

## **Анализ процесса релаксации растягивающих напряжений под действием импульса электрического тока**

**Г. В. Степанов, А. И. Бабуцкий, И. А. Мамеев, А. Н. Олисов**

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Приведена методика и представлены результаты экспериментальной оценки влияния импульсного электрического тока высокой плотности на уровень активного сопротивления и релаксацию упругих растягивающих напряжений для ряда металлических материалов. На основании анализа экспериментальных данных показано, что уровень растягивающих напряжений, плотность электрического тока и температура влияют на скорость пластической деформации.*

**Ключевые слова:** импульсный ток, релаксация, растягивающие напряжения, удельное электрическое сопротивление, плотность тока.

**Введение.** Пропускание импульсного электрического тока (ИЭТ) высокой плотности через металлический материал сопровождается рядом хорошо изученных явлений: повышение температуры, действие пондеромоторных сил (пинч-эффект), концентрация тока у поверхности материала (скин-эффект) и др. [1–3]. Однако такие явления, как релаксация упругих напряжений, влияние условий нагружения (уровня приложенных напряжений и температуры) и параметров ИЭТ на ее кинетику, несмотря на значительный объем проведенных к настоящему времени исследований [2–4], изучены недостаточно. Экспериментальные исследования, посвященные этой проблеме, выполнены для ограниченного числа материалов, условий нагружения, параметров электрического тока. Таким образом, информации для разработки эффективных технологических процессов обработки металлических материалов с использованием ИЭТ [3] все еще недостаточно.

В данном сообщении приведена методика и представлены результаты экспериментальной оценки влияния ИЭТ высокой плотности на удельное электрическое сопротивление и релаксацию упругих растягивающих напряжений. Испытания образцов в виде длинной узкой металлической полосы под действием растягивающей нагрузки обеспечили получение результатов, анализ которых позволяет оценить эффект, вызываемый непосредственным (нетермическим) действием электрического тока, и уточнить влияние уровня упругого растягивающего напряжения и плотности электрического тока на скорость пластической деформации.

Кроме того, в работе приведены результаты экспериментальной оценки нелинейного влияния плотности импульсного электрического тока на активное (омическое) сопротивление для ряда металлических материалов.

**Схема нагружения образцов.** Влияние ИЭТ на релаксацию растягивающих напряжений изучали на образцах малоуглеродистой стали Ст. 3, меди, молибдена и тантала в виде полос с поперечным сечением 2×6 мм (или 1×6 мм) длиной до 350 мм. Механическое нагружение образцов осуществлялось на испытательной машине ИР-50, в которой перемещение активного

захвата с помощью винтового привода позволяет после остановки последнего сохранять постоянной общую (суммарную) деформацию элементов цепи нагружения при изменении нагрузки в результате действия ИЭТ и (или) нагрева образца.

Растягивающее напряжение в образце рассчитывали по диаграмме усилие–время, регистрируемой посредством датчиков испытательной машины на двухкоординатном самописце. Упругое начальное напряжение  $\sigma$  в образце непосредственно перед пропуском ИЭТ варьировали в диапазоне  $\sigma = (0,5 \dots 1,0)\sigma_y$  ( $\sigma_y$  – предел текучести металла, определяемый по нагрузке, при которой начинается пластическая деформация при растяжении образца).

Для оценки влияния начальной температуры часть образца нагревали перед пропуском ИЭТ и регистрировали температуру в центре нагретого участка с помощью хромель-алюмелевой термопары.

Схема генератора ИЭТ, использовавшегося при выполнении исследований, детально описана ранее [5]. Цепь разряда включает батарею конденсаторов (напряжение заряда до 5 кВ) общей емкостью 600 мкФ, ключ замыкания и образец исследуемого металла.

Амплитуду и период колебаний тока при разряде определяли по диаграмме сила тока–время  $I(t)$ , которую строили на основании сигнала с пояса Роговского  $U_R(t)$ , регистрируемого высокоскоростной аналого-цифровой платой персонального компьютера,  $I(t) = kU_R(t)$ . Калибровочный коэффициент  $k$  определяли экспериментально по максимальной величине сигнала  $U_R^{\max}$ , поступающего с пояса Роговского при разряде батареи конденсаторов через проводник с заданным сопротивлением  $R^*$ , достаточно большим для получения аperiодического разряда,  $k = U_0 / (U_R^{\max} R^*)$ .

Расчетное повышение температуры (джоулев разогрев) в результате действия ИЭТ оценивали, используя интегральное соотношение:

$$\delta T = \frac{\rho}{C_V} \int_0^t i(t)^2 dt. \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  и  $C_V$  – удельное сопротивление и объемная теплоемкость, средние для расчетного диапазона температур;  $i(t)$  – изменение плотности тока во времени,  $i(t) = I(t)/S$ , где  $S$  – площадь сечения образца.

Указанное повышение температуры, величина которой максимальна непосредственно после действия ИЭТ, вызывает снижение уровня начальных растягивающих напряжений в образце на  $\delta\sigma_T$ ,  $\delta\sigma_T = \varepsilon_T E(L_T/L_0) = (\alpha/\eta)\delta TE(L_T/L_0)$ , где  $\varepsilon_T$  – деформация, вызванная повышением температуры;  $L_T$  – длина нагреваемой части образца;  $L_0$  – общая длина образца;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий влияние жесткости цепи нагружения испытательной машины. Отметим, что сохранение растягивающих напряжений в образце после нагрева обеспечивается только при уровне в нем начальных напряжений (нагрузки), превышающих  $\delta\sigma_T$ .

**Оценка влияния жесткости цепи нагружения испытательной машины.** Для получения достоверных данных о релаксации упругих напряжений следует учитывать влияние жесткости (или податливости) машины. Это обусловлено влиянием упругой деформации всех элементов цепи нагружения на деформацию и напряжение в образце [6–8].

Процедура экспериментальной оценки жесткости машины основана на том, что в результате нагрева образца или релаксации напряжений в нем изменяются нагрузка и упругая деформация всех элементов цепи нагружения, включая образец.

Такая оценка состоит из следующих этапов:

а) нагружение образца до заданного уровня растягивающих напряжений и отключение привода машины;

б) нагрев образца до заданной температуры пропусканием постоянного электрического тока 200 А с последующим отключением образца от цепи нагрева с регистрацией минимального уровня растягивающих напряжений и соответствующих этому уровню температур.

Влияние жесткости машины  $C_1$  (рис. 1) на изменение упругой деформации  $\varepsilon_2$  в образце общей длиной  $L_0$  и площадью поперечного сечения  $S$  при повышении температуры нагреваемого участка длиной  $L_T = \varphi L_0$  ( $\varphi < 1$ ) на  $\delta T$  оценивали на основании решения системы трех уравнений, определяющих равенство усилий в цепи нагружения машины и в образце до нагрева; равенство усилий в цепи нагружения машины и в образце после нагрева; сохранение суммарной деформации цепи нагружения с образцом  $\delta L$  до и после нагрева:

$$P^0 = C_1 \delta L_1^0 = SE \varepsilon_2^0; \quad P^1 = C_1 \delta L_1^1 = SE \varepsilon_2^1;$$

$$\delta L = \delta L_1^0 + L_2 \varepsilon_2^0 = \delta L_1^1 + L_2 (\varepsilon_2^1 + \varphi \alpha \delta T),$$

где верхние индексы 0 и 1 характеризуют параметры до и после нагрева образца соответственно.

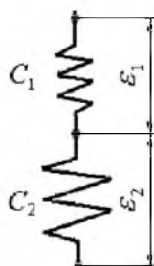


Рис. 1. Модель упругого деформирования элементов цепи нагружения испытательной машины (индексы 1) и образца (индексы 2).

Используя приведенные выше уравнения, а также учитывая податливость цепи нагружения и  $C_2 = ES/L_2$ , понижение напряжений  $\delta \sigma_T$ , вызванное повышением температуры участка образца на  $\delta T$ , можно определить зависимостью (пренебрегая влиянием температуры на  $E$  и  $\alpha$ ):

$$\delta\sigma_T = -\alpha\varphi E \frac{C_1}{C_1 + C_2} \delta T = -\alpha E \delta T / \eta; \quad \eta = \frac{C_1 + C_2}{C_1 \varphi}, \quad (2)$$

т.е. вследствие податливости машины понижение напряжения в результате нагрева участка образца в  $\eta$  раз меньше, чем при нагружении образца на абсолютно жесткой машине.

Относительная жесткость цепи нагружения машины  $C_r = C_1/C_2$  рассчитывается из экспериментально определенной величины повышения температуры  $\delta T$  на участке образца и соответствующего ему снижения напряжения  $\delta\sigma_T$ :

$$C_r = \left( 1 + \frac{\alpha\varphi E \delta T_m}{\delta\sigma_T} \right)^{-1}. \quad (3)$$

В экспериментах с образцами из малоуглеродистой стали ( $2 \times 6 \times 240$  мм,  $E = 200$  ГПа,  $\alpha = 1,25 \cdot 10^{-5}$ ) при длине нагреваемого участка 190 мм, нагружаемых растяжением до  $\sigma \approx 334$  МПа, повышение температуры на  $\delta T = 220^\circ\text{C}$  приводит к снижению напряжений на  $\delta\sigma_T = 122$  МПа, что соответствует расчетной относительной жесткости  $C_r = 0,973$  ( $\eta = 2,56$ ) согласно уравнению (3).

Пластическая деформация  $\delta\varepsilon_r$  в нагруженном растяжением образце, вызванная релаксацией упругих напряжений в результате действия ИЭТ, определяется по снижению растягивающих напряжений  $\delta\sigma_r$  с учетом податливости машины:

$$\delta\varepsilon_r = -\eta \delta\sigma_r / E. \quad (4)$$

**Оценка электрического сопротивления металлов при высокой плотности тока.** Для расчетной оценки повышения температуры в результате действия ИЭТ по уравнению (1) следует учитывать значения реального удельного сопротивления  $\rho$  металлического материала. Согласно существующим представлениям плотность тока не влияет на активное сопротивление металлов. Так, при плотности тока  $10^{13}$  А/м<sup>2</sup> можно ожидать отклонений от закона Ома, составляющих примерно 1% [1]. Однако, по-видимому, такое поведение является характерным для постоянного тока, так как ранее по результатам экспериментальных исследований взрывающихся проволок [9] была показана аномальная зависимость активного сопротивления от плотности импульсного тока: рост плотности тока приводит к существенному повышению сопротивления. Данное явление объясняется совместным действием ряда факторов: высокой температуры, скин-эффекта, пинч-эффекта и др.

Согласно данным [10] на электрическое сопротивление металлов влияет повышение температуры, а не плотность тока. Экспериментальная проверка влияния плотности тока на сопротивление металлов затруднена. В начальный период нарастания тока и в последующий период его поддержания на постоянном уровне устранить повышение температуры (например, путем охлаждения поверхности проводника) можно только в ограниченном диапа-

зоне значений плотности тока и размеров проводника. Известные из литературных источников экспериментальные исследования поведения металлов при действии тока высокой плотности выполнены в основном с использованием тонкой проволоки или фольги. Правомерность обобщения полученных результатов на проводники больших размеров требует дополнительной проверки.

В данной работе для экспериментальной оценки влияния плотности тока на электрическое сопротивление металла была использована методика, основанная на обработке регистрируемой диаграммы изменения во времени периодического затухающего тока в цепи разряда конденсаторной батареи через образец исследуемого металла.

Первичной информацией являются осциллограммы тока  $I(t)$ , полученные в серии экспериментов при варьировании разностью потенциалов  $U_0$  на выводах конденсаторной батареи емкостью 150 мкФ. По этим осциллограммам определяли зависимости  $I_{\max}$  и  $\lambda$  от  $U_0$  ( $I_{\max}$  и  $\lambda$  – максимальная амплитуда тока в первом колебании и его период).

Из условия наилучшего соответствия экспериментальных значений  $I_{\max}$  и  $\lambda$  их расчетным значениям для цепи разряда определяли активное сопротивление  $R_c$  и индуктивность цепи разряда  $L_c$ .

Расчетные диаграммы изменения тока  $I_c(t)$  и разности потенциалов на обкладках конденсатора  $U_c(t)$  при его разряде через образец определяли с использованием соотношений для цепи разряда с заданными параметрами. Изменение напряжения и тока с циклической частотой  $\omega$ , амплитудой тока  $A_0$  и сдвигом фаз  $\alpha_0$  определяется по соотношениям:

$$U_c(t) = \frac{A_0}{C} \exp\left(-\frac{R_c}{2L_c} t\right) \sin(\omega t + \alpha_0); \quad (5)$$

$$I_c(t) = A_0 \exp\left(-\frac{R_c}{2L_c} t\right) \left[ \frac{R_c}{2L_c} \sin(\omega t + \alpha_0) - \omega \cos(\omega t + \alpha_0) \right], \quad (6)$$

где

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_c C} - \frac{R_c^2}{4L_c^2}}; \quad A_0 = \frac{U_0 C}{\sqrt{1 - \frac{R_c^2 C}{4L_c}}}; \quad \alpha_0 = \arctg\left(2\omega \frac{L_c}{R_c}\right).$$

Корректность расчетов подтверждается выполнением закона сохранения энергии при разряде, т.е. равенство начальной энергии в батарее конденсаторов энергии в цепи разряда (текущих значений энергии в батарее конденсаторов, энергии электромагнитного поля и тепловой энергии):

$$CU_0^2/2 = CU(t)^2/2 + I(t)^2 L_c/2 + \int_0^t RI(t)^2 dt.$$

При разряде конденсаторной батареи через образец исследуемого металла активное сопротивление цепи разряда включает сопротивление образца  $R$  и сопротивление других ее элементов  $R_0$  (подводящие провода, области контакта и ключ замыкания). Значения  $R$  и  $R_0$  не являются постоянными, они изменяются в зависимости от величины тока, температуры и других эффектов, сопровождающих разряд. Поэтому для расчета удельного сопротивления исследуемого металла определяли активное сопротивление  $R$  участка образца длиной  $l^*$  как разность активных сопротивлений цепи разряда  $R_1$  и  $R_2$  ( $R = R_1 - R_2$ ) с образцами длиной  $l_1$  и  $l_2$  ( $l^* = l_1 - l_2$ ) при сохранении остальных параметров цепи разряда и тока неизменными.

Для определения  $R$  выполняли две серии экспериментов на образцах длиной  $l_1$  и  $l_2$  при варьировании величиной  $U_0$ . По результатам получали зависимости  $R_1(I, l_1)$  и  $R_2(I, l_2)$  и как их разность – зависимость  $R(I, l^*)$ . Удельное сопротивление металла образца с площадью поперечного сечения  $S$  рассчитывали из соотношения

$$\rho(i) = R(I)S/l.$$

Таким образом расчетное удельное сопротивление является его средним значением на участке роста плотности тока от начальной нулевой до максимальной величины и отражает непосредственное влияние плотности тока, повышения температуры и других эффектов, связанных с действием импульса тока.

Учитывая, что активное сопротивление образца исследуемого металла пропорционально его длине, сопротивление цепи без образца равно  $R_0(I) = R_1(I, l_1) - R_2(I, l_2)l_1/l_2$ . Для определения  $R_0(I)$  необходимо провести две серии испытаний с образцами разной длины.

Величина  $R_0(I)$  является характеристикой цепи разряда, так как не зависит от размеров и материала образца, поэтому, определив  $R_0(I)$ , для построения зависимости сопротивления образца от плотности тока достаточно провести серию экспериментов с образцами одинаковой длины.

Для экспериментального исследования влияния плотности тока на удельное сопротивление использовали образцы с малым поперечным сечением ( $1 \times 2$  мм или  $2 \times 2$  мм), что позволяет пренебречь влиянием скин-эффекта и пондеромоторных сил на удельное сопротивление. С целью уменьшения влияния теплового действия тока в экспериментах использовали разряд батареи пониженной емкости. По результатам обработки зарегистрированных зависимостей тока от времени индуктивность цепи разряда генератора ПЭТ составляет 1...2 мкГн. Импульс тока при разряде через образец является периодическим, затухающим через три-четыре колебания, с периодом первого колебания около 80 мкс.

Результаты обработки диаграмм изменения тока во времени  $R_1(I, l_1)$  и  $R_2(I, l_2)$ , полученных при разряде батареи конденсаторов ( $C = 150$  мкФ,  $U_0 = 1...5$  кВ) через образцы длиной  $l_1$  и  $l_2$ , приведены в таблице. Удельное сопротивление  $\rho$ , характеризующее его среднее значение за первую четверть колебаний тока, в таблице представлено в зависимости от максимальной



плотности тока  $\rho(i_{\max})$ . В качестве иллюстрации на рис. 2 приведена зависимость относительного сопротивления тантала  $\rho_r = \rho/\rho_0$  ( $\rho_0$  – удельное сопротивление при малой плотности тока) от максимальной плотности тока  $i_{\max}$ .

**Изменение значений удельного сопротивления металлов в зависимости от плотности тока**

Материал, размеры	Уравнение, аппроксимирующее $\rho(i)$	Значение $\rho$ , Ом·м [11]
Сталь Ст. 3, Ø2 мм, L = 145 мм	$\rho = 5,449 \cdot 10^{-28} i^2 + 1,356 \cdot 10^{-19} i + 8,978 \cdot 10^{-8}$	$9,48 \cdot 10^{-8}$ (300 К)
Ø2 мм, L = 305 мм	$\rho = 2,35 \cdot 10^{-7}$ ( $i_{\max} = 16 \cdot 10^9$ А/м <sup>2</sup> , $T_{\max} = 474$ К)	$1,47 \cdot 10^{-8}$ (387 К)
Медь, 2×2×145 мм	$\rho = 2,86 \cdot 10^{-18} i + 3,03 \cdot 10^{-8}$	$1,72 \cdot 10^{-8}$ (300 К)
2×2×305 мм	$\rho = 6,14 \cdot 10^{-8}$ ( $i_{\max} = 11 \cdot 10^9$ А/м <sup>2</sup> , $T_{\max} = 322$ К)	$1,79 \cdot 10^{-8}$ (311 К)
Молибден, 1×2×190 мм	$\rho = 9,50 \cdot 10^{-29} i^2 + 1,27 \cdot 10^{-18} i + 5,6 \cdot 10^{-8}$	$5,58 \cdot 10^{-8}$ (300 К)
	$\rho = 1,43 \cdot 10^{-7}$ ( $i_{\max} = 24 \cdot 10^9$ А/м <sup>2</sup> , $T_{\max} = 590$ К)	$9,34 \cdot 10^{-8}$ (445 К)
Тантал, 2×2,05×178 мм	$\rho = 8,07 \cdot 10^{-28} i^2 + 2,37 \cdot 10^{-18} i + 1,30 \cdot 10^{-7}$	$1,35 \cdot 10^{-7}$ (300 К)
2×2,05×365 мм	$\rho = 2,67 \cdot 10^{-7}$ ( $i_{\max} = 12 \cdot 10^9$ А/м <sup>2</sup> , $T_{\max} = 456$ К)	$1,73 \cdot 10^{-7}$ (378 К)

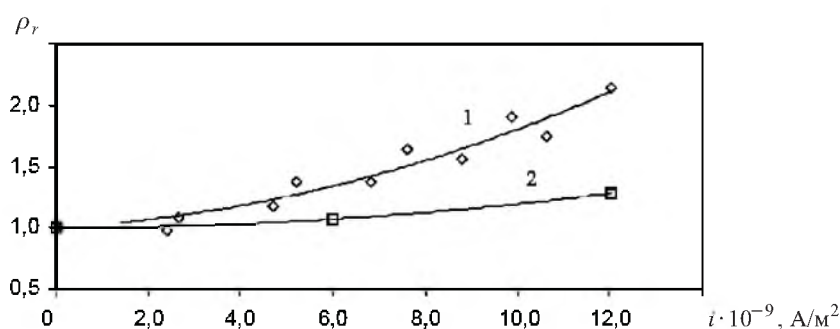


Рис. 2. Относительное изменение удельного сопротивления тантала с ростом амплитуды плотности тока при разряде конденсатора через образцы с поперечным сечением 2×2 мм, длиной 178 и 365 мм (1) и вследствие теплового действия тока (2).

Повышение температуры  $\Delta T$  в результате теплового действия тока за первую четверть его колебаний рассчитано по выражению (1) с использованием среднего значения удельного сопротивления  $\rho$  согласно зависимости  $\rho(i)$ , представленной в таблице. В качестве средней величины теплоемкости принято ее значение для температуры, превышающей начальную на  $\Delta T/2$  [11].

Результаты испытаний показали, что сопротивление тантала и молибдена при низкой плотности тока (менее  $2,5 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup>, при этом повышение температуры незначительно) близко к величине, приведенной в [11]. Однако в диапазоне высоких плотностей тока повышенное омическое сопротив-

ление этих металлов не может быть объяснено тепловым эффектом тока. Так, при плотности тока  $i_{\max} = 12 \cdot 10^{12} \text{ А/м}^2$  сопротивление тантала примерно в 1,5 раза выше, чем его сопротивление при той же температуре без учета влияния плотности тока. Аналогичное повышение сопротивления установлено для молибдена при плотности тока  $i_{\max} = 24 \cdot 10^{12} \text{ А/м}^2$ .

Удельное сопротивление малоуглеродистой стали при действии тока плотностью  $i_{\max} = 16 \cdot 10^{12} \text{ А/м}^2$  увеличивается приблизительно в 2,6 раза, что в 1,7 раза превышает его рост вследствие повышения температуры в результате теплового действия тока [11].

Испытания образцов меди показали, что при действии тока  $i_{\max} = 11 \cdot 10^{12} \text{ А/м}^2$  удельное сопротивление увеличивается в 3,4 раза (при повышении максимальной температуры на 22 К). По данным [11] для чистой меди такой прирост температуры вызывает повышение  $\rho$  всего на 4%. Отметим, что значения удельного сопротивления образцов меди при комнатной температуре отличаются от данных для чистой меди [11] в 1,75 раза. Это может быть вызвано различиями в чистоте, степени деформационного упрочнения и структуре.

Приведенные выше результаты анализа экспериментальных данных для исследованных металлов свидетельствуют, что рост удельного сопротивления с повышением плотности тока нельзя объяснить влиянием теплового эффекта электрического тока. По-видимому, на уровень сопротивления влияют дополнительные эффекты нетепловой природы (непосредственное влияние тока, изменение напряженного состояния и давления всестороннего сжатия под действием тока [5] и др.).

#### **Анализ релаксации напряжений, вызванной пропуском ИЭТ.**

Этапы нагружения при исследовании релаксации упругих напряжений:

- а) нагружение образца на машине до заданного уровня растягивающих напряжений, после чего ее привод отключается;
- б) нагрев участка образца до заданной температуры;
- в) разряд конденсаторной батареи ( $C = 600 \text{ мкФ}$ ,  $U_0 = 1...5 \text{ кВ}$ ) через нагретый участок образца и последующее охлаждение образца до начальной температуры.

В процессе испытания непрерывно регистрируются нагрузка на образец и температура его нагретого участка.

В результате обработки зарегистрированных диаграмм изменения тока во времени получили значение индуктивности цепи разряда, равное примерно 2 мкГн. Импульс тока при разряде через образец является периодическим, затухающим через три-четыре колебания, период первого колебания – около 225 мкс.

Основным параметром, характеризующим релаксацию напряжений в образце (пренебрегая эффектами ползучести, что справедливо для диапазона температур и напряжений, используемых при данных испытаниях), является величина  $\delta\sigma^{EC}$  – разность между начальным растягивающим напряжением после отключения привода испытательной машины и периода установления нагрузки и напряжением в образце после действия ИЭТ и остывания.



В качестве иллюстрации на рис. 3, 4 приведены зависимости снижения растягивающих напряжений в образце меди от нагрузки и плотности тока при трех- и десятикратном действии ИЭТ, вызванного разрядом батареи конденсаторов с начальной разностью потенциалов на ее выводах 3 и 4 кВ. Из экспериментов, выполненных при сохранении начальной деформации, следует:

уровень релаксации напряжений в результате действия ИЭТ повышается примерно пропорционально уровню растягивающих напряжений и квадрату плотности тока;

при повторном действии тока его эффект снижается (трех- и десятикратное действие тока практически оказывает одинаковое влияние на уровень релаксации напряжений).

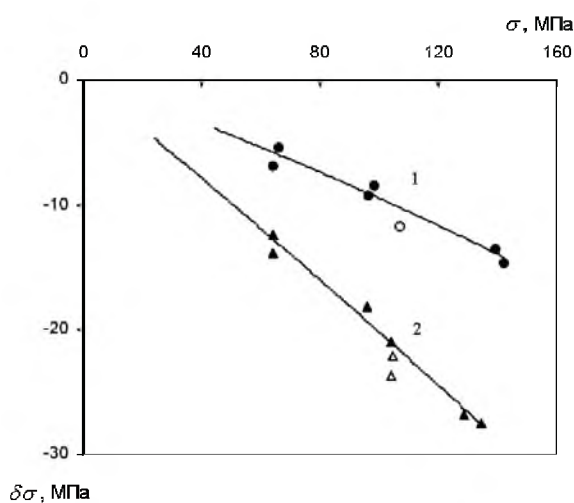


Рис. 3. Изменение растягивающего напряжения в образце меди, вызванное разрядом батареи конденсаторов  $C = 600$  мкФ,  $U_0 = 3$  (1) и 4 кВ (2). (Темные и светлые точки – соответственно трех- и десятикратное действие ИЭТ.)

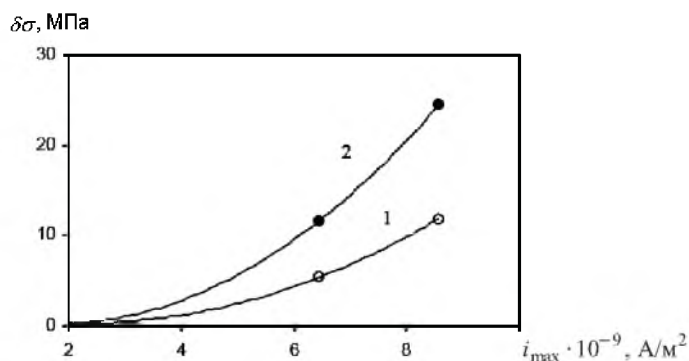


Рис. 4. Влияние плотности тока на изменение растягивающих напряжений в образце меди при их начальной величине 60 (1) и 120 МПа (2).

Анализ процесса релаксации упругих напряжений в металлическом образце обычно выполняется с использованием модели термоактивируемого движения дислокаций [2, 3, 12]. Согласно этой модели скорость пласти-

ческой деформации в зависимости от уровня механической нагрузки определяется изменением энергии термической активации движения дислокаций, а действие ИЭТ может быть учтено изменением (снижением) энергии активации или повышением эффективного напряжения  $\sigma^{EC}$ . С учетом вероятности обратного перехода при движении дислокаций под действием ИЭТ скорость пластической деформации определяется экспоненциальным выражением

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \left[ \exp\left(-\frac{Q_0 - \gamma\sigma_{eff}}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{Q_0 + \gamma\sigma_{eff}}{kT}\right) \right] \quad (7)$$

при  $\sigma_{eff} = \sigma - \sigma_s + \sigma^{EC} \geq 0$ ;

$$\dot{\varepsilon} = 0 \quad \text{при} \quad \sigma_{eff} = \sigma - \sigma_s + \sigma^{EC} < 0,$$

где  $\dot{\varepsilon}_0$  – предельная скорость контролируемой термоактивируемым движением дислокаций пластической деформации, которая соответствует нулевому уровню потенциальных барьеров на пути дислокаций;  $\gamma$  – параметр, учитывающий влияние напряжения на энергию активации.

Для расчетной оценки скорости деформации по уравнению (7) необходимо определить четыре параметра ( $\dot{\varepsilon}_0$ ,  $Q_0$ ,  $\gamma$ ,  $\sigma_s$ ), которые в общем случае зависят от приложенной нагрузки, температуры и плотности тока.

Без пропускания ИЭТ при постоянном растягивающем напряжении  $\sigma \leq \sigma_s$  скорость деформации образца равна нулю. Поэтому величину  $\sigma_s$  можно легко вычислить по статической нагрузке, получаемой нагружением до появления первых признаков пластической деформации с последующей выдержкой в течение достаточно большого промежутка времени (в данном случае 24 часа).

При начальном напряжении ниже  $\sigma_s$  возникновение пластической деформации, вызванной действием ИЭТ, может быть результатом как теплового, так и нетеплового действия тока на динамику дислокаций, что имеет место при условии  $\sigma^{EC} \geq \sigma_s - \sigma$ .

По результатам экспериментов и проведенных расчетов повышение температуры нагруженного растяжением образца под действием ИЭТ (без перемещения захватов испытательной машины) сопровождается снижением растягивающих напряжений вследствие теплового расширения образца без заметного эффекта релаксации (после охлаждения образца напряжение повышается до исходного уровня). Следовательно, возникновение пластической деформации полностью определяется специфическим действием импульса тока, которое не может быть вызвано однородным повышением температуры материала образца.

В соответствии с уравнением (7) снижение энергии активации в результате действия ИЭТ влияет на релаксацию напряжений только при положительной величине  $\sigma_{eff}$ , т.е., если  $\sigma^{EC} \geq \sigma_s - \sigma$ . Однако в экспериментах, выполненных при высокой плотности импульсного тока (выше  $1 \cdot 10^{12}$  А/м<sup>2</sup>), эффект влияния тока, связанный с релаксацией напряжений, установлен во всем диапазоне упругих растягивающих напряжений, в том числе и при их

низком начальном уровне. Это позволяет предположить, что  $\sigma^{EC} \geq \sigma_s$  при  $\sigma \approx 0$ .

Средняя скорость пластической деформации образца в период действия ИЭТ с характерной длительностью  $\tau$  определяется из экспериментально определенного снижения растягивающих напряжений  $\delta\sigma^{EC}$  по следующему уравнению, учитывающему влияние жесткости машины:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\delta\varepsilon^{EC}}{\tau} = \eta \frac{\delta\sigma^{EC}}{E\tau}.$$

При этом зависимость величины пластической деформации, вызванной действием ИЭТ, от уровня начального напряжения, температуры и плотности тока можно принять в виде

$$\delta\varepsilon = \dot{\varepsilon}\tau = (\beta_1 i + \beta_2 i^2) \sigma^n f(T). \quad (8)$$

Из зависимости  $\delta\sigma(i_{\max})$  для образца меди (рис. 4) следует, что снижение начального растягивающего напряжения примерно пропорционально квадрату плотности тока. Аналогичный эффект действия ИЭТ установлен для стали, меди, молибдена и тантала. Приведенный эффект действия тока наблюдается при его высокой плотности (выше  $1 \cdot 10^{12}$  А/м<sup>2</sup>), что согласуется с известными литературными данными [2, 3].

Предварительный нагрев образца повышает эффект влияния ИЭТ на процесс релаксации. По экспериментальным данным нагрев на 200 К повышает уровень пластической деформации, вызванной ИЭТ, примерно в два раза для всех испытанных металлов.

Анализ результатов экспериментов показал, что заданный уровень скорости пластической деформации при действии ИЭТ обеспечивается соответствующим выбором уровня растягивающих напряжений, температуры и плотности электрического тока.

**Заключение.** Действие ИЭТ на нагруженный растягивающей нагрузкой металлический образец при сохранении его общей деформации вызывает понижение напряжений в результате их релаксации, интенсивность которой возрастает пропорционально квадрату плотности тока в исследованном диапазоне упругих растягивающих напряжений.

На основании результатов экспериментальных исследований установлено, что уровень удельного сопротивления металла образца повышается с ростом плотности тока, что влияет на тепловое действие ИЭТ.

Влияние параметров упругопластического нагружения и импульса электрического тока (формы, длительности и т.д.) на релаксацию напряжений в металлических материалах может быть предметом дальнейших исследований.

## Резюме

Наведено методику і результати експериментальної оцінки впливу імпульсного електричного струму високої густини на релаксацію пружних напру-

жень розтягу в сталі та рівень активного онору ряду металічних матеріалів. Аналіз експериментальних даних показав, що рівень напружень розтягу, густина електричного струму та температура впливають на швидкість пластичної деформації.

1. *Парселл Э.* Электричество и магнетизм. Берклиевский курс физики. Т. 2. – М.: Наука, 1971. – 447 с.
2. *Спицин В. И., Троицкий О. А.* Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
3. *Баранов Ю. В., Троицкий О. А., Авраамов Ю. С., Шляпин А. Д.* Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.
4. *Sprecher A. F., Mannan S. L., and Conrad H.* On the mechanisms for the electroplastic effects in metals // *Acta Met.* – 1986. – **34**, No. 7. – P. 1145 – 1162.
5. *Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А.* Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности // *Пробл. прочности.* – 2004. – № 4. – С. 60 – 67.
6. *Новогрудский Л. С.* О влиянии податливости испытательной машины на сопротивление деформированию металлов при скачкообразном развитии их уругоэластической деформации // *Там же.* – 2000. – № 3. – С. 125 – 132.
7. *Фридман Я. Б., Зилова Т. К., Дроздовский Б. А.* Кинетика деформирования и разрушения. – М.: ВНИИАМ, 1960. – 103 с.
8. *Стрижало В. А., Воробьев Е. В.* Моделирование низкотемпературной прерывистой текучести методом импульсного нагружения // *Пробл. прочности.* – 1997. – № 3. – С. 83 – 89.
9. *Рейтель Р., Блекборн Дж.* Гидродинамическое объяснение аномального сопротивления взрывающихся проволок // *Электрический взрыв проводников.* – М.: Мир, 1965. – 360 с.
10. *Мартынюк М. М.* Фазовые переходы при импульсном нагреве. – М.: Изд-во Рос. ун-та дружбы народов, 1999. – 332 с.
11. *Material Property Database (MPDB), MPDB v. 5.15.* – Demo Version, JANM Software, Inc.
12. *Степанов Г. В.* Уруго-эластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.

Поступила 27. 12. 2004