

## ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В МЕТАЛЛАХ

О. А. ТРОИЦКИЙ, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, oatroitsky@rambler.ru  
(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Россия, г. Москва)

**Аннотация.** Рассмотрен механизм электропластического эффекта (ЭПЭ) и возможные области его технологического применения при прокатке, волочении, вытяжке, тонколистовой штамповке и других способах обработки металлов давлением.

Обосновано представление, что электропластическая деформация металла, основой которой является ЭПЭ, может быть применена на среднем и мелко металлургическом переделе. ЭПЭ позволяет снизить сопротивление металла деформированию на 25–30 %, увеличить пластичность металла во время его обработки, увеличить остаточную пластичность до 30 %. За счет повышения степени совершенства аксиальной текстуры проволоки при волочении по технологии с использованием ЭПЭ достигается снижение ее электрического сопротивления на 15 %. При электропластической деформации металла (ЭПДМ) нержавеющей сталей практически полностью подавляется аустенитно-мартенситное фазовое  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение, что делает ненужными операции дорогостоящих и энергоемких аустенизирующих отжигов.

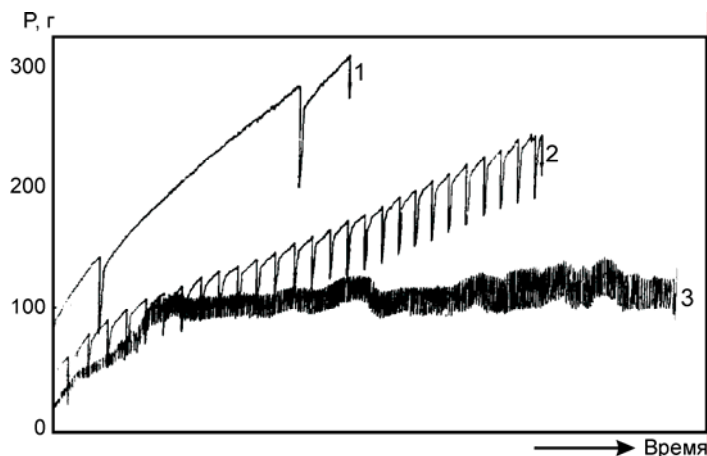
На основе ЭПЭ в разных странах (в основном в России, Южной Кореи, Италии, Великобритании и Китае) создано примерно 45 станков и мощных металлообрабатывающих станков, работающих по технологиям ЭПДМ. Разрабатываются различные варианты эффективных энергосберегающих критических технологий ЭПДМ прокаткой, волочением, штамповкой, вытяжкой и плочением, а также брикетирования с током металлических отходов. Создается новое и модернизируется существующее оборудование под технологию ЭПДМ.

**Ключевые слова:** электропластический эффект; электропластическая деформация металла; действие электромагнитных полей на деформацию металлов; сопротивление металла деформированию; остаточная пластичность.

**Ссылка для цитирования.** Троицкий О.А. Электропластический эффект в металлах // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 9. С. 65–76.

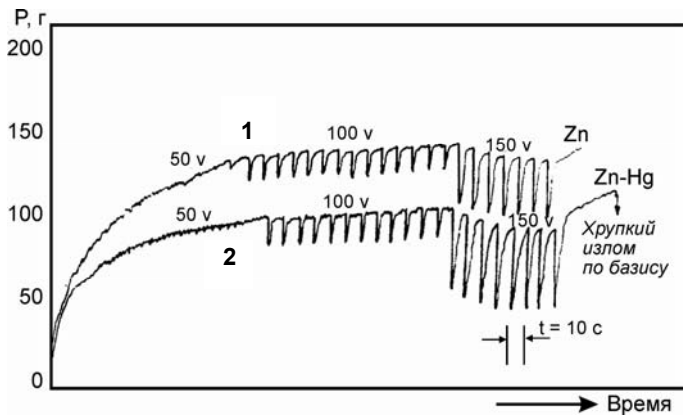
**Doi:** 10.32339/0135-5910-2018-9-65-76

Электропластический эффект (ЭПЭ) был обнаружен в 1969 г. [1]. ЭПЭ возникал при действии одиночными импульсами тока с амплитудной плотностью  $J_m = 10^5$  А/см<sup>2</sup> и длительностью  $\tau \approx 10^{-4}$  с на деформацию кристаллов цинка растяжением и сжатием при температуре жидкого азота. Эффект проявлялся, как показано на рис. 1, в скачкообразных падениях приложенной нагрузки испытательной машины Instron за счет скачков пластической деформации кристаллов во время прохождения по ним импульсов тока, практически без участия теплового эффекта. Измеренный термопарами тепловой эффект в момент прохождения импульса тока был не более 1 град. Фиксировался небольшой эффект Пельтье.



**Рис. 1.** Скачкообразная деформация кристаллов цинка под влиянием импульсов тока; происходит увеличение пластической деформации металла до разрушения при азотной температуре. Импульсы следовали через 200 с (1), 20 с (2) и через каждую секунду (3). Амплитуда плотности тока составляла  $J_m = 10^5$  А/см<sup>2</sup> при длительности импульсов  $\tau \approx 10^{-4}$  с

**Fig. 1.** Stepwise deformation of zinc crystals caused by current pulses; metal plastic deformation takes place till destruction at nitrogen temperature. Pulses were going in 200 s (1), 20 s (2) and in every second (3). The amplitude of the current density was  $J_m = 10^5$  А/см<sup>2</sup> at pulse length  $\tau \approx 10^{-4}$  s

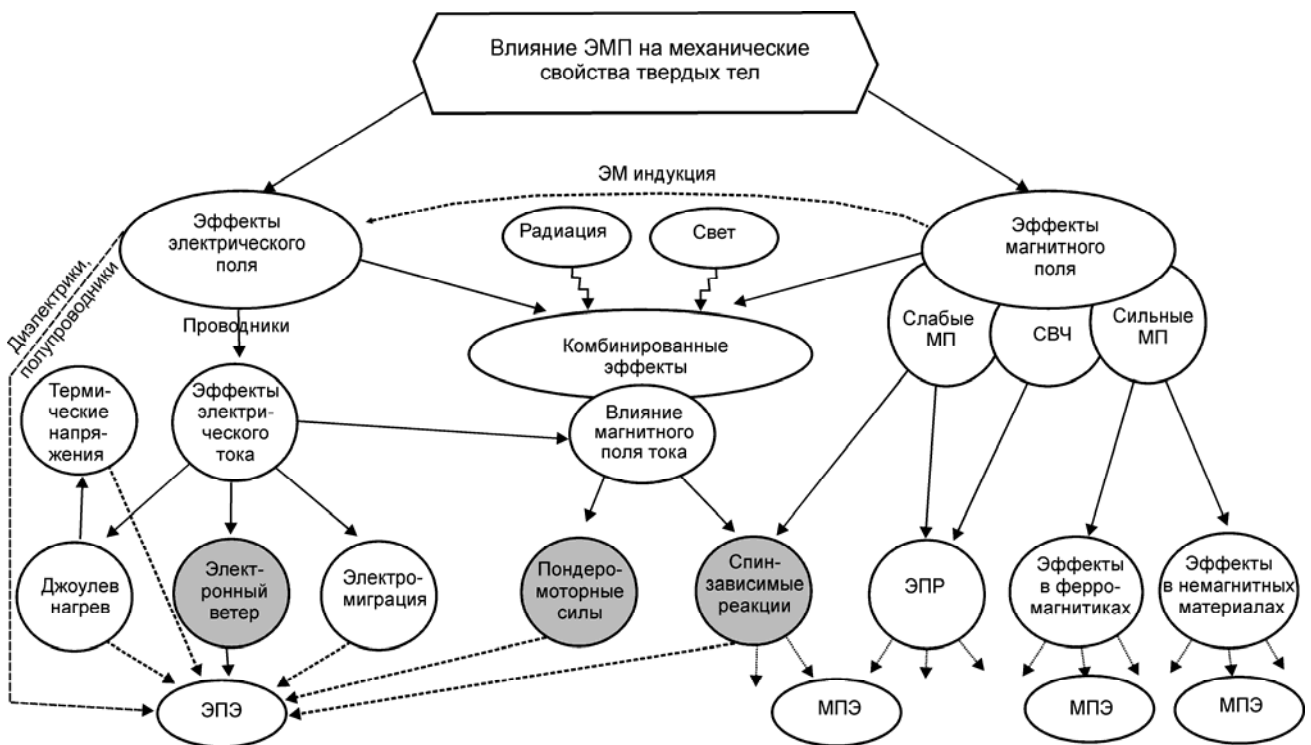


**Рис. 2.** Диаграммы растяжения кристаллов цинка  $\chi_0 = 34^\circ$  с осцилляциями деформирующего усилия в связи с прохождением импульсов тока при комнатной температуре. Кристаллы имели чистую поверхность (кривая 1) либо содержали пленку ртути толщиной 5 мкм, являющейся сильным ПАВ по отношению к цинку (кривая 2)

**Fig. 2.** Tensile diagram of zinc crystal  $\chi_0 = 34^\circ$  with oscillations of deforming force caused by passing current pulses at room temperature. Crystals have clean surface (curve 1) or have a film of mercury of 5 microns thickness, being a strong surface-active substance relating to zinc (curve 2)

Опыты повторили при комнатной температуре и обнаружили увеличение пиков ЭПЭ в присутствии сильно поверхностно-активного вещества (ПАВ) в виде жидкой ртути (рис. 2). Импульсы тока подавались на деформируемые кристаллы цинка через каждые 10 с, а амплитуда тока была примерно такая же, как на рис. 1. Видно, что пики ЭПЭ увеличиваются в присутствии ПАВ. Поверхностно-активный расплав ртути вызывал также увеличение скачков деформирующего усилия, а также понижение общего уровня деформации кристаллов цинка. Полученный результат может быть объяснен облегчением работы выхода дислокаций на поверхность кристаллов под влиянием ПАВ.

В последующие годы были продолжены детальные исследования ЭПЭ в металлах [2–33]. К настоящему времени выявлен ряд новых механизмов действия электромагнитных полей (ЭМП) на деформацию металлов и вообще на деформацию твердых тел. Это представлено обобщенной диаграммой (рис. 3), как плод работы многих авторов. Стали известны новые физические эффекты [4–6].



**Рис. 3.** Возможные каналы действия тока и электромагнитных полей

**Fig. 3.** Possible channels of current and electromagnetic fields actions

Отметим два явления на левой стороне диаграммы — джоулевый нагрев и электромиграция. Они практически не присутствовали в первых опытах с ЭПЭ, поскольку несущественны при температуре жидкого азота. Существование ЭПЭ было подтверждено многими авторами [5–16]. Установлена полярность ЭПЭ [12, 13], что с несомненностью свидетельствует о наличии в составе ЭПЭ действия “электронного ветра”, которое по току должно быть линейным, а не квадратичным, как джоулевый эффект. Детально существование ЭПЭ было подтверждено американскими учеными под руководством проф. Г. Конрада [5–7] на поликристаллическом титане десять лет спустя после первой российской публикации [1]. Названия главных явлений, сопровождающих ЭПЭ, на рис. 3 затемнены. Это следующие явления:

– действие “электронного ветра” на движение дислокаций в металле, включая давление “ветра” электрического тока на временно заторможенные скопления дислокаций с усилением их

### Действие “электронного ветра” тока

Действие “электронного ветра” на процесс перемещения дислокаций деформации металла может быть существенным при больших плотностях тока ( $J_m = 10^5\text{--}10^6$  А/см<sup>2</sup>). Кравченко В.Я. теоретически рассмотрел вопрос взаимодействия направленного потока электронов с движущимися дислокациями [32, 33]. Сила увлечения дислокаций электронами может быть представлена в виде

$$F_e = b/4(v_e/v_d - 1)v_d/v_F \cdot dne/d\mu \cdot \Delta^2,$$

где  $\mu$ ,  $\Delta$  — химический и деформационный потенциал;  $v_F$  — скорость электронов на поверхности Ферми. При условии превышения скоростью дрейфа электронов  $v_e$  скорости движения дислокаций  $v_d$  сила  $F_e$  становится положительной величиной. В принципе указанное основное положение теории В.Я. Кравченко подтверждается экспериментами по ЭПЭ. Однако в рамках его теории не объясняется вся совокупность экспериментальных данных по ЭПЭ, накопленных к настоящему времени. В частности, совершенно не объясняется сильная зависимость ЭПЭ от концентрации примесей, особенно сильная парамагнитных примесей на величину ЭПЭ, а также возможное влияние “электронного ветра” тока на работу источников дислокаций. Тогда как непротиворечивым можно считать, что под влиянием импульсов тока усиливается генерирующая работа источников дислокаций.

Простой расчет, выполненный другим теоретиком В.Д. Фиксом, показал, что “электронный ветер” при больших плотностях тока может вызывать размножение дислокаций в источниках

взаимодействия с временными стопорами, включая точечные дефекты, приводящие к уменьшению числа незавершенных сдвигов в кристаллической решетке, к пластификации металла под влиянием силового действия тока как материальной подвижной среды [1, 2, 8–33];

– пондеромоторные силы пинч-эффекта (ПЭ), вызывающие колебания узлов кристаллической решетки [3, 4] по типу влияния ультразвука, что влияет на деформацию металла и разупрочняет его, вызывающие также макроскопическую вибрацию всего образца;

– спин-зависимые реакции электронов с дефектами решетки, включая конверсию электронных пар, взаимодействие парамагнитных примесей с подвижными дислокациями, влияние электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) на механические свойства металла, что можно отнести к разным проявлениям нового физического явления — спинового физического явления.

Рассмотрим их подробнее.

Франка–Рида. Закрепленная стопорами линейная дислокация может оторваться от временного закрепления, а на месте ее отрыва возникает новая дислокация, если механические напряжения  $\sigma$  превышают критический уровень  $\sigma_c$ , что выполняется при ЭПЭ. Должно выполняться условие

$$\sigma > \sigma_c = 2\tau/Lb = 2\mu b/L,$$

где  $\tau$  — линейное натяжение дислокационной петли;  $L$  — расстояние между точками закрепления;  $\mu$  — модуль сдвига. Известно, что при  $L = 10^{-3}$  см напряжения начала работы источников Франка–Рида равны экспериментально наблюдаемому пределу текучести металла  $\sigma_c$ . Размножение дислокаций импульсным “электронным ветром” может реализоваться в том случае, если созданные током механические напряжения

$$\sigma_J = J_m/e \cdot mv_F$$

будут равными значениям критических механических напряжений или пределу текучести  $\sigma_c$ . В этом случае можно приравнять два последних выражения и получить формулу для критических значений амплитуды плотности тока  $J_m$ , при которых начинается генерирование дислокаций:

$$J_m = 2e\mu_b/mv_FL = b/L \cdot \mu.$$

Для металлов можно принять значения  $\mu = 10^{10}$  и  $10^{11}$  дин/см<sup>2</sup> и  $b/L = 10^{-5}$ . Тогда для достаточной плотности тока получается значение  $J_m = 10^5\text{--}10^6$  А/см<sup>2</sup>, что достижимо в эксперименте, особенно на тонких образцах и при малых

длительностях импульсов тока (порядка  $10^{-4}$  с). С учетом текущего внешнего механического напряжения  $\sigma_s$ , окончательно имеем

$$J_m = e/mv_F = (2\mu_b/L - \sigma_s) = 10^5 \text{ A/cm}^2,$$

что соответствует использованным при обнаружении ЭПЭ плотностям тока [1].

Таким образом, приведенные фрагменты теорий взаимодействия “электронного ветра” с дислокациями В.Я. Кравченко и В.Д. Фикса, относящиеся к основам электронной теории пластичности металлов, обосновывают режим ЭПЭ по параметрам импульсов тока, его скоростную зависимость и в меньшей степени влияние примесей. Однако, например, зависимость ЭПЭ от величины длительности импульсов тока не может быть объяснена с привлечением только этих теорий. Остается также в стороне от объяснения такая важная компонента ЭПЭ, как динамический ПЭ, органически свойственный действию импульсного тока.

По мнению автора, важную роль в величине ЭПЭ в различных металлах играет поверхность Ферми. Об этом неоднократно писали и представляли в монографиях отдельной главой. Поверхность Ферми является изоэнергетической поверхностью в импульсном  $pF$ -пространстве и представляет собой жесткий энергетический каркас, частично повторяющий симметрию кристаллической решетки металла. Верхний энергетический уровень свободных электронов металла, принимающий участие в электропроводности и в передачах импульсов силы и энергии на дислокации в ходе, в частности, электропластической деформации, описывается согласно И.М. Лифшицу формулой

$$\varepsilon_{F(0)} = \hbar/2m(3\pi^2n)^{2/3}$$

и составляет, например, для цинка при  $n = 3,38 \times 10^{22}$  величину примерно 5 эВ. Полная площадь поверхности Ферми составляет  $S_F = 1,8 \times 10^{-37} \text{ г}^2 \cdot \text{см}^2 / \text{с}^2$ , а средняя скорость электронов на поверхности Ферми равна  $\langle v_F \rangle = 0,92 \times 10^8 \text{ см/с}$ , что на несколько порядков выше дрейфовых скоростей электронов  $v_e = 10^2 \text{ см/с}$  при максимально возможных плотностях тока в металле  $J_m = 10^6 \text{ A/cm}^2$  (в импульсном режиме).

Тем не менее из теории В.Я. Кравченко [32, 33] следует, что “электронный ветер” может производить ускорение дислокаций, действуя на них с максимальной силой:

$$F_{e,\max} = b/4 \cdot v_e/v_F \cdot dn/d\mu \cdot \Delta^2.$$

Большинство металлов имеют сложный характер проводимости, имея электронную и “дырочную” изоэнергетические поверхности, которые, смещаясь в разные стороны под влиянием поля, передают дислокациям импульсы силы и

энергии в противоположных направлениях. Одно из представлений о “дырках” заключается в том, что они имеют положительный заряд  $e > 0$  и положительную эффективную массу  $m^* > 0$  [14], занимая область внутри  $p$ -пространства после ухода из нее электронов проводимости. С точки зрения механизма ЭПЭ представление о “дырках” как о некоторых аналогах позитронов, имеющих обратную направленность дрейфа во время прохождения тока, вполне приемлемо. Они будут влиять на движение не тех дислокаций, которые ускоряются под действием электронов, а других групп дислокаций, имеющих иной знак и положение своих экстраллоосей относительно плоскости скольжения.

Другим важным аспектом влияния поверхности Ферми на ЭПЭ является участие различных ее частей и фрагментов в передачах импульсов энергии и силы на дислокации. В процессе электропроводности, как известно, происходит смещение фермиевских электронов по нормали к поверхности Ферми, причем доля таких электронов возрастает с увеличением площади поверхности Ферми и степени ее закрытости. Например, металлы I группы (Cu, Ag и Au), образующие, как показано на рис. 4 на примере серебра, систему сфер (“пузо”), соединенные между собой узкими перемычками (“шейки”) в направлении пространственных диагоналей гранцентрированной кубической решетки, с ростом атомного номера в ряду Cu, Ag и Au имеют противоположные тенденции. С одной стороны, площадь Ферми  $S_F$  возрастает и можно ожидать усиления ЭПЭ в золоте и серебре по сравнению с медью. С другой стороны, в этом же ряду диаметр “шейки” возрастает, что означает уменьшение степени ее закрытости. Поэтому можно ожидать, наоборот, уменьшения ЭПЭ в золоте и серебре. Это требует выяснения в ближайших экспериментах.

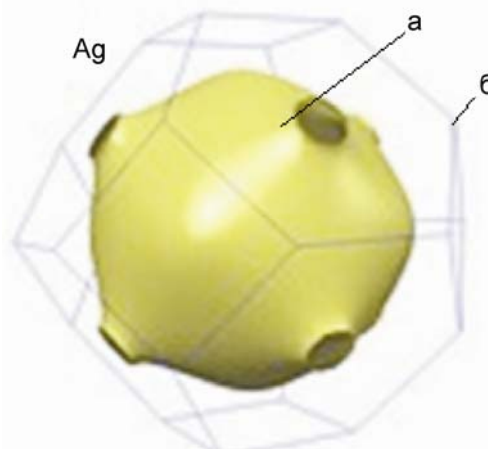


Рис. 4. Поверхность Ферми серебра

Fig. 4. Fermi surface of silver

Для анизотропных металлов, имеющих гексагональную плотноупакованную решетку, необходимо учитывать также отсутствие коллинеарности между вектором плотности тока  $J_m$  и полем  $E$ . При протекании по ним тока, помимо указанного основного поля, возникает поперечное поле  $E_n$ , подобное полю Холла, что, возможно, усиливает ЭПЭ. Этот вопрос необходимо также уточнять.

Важным вопросом является также уточнение роли малых фрагментов поверхности Ферми. Естественно ожидать, что существенный вклад в ЭПЭ вносят те ее участки, для которых характерны небольшие скорости фермиевских электронов, что обратно пропорционально объемам, охватываемым отдельными фрагментами поверхности Ферми. Поэтому можно считать, что ЭПЭ, подобно электронной теплоемкости, пропорционален  $\int dS_F/V$ , где  $dS_F$  — элемент площади поверхности Ферми;  $V$  — объем, охватываемый поверхностью Ферми. Большое значение для большой величины ЭПЭ конкретного металла имеет наличие у поверхности Ферми большого количества замкнутых фрагментов ее объема в виде “раковин”, “линз”, “игл” и “сигар”, а также различного рода вмятин, гофров и перемычек, ориентированных своими малыми осями по полю  $E$ , когда роль ортогональных смещений и роль всей поверхности Ферми возрастают.

При деформации металла происходит трансформация поверхности Ферми, в ходе которой замкнутые поверхности могут стать открытыми, и наоборот. Также может влиять магнитное поле, создаваемое динамическим ПЭ импульсного тока. Известно, в частности, что в рении в результате магнитного пробоя происходит образование открытых направлений  $\langle 1100 \rangle$  и  $\langle 1210 \rangle$  между бывшими до этого замкнутыми частями поверхности Ферми “монстром” и “сигарой” или “иглой”, что отмечается также для цинка и может быть причиной снижения ЭПЭ в ходе электропластической деформации.

Поверхность Ферми цинка, наиболее изученного в отношении ЭПЭ, имеет практически полную компенсацию электронных и дырочных объемов, но топология этих объемов совершенно различная. Дырочная поверхность открытая и представляет собой многосвязную конструкцию — “монстр”, а электронная поверхность состоит из “линз” и “иглок” на вертикальных гранях вдоль оси  $[0001]$ , перпендикулярной плоскости базиса, а также из “сигар”, “раковин” и “бабочек” на горизонтальных направлениях. Поэтому, вероятно, механизм взаимодействия электронов с дислокациями превалирует в цинке над механизмом взаимодействия “дырок” с дислокациями.

Кадмий имеет также открытую “дырочную” поверхность Ферми. Однако у него в базисной плоскости  $(0001)$  имеются разрывы, т. е. эле-

менты закрытости, чем можно объяснить большую величину ЭПЭ в этом металле, сопоставимую с цинком. Кроме того, в кадмии даже в сильном магнитном поле вдоль направлений  $\langle 1100 \rangle$  и  $\langle 1210 \rangle$  не образуются открытые направления, этим он отличается от цинка, а также от рения, бериллия и магния. Величина ЭПЭ в кадмии в отличие от цинка не снижается в ходе электропластической деформации благодаря сохранению закрытости поверхности Ферми в направлениях  $\langle 1210 \rangle$  наиболее вероятного направления продвижения дислокаций в базисной плоскости  $(0001)$ . Наконец, для таллия поверхность Ферми является открытой с неравным числом электронных и “дырочных” носителей. Она содержит две гофрированные плоскости типа  $(0001)$ , соединенные узкими перемычками вдоль оси  $[0001]$ . Гофры в плоскости  $0001$  создают соответствующие компоненты электронного и “дырочного” ветров, влияющих на перемещения базисных дислокаций разного знака. Поэтому в этом металле можно ожидать большой величины ЭПЭ.

Также отметим одну деталь механизма передачи импульсов силы и энергии от фермиевских носителей тока на дислокации, подтверждающую определяющую роль удельной поверхности Ферми  $\int dS_F/V$  в величине ЭПЭ. Поглотив в поле  $E$  кванты энергии, фермиевские носители тока (электроны и “дырки”) переходят в непосредственную окрестность от поверхности Ферми, приводя к ее смещению в поперечном направлении по нормали к поверхности Ферми на величину  $\Delta\varepsilon/\varepsilon_F = 10^{-5} - 10^{-3} \%$ .

В силу большой разницы эффективных масс электронов и узлов решетки (тем более дислокаций) фермиевские электроны в ходе рассеяния и потерь приобретенной в поле  $E$  энергии  $\Delta\varepsilon$  изменяют лишь направление своего импульса, перепрыгивая с одной точки поверхности Ферми на другую. Множество таких столкновений приводит к отрыву дислокации от препятствия и к увеличению скорости движения дислокации. Таким образом, фермиевские электроны и “дырки” фактически не покидают верхний уровень поверхности Ферми, мигрируя по ее поверхности. Поэтому, чем больше поверхность Ферми  $S_F$  металла, и конкретно, чем больше ее удельный вес  $\int dS_F/V$  по отношению к объему, охватываемому изоэнергетическим объемом (что реализуется при большом числе объемов, охватываемых отдельными фрагментами поверхности Ферми), тем больше величина ЭПЭ. В этих условиях возрастает число элементарных передач импульсов силы и энергии от носителей к дислокациям, участвующим в пластической деформации металла.

## Пондеромоторный пинч-эффект действия тока

В основе ПЭ лежит взаимодействие импульсного тока с собственным магнитным полем проводника, по которому проходит ток. Проводник начинает периодически сжиматься в радиальном направлении и вибрировать с частотой следования импульсов. Указанный ПЭ можно создавать в специальных электромеханических устройствах или в подходящих готовых элементах машин и механизмов, желательны протяженных и круглого сечения. С помощью ПЭ действия импульсного тока можно создать регулируемую вибрацию и через нее усиливать различные технологические процессы, например, подачу смазки в узлы трения машин и механизмов. ПЭ составной частью входит также в электропластическую деформацию металла [1–10]. Можно создавать и осуществлять следующие новые направления исследований:

- изучение влияния управляемой вибрации, создаваемой ПЭ, на поведение деталей машин и механизмов за счет стимулирования поступления смазки в узлы трения, а также на усиление по тем же причинам капиллярного эффекта;

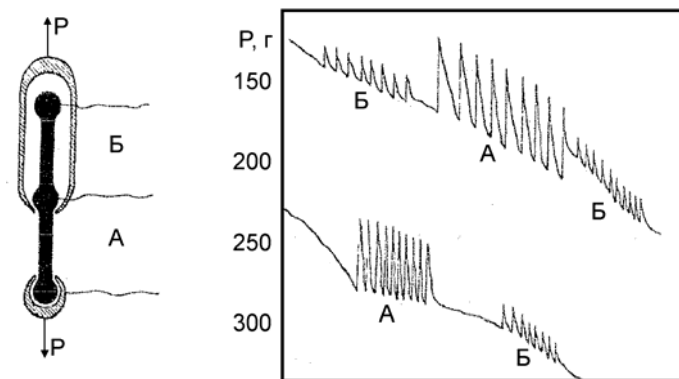
- исследование возможности очистки металлических поверхностей от твердых накипных отложений под влиянием совместных действий упругих колебаний поверхности под влиянием ПЭ и действия ПАВ на примере очистки от накипи трубок теплообменников;

- определение поверхностного натяжения жидкого металла с помощью пондеромоторных сил импульсного тока.

Указанный далеко не полный перечень новых направлений исследований ПЭ может быть расширен за счет добавления в него других процессов в машинах и механизмах с целью их интенсификации за счет вибраций от ПЭ. Перечень может быть также расширен за счет добавления новых и старых физических эффектов и явлений в конденсированных проводящих средах, на которые может влиять ПЭ.

В работах [3, 4] было показано, что ПЭ непосредственно участвует в ЭПЭ. Поскольку ПЭ заключается во взаимодействии собственного магнитного поля тока с образцом, изучение влияния ПЭ на пластическую деформацию металла является довольно сложной задачей из-за влияния самого тока на деформацию металла. Чтобы разделить действие тока и ПЭ на пластическую деформацию металла в прямом опыте, были взяты два одинаковых кристалла цинка ориентации плоскости базиса (0001) относительно оси образца  $32^\circ$ . Они были состыкованы и сварены головками. Верхняя недеформируемая часть полученного двойного образца располагалась в полости верхнего зажима испытательной машины Instron. В процессе опыта она вообще не деформировалась, но имелась возможность пропускать там такие же по величине импульсы тока, как в нижней деформируемой части. При-

менялись импульсы с амплитудной плотностью тока  $J_m$ , равной примерно  $10^3$  А/мм<sup>2</sup>, при длительности импульсов  $10^{-4}$  с. Частота посылок импульсов тока выбиралась небольшой (0,1–0,2 Гц), чтобы можно было фиксировать величину отдельных скачков деформации. Опыты проводились при температуре жидкого азота, что исключало влияние тепловых эффектов. Прямыми опытами было установлено, что пропускание импульсов тока в верхней недеформируемой части Б двойного образца вызывает скачки деформации в нижней деформируемой части А, в которой в это время не проходил ток. Этот результат показан 3 раза на правой части рис. 5. Видно, что скачки деформации небольшие, но они есть, и это подтверждает влияние ПЭ на пластическую деформацию металла. Дело в том, что вибрации образца от ПЭ в верхней части двойного образца передаются через коэффициент Пуассона вниз на деформируемую нижнюю часть и здесь вызывают небольшие скачки деформации. Если же ток пропускать в деформируемой части А, то скачки становятся большими по величине, поскольку в полной мере начинает действовать ЭПЭ в силу наличия, в частности, действия “электронного ветра” импульсного тока, усиленного влиянием ПЭ. Это показано в правой части рис. 5 дважды. Видно, что пики возросли по своей величине в несколько раз. Помимо этого в процессе электропластической деформации металла может возникать также спиновое разупрочнение металла, чему посвящен следующий раздел.



**Рис. 5.** Диаграммы растяжения двойных монокристаллических образцов цинка с пиками ЭПЭ — осцилляциями деформирующего усилия, связанными с прохождением импульсов тока по деформируемой (А) и недеформируемой (Б) частям двойных образцов

**Fig. 5.** Tensile diagrams of double monocrystalline zinc specimens with peaks of deforming force oscillations, caused by current pulses passing (A) and no deformed (B) part of double specimens



Таким образом, проведенные опыты с двойными образцами, по мнению многих ученых, занимающихся электропластической деформацией металлов, стали прямым доказательством участия ПЭ в ЭПЭ. Результаты этих опытов были представлены в университете штата Северная Каролина, США, на семинаре по ЭПЭ, проводимом проф. Г. Конрадом в 1985 г.

Переходя к физическому механизму ПЭ, отметим, что под влиянием действия собственного магнитного поля импульсного тока происходит оттеснение электронов проводимости и линий тока от поверхности образца к его середине, т. е. вглубь образца за счет силы Лоренца. Теоретическое рассмотрение действия ПЭ было сделано И. Батароновым [8–10]. Возникающая поляризация электронной системы металла в приповерхностных областях вызывает поперечное электрическое поле Холла, которое препятствует дальнейшему сжатию электронной плазмы металла. Это, в свою очередь, становится причиной давления на ионный остов решетки и появления механических напряжений, а также указанных скачков деформации с частотой следования импульсов тока. Давление собственного магнитного поля тока на образец в радиальном направлении составляет  $p = \mu \frac{H^2}{8\pi}$ , дн/см<sup>2</sup>, или

$p \approx 1,6 \times 10^{-2} \mu(J_T)^2$ . Из последнего выражения следует, что при одной и той же плотности тока, например  $J_m = 10^5$  А/см<sup>2</sup>, ПЭ будет выражен тем больше, чем больше радиус используемых образцов. Таким образом, ПЭ является масштабным эффектом. Он квадратично зависит от  $R$  (а также от  $J_m$ ). Для образцов малого радиуса он практически не наблюдается, чем в свое время воспользовались американцы. По данным американских ученых [5–7], при радиусе образцов ~0,25 мм этот эффект не оказывает какого-либо действия на деформацию титана, деформируемого с током. В первых опытах по электропластической деформации металлов [1, 2] образцы имели радиус ~0,5 мм, что также относится к малым размерам. При пороговых значениях плотности тока 400–500 А/мм<sup>2</sup> на поверхности образцов механическое давление в радиальном направлении составляло  $p = 0,9 \times 10^4$  Па. Подобные напряжения могли вызывать усиление пластической деформации кристаллов цинка, растягиваемых или сжимаемых с постоянной скоростью в испытательной машине. Что касается влияния материала образца, то, как указывалось, ПЭ тем больше, чем больше проводимость металла. Таким образом, по величине ПЭ на первом месте стоит медь, на втором — цинк и на третьем — сталь.

### Спиновое разупрочнение металла

С целью выяснения вопроса о наличии в электропластической деформации, в частности в ЭПЭ, спинового разупрочнения металла за счет конверсии электронных пар и наличия спин-зависимых реакций электронов с дефектами решетки, включая взаимодействие парамагнитных примесей с подвижными дислокациями, проведены новые эксперименты, в которых совмещалось действие импульсов тока и СВЧ-излучения на пластическую деформацию тонких образцов. Было обнаружено увеличение пиков ЭПЭ в стальных образцах под влиянием СВЧ-излучения. Применялись следующие две основные постановки опыта:

– при активной деформации растяжением тонких стальных образцов при одновременном действии одиночных импульсов тока и СВЧ-излучения и без него;

– при релаксации механических напряжений в нагруженных образцах с током и без тока с ориентацией вектора напряженности электрического поля СВЧ-излучения продольно или поперечно оси деформируемых образцов.

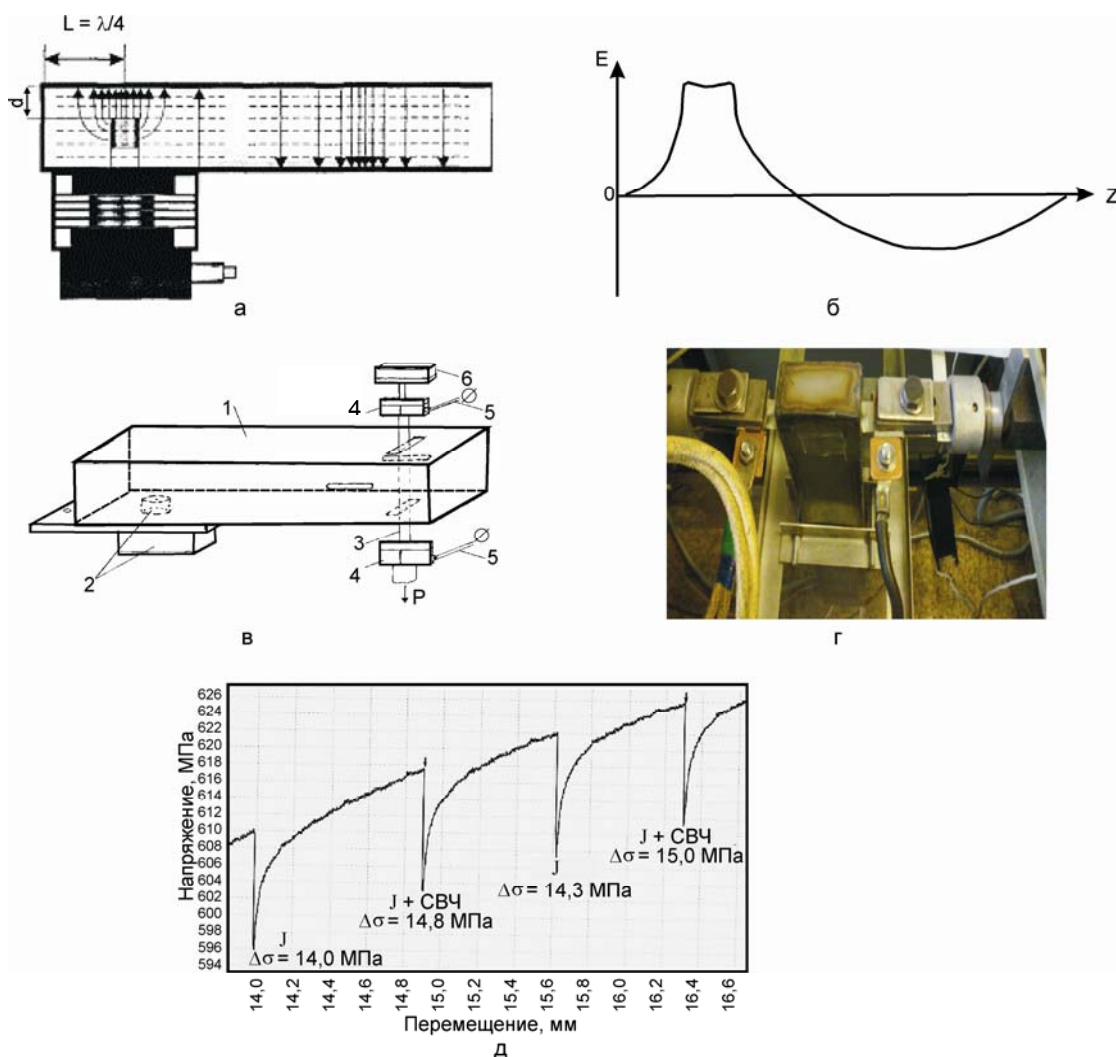
Испытывались образцы — лопаточки из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм с длиной рабочей части 28 мм в изолированных зажимах горизонтальной испытательной машины ИР 5047-50-10 на участках текучести на последней стадии растяжения перед разрывом при одновременном действии импульсами тока и СВЧ-излучением.

Установлено, что при продольной ориентации вектора  $E$  в составе СВЧ-излучения в суммарном действии тока и СВЧ-излучения эффект разупрочнения металла возрастал примерно на 8 % (с 22 до 30 %). Тепловые эффекты действия тока и СВЧ-излучения корректно вычитались из величины общего снижения деформирующих усилий и релаксации напряжений.

Для изучения влияния СВЧ-излучения на механические свойства металлов в условиях пластической деформации растяжением при одновременном действии импульсным током была выбрана частота 2,45 ГГц, применяемая в микроволновых СВЧ-печах [1]. Передача электромагнитного излучения от источника СВЧ-излучения — магнетрона к деформируемому образцу осуществлялась с помощью волновода прямоугольного сечения. Электромагнитная энергия излучалась магнетроном с помощью антенны в виде электрического штыря. Штырь входил в волновод и располагался на расстоянии примерно в четверть длины волны  $\lambda$ . Прямоугольный волновод с одной стороны был закорочен металлической стенкой. Штырь магнетрона излучал электромагнитные волны (ЭМВ) во всех направлениях — прямые в направлении нагрузки (деформируемого образца) и обратные в противоположном направлении к глухой стенке волновода, которые после отражения складывались (рис. 6, а). Для стандартных волноводов должно

выполняться соотношение  $b/a < 0,5$ . При  $\lambda/a < 2$  в волноводе распространяется единственный вид волн типа Н<sub>10</sub>, которые рекомендованы к использованию. По длине волны можно подобрать размеры сторон  $a$  и  $b$  [2]. Расстояние от штыря до оси деформируемого образца было кратным длине волны  $\lambda$ . В этом случае значение напряженности электрического поля на образце максимально (см. рис. 6, в). За образцом на расстоянии  $\lambda/4$  волновод ограничивался глухой стенкой. Длина волновода от одной глухой стенки до другой составила  $\lambda + \lambda/2$ . Короб вол-

новода был изготовлен из нержавеющей стали с окнами во взаимно перпендикулярных плоскостях для размещения испытуемого образца (рис. 6, в). В опытах применялось дистанционное управление магнетроном. Ориентацию вектора напряженности  $E$  электрического поля СВЧ-излучения меняли поворотом короба волновода относительно деформируемого образца на  $90^\circ$ . Температуру образцов измеряли термопарой во время действия СВЧ-излучения и одиночных импульсов тока. Она не превышала  $600\text{--}800^\circ\text{C}$ .



**Рис. 6.** Подключение магнетрона к волноводу (а) и распределение напряженности электрического поля по длине  $Z$  волновода (б); в — схема корпуса волновода (1) с магнетроном (2) для подведения СВЧ-излучения к деформируемому образцу (3), находящемуся в захватах (4) с токоподводом (5) и датчиком измерения усилий (6); г — блок деформации образцов при действии СВЧ-излучения и импульсов тока. Образец находится внутри волновода, магнетрон внизу. Электромагнитное поле  $E$  направлено поперек оси образца; д — скачки деформации в сторону разупрочнения при активной деформации и действии импульсов тока  $J$ , а также тока  $J + СВЧ$ -излучения. Поле  $E$  в составе СВЧ-излучения было направлено поперек оси образца

**Fig. 6.** Connection of magnetron to waveguide (a) and electric field tension distribution along the  $Z$  length of the waveguide (б); в — diagram of waveguide body (1) with magnetron (2) for connection of SHF-radiation to the deformed specimen (3), which was in a holders (4) with shunt (5) and force measuring sensor (6); г — specimens deformation unit during SHF-radiation current pulses action. Specimen is inside the waveguide, magnetron – in the bottom. Both electromagnetic and electric fields directed transverse the specimen axis; д — deformation skips in the direction of weakening at active deformation and current pulses  $J$  action, as well as  $J + СВЧ$ -radiation action; Field  $E$  within the SHF-radiation was directed transvers the specimen axis.



На рис. 7 приведены результаты обработки данных первых экспериментов. По оси ординат отложена величина падений (скачков вниз) механических напряжений при действии только импульса тока, т. е. величина пиков ЭПЭ (нижняя область значений) или совместно импульса тока и СВЧ-излучения (верхняя область значений), а по оси абсцисс — приложенные механические напряжения. Видно, что в присутствии СВЧ-излучения происходит увеличение пиков ЭПЭ. Этот результат, экспериментально полученный впервые в мире, может свидетельствовать о наличии в составе ЭПЭ нового физического явления — спинового разупрочнения металла. В подобной постановке опыта складываются условия для возникновения ЭПР, что предсказывалось израильскими учеными [14, 27–29]. Обнаруженное явление может найти практическое применение при деформации тонколистовых материалов, включая тонкие железные и стальные листы.

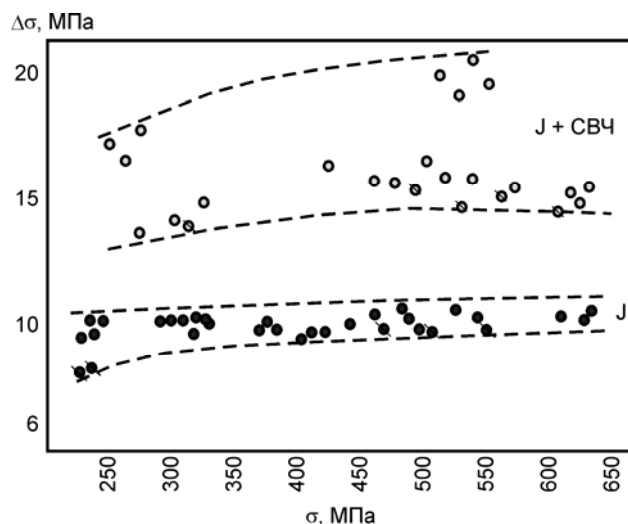


Рис. 7. Скачки деформации в сторону разупрочнения при активной деформации и действии импульсов тока  $J$ , а также тока  $J$  + СВЧ-излучения (данные получены на пяти образцах)

Fig. 7. Deformation skips in the direction of weakening at the active deformation and current pulses  $J$  action, as well as  $J$  + SHF-radiation action (data received at five specimens)

### Практическое применение электропластического эффекта

Таким образом, ЭПЭ, несомненно, относится к кооперативным явлениям. Он может быть применен при любом виде обработки металлов давлением (ОМД). Для этого должны выполняться следующие два обязательных условия:

- заготовка должна находиться под механическими напряжениями выше предела текучести  $\sigma_c$ ;

- зона деформации металла должна подвергаться действию импульсов тока указанных выше режимов, а также для усиления ЭПЭ действию СВЧ-излучения.

Менее обязательными, но желательными условиями реализации большого ЭПЭ являются еще три условия, касающиеся параметров импульсного тока:

- длительность импульсов тока прямоугольной и трапецеидальной формы  $\tau$  должна быть близка к характерным временам скачков деформации  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  с и не превышать  $(1,5\text{--}2,5) \times 10^{-2}$  с, если нежелательны значительные тепловые процессы;

- амплитудная плотность тока  $J_m$  должна быть не менее  $10^5$ – $10^6$  А/см<sup>2</sup> с тем, чтобы электроны проводимости передавали на дислокации и другие подвижные дефекты структуры импульсы силы и энергии достаточной величины для их продвижения и стимулирования пластической деформации металла;

- частота следования импульсов  $F$  должна быть достаточной (как правило, сотни герц) для того, чтобы все участки движущейся сквозь зону деформации заготовки успевали проработаться током. Величина  $F$  легко определяется делением скорости движения заготовки  $v$  сквозь зону деформации на величину зоны деформации  $l$  в продольном направлении и в направлении вектора плотности тока  $J_m$ , т. е.  $F = v/l$ .

Действие ЭПЭ во время ОМД приводит к следующим основным результатам:

- снижение сопротивления металла деформированию на 25–30 %;

- увеличение пластичности металла во время обработки;

- увеличение остаточной пластичности до 30 %;

- повышение степени совершенства аксиальной текстуры проволоки при волочении, приводящее к снижению ее электрического сопротивления на 15 %;

- улучшение структуры и фазового состава материала проволоки;

- при прокатке, волочении и вытяжке нержавеющих сталей практически полностью подавляется аустенитно-мартенситное фазовое  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение, что делает ненужными операции дорогостоящих и энергоемких аустенизирующих отжигов;

- уменьшается вероятность хрупкого разрушения материала во время обработки.

В основе ЭПЭ лежит силовое действие тока на пластическую деформацию металла в основном по двум каналам — через электронную подсистему посредством воздействия “электронного ветра” на дислокации, а также через решеточную подсистему металла посредством создания вибрации решетки за счет ПЭ действия импульсного тока (взаимодействия тока с собственным магнитным полем тока). В силу действия последнего физического фактора возникают колебания узлов решетки, подобные тем, что имеют место при действии ультразвуком на пластическую деформацию металла по механизму своеобразного

механотронного действия, не связанного с тепловым действием тока. Помимо этого, как показали последние эксперименты, в составе ЭПЭ присутствует новое физическое явление спинового разупрочнения металла или влияние ЭПР на механические свойства металла, что в принципе можно усилить до технологически значимого, поднимая мощность СВЧ-излучения до значений, например, 10 кВт и выше. Более подробную информацию об ЭПЭ, его физическом объяснении и технологических применениях можно найти в работах [1–4, 15–24].

### Распространенность ЭПЭ в мире

В настоящее время на основе ЭПЭ в разных странах созданы примерно 45 станков и мощных металлообрабатывающих станков, работающих по технологиям электропластической деформации металлов (ЭПДМ) (Россия — 25, Южная Корея — 2, Италия — 5, США — 6, Китай — 5). Разрабатываются различные варианты эффек-

тивных энергосберегающих критических технологий ЭПДМ прокаткой, волочением, штамповкой, вытяжкой и плющением, а также брикетирования с током металлических отходов. Создается новое оборудование для ЭПДМ и модернизируется существующее оборудование под технологию ЭПДМ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Троицкий О.А. Электромеханический эффект в металлах // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 2. № 10. С. 18–22.
2. Троицкий О.А., Розно А.Г. Электропластическая деформация в металлах // Физика твердого тела. 1970. Т. 12. № 1. С. 203–209.
3. Троицкий О.А. Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом // Изв. АН СССР. 1977. Сер. № 6. С. 118–122.
4. Спицын В.И., Троицкий О.А. Моделирование теплового и пинч-эффекта импульсного тока на пластическую деформацию металла // ДАН СССР. 1975. № 5. С. 1070–1073.
5. Okazaki K., Kagava M., Conrad H. Electroplastic effect in metals // Scr. Met. 1978. № 12. P. 1063.
6. Okazaki K., Kagava M., Conrad H. // Scr. Met. 1979. № 13. С. 277.
7. Okazaki K., Kagava M., Conrad H. // Scr. Met. 1979. № 13. С. 473.
8. Батаронов И.Л., Батенко Т.А., Рошупкин А.М. О линейном отклике дислокационного ансамбля на воздействие током // Изв. АН СССР. 1995. Т. 61. № 5. С. 877–885.
9. Батаронов И.Л., Рошупкин А.М. Электропластическая деформация металла и динамический ПЭ // Изв. вузов. Черная металлургия. 1993. № 8. С. 57–61.
10. Батаронов И.Л., Рошупкин А.М. К электронной теории динамического пинч-эффекта в металлах // Изв. вузов. Черная металлургия. 1993. № 8. С. 61–64.
11. Структура и свойства перспективных металлических материалов / А.Я. Багаутдинов, В.Г. Громов, Ю.И. Головин, О.А. Троицкий и др. — Томск: изд-во НТЛ. 2007. — 575 с.
12. Zuev L.D., Gromov V.E., Gurevich L.I. The effect of electric current pulses on the dislocation mobility in Zn single crystals // Physica Status Solidi (a). 1990. V. 121. P. 437–443.
13. Зуев Л.Б., Громов В.Е., Курилова И.Ф. и др. Подвижность дислокаций в монокристаллах Zn при действии импульсов тока // ДАН СССР. 1978. Т. 239. № 1. С. 84–87.
14. Molotskii M., Fleurov V. // J. Phys. Chem. B. 2000. V. 104. P. 3812–3816.
15. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. — М.: изд-во МГИУ. 2001. — 843 с.
16. Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технологии, структура и свойства). — Ижевск: изд-во РХД, АНО ИКИ. 2004. Т. I. — 590 с. Т. II. — 467 с.
17. Roschupkin A.M., Bataronov I.L., Troitskii O.A., Moiseenko M.M. Electric current effect on metal surface layers // Physica Status Solidi (b). 1989. V. 151. № 1. P. 121–126.
18. Громов И.Е., Громов Л.Б., Батаронов И.Л., Рошупкин А.М. Развитие представлений о подвижности дислокаций при токовом воздействии // Физика твердого тела. 1991. Т. 33. № 10. С. 3027–3032.
19. Рошупкин А.В., Батаронов И.Л. Критический анализ теорий электропластического эффекта // Изв. вузов. Черная металлургия. 1991. № 10. С. 75, 76.
20. Рошупкин А.М., Батаронов И.Л. Физические основы электропластической деформации металлов // Изв. вузов. Физика. 1996. № 3. С. 57–65.
21. Рошупкин А.М., Батаронов И.Л. О влиянии электрического тока и магнитного поля на взаимодействие дислокаций с точечными дефектами в металлах // Физика твердого тела. 1988. Т. 30. № 11. С. 3311.

22. Батаронов И.Л., Горнов С.К., Рошупкин А.М. Формирование термоупругих напряжений импульсным электрическим током и их роль в электропластической деформации металла // Изв. вузов. Черная металлургия. 1992. № 6. С 105–108.
23. Троицкий О.А. Исследования электропластической деформации металлов // Проблемы прочности. 1976. № 12.
24. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. — М.: Наука, 1985. — 160 с.
25. Sprecher A.F., Mannan S.L., Conrad H. On the mechanisms for electroplastic effect in metals // Acta Metallurgica. 1986. V. 34. № 7. P. 1145–1162.
26. Conrad H., Sprecher A.F. The electroplastic effect in metals // Dislocation in Solids, edited by F.R.N. Nabarro. 1989. V. 8. P. 497–541.
27. Molotskii M., Fleurov V. Magnetic effect in electroplasticity of metals // Physical Review B. 1991. V. 52. № 22. P. 311–317.
28. Молоцкий М. Physics of solid // Физика твердого тела. 1991. Т. 33. № 10. С. 3112.
29. Molotskii M. Plasticity of ferromagnets near the curie point // Philosophical Magazine. 2003. V. 83. № 12. P. 1421.
30. Троицкий О.А., Спицын В.И., Стащенко В.И. // ДАН СССР. 1981. Т. 256. № 5. С. 1134–1137.
31. Стащенко В.И., Троицкий О.А., Яновский Ю.Г., Ульянов Л.П. // Изв. АН СССР. Металлы. 1981. № 2. С. 176.
32. Кравченко В.Я. Взаимодействие направленного потока электронов с движущимися дислокациями // ЖЭТФ. 1966. Т. 51. № 36 (12). С. 1676–1681.
33. Кравченко В.Я. Влияние электронов на торможение дислокаций в кристаллах // Физика твердого тела. 1966. Т. 8. № 3. С. 927–933.

## ELECTROPLASTIC EFFECT IN METALS

*O. A. TROITSKY, HD (Tech), Professor, chief research assistant, oatroitsky@rambler.ru  
(Institute of Science of Machines after A.A. Blagonravov, Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow)*

**Abstract.** A mechanism of electroplastic effect considered as well as possible areas of its technological application during rolling, drawing, stamping of thin sheets and other methods of metals forming.

A conception justified that metal electroplastic deformation, based on electroplastic effect, can be applied at middle and final metallurgical stage. Electroplastic effect allows to decrease metal resistance to deformation by 25–30% and increase the ductility of a metal during its forming, to increase residual ductility till 30%. Due to increasing of axial texture perfection degree of wire during drawing technology with electroplastic effect application, a decrease of its electric resistance by 15% is reached. During the metal electroplastic deformation of stainless steels the austenite-martensitic phase  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformation is practically completely suppressed, which makes unnecessary operations of money-and energy consuming austenizing annealing.

Based on electroplastic effect about 45 mills and powerful metal-processing facilities, using metal electroplastic effect deformation created in different countries (mainly in Russia, South Korea, Italy, Great Britain and China). Different variants of effective energy-saving critical technologies are being developed by metal electroplastic effect deformation by rolling, drawing, stamping and flatting, as well as briquetting of metal wastes with current. A new equipment is created and existing equipment is modernized for application of metal electroplastic effect deformation technology.

**Key words:** electroplastic effect; metal electroplastic effect deformation; electromagnetic fields action on metals deformation; metal resistance to forming; residual ductility.

**For citation:** Troitsky O.A. Electroplastic effect in metals. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 9, pp. 65–76. (In Russ.).

**Doi:** 10.32339/0135-5910-2018-9-65-76

## REFERENCES

1. Troiczkiy O.A. Electromechanical effect in metals. *Pis'ma v ZhE'TF*, 1969, vol. 2, no. 10, pp. 18–22. (In Russ.).
2. Troiczkiy O.A., Rozno A.G. Electroplastic deformation in metals. *Fizika tverdogo tela*, 1970, vol. 12, no. 1, pp. 203–209. (In Russ.).
3. Troiczkiy O.A. Electromechanical effect in metals, caused by pinch effect. *Izvestiya AN SSSR*, 1977, no. 6. pp. 118–122. (In Russ.).
4. Spicyn V.I., Troiczkiy O.A. Simulation of heat- and pinch effect of pulse current on plastic deformation of metal. *DAN SSSR*, 1975, no. 5, pp. 1070–1073. (In Russ.).
5. Okazaki K., Kagava M., Conrad H. Electroplastic effect in metals. *Scr. Met.*, 1978, no. 12, pp. 1063.
6. Okazaki K., Kagava M., Conrad H. *Scr. Met.*, 1979, no. 13, pp. 277.
7. Okazaki K., Kagava M., Conrad H. *Scr. Met.*, 1979, no. 13, pp. 473.
8. Bataronov I.L., Batenko T.A., Roshhupkin A.M. About linear dislocation ensemble response on current action. *Izvestiya AN SSSR*, 1995, no. 5. pp. 877–885. (In Russ.).
9. Bataronov I.L., Roshhupkin A.M. Electroplastic deformation of metal and dynamic pinch effect. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 1993, no. 8, pp. 57–61. (In Russ.).
10. Bataronov I.L., Roshhupkin A.M. Electron theory of dynamic pinch effect in metals. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 1993, no. 8, pp. 61–64. (In Russ.).
11. Bagautdinov A.Ya., Gromov V.G., Golovin Yu.I., Troiczkiy O.A. etc. *Struktura i svojstva perspektivny'x metallicheskih materialov* [Structure and properties of perspective metallic materials]. Tomsk: izd-vo NTL, 2007, 575 p. (In Russ.).
12. Zuev L.D., Gromov V.E., Gurevich L.I. The effect of electric current pulses on the dislocation mobility in Zn single crystals. *Physica Status Solidi (a)*, 1990, vol. 121, pp. 437–443.

13. Zuev L.D., Gromov V.E., Kurilova I.F. etc. Mobility of dislocations in Zn monocrystalline at current pulses action. *DAN SSSR*, 1978, vol. 239, no. 1, pp. 84–87. (In Russ.).
14. Molotskii M., Fleurov V. *J. Phys. Chem. B*, 2000, vol. 104, pp. 3812–3816.
15. Baranov Yu.V., Troiczkiy O.A., Avramov Yu.S., Shlyapin A.D. *Fizicheskie osnovy' e'lektroimpul'snoj i e'lektroplasticheskoy obrabotok i novy'e materialy'* [Physical base of electroimpulse and electroplastic processing and new materials]. Moscow: izd-vo MGIU, 2001, 843 p. (In Russ.).
16. Troiczkiy O.A., Baranov Yu.V., Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D. *Fizicheskie osnovy' i texnologii obrabotki sovremenny'x materialov (teoriya, texnologii, struktura i svojstva)* [Physical base and technologies of processing of up-to-date materials]. Izhevsk: izd-vo RXD, ANO IKI, 2004, vol. 1, 590 p.; vol. 2, 467 p. (In Russ.).
17. Roschupkin A.M., Ataronov I.L., Troitskii O.A., Moiseenko M.M. Electric current effect on metal surface layers. *Physica Status Solidi (b)*, 1989, vol. 151, pp. 121–126.
18. Gromov I.E., Gromov L.B., Bataronov I.L., Roschupkin A.M. Development of conceptions of dislocations mobility at current action. *Fizika tverdogo tela*, 1991, vol. 33, no. 10, pp. 3027–3032. (In Russ.).
19. Roshhupkin A.M., Bataronov I.L. Critical analysis of electroplastic effect theories. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 1991, no. 10, pp. 75, 76. (In Russ.).
20. Roshhupkin A.M., Bataronov I.L. Physical base of electroplastic deformation of metals. *Izvestiya VUZov. Fizika*, 1996, no. 3, pp. 57–65. (In Russ.).
21. Roshhupkin A.M., Bataronov I.L. About influence of electric current and magnetic field on interaction of dislocations with point defects in metals. *Fizika tverdogo tela*, 1988, vol. 30, no. 11, pp. 3311. (In Russ.).
22. Bataronov I.L., Gornov S.K., Roshhupkin A.M. Forming of thermoelastic tensions by pulse electric current and their role in the electroplastic metal deformation. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 1992, no. 6, pp. 105–108. (In Russ.).
23. Troiczkiy O.A. Study of electroplastic deformation of metals. *Problemy' prochnosti*, 1976, no. 12, pp. 88–93. (In Russ.).
24. Spicyn V.I., Troiczkiy O.A. *E'lektroplasticheskaya deformatsiya metallov* [Electroplastic deformation of metals]. Moscow: Nauka, 1985, 160 p. (In Russ.).
25. Sprecher A.F., Mannan S.L., Conrad H. On the mechanisms for electroplastic effect in metals. *Acta Metallurgica*, 1986, vol. 34, no. 7, pp. 1145–1162.
26. Conrad H., Sprecher A.F. The electroplastic effect in metals. *Dislocation in Solids*. F.R.N. Nabarro ed., 1989, vol. 8, pp. 497–541.
27. Molotskij M., Fleurov V. Magnetic effects in electroplasticity of metals. *Physical Review B*. 1991, vol. 52, no. 22, pp. 311–317.
28. Moloczkiy M. Physics of solid. *Fizika tverdogo tela*, 1991, vol. 33, no. 10, pp. 3312. (In Russ.).
29. Molotskij M. Plasticity of ferromagnets near the curie point. *Philosophical Magazine*, 2003, vol. 83, no. 12, pp. 1421–1430.
30. Troiczkiy O.A., Spicyn V.I., Stashenko V.I. *DAN SSSR*, 1981, vol. 256, no. 5, pp. 1134–1137. (In Russ.).
31. Stashenko V.I., Troiczkiy O.A., Yanovskij Yu.G., Ul'yanov L.P. *Izvestiya AN SSSR. Metally'*, 1981, no. 2, pp. 176. (In Russ.).
32. Kravchenko V.Ya. Interaction of directed flow of electrons with moving dislocations. *ZhE'TF*, 1966, vol. 51, no. 36 (12), pp. 1676–1681. (In Russ.).
33. Kravchenko V.Ya. Influence of electrons on deceleration of dislocations in crystals. *Fizika tverdogo tela*, 1966, vol. 8, no. 3, pp. 927–933. (In Russ.).