

Влияние обработки импульсным магнитным полем на сопротивление разрушению образца с трещиной

Г. В. Степанов, В. В. Харченко, А. А. Котляренко, А. И. Бабуцкий

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

Приведены результаты экспериментальных исследований по оценке влияния обработки импульсным магнитным полем образцов из стали 45 с трещиной на их сопротивление разрушению. Перед обработкой образцы механически нагружали до уровня напряжений в вершине трещины, при которых значение коэффициента интенсивности напряжений ниже критического. В результате обработки под действием импульсного магнитного поля в образце происходит релаксация напряжений вследствие пластического течения в вершине трещины, что приводит к ее притуплению. Данные испытаний обработанных образцов свидетельствуют о существенном повышении сопротивления разрушению по сравнению с таковыми образцов в исходном состоянии.

Ключевые слова: сопротивление разрушению, релаксация напряжений, импульсное магнитное поле.

Введение. В настоящее время после обнаружения в конструкции трещины зачастую ее эксплуатация не прекращается. Обычно в таком случае вначале оценивается степень опасности трещины: с учетом характеристик сопротивления разрушению (K_{1c} , K_c , δ_c) определяется способность конструкции функционировать с имеющейся трещиной. Применение характеристик сопротивления разрушению, в первую очередь K_{1c} , в качестве критериев прочности позволяет рассчитать максимально допустимую нагрузку в конструкции с трещиной известных размеров, при которой еще не начнется ее неконтролируемое разрушение. Можно решить и обратную задачу – определить критический размер трещины при известной нагрузке.

Одновременно с этим, как правило, предпринимаются меры по предотвращению дальнейшего распространения трещины. Например, корректируют режим эксплуатации конструкции в сторону снижения уровня ее нагруженности, используют различные конструктивные решения: применение на пути движения трещины элементов жесткости и накладок из материала с высокой вязкостью, приваренных или приклепанных к листовым конструкциям; нанесение барьерных швов [1]; засверливание в вершине трещины так называемого “разгружающего” отверстия и т.п.

Актуальность задачи повышения сопротивления разрушению ответственных конструкций и их элементов обуславливает необходимость проведения дальнейших исследований по разработке новых конструктивно-технологических ее решений. В частности, практический интерес представляет возможность использования обработки элементов конструкций с трещинами импульсным электромагнитным полем. Многочисленные исследования в этом направлении начали проводиться в 1970–1980 годах [2–8], однако и в настоящее время они представляют интерес [9–13].

В основе исследований лежит известный эффект, заключающийся в том, что при обработке импульсным электромагнитным полем электропроводного тела с трещиной в силу естественных причин в ее вершине происходит резкая концентрация электрического и магнитного поля (аналогично концентрации механических напряжений и деформаций при нагружении растяжением). В результате термического действия электрического тока (джоулев разогрев) и электропластического эффекта при определенных условиях, прежде всего при достаточной плотности тока, может происходить “залечивание” трещины – ее заплавление или, наоборот, формирование кратера в вершине, т.е. образование разгружающего отверстия подобно засверливанию.

Вместе с тем анализ существующих методов повышения сопротивления разрушению показывает, что для этого радикальные изменения в вершине трещины (расплавление и выброс металла, приводящий к формированию кратера) необязательны. Например, исследования [14–18] указывают на то, что предварительное нагружение образца с трещиной при повышенной температуре положительно влияет на сопротивление хрупкому разрушению при последующем его нагружении при более низкой температуре. В литературных источниках эта процедура получила название “предварительное тепловое нагружение”, она включает нагружение элемента конструкции с трещиной при повышенной температуре (как правило, выше температуры вязкохрупкого перехода) и последующую разгрузку. При этом считается, что эффект повышения сопротивления разрушению обусловлен действием следующих основных факторов: нагружение и последующая разгрузка в окрестности вершины трещины приводят к сжимающим остаточным напряжениям; при повышенном пластическом течении в вершине трещины происходит ее притупление; в окрестности вершины трещины формируется деформационно-упрочненная структура материала.

Следует отметить, что эффект пластического течения в вершине трещины может быть достигнут и другими методами. В частности, ниже приведены результаты исследования влияния импульсного магнитного поля (ИМП) на притупление трещины в образце, изначально нагруженном до уровня напряжений в ее вершине, при которых значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) ниже критического K_{Ic} . Течение металла в вершине трещины в данном случае является результатом релаксации напряжений вследствие действия так называемого электро- и магнитопластического эффектов [19–23], что приводит к дополнительному раскрытию берегов трещины (ее притуплению) и, как следствие, повышению характеристик сопротивления разрушению.

Образцы, методики обработки и испытаний. Для экспериментального исследования сопротивления материала разрушению использовали образцы с трещиной – компактные СТ образцы (при испытании на внецентренное растяжение) и гладкие (при испытании на одноосное растяжение). Образцы изготавливали из одного и того же листа горячекатаной среднеуглеродистой стали 45 в состоянии поставки следующего химсостава (%): 0,45 C; 0,5...0,8 Mn; < 0,25 Ni; < 0,25 Cr; < 0,05 Cu; 0,17...0,37 Si; < 0,08 As; < 0,035 P; < 0,04 S.

Компактные СТ образцы изготавливали толщиной $B = 4$ мм и шириной $W = 14$ мм, остальные геометрические размеры и пропорции удовлетворяли требованию стандарта [24]. Начальный надрез в образце выполняли перпендикулярно направлению прокатки. Пятикратные гладкие образцы для испытаний на растяжение с прямоугольным рабочим сечением 2×5 мм изготавливали согласно стандарту [25], за исключением увеличенной длины захватных частей. Эти образцы вырезали с учетом обеспечения ориентации их оси в направлении прокатки. Для снятия возможных остаточных напряжений в материале образцов их подвергали отжигу по режиму: нагрев в вакуумной печи до температуры 800°C , затем охлаждение с печью до комнатной температуры.

После отжига в каждом СТ образце выращивали усталостную трещину [24]. Образцы нагружали циклической нагрузкой с асимметрией цикла 0,1 путем перемещения активного захвата по синусоидальному закону с частотой 20 Гц на машине с сервогидравлическим приводом BiSS-202-V (Индия). Нагружение останавливали по достижении длины трещины a , соответствующей соотношению $a/W = 0,5$. Трещина выращивалась за два этапа: на первом (80% длины усталостной трещины) прикладывалась максимально допустимая нагрузка, на втором – нагрузка ступенчато снижалась по экспоненциальному закону таким образом, чтобы выполнялось следующее требование: на последнем этапе K_{\max} не должно превышать 60% K_c материала ($K_{\max} = 24,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, что соответствует нагрузке 1,21 кН). Окончательный замер общей длины трещины, включающей надрез и усталостную трещину, проводили на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axiotech Vario (Германия).

При проведении обработки СТ образцов, включающей предварительное механическое нагружение и воздействие ИМП, образец устанавливали между двумя индукторами (ближний индуктор на рис. 1 не показан). Перед воздействием ИМП образец с помощью испытательной машины нагружали с целью формирования растягивающих начальных упругопластических напряжений в вершине трещины, а также для снижения электрического контакта между ее берегами.

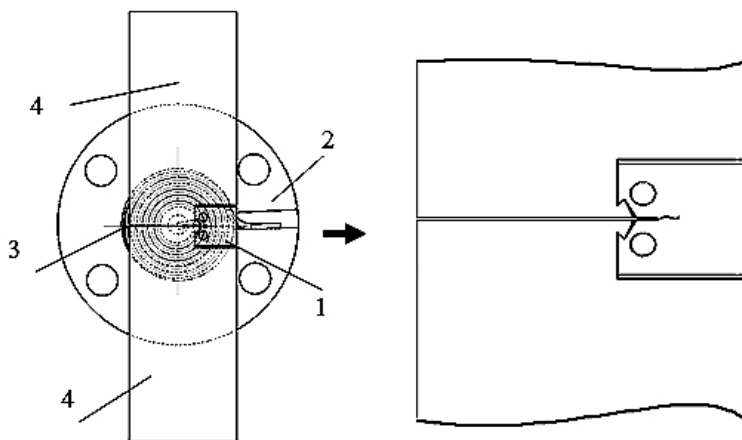


Рис. 1. Расположение СТ образца при обработке: 1 – образец; 2 – корпус индуктора; 3 – витки индуктора; 4 – тяги для механического нагружения.

Из-за наличия индукторов использовать обычные вилочные захваты для нагружения СТ образца оказалось невозможным. Поэтому были изготовлены специальные тяги, по форме подобные вырезам на образце, для установки датчика измерения раскрытия трещины (рис. 1). Толщина тяг равнялась толщине испытываемых образцов. Перед обработкой СТ образец с предварительно выращенной усталостной трещиной вставляли в вырезы тяг, затем всю сборку размещали в силовой цепи испытательной машины и нагружали в жестком режиме усилием порядка 1 кН, что несколько ниже уровня нагрузки, соответствующей значению K_{\max} на последнем этапе выращивания усталостной трещины. Учитывая, что нагрузка в случае выращивания усталостной трещины, когда образец с помощью шпилек фиксировался в вилочных захватах, и при обработке, когда образец фиксировался в замках специальных тяг, прикладывалась в разных точках, значения K_{\max} корректировали в зависимости от точки ее приложения.

После предварительного нагружения силовой цепи с обеих сторон образца устанавливали индукторы, обеспечивая соответствующее расположение образца с трещиной по отношению к индуктору (рис. 1) и избегая чрезмерного затягивания болтов.

При обработке ИМП возбуждалось путем разряда предварительно заряженной батареи высоковольтных конденсаторов через последовательно соединенные индукторы, установленные с обеих сторон образца (рис. 1) и стянутые четырьмя болтами для предотвращения их смещения вследствие взаимного отталкивания (ток в индукторах протекал в одном направлении). При этом с помощью пояса (катушки) Роговского и высокочастотной аналого-цифровой платы PCI-9810 (ADLINK Technology, Тайвань), установленной на персональном компьютере, регистрировали параметры тока разряда. Для всех образцов использовали один и тот же режим зарядки батареи конденсаторов: напряжение $U_0 = 3,5$ кВ; емкость $C = 1200$ мкФ. Для снижения частоты колебаний тока и, следовательно, частоты магнитного поля в цепь разряда дополнительно помещали катушку индуктивности. Согласно результатам регистрации ток разряда составляет примерно 11 кА при общей длительности около 10 мс (рис. 2).

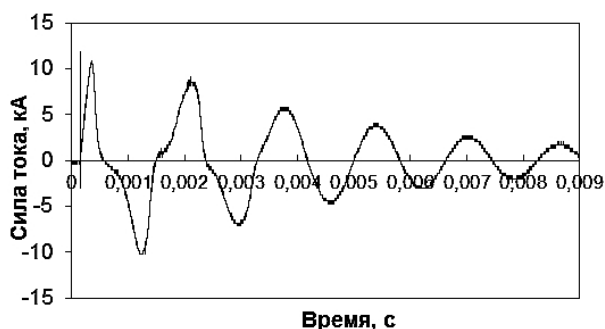


Рис. 2. Вид импульса тока, проходящего через индукторы при обработке образцов.

В процессе обработки проводили регистрацию усилия на образце. На рис. 3 приведена диаграмма нагружения СТ образца на машине ИР 5047-50-02 (Точприбор, Россия). Видно, что после нагружения до 1 кН и остановки

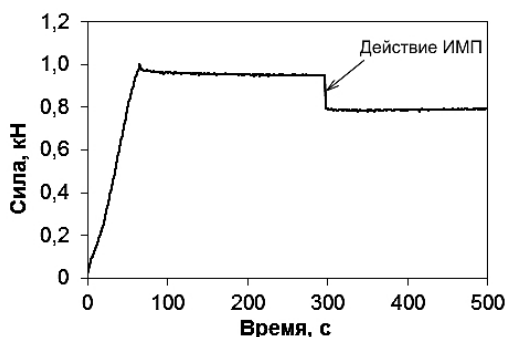


Рис. 3. Диаграмма нагружения СТ образца при обработке.

активного захвата в силовой цепи машины имеет место небольшая естественная релаксация нагрузки на уровне 2...3%, после воздействия ИМП происходит существенный ее сброс (релаксация) примерно на 10%.

При обработке также регистрировали прирост температуры в вершине усталостной трещины потенциометром КСП-4 с использованием хромель-алюмелевой термопары (диаметр проволок 0,2 мм), которую прижимали к поверхности образца. Для исключения повреждения потенциометра индуцированными токами замер температуры осуществляли через 1...2 с после разряда конденсаторов. В результате обработки в окрестности вершины трещины было зарегистрировано повышение температуры примерно на 4°C. После обработки образец полностью разгружали.

Испытания как исходных компактных СТ образцов, так и после обработки проводили при комнатной температуре на испытательной машине ViSS-202-V. При этом регистрировали усилие, прикладываемое к образцу, и раскрытие трещины с помощью датчика Vi-06-201 (ViSS, Индия). По полученным экспериментальным данным в соответствии с требованиями стандарта [24] рассчитывали максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений K_{max} и коэффициента прочности R_{sc} :

$$K_{max} = \frac{P_{max}}{BW^{1/2}} f(a/W),$$

где

$$f(a/W) = \frac{1}{(1 - a/W)^{3/2}} \times$$

$$\times (2 + a/W)(0,866 + 4,64(a/W) - 13,32(a/W)^2 + 14,72(a/W)^3 - 5,6(a/W)^4);$$

$$R_{sc} = \frac{2P_{max}(2W + a)}{B(W - a)^2 \sigma_{YS}},$$

где P_{max} – максимальное усилие, зарегистрированное в ходе эксперимента; W , B – ширина и толщина образца; a – длина трещины; σ_{YS} – предел текучести; R_{sc} – коэффициент прочности СТ образца.

Для контроля изменения характеристик прочности материала в результате обработки проводили испытания на одноосное растяжение гладких образцов. Как и в случае СТ образцов, при обработке их размещали между двумя коаксиально установленными индукторами (ближний индуктор не показан) – рис. 4. Перед обработкой образцы с помощью испытательной машины ИР 5047-50-02 в жестком режиме нагружения предварительно подгружали усилием, которое составляло 80% предела текучести, определенного по результатам испытаний на одноосное растяжение образцов в исходном состоянии. Обработку осуществляли с использованием аналогичного импульса тока, как и в случае СТ образцов (те же значения напряжения, емкости и та же дополнительная катушка индуктивности).

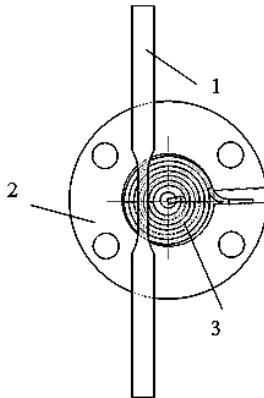


Рис. 4. Расположение образца для испытаний на одноосное растяжение при обработке ИМП: 1 – образец; 2 – корпус индуктора; 3 – витки индуктора.

Регистрация усилия на образце в процессе обработки показала, что характер нагружения и сброса нагрузки в результате релаксации напряжений, вызванной действием ИМП (сброс нагрузки составил примерно 5%), аналогичен приведенному на рис. 3. По данным регистрации температуры термопарой, прижатой к центральной части образца, его нагрев при действии ИМП равен около 12°C.

Образцы в исходном состоянии и после обработки испытывали на одноосное растяжение на машине с сервогидравлическим приводом ViSS-100 (Индия). Испытания проводили на воздухе при комнатной температуре. Нагружение осуществляли путем перемещения активного захвата машины с контролем скорости нагружения. Скорость деформации образца контролировали экстензометром Instron 2620-602 (Великобритания). Скорость деформации рабочей части образца задавали равной 2 мм/мин. В ходе испытания регистрировали диаграмму растяжения в координатах нагрузка–деформация с дальнейшим определением механических свойств материала.

Анализ результатов. Данные испытаний образцов приведены в табл. 1, 2 и на рис. 5. Результаты испытаний СТ образцов обрабатывали с использованием вышеприведенных зависимостей для коэффициента интенсивности напряжений K_{\max} и коэффициента прочности R_{sc} с учетом данных испытаний гладких образцов (табл. 2). Вполне очевидно, что при толщине СТ образца 4 мм у вершины трещины возникает большая пластическая зона.

Т а б л и ц а 1

Характеристики трещиностойкости стали 45 в исходном и обработанном состоянии

Состояние образца	a , мм	W , мм	B , мм	P_{\max} , кН	K_{\max} , МПа $\sqrt{м}$	R_{sc}
Исходное	6,69	14	4	2,46	46,96	2,12
	7,03	14	4	2,31	47,49	2,22
	7,26	14	4	2,12	46,04	2,20
После обработки	7,07	14	4	2,47	51,31	2,60
	7,16	14	4	2,47	52,3	2,68
	7,25	14	4	2,4	52,01	2,68
	7,29	14	4	2,47	53,86	2,79
	7,20	14	4	2,5	53,50	2,74

Т а б л и ц а 2

Характеристики прочности стали 45 в исходном и обработанном состоянии

Состояние образца	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
Исходное	200	381	609
	203	379	617
	204	373	612
	202	370	608
После обработки	177	345	599
	192	347	608
	190	351	609
	187	349	602

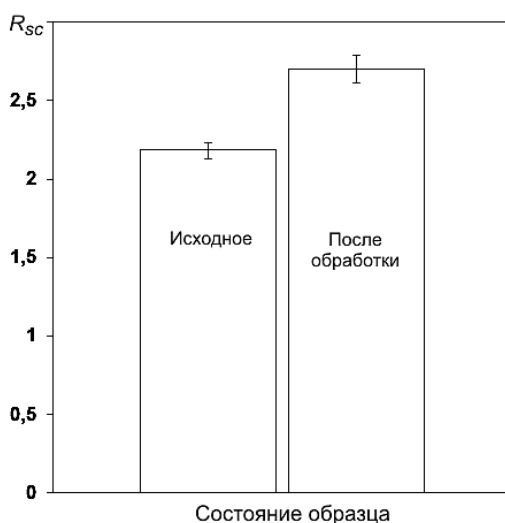


Рис. 5. Значения коэффициента прочности R_{sc} .

Следовательно, рассчитанные значения K_{\max} при плоской деформации являются качественной оценкой (не выполняется известное требование $B > 2,5(K_{1c}/\sigma_{YS})^2$). Однако в нашем исследовании все же используется коэффициент интенсивности напряжений K_{\max} , поскольку это простейший критерий из имеющихся, позволяющий оценить эффект влияния обработки на поведение трещины и связывающий нагрузку с ее длиной. Также для анализа результатов обработки на рис. 5 приведен график изменения коэффициента прочности R_{sc} в зависимости от состояния образца, который в соответствии со стандартом [24] рекомендуется принимать во внимание в случае невозможности корректного расчета K_{\max} .

Результаты испытаний СТ образцов свидетельствуют о существенном влиянии обработки ИМП на способность трещины к распространению: в терминах коэффициента прочности R_{sc} повышение сопротивляемости материала распространению трещины увеличилась на 24%. Результаты испытаний на одноосное растяжение гладких образцов (табл. 2) показывают, что обработка практически не влияет на предел прочности σ_B материала, однако приводит к заметному снижению предела текучести $\sigma_{0,2}$ (на 7%) и модуля упругости E (на 8%).

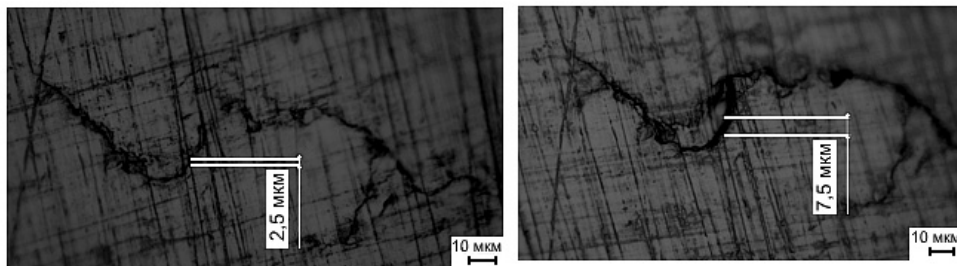
По-видимому, основное влияние обработки на повышение сопротивления разрушению может быть обусловлено эффектом притупления трещины вследствие пластического течения в ее вершине. Из данных, представленных на рис. 3, следует, что в результате воздействия ИМП в образце происходит релаксация напряжений. Вполне естественно предположить, что основной областью, в которой начальные упругопластические напряжения приводят к повышению пластической составляющей (в этом заключается релаксация напряжений), является наиболее нагруженная область у вершины трещины.

Вывод о притуплении трещины вследствие пластической деформации в вершине можно сделать исходя из зарегистрированного расхождения ее берегов. На рис. 6 показано расхождение берегов трещины при испытании СТ образца в исходном состоянии и после обработки ИМП с последующей полной разгрузкой от силовой цепи. В образце после обработки разница в раскрытии берегов трещины на удалении 30 мкм от ее вершины составила 5 мкм по отношению к исходному. При этом, в отличие от ранее выполненных исследований [2–13], при использованных в данной работе параметрах ИМП отсутствуют какие-либо следы оплавления у вершины трещины.

Анализ природы зарегистрированной в настоящих экспериментах релаксации напряжений в вершине трещины при действии ИМП требует отдельного рассмотрения. На наш взгляд, основной вклад в релаксацию напряжений вносят эффекты нетермического происхождения. Об этом свидетельствуют результаты измерений температуры у вершины трещины, а также отсутствие зон с цветами побежалости на поверхности образца (рис. 6).

Из фрактографий изломов образцов видно, что следы оплавления у вершины трещины при использованной обработке отсутствуют, не подтверждается и существенное термическое влияние, вызывающее изменение свойств материала в области перехода от усталостной трещины к статическому долому. На рис. 7 приведены фрактограммы изломов СТ образцов в исходном

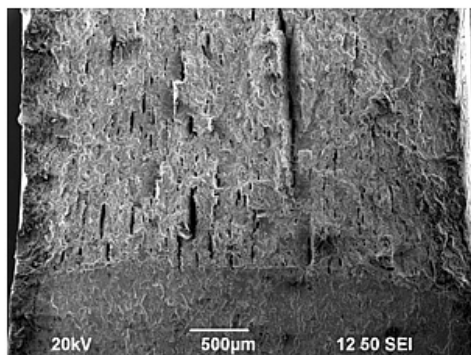
состоянии и после обработки, полученные с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL JCM-5700 (Великобритания). После обработки на изломах отсутствуют следы оплавления, в частности в точке с наибольшей концентрацией индуцированного тока (точка пересечения фронта трещины с боковой поверхностью образца) – рис. 7. При этом внешний вид поверхностей изломов образцов в исходном состоянии и после обработки практически идентичен.



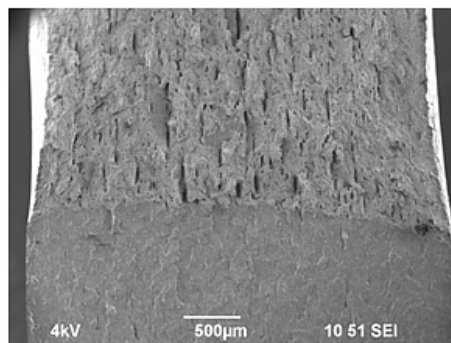
a

б

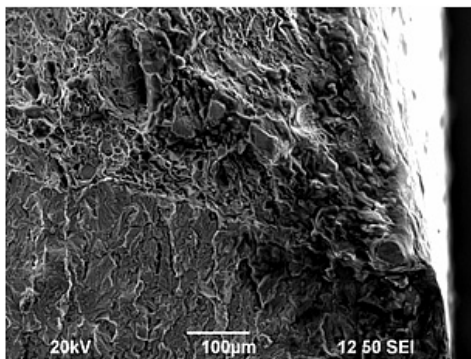
Рис. 6. Вид вершины усталостной трещины (движение трещины справа налево) до (*a*) и после (*б*) обработки СТ образца.



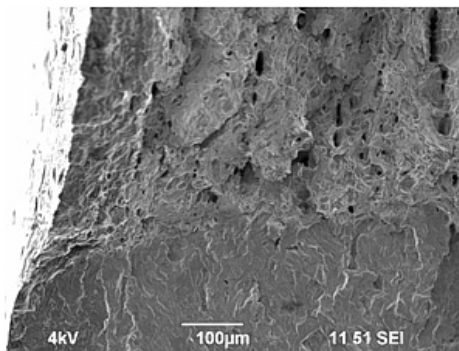
a



б



в



г

Рис. 7. Вид изломов СТ образцов в исходном состоянии (*a*, *в*) и после обработки (*б*, *г*): *a*, *б* – общий вид изломов; *в*, *г* – кромка с зоной перехода от усталостной трещины к статическому долому.

О нетермическом характере релаксации напряжений при обработке ИМП свидетельствуют результаты, полученные с использованием гладких образцов. Прежде всего, обращает на себя внимание факт существенной релаксации напряжений в случае их обработки при зарегистрированном разогреве не более 12°C. Если при обработке ИМП образца с трещиной корректно измерять температуру в вершине достаточно сложно, то для плоских образцов ее достоверность не вызывает сомнений.

Таким образом, зарегистрированная релаксация напряжений в гладких образцах при испытаниях на растяжение (на уровне 5%) обусловлена действием электро- и магнитоэластического эффектов [19–23]. В основе указанных эффектов лежит повышение мобильности дислокаций под действием электрического тока и магнитного поля. Об этом свидетельствуют полученные данные о существенном снижении (на 8%) значений модуля упругости в результате обработки. Известно, что модуль упругости материала определяется его дислокационной структурой и является функцией плотности и подвижности дислокаций [26]. Его снижение является, прежде всего, следствием открепления дислокаций от всевозможных стопоров (атмосфер Котрелла и др.).

Вместе с тем эффект термического разупрочнения материала в вершине трещины в результате действия индуцированных токов и магнитного поля также не может быть полностью исключен. Для уточнения возможного термического влияния обработки на релаксацию напряжений в вершине трещины следует провести дополнительные исследования. В частности, необходимо выполнить численное моделирование обработки образца с трещиной с целью определения распределения индуцированных токов и температуры в ее вершине, что является задачей дальнейших исследований.

Выводы

1. Результаты испытаний гладких образцов на одноосное растяжение свидетельствуют о том, что обработка практически не влияет на предел прочности материала, однако вызывает заметное снижение предела текучести (на 7%) и модуля упругости (на 8%).

2. Результаты испытаний обработанных ИМП компактных СТ образцов показали существенное повышение сопротивления разрушению по сравнению с образцами в исходном состоянии (коэффициент прочности R_{sc} увеличился на 24%).

3. Повышение сопротивления разрушению обработанных СТ образцов следует в основном связывать с притуплением вершины трещины вследствие пластического течения в ее области из-за релаксации начальных упруго-пластических напряжений под действием электро- и магнитоэластического эффектов.

Резюме

Наведено результати експериментальних досліджень по оцінці впливу обробки імпульсним магнітним полем зразків зі сталі 45 із тріщиною на їх опір руйнуванню. Перед обробкою зразки механічно навантажували до рівня

напружень у вершині тріщини, за яких значення коефіцієнта інтенсивності напружень нижче за критичне. У результаті обробки під дією імпульсного магнітного поля у зразку має місце релаксація напружень внаслідок пластичної течії у вістрі тріщини, що призводить до її притуплення. Результати випробувань оброблених зразків показали істотне підвищення опору руйнуванню в порівнянні зі зразками в початковому стані.

1. *Разрушение* / Под ред. Г. Либовица. Т. 5. Расчет конструкций на хрупкую прочность. – М.: Машиностроение, 1977. – 466 с.
2. *Финкель В. М., Головин Ю. И., Слетков А. А.* О возможности торможения быстрых трещин импульсами тока // Докл. АН СССР. – 1976. – **227**, № 4. – С. 848 – 851.
3. *Финкель В. М., Головин Ю. И., Слетков А. А.* Испытания труб и локализация разрушения в них электродинамическим способом // Завод. лаб. – 1976. – № 7. – С. 861 – 865.
4. *Головин Ю. И., Финкель В. М., Слетков А. А.* Влияние импульсов тока на кинетику распространения трещин в кремнистом железе // Пробл. прочности. – 1977. – № 2. – С. 86 – 91.
5. *Финкель В. М., Головин Ю. И., Слетков А. А.* Разрушение вершины трещины сильным электромагнитным полем // Докл. АН СССР. – 1977. – **237**, № 2. – С. 325 – 327.
6. *Финкель В. М., Головин Ю. И., Слетков А. А.* Образование кратера в вершине трещины под действием мощного локального электромагнитного поля // Физика и химия обраб. материалов. – 1977. – № 3. – С. 18 – 23.
7. *Финкель В. М., Иванов В. М., Головин Ю. И.* Залечивание трещин в металлах скрещенными электрическим и магнитным полями // Пробл. прочности. – 1983. – № 4. – С. 54 – 58.
8. *Doelp G. G. S.* Experimental and Currents and Electromagnetic Blunting of Cracks in Thin Plates. – MS Thesis. – Cornell University, 1984.
9. *Satapathy S., Stefani F., and Saenz A.* Crack tip behavior under pulsed electromagnetic loading // IEEE Trans. Magn. – 2005. – **41**. – P. 226 – 230.
10. *Gallo F., Satapathy S., and Ravi-Chandar K.* Melting and cavity growth in the vicinity of crack tips subjected to short-duration current pulses // Ibid. – 2009. – **45**. – P. 584 – 586.
11. *Liu T. J. C.* Thermo-electro-structural coupled analyses of crack arrest by Joule heating // Theor. Appl. Fract. Mech. – 2008. – **49**. – P. 171 – 184.
12. *Liu T. J. C.* Crack repair performance of piezoelectric actuator estimated by slope continuity and fracture mechanics // Eng. Fract. Mech. – 2008. – **75**. – P. 2566 – 2574.
13. *Gallo F., Satapathy S., and Ravi-Chandar K.* Melting and crack growth in electrical conductors subjected to short-duration current pulses // Int. J. Fract. – 2011. – **167**. – P. 183 – 193.

14. *Chell G. G., Haigh J. R., and Vitek V.* A theory of warm prestressing: experimental validation and implications for elastic plastic failure criteria // *Ibid.* – 1981. – **17**, No. 1. – P. 61 – 81.
15. *Curry D. A.* A micromechanical approach to the warm pre-stressing of ferritic steels // *Ibid.* – No. 3. – P. 335 – 343.
16. *Pokrovsky V. V., Troshchenko V. T., Kaplunenko V. G., et al.* A promising method for enhancing resistance of pressure vessels to brittle fracture // *Int. J. Press. Vess. Piping.* – 1994. – **58**. – P. 9 – 24.
17. *Покровский В. В., Иванченко А. Г.* Влияние режимов предварительного термомеханического нагружения на повышение сопротивления хрупкому разрушению теплоустойчивых сталей // *Пробл. прочности.* – 1999. – № 2. – С. 126 – 138.
18. *Smith D. J., Hadidimound S., and Fowler H.* The effect of warm pre-stressing on cleavage fracture. Pt. 1: Evaluation of experiments // *Eng. Fract. Mech.* – 2004. – **71**. – P. 2015 – 2032.
19. *Спицын В. И., Троицкий О. А.* Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
20. *Sprecher A. F., Mannan S. L., and Conrad H.* On the mechanisms for the electroplastic effects in metals // *Acta Metal.* – 1986. – **34**, No. 7. – P. 1145 – 1162.
21. *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.
22. *Степанов Г. В., Бабуцкий А. И.* Оценка влияния импульсного электрического тока высокой плотности на скорость пластической деформации металлов // *Там же.* – № 2. – С. 105 – 113.
23. *Головин Ю. И., Моргунов Р. Б.* Магнитопластические эффекты в кристаллах // *Изв. РАН.* – 1997. – **61**, № 5. – С. 850 – 859.
24. *E399-90.* Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials // *Annual Book of ASTM Standards*, 1997.
25. *ГОСТ 1497-84.* Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 01.01.86.
26. *Островский А. А.* Влияние предварительной пластической деформации на величину модуля упругости стали // *Пробл. прочности.* – 1975. – № 4. – С. 93 – 94.

Поступила 15. 03. 2012