

Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности

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

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

Представлены результаты экспериментального и численного исследования нестационарного напряженно-деформированного состояния в тонком стальном стержне (отрезок проволоки), предварительно растянутом статической нагрузкой до напряжений ниже предела текучести, при пропускании импульса электрического тока высокой плотности. Воздействие импульса электрического тока приводит к осцилляции осевых напряжений с периодом, соответствующим периоду собственных продольных колебаний стержня. Уровень максимальных сжимающих и растягивающих напряжений определяется длительностью фронта и амплитудой импульса тока. Высокий уровень указанных напряжений в центральной части стержня вызывает локальную потерю продольной устойчивости. Результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния в стержне при его нагреве в результате воздействия импульса электрического тока соответствуют экспериментально наблюдаемым эффектам. Снижение после воздействия тока уровня растягивающих напряжений от приложенной статической нагрузки свидетельствует о развитии процессов релаксации, связанных не только с нагревом. Для отдельной оценки эффектов, обусловленных волнами упругих напряжений в стержне, нагревом и непосредственным действием электрического тока, необходимы дополнительные исследования.

Ключевые слова: импульсный электрический ток, потеря устойчивости, волна разгрузки, релаксация напряжений, напряженно-деформированное состояние.

Введение. При пропускании импульсного электрического тока (ИЭТ) высокой плотности в металлическом материале наблюдаются хорошо изученные эффекты – повышение температуры, действие пондеромоторных сил (пинч-эффект), концентрация тока у поверхности (скин-эффект) и др. Несмотря на систематические исследования, проводимые в этом направлении уже несколько десятилетий, единое мнение о влиянии параметров ИЭТ на механизмы изменения характеристик прочности и пластичности металлов, ползучесть и релаксацию механических напряжений отсутствует. Например, авторы работ [1–3] считают, что наиболее существенное влияние на процессы в металле оказывает электропластический эффект, не связанный с разогревом и обусловленный прямым воздействием электронов проводимости на дислокации и другие дефекты кристаллической решетки. В [4–6] предполагается, что эффект электропластичности определяется существенной локальной неоднородностью распределения температуры по объему металла, т.е. имеет термическую природу. По мнению авторов работы [7], на процессы пластической деформации металлов при электрическом воздействии влияют как вышеуказанные факторы, так и ряд других.

Для экспериментального исследования процессов, происходящих в металле, разработаны специальные методики, однако объем выполненных к

настоящему времени исследований и результаты их анализа недостаточны для полного понимания механизмов влияния ИЭТ на характеристики прочности и пластичности металла, в связи с чем дальнейшие исследования этих процессов остаются актуальными. В частности, недостаточно проанализирована роль нестационарного напряженно-деформированного состояния (НДС) в объеме металла при пропускании через него ИЭТ. Практически все исследования ограничены изучением влияния пинч-эффекта [8, 9] и не учитывают волновые процессы нагрузки-разгрузки, возникающие при продольном расширении металла образца, нагретого импульсом электрического тока.

В данном сообщении представлены результаты экспериментальных исследований влияния ИЭТ высокой плотности на релаксацию напряжений в тонком стальном стержне (отрезок проволоки), растянутом статической нагрузкой до напряжений ниже предела текучести. С использованием метода конечных элементов (МКЭ) численно исследовалось нестационарное НДС, вызванное пропусканием импульсного тока.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ. Процесс релаксации растягивающих напряжений изучали как при воздействии ИЭТ, так и при постоянном токе величиной 400 А. В качестве образцов использовали отожженную низкоуглеродистую стальную проволоку диаметром $D = 0,8$ мм и длиной $L = 350$ мм. На рис. 1,а приведена схема механических испытаний образцов в условиях жесткого нагружения, реализованная на базе испытательной машины РМ-30.

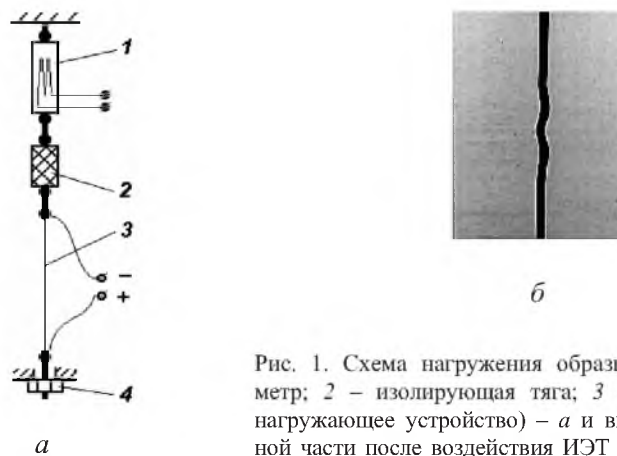


Рис. 1. Схема нагружения образца (1 – динамометр; 2 – изолирующая тяга; 3 – образец; 4 – нагружающее устройство) – а и вид его центральной части после воздействия ИЭТ – б.

Схема генератора ИЭТ, использовавшегося при данных исследованиях показана на рис. 2. Генератор ИЭТ включает источник высокого напряжения (до 5 кВ), батарею конденсаторов, общей емкостью до 2000 мкФ, механический разрядник и балластное сопротивление. Амплитуду импульсного тока, длительность фронта и общую длительность импульса регистрировали с использованием пояса Роговского, сигнал с которого подавался на высокоскоростную аналого-цифровую плату регистрации персонального компьютера. Температуру нагрева образцов в результате пропускания электрического тока регистрировали потенциометром КСП-4 с использованием хромель-алюмелевой термопары.

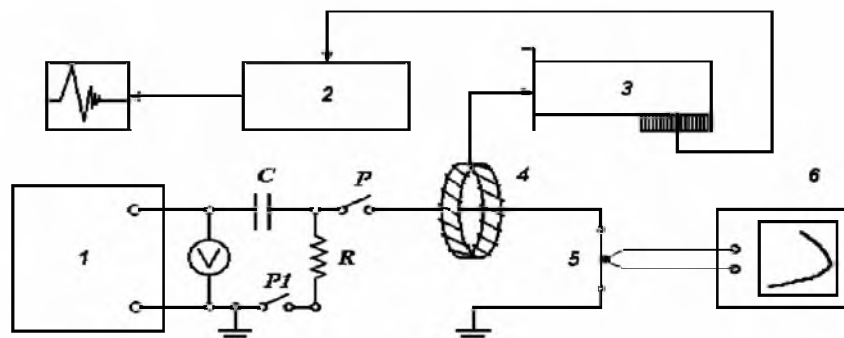


Рис. 2. Схема генератора ИЭТ и регистрации параметров нагружения образца: C – батарея конденсаторов; R – балластное сопротивление; P и PI – разрядники; 1 – источник высокого напряжения; 2 – программа обработки данных; 3 – аналого-цифровая плата; 4 – пояс Роговского; 5 – образец; 6 – потенциометр КСП-4.

К каждому образцу прикладывали начальную нагрузку, вызывающую растягивающие напряжения величиной $0,95\sigma_T$, где σ_T – предел текучести материала. Снижение уровня растягивающих напряжений после пропускания ИЭТ характеризует их релаксацию. Степень релаксации напряжений S определяли из соотношения $S = (\varepsilon_0 - \varepsilon_f) / \varepsilon_0 = \varepsilon_p / \varepsilon_0$ (ε_p – пластическая составляющая деформации) с учетом данных тензометрических измерений упругой деформации динамометра ε_0 непосредственно после механического нагружения стержня и деформации ε_f после пропускания ИЭТ и охлаждения его до исходной температуры.

Через образцы первой серии пропускали ИЭТ, амплитуда которых изменялась в пределах 15...20 кА. При этом длительность импульса не изменялась и составляла примерно 300 мкс; образцы нагревали до температуры 550...1000°C. Через образцы второй серии пропускали постоянный ток величиной 400 А (от сварочного выпрямителя ВСВУ-400) и длительностью 1...1,6 с. Последнюю выбирали такой, чтобы получить тот же уровень температур, что и в образцах первой серии.

На рис. 3 приведена зависимость релаксации напряжений от температуры нагрева образцов при пропускании ИЭТ. Там же представлены аналогичные данные, полученные при действии постоянного тока. Видно, что эффект релаксации растягивающих напряжений наблюдается при температурах нагрева выше 700°C.

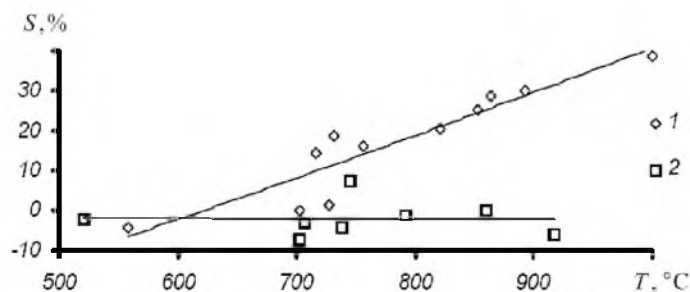


Рис. 3. Зависимость степени релаксации напряжений от температуры нагрева образцов: 1 – импульсный ток; 2 – постоянный ток.

Ранее [10] установлено, что в условиях воздействия сдвиговых напряжений при аналогичном нагреве до указанных температур происходит практически полная релаксация напряжений. Наблюдаемое различие между результатами может быть объяснено тем, что повышение температуры на $\Delta T_0 = \varepsilon_0 / \alpha \geq 160^\circ\text{C}$ в растянутом стержне вызывает снижение напряжений до нуля за счет термического расширения в течение начального периода действия тока (в нашем случае это время $t_i \approx 15 \dots 30$ мкс). После нагрева на ΔT_0 и выше продольное напряжение сохраняется на уровне, близком к нулевому. Таким образом, при нагреве до $T \geq \Delta T_0$ релаксация напряжений вследствие пропускания ПЭТ возможна только в начальный период действия тока, когда материал еще не разогрелся и существуют растягивающие напряжения.

По данным рис. 3 эффект релаксации напряжений проявляется только при повышенной плотности импульсного тока. Пропускание постоянного тока длительностью, обеспечивающей нагрев до той же температуры, что и при использовании ПЭТ, не вызывает релаксации напряжений в исследованном диапазоне температур. Сопоставление полученных результатов при действии постоянного тока и ПЭТ свидетельствует, что различие в релаксации напряжений не связано с влиянием температуры. Наблюдаемое усиление эффектов релаксации при повышении плотности импульсного тока, полученное в экспериментах, может быть обусловлено непосредственным (не тепловым) действием тока.

Отметим, что наличие в стержне высоких напряжений продольного сжатия при пропускании ПЭТ, вызванных его импульсным термическим расширением, приводит к потере продольной устойчивости, что соответствует данным работы [11]. Потеря устойчивости проявляется в локальном искривлении оси стержня вблизи центральной части (рис. 1,б). При многократном действии ПЭТ возникают дополнительные участки потери устойчивости, расположенные по длине стержня.

Результаты численного моделирования и их анализ. *Схема конечно-элементного моделирования.* Для оценки влияния величины и длительности повышения температуры на нестационарное НДС в стержне были выполнены расчеты с использованием МКЭ.

Принимая НДС в стержне осесимметричным, расчеты проводили с помощью конечноэлементной модели в виде одной четверти цилиндрического стержня ($D = 0,8$ мм, $L = 300$ мм) половинной длины. Нагрузка – мгновенное (линейное) однородное повышение температуры в объеме стержня на $\Delta T = 500^\circ\text{C}$. Граничные условия: нулевое продольное перемещение в сечении стержня, соответствующем середине его длины. Поскольку характерное время охлаждения на воздухе, определенное по диаграмме температура – время (приблизительно 60 с), на несколько порядков выше длительности воздействия импульсных токов, используемых при испытаниях, при численном моделировании теплоотвод с наружной поверхности стержня не учитывался, а температура нагрева определялась только тепловым действием тока. Начальные условия: нулевые перемещения; напряжения и нулевая температура.

Результаты. Расчеты проводили для упругого стержня с постоянными термомеханическими характеристиками, соответствующими характеристикам стали: модуль Юнга $E = 200$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; коэффициент линейного расширения $\alpha = 1,25 \cdot 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$. При выполнении расчетов пренебрегали зависимостью данных характеристик от температуры.

При мгновенном повышении температуры в стержне возникает состояние объемного сжатия, за которым следует снижение давления в результате распространения продольных и радиальных волн разгрузки, инициируемых соответственно от свободных от нагрузки торцов и наружной цилиндрической поверхности стержня. Наложение этих волн определяет нестационарное НДС в стержне. Согласно результатам численных расчетов период продольных и радиальных колебаний стержня при пропускании ПЭТ соответствует периоду его колебаний с собственной частотой, $\lambda_L = 2L/c_0$ и $\lambda_R = 2D/c_0$ (c_0 – скорость упругих волн). Уровень максимальных продольных напряжений растяжения–сжатия в центре стержня резко снижается с увеличением длительности нарастания температуры (рис. 4–6). Уменьшение длины стержня L также вызывает снижение амплитуды циклического изменения продольного напряжения (рис. 6).

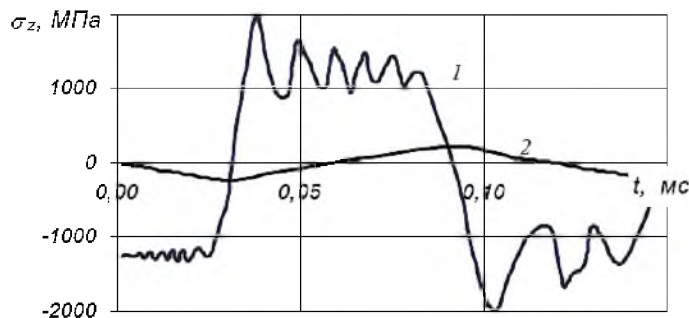


Рис. 4. Изменение осевого напряжения σ_z во времени в центре стержня при ступенчатом (1) и линейном за время 0,1 мс (2) повышении температуры.

Напряжение сжатия, действующее непосредственно после мгновенного повышения температуры на ΔT , соответствует тепловой составляющей давления в металле:

$$p_{\max}^T = 3\Delta T\alpha K,$$

где K – модуль объемного сжатия. Величина давления зависит от повышения температуры, коэффициента линейного расширения и упругих свойств металла и характеризует возможный уровень термонапряжений в начальный период времени после мгновенного роста температуры.

В соответствии с вышеприведенным уравнением для стального стержня при $\Delta T = 500\text{°C}$ расчетный уровень максимального давления $p_{\max}^T \approx 3,0$ ГПа. Однако в результате разгрузки в радиальном направлении напряжение сохраняется только в продольном направлении, $\sigma_z^T = \Delta T\alpha E \approx 1,2$ ГПа, что соответствует данным численного моделирования (рис. 4).

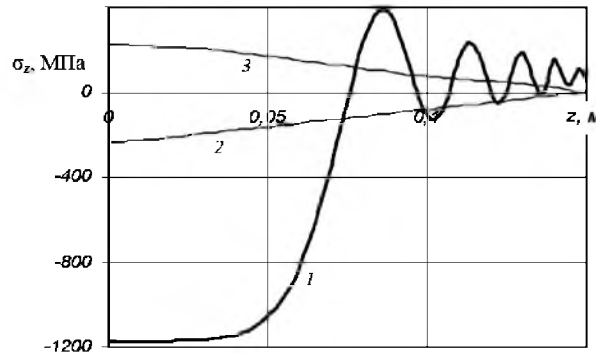


Рис. 5. Распределение осевого напряжения σ_z вдоль оси стержня от центра к торцу: 1 – через 18 мкс от начала ступенчатого повышения температуры; 2, 3 – соответственно 30 и 90 мкс от начала линейного повышения температуры.

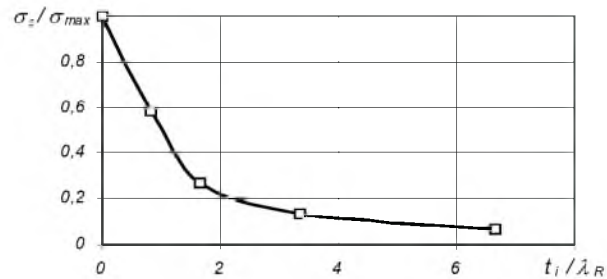


Рис. 6. Зависимость относительного продольного напряжения в цикле от относительной длительности повышения температуры.

Пинч-эффект в стальном стержне, вызванный мгновенным нарастанием тока до $I = 2 \cdot 10^4$ А, приводит к циклическому изменению в нем напряжений сжатия в радиальном направлении. Анализ результатов численного моделирования показал, что на оси стержня амплитуда колебаний напряжений σ_{aR} в радиальном направлении относительно среднего уровня напряжений сжатия σ_m приблизительно равна 17 МПа (по результатам расчетов напряжения $\sigma_m = -\sigma_{aR}$). При этом период колебаний $\lambda_R \approx 0,2$ мкс соответствует периоду радиальных колебаний стержня с собственной частотой. Амплитуда колебаний напряжений σ_{aR} наибольшая при мгновенном ($t_i = 0$) нарастании тока, с увеличением длительности нарастания тока t_i до максимума она снижается (при $t_i > 2\lambda_R$ колебания напряжений незначительны). С удалением от оси стержня уровень напряжений в радиальном направлении уменьшается.

Учитывая низкий уровень обусловленных пинч-эффектом напряжений по сравнению с уровнем продольных напряжений, их влиянием на НДС в стержне при воздействии ИЭТ можно пренебречь.

Сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными показало, что, несмотря на наличие начального продольного напряжения упругого растяжения в стержне, наложение термонапряжений вследствие пропуска импульсного тока вызывает значительный уровень напряжений сжатия в его центральной части. Это приводит к

потере продольной устойчивости, наблюдаемой экспериментально (рис. 1,б). Отметим, что указанные напряжения сжатия действуют до момента их снижения продольной волной упругой разгрузки, распространяющейся от торцов стержня. Поскольку интенсивность волны разгрузки зависит от жесткости захватов и их инерционности, реальное изменение напряжений, вызванное этой волной, может существенно отличаться от случая свободного торца. Естественно, что после потери устойчивости стержня происходит падение уровня продольных термонапряжений сжатия.

Таким образом, при пропускании ИЭТ через металлический стержень кроме известных эффектов возникает нестационарное НДС, влияние которого следует учитывать при анализе результатов экспериментальных исследований, прочностных расчетах элементов электротехнического оборудования и разработке технологий металлообработки, основанных на использовании ИЭТ.

Заключение. Быстрый нагрев длинного стержня под воздействием ИЭТ и распространение от его торцов волн упругой разгрузки приводят к циклическому изменению продольных напряжений. Максимальная амплитуда циклических напряжений растяжения–сжатия определяется длительностью фронта (время нарастания) и амплитудой ИЭТ, а частота их изменения соответствует собственной частоте продольных колебаний стержня.

Высокий уровень напряжений сжатия в центральной части стержня при воздействии ИЭТ является причиной локальной потери продольной устойчивости, зарегистрированной в экспериментах.

Импульсный электрический ток высокой плотности вызывает снижение уровня начальных растягивающих напряжений в стержне, предварительно нагруженном статической растягивающей нагрузкой. Постоянный ток низкой плотности, действующий с длительностью, обеспечивающей нагрев до тех же температур, которые достигаются при пропускании ИЭТ, не влияет на уровень начальных напряжений. Это свидетельствует о развитии процессов релаксации, не связанных с тепловым эффектом действия тока.

Наблюдаемый экспериментально процесс релаксации напряжений является результатом совместного действия электрического тока (электропластический эффект) и нестационарного НДС.

Для отдельной оценки эффектов, вызванных волнами упругих напряжений в стержне, нагревом и другими эффектами при пропускании ИЭТ, необходимы дополнительные исследования.

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

Резюме

Представлено результати експериментального та чисельного дослідження нестационарного напружено-деформованого стану в тонкому сталевому стрижні (відрізок дроту), який було попередньо розтягнуто статичним навантаженням до напружень, нижчих за границю текучості, при пропусканні імпульсу електричного струму високої густини. Дія імпульсу електричного струму призводить до осциляції осьових напружень із періодом, що відпо-

відає періоду власних поздовжніх коливань стрижня. Рівень максимальних стискальних і розтяжних напружень визначається тривалістю фронту й амплітудою імпульсу струму. Високий рівень указаних напружень у центральній частині стрижня зумовлює локальну втрату поздовжньої стійкості. Результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану в стрижні при його нагріванні в результаті дії імпульсу електричного струму відповідають ефектам, які спостерігаються експериментально. Зниження після дії струму рівня попередніх розтяжних напружень від прикладеного статичного навантаження свідчить про розвиток процесів релаксації, які пов'язані не тільки з нагріванням. Для окремої оцінки ефектів, що зумовлені хвилями пружних напружень у стрижні, нагріванням та безпосередньою дією електричного струму, необхідні додаткові дослідження.

1. Троїцкий О. А. Электромеханический эффект в металлах // Письма в журн. exper. и теорет. физики. – 1969. – № 10. – С. 18 – 22.
2. Троїцкий О. А., Розно А. Г. Электропластическая деформация металла // Физика твердого тела. – 1970. – 12, № 1. – С. 203 – 210.
3. Спицын В. И., Троїцкий О. А. Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
4. 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.
5. Беклемишев Н. Н., Корягин Н. И., Шапиро Г. С. О процессе пластической деформации в импульсном электромагнитном поле некоторых проводящих материалов // Там же. – 1985. – № 1. – С. 159 – 161.
6. Беклемишев Н. Н., Корягин Н. И., Шапиро Г. С. Влияние импульса тока на ресурс пластичности проводящих материалов // Там же. Сер. Техн. науки. – 1985. – 38, № 4. – С. 25 – 28.
7. Климов К. М., Новиков И. И. К вопросу об “электроннопластическом эффекте” // Пробл. прочности. – 1984. – № 2. – С. 98 – 103.
8. Троїцкий О. А. Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. – 1977. – № 6. – С. 118 – 122.
9. Троїцкий О. А. Соотношение теплового, пондеромоторного и электронно-пластического эффектов в цинке // Докл. АН СССР. – 1980. – 251, № 2. – С. 400 – 403.
10. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И. Релаксация напряжений в стали при пропускании тока большой плотности // Пробл. прочности. – 1993. – № 9. – С. 89 – 91.
11. Абрамова К. Б., Златин Н. А., Перегуд Б. П. Магнитогидродинамические неустойчивости жидких и твердых проводников. Разрушение проводников электрическим током // Журн. exper. и теорет. физики. – 1975. – 69, № 6 (12). – С. 2007 – 2022.

Поступила после доработки 13. 04. 2004