

Влияние импульсного электрического тока на напряженно-деформированное состояние в стальной полосе с трещиной

Г. В. Степанов, А. В. Чижик

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

Изложены результаты расчетной оценки влияния импульсного электрического тока на изменение напряженно-деформированного состояния в области вершины краевой трещины в стальной полосе с использованием метода конечных элементов. Показано, что антисимметричное действие тока высокой плотности по берегам трещины вызывает в области ее вершины локальное изменение напряженно-деформированного состояния с образованием остаточных пластических деформаций, которые суммируются с деформациями, возникшими вследствие теплового действия тока.

Ключевые слова: импульсный электрический ток, изгиб, краевой концентратор, трещина, взаимодействие токов.

Введение. При различных видах нагружения в элементах конструкций с концентраторами в виде выточек, пазов, галтельных переходов возникают трещины, что приводит к уменьшению долговечности конструкций [1–3]. Для повышения долговечности конструкции необходимо снизить влияние концентраторов напряжений на ее ресурс, что и определяет актуальность разработки технологий, обеспечивающих устойчивость к трещинообразованию и понижение максимальных напряжений в концентраторах. Сложность задачи заключается в том, что это многофакторный процесс, при котором следует учитывать как влияние напряженно-деформированного состояния (НДС), так и коррозионного воздействия [4, 5], а также температурно-временных условий нагружения [6].

Приведенные в [7, 8] результаты исследований свидетельствуют об изменении физико-механических свойств материалов и их анизотропии в широком температурном диапазоне под действием импульсного электрического тока (ИЭТ). Для повышения долговечности элементов конструкций с концентраторами представляется перспективным совместное влияние на них ИЭТ и нагрева [9–12]. Известные исследования взаимосвязи характеристик прочности при переменном нагружении с параметрами ИЭТ ограничены, а предложенные методики выбора оптимальных режимов обработки ИЭТ часто сложно реализовать [13–15]. Таким образом, накопление дополнительного объема экспериментальных и расчетных результатов по данной проблематике позволит уточнить влияние различных параметров на подобные процессы, что и определяет актуальность представленной работы.

Влияние ИЭТ высокой плотности на металл – результат одновременного действия целого ряда физических процессов. Среди них наиболее значимыми являются джоулев нагрев (однородный или неоднородный, учитывающий микронеоднородность выделения тепла, вызванную микроструктурой и различными типами дефектов кристаллической решетки металла), взаимодействие токов (пондеромоторное) и специфическое, обычно называемое электропластическим эффектом, природу которого нельзя ограничить только нагревом локальных объемов [10, 11]. Отметим, что тепловое влияние ИЭТ сохраняется также после его воздействия, в то время как взаимодействие токов (результат действия электромагнитных сил, существенных для участков с высокой плотностью тока) лимитировано длительностью импульса. Эти эффекты во

многим зависят от упругопластического поведения металла и скорости развития пластической деформации.

В настоящей работе представлены данные расчетной оценки влияния электромагнитных сил и теплового эффекта, инициированных ИЭТ, на изменение НДС вблизи краевого концентратора и трещины в металлической полосе без внешней нагрузки. Результаты получены путем моделирования с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

Моделирование НДС в полосе с концентратором. Расчеты проводили согласно схеме нагружения, применяемой ранее [15] для экспериментального определения долговечности полосы с краевым концентратором (рис. 1,а). Объектом исследования служила стальная полоса с рабочей длиной $L = 40$ мм и поперечным сечением 5×30 мм. В центральной части полосы на равноудаленном расстоянии от ее краев расположен концентратор напряжений (рис. 1).

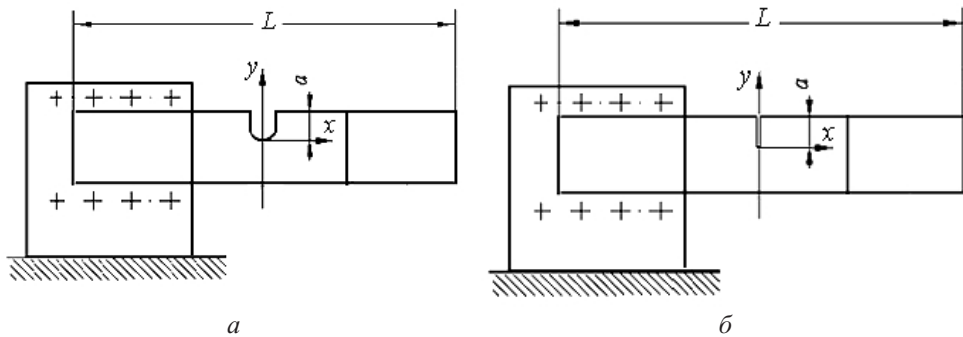


Рис. 1. Схема нагружения полосы с краевым концентратором радиусом закругления $R = 2$ мм (а) и трещиной (б).

Оценивается влияние ИЭТ на НДС в стальной полосе с концентратором напряжения глубиной $a = 6,5$ мм двух типов: краевым (радиус закругления $R = 2$ мм) и в виде трещины.

Модель поведения материала – упругопластическое деформирование при плоском деформированном состоянии с кусочно-линейным деформационным упрочнением, аналогичным используемому в [15]. Физико-механические характеристики металла, определяющие его поведение, в расчетах принимали линейно зависимыми от температуры в интервале $0 \dots 1000^\circ\text{C}$, они приближенно соответствуют стали 20:

Температура T , $^\circ\text{C}$	0/1000
Плотность ρ , кг/м^3	7800/7000
Модуль упругости E , ГПа	200/20
Коэффициент Пуассона ν	0,3/0,3
Предел текучести σ_T , МПа	244/24,4
Теплоемкость C_V , МДж/м^3	3,5/5,0
Коэффициент линейного расширения α , K^{-1}	$1,15 \cdot 10^{-5}/1,25 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент конвективного теплообмена k , $\text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	40/80
Удельное электросопротивление R , $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$	20/2

Моделирование нагрева действием ИЭТ и последующее охлаждение полосы, т.е. расчет полей температур, выполняли для нестационарного нагрева с помощью прикладной программы ANSYS ED [16].

При проведении расчета на заземленном конце полосы слева перемещения в направлении осей x и y приняты нулевыми, на свободном, правом ее конце нагрузка отсутствует. Основные расчеты выполняли с использованием МКЭ модели с квадратными элементами у дна концентратора и 12 сингулярными элементами у вершины трещины радиусом 0,1 мм.

Импульс тока в расчетах имеет форму затухающих синусоидальных колебаний. Эффект влияния ИЭТ рассчитан для импульса, вызванного разностью потенциалов $U(t)$ между торцами полосы и изменяющегося во времени по экспоненциальному закону:

$$U(t) = U_0 \exp(-t/\tau) \sin(2\pi t/\tau),$$

где U_0 – начальное значение электрического потенциала; τ – период колебаний потенциала.

В полосе с трещиной при $U_0 = 25$ В, $\tau = 250$ мкс максимальная плотность тока J у вершины трещины равна $9,8 \cdot 10^9$ А/м², а локальное повышение температуры $\Delta T \approx 1155^\circ\text{C}$ (рис. 2 и 3). На противоположном торце полосы значение плотности тока не превышает $2,5 \cdot 10^9$ А/м² ($\Delta T \approx 35^\circ\text{C}$), а на удалении от концентратора (в области равномерного потенциала) – $2,4 \cdot 10^9$ А/м² ($\Delta T \approx 32^\circ\text{C}$).

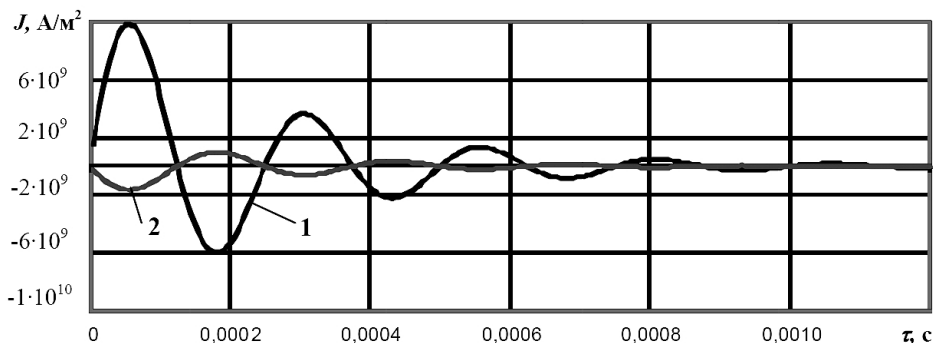


Рис. 2. Изменение во времени плотности тока в конечном элементе, прилегающем к берегу трещины за ее вершиной вдоль (1) и поперек (2) при $U_0 = 25$ В.

В полосе с краевым концентратором при $U_0 = 25$ В, $\tau = 250$ мкс максимальная плотность тока у его дна составляет $6,3 \cdot 10^9$ А/м² ($\Delta T \approx 217^\circ\text{C}$), т.е. температурный перепад намного ниже, чем у вершины трещины (рис. 3). Данные расчета показывают, что на противоположном торце полосы максимальная плотность тока $J = 2,5 \cdot 10^9$ А/м² ($\Delta T \approx 35^\circ\text{C}$), на удалении от концентратора – $2,3 \cdot 10^9$ А/м² ($\Delta T \approx 29^\circ\text{C}$). Таким образом, эти параметры близки к полученным для полосы с трещиной.

Длительность импульса, равная примерно трем периодам затухающих колебаний, определяет локальное повышение температуры у дна концентратора (вершины трещины). Влияние взаимодействия токов на напряжения в вершине трещины является незначительным по сравнению с влиянием температуры. Отметим, что инициированный ИЭТ заданных параметров нагрев (равномерный и неравномерный) полосы без нагрузки с краевым концентратором (свободное перемещение конца полосы) не вызывает существенных неупругих деформаций у дна концентратора. В полосе с трещиной в ее вершине возникает остаточная пластическая деформация, что обуславливает ее изгиб после охлаждения.

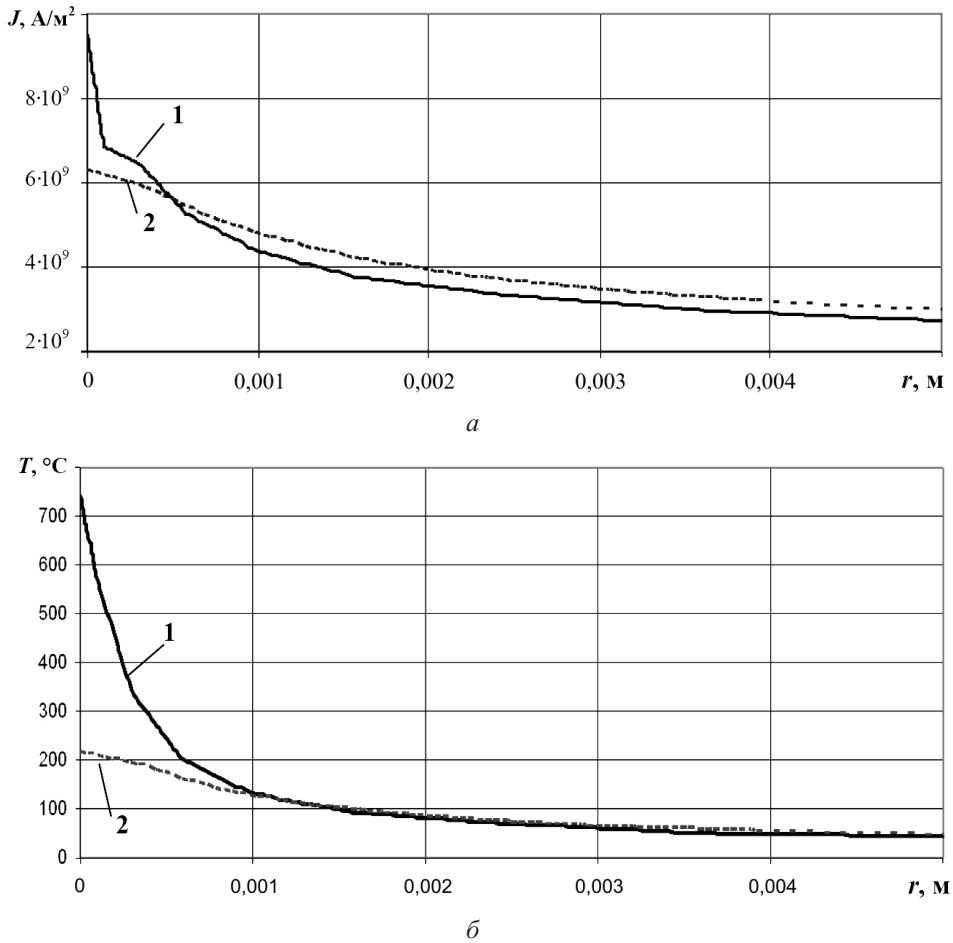


Рис. 3. Изменение максимальной плотности тока в момент времени 60 мкс (*а*) и температуры в момент времени 600 мкс (*б*) вдоль линии продолжения трещины (1) и краевого концентратора (2).

С увеличением радиуса кривизны (уменьшением R) у дна концентратора отмечается локальное повышение плотности тока и температуры. Следовательно, пропускание ИЭТ может локально повысить температуру в вершине трещины до температуры плавления. Принимая, что теплопроводность приводит к снижению градиента температуры (ее выравниванию) в области $< 0,1$ мм, максимальная расчетная температура определяется ее средней величиной в конечных элементах с таким же размером у вершины трещины.

Для упрощенной численной оценки влияния сил взаимодействия токов на НДС в вершине трещины рассматривали антисимметричное действие токов, нормальных плоскости xu и противоположных по направлению в слоях толщиной b , прилегающих к ее берегам, т.е. параллельных плоскости трещины, при линейном росте их плотности до $1 \cdot 10^9$ А/м². По результатам расчетов сила взаимодействия (отталкивания) таких токов вызывает напряжение растяжения в конечных элементах, прилегающих к вершине трещины, которое возрастает с увеличением толщины слоя b (рис. 4). При $b = 2,5$ мм это напряжение, усредненное по сингулярным элементам у вершины трещины, равно примерно 50 МПа, с повышением плотности токов в слоях толщиной b оно увеличивается (рис. 4 и 5).

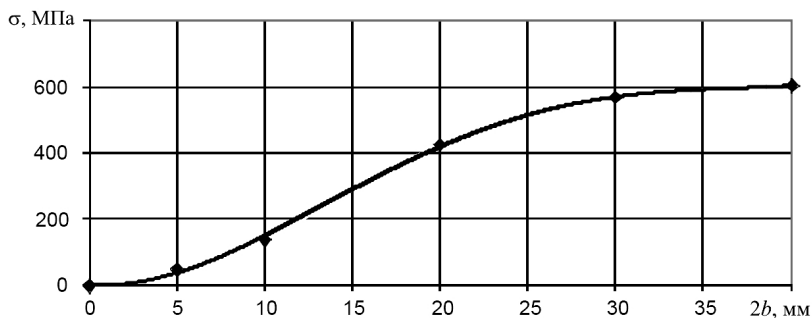


Рис. 4. Зависимость растягивающего напряжения у вершины трещины, вызванного взаимодействием токов, от толщины слоя $2b$ при плотности тока $1 \cdot 10^9$ А/м².

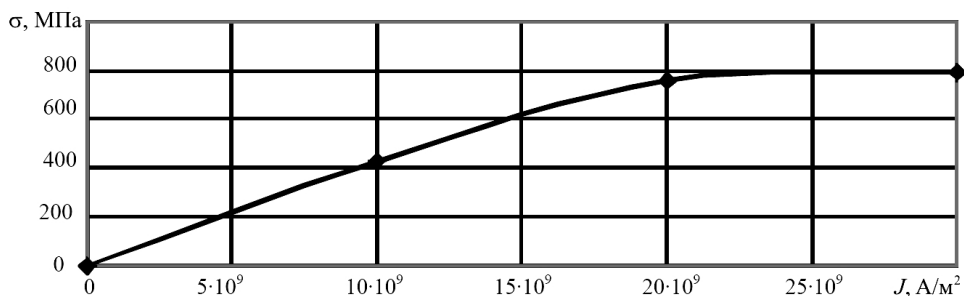


Рис. 5. Зависимость растягивающего напряжения у вершины трещины, вызванного взаимодействием токов, от плотности тока при толщине слоев $2b = 20$ мм.

Приближенная расчетная оценка напряжений в вершине трещины, обусловленных взаимодействием противоположных по направлению токов в слоях вдоль ее берегов, зависит от геометрии слоев и плотности токов (рис. 4 и 5). Принимая, что при взаимодействии токов толщина двух слоев равна 5 мм (по 2,5 мм по берегам трещины), напряжение в вершине трещины достигает 50 МПа при плотности тока $1 \cdot 10^9$ А/м². При увеличении плотности тока до $1 \cdot 10^{10}$ А/м² и толщины слоя растягивающее напряжение возрастает до 500...800 МПа (при существенном повышении температуры и среднего значения напряжения), что приводит к возникновению пластической деформации в области, прилегающей к вершине трещины (рис. 5).

Следует отметить, что НДС в вершине трещины зависит от скорости пластической деформации, определяемой временными параметрами и интенсивностью ИЭТ.

Как показывают результаты ранее проведенных исследований [11], влияние электропластического эффекта (действие ИЭТ не связано с тепловым влиянием) на НДС вблизи вершины трещины или краевого концентратора приводит к существенному его изменению. Одним из механизмов такого влияния является взаимодействие противоположно направленных токов по берегам микротрещин и по другим дефектам кристаллической решетки металла. Для более конкретного определения механизмов, имеющих место при подобном рода действии ИЭТ, требуются дополнительные оценки, основанные на результатах экспериментальных исследований.

Выводы

1. Эффект обработки полосы металла с трещиной ИЭТ, нормальным плоскости трещины, обусловлен взаимодействием токов в период действия импульса и после-

дующим тепловым его влиянием, включая нагрев и охлаждение, которые определяют величину локальной пластической деформации в вершине трещины.

2. Взаимодействие противоположно направленных токов высокой плотности по берегам трещины и локальный нагрев в ее вершине приводят к локальной пластической деформации в вершине трещины и изгибу полосы без внешней нагрузки.

3. Напряженно-деформированное состояние в вершине трещины существенно зависит от скорости пластической деформации, определяемой интенсивностью и временными параметрами ИЭТ.

Оценка специфического влияния ИЭТ (дополняет тепловое действие тока и взаимодействие токов по берегам трещины) и скорости деформации на изменение НДС у дна концентраторов напряжений является задачей дальнейших исследований.

Резюме

Викладено результати розрахункової оцінки впливу імпульсного електричного струму на зміну напружено-деформованого стану в околі вершини крайової тріщини в сталевій смугі з використанням методу скінченних елементів. Показано, що антисиметрична дія струму високої густини по берегах тріщини викликає в околі її вершини локальну зміну напружено-деформованого стану з появою залишкових пластичних деформацій, які підсумовуються з деформаціями, що виникли внаслідок теплової дії струму.

1. Махутов Н. А., Гаденин М. М. Обоснование прочности, ресурса, надежности и безопасности ГЭС: Тр. Всерос. науч.-практ. конф. "Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем" (1–3 июня 2010, Москва). Т. 2. М.: Изд. дом МЭИ, 2010. С. 201–205.
2. Куркин А. С., Батов Г. П. Предельная пластичность – универсальная локальная критериальная характеристика разрушения для оценки ресурса сварных конструкций. *Завод. лаб. Диагностика материалов*. 2010. **76**, № 6. С. 45–54.
3. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.
4. Драгунов Ю. Г., Зубченко А. С., Петрова О. Ю., Харина И. Л. Влияние воды высоких параметров на склонность стали 10ГН2МФА к замедленному деформационному коррозионному растрескиванию. *Машиностроение и инж. образование*. 2007. № 4. С. 35–41.
5. Чаусов Н. Г., Лебедев А. А., Зайцева Л. В., Гетманчук А. В. Влияние вида напряженного состояния на кинетику накопления повреждений и трещиностойкость корпусной стали 15Х2МФА в разных состояниях. *Сообщ. 1. Стадийность процесса разрушения стали КП60. Пробл. прочности*. 1993. № 3. С. 3–9.
6. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. Киев: Наук. думка, 1991. 288 с.
7. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. Т. 1. Киев: Изд. Ин-та проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2008. 504 с.
8. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Оправхата Н. Я. Влияние электрического тока на механические характеристики рельсовой стали. *Пробл. прочности*. 2010. № 4. С. 145–153.

9. Спицын В. И., Троицкий О. А. Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. 160 с.
10. Баранов Ю. В., Троицкий О. А., Авраамов Ю. С. и др. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. М.: Изд. МГИУ, 2001. 844 с.
11. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И. Влияние импульсного электрического тока высокой плотности на прочность металлических материалов и напряженно-деформированное состояние элементов конструкций. Киев: Наук. думка, 2014. 278 с.
12. Коновалов С. В., Громов В. Е., Иванов Ю. Ф. Влияние электромагнитных полей и токов на пластическую деформацию металлов и сплавов. Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2013. 293 с.
13. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И. Влияние импульсного тока высокой плотности на усталостную долговечность стального образца с концентратором. *Пробл. прочности*. 1995. № 5-6. С. 74–78.
14. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И. Влияние импульсного электрического тока на напряженно-деформированное состояние в области концентратора напряжений в консольной балке при циклическом изгибе. *Пробл. прочности*. 2010. № 2. С. 133–140.
15. Степанов Г. В., Мамеев И. А. Определение долговечности при циклических нагрузках консольной балки с концентратором напряжений при изгибе. *Пробл. прочности*. 2014. № 4. С. 43–49.
16. ANSYS Release 10.0 Documentation.

Поступила 20. 04. 2016