

УДК 621.77.014

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЕ ПЛЮЩЕНИЕ МЕТАЛЛА

О.А. Троицкий

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Аннотация. *Описывается разработанный стан и способ для ультразвукового электропластического плющения проволоки из вольфрама и других труднодеформируемых металлов и сплавов. Способ предусматривает одновременное использование в зоне деформации электрического тока и ультразвука.*

Ключевые слова: *ультразвуковое электропластическое плющение.*

I. Электропластический эффект и электропластическая деформация металла.

Электропластический эффект (ЭПЭ) был обнаружен в 1969 году при действии одиночными импульсами тока плотностью $\sim 10^5 \text{ А/см}^2$ и длительностью $\sim 10^{-4}$ сек на деформацию кристаллов цинка растяжением и сжатием [1]. Он проявлялся в скачкообразных удлинениях образцов при прохождении по ним каждого импульса тока без какого-либо существенного теплового эффекта и без дилатации образцов. Возникло предположение, что в основе нового эффекта лежит ускорение пластического течения металла потоком электронов проводимости, которые помимо джоулевого эффекта способны оказывать особое специфическое электропластическое действие на металл, находящийся под механическими напряжениями выше предела текучести, включающее в себя как действие «электронного ветра», так и вибрации решетки под влиянием пинч-эффекта [2].

Примерно десять лет спустя новый эффект действия тока был подтвержден профессором Г. Конрадом с сотрудниками [3-6]. При этом использовались такие же плотности тока и длительности одиночных импульсов. Опыты ставились на образцах титана диаметром $\sim 0,3$ мм, что уменьшало возможное влияние пинч-эффекта. К исследованиям ЭПЭ в 70 годы прошлого столетия обратились многие ученые в России, Украине, Америке и Израиле [1-20]. Установлено, что ЭПЭ 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. Он может действовать наряду с джоулевым эффектом в ставших традиционными способах обработки металлов давлением с участием электрического тока, таких как ЭКН (электроконтактный нагрев) и индукционный нагрев токами Фуко, где используется джоулевый эффект.

Возникло обоснованное предположение, что с помощью ЭПЭ можно интенсифицировать технологические процессы обработки металлов давлением (ОМД), такие как волочение, прокатка, штамповка, вытяжка и др. Эти предположения оправдались, но внедрение новой технологий электропластической деформации металла (ЭПДМ) оказалось связанным с рядом объективных трудностей:

- сложностью подведения тока высокой плотности в зону деформации металла на современных прокатных и волочильных станах;
- отсутствием хороших не искрящих контактов;
- отсутствием промышленных источников импульсного тока, предназначенных для этих целей.

Справедливости ради отметим, ЭПЭ менее универсален, чем джоулевый эффект, т.к. в отличие от последнего существует лишь во время пластической деформации материала. Вместе с тем он энергетически менее емок, т.к. ток вводится лишь в зону деформации металла:

- непосредственно в зону волочения с помощью двух близко стоящих контактов до и после волоки;

- в промежутки между валками при прокатке;
- по периметру вырубки материала при вырубке и штамповке материала;
- - через деформирующие стальные шарики или ролики в случае ротационной вытяжки металла.

Например, введение технологии электропластического волочения на современном стане получения проволоки энергетически означает включение одной не очень мощной лампы накаливания в цепь, обеспечивающую электричеством этот стан. При волочении медной проволоки, например, диаметром 0,2 - 0,3 мм это эквивалентно включению в цепь 100 вт лампы накаливания. Вместе с тем в силу относительной малости сечений металла в зоне волочения, прокатки и т.д. плотность вводимой электрической мощности при электропластической технологии ОМД достаточно высока и достигает значений $5 \cdot 10^4$ Вт/см², что близко к лучевым воздействиям.

К преимуществам электропластической технологии ОМД можно отнести следующее:

- возможность позонного воздействия на материал и позонной интенсификации технологических процессов с получением материала с периодически измененными свойствами;
- -экологическая чистота метода и его экономичность;
- высокая скорость и эффективность воздействия;
- отмена операций промежуточных отжигов;
- возможность комбинирования ЭПЭ с джоулевым эффектом с установлением в заготовке практически любых сопутствующих температур.

К недостаткам и ограничениям новой технологии относятся:

- снижение величины ЭПЭ с увеличением скорости деформации заготовки более 1,0 – 1,5 м/сек, что связано с ограничениями на скорость дрейфа электронов транспортного тока; скорость деформации материала не должны превышать скорость дрейфа электронов, которая определяется по формуле $V_F \cong J / en \cong 0,5 - 1 \dot{i} / \dot{n}$, где e - заряд электронов; n - концентрация электронов в единице объема металла, J - амплитудная плотность тока.
- невозможность ее применения при ОМД заготовок большого сечения из-за большого энергопотребления в этом случае и сложности создания в зоне деформации плотности тока порядка 10^5 А/см², при которой реализуется ЭПЭ.

Как уже установлено в технологических опытах, наиболее вероятными областями практического применения ЭПЭ являются:

- сверхтонкое, тонкое и среднетонкое волочение проволоки (до ~ 1 мм);
- прокатка тонкого листа и ленты;
- ультразвуковая ковка ленты;

В настоящее время во всем мире создано примерно 45 единиц опытных станов и станков ЭПДМ. Созданные станы и технологии ЭПДМ уже осуществляют выпуск массовой продукции в этой области металлургии. Целесообразность расширения использования ЭПЭ при всех видах ОМД стала очевидной. Поэтому массовое внедрение технологий ЭПДМ в металлургическую практику - это вопрос только времени. Технологии ЭПДМ относятся к классу материал- и энергосберегающих.

Одной из технологий ЭПДМ является ультразвуковое электропластическое плющение (УЗЭП) труднодеформируемых металлов и сплавов.

II. Ультразвуковое электропластическое плющение металла.

В работах [14-17] осуществлялось плющение с током проволоки из молибдена в ленту при $q = 20\%$, а также из сплава Мо с Re МР-47ВП в ленту с коэффициентом формы до 30 (вместо достижимого при обычной прокатке 10) с нагревом в зоне деформации не более 300-350⁰С. По такой технологии получали ленты из вольфрама и вольфрам-рениевого сплава

ВР-27ВП с коэффициентом формы до 20-30. Достигались единичные обжатия до 22-40% [14].

Однако применение в зоне деформации вольфрама только электрического тока не позволяет получать еще больших степеней единичного обжатия материала, чем указанные. В связи с этим, нами совместно с сотрудниками МГМИ были разработаны стан и способ для ультразвукового электропластического плющения проволоки из вольфрама и других труднодеформируемых металлов и сплавов [8,9]. Способ предусматривает одновременное использование в зоне деформации электрического тока и ультразвука, как показано на рис. 1, где 1, 9 - приемно-сдаточный и укладочный механизмы; 2 – двигатель постоянного тока; 3, 4 - датчик натяжения и тензостанция; 5 -7 - ультразвуковой генератор, преобразователь и концентратор УЗ-колебаний; 8 - отражатель; 10 - генератор импульсного тока; 11 - исходная проволока; 12 - получаемая микролента.

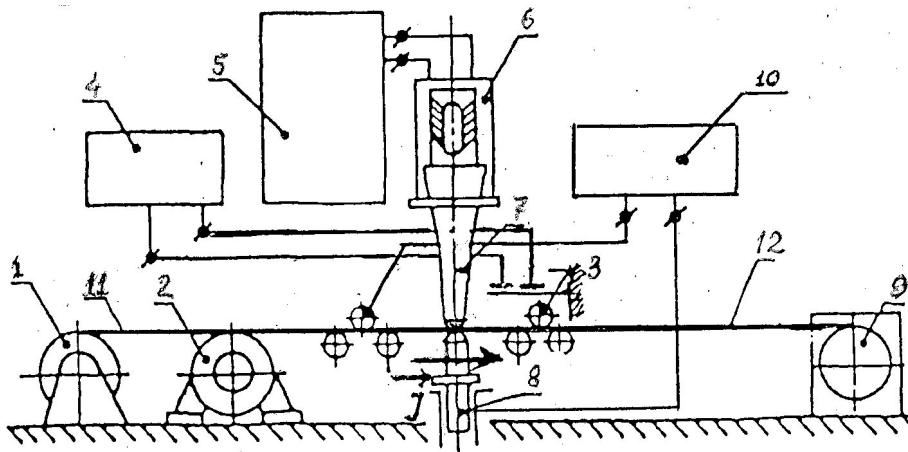


Рис. 1

При ультразвуковом электропластическом плющении, в отличие от простого плющения с током [14-17] и разработанного в [19] способа простого ультразвукового плющения, достигаются рекордные степени единичного обжатия - в несколько десятков процентов (до 88-90%) без растрескивания материала. В качестве источника ультразвука использовался генератор УЗГ-1-4 с преобразователем типа ПМС-15А-18. Геометрические размеры концентратора и отражателя выбирались с учетом необходимости получения стоящей волны, что увеличивало амплитуду колебаний в зоне деформации в 2 раза.

При УЗ-плющении, как было показано в [19, 21], возможны два режима деформирования - импульсный и непрерывный, причем соотношение между ними определяется кинематическими параметрами установки и режимами процесса УЗ-плющения. Импульсный режим деформирования более эффективен, чем непрерывный с точки зрения снижения энергосиловых параметров процесса и повышения качества получаемой ленты. Согласно [21] существуют предельные соотношения между скоростью протягивания ленты, величиной упругой деформации заготовки (большой частью проволоки небольшого диаметра), параметрами колебательной системы и углом захвата бойков, при котором обеспечивается импульсный режим упругопластического деформирования металла.

Важно отметить, что для увеличения скорости протягивания ленты и диаметра деформируемой проволоки необходимо увеличивать суммарную амплитуду УЗ-колебаний и уменьшать угол захвата бойков или упругие свойства заготовки, что мы делаем с помощью электропластического эффекта действия тока.

При плющении вольфрама марки ВТ исходная проволока имела диаметр 0,41 мм. Частота ультразвука была равна 18-20 кГц, амплитуда колебаний 20-60 мкм. Скорость плющения составляла 6-60 м/мин. Без тока процесс, как правило, не шел - происходило расщепление материала. С током (при одновременном действии УЗ) получалась лента хорошего качества. За один проход достигались единичные обжатия на 88-90%. Амплитудная плотность тока в зоне деформации составляла $(1,1-4,5) \cdot 10^2$ А/мм². Нагрев по расчетам был равен 400-450⁰С.

На рис. 2,а по результатам испытаний 8-10 образцов в каждой точке приведены зависимости предела прочности ленты, полученной с использованием УЗ, импульсного (кривые 1, 2 - разной полярности), постоянного (кривые 3, 4 - разной полярности) и переменного (кривая 5) тока от степени единичного обжатия $(d_0 - h)/d_0$. Видно, что наибольшее изменение σ_b происходит после плющения на постоянном и импульсном токе. Наличие минимума на кривых объясняется тем, что при больших единичных обжатиях $(d_0 - h)/d_0$ (начиная примерно с 65%) процесс плющения частично переходит в волочение. Это отражается на механических свойствах ленты.

Пластичность ленты оценивалась по числу перегибов на радиусе в 1 мм. Зависимость числа гибов n от степени обжатия $(d_0 - h)/d_0 \cdot 100\%$ приведена на рис 2,б). Видно, что n нарастает с увеличением $(d_0 - h)/d_0$, особенно в случае совмещения УЗ с действием импульсного тока.

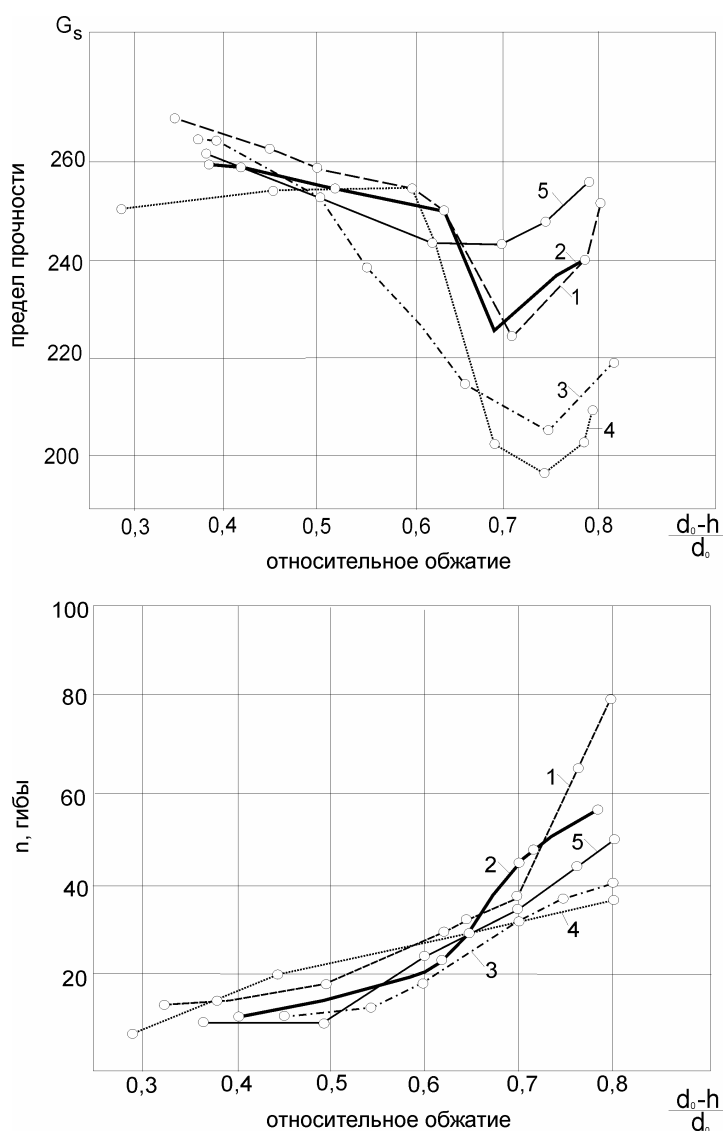


Рис. 2а-б. Зависимость предела прочности σ_b (а) и числа гибов n (б) вольфрамовой ленты от единичных обжатий при ультразвуковом электростатическом плющении. 1,2 – импульсный ток (плюс и минус до зоны деформации); 3,4 – постоянный ток (плюс и минус до зоны деформации); 5 – переменный ток

Можно предположить, что под влиянием тока увеличивается пластичность материала за счет формирования дислокационной структуры, препятствующей раннему появлению микротрещин в ленте. В частности, может возникать более дисперсная ячеистая структура.

Такие предположения можно сделать на основании работ С.А.Фирстова, которым было показано, что при больших деформациях со знакопеременным нагружением можно сформировать разориентированную ячеистую дислокационную структуру, и за счет этого повысить весь комплекс механических характеристик о.ц.к. металлов. Знакопеременные напряжения должны быть достаточными для размножения дислокаций. Последнее условие, по-видимому, выполнялось в описанных экспериментах.

На рис. 2,б приведены зависимости числа гибов n на радиусе $r = 2$ мм (основные линии) и угла пружинности Ψ (пунктирные линии) от q для ленты, полученной без тока (1 и 1') и с постоянным током (2 и 2' - минус; 3 и 3' - плюс для зоны деформации). Видно, что в результате действия тока число гибов n и угол пружинности Ψ возрастают. Было установлено также, что происходит снижение усилий прокатки на 10-15%.

Рентгеноструктурные исследования вольфрамовой ленты были проведены во ВНИИТСе. Использовался дифрактометрический метод построения полюсных фигур. Съемки велись на отражение от плоскости (200) на приборе ДРОН-1 с приставкой ГП-2. Образцы приклеивались на кювету в виде монослоя размером 17×17 мм². Поверхностный слой образцов толщиной примерно 20 мкм снимался электрополировкой. В процессе съемки кюветы вращались на 360° и наклонялись от 0° до 70° через каждые 5° . Бесструктурным эталоном служил вольфрамовый штабик, спеченный из мелкодисперсного вольфрамового порошка при 1200°C . Частичные полюсные фигуры были получены усреднением полных полюсных фигур.

На рис. 3 приведены полюсные фигуры. Установлено, что кроме характерной для текстуры прокатки металлов с о.ц.к. структурой ориентировки зерен (001) <110> развивается ориентировка (111) <110>, а для этой текстуры, как было показано С.А.Фирстовым, характерна более дисперсная ячеистая дислокационная структура, чем для (001) <110>. Ориентировка (001) <110> была наиболее острой у ленты, полученной с использованием импульсного тока.

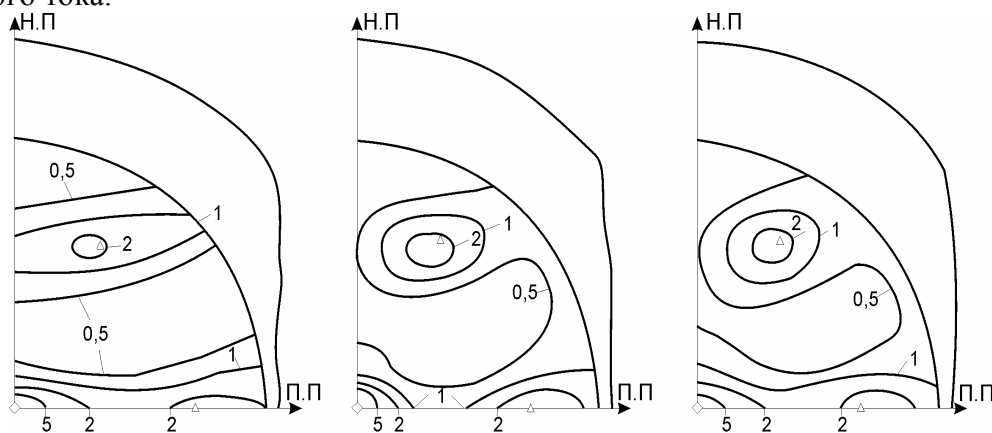


Рис.3. Полюсные фигуры (200) пленки толщиной 85-90 мкм из вольфрамовой проволоки диаметром 0,4 мм, полученной при пропускании тока: а) постоянного; б) импульсного; в) переменного; (\diamond - (001) /110/, Δ - (111) /110/)

Была изучена также электропластическая прокатка пружинного сплава К40ТЮ, идущего на изготовление пружин часовых механизмов. Высокие упругие свойства ленты из этого материала достигаются при деформировании на 85-90% (для проволоки) и на 70-75% (для ленты) с преимущественной кристаллографической ориентировкой (111). Сплав К40ТЮ является стареющим сплавом. Основные элементы, входящие в сплав: 39,85% Со; 12,5% Gr; 18,52% Ni; 3,7% Мо; 6,59% W; 1,78% Ti; 2,05% Mn, остальное С, Si и Р. После прокатки лента имела $\sigma_b = (2,0-2,05) \cdot 10^3$ МПа, угол пружинности $\Psi = 135-140^\circ$ (при размере 1,2x1,5 мм) и число гибов $n = 100-130$. После отпуска в результате дисперсионного твердения σ_b повышалась до $(2,35-2,45) \cdot 10^3$ МПа, а Ψ до $160-166^\circ$. Число гибов сокращалось.

На рис.4 по результатам 8-10 испытаний в каждой точке приведены значения σ_b ленты в зависимости от степени единичного обжатия q . Деформация осуществлялась либо без тока (1), либо с постоянным током силой 10 А (2, 3) с минусом (2) и плюсом (3) до зоны деформации. Видно, что с током высокие значения $\sigma_b = (1,9-2,0) \cdot 10^3$ МПа получаются уже при относительно малых степенях обжатия $q = 33-45\%$, тогда как без тока подобные значения σ_b получаются лишь при $q = 50-60\%$.

Показанное на рис. 4 изменение механических свойств ленты можно объяснить, наряду с деформационным упрочнением, процессами старения, проходящими частично во время обработки сплава с током. По существующей технологии операция старения проводится обычно при 350°C . Температурные условия во время электропластической прокатки были обеспечены, а равномерная и интенсивная пластическая деформация материала за счет электроннопластического действия тока стимулировала выделение мелкодисперсных фаз и образование сложных твердых растворов.

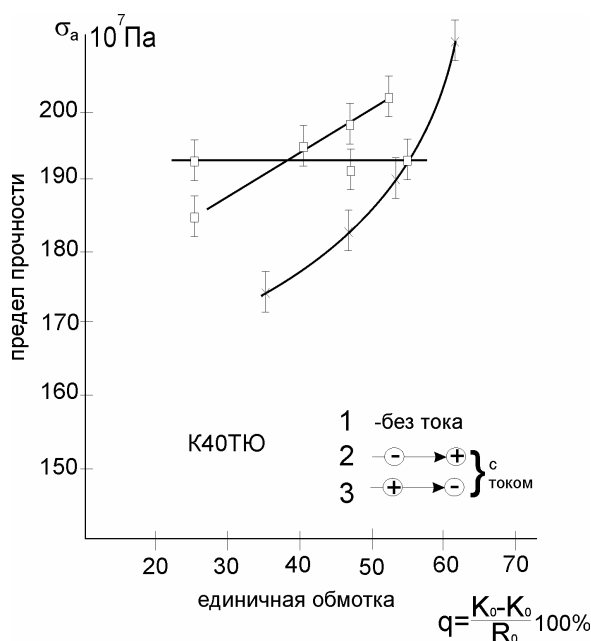


Рис. 4. Зависимость предела прочности σ_b (а), числа гибов n (основные линии) и угла пружинности ψ (пунктирные линии) (б) ленты из сплава K40TЮ от степени обжатия $q = (h_1 - h_0) / h_1 \cdot 100\%$ для образцов, прокатанных без тока (кривая 1 и 1') и с постоянным током силой 10А (кривые 2 и 3) с полярностью минус (кривая 2 и 2') и плюс (кривая 3 и 3') до зоны деформации

Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре АДП - 10 фирмы "Филипс" с использованием $\text{Co} - K_\alpha$ -излучения. Методика подготовки образцов была прежней. Рентгенофазовый анализ показал присутствие в образцах, фазы кобальта модификации $\beta\text{-Co}$, имеющей г.ц.к. структуру с параметрами решетки $a = 3,537$ А. Это высокотемпературная модификация существует в равновесных условиях при $T \geq 417^\circ\text{C}$. Параметр a определялся по линиям (222) и (311). Результаты измерений приведены в таблице.

Было установлено, что в результате действия постоянного тока происходит увеличение a до значений $3,605 \pm 0,001$ А, что объясняется образованием сложных твердых растворов с большим числом компонент. При действии переменным током существенных изменений параметра a по сравнению с деформацией без тока не происходило. Следовательно, тепловые процессы не определяли структурные и фазовые превращения в материале. С увеличением степени единичного обжатия ленты q наблюдалось

пропорциональное q искажение решетки β -Со. Наконец, оценки по уширению линий на полувысоте пиков при одних и тех же q показали увеличение размеров кристаллитов в ленте, прошедших прокатку с током, в пределах от 0,3 до 0,6 мкм.

Таблица 1

Изменение параметра кристаллической решетки пружинной ленты К40ТЮ после обычной и электропластической прокатки

№№ п/п	Номер образца и степень обжатия	Электрический режим	Параметр кристаллической решетки, а, А
1	№ 00 Исходный образец	Отжиг при 600 ⁰ С 4 часа	3,5±0,001
2 3 4	№ 27 №26 $q_{27}>q_{26}>q_{23}$ №23	Без тока	3,600±0,001
5 6 7	№ 1 № 3 $q_1>q_3>q_6$ № 6	Переменный ток 15 А	3,600±0,001
8 9 10	№ 12 № 10 $q_{12}>q_{10}>q_8$ № 8	Постоянный ток 15 А плюс до зоны деф.	3,604±0,001
11 12 13	№ 17 № 14 $q_{17}>q_{14}>q_{15}$ № 15	Постоянный ток 15 А минус до зоны деф.	3,604±0,001

Выводы

В результате ультразвукового электропластического плющения проволоки вольфрама в ленту достигаются единичные обжатия до 88-90% при хорошем качестве поверхности и кромок ленты. Лента обладает высокой пластичностью, может производиться без создания защитной атмосферы вокруг зоны деформации.

Наложение тока на зону деформации пружинной ленты из сплава К40ТЮ приводит к росту угла пружинности ленты Ψ , более раннему по степеням деформации упрочнению σ_b и некоторому росту числа гибов ленты n . Происходит также увеличение параметра кристаллической решетки основной фазы, что объясняется выделением мелкодисперсных фаз и образованием сложных твердых растворов.

Предложена модель электронно-пластического эффекта, учитывающая основные положения динамической и инерционной теорий участия электронов проводимости в пластической деформации металла. Модель построена, в предположении эквивалентности действия тока приложению к кристаллам дополнительных эффективных напряжений, влияния тока на скопления дислокаций, на перестройку и срыв скоплений со стопоров в виде примесей и дислокаций в других системах скольжения, а также с других препятствий, помимо возможного действия спинового разупрочнения [20].

Литература

1. О.А. Троицкий, Электромеханический эффект в металлах // Письма в ЖЭТФ, 10, 18-22(1969).
2. О.А.Троицкий, Ю.В.Баранов, Ю.С.Авраамов, А.Д.Шляпин. Физические основы и технологии обработки современных материалов, М-И, I и II тома, Ижевск: Изд-во РХД, АНО ИКИ.

3. K. Okazaki, M. Kagawa, H. Conrad, Электромеханический эффект в металлах. Ser. Met., 12, 1063 (1978)
4. K. Okazaki, M. Kagawa, H. Conrad, Ser. Met., 13, 277 (1979)
5. K. Okazaki, M. Kagawa, H. Conrad, Ser. Met., 13, 473 (1979)
6. K. Okazaki, M. Kagawa, H. Conrad. Evaluation of the contr, of skin, pinch and heating to the electroplastic effect in titanium. Preprint 1979
7. О.А. Троицкий, А.Г. Розно, Электропластическая деформация металла // Физика твердого тела, 12, №1, 203-210, 1970.
8. В.И. Спицын, О.А. Троицкий, Электропластический эффект в металлах // Вестник АН СССР, №11, 10-14, 1974.
9. В.И. Спицын, О.А. Троицкий, Моделирование теплового и пинч-действия импульсного тока на пластическую деформацию металла // Доклады АН СССР, 220, №5, 1070-1073, 1975.
10. О.А. Троицкий, В.И. Спицын, Исследование электропластической деформации методом релаксации напряжений и ползучести // Доклады АН СССР, 226, №6, 1307-1310, 1976.
11. В.И. Спицын, О.А. Троицкий, В.Г. Рыжков, А.С. Козырев, Однофильерное электропластическое волочение тончайших медных проволок // Доклады АН СССР, 231, 402-407, 1976.
12. О.А. Троицкий, В.И. Сташенко, В.И. Спицын, Влияние электрического тока на релаксацию напряжений в кристаллах Zn, Cd и Pb // Доклады АН СССР, 241, №2, 93-95, 1978.
13. А.А. Предводителев, О.А. Троицкий, Дислокации и точечные дефекты в гексагональных металлах. М: Атомиздат, 1973.
14. К.М. Климов и др. Изменение пластичности вольфрама под влиянием электрического тока // МТОМ, №1, стр. 56-57, 1977.
15. К.М. Климов и др. Электропластическая прокатка проволок в ленту микронных сечений из вольфрама и его сплава с рением // Известия АН СССР, сер. Металлы, №4, стр. 143-145, 1975.
16. К.М. Климов и др. Об электропластичности металлов // ДАН СССР, т219, №2, стр. 323-325, 1974.
17. К.М. Климов и др. Использование эффекта электропластичности для плющения проволоки // Приборы и системы управления, №10, стр. 5—53, 1975.
18. В.И. Спицын, О.А. Троицкий и др. Стан для плющения тончайшей пружинной ленты из вольфрама с помощью ультразвука и электропластического эффекта // ДАН СССР, т. 236, №1, стр. 85-086, 1977.
19. Е.П. Игнашев. Исследование и разработка методов и устройств для получения узких микролент, применяемых в приборостроении. Автореферат диссертации, Минск, 1073.
20. M. Molotskii and V. Fleurov, Magnetic effects in electroplasticity of metals, Physical Review B, v 52, № 22, p. 15829.
21. В.Н. Северденко, В.В. Клубович, А.В. Степаненко. Обработка металлов давлением с ультразвуком. Минск: Наука и техника, 1973, стр. 288.

Поступила: 29.07.09.