

## ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ЖЕЛЕЗНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

Троицкий О. А., Сташенко В. И.

*ИМАШ РАН, Москва, Россия*  
[oaTROITSKY@mail.ru](mailto:oaTROITSKY@mail.ru), [ssv568@mail.ru](mailto:ssv568@mail.ru)

Воздействия электрическими и магнитными полями на металл при его деформации позволяют углубить представления о физической природе твердого тела, а также дают возможность управлять его формообразованием. Эти внешние воздействия не являются высокоэнергетическими и не превышают  $10^{-4}$  эВ в расчете на один атом.

Значительный эффект наблюдается при действии импульсного тока высокой плотности в процессе пластической деформации металлов и сплавов, когда в зону деформации вводится импульсы тока длительностью порядка 150–200 мкс, амплитудной плотностью  $10^3$  А/мм<sup>2</sup>, частотой следования до  $10^3$  Гц (в зависимости от скорости прохождения заготовки через зону деформации). В этом случае сопутствующий нагрев заготовки не превышает 100–200°С. Эффект действия импульсного тока объясняется его как бы силовым влиянием на пластическую деформацию металла по каналам электронной подсистемы – электронным «ветром» на дислокации при пластической деформации [1,2], с передачей дислокациям импульсов силы и энергии; через решетчатую подсистему металла – посредством создания вибраций решетки, подобной действию ультразвука за счет пинч-эффекта (пондеромоторного действия тока собственным магнитным полем) [3, 4]; посредством механизма спинового резонансного разупрочнения металлов, имеющих количество примесей (до 1 %).

В результате спиновой конверсии происходит допиннинг (открепление) дислокаций от точек закрепления в виде примесей [5,6]. Указанные эффекты вносят кооперативный вклад в электропластическую деформацию (ЭПД), создавая электропластический эффект (ЭПЭ), имеющий технически большое значение.

В работе изучалась электропластическая деформация прокаткой полос железоникелевого сплава толщиной порядка ~1 мм, шириной ~3 мм, длиной ~300 мм, с подачей импульсного тока в зону деформации.

Использовалась обычная скорость прокатки 0,4 м/с, подбирались режимы импульсного тока по параметрам амплитуды тока, длительности импульсов и частоты следования импульсов, при которых получается максимальная остаточная пластичность полос и максимальная их длина после 8 прокаток с единичными обжатиями примерно 6–8%, что оценивалось сразу путем измерений длины и ширины полос, а также их остаточной пластичности с помощью испытательной машины на растяжение с определением относительного удлинения образцов до разрушения, а также микротвердости на микротвердомере.

Использовался генератор импульсов тока при тех же механических режимах. Исследовалось влияние униполярных импульсов тока и биполярных импульсов тока. Используя результаты предыдущих опытов по режимам импульсного тока, способам его подведения в зону деформации и характера пропускаемого тока, установлено влияние на получаемую длину образцов (пластичность и остаточную пластичность при последующих механических испытаниях полос) по факторам:

- скорость прокатки, начиная с 0,1 м/с и до 1 м/с;
- величины единичных обжатий, начиная со значений 2–3% и до значений 15–16% с шагом по 3%.

Было установлено, что наибольший эффект ЭПД наблюдается тогда, когда пропускаемый через зону деформации импульсный ток имел полярность от отрицательного полюса к положительному полюсу вдоль направления прокатки. Обратная поляр-

ность, т.е. от положительного полюса к отрицательному вдоль направления прокатки давала меньший эффект ЭПД, что являлось еще одним подтверждением нетепловой полярной природы ЭПЭ, основанной на тепловом действии тока при пластической деформации металла.

При исследовании частотной зависимости ЭПД было установлено, что наиболее оптимальная частота следования импульсов тока лежит в пределах 300–500 Гц. Отмечались также результаты отдельных экспериментов, когда ЭПД при 1000 Гц приводила к увеличению ширины полосы для образцов, вырезанных вдоль направления прокатки листа. Толщина полосы в результате ЭПД уменьшалась практически для всех применяемых частот импульсного тока, что указывает на снижение эффекта прокатки.

Исследования влияния длительности импульсов показали следующие результаты: для образцов, вырезанных вдоль прокатки, эффект ЭПД по длине образца был выше при длительности импульсов 220 мкс, чем для образцов, вырезанных поперек прокатки. Все примененные длительности импульсов в пределах 80–280 мкс давали примерно одинаковый результат. Тем не менее, можно отметить, что эффект ЭПД в ширину для образцов, вырезанных вдоль прокатки, был выше при длительности 100 мкс, а для вырезанных поперек прокатки – при длительности 280 мкс. ЭПД по толщине для всех образцов был выше при длительности 280 мкс.

Весь диапазон амплитуд плотности тока от 600 до 1200 А/мм<sup>2</sup> дал практически одинаковый результат.

Сопоставительные исследования влияния на ЭПД униполярных и биполярных импульсов тока на увеличение продольной деформации полос дал практически одинаковый эффект. Вместе с тем, наблюдалось усиление ЭПД действия биполярных импульсов тока на увеличение ширины и уменьшение толщины полосы.

Исследования влияния скоростных режимов ЭПД показали следующие результаты: ЭПД по удлинению образцов в пределах скоростей деформации от 0,1 до 0,6 м/с был примерно одинаковым, а ЭПД по уширению полос было тем больше, чем выше скорость деформации.

Полученные результаты использовались при ротационной вытяжке цилиндров из железоникелевого сплава толщиной до 2 мм. Импульсный ток (минус источника) подводился к обойме с шариками и к оправе. Охлаждение и смазка зоны деформации осуществлялись минеральным маслом. За 10 проходов заготовки удлинились на 450–500% без отжигов. Такая технология является энергосберегающей и повышающей производительность оборудования.

Таким образом, ЭПЭ при ОМД на макроуровне проявляется в снижении сопротивления металла деформированию на 25–30% (что регулируется, в частности, по снижению на указанную величину потребления электроэнергии приводами станков), увеличении его пластичности, включая остаточную, на десятки процентов, в улучшении структуры, текстуры и фазового состава материала. В частности, при волочении с током повышается степень совершенства аксиальной текстуры проволоки, вызывающее снижение ее электрического сопротивления, а также при прокатке, волочении и вытяжке нержавеющей сталей практически полностью подавляется аустенитно-мартенситное фазовое  $\gamma$ - $\alpha$ -превращение, что делает ненужными операции дорогостоящих и энергоемких аустенизирующих отжигов заготовок, повышая производительность.

## Список литературы

1. Кравченко В.Я. // ЖЭТФ. – 1966. – Т.51. № 6 (12). С.1676.
2. Троицкий О.А. Электромеханический эффект в металлах, ж. Письма в ЖЭТФ, 1969. – Т.2. - № 10. С.18-22.
3. Батаронов Н.Л., Горлов С.К., Ращупкин А.М. // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. 1992. - № 6. – С.105.
4. Головин Ю.И., Киперман В.А. // Физика и химия обработки материалов. 1980. - № 4. – С.26. 176

5. Молоцкий М.И. // ФТТ. - 1991. – Т.33. - № 10. – С.3112.
6. Molotskii M. and Fleurov V. Magnetic effects in electroplasticity of metals, Physical Review B, 1996, v73, № 1, p.11.

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА И СЕРИЙ ИХ СЛЕДОВАНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА ДЕФОРМИРОВАНИЮ**

**Сташенко В. И., Троицкий О. А.**

*ИМАШ РАН, Москва, Россия*  
[ssv568@mail.ru](mailto:ssv568@mail.ru), [otroitsky@mail.ru](mailto:otroitsky@mail.ru)

Создание и внедрение перспективных технологий с применением внешних энергетических воздействий при пластическом формоизменении заготовок требует дальнейших исследований по изучению как эмпирических закономерностей, так и выявлению основных физических механизмов процессов, протекающих в материалах при действии электрических полей и токов.

Включение импульсного тока при пластической деформации сопровождается обычно скачком деформации, величина которого зависит как от структуры металла и величины, предшествующей деформации, так и от параметров тока. Прямое доказательство нетеплового действия импульсов тока получено в [1-3] при исследованиях полярности действия тока на пластическую деформацию, в работах [4-6] при корректном отделении эффекта от тепловой части действия тока.

Включение импульсного тока в процессе активной деформации образцов [1,5] или ползучести [4,6] приводят, как правило, к скачкообразному приращению деформации и связанному с этим скачку деформационного усилия. Зависимость этого эффекта от амплитуды  $I_m$  и длительности  $t_n$  носит пороговый характер [1,3]. Порог по  $I_m$  лежит на уровне 250–400 А/мм<sup>2</sup> для различных металлов, а по  $t_n$  на уровне 50–100 мкс. Эффект увеличивается с ростом  $I_m$  и  $t_n$ , а также с ростом частоты тока [7]. Встречные импульсы могут мешать друг другу в их действии на пластическую деформацию металла [8], а действие парных импульсов зависят от времени между импульсами в паре [4]. Значительно сильнее проявляют себя серии из 10-20 импульсов, пропускаемые через деформируемый металл с достаточным интервалом времени для накопления незавершенных сдвигов [9].

Отмеченные особенности электронно-пластического эффекта (ЭПЭ) естественно объяснить увлечением дислокаций электронами проводимости в направлении тока [10]. Однако действие тока на дислокации, участвующие в пластической деформации, не эквивалентно только применению к ним дополнительного механического напряжения [11]. Более значительный безактивационный вклад тока состоит в том, что под влиянием импульсов тока наиболее неравновесные группы дислокаций положительного знака открепляются от препятствий безактивационным путем, чему также способствует инерционный эффект Гранато [11]. При этом резко возрастают силы, действующие на дислокации в направлении тока. Группы же дислокаций отрицательного знака открепляются от стопоров только термофлуктуационным путем. К тому же это открепление затрудняется встречным током. При деформации происходит упрочнение материала, что препятствует появлению новых неравновесных групп дислокаций. Время формирования таких групп  $t_f$  [11] после микропластической деформации, вызванной очередным импульсом тока, с ростом общей деформации увеличивается. Наибольшее действие импульсный ток оказывает к приходу каждого из последующих импульсов, когда появ-