

УДК 621.384.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБРАЗОВАНИЯ И ЗАРОЖДЕНИЯ РАЗРУШЕНИЯ В СТАЛЬНОЙ РАСТЯНУТОЙ ПЛАСТИНЕ С КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ДЕФЕКТОМ

Е. А. Мойсейчик

Белорусский национальный технический университет, 220013 Минск, Белоруссия
E-mail: emoisseitchik@mail.ru

Исследовано явление локализации тепловыделения при деформировании стальной пластины с вырезами. Показано, что источником теплообразования в металлическом образце является не вся зона пластических деформаций вблизи вершины дефекта (трещины), а лишь занимающие относительно небольшую часть этой зоны полосы скольжения (полосы Чернова — Людерса), в которых деформация инициирует протекание физико-химических процессов. Установлено, что в полосах скольжения температура металла повышается на десятки градусов (и выше). Деформирование надрезанных образцов характеризуется неоднородным развитием пластической деформации по объему материала и высокой скоростью распространения тепловой волны по направлениям действия максимальных касательных напряжений.

Ключевые слова: трещина, полосы скольжения, физико-химические процессы, дислокационное туннелирование, деформационное теплообразование, излом.

Введение. Механические характеристики стали и других сплавов, используемые в классических критериях прочности [1, 2], применяемых при расчете элементов и узлов конструкций, определяются в результате испытаний стандартных образцов при одноосном напряженном состоянии [3]. В зонах конструктивно-технологических надрезов (отверстия, вырезы, места изменения сечений, сварочные дефекты, трещины и т. д.) указанные материалы имеют деформационные и прочностные характеристики, существенно отличающиеся от полученных стандартными методами [4, 5]. Результаты исследований конструктивной прочности строительных сталей показывают, что эти различия обусловлены сложным напряженно-деформированным состоянием материала в окрестности надрезов, трещин и температурными условиями деформирования элементов конструкций [6]. При этом в отличие от факторов, определяющих напряженно-деформированное состояние вблизи надреза, температура испытательной камеры (в диапазоне от +20 до –80 °С) оказывает существенно меньшее влияние на процессы зарождения и развития разрушения элементов конструкций, выполненных из строительных низкоуглеродистых сталей [6]. Значительный нагрев металла в зонах развития пластических деформаций в окрестности дефекта влияет как на зарождение разрушения, так и на его развитие [6]. На взаимосвязь деформационного нагрева и сопротивляемости разрушению элементов конструкций из стали впервые указано в работе [7]. Для выявления зависимости сопротивления разрушению от характеристик

напряженно-деформированного состояния в зоне надреза и температуры элементов следует учитывать процесс локализации пластических деформаций вблизи надреза, появление в этой зоне источников тепла и изменение механических свойств материала под влиянием выделяющегося тепла. Превращение энергии механического деформирования металла в окрестности дефекта в тепловую энергию приводит к существенному повышению средней температуры [8]. В работе [9] показано, что такое повышение температуры в вершине трещины в сочетании с объемным напряженно-деформированным состоянием приводит к изменению динамики развития трещины.

Целью настоящей работы является установление взаимосвязи между разрушением растянутых пластин из низкоуглеродистой строительной стали и деформационным теплообразованием и уточнение механизмов теплообразования, зарождения и развития разрушения в окрестности конструктивно-технологических дефектов в таких пластинах.

Теплообразование и развитие разрушения в тонких листах. Экспериментальное исследование теплообразования в растянутых образцах из тонколистовой стали выполнялось с помощью компьютерного термографа IRTIS-2000 (период сканирования одного кадра — до 2,3 с). Образцы нагружались до полного разрушения на разрывной машине Р-50 (рис. 1). При этом записывалась диаграмма нагрузка — удлинение. Изменение температуры на поверхности берегов движущейся трещины показано на рис. 2. На рис. 3 представлено распределение температуры на различных стадиях зарождения трещины в окрестности выреза и ее роста при нагружении образца и начальной температуре металла $T_n = 18,4$ °С. Видно, что процесс деформирования листового элемента приводит к локализации пластической деформации вблизи дефекта. В зоне локализации пластической деформации температура повышается до $T_{cp} = 22,4$ °С (кадр 1 на рис. 3). Зародившаяся при $T_{cp} = 23,8$ °С трещина медленно развивается с увеличением средней температуры в вершине трещины до $T_{cp} = 25,2$ °С (кадры 2, 3). Сближение полей пластических деформаций дефектов приводит к повышению температуры в материале до $T_{cp} = 25,3$ °С. Встречное развитие трещин вызывает увеличение температуры металла, находящегося между вершинами трещин, до $T_{cp} \geq 30,4$ °С. При увеличении толщины листа образцов до 1,5 и 3,0 мм происходят те же процессы, но вблизи надрезов и в окрестности трещины



Рис. 1

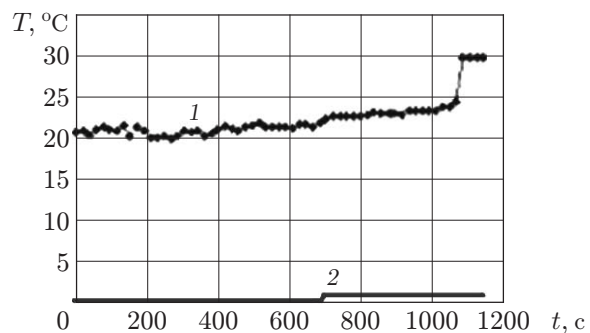


Рис. 2

Рис. 1. Образец, изготовленный из стального листа шириной 500 мм и толщиной 1 мм

Рис. 2. Изменение максимальной температуры поверхности образца при медленном развитии трещины (1) и скорости роста трещины до 0,01 м/с (2)

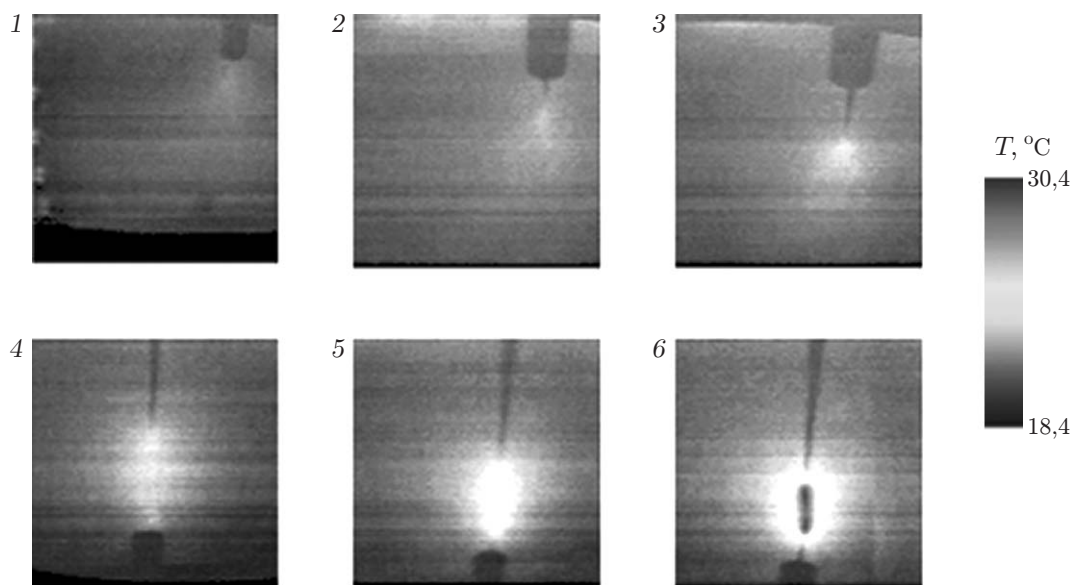


Рис. 3. Поля температуры при движении трещины в образце в различные моменты времени

средняя температура увеличивается более интенсивно. При этом до момента образования трещины в окрестности дефекта плоского образца при всех исследованных толщинах наблюдалось незначительное повышение температуры, после чего зарождалась трещина и происходило ее дальнейшее развитие. Следует отметить, что движение трещины по поперечному сечению образца сопровождается значительным локальным повышением температуры перед ее вершиной. Температура нагрева металла перед движущейся трещиной в несколько раз выше, чем на стадии зарождения трещины. С увеличением скорости деформирования материала температура нагрева существенно увеличивается. Резкое повышение максимальной температуры перед разрушением (кривая 1 на рис. 2) можно объяснить как возрастанием мощности двух встречных источников теплообразования, так и увеличением температуры поверхности листа при выходе на нее полос сдвига.

Особенности теплообразования и разрушения толстых листов. Исследуем процесс разрушения толстых листов экспериментально с использованием термографирования растянутых образцов. Для этого выберем такую форму образца, чтобы в ходе эксперимента полосы сдвига могли зародиться вблизи моделей конструктивно-технологических дефектов, а размеры образцов и скорость деформирования позволяли фиксировать процессы деформирования методом термографирования с момента приложения нагрузки до момента разрушения образца. В эксперименте, проведенном на испытательной машине Р-100 при температуре окружающего воздуха $7,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, образцы из стали марки СтЗсп квазистатически нагружались растягивающим усилием до разрушения (рис. 4). При этом записывалась диаграмма нагрузка — удлинение. Испытания и обработка данных проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 1497. Процесс деформирования образцов регистрировался с помощью компьютерного термографа IRTIS-2000, а обработка результатов велась с использованием пакета программ IRTIS. На рис. 4–6 показаны фотографии образца из стали СтЗсп с боковыми вырезами после разрушения, а также изменение температуры поверхности образцов.

На рис. 6 приведены фотографии поверхности образцов, сканированные термографом, при различных текущих значениях времени t с момента приложения нагрузки. Видно, что на стадии упругости в образце с боковыми надрезами на площадках действия наибольших

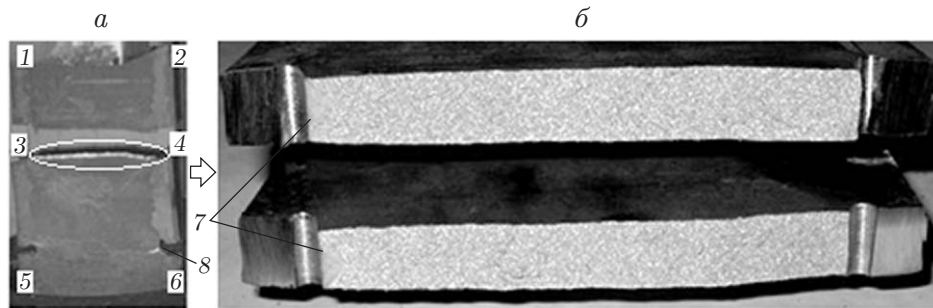


Рис. 4. Образец, изготовленный из стального листа толщиной 18 мм (а), и его поверхность разрушения (б):
 1–6 — боковые надрезы; 7 — начальная трещина, инициировавшая хрупкий излом; 8 — неразвившаяся трещина скола

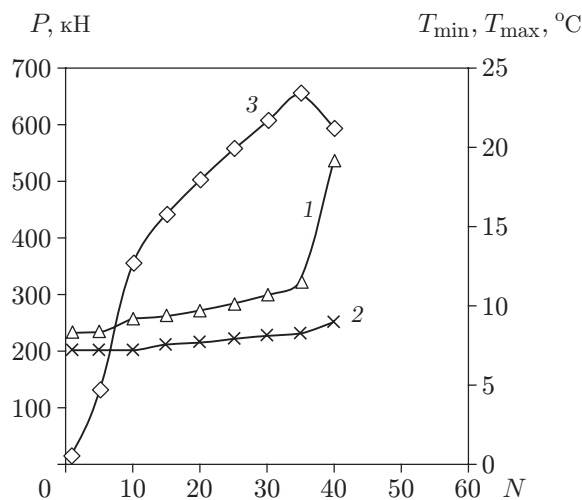


Рис. 5. Изменение максимальной (1) и минимальной (2) температур поверхности образца, показанного на рис. 4, при растяжении его силой P (3) (N — номер кадра, полученного с помощью термографа)

касательных напряжений зарождаются полосы сдвига. С увеличением нагрузки ширина полос увеличивалась. Полосы сдвига, возникающие при деформировании, являлись источниками теплообразования. До момента зарождения трещины вблизи бокового выреза температура поверхности полосы постепенно увеличивалась, температура поверхности образца в конкретных точках зависела от процесса волнового деформирования материала. На стадии образования свободных поверхностей с увеличением длины трещины температура поверхности образца значительно возрастала. При вязком разрушении образца, имеющего такую же форму, но меньшую толщину, непосредственно перед разрушением температура поверхности достигала 88 °С. На рис. 6 видно, что при нагружении образца происходит деформационное структурирование материала на блоки, размеры и форма которых определяются видом и расположением дефектов. При увеличении усилия размеры блоков изменяются. Возможность появления вязкого, квазихрупкого или хрупкого изломов, по-видимому, определяется напряженно-деформированным состоянием блока, в котором зародилась трещина. В образце, показанном на рис. 4, разрушение в виде скола начало развиваться вблизи надреза б, а затем произошел хрупкий отрыв в сечении 3–4 с очагом в начальной трещине в окрестности дефекта 3. Распространение трещины произошло по

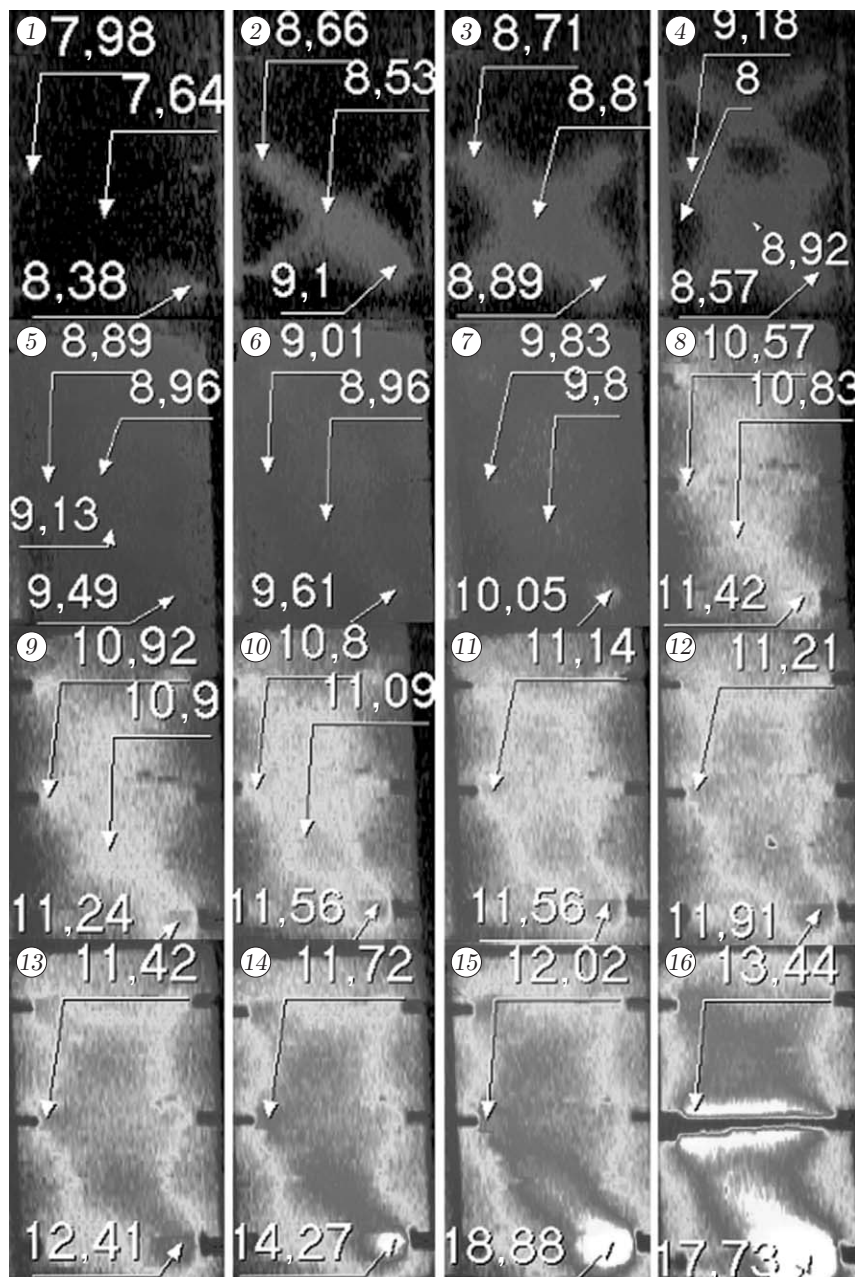


Рис. 6. Деформационные полосы и распределение температуры T , °C при растяжении образца с боковыми надрезами, показанного на рис. 4:

1–16 — номера кадров, соответствующие рис. 3: 1 — $t = 16,30$ с, 2 — $t = 23,51$ с, 3 — $t = 25,61$ с, 4 — $t = 27,86$ с, 5 — $t = 30,30$ с, 6 — $t = 32,61$ с, 7 — $t = 34,93$ с, 8 — $t = 46,57$ с, 9 — $t = 58,22$ с, 10 — $t = 81,51$ с, 11 — $t = 90,83$ с, 12 — $t = 93,15$ с, 13 — $t = 95,48$ с, 14 — $t = 97,81$ с, 15 — $t = 100,10$ с, 16 — $t = 107,10$ с

диагонали ромбовидного блока, ограниченного полосами скольжения. Быстрому развитию начальной трещины вблизи надреза 3 (см. рис. 4) предшествовали “перескок” полос деформирования от надрезов 6 и 2 к надрезу 3 и их наложение вблизи дефекта 3 (см. рис. 6). На рис. 5 показаны диаграмма растяжения образца и изменение минимальной и максимальной температур в различных точках его поверхности в процессе деформирования.

Теплообразование, распределение тепла, выделяющегося при деформировании, и зарождение разрушения в образцах с надрезами. Измерения температуры поверхности, выполненные в ходе эксперимента в окрестности надреза тонких и толстых листов, показали, что в зоне зарождения трещины повышение температуры достигало $30 \div 90$ °С. При этом более высокие температуры фиксировались на поверхностях образцов без надрезов. В этих образцах пластические деформации охватывали значительно большую область, чем в надрезанных образцах такой же толщины. В образцах, изготовленных из тонких листов, трещина скола зарождалась вблизи основания надреза и при дальнейшем нагружении развивалась в поперечном направлении относительно оси растягивающего усилия. Наибольшая температура металла фиксировалась перед вершиной трещины. Наложение полей двух встречных трещин приводит к значительному увеличению температуры металла. В образцах, изготовленных из листов толщиной $18 \div 30$ мм, даже при температуре охлаждающего воздуха -80 °С температура стали в основании надреза была выше нуля [6]. Об этом можно судить по пятну конденсата, возникающему в окрестности надреза непосредственно после завершения испытания и открытия камеры охлаждения. Остальная часть поверхности охлаждаемой зоны образца была равномерно покрыта слоем белого инея.

Можно предположить, что причиной нагрева являются физико-химические процессы, происходящие в деформированном материале образца, и особенности распространения тепла, выделяющегося при деформировании [10]. Возникающие при деформировании стали в полосах по направлениям наибольшего нагрева окарины на поверхности свидетельствуют о возникновении в этих полосах пластического течения материала. Появление на макроуровне областей (полос) неоднородной пластической деформации обусловлено процессами зарождения и развития дислокаций, самоорганизацией и эволюцией дислокационного ансамбля в деформируемых структурных элементах стали. Диссипация энергии при движении дислокаций приводит к нагреву материала в областях локализации деформации (на линиях и поверхностях полос скольжения). Доказательства наличия дислокационного нагрева в областях локализации деформации в кристаллах приведены в работе [11]. Однако измеренные в эксперименте температуры на поверхностях полос скольжения и в окрестности вершины магистральной трещины при ее зарождении и развитии (см. рис. 1–4, 6) существенно выше соответствующих значений, вычисленных с учетом условия превращения механической работы деформирования в тепло [12, 13]. Такое различие можно объяснить тем, что в расчетах не были учтены все источники теплообразования в пластически деформируемых зонах и реальный механизм пластической деформации.

Следует отметить, что наличие дислокаций в материале объясняет не только развитие деформационных процессов, но и повышение химической активности атомов и ионов структурных элементов материала, расположенных вдоль линий дислокации. В окрестности линий дислокаций и точек их выхода на поверхность структурных элементов атомы металла имеют повышенные значения химического потенциала [10]. Наличие дислокаций на границе раздела фаз обуславливает распад неустойчивых фаз и выделение растворенных в фазе примесей, т. е. возникновение химических реакций, сопровождающихся теплообразованием [10, 14]. Такие реакции инициируются в областях, где образуются зародыши продукта реакции. Зародыши появляются вдоль полосы скольжения, т. е. в зоне действия максимальных касательных напряжений. В процессе развития деформации зародыши уве-

личиваются и сливаются друг с другом, образуя сплошную реакционную зону. Нагрев материала в реакционной зоне приводит к изменению напряженно-деформированного состояния материала в ее окрестности. На границе этой зоны возникает участок со значительным перепадом температуры материала. Возникающий вследствие этого градиент температурных напряжений вызывает появление новых дислокаций. В результате по линиям скольжения реакция может продвигаться вглубь материала со значительной скоростью. В процессе деформирования происходят изменение плотности дислокаций и самоорганизация дислокаций, способствующие развитию локализации деформации и появлению деформационных структур [15].

Из сказанного выше следует, что деформационные процессы в основании надреза исследованных образцов обусловлены ростом возникшей трещины и образованием тепла, а зарождение трещины в образцах, изготовленных из толстых листов стали [6], и ее последующий рост происходят по термофлуктуационному механизму. По-видимому, фронтальное распределение температуры на границе трещины определяет и ее форму. Предположим, что теплоотдача от внутреннего источника в деформируемый металл происходит по толщине h листа, мощность w деформационно-химического нагрева в окрестности трещины постоянна; средняя теплопроводность стали в рассматриваемом интервале температур равна λ , температура боковых поверхностей одинакова и равна θ_2 . При таких ограничениях максимальную температуру θ_1 имеет слой металла, примыкающий к срединной плоскости листа. Составляя дифференциальное уравнение распространения тепла по толщине листа и решая его, получаем $\theta_1 - \theta_2 = wh^2/(8\lambda)$. Эта квадратичная зависимость для перепада температуры показывает, что форма фронта медленно растущей трещины должна быть близка к параболической. Увеличение скорости движения трещины может привести к уменьшению кривизны параболы.

Результаты компьютерной термографии показывают, что при растяжении плоского образца из стали СтЗсп с тремя парами боковых надрезов (см. рис. 4) физико-химические процессы, сопровождающиеся теплообразованием, происходят не во всем деформируемом объеме, а только в направлениях, на которых действуют наибольшие касательные напряжения τ (направления AB , CD на рис. 7). Полосы AB , CD зарождались от надрезов (макродефектов), расположенных в зонах A , B , C , D . При этом одна из отмеченных полос сдвига обычно возникала раньше другой. Полоса зарождалась вблизи одного из надрезов (зоны A , B , C , D) и быстро (со скоростью не менее 0,1 м/с) распространялась вдоль оси полосы сдвига. Температура деформированного металла полосы была значительно выше, чем в соседних зонах. Более существенное повышение температуры отмечалось в зоне пересечения полос скольжения AB , CD . После повышения температуры в полосе сдвига шириной Δ , как правило, происходило разрушение полосы по типу скола, в отдельных случаях — по типу отрыва. Клинообразные области, примыкающие к полосам сдвига, находились в упругом состоянии и смещались полосами скольжения к началу координат, при этом после разрушения образца выполнялось условие $b_0 > b$. В проведенном эксперименте получены следующие результаты: 1) в пластической области в окрестности надреза (дефекта) образуется зародыш, в котором при достижении предельной для него температуры поверхности металла зарождается магистральная трещина; при движении этой трещины в пределах полосы сдвига температура поверхности повышается; 2) возникает отмеченный выше температурный всплеск, быстро движущийся вдоль полосы сдвига. По-видимому, эти особенности теплообразования объясняются тем, что твердофазные химические реакции возникают, как правило, на участках, где кристаллические решетки разрыхлены дефектами структуры, и происходят в несколько этапов. Большое количество таких дефектов упаковки имеется во фрагментированных при деформации цементитных составляющих стали. Зародыши возникают в пластической зоне вблизи дефектов поверх-

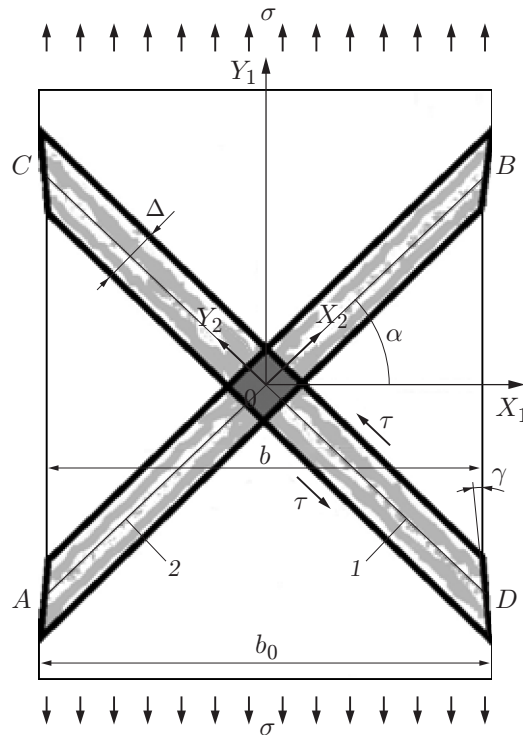


Рис. 7. Схема локализации деформации в плоских образцах:
 1, 2 — полосы сдвига шириной Δ ; b_0 , b — начальная и текущая ширина полосы; τ — напряжение сдвига; AB , CD — полосы скольжения

ности и формы образца, а затем происходят образование, развитие и слияние зародышей в направлении действия максимальных касательных напряжений. Перенос реагирующих компонентов к зародышу, т. е. в область химического взаимодействия, осуществляется за счет диффузии. В эксперименте с образцами с надрезами наблюдались “прострелы” тепловой волны вдоль линий AB , CD (см. рис. 7). Объяснение указанного явления в литературе не найдено. Особенности таких “прострелов” являются неоднородное развитие пластической деформации в объеме деформируемого образца и высокая скорость распространения тепловой волны в направлениях действия максимальных касательных напряжений в стальном образце. При этом материал образца, расположенный вне полос скольжения, остается не вовлеченным в процесс деформирования. По-видимому, в указанных направлениях возникает локализация деформации, что обусловлено наличием физико-химических процессов в полосе сдвига. Это явление зафиксировано на рис. 6 и наблюдается как на упругом участке диаграммы, так и на участках упругопластического деформирования и долома. Особенность этого процесса состоит в том, что на стадии пластического деформирования образуется канал, в котором зарождается магистральная трещина и происходит ее движение на начальном этапе.

При указанном выше неоднородном распределении по объему образца полос скольжения (тепловых источников), когда основной объем материала образца находится в упругом состоянии, средние температуры в образце и на его поверхности определяются мощностью и количеством тепловых источников (полос скольжения), теплофизическими характеристиками материала и условиями теплообмена с окружающей средой. На среднюю температуру образца существенное влияние оказывает упругое состояние металла в областях, примыкающих к полосам скольжения. При упругом растяжении сталь охлаждается [8], а при пластическом деформировании нагревается, поэтому температуру материала, со-

стоящего из упругих и пластически деформированных областей, можно определить из уравнения теплового баланса.

Выводы. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы. Источником теплообразования в металлическом образце является не вся зона пластических деформаций вблизи вершины дефекта (трещины), а лишь полосы скольжения (полосы Чернова — Людерса), занимающие относительно небольшую долю этой зоны. Отмечено значительное повышение температуры в полосах скольжения, обусловленное происходящими в них физико-химическими процессами.

Деформирование надрезанных стальных образцов характеризуется неоднородным по объему развитием пластической деформации и высокой скоростью распространения тепловой волны в направлениях действия максимальных касательных напряжений. При этом материал образца, расположенный вне полос скольжения, остается не вовлеченным в процесс деформирования. По-видимому, распространение тепловой волны в указанных направлениях вызвано локализацией деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гольденблат И. И.** Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов / И. И. Гольденблат, В. А. Копнов. М.: Машиностроение, 1968.
2. **Металлические конструкции:** В 3 т. / Под ред. В. В. Горева. Т. 1. Элементы стальных конструкций. М.: Высш. шк., 1997.
3. **Фридман Я. Б.** Механические свойства металлов: в 2 ч. М.: Машиностроение, 1974. Ч. 2.
4. **Надаи А.** Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Изд-во иностр. лит., 1954.
5. **Ужик Г. В.** Сопrotивление отрыву и прочность металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1950.
6. **Мойсейчик Е. А.** Количественная оценка надежности статически растянутых элементов строительных конструкций из малоуглеродистых сталей при низких температурах: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1980.
7. **Wells A. A.** The mechanics of notch brittle fracture // *Weld. Res.* 1953. V. 7, N 2. P. 34–56.
8. **Weichert R., Schoenert K.** Heat generation at the tip of a moving crack // *J. Mech. Phys. Solids.* 1978. V. 26. P. 151–161.
9. **Brock L. M.** Effects of thermoelasticity and a von Mises condition in rapid steady-state quasi-brittle fracture // *Intern. J. Struct.* 1996. V. 33, N 28. P. 4131–4142.
10. **Болдырев В. В.** Влияние дефектов в кристаллах на скорость термического разложения твердых веществ. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1963.
11. **Клявин О. В.** Физика пластичности кристаллов при гелиевых температурах. М.: Наука, 1987.
12. **Матвиенко Ю. Г., Авраменко В. Г.** Динамика температурного поля в пластически деформируемых металлах. 1. Гладкий образец // *Деформация и разрушение материалов.* 2009. № 9. С. 7–12.
13. **Матвиенко Ю. Г., Авраменко В. Г.** Динамика температурного поля в пластически деформируемых металлах. 2. Образец с трещиной // *Деформация и разрушение материалов.* 2009. № 10. С. 2–9.
14. **Мелихов И. В.** Физико-химическая эволюция твердого вещества. М.: Бинум, 2006.
15. **Малыгин Г. А.** Процессы самоорганизации дислокаций и пластичность кристаллов // *Успехи физ. наук.* 1999. Т. 169, № 9. С. 979–1010.

*Поступила в редакцию 2/VIII 2011 г.,
в окончательном варианте — 15/VI 2012 г.*