].

Физическая картина электродинамического пинч-эффекта заключается в том, что под влиянием собственно-

го магнитного поля тока, которое кольцевыми линиями охватывает проводник с током, происходит отеснение электронов проводимости и линий тока от поверхности вглубь металла, что противоположно скин-эффекту. Происходящая при этом поляризация электронной системы металла в приповерхностных областях приводит к возникнове-

нию поперечного электрического поля Холла, которое начинает препятствовать дальнейшему сжатию электронной плазмы металла и становится причиной появления собственного магнитного поля тока на проводник в радиальном направлении.

Первопричиной возникновения пинч-эффекта является сила Лоренца, которая действует со стороны собственного магнитного поля тока на электроны, движущиеся с дрейфовыми скоростями $v_e = J_m / et$ (где J_m – амплитудная плотность тока, e и m – заряд и масса электрона), на электронную плазму или «электронный ветер» с отжиманием последнего к оси.

Механические напряжения от пинч-эффекта различны для разных металлов. В статическом пределе сдвиговые напряжения, создаваемые пинч-эффектом, постоянны по сечению проводника и определяются по формуле $\sigma_p = \kappa J_m^2 R^2 / c^2$ где κ – коэффициент, определяемый формой проводника, коэффициентом Пуассона и действующими системами скольжения дислокаций, равный примерно 0,5. В силу квадратичной зависимости σ_p от плотности тока J_m и от радиуса образца R (в общем случае – поперечного его размера) в определенных условиях и при специальных режимах тока динамический пинч- эффект может стать доминирующим фактором в суммарном эффекте действия тока при ЭПДМ, оказывая существенное влияние на фазовые превращения и прочность кристаллов.

Скорость диффузии магнитного поля определяет, помимо пинч-эффекта, величину скин-эффекта, также сопутствующего действию импульсного тока. Прохождение импульса тока по проводнику начинается всегда с поверхностных слоев металла. Объемный ток запаздывает по отношению к полному току на величину времени τ затухания магнитного поля в образце, которое определяется по формуле

$$\tau = 4\pi\lambda R^2 / c^2 \mu ,$$

где λ – проводимость металла; μ – геометрический фактор, равный 3,8; c – скорость света; R – радиус образца. Из последней формулы следует, что с понижением температуры, вследствие роста λ , динамический пинч-эффект может усиливаться. Поэтому электропластическую деформацию металла (ЭПДМ) с участием пинч-эффекта целесообразно проводить без нагрева металла.

Другой практический вывод касается крутизны фронтов импульсов тока. Дело в том, что скин-эффект, величина которого зависит от скорости диффузии магнитного поля внутрь металла, определяет крутизну фронтов импульсов тока, проходящих по металлу. Этот эффект может вызвать кратковременные повышения плотности тока на поверхности проводника, повторяющиеся при каждом очередном импульсе тока, если отношение длительности фронтов импульсов t_f ко времени затухания магнитного поля τ сделать меньшим 2 , т.е. если создать условия для выполнения неравенства $n = t_f / \tau < 2$, что может быть полезным для ЭПДМ волочением проволоки с целью снижения сил трения в волоке.

Учитывая то, что параметр τ зависит исключительно от природы металла, а параметр t_f может зависеть также от условий эксперимента и режимов ЭПДМ, в частности, от индуктивности проводов, подводящих ток от генератора импульсного тока к зоне деформации металла во время ЭПДМ, эффективное управление скин-эффектом с соблюдением приведенного неравенства можно осуществлять варьированием параметром длительности переднего фронта импульсов t_f в сторону его уменьшения. Указанное обстоятельство необходимо учитывать проектировщикам и изготовителям генераторов импульсного тока для целей ЭПДМ, закладывая в их конструкции и схемы возможность варьирования параметром t_f в широких пределах, например, от 10^{-6} до 10^{-5} сек, т.е. не менее чем на порядок величины.