

**В.С. САВЕНКО**  
УО МГПУ им. И.П. Шамякина (г. Мозырь, Беларусь)

## **ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В МЕТАЛЛАХ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧНОСТИ**

При пропускании импульсов тока высокой плотности порядка  $10^3$  А/мм<sup>2</sup> длительностью  $10^{-4}$  с во время пластической деформации, через электропроводящие материалы реализуется электропластический эффект (ЭПЭ). ЭПЭ стимулирует деформационные процессы, уменьшает усилия деформации, улучшает физико-механические и служебные характеристики материала. Возбуждение электронной подсистемы металла для реализации электропластичности в металлическом образце, нагруженном выше предела текучести, приводит к возникновению деформационных процессов за счет осцилляций деформирующих усилий и пондеромоторных эффектов, обуславливающих виброакустические колебания кристаллической решетки в различных направлениях. Специальными опытами было установлено, что эффект частично связан с пондеромоторным пинч-эффектом действия импульсного тока, создающего вибрацию в образце за счет периодического сжатия образцов в радиальном направлении собственным магнитным полем тока [1–2]. Кооперативное явление ЭПЭ включает в себя также ускорение пластического течения металла потоком электронов проводимости, находящихся в дрейфовом движении под влиянием приложенной разности потенциалов, т.е. действием также «электронного ветра» внутри деформируемого металла, имеющего скорость

$$V_F \cong \frac{J}{en} \cong 0,5 - 1 м/с$$

где  $e$  – заряд электронов и  $n$  – концентрация электронов в единице объема металла.

При изучении действия СВЧ-излучения на деформируемый металл одновременно с действием импульсов тока были установлены признаки наличия в ЭПЭ спинового разупрочнения металла, связанного с депиннингом дислокаций от точек закрепления, обусловленного наличием спиновой конверсии электронных пар, состоящих из электронов на примесях и электронов, локализованных на линиях дислокаций. Это явление также связано с процессами деформирования кристаллической решетки на микроуровне. В [3] было установлено, что ЭПЭ является объективно существующим явлением и фиксируется на всех без исключения исследованных проводящих и в той или иной степени пластичных материалах при различных видах нагружения образцов, включая сжатие и более сложные напряженные состояния-прокатку, волочение, вытяжку, ковку и др. ЭПЭ может действовать, наряду с джоулевым эффектом, в ставших уже традиционными способах обработки металлов давлением с участием электрического тока, таких, как ЭКН (электроконтактный нагрев) и индукционный нагрев токами Фуко, в которых используется тепловое действие тока. Следует отметить, что главным назначением электропластической деформации металлов (ЭПДМ) на основе ЭПЭ с его специальными режимами импульсного тока является холодная и тепловая деформация металла практически при всех видах обработки металлов давлением (ОМД). ЭПЭ менее универсален, чем джоулевый эффект, т.к. существует лишь во время пластической деформации материала. Вместе с тем он менее энергичен, т.к. ток вводится непосредственно в зону деформации металла. Фактор влияния в ЭПЭ «электронного ветра» на дислокации с величиной силы давления  $F_e$  на единицу длины дислокации определяется по формуле:

$$F_e = B_e \cdot v_e, \quad (1)$$

где  $B_e$  – коэффициент электронного торможения дислокаций;  $v_e$  – дрейфовая скорость электронов, определяемая по формуле:

$$v_e = J/en, \quad (2)$$

где  $J_m$  – амплитудная плотность тока,  $e$  – заряд,  $n$  – концентрация свободных электронов проводимости.

Первоначально в расчетах В.Я. Кравченко, выполненных на основе первого борновского приближения, считалось что  $V_e = 10^{-6}$  г/см·с, но расчет давал значения силы давления «электронного ветра» значительно меньше, чем наблюдавшая в эксперименте величина ЭПЭ. В последующем А.М. Рощупкиным в 1979 году было получено выражение:

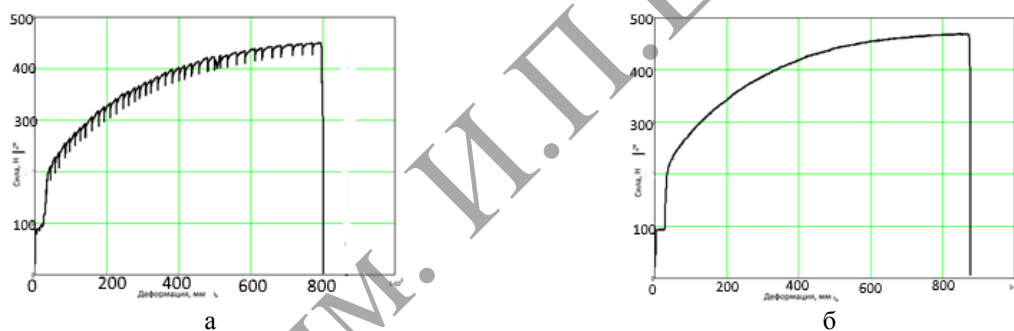
$$V_e = 4 \cdot h \cdot n, \quad (3)$$

где  $h$  – постоянная Планка с численным значением  $V_e = 10^{-4}$  г/см·с, находящимся в большем согласии с экспериментальными данными по ЭПЭ. Тем не менее первоначальное предположение о том, что действие силы  $F_e$  эквивалентно приложению к образцам дополнительных механических напряжений величиной  $\sigma_e = F_e/b$  и в соответствии с основным уравнением кинетики пластической деформации приводит к ускорению пластического течения металла, оказалось все же недостаточным и не полностью соответствующим физической картине явления ЭПЭ и его технологических приложений в виде различных способов ЭПДМ.

Ряд авторов объясняют механизмы электропластической деформации электронно-дислокационным взаимодействием, давлением «электронного ветра» на скопление дислокаций, точечных дефектов, уменьшением стартовых напряжений для срыва дислокаций со стопоров, действием термических и нетермических эффективных напряжений, а также спиновым разупрочнением металлов [3–4].

Следует отметить, что при возбуждении импульсов тока в образцах выделяется также значительное количество Джоулева тепла, однако при длительности импульсов тока 100 мкс и плотности тока от 100 до нескольких тысяч А/мм<sup>2</sup> нагрев образца не превышает нескольких градусов, если импульсы разделены интервалами в десятки секунд.

На рисунке 1 представлены графики осциллограмм деформирующих усилий при пропускании импульсов тока (а) и без импульса тока (б) при приложении к образцу статической силы от величины деформации до момента разрушения.



(а) с током (б) без тока

**Рисунок 1. – Зависимость приложенной к образцу статической силы от величины деформации до момента разрушения**

Из графиков видно что деформация образцов в условиях электропластичности падает с одновременным увеличением прочностных свойств материала.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Савенко, В.С. Фундаментальные и прикладные исследования электропластической деформации металлов: монография / О.А. Троицкий, В.С. Савенко. – Минск: ИВЦ Минфина, 2013. – 375с.
2. Савенко, В.С. Механическое двойникование и электропластичность металлов в условиях внешних энергетических воздействий / В.С. Савенко. – Минск: БГУ, 2003. – 200 с.
3. Савенко, В.С. Применение статического метода для изучения кинетики образования клиновидных двойников в кристаллах висмута при наложении на них электрических и магнитных полей / В.С. Савенко, О.М. Остриков // Весці НАН Беларусі. Сэрыя фізіка-матэматычных навук. – 1998. – № 2. – С.43–49.
4. Savenko, V.S. Influence of electroplastic deformation on physicomachanical characteristics of deformation aluminum // First Russia-China Joint Symposium on the electroplasticity effect in metals Shenzhen, China, May 31 – June 4, 2007. – P. 218.