

Влияние импульса электрического тока высокой плотности на релаксацию сдвиговых напряжений

Г. В. Степанов, А. И. Бабуцкий, В. П. Пахотных

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

Приведены методика и некоторые результаты экспериментального исследования релаксации напряжений сдвига, вызванной действием импульса электрического тока высокой плотности. Установлено существенное влияние нетеплового эффекта действия тока на кинетику деформации при сдвиге. Показано, что скорость деформации металла при сдвиге в период действия импульса электрического тока определяется коэффициентом вязкости аналогично неупругому деформированию с повышенной скоростью.

Ключевые слова: релаксация напряжений сдвига, кинетика деформирования, коэффициент вязкости, скорость деформации.

Введение. Использование обработки импульсным электрическим током (ИЭТ) представляется перспективным при различных видах обработки, связанных с пластификацией металлических материалов и улучшением их механических характеристик [1–7]. Несмотря на значительный объем исследований по оценке влияния тока на свойства металла и его структуру, влияние тока на релаксацию напряжений в зависимости от напряженного состояния изучено недостаточно для обеспечения широкого практического использования обработки в технологических целях. Исследования в основном сводятся к изучению влияния ИЭТ на релаксацию растягивающих напряжений [1–3, 6, 7]. Однако исследование релаксации указанных напряжений затруднено, поскольку при сохранении общей продольной деформации (жесткое нагружение) уровень напряжений в растягиваемом образце снижается в результате его термического удлинения из-за повышения температуры при тепловом действии электрического тока. В связи с этим представляют интерес испытания в условиях поперечного сдвига. Вследствие снижения влияния теплового действия ИЭТ на изменение нагрузки при испытаниях на поперечный сдвиг проведение таких испытаний расширяет возможности экспериментального исследования эффектов, вызванных нетепловым действием ИЭТ. Методика и некоторые результаты исследования релаксации напряжений сдвига при пропускании ИЭТ высокой плотности приведены ниже. Сопоставление результатов экспериментов с численным моделированием процесса деформирования полосы при поперечном сдвиге с учетом только теплового эффекта ИЭТ свидетельствует о существенном влиянии нетеплового действия тока.

Экспериментальная методика исследования релаксации напряжений сдвига. Образец в виде полосы (поперечное сечение $s \times b$) из малоуглеродистой стали Ст. 3 нагружали по схеме, приведенной на рис. 1. При этом упругая (или упругопластическая) деформация локализуется симметрично в областях зазоров шириной δ между матрицей и пуансоном.

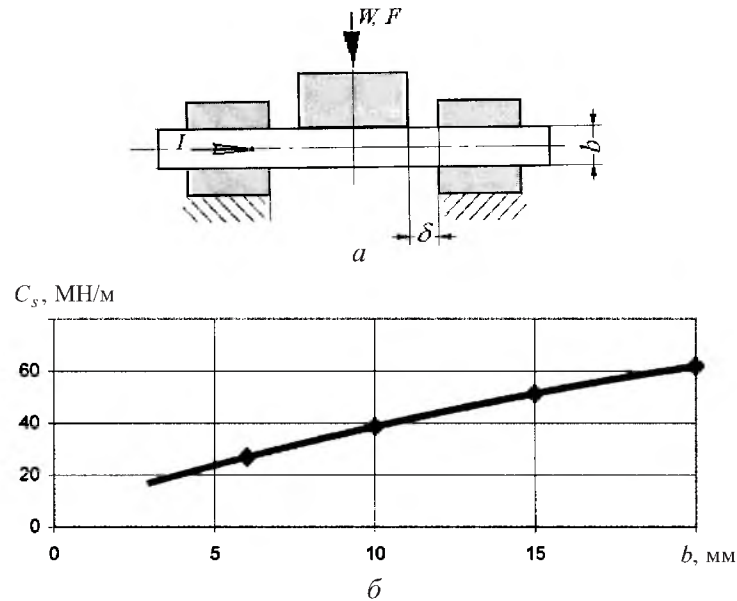


Рис. 1. Схема нагружения (а) и зависимость расчетной жесткости образца толщиной 1,0 мм от ширины b при сдвиге на $f_s = 10$ мкм его центральной части (б).

Исследование процессов релаксации сдвиговых напряжений проводили следующим образом. После нагружения образца заданным перемещением пуансона W привод машины останавливали и после выдержки (для завершения процессов релаксации в элементах цепи нагружения) через образец пропускали ИЭТ. По показаниям динамометра (его упругой деформации), установленного на пуансоне, рассчитывали нагрузку F на образец и ее изменение вследствие действия ИЭТ.

Из регистрируемой диаграммы нагрузка F – перемещение W следует, что пропускание ИЭТ через нагруженный образец приводит к быстрому снижению нагрузки, которая сохраняется при дальнейшем охлаждении и длительной выдержке. При последующем деформировании образца перемещением пуансона по достижении исходного (до пропускания ИЭТ) уровня нагрузки диаграмма нагрузка–перемещение является продолжением начальной диаграммы. По снижению нагрузки вследствие действия ИЭТ оценивали среднюю неупругую деформацию сдвига в областях ее локализации с учетом соотношения жесткостей образца и цепи нагружения. В проведенных испытаниях жесткость элементов цепи нагружения намного ниже жесткости образца при его упругом и упругопластическом деформировании, что облегчает оценку усредненной деформации в образце.

Расчетная оценка жесткости образца и машины. Для оценки изменения неупругой деформации в образце, вызванной действием ИЭТ, следует учитывать соотношение жесткостей элементов цепи нагружения и образца по методике, аналогичной описанной ранее [7, 8].

Перемещение ΔW нагружающей траверсы испытательной машины (пуансона), полагая постоянной жесткость элементов нагружающей цепи машины, определяется уравнением

$$\Delta W = \left(\frac{1}{C_M} + \frac{1}{C_s} \right) \Delta F = \frac{\Delta F}{C_{total}}, \quad (1)$$

где C_M и C_s – жесткость элементов нагружающей цепи машины и образца; ΔF – нагрузка на образец.

Жесткость машины C_M может быть рассчитана по уравнению (1) по заданным значениям общей жесткости цепи нагружения C_{total} ($C_{total} = \Delta F / \Delta W$) при перемещении траверсы машины и жесткости образца C_s при перемещении его центральной части.

При этом следует учитывать, что поперечное перемещение центральной части образца на единицу нагрузки ($\Delta f_s / \Delta F = 1 / C_s$), характеризующее его жесткость, зависит от упругопластических свойств, размеров поперечного сечения ($s \times b$), ширины области сдвиговых деформаций (зазора δ между пуансоном и матрицей).

Результаты расчета жесткости образца для начального участка нагружения методом конечных элементов (МКЭ) при плоском напряженном состоянии с учетом неоднородности его деформации и концентрации напряжений в угловых точках контакта с пуансоном и матрицей приведены на рис. 1, б. При расчетах поперечное перемещение центральной части образца f_s рассчитывали как перемещение недеформируемого пуансона относительно недеформируемой матрицы.

В качестве иллюстрации поведения образца при нагрузке и разгрузке на рис. 2 представлена расчетная зависимость поперечной нагрузки F от перемещения f_s , полученная при нагружении стального образца сечением $s = 2$ мм, $b = 6$ мм (модуль Юнга $E = 200$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; предел текучести $\sigma_y = 350$ МПа; модуль деформационного упрочнения $M = 350$ МПа). При увеличении f_s неупругое деформирование в угловых точках контакта образца с пуансоном и матрицей вызывает повышение жесткости, затем ее снижение после распространения неупругой деформации на всю ширину образца. Расчетная зависимость усилия на образец от перемещения его центральной части (рис. 2) используется для определения жесткости $C_s(f_s) = \Delta F / \Delta f_s$ при нагрузке и разгрузке. По результатам расчетов неупругая деформация сдвига в центре областей ее локализации возникает при перемещении $f_s > 0,01$ мм, что приводит к повышению жесткости образца. Характеристика жесткости образца при разгрузке практически не отличается от таковой при нагрузке в диапазоне малых неупругих деформаций.

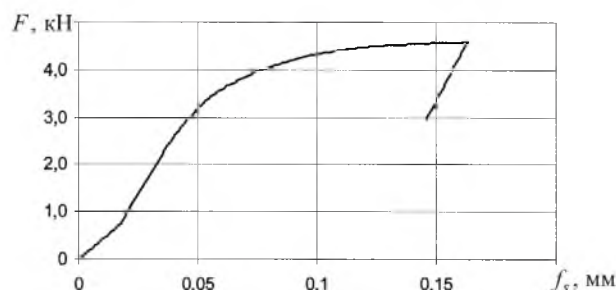


Рис. 2. Расчетное изменение нагрузки на образец в зависимости от перемещения его центральной части при нагрузке и разгрузке.

Как следует из (1), жесткость машины C_M , которую в широком диапазоне нагрузок можно принять постоянной, при известной жесткости образца C_s заданного сечения можно определить по уравнению

$$C_M = \frac{1}{\frac{\Delta W}{\Delta F} - \frac{1}{C_s}} = \frac{1}{\frac{1}{C_{total}} - \frac{1}{C_s}}. \quad (2)$$

Для расчета жесткости цепи нагружения C_{total} исходными экспериментальными данными служили линейные участки зависимости нагрузка F – перемещение ползуна машины W , соответствующие малым неупругим деформациям, $C_{total} = \Delta F / \Delta W$ (рис. 3).

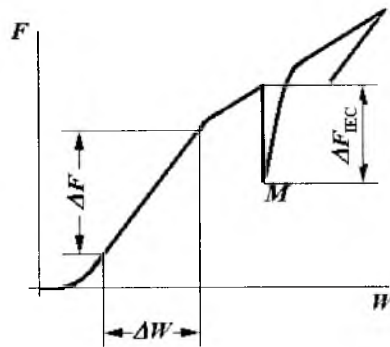


Рис. 3. Схематическое представление диаграммы $F - W$ с понижением нагрузки до точки M при действии ИЭТ.

Жесткость машины C_M можно рассчитать по уравнению (2), если известны общая жесткость цепи нагружения C_{total} и жесткость образца C_s . В проведенных экспериментах с использованием образцов сечением $s = 2$ мм, $b = 6$ мм жесткость цепи нагружения, рассчитанная по наклону диаграммы нагрузка–перемещение на участке линейного роста нагрузки, равна $C_{total} = \Delta F / \Delta W = 7,85 \cdot 10^6$ Н/м. Расчетная жесткость C_{s0} таких образцов в диапазоне малых перемещений ($f_s < 10$ мкм), соответствующих их упругому деформированию, составляет $\approx 5 \cdot 10^7$ Н/м. При дальнейшем линейном росте нагрузки, вызывающей развитие неупругого деформирования от угловых точек контакта образца с матрицей и пуансоном, и при разгрузке жесткость образца $C_s \approx 10^8$ Н/м. Жесткость элементов нагружающей цепи машины $C_M \approx 8,6 \cdot 10^6$ Н/м, определенная по (2) с учетом значения C_s , существенно меньше жесткости образца при разгрузке.

Влияние ИЭТ на механические напряжения в образце. Влияние тока на напряженно-деформированное состояние (НДС) образца при сдвиге экспериментально определяется снижением поперечной нагрузки ΔF_{IEC} (рис. 3). Из (1) следует, что поперечное неупругое перемещение центральной части образца Δf_{IEC} , вызванное действием ИЭТ (без перемещения траверсы, $\Delta W = 0$), с учетом соотношения жесткостей образца C_s и машины C_M удовлетворяет уравнению

$$\Delta W = \left(\frac{1}{C_M} + \frac{1}{C_S} \right) \Delta F_{IEC} + \Delta f_{IEC} = 0, \quad (3)$$

из которого получим

$$\Delta f_{IEC} = - \frac{\Delta F_{IEC}}{C_M} \left(\frac{C_M}{C_S} + 1 \right). \quad (4)$$

Таким образом, для оценки неупругого перемещения образца Δf_{IEC} по уравнению (4) достаточно знать жесткости машины C_M и образца заданного сечения C_S .

Ио экспериментально определенному снижению поперечной нагрузки ΔF_{IEC} в результате действия ИЭТ (рис. 3) рассчитывали Δf_{IEC} . Усредненный уровень деформации сдвига ε_{IEC} , соответствующий среднему напряжению сдвига, определяли из уравнения

$$\varepsilon_{IEC} = \frac{\Delta f_{IEC}}{\delta_{eff}} \approx \frac{\Delta F_{IEC}}{2\delta} \left(\frac{1}{C_S} + \frac{1}{C_M} \right) = \frac{\Delta F_{IEC}}{2\delta C_{total}}, \quad (5)$$

где учитывалось, что ширина области неупругой деформации сдвига $\delta_{eff} = 2\delta$ (по результатам расчетов с использованием МКЭ).

Усредненная неупругая деформация в результате действия ИЭТ в областях ее локализации в стальном образце указанного выше сечения при нагружении на использованной в экспериментах испытательной машине ($C_S \approx 10^8$ Н/м, $C_M \approx 8,6 \cdot 10^6$ Н/м) определяется по снижению нагрузки по уравнению

$$\varepsilon_{IEC} \approx \frac{\Delta F_{IEC}}{2\delta C_{total}} \approx 0,63 \cdot 10^{-4} \Delta F_{IEC}. \quad (6)$$

В проведенных экспериментах регистрируемое снижение изменения нагрузки на $\Delta F_{IEC} = 1,0$ кН (при действии ИЭТ, вызванного разрядом батареи конденсаторов емкостью 600 мкФ, заряженных до 4 кВ) соответствует средней деформации неупругого сдвига в областях деформации $\varepsilon_{IEC} \approx 6,3\%$.

Ио результатам экспериментов (рис. 4) уровень релаксации напряжений при действии тока возрастает линейно с увеличением нагрузки, однако отношение $\Delta F_{IEC}/F$ изменяется незначительно. Иовышение напряжения U_0 , емкости C батареи конденсаторов, а следовательно, амплитуды и длительности ИЭТ усиливает эффект действия тока.

Ипроведенный выше анализ не учитывает изменение жесткости образца, вызванное его деформационным упрочнением и нагревом. Для оценки относительного влияния жесткости образца на ΔF_{IEC} рассмотрим, как изменяется поперечная нагрузка на образец при действии ИЭТ (рис. 5). Упругое или неупругое деформирование образца при повышении нагрузки можно представить соответственно линиями OB (рис. 5,а) или OAB (рис. 5,б). Ири действии ИЭТ происходит снижение упругой нагрузки по линиям BO или

BO_1 (рис. 5). Линии DCB (рис. 5) характеризуют линейное деформирование элементов в цепи нагружения машины с повышением нагрузки. При заданном перемещении траверсы машины W устанавливается равновесие (на рис. 5 точки B), определяемое равенством усилий в элементах машины и нагрузки на образец.

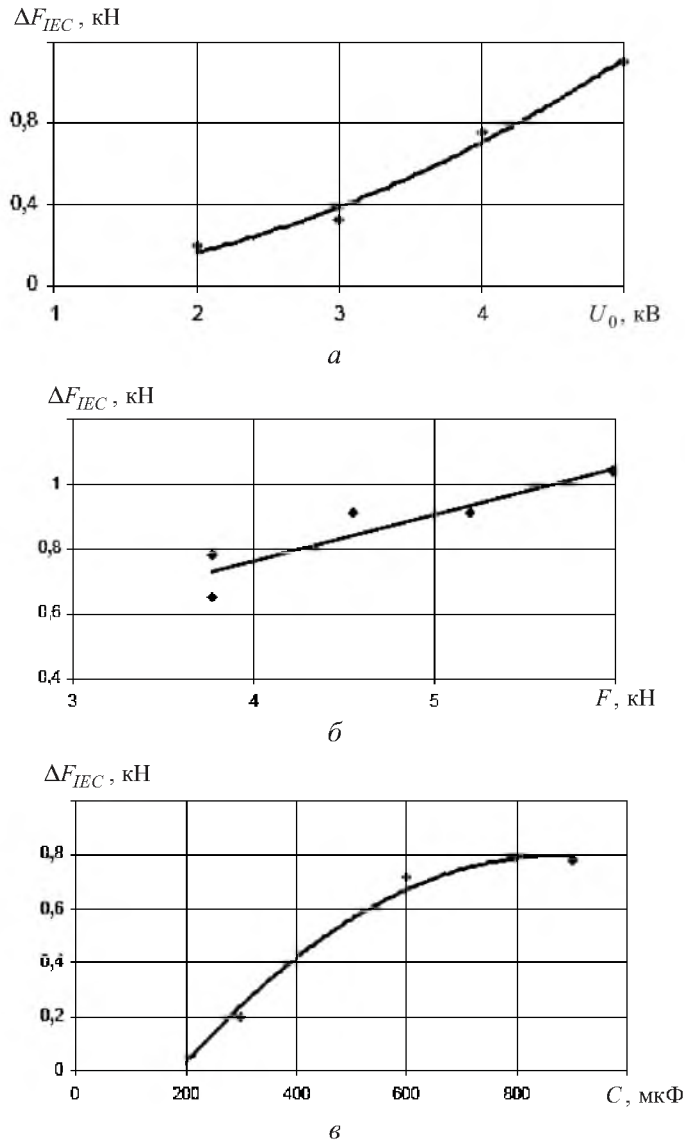


Рис. 4. Изменение поперечной нагрузки ΔF_{IEC} на образец, вызванное действием ИЭТ, в зависимости от напряжения U_0 ($C = 600$ мкФ, $F = 3,9$ кН) – а, нагрузки F ($C = 600$ мкФ, $U_0 = 4$ кВ) – б и емкости батареи конденсаторов C ($U_0 = 4$ кВ, $F = 3,9$ кН) – в.

Пропускание через образец ИЭТ приводит к неупругому перемещению его центральной части Δf_{IEC} и снижению нагрузки ΔF_{IEC} . Из приведенной схемы видно, что при заданном снижении нагрузки ΔF_{IEC} уменьшение жесткости элементов машины (уменьшение наклона линии DCB на

рис. 5) вызывает увеличение Δf_{IEC} и, следовательно, деформации в локальных областях сдвига. Как следует из проведенного анализа, при низкой жесткости элементов машины влияние изменения жесткости образца на релаксацию напряжений несущественно.

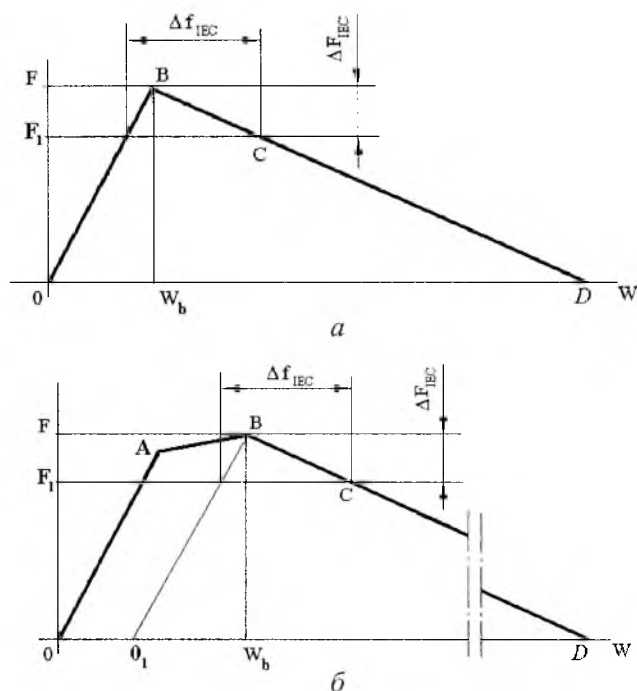


Рис. 5. Схема изменения диаграммы усилие–перемещение при действии ИЭТ.

Оценка теплового действия ИЭТ. Расчетное снижение нагрузки, вызванное тепловым действием тока, определяли для синусоидального тока с экспоненциальным характером затухания его амплитуды за три периода:

$$i(t) = i_0 \exp(t/T) \sin(2\pi t/T),$$

где i_0 – номинальная амплитуда плотности тока; T – период его колебаний.

С использованием метода конечных элементов рассчитано изменение температуры в образце во времени (удельное электросопротивление $2 \cdot 10^{-7}$ Ом · м, объемная теплоемкость $3,5$ МДж/(м³ · К), коэффициент теплопроводности 80 Дж/(м · К · с)). При амплитуде плотности тока при первом колебании $3,9 \cdot 10^9$ А/м² (период колебаний $T \approx 250$ мкс) повышение температуры, вызванное ИЭТ на границах образца, составляет примерно 85°C . Локальное увеличение амплитуды плотности тока в угловых точках за $0,08$ мс до $6,5 \cdot 10^9$ А/м² приводит к повышению температуры, достигающему 400°C , однако через $0,8$ мс температура быстро снижается до 90°C , причем в пределах всей области локализованного сдвига в образце ее повышение не превышает 90°C . Расчетное уменьшение нагрузки на образец вследствие

теплового действия тока с учетом неоднородного распределения температуры в момент ее максимума в угловых точках является незначительным. После выравнивания температуры в полосе сдвига к моменту окончания действия ИЭТ (через 0,8 мс после начала действия ИЭТ) расчетное снижение сопротивления металла сдвигу, вызванное нагревом, не превышает 7,5% (при повышении температуры до 1000°C сопротивление сдвигу снижается в 10 раз). Расчетное снижение сопротивления сдвигу существенно ниже зарегистрированного в экспериментах уменьшения нагрузки (~17,5%) – рис. 4,б. Это может быть обусловлено преобладающим нетепловым действием электрического тока, снижающего сопротивление металла деформации более интенсивно, чем следует из зависимости свойств металла от температуры.

Анализ влияния ИЭТ на кинетику деформирования. Согласно результатам экспериментальных исследований влияние ИЭТ на релаксацию растягивающих и сдвиговых напряжений проявляется в увеличении неупругой деформации за период действия тока, следовательно, повышении скорости пластической деформации. При этом наблюдается эффект “насыщения”: с увеличением плотности тока уровень релаксации напряжений асимптотически приближается к предельному значению, поскольку величина снижения напряжений не может превышать их исходных значений.

Скорость пластической деформации при действии ИЭТ, как и при динамическом деформировании, может быть определена с использованием ее линейной зависимости от “перенапряжения” [9]:

$$\dot{\varepsilon}_p = (\sigma - \sigma_{st})/\mu,$$

где σ – сопротивление металла при динамическом нагружении; σ_{st} – сопротивление металла при статическом нагружении; μ – коэффициент вязкости.

В проведенных экспериментах непосредственно перед пропуском ИЭТ имеем $\sigma = \sigma_{st}$, следовательно, скорость пластической деформации равна нулю. Действие ИЭТ приводит к снижению начального сопротивления сдвигу σ_{st} на $\Delta\sigma_{IEC}$, т.е. до $\sigma_{st} - \Delta\sigma_{IEC}$, и развитию деформации со средней скоростью $\dot{\varepsilon}_p = \Delta\sigma_{IEC}/2\mu$. Средняя величина скорости деформации $\dot{\varepsilon}_p$ при действии ИЭТ, вызывающего деформацию пластического сдвига ε_p за эффективное время действия тока t_{eff} , и коэффициент вязкости μ определяются по уравнениям

$$\dot{\varepsilon}_p = \frac{\varepsilon_p}{t_{eff}}; \quad \mu = \frac{\Delta\sigma_{IEC}}{2\dot{\varepsilon}_p} = \frac{\Delta F_{IEC}}{4sb\varepsilon_p} t_{eff}. \quad (7)$$

Выше указывалось, что при нагружении сдвигом стального образца по снижению нагрузки на $\Delta F_{IEC} = 1000$ Н (при нагрузке ≈ 5700 Н, рис. 4) из уравнения (6) определяется прирост средней деформации сдвига $\Delta\varepsilon_{IEC} \approx \approx 6,3\%$ при величине смещения $\Delta f_{IEC} \approx 0,126$ мм. Это соответствует среднему значению скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{IEC} \approx 250$ с⁻¹ (при $t_{eff} = 250$ мкс) и коэффициенту вязкости $\mu \approx 8,3 \cdot 10^4$ Иа · с, величина которого удовлетвори-

тельно согласуется с известными данными для низкоуглеродистой стали при высокой скорости деформации, соответствующей атермическому механизму движения дислокаций [9, 10]. Следовательно, кинетика деформации при действии ИЭТ, как и при динамическом нагружении, определяется уровнем “перегрузки” и коэффициентом вязкости металла при соответствующей скорости пластической деформации.

Выводы

1. Экспериментально определенный уровень релаксации напряжений сдвига существенно выше расчетного снижения напряжений, вызванного повышением температуры в результате теплового действия ИЭТ, что свидетельствует о влиянии на релаксацию напряжений эффектов, связанных с нетепловым действием тока.

2. Кинетика деформации металла при сдвиге в период действия ИЭТ определяется коэффициентом вязкости, как и при деформировании с повышенной скоростью.

Изучение эффектов релаксации напряжений в различных конструкционных металлах и их связи с микроструктурными изменениями при действии ИЭТ является задачей дальнейших исследований.

Резюме

Наведено методику та деякі результати експериментального дослідження релаксації напружень зсуву, що зумовлена дією імпульсу електричного струму високої щільності. Установлено суттєвий вплив нетеплового ефекту дії струму на кінетику деформації при зсуві. Показано, що швидкість деформації металу при зсуві в період дії імпульсу електричного струму визначається коефіцієнтом в'язкості аналогічно непружному деформуванню з підвищеною швидкістю.

1. *Спицин В. И., Троицкий О. А.* Электропластическая деформация металла. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
2. *Баранов Ю. В., Троицкий О. А., Аврамов Ю. С., Шляпин А. Д.* Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.
3. *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.
4. *Доронин Ю. Л.* Исследование возможностей повышения конструкционных и эксплуатационных характеристик деталей летательных аппаратов импульсным воздействием высокоэнергетического электромагнитного поля: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1992. – 18 с.
5. *Володин В. Л., Бадьина М. И., Сарычев В. Л., Кудашкина А. Н.* Исследование структуры и свойств высокомарганцовистых сталей после воздействия импульсных электрических токов // *Изв. вузов. Черная металлургия.* – 1992. – № 6. – С. 98 – 99.

6. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А., Олисов А. Н. Анализ процесса релаксации растягивающих напряжений под действием импульса электрического тока // Пробл. прочности. – 2006. – № 1. – С. 116 – 127.
7. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А. Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности // Там же. – 2004. – № 4. – С. 60 – 67.
8. Новогрудский Л. С. О влиянии податливости испытательной машины на сопротивление деформированию металлов при скачкообразном развитии их упругопластической деформации // Там же. – 2000. – № 3. – С. 125 – 132.
9. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.
10. Степанов Г. В., Зубов В. И. Обобщенная кривая деформирования высокопрочной стали в широком диапазоне скоростей деформирования // Пробл. прочности. – 2004. – № 2. – С. 77 – 86.

Поступила 23. 02. 2007