

Влияние импульсного электрического тока на напряженно-деформированное состояние в области концентратора напряжений в консольной балке при циклическом изгибе

Г. В. Степанов, А. И. Бабуцкий

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

Приведены результаты расчетной оценки влияния теплового эффекта, вызванного действием импульсного электрического тока, на изменение напряжений в области краевого концентратора напряжений в металлической консольной балке при ее циклическом изгибе. По результатам расчетов тепловое действие импульсного электрического тока снижает уровень максимальных растягивающих напряжений в области концентратора без изменения размаха циклических напряжений при дальнейшем нагружении. Предварительный однородный нагрев усиливает действие импульсного электрического тока. При нагружении в условиях плоского напряженного состояния влияние действия импульсного электрического тока значительно ниже, чем при плоском деформированном состоянии.

Ключевые слова: импульсный электрический ток, концентратор напряжений, циклический изгиб.

Введение. Напряженно-деформированное состояние (НДС) в области концентраторов напряжений существенно влияет на прочность и долговечность элементов конструкций при циклическом нагружении. Применение технологий, обеспечивающих снижение уровня максимальных растягивающих напряжений, приводит к повышению долговечности конструкций, что и определяет актуальность их разработки. Согласно известным литературным данным, обработка импульсным электрическим током (ИЭТ) вызывает релаксацию напряжений в обрабатываемом объеме металлического материала [1–4]. Поэтому такая обработка представляется перспективной для повышения циклической долговечности элементов конструкций с концентраторами напряжений.

Поскольку известные исследования взаимосвязи характеристик прочности при циклическом нагружении с параметрами ИЭТ [5–8] ограничены и их недостаточно для выбора оптимальных режимов обработки, расширение расчетных и экспериментальных исследований в этом направлении приобретает актуальность.

В результате действия ИЭТ на нагруженный металл проявляется ряд физических процессов, среди которых наиболее существенны тепловое (джоулев разогрев) и специфическое действие тока, обычно называемое электропластическим эффектом [1]. В данном сообщении приведены результаты расчетной оценки влияния теплового эффекта, вызванного пропуском ИЭТ, на изменение напряжений в области краевого концентратора напряжений в металлической консольной балке при ее циклическом изгибе. Электропластический эффект ИЭТ в расчетах не учитывается, хотя его вклад в перераспределение напряжений в области концентратора может быть значительным. Оценку неоднородного поля температур и НДС в области концент-

ратора напряжений, связанного с неоднородным нагревом и охлаждением металла вследствие пропуска ИЭТ, а также внешнего циклического нагружения выполняли с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

Расчетная модель. Расчеты осуществляли для стальной балки (поперечное сечение 5×30 мм, длина $L = 120$ мм) с краевым радиусным ($R = 3$ мм – рис. 1,а) и острым (глубина $C = 3,75$ мм, угол у вершины равен 60° – рис. 1,б) концентраторами напряжений в середине пролета. Модель поведения материала – упругопластическое деформирование с кинематическим линейным деформационным упрочнением. Физико-механические свойства металла в расчетах принимали как линейно зависимыми от температуры, так и постоянными при ее изменении от 0 до 1000°C (таблица). Поле температур вследствие действия ИЭТ рассчитывали путем решения задачи нестационарного нагрева.

Физико-механические свойства металла, принятые в расчетах

T , $^\circ\text{C}$	ρ , кг/м^3	E , ГПа	ν	σ_Y , МПа	M , МПа	C_V , МДж/м^3	α , К^{-1}	k , $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	r , $\text{Ом}\cdot\text{м}$
0	7800	200	0,3	300	300	3,5	$1,25 \cdot 10^{-5}$	80	$2 \cdot 10^{-7}$
1000	7700	100	0,4	3	3	7,0	$1,50 \cdot 10^{-5}$	40	$2 \cdot 10^{-7}$

Примечание. ρ – плотность, E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона, σ_Y – предел текучести, M – модуль упрочнения, C_V – теплоемкость, α – коэффициент линейного расширения, k – коэффициент конвективного теплообмена, r – удельное электросопротивление.

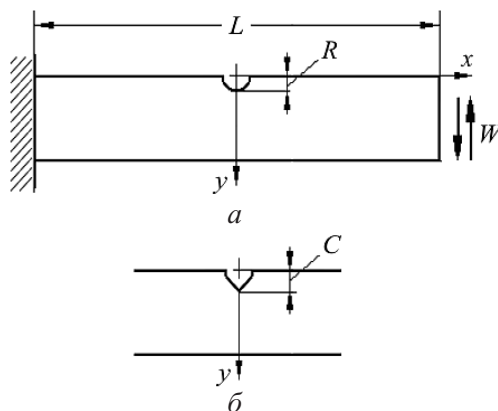


Рис. 1. Схема нагружения образца.

На защемленном конце балки перемещение в направлении осей x и y принимали нулевым, на свободном ее конце задавали одностороннее циклическое смещение с амплитудой $W = 0,5$ мм в направлении оси y (жесткое нагружение с асимметричным циклом). Основные расчеты выполняли для случая плоского деформированного состояния (ПДС) с использованием конечноэлементной модели с размерами четырехугольных конечных элементов вблизи концентратора, составляющими $0,25$ мм.

Тепловой эффект ИЭТ в расчетах определяли для импульсов тока синусоидальной формы, вызванных разностью потенциалов $U(t)$ между заземленным и свободным торцами балки и затухающих по экспоненциальному закону:

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

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

Моделирование НДС в балке с радиусным концентратором напряжений. В балке с радиусным концентратором при $U_0 = 100$ В, $\tau = 250$ мкс максимальная плотность тока в сечении концентратора у его поверхности равна $6,2 \cdot 10^9$ А/м², что приводит к локальному повышению температуры ($\Delta T \approx 217^\circ\text{C}$), на противоположном крае сечения у поверхности – $3,3 \cdot 10^9$ А/м² ($\Delta T \approx 62^\circ\text{C}$), а на удалении от концентратора (в зоне равномерного распределения тока, ближе к торцу или заземлению) – $3,2 \cdot 10^9$ А/м² ($\Delta T \approx 59^\circ\text{C}$).

Отметим, что согласно результатам моделирования как неравномерный нагрев, вызванный пропусканием ИЭТ заданных параметров, так и однородный дополнительный нагрев ненагруженной балки (свободное перемещение конца консоли) не приводят к возникновению неупругих деформаций.

Результаты расчетов НДС в балке с радиусным концентратором при сохранении амплитуды одностороннего циклического смещения $W = 0,5$ мм свидетельствуют о следующем (рис. 2):

первое нагружение балки смещением W (цикл 1) вызывает неупругое растяжение у поверхности концентратора (рост пластической деформации до $\varepsilon_x = 0,06\%$, повышение напряжения до $\sigma_x = 350$ МПа); в последующих циклах разгрузки–нагрузки (циклы 2 и 3) отношение максимального напряжения к минимальному ($\sigma_x^{\max}/\sigma_x^{\min} = 355$ МПа/–83 МПа) не изменяется, а пластическое деформирование несущественно;

обработка ИЭТ после цикла 3 (при смещении $W = 0,5$ мм), включающая нагрев (цикл 4) и охлаждение (цикл 5), вызывает рост пластической деформации с $\varepsilon_x = 0,06$ до $0,237\%$. Это изменяет отношение максимального и минимального напряжений ($\sigma_x^{\max}/\sigma_x^{\min} = 241$ МПа/–196 МПа);

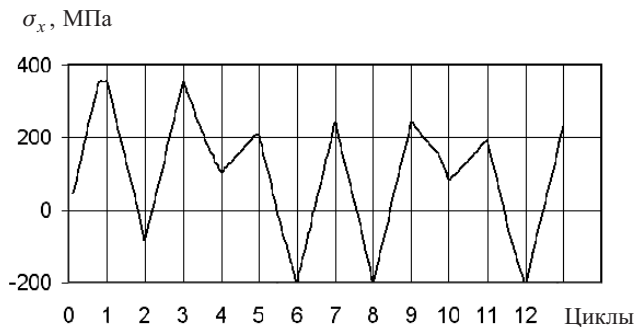


Рис. 2. Изменение напряжения σ_x у дна концентратора ($R = 3$ мм) в консольной балке при циклах смещения ее конца на $W = 0,5$ мм и дополнительных циклах повышения температуры (циклы 4 и 10), вызванных действием ИЭТ, и ее снижения вследствие охлаждения (циклы 5 и 11) в нагруженном состоянии.

повторная обработка ИЭТ при смещении $W = 0,5$ мм, включающая нагрев (цикл 10) и охлаждение (цикл 11), не приводит к заметной пластической деформации и изменению напряжений при последующих циклах нагружения.

Таким образом, обработка ИЭТ балки с радиусным концентратором (номинальная амплитуда плотности тока $3,2 \cdot 10^9$ А/м² при первом периоде колебаний) изменяет отношение циклических напряжений в области концентратора с $\sigma_x^{\max} / \sigma_x^{\min} = 355$ МПа/–83 МПа до $\sigma_x^{\max} / \sigma_x^{\min} = 241$ МПа/–196 МПа, т.е. снижает амплитуду максимальных растягивающих напряжений без изменения величины размаха циклических напряжений. По результатам расчетов на рис. 3 приведено распределение напряжений в поперечном сечении балки при ее нагружении смещением $W = 0,5$ мм и $W = 0$ без обработки и после обработки ИЭТ.

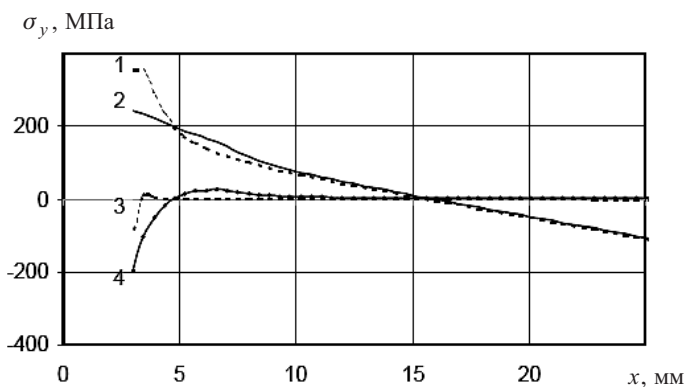


Рис. 3. Распределение напряжений в поперечном сечении балки с радиусным концентратором глубиной 3 мм при $W = 0,5$ мм (кривые 1 и 2) и $W = 0$ (кривые 3 и 4) после двух циклов нагружения: 1, 3 – без обработки ИЭТ; 2, 4 – после обработки ИЭТ.

С уменьшением разности потенциалов между торцами балки, т.е. со снижением плотности тока, влияние обработки ИЭТ на уровень растягивающих напряжений понижается:

при $U_0 = 50$ В, $\tau = 250$ мкс максимальная плотность тока у поверхности концентратора равна $3,15 \cdot 10^9$ А/м² ($\Delta T \approx 54^\circ\text{C}$), на удалении от него $1,6 \cdot 10^9$ А/м² ($\Delta T \approx 15^\circ\text{C}$); обработка ИЭТ после цикла 3 (смещение $W = 0,5$ мм) приводит к росту пластической деформации 0,096% и изменению отношения напряжений с $\sigma_x^{\max} / \sigma_x^{\min} = 355$ МПа/–83 МПа при первом цикле нагрузки–разгрузки до $\sigma_x^{\max} / \sigma_x^{\min} = 320$ МПа/–117 МПа при последующих циклах нагрузки–разгрузки;

при $U_0 = 25$ В, $\tau = 250$ мкс максимальная плотность тока у поверхности концентратора составляет $1,6 \cdot 10^9$ А/м² ($\Delta T \approx 13,5^\circ\text{C}$), на удалении от него $0,8 \cdot 10^9$ А/м² ($\Delta T \approx 3,8^\circ\text{C}$), что незначительно влияет на отношение напряжений, изменяя его с $\sigma_x^{\max} / \sigma_x^{\min} = 355$ МПа/–83 МПа до $\sigma_x^{\max} / \sigma_x^{\min} = 349$ МПа/–89 МПа, т.е. менее чем на 10 МПа.

Качественное влияние ИЭТ на диаграмму деформирования (реаксацию упругих напряжений) иллюстрирует схема, приведенная на рис. 4. После начального упругопластического деформирования по линии $0-1$ последующая разгрузка по деформации, т.е. снижение деформации до нулевого уровня, вызывает образование остаточных напряжений сжатия (точка $1'$). Дальнейшее циклическое нагружение смещением W не вызывает дополнительное пластическое деформирование, а напряжения изменяются по линии $1'-1$. Действие ИЭТ при максимальной нагрузке (смещение W), сопровождающееся нагревом и последующим охлаждением, приводит к пластической деформации материала и снижению уровня максимального растягивающего напряжения до точки 2. Деформирование при сохранении амплитуды смещения W не вызывает возникновения пластических деформаций (изменение напряжений по линии $2'-2$).

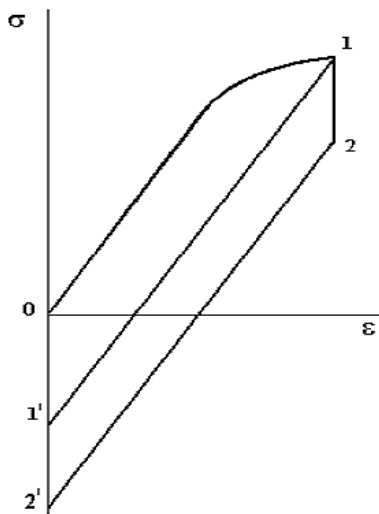


Рис. 4. Схема деформирования в области концентратора напряжений.

Данные дополнительных расчетов показывают, что однородный нагрев нагруженной изгибом балки, понижающий предел текучести, вызывает аналогичный эффект. Обработка, включающая действие ИЭТ после предварительного однородного нагрева, способствует более интенсивному снижению максимальных растягивающих напряжений, что является результатом суммирования эффектов, вызванных однородным и неоднородным нагревом.

Следует отметить, что при плоском напряженном состоянии (ПНС) влияние обработки ИЭТ на НДС при циклическом изгибе существенно ниже, чем при ПДС. Это обусловлено тем, что неоднородное термическое расширение металла при действии ИЭТ более интенсивно снижает уровень максимальных растягивающих напряжений в области концентратора ввиду пониженной объемной деформации.

Моделирование НДС в балке с острым концентратором. Обработка ИЭТ нагруженной изгибом (смещение W) балки с острым концентратором (рис. 1,б) характеризуется повышенной локализацией электрического тока, температуры и пластической деформации у его вершины. При выбранных

параметрах ИЭТ и смещения W снижение уровня максимальных растягивающих напряжений вблизи острого концентратора вследствие обработки ИЭТ существенно выше, чем вблизи поверхности радиусного концентратора.

При ПДС обработка, включающая однородный нагрев и охлаждение нагруженной изгибом балки, вызывает более интенсивное снижение максимального растягивающего напряжения у вершины острого концентратора, чем обработка ИЭТ (при равенстве температур у концентратора). Так, при однородном нагреве до 300°C и охлаждении при фиксированном смещении $W = 0,5$ мм происходит изменение отношения напряжений с $\sigma_x^{\max}/\sigma_x^{\min} = 495$ МПа/–157 МПа (до обработки) до $\sigma_x^{\max}/\sigma_x^{\min} = 238$ МПа/–413 МПа (после обработки и цикла нагрузка–разгрузка). В то же время обработка ИЭТ ($U_0 = 100$ В, $\tau = 250$ мкс), несмотря на более высокую температуру у вершины концентратора (около 430°C), способствует изменению отношения циклических напряжений до значения $\sigma_x^{\max}/\sigma_x^{\min} = 382$ МПа/–269 МПа.

Как и в случае радиусного концентратора, уровень напряжений в области острого концентратора при ПНС ниже, чем при ПДС. При ПНС однородный нагрев до 300°C и охлаждение в условиях фиксированного смещения $W = 0,5$ мм вызывают у вершины острого концентратора изменение отношения напряжений с $\sigma_x^{\max}/\sigma_x^{\min} = 330$ МПа/–232 МПа при $\varepsilon_x \approx 0,052\%$ (до обработки) до $\sigma_x^{\max}/\sigma_x^{\min} = 291$ МПа/–267 МПа при $\varepsilon_x \approx 0,045\%$ (после обработки и цикла нагрузка–разгрузка). Исключить циклическую пластическую деформацию в области концентратора до и после обработки можно только при уменьшенной величине W .

Обсуждение результатов. При вызывающей циклическое пластическое деформирование в области концентратора величине циклического нагружения эквивалентная пластическая деформация, определяемая суммированием абсолютных приращений неупругой деформации, характеризует исчерпание ресурса пластичности металла [9]. Долговечность при таком циклическом нагружении возрастает с уменьшением амплитуды циклической пластической деформации при нагрузке и разгрузке. Поэтому обработка ИЭТ, снижающая амплитуду циклических деформаций в области концентратора, является перспективной для повышения долговечности элементов конструкций.

При определении числа циклов нагружения до появления трещины следует учитывать, что вблизи радиусного концентратора деформация распространяется на значительную часть поверхности дна выборки. Следовательно, с уменьшением радиуса концентратора уменьшается объем пластически деформируемого металла. При увеличенном объеме металла в состоянии неупругого циклического деформирования уменьшается величина деформации за цикл, в результате чего увеличивается число циклов нагружения до появления макротрещины при росте радиуса концентратора.

Вышеуказанное снижение уровня растягивающих напряжений при обработке ИЭТ исключает или понижает пластическую деформацию при последующем циклическом нагружении, вследствие чего повышается долговечность.

Согласно данным моделирования обработка нагруженной изгибом консольной балки с краевым дефектом, включающая неоднородный нагрев, вызванный пропусканием ИЭТ, или однородный нагрев (либо их суммарное действие) и последующее охлаждение, способствуют дополнительному пластическому деформированию в области дефекта. При этом амплитуда циклической деформации понижается, что позволяет предположить повышение циклической долговечности, определяемой исчерпанием ресурса пластичности металла.

Выводы

1. Влияние обработки ИЭТ на понижение уровня максимальных растягивающих напряжений в области краевого концентратора (дефекта) при одностороннем циклическом изгибе проявляется в ограниченном диапазоне амплитуды циклических напряжений. Предварительный однородный нагрев усиливает эффект действия ИЭТ.

2. Влияние обработки ИЭТ на НДС при ПНС существенно ниже, чем при ПДС, из-за различной величины объемной деформации.

Оценка влияния специфического (не связанного с тепловым) действия ИЭТ на изменение НДС в области концентратора напряжений в балке при ее циклическом нагружении является задачей дальнейших исследований.

Резюме

Наведено результати розрахункової оцінки впливу теплового ефекту внаслідок дії імпульсного електричного струму на зміну напружень в області крайового концентратора напружень у металевій консольній балці при її циклічному згині. За результатами розрахунків теплова дія імпульсного електричного струму зменшує рівень максимальних напружень розтягу в області концентратора без зміни розмаху циклічних напружень при подальшому навантаженні. Попереднє однорідне нагрівання підсилює дію імпульсного електричного струму. При навантаженні в умовах плоского напруженого стану вплив дії імпульсного електричного струму значно нижчий, аніж при плоскому деформованому стані.

1. Спицин В. И., Троицкий О. А. Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
2. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И. Воздействие электрического тока на релаксацию напряжений в металле // Пробл. прочности. – 1996. – № 2. – С. 68 – 72.
3. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А., Олисов А. Н. Влияние импульса электрического тока на уровень напряжений в металлической полосе при ее растяжении // Там же. – 2005. – № 6. – С. 61 – 67.
4. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А., Олисов А. Н. Анализ процесса релаксации растягивающих напряжений под действием импульса электрического тока // Там же. – 2006. – № 1. – С. 116 – 127.

5. *Соснин О. В., Громов В. Е., Козлов Э. В.* Электростимулированная малоцикловая усталость. – М.: Недра Коммуникейшенс Лтд, 2000. – 208 с.
6. *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.
7. *Богуслаев В. А., Долматов А. И., Жеманюк П. Д. и др.* Повышение ресурса деталей ГТД из титановых сплавов. – Запорожье, 2000. – 110 с.
8. *Лоскутов С. В., Левитин В. В.* Влияние электроимпульсной обработки на структуру и долговечность титановых сплавов // Журн. техн. физики. – 2002. – **72**, вып. 4. – С.133 – 135.
9. *Троценко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А. и др.* Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – Киев: Ин-т пробл. прочности НАН Украины, 2000. – 569 с.

Поступила 21. 05. 2007