УДК 620.17

## Е.А. МОЙСЕЙЧИК

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

## О МЕХАНИЗМЕ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ

В статье на основании экспериментальных данных исследован механизм зарождения и развития трещины в окрестности дефектов при статическом растяжении листовых элементов из низкоуглеродистой стали. Показано, что разрушение инициируется начальной трещиной параболической формы, зарождающейся у дефектов конструктивно-технологического происхождения. На основании корреляционных зависимостей установлено, что форма и размеры начальной трещины определяются объемом пластически деформированного материала в основании дефекта и физико-химическими процессами, развивающимися в этом объеме. С использованием инфракрасного излучения деформационных источников тепла показано, что в материале деформируемого элемента при нагружении происходит образование блоков с различным напряженно-деформированным состоянием. Сделано предположение, что развитие начальной трещины в упруго напряженном блоке предопределяет его хрупкий излом, а развитие трещины по траекториям максимальных касательных напряжений приводит к вязкому разрушению образца.

**Ключевые слова:** статическое растяжение, трещина, нагружение, напряженно-деформироканное состояние, низкоуглеродистая сталь

Введение. Известно [1, 2], что стальные изделия в зонах конструктивно-технологических надрезов (отверстия, вырезы, места изменения сечений, сварочные дефекты и т.д.) проявляют механические свойства, существенно отличающиеся от определенных стандартными методами. Эти различия вызываются более сложным напряженно-деформированным состоянием стали в окрестности надрезов (дефектов) и температурными условиями деформирования элементов. В ряде случаев это приводит к аварийным ситуациям и обрушениям конструкций и сооружений [3].

Постановка задачи. При работе растянутого элемента конструкции в предельном состоянии в окрестности дефекта (надреза) металлургического, конструктивно-технологического или эксплуатационного происхождения зарождается трещина, развитие которой приводит к разрушению [4, 5]. Этот процесс на начальной стадии контролируется предельным напряженно-деформированным состоянием, которое зависит от геометрии надреза и толщины растягиваемого элемента. При изменении толщины дефектного элемента происходит изменение механизма излома (рисунок 1): от скола у тонких элементов( $a_0 = 0$ ), смешанного механизма разрушения у элементов промежуточных толщин  $(h/2 > a_0 > 0)$ , до отрыва у толстых элементов  $(a_0 \approx h/2)$ . Продвижение образовавшейся в тонком листе трещины происходит за счет перемещения винтовых дислокаций в направлении оси Х, по плоскости, расположенной под углом 45 ° к поверхности полосы (см. рисунок 1). При этом каждая винтовая дислокация создает относительное смещение нижней и верхней частей трещины на величину ее вектора Бюргерса. В образцах толщиной 30-40 мм и более (толстых образцах) поверхность излома почти перпендикулярна срединной поверхности пластины (см. плоскость *X<sub>2</sub>OX<sub>1</sub>* на рисунке 1). У боковых поверхностей листа наблюдается небольшая доля косого излома. Это свидетельствует о том, что в центральной части пластины в окрестности вершины трещины компонента деформации  $\epsilon_{33} = 0$  и здесь происходит высокое стеснение деформации, приводящее к развитию трехосного напряженного состояния [4, 5]. Для промежуточных толщин механизм разрушения более сложный чем в рассмотренных двух случаях. В этом случае центральная (4, рисунок 1) и приповерхностные (3, рисунок 1) области излома пластины сравнимы по размерам. У исходного надреза (1, рисунок 1) при объемном напряженном состоянии зарождается в процессе отрыва начальная «ногтеобразная» трещина (2, рисунок 1), при движении которой снижается доля плоского излома отрывом (4, рисунок 1) и долом происходит сколом [4, 5].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование механизма зарождения и развития начальной трещины в окрестности дефектов при статическом растяжении элементов из низкоуглеродистой стали. В процессе эксперимента целесообразно воспроизвести и исследовать три вида изломов: скол, промежуточное разрушение, отрыв.

Объекты, оборудование и технология эксперимента. В представляемой работе использовались данные двух экспериментов: в первом температура испытаний варьировалась от +22 °C до -80 °C; второй проводился при температуре лаборатории. Экспериментальные образцы в обоих случаях изготавливались из листовой низкоуглеродистой стали ВСт3сп. Химсостав и механические характеристики стали приведены в таблице 1, форма образцов — в таблице 2. В первом эксперименте нагружение производилось на машине ЦДМ-200. Во втором — все образцы нагружались статически растягивающим усилием до разрушения на испытательной машине Р-100 с записью диаграммы «нагрузка—удлинение». Испытания и обработка данных проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 1497. Во втором эксперименте с помощью компьютерного термографа «ИРТИС-2000» процесс деформирования образца отображался в термофильме. Вид испытательной машины с установленным образцом и термографом показан на рисунке 2. В первом эксперименте температура фиксировалась в отдельных характерных точках поверхности медь-константановыми термопарами и записывалась на ленте потенциометра ЭПП-09.

**Данные эксперимента и их обсуждение.** В приложении к работе [6] приведены экспериментальные



Рисунок 1 — Схема излома плоского образца

ланные по изломам при статическом нагружении листовых образцов из низкоуглеродистой стали Ст3 серий А-Г (см. таблицы 1, 2). Характерные виды изломов образцов толщиной 30 мм показаны на рисунке 3 [6]. При этом образцы без технологических воздействий имели начальные надрезы с радиусом кривизны у основания 6 мм (см. рисунок 3 а) и 0,5 мм (см. рисунок 3 б) и испытывались при температурах, соответственно, +20 °С и -30 °С. Соответствующие характеристики для образцов со сварочными воздействиями следующие: 1 мм; -5 °С (см. рисунок 3 в) и 0,25 мм; -80 °С (см. рисунок 3 г). На всех изломах [6] видно, что развитию разрушения при статическом растяжении образцов предшествовало образование начальных трещин (на изломе (см. рисунок 3 г) начальная трещина развилась на 0,5 мм). Схематически развитие разрушения и основные параметры начальной трещины показаны на рисунке 4.

Таблица 1 — Характеристики материала образцов

Все изломы можно отнести к трем видам: вязкие, квазихрупкие и хрупкие. Из рисунка 3, таблицы П.5 [6] следует, что площадь начальной трещины отрыва уменьшается для более острых надрезов и при снижении температуры испытания. В процессе испытаний крупноразмерных образцов одна из термопар крепилась на боковой поверхности пластины у основания надреза. Головка отметчика температуры потенциометра ЭПП-09 «зашкаливала», когда наступала очередь печати температуры по сигналу термопары в устье надреза (при толщинах листов 12-30 мм). Измерения температуры в окрестности надреза сразу после разрушения образца показали, что в зоне зарождения начальной трещины повышение температуры достигало 30—90 °С. У листов толщиной 18—30 мм даже при температуре охлаждающего воздуха -80 °С температура стали у корня надреза была выше нуля. Об этом можно было судить по пятну конденсата влаги (не замерзшей) в окрестности надреза сразу после испытания и открытия камеры охлаждения. Вся остальная поверхность охлаждаемой зоны образца в то же время была покрыта равномерным белым слоем инея. Все это свидетельствует, что деформационные процессы у корня надреза связаны с ростом начальной трещины и образованием тепла в деформированном объеме металла в окрестности надреза. В работе [6] указанная зависимость не анализировалась, а было высказано предположение, что взаимодействие указанных процессов позволяет «объяснить наличие максимума на температурной кривой прочности образцов и ее зависимость от комплексного действия скорости деформирования».

Можно допускать, что причиной нагрева являлись физико-химические процессы в материале деформированной области образца и особенности распространения деформационного тепла, а рост трещины обеспечивался термофлуктуационными механизмами. Видимо, фронтальное распределение температуры на границе трещины определило и ее форму. На рисунке 4 схематически представлен излом с начальной трещиной 1 у дефекта. Будем считать, что теплоотдача происходит в деформируемый металл в направлении толщины листа, а мощность (*w*) деформационно-химического нагрева постоянна в окрестности трещины, средняя теплопроводность в экспериментальном интервале температур равна  $\lambda$ , температура боковых поверхностей одинакова и равна  $\theta_2$ . При таких ограничениях максимальную температуру  $\tilde{\theta}_1$ 

| №<br>экс-      | Толщина,<br>мм | Химический состав, % |      |      |       |       |      |      | Механические свойства       |                      |       |
|----------------|----------------|----------------------|------|------|-------|-------|------|------|-----------------------------|----------------------|-------|
| пери-<br>мента |                | С                    | Mn   | Si   | Р     | S     | Ni   | Cr   | <b>σ</b> <sub>т</sub> , МПа | σ <sub>в</sub> , МПа | δ, %  |
| 1              | 6              | 0,21                 | 0,55 | 0,17 | 0,020 | 0,026 | _    | I    | 314                         | 498                  | 23,2  |
|                | 12             | 0,18                 | 0,52 | 0,19 | 0,031 | 0,023 | _    | I    | 295                         | 463                  | 26,0  |
|                | 18             | 0,17                 | 0,48 | 0,18 | 0,026 | 0,036 | _    | _    | 270                         | 437                  | 29,9  |
|                | 25             | 0,15                 | 0,51 | 0,14 | 0,025 | 0,180 | _    | _    | 274                         | 433                  | 29,2  |
|                | 30             | 0,16                 | 0,49 | 0,17 | 0,027 | 0,029 | _    | -    | 281                         | 442                  | 28,4  |
| 2              | 6, 12, 18      | 0,15                 | 0,50 | 0,24 | _     | _     | 0,11 | 0,26 | 263,5-269,8                 | 439,3-444,9          | 17—19 |

81





имеет слой металла, примыкающий к срединной плоскости листа. Составляя дифференциальное уравнение распространения тепла в направлении толщины листа и, решая его, получим, что  $\theta_1 - \theta_2 = wh^2/8\lambda$ . Эта квадратичная зависимость для перепада температуры показывает, что фронт медленно растущей трещины близок к параболе. Увеличение скорости движения трещины должно привести к спрямлению параболы.

По экспериментальным данным 1-го эксперимента (таблица П.5 [6]) можно получить ряд полезных корреляционных зависимостей, подтверждающих устойчивую взаимосвязь между параметрами дефекта, размерами пластической зоны в вершине дефекта и характерными размерами начальной трещины. Для этого используем обозначения, получаемые из простых выражений (1)—(3).

Площадь начальной параболической трещины 1 (рисунок 4) равна:

 $S_{cr} = \frac{4}{3} B l_{cr} = \frac{4}{3} \frac{K_{m}^2 h^2}{K_{cr}},$  (1)



Рисунок 2 — Вид испытательной машины с установленным образцом и термографом

где

$$K_{nr} = \frac{\theta}{h}, \quad K_{cr} = \frac{\theta}{l_{cr}}.$$
 (2)

Из выражений (2) следует:

ł

$$l_{cr} = \frac{K_{nr}}{K_{cr}}h.$$
 (3)

Начальная трещина подрастает в течение инкубационного отрезка времени в пластически деформированном объеме металла в устье дефекта (рисунок 5), который можно заменить равновеликим цилиндром с размерами  $h^*$ ,  $d^*$ . В этом же объеме образуются при физико-химических реакциях с участием дислокаций и источники тепла, которое распространяется в примыкающие объемы металла (и в значительной мере вдоль оси  $X_3$ ). В силу этого параметры, определяющие площадь трещины, должны существенно зависеть от температуры, при которой испытывался образец. Графики рисунков 6—8 указывают на существование такой зависимости.

Устойчивая корреляционная связь существует между утяжкой кромок листа в основании надреза и параметрами начальной трещины (рисунки 9, 10). Из рисунка 11 следует, что величина пластически деформируемого объема металла в основании надреза предопределяет площадь начальной трещины. Учитывая, что в этом объеме возникают и действуют при нагружении образца тепловые источники, то данные рисунка 11 можно рассматривать как подтверждение устойчивой зависимости между параметрами начальной трещины и температурой охлаждения образца (рисунки 6-8). Можно допускать, что длина начальной трещины зависит от радиуса *R* кривизны поверхности металла надреза (рисунок 12). Из описанного эксперимента неясно, как развивалась деформация образца до зарождения начальной трещины, какие объемы металла определяют вид излома (вязкий, квазихрупкий, хрупкий).



в

г

Рисунок 3 — Характерные виды хрупких изломов образцов эксперимента 1

Частичные ответы на этот вопрос следуют из второго эксперимента. На изломе (рисунок 13  $\delta$ ) видно, что разрушение сопровождалось образованием начальной трещины. На рисунке 13 *а* видно образование двух очагов разрушения: в точках 3 и 6. Следы отслоения окалины на боковой поверхности образца выявляют участки с различными уровнями деформации стали. Пластически деформированы участки, примыкающие к боковым кромкам между надрезами (участки вдоль линий 1—3,3—5,2—4,4—6) и диагональным направлениям 1—4,2—3,3—6, 4—5.

Литературные данные [7—11] позволяют выявить характерные для механики деформирования твердого тела особенности фигур деформации. Так, полосы скольжения всегда зарождаются у свободной поверхности. Их траектории прямолинейны, если на поверхности зарождения полосы отсутствует нагрузка; при наличии нагрузки — поло-



Рисунок 4 — Схема излома с начальной трещиной у дефекта

сы криволинейные. Ширина полос изменяется вдоль ее траектории и на отдельных участках принимает клинообразную форму. Ширина полосы большая на участках, где должно быть большим относительное удлинение материала при деформировании. Предельная ширина полосы скольжения определяется характерным размером дефекта, ответственного за ее образование (например, диаметр отверстия). Угол наклона полосы к направлению действия силы при свободном деформировании близок к 45 °, при стеснении деформационного процесса величина угла может увеличиваться или уменьшаться. Схема траекторий полос скольжения в элементе определяется расположением очагов их образования (дефектов). Начальная анизотропия материала и процессы старения приводят к изменению этого угла. Полосы скольжения разделяют материал



Рисунок 5— Вид пластически деформированном металла в устье дефекта







Рисунок 7 — Корреляционная зависимость параметра  $K_{cr}$  начальной трещины от температуры образцов серии В



Рисунок 8 — Корреляционная зависимость параметра *К*еначальной трещины от температуры образцов серии Г





Рисунок 10 — Корреляционная зависимость параметров  $K_{cr}$  и  $K_{n}$  начальной трещины для образцов серии Г



Рисунок 12 — Корреляционная зависимость длины начальной трещины и радиуса пластически деформированного металла



Рисунок 13 — Виды образца эксперимента 2 и его хрупкого излома с начальной трещиной



Рисунок 14 — Взаимозависимости усилия деформирования и изменения максимальной и минимальной температуры металла образца при термофильмировании

на блоки: в полосах скольжения материал находится в пластически активированном состоянии; вне полос скольжения материал работает в упругой стадии. Неупругая стадия деформирования материала представляет собой процесс возникновения очагов скольжения и их волноподобного



Рисунок 15 — Полосы деформирования стали образца (см. рисунок 13) и их изменение в процессе нагружения

развития в следящем за изменением внешних (граничных) перемещений режиме. Проследить весь путь возникновения и развития полос скольжения можно экспериментально, при термографировании растянутых образцов. Для этой цели конструкция образца должна быть такой, чтобы в процессе эксперимента полосы сдвига могли зарождаться у моделей конструктивно-технологических дефектов, а размеры образцов и скорость деформирования должны позволять фиксировать процессы деформирования методом термографирования от начала приложения нагрузки до разрушения образца. На рисунках 14, 15 показаны данные изменения температуры поверхности образца (см. рисунок 13) по результатам термографирования при нагружении растягивающим усилием. На кадрах термофильма (см. рисунок 15) видно, что в упругой стадии в теле образца зарождаются полосы сдвига, направление которых соответствует наибольшим сдвигающим напряжениям. Ширина полос растет с увеличением нагрузки. В полосах сдвига появляются и функционируют при деформировании источники теплообразования. При этом температура поверхности полосы сдвига растет плавно до стадии зарождения трещины у дефекта, а температура поверхности образца в конкретных точках формируется в процессе волнового деформирования материала. На стадии образования свободных поверхностей при росте зародившейся трещины температура поверхности образца значительно возрастает. При вязком разрушении образца такой же формы, но меньшей толщины, температура поверхности достигала в стадии долома 88 °С. Приведенные кадры термофильма показали, что в при нагружении образца происходит деформационное структурирование материала на блоки, размеры и расположение которых определяется видом и расположением дефектов. При увеличении усилия размеры блоков изменяются. Возможность появления вязкого, квазихрупкого или хрупкого изломов, видимо, определяется напряженнодеформированным состоянием блока, в котором зародилась начальная трещина. В приведенном на рисунке 13 образце разрушение начало развиваться сколом у надреза 6, а затем произошел хрупкий отрыв по сечению 3-4 с очагом в начальной трещине у дефекта 3. Распространение трещины произошло по диагонали 3-4 ромбовидного блока, ограниченного полосами скольжения.

Выводы. 1. Разрушение стальных листовых элементов инициируется начальной трещиной параболической формы, зарождающейся у дефектов конструктивно-технологического происхождения. Форма и размеры начальной трещины определяются объемом пластически деформированного материала в основании дефекта и физико-химическими процессами, развивающимися в этом объеме. При нагружении материала деформируемого элемента происходит его структурирование с образованием блоков с различным напряженно-деформированным состоянием. Развитие начальной трещины в упруго напряженном блоке предопределяет его хрупкий излом, а развитие трещины по траекториям максимальных касательных напряжений приводит к вязкому разрушению образца. 2. Источником теплообразования в металлическом образце является не весь объем зоны деформаций у вершины дефекта, трещины, а только участки скольжения, занимающие относительно небольшую долю этой зоны. В полосах скольжения температура металла значительно превышает температуру материала смежных зон (повышается на десятки-сотни градусов). Условия распределения и отвода деформационного тепла из зоны пластического деформирования в окрестности вершины дефекта позволяют целенаправленно воздействовать на развитие механизма излома (вязкий, квазихрупкий, хрупкий), контролировать зарождение и развитие дефектов в элементах строительных, машиностроительных и др. металлических конструкций методами компьютерной термографии.

## Список литературы

- Макклинток, Ф. Деформация и разрушение материалов / Ф. Макклинток, А. Аргон. — М.: Мир, 1970. — 444 с.
- Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов: в двух частях / Я.Б. Фридман. — 3-е изд. — Ч. 2: Механические испытания. Конструкционная прочность. — М.: Машиностроение, 1974. — 368 с.
- Аугустин, Я. Аварии стальных конструкций / Я. Аугустин, Е. Шледзевский. — М.:Стройиздат, 1978. — 183 с.
- Нотт, Дж. Основы механики разрушении / Дж. Нотт. М.: Металлургия, 1978. — 256 с.
- Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек; пер. с англ. — М.: Высш.шк., 1980. — 368 с.
- Мойсейчик, Е.А. Количественная оценка надежности статически растянутых элементов строительных конструкций из малоуглеродистых сталей при низких температурах: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Е.А. Мойсейчик. — Новосибирск, 1980. — 205 с.
- Straus, B. Riβbildung in Kesselblechen / B. Straus, Ad. Fry // Stahl und Eisen. – 1921. – № 33. – pp. 1133–1137.
- Fry, Ad. Kraftwirkungfiguren im Flubeisen, dargestelt durch ein neues Aetzverfahren / Ad. Fry // Stahl und Eisen. – 1921. – № 32. – pp. 1093–1097.
- Rudeloff, M. Berichte des Ausschusses fur Versuche im Eisenbau / M. Rudeloff. — Ausgabe A. Heft 3: Versuche mit Auschlussen steifer Stube. — Berlin: Verlag von J.Springer, 1921. — 84 p.
- Nadai, A. Der Bildsame Zustand der Werkstoffe / A. Nadai. Berlin: Verlag von J.Springer, 1927. – 171 p.
- Handbuch der Physikalischen und technischen Mechanik. Band IV-2 Halfte. Technische Physik der festen Korper / Herausgegeben von prof. F.Auerbach. – W.Hort.-Berlin: Verlag für J. Springer, 1931. – 614 p.

Moiseichik E.A.

On the mechanism of origin and destruction of elements of carbon steel for static tension

In the article on the basis of experimental data to investigate the mechanism of nucleation and crack development in the vicinity of defects in static tensile sheet elements of mild steel. It is shown that the destruction is initiated by the initial crack of a parabolic shape, emerging from defects in design-technological origin. Based on the correlations found that the shape and size of the initial cracks are determined by the volume of plastically deformed material at the base of the defect and the physical and chemical processes taking place in this volume. By using infrared heat deformation shows that the material of a deformable element for loading the formation of blocks with different stress-strain state. It is suggested that the development of initial cracks in elastically strained unit determines its brittle fracture and crack propagation along the trajectories of maximum shear stress leads to ductile fracture specimen.

Поступила в редакцию 16.04.2011.