

Влияние импульсного электрического тока на уровень напряжений в металлической полосе при ее растяжении

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

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

Приведены результаты экспериментальной оценки влияния импульсного электрического тока на уровень напряжений в растягиваемой стальной полосе. Показано, что на стадии повышения нагрузки релаксация напряжений в полосе возрастает с ростом плотности тока и уровня нагрузки. После ступенчатого снижения нагрузки пропускание импульса тока вызывает не релаксацию растягивающих напряжений, а их повышение. Высказано предположение, что при нагрузке и последующей разгрузке в металле возникают микропластические деформации различного направления, которые усиливаются при пропускании импульса электрического тока. Предложена феноменологическая модель поведения металла, описывающая эффекты, вызванные пропусканием импульсного электрического тока при нагрузке и разгрузке.

Ключевые слова: импульс электрического тока, напряженно-деформированное состояние, релаксация напряжений, феноменологическая модель материала.

Введение. Пропускание импульса электрического тока (ИЭТ) высокой плотности через металлический материал приводит к повышению температуры, возникновению пондеромоторных сил (пинч-эффект), концентрации тока у поверхности и у дефектов, а также других явлений, в том числе и электропластического эффекта [1–7]. Однако поведение металла при действии ИЭТ на стадиях повышения механической нагрузки и разгрузки исследовано еще недостаточно.

В данном сообщении представлены результаты экспериментальных исследований влияния ИЭТ высокой плотности на релаксацию растягивающих напряжений в полосе из низкоуглеродистой стали при одноосном растяжении. Такие испытания обеспечивают простоту анализа результатов и надежную оценку влияния эффектов, сопровождающих пропускание ИЭТ, на напряженно-деформированное состояние металла.

Методика эксперимента. Исследование влияния ИЭТ на релаксацию напряжений в полосе металла при повышении и снижении растягивающей нагрузки выполнено на образцах в виде полос из низкоуглеродистой стали Ст. 3 с поперечным сечением 2×6 мм и длиной между захватами 350 мм. Импульсный ток пропускали через центральную часть образца длиной 240 мм. Механическое нагружение образцов осуществлялось на испытательной машине ИР-50, которая обеспечивала жесткое перемещение активного захвата с помощью винтового привода, что позволяло сохранить постоянной полную (упругую и пластическую) деформацию образца при выдержке после повышения или снижения нагрузки. Максимальные напряжения, до которых нагружались образцы, не превышали предел текучести материала ($\sigma_{0,2} = 335$ МПа).

Схема генератора ИЭТ, использовавшегося при выполнении данных исследований, аналогична описанной ранее [8]. Цепь разряда включала батарею конденсаторов емкостью 600 мкФ, механический разрядник и образец, индуктивность цепи составляла около 2 мкГн. Симметричная разводка токоподводов у образца устраняет неуравновешенное воздействие на него механических сил электромагнитной природы, возникающих при протекании электрического тока. Импульс тока при разряде регистрировали с помощью пояса Роговского, сигнал с которого подавали на высокоскоростную аналого-цифровую плату персонального компьютера. Конденсаторы заряжали до напряжения 4 и 3 кВ, что обеспечивало ток в цепи с максимальной амплитудой около 50 и 40 кА соответственно. Как показали результаты регистрации, импульс тока является периодическим, затухающим за три колебания. Период первого колебания приблизительно равен 225 мкс.

Результаты исследований и их анализ. Изменение напряжений в образце, вызванное действием ИЭТ, при непрерывном повышении нагрузки схематически показано на рис. 1. Кинетика напряжений в процессе выдержки без изменения общей деформации образца после повышения и понижения нагрузки в результате пропускания ИЭТ представлена на рис. 2.

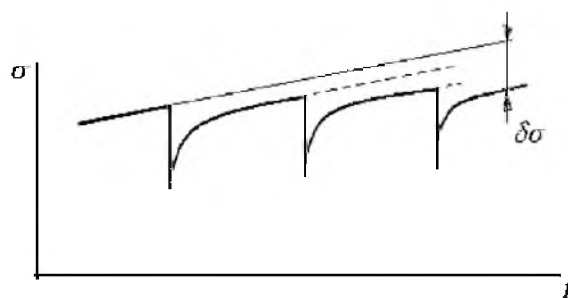


Рис. 1. Схема изменения во времени растягивающего напряжения в полосе вследствие действия ИЭТ при ее удлинении с постоянной скоростью.

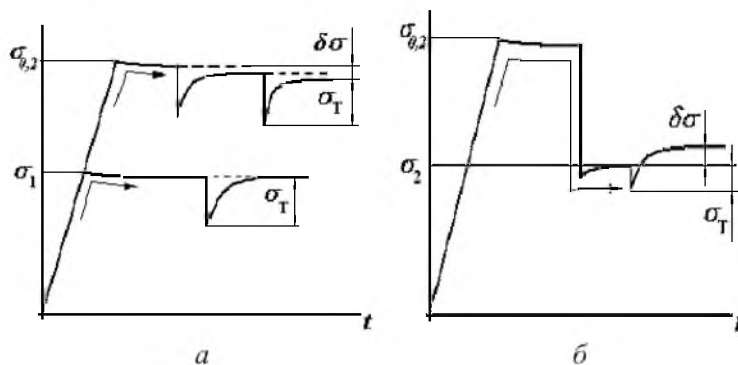


Рис. 2. Схематическое представление кривой деформирования при воздействии ИЭТ и выдержке после повышения (а) и снижения (б) нагрузки.

При непрерывном упругом растяжении полосы со скоростью 0,2 мм/мин действие ИЭТ, одним из факторов которого является термическое расширение образца, вызывает быстрое снижение напряжения с последующим его

повышением в результате охлаждения образца до уровня ниже соответствующего упругому деформированию без действия ИЭТ (рис. 1). Понижение напряжения на величину $\delta\sigma$ характеризует непосредственный (нетепловой) эффект влияния электрического тока на материал. При этом пинч-эффектом можно пренебречь, так как вызванные им напряжения сжатия в полосе не превышают 10 МПа.

Величина $\delta\sigma$ повышается с ростом уровня упругого напряжения в полосе в момент пропускания ИЭТ. Неупругая составляющая деформации, вызванной нетепловым воздействием ИЭТ, возрастает при действии последовательной серии импульсов тока. Так, отклонение уровня напряжения от линейно-упругого, вызванное серией из шести импульсов электрического тока ($U_0 = 4$ кВ), составило $\sum \delta\sigma \approx 55$ МПа при непрерывном нагружении с 140 до 300 МПа.

Экспериментальные данные по изменению растягивающих напряжений в полосе вследствие действия ИЭТ при выдержке без изменения общей деформации полосы после повышения и понижения нагрузки приведены на рис. 3. Здесь каждая точка соответствует суммарной величине изменения напряжений после действия серии из трех идентичных импульсов тока с промежутками времени между ними, достаточными для охлаждения образца до исходной температуры. Релаксация напряжений после каждого последующего импульса ниже, чем после предыдущего. Повышение плотности тока и уровня растягивающих напряжений увеличивает уровень релаксации напряжений, вызванных действием ИЭТ (на рис. 3 кривые 1 и 2).

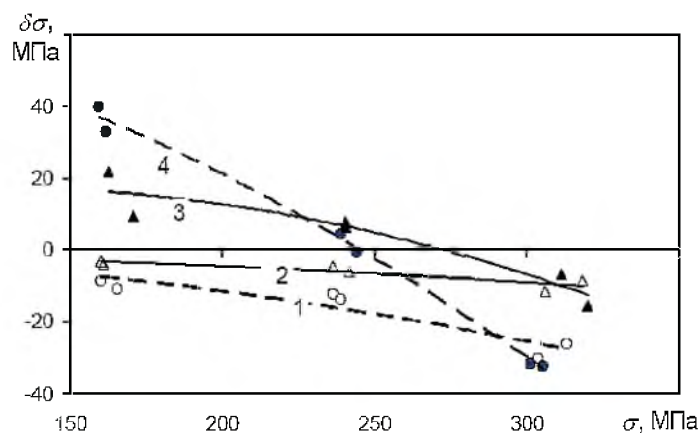


Рис. 3. Изменение растягивающих напряжений в стальной полосе вследствие действия ИЭТ при ступенчатом повышении (1, 2) и ступенчатом снижении (3, 4). (Сплошные линии – зарядка конденсаторов до напряжения 3 кВ, пунктирные – 4 кВ).

Отметим, что при выдержке полосы под нагрузкой после ее повышения наблюдается некоторое снижение напряжений (менее 1%) вследствие релаксационных эффектов в цепи нагружения и образце (рис. 2), тогда как действие ИЭТ вызывает более существенную релаксацию напряжений. При низком уровне приложенных напряжений ($\sigma < 0,5\sigma_{0,2}$) после действия ИЭТ и последующего охлаждения уровень растягивающей нагрузки повышается

до исходного, т.е. практически отсутствует заметный нетепловой эффект ИЭТ (на рис. 2 нижние кривые).

Сразу после снижения растягивающей нагрузки и выдержке при постоянной общей деформации полосы наблюдается незначительное повышение нагрузки. Действие ИЭТ в процессе такой выдержки вызывает повышение уровня растягивающих напряжений (рис. 2, б), возрастающих с понижением уровня нагрузки и увеличением плотности тока (на рис. 3 кривые 3 и 4).

Влияние более интенсивного предшествовавшего нагружения на поведение металла при выдержке с пониженным уровнем нагрузки, заключающееся в повышении уровня растягивающих напряжений, указывает на развитие в металле микропластических деформаций при нагрузке и разгрузке.

Действие ИЭТ на поведение металла при нагрузке и разгрузке свидетельствует о несовершенной упругости металла, которая, например, наиболее полно изучена при исследованиях демпфирования колебаний [9]. Судя по результатам проведенных экспериментов, ИЭТ облегчает и ускоряет развитие микропластических деформаций различного знака при нагрузке и разгрузке.

Модель поведения металла при нагрузке и разгрузке с учетом воздействия ИЭТ. Исходя из полученных экспериментальных данных можно построить феноменологическую модель поведения металла под действием растягивающих напряжений при пропускании ИЭТ. Модель соответствует трехэлементной модели, которая состоит из последовательно соединенных упругой и упругопластической ячеек (рис. 4). Упругая деформация металла определяется модулем упругости E (неупругими деформациями упругопластической ячейки с элементом трения сопротивлением σ_0 и упругим элементом с модулем упругости E_0 пренебрегаем). В общем случае сопротивление трения σ_0 зависит от параметров нагружения и деформирования, а влияние ИЭТ вызывает его снижение на величину $\delta\sigma(i)$, которая увеличивается с ростом плотности тока i и его длительности.

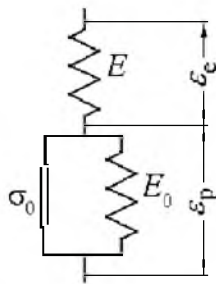


Рис. 4. Феноменологическая модель упругопластического поведения металла.

Для предварительно растянутой до напряжения σ_1 (σ_1 ниже предела текучести) полосы после пропускания ИЭТ из простых соотношений для элементов модели получим зависимости между напряжением и деформацией:

$$\sigma_1 = E\varepsilon_{e1} = E_0\varepsilon_{p1} + \sigma_{0(1)} - \delta\sigma(i), \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_{e1} + \varepsilon_{p1},$$

из которых следует, что упругая деформация на стадии роста нагрузки определяется выражением

$$\varepsilon_{e1} = \frac{E_0 \varepsilon_1 + [\sigma_{0(1)} - \delta\sigma(i)]}{E + E_0}. \quad (1)$$

Следовательно, при сохранении общей деформации полосы уменьшение напряжений трения на величину $\delta\sigma(i)$ в результате действия ИЭТ (если таково существенно) вызывает снижение уровней напряжений и упругой деформации. Повышение плотности тока при сохранении параметров цепи разряда приводит к более интенсивному снижению напряжений.

В случае снижения уровня растягивающей нагрузки на полосу, предварительно растянутую до напряжений ниже предела текучести, упруго-пластическая ячейка не деформируется в обратном по отношению к начальной деформации направлении (при разгрузке упругая деформация не изменяется) до тех пор, пока сжимающее усилие в элементе трения ниже критического значения $\sigma_{0(2)}$. Из приведенных выше соотношений следует, что неупругая деформация при разгрузке возникает при напряжении в элементе трения $\sigma_{0(2)} = -E_0 \varepsilon_{p2}$.

После разгрузки до напряжения σ_2 упругая деформация после действия импульса тока будет

$$\varepsilon_{e2} = \frac{E_0 \varepsilon_2 - [\sigma_{0(2)} - \delta\sigma(i)]}{E + E_0}. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что в результате пропускания импульса тока через металлический материал, подверженный первоначальной нагрузке до напряжений ниже предела текучести и последующей разгрузке, происходит повышение уровня упругой деформации ε_{e2} и соответствующего ей напряжения σ_2 (рис. 2,б).

Такое влияние ИЭТ на поведение металла с точки зрения дислокационного механизма пластической деформации объясняется тем, что во время выдержки при неизменной деформации (после повышения или снижения нагрузки) импульс тока вызывает снижение уровня барьеров на пути дислокаций, вследствие чего они смещаются в сторону большей стабильности.

Заключение. Действие ИЭТ на уровень растягивающих напряжений в металлической полосе при сохранении ее общей деформации вызывает релаксацию напряжений после повышения нагрузки и рост напряжений после ее снижения.

Эффект ИЭТ возрастает с увеличением плотности тока, уровня растягивающих напряжений при повышении нагрузки и степени снижения напряжений при разгрузке. Результаты действия ИЭТ суммируются в случае серии идентичных импульсов тока, при этом эффект от каждого последующего импульса меньше, чем от предыдущего.

Влияние истории предшествующего растяжения на эффект ИЭТ при последующем понижении напряжений может быть связано с развитием в металле малых неупругих деформаций разного знака при повышении нагрузки и ее снижении.

Можно предположить, что влияние ИЭТ на уровень напряжений в металле возрастет при повышении температуры, что может быть предметом дальнейших исследований.

Исследования выполнены при поддержке European Research Office of the us Army по контракту № N62558-03-M-0809.

Резюме

Наведено результати експериментальної оцінки впливу електричного струму на рівень напружень у сталевій смугі, що розтягується. Установлено, що на стадії підвищення навантаження на смугу релаксація напружень із ростом густини струму та ступеня навантаження зростає. Після ступеневого зниження навантаження в попередньо навантаженій смугі пропускання імпульсу струму викликає не релаксацію напружень розтягу, а їх підвищення. Це свідчить про те, що при навантаженні та розвантаженні в металі виникають мікропластичні деформації різного напрямку, які проявляються при пропусканні імпульсу електричного струму. Запропоновано феноменологічну модель поведінки металу, що описує ефект дії імпульсу електричного струму при навантаженні та розвантаженні.

1. *Спицин В. Н., Троицкий О. А.* Электропластическая деформация металлов. – М.: Машиностроение, 1985. – 250 с.
2. *Беклемишев Н. Н., Корягин Н. И., Шапиро Г. С.* Влияние локального неоднородного импульсного электромагнитного поля на пластичность и прочность проводящих материалов. – Изв. АН СССР. Сер. Металлы. – 1981. – № 4. – С. 184 – 187.
3. *Климов К. М., Новиков И. И.* Пластическая деформация металлов в электромагнитном поле // V Всесоюз. съезд по теорет. и прикл. механике. – Алма-Ата: Наука, 1981. – С. 190 – 194.
4. *Громов В. Е., Зуев Л. Б., Базаикин В. И., Целлермаер В. Я.* Закономерности электростимулированной пластической деформации металлов и сплавов на разных структурных уровнях // Изв. вузов. Физика. – 1996. – № 3. – С. 66 – 96.
5. *Копанев А. А.* К вопросу о природе электропластического эффекта в металлах // Пробл. прочности. – 1991. – № 1. – С. 47 – 51.
6. *Степанов Г. В., Бабуцкий А. И.* Воздействие электрического тока на релаксацию напряжений в металлах // Там же. – 1996. – № 2. – С. 68 – 72.
7. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях. – Киев: Наук. думка, 1990. – 157 с.

8. *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.
9. *Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.* Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1975. – 359 с.

Поступила 28. 09. 2005