

УДК 621.91

**Герцрикен Д.С.***(Институт металлофизики им. Г.В.Курдюмова НАНУ)***Лопата Л.А.***(Институт воздушного транспорта НАУУ)***Хомяковский Ю.Л.***(Винницкий национальный аграрный университет)***Кожевникова Е.Е.***(Одесская национальная морская академия)*

## **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА НА ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДЕФОРМИРУЕМЫХ МЕТАЛЛАХ**

*Розглянуто перенесення речовини при електроконтакті пріпінанії. Результати досліджень показують, що за час дії синхронізованих імпульсів струму і тиску, в результаті реалізації електропластичного ефекту відбуваються миттєве зміцнення і, як наслідок, високошвидкісна пластична деформація, внаслідок чого виникає розвинена дифузійна зона між покриттям і металом. Крім того, має місце також дифузія атомів основного металу в покриття, практично на всю товщину покриття. Для опису електропластичного ефекту використана модель процесу зміцнення металу при проходженні імпульсів струму.*

*The transfer of matter is considered at the electro-pin baking. The results of researches show that in times of action of the synchronized impulses of current and pressure, as a result of realization of electro-plastic effect there are instantaneous loss of strength and, as a result, highly speed flowage, as a result there is the developed diffusive area between coverage and metal of basis. In addition, takes a place also diffusion of atoms of parent metal in coverage, practically on all of thickness of coverage. For description of electro-plastic effect the model of process of loss of strength metal is utilized at passing of impulses of current.*

### **Введение**

Одновременное действие пластической деформации и импульсов электрического тока используется при различных видах химико-термической обработки [1].

### **Основная часть**

Рассмотрим перенос вещества при электроконтактном пропекании. Оно осуществляется под импульсным давлением при прямом пропускании электрического тока до 8...30 кА, вторичным напряжением 1...6 В, давлением до 100 МПа, временем импульса 0,04...0,2 с, временем паузы 0,04...0,2 с., высокими скоростями нагрева, которые могут достигать  $10^3...10^4$  К/с. Результаты исследований показывают, что за время действия синхронизированных импульсов тока и давления, в результате реализации электропластического эффекта происходят мгновенное разупрочнение и, как следствие, высокоскоростная пластическая деформация ( $10 \leq \dot{\epsilon} \leq 10^2$  с<sup>-1</sup>), в результате чего возникает развитая диффузионная зона между покрытием и металлом основы. Кроме того, имеет место также диффузия атомов основного металла в покрытие, практически на всю толщину покрытия. При режимах  $I_{св} = 9$  кА,  $t_{импульса} = 0,06$  с,  $p = 80$  МПа, глубина проникновения составляет 10-12 мкм. С ростом величин давления и силы тока диффузионная зона возрастает и достигает значения  $\sim 25$  мкм. Для сравнения определяли величину диффузионной зоны и форму концентрационного профиля при медленном растяжении со скоростью  $3 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>.

Коэффициенты диффузии ( $D_M$ ) представлены в табл. 1. Из ее рассмотрения следует, что одновременное воздействие импульсов тока и деформации приводит к росту подвижности атомов на  $\sim 5$  порядков аналогично тому, что происходит при импульсных механическом и электромагнитном нагружениях [1].

Таблиця 1

Подвижность атомов в металлах при статической ( $D$ ) и импульсной ( $D_M$ ) обработках.

Диффузант	Металл	$D_M \cdot 10^5, \text{см}^2/\text{с}$	$D \cdot 10^{11}, \text{см}^2/\text{с}$
Ni	Железо	3,0	0,4
Cr	Никель	6,3	6,5
W	Железо	5,2	3,2
Fe	Никель	3,9	7,6
Al	Никель	7,1	65,0
Mn	Никель	9,2	98,0

При наложении импульсов тока на медленно растягиваемый металл ( $10^3 \text{ А/мм}^2$ ,  $1,25 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ ,  $323 \text{ К}$ ) происходит деформация со скоростью  $40 \text{ с}^{-1}$ , и подвижность атомов резко возрастает (табл. 2).

Таблиця 2

## Подвижность атомов в металлах при действии одного импульса тока.

*Me $\nabla$ <Me	Ni $\nabla$ <Ni	Ni $\nabla$ <Cu	Cu $\nabla$ <Ni	Fe $\nabla$ <Fe	Fe $\nabla$ <Co	Co $\nabla$ <Fe	Co $\nabla$ <Co	Al $\nabla$ <Ti	Ti $\nabla$ <Al
$D_M \cdot 10^5, \text{см}^2/\text{с}$	1,8	2,1	0,9	1,2	2,0	3,0	3,2	4,9	6,6

С повышением температуры и скорости скачкообразной деформации в момент разупрочнения в условиях конденсаторной сварки алюминия, меди, никеля ( $2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ ,  $7,5 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ ,  $\sim 723 \div 873 \text{ К}$ ) подвижность собственных атомов и атомов других металлов растет еще больше и достигает величин  $10^{-3} - 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ . Аналогичное влияние температуры и скорости деформации наблюдается при различных обработках: механическом воздействии, нагружении ударами с ультразвуковой частотой и др. [1].

Для понимания полученных результатов необходимо создание модели процесса разупрочнения металла при прохождении импульсов тока.

Для описания электропластического эффекта (ЭПЭ) можно использовать модель предложенную в работе [2]. Включение импульсного тока в процессе активной деформации образцов или ползучести приводит, как правило, к скачкообразному приращению деформации и связанному с этим скачком деформирующего усилия. Зависимость этого эффекта от амплитуды  $J_0$  и длительности  $t_u$  импульсов тока носит пороговый характер [3]. Порог по  $J_0$  лежит на уровне  $250-400 \text{ А/мм}^2$  для различных металлов, а по  $t_u$  на уровне  $50-100 \text{ мкс}$ . Эффект увеличивается с ростом  $J_0$  и  $t_u$ , а также с ростом частоты тока [4]. Действие тока на дислокацию, участвующие в пластической деформации, не эквивалентно только приложению к ним механического напряжения. Как следует из формулы Пича-Келера, сила, действующая на дислокацию со стороны внешнего напряжения, изменяет своё направление на противоположное при изменении знака дислокации. Протекание тока  $J_0$  приводит к тому, что дислокации, перемещающиеся под острым углом по отношению к направлению тока (условно, "положительные" дислокации), ускоряют своё движение под влиянием силы увлечения, которая в расчёте на единицу длины дислокации записывается в виде

$$F = J_0 B / ne, \quad (1)$$

где  $B$ -коэффициент электрон-дислокационного взаимодействия,  $n$ -концентрация электронов проводимости,  $e$ -заряд электрона.

Дислокации "отрицательного" знака движутся под тупым углом к направлению тока, тормозятся той же силой. Нужно отметить, что это обстоятельство не обязательно должно приводить к полярному характеру ЭПЭ, поскольку данный эффект является откликом всего дислокационного ансамбля на действие тока. Зависимость вклада в ЭПЭ от направления тока

обусловлена различием между плотностями дислокаций разного знака. Воспользовавшись кинетическим уравнением для скорости термически активированной деформации, в которую учтено действие на дислокации силы увлечения (1), можно показать, что в режиме ползучести скачок деформации определяется выражением

$$\Delta\varepsilon = f \cdot t_u \left[ \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} \cdot \frac{\sigma_l}{K} + \frac{V^* \sigma_l^2}{2KkT} \right], \quad (2)$$

где  $N_+$  и  $N_-$  – плотности дислокаций положительного и отрицательно знаков;  $K$  – коэффициент линейного упрочнения;  $\sigma_l = J_0 B / neb$ ;  $b$  – вектор Бюргерса.

Здесь учтено, что  $\sigma_l V^* \ll kT$ . Число  $N_+$  и  $N_-$  практически одинаковы. Поэтому согласно (2) термофлуктуационный вклад в ЭПЭ будет не полярным, а различие между оценкой  $\Delta\varepsilon$  и ее экспериментальным значением составит четыре порядка.

Такое большое расхождение оценок с экспериментальными данными свидетельствует о более значительном безактивационном вкладе тока в ЭПЭ. Физическая природа этого вклада состоит в том, что под влиянием импульсов тока наиболее неравновесные группы дислокаций положительного знака открепляются от своих препятствий безактивационным путём, чему также способствует инерционный эффект Гранато. При этом резко возрастают силы, действующие на дислокации в направлении тока. Группы же дислокаций отрицательного знака открепляются от стопоров только термофлуктуационным путём. К тому же это открепление затрудняется встречным током. Происходящее во время деформации упрочнение материала препятствует появлению новых неравновесных групп дислокаций. Поэтому время формирования  $t_\phi$  таких групп после микропластической деформации, вызванной очередным импульсом тока, с ростом общей деформации должно возрастать. Качественно это можно учесть, полагая  $t_\phi = \bar{l} / \bar{\mathcal{G}}$ , где  $\bar{\mathcal{G}}$  – средняя скорость термофлуктуационного движения дислокаций в отсутствии импульсов тока, а  $\bar{l}$  – среднее перемещение дислокаций, открепившихся от стопоров. Так как скорость пластической деформации  $\dot{\varepsilon}$  связана с  $\bar{\mathcal{G}}$  соотношением  $\dot{\varepsilon} = bN\bar{\mathcal{G}}$ , то  $t_\phi = \varepsilon_0 / \dot{\varepsilon}$ , где  $\varepsilon_0 = b\bar{l}N$ , а  $N$  – общая плотность дислокаций обоих знаков. Воспользовавшись уравнением термоактивируемой пластической деформации с помощью которого, в частности, получена формула (2):

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon_0 \omega \operatorname{sh} \frac{(\sigma^* - K\varepsilon) \mathcal{G}^*}{kT}, \quad (3)$$

Здесь  $\omega = \nu \exp(-U/kT)$  – средняя частота преодоления дислокациями потенциальных барьеров с энергией активации  $U$ ,  $\nu$  – частота попыток преодоления барьеров;  $\sigma^*$  – эффективные напряжения, отвечающие началу процесса пластической деформации.

Решая уравнение (3) для случая ползучести ( $\sigma^* = \text{const}$ ), найдём зависимость от времени пластической деформации. Вычисляя затем скорость ее изменения, получается в итоге время формирования неравновесных дислокационных скоплений:

$$t_\phi = \frac{\varepsilon_0}{\dot{\varepsilon}(t)} \quad (4)$$

Наибольшее действие импульсный ток оказывает в тех случаях, когда к приходу каждого из последующих импульсов успевают появиться неравновесные группы дислокаций, т.е. при  $f t_\phi(t) \ll 1$ . Данному условию удовлетворяют только  $n$  первых импульсов тока, число которых согласно приведённому неравенству определяется с помощью уравнения  $f t_\phi(t_0 + n/f) = 1$ , где  $t_0$  – момент включения тока. Если принять, что каждый из  $n$  импульсов вызывает элементарную пластическую деформацию  $\delta\varepsilon$ , то безактивационный вклад тока в пластическую деформацию будет

$$\Delta\varepsilon = n\delta\varepsilon = \frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon_0} \left\{ \frac{kT}{KV^*} \left[ \Phi\left(\frac{f}{\omega}\right) + \frac{f}{\omega} \ln th \frac{\sigma^* V^*}{2kT} \right] - ft_0 \right\}. \quad (5)$$

Нужно отметить, что полученная формула применима лишь при частотах  $f \leq f_0 = t_\phi^{-1}(t_0)$ . В противоположном случае, когда  $f > f_0$ , дислокационный ансамбль будет реагировать не на каждый очередной импульс тока, «пропуская» с увеличением  $f$  всё большее число импульсов.

### Выводы

Учитывая это, а также наличие в (5) максимума при  $f \sim \omega$ , следует сделать вывод о наличии не монотонного изменения  $\Delta\varepsilon$  с возрастанием частоты импульсного тока. Элементарная пластическая деформация  $\delta\varepsilon$ , как и  $\Delta\varepsilon$ , зависит, согласно (5), от амплитуды импульсов  $J_0$  и их длительности  $t_{и}$ . Отметим также, что множитель  $kT/KV^*$  в (6) в отличие от случая логарифмического закона ползучести обусловлен не непосредственно термофлуктуационной пластической деформацией, а тем, что число актов безактивационной деформации определяется временем  $t_\phi$ , характеризующим термофлуктуационную перестройку дислокационного ансамбля в процессе ползучести.

### Литература

1. Герцикен, Д.С. *Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий*. /Д.С. Герцикен, В.Ф. Мазанко, В.М. Тышкевич, В.М. Фальченко - Киев: РИО ИМФ НАН Украины, 1999. - 436 с.
2. Роцупкин, А.М. /А.М. Роцупкин, О.А. Троцкий, В.И. Спицин // ДАН СССР.- 1986.- Т.286, № 3. - С. 633 - 636.
3. Зуев, Л.Б. /Л.Б. Зуев, В.Е. Громов, В.Ф. Курилов, Л.И. Гуревич // ДАН СССР.- 1978.- Т.239, №1.- С. 84 - 86.
4. Троцкий, О.А. /О.А. Троцкий, В.И. Спицин, В.И. Стащенко // ДАН СССР.- 1981.- Т.256, №5.- С. 1134 - 1137.