

УДК 539.374

О ЗАКОНЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ ДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

БЕКЛЕМИШЕВ Н. Н., ВЕДЕНИЯПИН Е. Н., ШАПИРО Г. С.

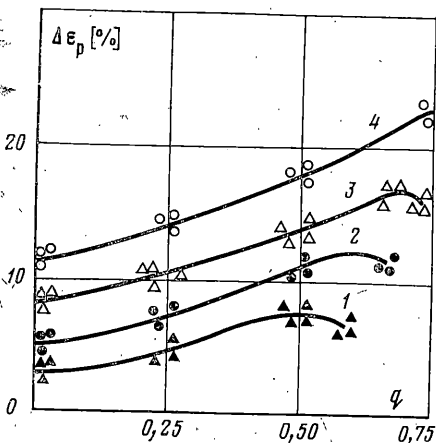
Предлагается уравнение деформирования упругопластического материала, учитывающее зависимость предельной пластической деформации от величины удельной энергии импульсного тока, истории его изменения, а также величины пластической деформации, накопленной к моменту действия импульса.

Анализ этого уравнения проведен для условий нагружения с постоянной скоростью деформации, а также ползучести и релаксации при одновременном действии импульсного тока. Теоретические результаты сравниваются с данными экспериментов.

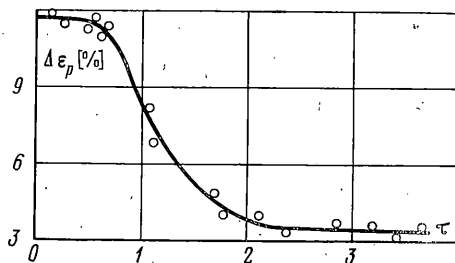
Исследование влияния высокоэнергетических импульсов тока на процесс пластической деформации проводящих материалов начато сравнительно недавно [1]. Установлено, что действие импульсов тока с достаточно высокой удельной энергией ( $10^8$  Дж/м<sup>3</sup>) приводит к существенному изменению пластических свойств проводящих материалов. Так, под импульсным действием тока при параметрах импульса ( $10^8$ – $10^9$ ) А/м<sup>2</sup> с длительностью единичного импульса  $\tau \sim 10^{-4}$  с, скважностью  $Q \sim 10^{-4}$  с и длительностью воздействия  $T \sim 180$  с в условиях одноосного напряженного состояния падение напряжений в образцах для режима релаксации доходит до 35%, а возрастает скорость ползучести до пяти раз. Исследования проводились на монокристаллах Zn, Pb, а также поликристаллических материалах: сплавах М1, Х18Н9Т [2, 3].

В [4, 5] показано, что использование импульсного тока с параметрами  $I \sim 10^9$  А/м<sup>2</sup> и  $T \sim 10$  с может повышать в несколько раз пластические свойства труднодеформируемых материалов, таких, как молибден, рений, и сплавов на их основе.

Подробное изучение влияния импульсного тока на процесс пластической деформации проводилось в [6, 7]. Установлено, что определяющими параметрами являются удельная энергия импульсов и история их изменения, а также величина накоплен-



Фиг. 1



Фиг. 2

ной пластической деформации к моменту начала действия тока. Оказалось, что при удельной энергии импульса  $\mu \sim 10^9$  Дж/м<sup>3</sup> предельная пластическая деформация может увеличиться примерно в десять раз при сравнительно неизменных прочностных характеристиках. Исследованный диапазон параметров составил  $10^8 \leq I \leq$

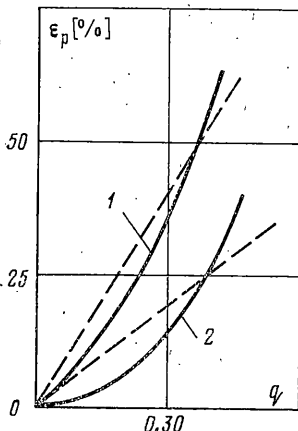
$\leq 10^{11}$  А/м<sup>2</sup> и  $10^{-4} \leq T \leq 10^{-1}$  с. Эксперименты проводились на широком классе материалов: алюминиевых и титановых сплавах, слоистых материалах системы См. 3+X18Н9Т, волокнистых композитах системы Br+Nb и порошковых материалах типа МЧ-1.

Обнаруженные эффекты не могут быть объяснены традиционным интегральным разогревом материала за счет выделения джоулева тепла. Цель публикуемой работы — сформулировать и исследовать феноменологическое определяющее уравнение упругопластической проводящей среды, деформируемой в импульсном электромагнитном поле.

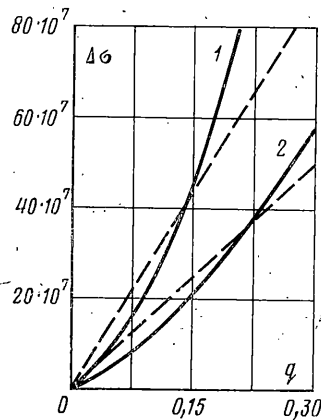
Экспериментальные исследования проводились на медном сплаве М1 при раздельном и одновременном действии импульса тока и механической нагрузки. Для проведения экспериментов использовалась специальная установка, снабженная следящей системой, позволяющей реализовать заданный закон нагружения или деформирования в условиях одноосного напряженного состояния [8]. Установка снабжена источником импульсного тока, позволяющим формировать импульсы с заданной мощностью и историей их изменения. Амплитудные значения плотности импульса тока изменялись в пределах  $10^5 \leq I \leq 10^{10}$  А/м<sup>2</sup>, длительность —  $10^{-4} \leq T \leq 10^{-1}$  с.

На фиг. 1 представлены результаты экспериментальных исследований при раздельном действии механической нагрузки и импульса тока. В процессе проведения экспериментов изменялась величина предварительной пластической деформации  $\epsilon_p = 1, 2, 4, 5\%$  (кривые 1–4) и величина удельной энергии импульса тока.  $0 \leq \mu \leq \leq 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>. Результаты экспериментов представлены в виде зависимости увеличения предельной пластической деформации  $\Delta \epsilon_p$  при последующем нагружении от безразмерного параметра  $q$ , характеризующего удельную энергию импульса ( $q = \mu / \mu_0$ , где  $\mu_0$  — удельная энергия импульса, соответствующая максимальному влиянию импульсного тока на предельную пластическую деформацию; величина импульса  $\mu_0$  во всех экспериментах оставалась неизменной).

Результаты исследования влияния истории изменения удельной энергии импульса на величину  $\Delta \epsilon_p$  представлены на фиг. 2. Результаты экспериментов, представ-



Фиг. 3



Фиг. 4

ленные на фиг. 1 и 2, показывают, что максимальное увеличение параметра  $\Delta \epsilon_p$  определяется величиной предварительной пластической деформации и в интервале времени  $0 \leq T \leq 5 \cdot 10^{-1}$  с для исследуемых материалов история изменения импульса не существенна.

Исследование процесса пластической деформации при одновременном действии импульса тока проводилось в режимах ползучести и релаксации (фиг. 3, 4). Кривые 1 и 2 соответствуют разным величинам предварительной пластической деформации.

На фиг. 5 представлена диаграмма деформирования сплава М1 при одновременном действии импульса тока. Точками А, В, С обозначены различные предварительные величины пластической деформации. Кривая 1 соответствует растяжению с постоянной скоростью деформации при  $q=0$ ; кривые 2, 3, 2', 3', 2'', 3'' получены при значениях  $q=0,50$  и  $0,75$ ; кривые 4, 5, 4', 5', 4'', 5'' — при  $q=0$ . На фиг. 5 представлены также результаты при повторном нагружении при  $q=0$ , определяющие упругие участки диаграмм 4, 5, 4', 5', 6', 4'', 5''. Эти результаты показывают, что влияние импульса существенно сказывается на диаграмме деформирования.

Результаты экспериментов позволяют выделить параметры, влияющие на процесс пластической деформации при одновременном действии импульса тока. Это — величина предварительной пластической деформации, величина удельной энергии импульса и история ее изменения.

Предлагаемая далее модель описания поведения проводящего материала при действии импульса тока основывается на гипотезе о локально-неоднородных распределениях импульса тока, теплового поля и поля механических напряжений (термической природы и от действия пинч-дефекта) на дефектах кристаллической структуры (микропорах и микротрещинах). Наличие таких неоднородных распределений может способствовать локальным процессам, определяющим зарождение и развитие дефектов кристаллической структуры, и тем самым увеличивать способность материала к пластической деформации.

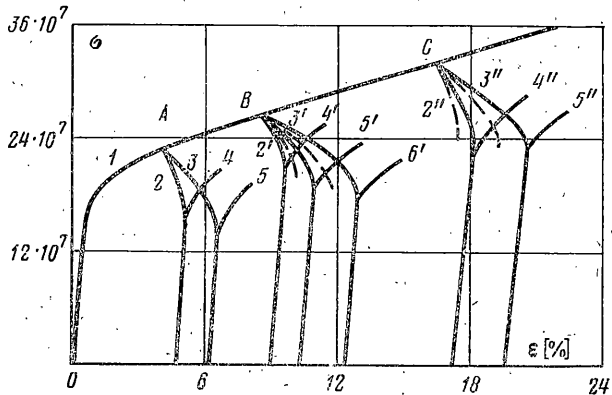
Для формулировки феноменологического закона деформирования введем безразмерные величины: напряжение  $\sigma = S/E$ , время  $t = T/\tau_0$ , энергию импульса тока  $q = \mu/\mu_0$ , где  $E$  — модуль упругости,  $\tau_0 = \rho c_0 a^2 / \chi$  — характерный масштаб времени, определяющий нестационарность локального температурного поля,  $\mu_0 = I_0^2 t / \gamma_0$  — характерный масштаб удельной энергии импульса тока,  $I_0$  — эффективное значение импульса тока,  $\gamma_0$  — проводимость материала,  $\rho$ ,  $c_0$ ,  $\chi$  — физические константы (плотность, теплоемкость и теплопроводность),  $a$  — характерный линейный размер области локальной неоднородности физических полей.

Пусть  $\varepsilon$  — полная деформация, тогда пластическая ее часть определяется как  $\varepsilon_p = \varepsilon - \sigma$ , а уравнение кривой деформирования можно записать в виде  $F(\varepsilon) = \sigma$ , где  $f(\varepsilon_p)$  — функция, определенная только для положительных значений аргумента и  $f(0) = \sigma_0$  ( $\sigma_0$  — предел текучести в исходном состоянии).

Примем далее гипотезу о независимости процесса упрочнения материала за счет пластической деформации и его разрушения при действии импульса тока. Учитывая также экспериментальные факты, запишем определяющее уравнение в виде

$$f(\varepsilon_p) = \sigma + \int_0^t q^*(t') K(t-t') dt', \quad 0 < q \leq 1 \quad (1)$$

Второе слагаемое в уравнении (1) в правой части определяет упрочнение материала под действием импульса тока, не связанное с интегральным разогревом образца. Функция  $K(t-t')$  имеет свойства  $K(t-t') = 1$ ,  $0 < t \leq 1$ ,  $K(t-t') \rightarrow 0$ ,  $t \rightarrow \infty$ . Таким образом, уравнение (1) достаточно полно отражает обнаруженные экспериментальные факты: влияние предварительной степени деформации, величины удельной энергии тока и длительности его воздействия. При дальнейшем анализе примем, что



Фиг. 5

$K=1$ . При этом  $q^*(t')$  — мощность импульса, а ядро интеграла  $K(t-t')$  учитывает полноту использования удельной энергии импульса тока на разрушение.

Заметим, что в первом приближении для функции  $f(\varepsilon_p)$  можно принять кусочно-линейную аппроксимацию  $f(\varepsilon_p) = \sigma_0 + m\varepsilon_p$ , где  $m$  — модуль упрочнения. Для получения качественных результатов будем использовать эту аппроксимацию. Примем за меру упрочнения работу пластической деформации

$$W_p = \int_0^{\varepsilon_p} \sigma d\varepsilon_p \quad (2)$$

В этом случае уравнение (1) может быть записано:

$$\sigma = \sigma_0 \sqrt{1 + 2mW_p / \sigma_0^2}, \quad q=0 \quad (3)$$

При действии импульса  $q > 0$  получим вместо (3):

$$\sigma = \sigma_0 \sqrt{1 + 2m \Psi(t) / \sigma_0^2}, \quad q > 0 \quad (4)$$

$$\Psi(t) = \int_0^t [W_p^*(t') - q^*(t')] dt', \quad \Psi(t) \geq 0$$

Рассмотрим простейшие примеры приложения уравнения (1) к описанию режимов ползучести, релаксации и активного деформирования. В случае ползучести уравнение (4) принимает вид

$$\sigma = \sigma_0 \sqrt{1 + (2m / \sigma_0^2) (W_p^0 - q)}, \quad q > 0 \quad (5)$$

где  $W_p$  — работа пластической деформации, определяющая упрочнение материала к моменту начала действия импульса. Очевидно, что режим ползучести будет выполняться, если  $W_p^0 - q = \text{const}$ , откуда нетрудно получить для деформации ползучести

$$\Delta \varepsilon_p = q / \sigma, \quad q > 0 \quad (6)$$

Аналогично для режима релаксации  $\varepsilon_p = 0$  с учетом условия  $W_p = 0$  получим

$$\Delta \sigma = m q / \sigma_0, \quad q > 0 \quad (7)$$

где  $\Delta \sigma$  — падение напряжения в образце под действием импульса тока в Па. Из (6), (7) следует, что влияние предварительной пластической деформации сказывается существеннее при релаксации, чем в режиме ползучести. Этот вывод хорошо согласуется с данными экспериментов.

При процессе активной деформации с постоянной скоростью  $\varepsilon_p^* \approx \varepsilon_0$  уравнение (4) принимает вид

$$\sigma(t) = \sigma_0 \left\{ 1 + \frac{2m}{\sigma_0^2} \left[ \int_0^t (\sigma \varepsilon_0 - q^*) dt' \right] \right\}^{1/2}, \quad q > 0 \quad (8)$$

и  $R \geq 0$  ( $R$  — подынтегральное выражение).

Примем следующее предположение. Пусть упрочнение материала мало, а удельная энергия импульса полностью используется для реализации физических процессов увеличения пластичности, несвязанных с интегральным разогревом образца. Работу пластической деформации в этом случае можно определить как  $W_p = \sigma_0 \varepsilon_p$ .

Разлагая (8) в ряд и ограничиваясь членами второго порядка, получим

$$\sigma(t) = \sigma_0 \left[ 1 + (2m / \sigma_0^2) (\sigma_0 \varepsilon_0 - q^*) t - 1/4 (\sigma_0 \varepsilon_0 - q^*)^2 t^2 \right] \quad (9)$$

На основании выражений (6), (7) и (9) проведены расчеты для соответствующих режимов. При этом принималось, что безразмерный модуль упрочнения материала  $m = 0,01$ , а масштабы для напряжения, мощности импульса тока и времени были выбраны соответственно равными  $E = 11,8 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\tau_0 = 0,1$  с,  $q^* = 10^8$  Вт/м<sup>3</sup>. На графиках фиг. 3–5 нанесены пунктиром результаты, полученные при помощи предложенного закона деформирования. Сравнение результатов теории и эксперимента показывает их достаточно хорошее качественное совпадение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Спицын В. И., Троцкий О. А., Гусев Е. В., Курдюков В. К. Электропластическая деформация нержавеющей стали. — Изв. АН СССР. Металлы, 1974, № 2, с. 123–128.
2. Троцкий О. А., Сташенко В. И. Исследование электропластической деформации металла методом релаксации напряжений. — Физ. металлов и металловед., 1979, т. 47, вып. 1, с. 180–187.
3. Троцкий О. А., Сташенко В. И., Спицын В. И. Влияние частоты импульсного тока и внешнего механического напряжения на скорость ползучести кристаллов. — Физ. металлов и металловед., 1982, т. 53, вып. 1, с. 180–184.
4. Климов К. М., Шнырев Г. Д., Новиков И. И. Изменение пластичности вольфрама под влиянием электрического тока. — Металловед. и термич. обработка металлов, 1977, № 1, с. 56–57.
5. Климов К. М., Новиков И. И. О новых возможностях пластического деформирования металлов. — Пластическая деформация легких и специальных сплавов: Сб. статей. М.: Металлургия, 1978, № 1, с. 284–292.

6. Беклемишев Н. Н., Горский А. Е., Журкин Б. Н., Порохов В. А., Шапиро Г. С. Механическое поведение металлов и сплавов под действием импульса тока в условиях, близких к ползучести.— В кн.: Применение физических полей для обработки металлов. М., ЦНИИТЭИприборостроения, 1981, с. 25–31. (Приборы, средства автоматизации и системы управления: ЭИ.ТС-1. Обмен передовым опытом в приборостроении. Вып. 4.)
7. Беклемишев Н. Н., Горский А. Е., Журкин Б. Н., Порохов В. А. Обработка материалов в электромагнитных полях. М., ЦНИИТЭИприборостроения, 1981. 55 с. (Приборы, средства автоматизации и системы управления: ОИ.ТС-9. Экономика и технология приборостроения. Вып. 1.)
8. Горский А. Е., Журкин Б. Н., Мешков С. И., Попов О. В., Порохов В. А. Установка для исследования кратковременной ползучести материалов в процессе воздействия на них импульсного электромагнитного поля.— В кн.: Применение физических полей для обработки металлов. М., ЦНИИТЭИприборостроения, 1981, с. 34–38. (Приборы, средства автоматизации и системы управления: ЭИ.ТС-1. Обмен передовым опытом в приборостроении. Вып. 4.)

Москва

Поступила в редакцию  
19.VIII.1982