

Евгений Алексеевич МОЙСЕЙЧИК,
кандидат технических наук,
доцент кафедры
"Сопротивление материалов
и теория упругости"
Белорусского национального
технического университета

МЕХАНИЗМ ТЕПЛООБРАЗОВАНИЯ В ВЕРШИНЕ ТРЕЩИНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ

MECHANISM OF HEAT GENERATION AT THE TIPS OF CRACKS IN METAL PLATES

В статье показано, что с уменьшением толщины стальных листов до 3–10 мм и ростом радиуса надреза напряженное состояние приближается к плоскому. Отмечено также, что источником теплообразования в металлическом образце является не весь объем зоны пластических деформаций у вершины дефекта, трещины, а только участки скольжения (полосы Людерса—Чернова), занимающие относительно небольшую долю этой зоны.

This article shows that with the decrease in thickness of steel sheets up to 3–10 mm and increase in the radius of the notch, the state of stress approaches plane stress. It has been stated that the source of heat generation in a metal specimen is not the whole volume of the zone of plastic strain at the tip of a defect, a crack, but only the sliding parts (Luders—Chernov lines) occupying a relatively small portion of this zone.

ВВЕДЕНИЕ

Для применяемых в практике расчета элементов и узлов металлических конструкций классические критерии прочности [1–3] механические характеристики стали и других сплавов определяются испытанием стандартных образцов при одноосном напряженном состоянии [4]. Тот же материал в зонах конструктивно-технологических надрезов (отверстия, вырезы, места изменения сечений, сварочные дефекты и т. д.) проявляет пластические и прочностные свойства, существенно отличающиеся от определенных стандартными методами [5–7]. Многочисленные исследования конструктивной прочности стали показывают [8, с. 64–80], что эти различия определяются более сложным напряженно-деформированным состоянием стали в окрестности надрезов, трещин и температурными условиями деформирования элементов. В ряде случаев это приводит к аварийным ситуациям и обрушениям конструкций и сооружений [9, 10].

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ЗОНА В ОКРЕСТНОСТИ ТРЕЩИНЫ

Очагом зарождения трещины в элементе конструкции является дефект (надрез) металлургического, конструктивно-технологического или эксплуатационного происхождения [11, 12]. Зарождение и развитие трещины в этой зоне контролируется предельным напряженно-деформированным состоянием, которое зависит от геометрии надреза и начальной толщины растягиваемого элемента. При изменении толщины элемента с дефектом происходит изменение механизма излома: от скола у тонких элементов (рис. 1), смешанного механизма у элементов промежуточных толщин (рис. 2), отрыва у толстых элементов (рис. 3). Продвижение образовавшейся в тонком листе трещины происходит за счет перемещения винтовых дислокаций MN в направлении оси X_2 по плоскости, расположенной под углом 45° к поверхности полосы (см. рис. 1). При этом каждая винтовая дислокация MN создает относительное смещение

нижней и верхней частей трещины на величину ее вектора Бюргерса.

Смещение трещины при сдвиге S происходит под действием касательных напряжений τ согласно выражению, приведенному в [13]

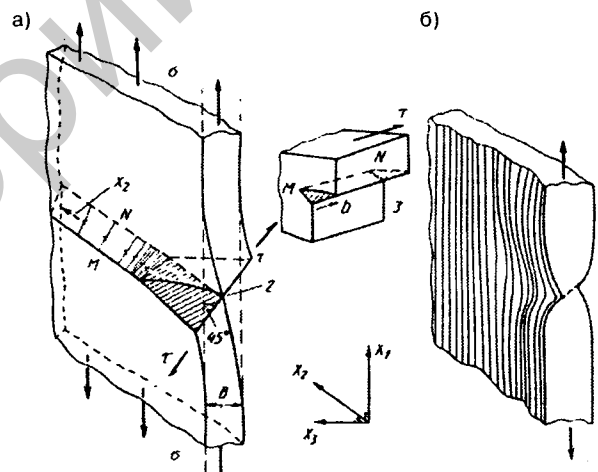


Рис. 1. Схема образования поверхности скола перед вершиной трещины в тонкой пластине (а) и шейкообразования в процессе зарождения трещины (б)

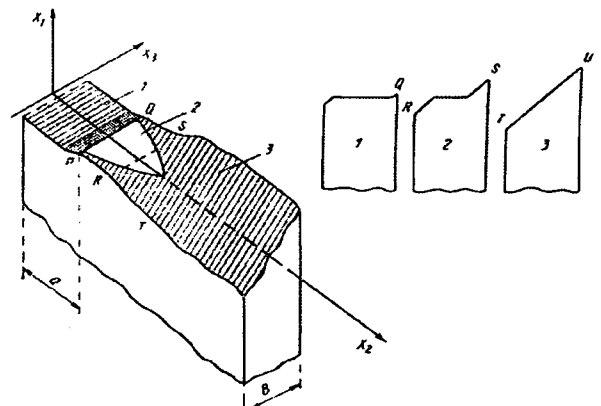


Рис. 2. Зарождение трещины отрыва и развитие разрушения в листе с надрезом промежуточной толщины

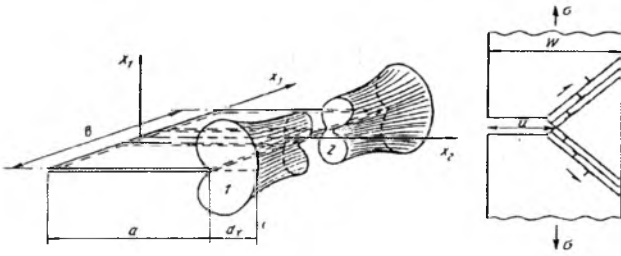


Рис. 3. Развитие пластической зоны в вершине трещины в листе большой толщины

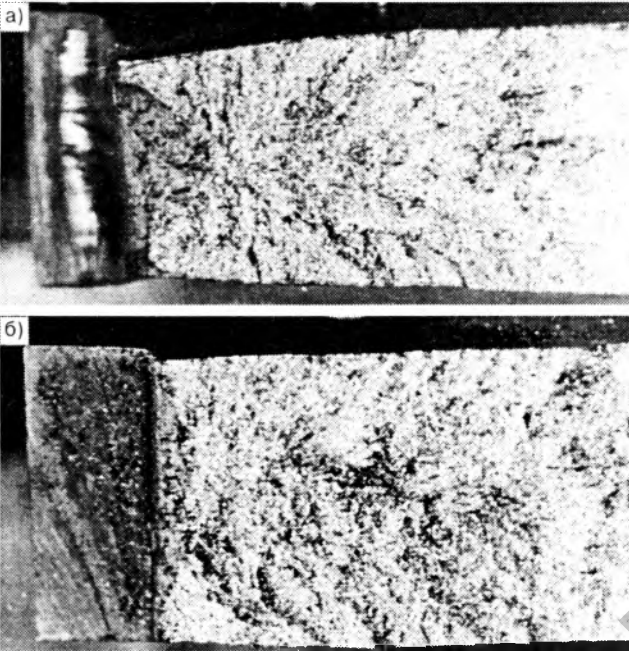


Рис. 4. Вид начальной трещины отрыва в изломе образца: а — $K=3$; $B=30$ мм; $T=20$ °С; $a=8,0$ мм; $r_0=6,0$ мм; б — $K=6$; $B=30$ мм; $T=-5$ °С; $a=8,1$ мм; $r_0=1,0$ мм

$$S = \frac{4\tau_y}{\pi\alpha} \cdot a \ln \left[\sec \left(\frac{\pi q}{2\tau_y} \right) \right] \quad (1)$$

где q , τ_y , a — соответственно напряжение, предел текучести при сдвиге и длина трещины.

С увеличением a напряжение q , необходимое для дальнейшего роста трещины, уменьшается, а приложенное к элементу напряжение σ растет из-за уменьшения площади поперечного сечения. Трещина при этом развивается с ускорением.

В образцах толщиной 30–40 мм и более (толстых образцах) поверхность излома почти перпендикулярна срединной поверхности пластины (см. рис. 3, плоскость X_2OX_1). У боковых поверхностей листа наблюдается небольшая доля косоугольного излома (см. рис. 3). Это свидетельствует о том, что в центральной части пластины в окрестности вершины трещины компонента деформации ε_{33} равна 0; здесь происходит высокое стеснение деформации, приводящее к развитию трехосного напряженного состояния [13, 14]. При фиксированном раскрытии трещины пластическая зона у поверхности пластины 1 (см. рис. 3) значительно больше величины пластической зоны в ее средней части 2 (см. рис. 3).

Для промежуточных толщин (см. рис. 2) механизм разрушения более сложный, чем в рассмотренных двух случаях на рис. 1 и 3, где центральная и приповерхност-

ные области пластины сравнимы по размерам. При росте трещины под действием возрастающей нагрузки пластическая зона перед вершиной трещины увеличивается, развивается релаксация компоненты напряжения, направленного по оси X_3 , и уменьшается доля сечения, где материал деформируется в условиях плоской деформации. У исходного надреза при объемном напряженном состоянии зарождается в процессе отрыва "ногтеобразная" трещина, при движении которой снижается доля плоского излома отрывом (см. рис. 2, сечения 1, 2, 3) и долом происходит сколом [13, 14]. Эта модель промежуточного разрушения хорошо иллюстрируется данными эксперимента на образцах из малоуглеродистой стали Ст3 толщиной 6, 12, 25, 30, 36 мм [8]. Из рис. 4 видно, что площадь начальной трещины отрыва уменьшается для более острых надрезов и при снижении температуры испытания.

При фиксированной температуре испытания зарождающаяся в устье надреза с кривизной $1/r_0$ начальная трещина отрыва может инициировать долом пластины по механизму скола (вязкое разрушение), по промежуточному механизму (квазихрупкое разрушение), отрывом (хрупкое разрушение) в зависимости от вида напряженно-деформированного состояния (НДС) в материале зоны дефекта. Основными факторами, определяющими НДС в дефектных участках элементов, являются кривизна в устье дефекта ($1/r_0$) и толщина элемента. При фиксированной кривизне прочность листового элемента зависит от механизма зарождения и развития разрушения, и при росте толщины листа изменяется в соответствии с кривой 2 на рис. 5. Из рис. 5 следует, что наибольшее сопротивление разрушению оказывают пластины промежуточных толщин (для Ст3 — листы толщиной 12–20 мм [8]). Подобным образом сопротивление разрушению пластин зависит и при росте коэффициента концентрации напряжений в зоне зарождения трещины отрыва [8].

При этом следует обратить внимание на некоторые особенности предельного напряженно-деформированного состояния и его зависимость от геометрии надреза. Так, угол раскрытия и контуры надреза незначительно сказываются на изменении напряженно-деформированного состояния. С уменьшением толщины и ростом радиуса надреза напряженное состояние приближается к плоскому. При этом оно не достигается в точности даже для весьма тонких образцов. Увеличение толщины элементов с надрезами до 30–40 мм сопровождается появлением плоской деформации. Максимумы осевых напряжений с уменьшением кривизны и ростом толщи-

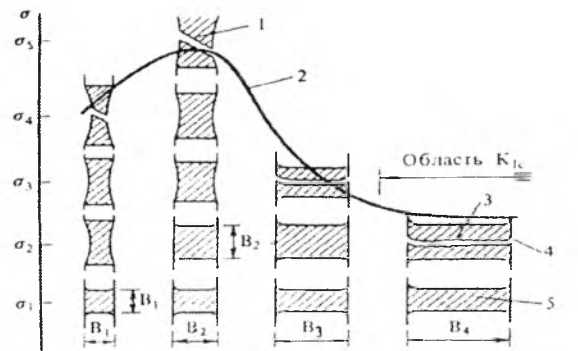


Рис. 5. Схема изменения сопротивления металлических пластин разрушению в зависимости от толщины проката

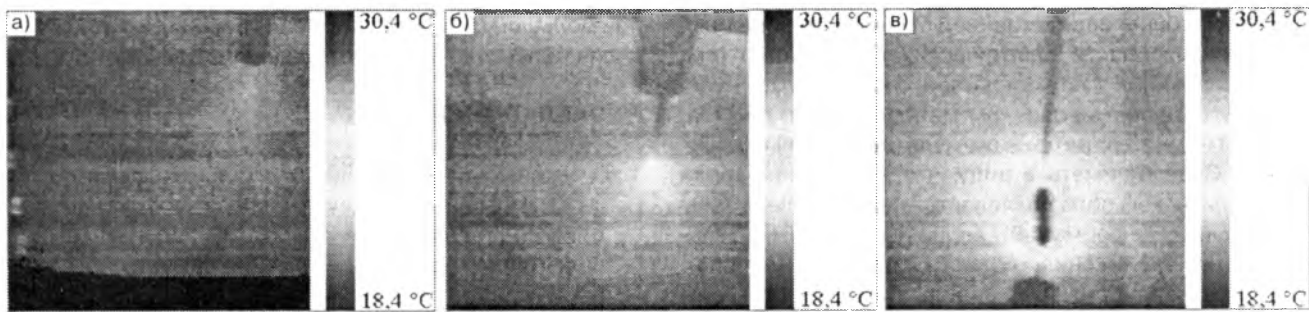


Рис. 6. Стадии развития трещины и теплообразования в ее вершине при растяжении тонкого листа с симметричными надрезами:
 а — зарождение пластических деформаций у выреза, $t_{cp} = 22,4 \text{ } ^\circ\text{C}$;
 б — медленное развитие трещины, $t_{cp} = 25,2 \text{ } ^\circ\text{C}$;
 в — температурное поле при сближении полей пластических деформаций двух встречных трещин, $t_{cp} \geq 30,4 \text{ } ^\circ\text{C}$

ны у основания надреза смещаются в середину образца, определяя точку зарождения трещины. В момент ее образования нагрузка на образец наибольшая. Кинетика деформированного и напряженного состояния обуславливает указанное выше изменение разрушающих надрезанные образцы нагрузок с ростом их толщины. Достаточно острые надрезы, начиная с некоторой толщины пластины, способны не допустить уменьшения кривизны в основании при деформировании и тем самым сковать поперечные деформации. В этом случае разрушение определяет небольшой объем предельно деформированного металла, прилегающего к надрезу. И чем меньше этот объем, тем при меньших номинальных напряжениях появится текучесть металла и произойдет зарождение трещины в зоне возникновения объемного напряженного состояния. С увеличением радиуса надреза растет такой объем металла, достигая при величине коэффициента концентрации напряжения, примерно равного трем, насыщения, сопровождаемого течением металла по всему сечению. При этом происходит увеличение первоначального радиуса надреза, перераспределение и снижение максимумов напряжений, их градиентов.

ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ В ВЕРШИНЕ НАДРЕЗА, ТРЕЩИНЫ

Температура испытания (и эксплуатации) в диапазоне от плюс $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ до минус $80 \text{ } ^\circ\text{C}$ в значительно меньшей мере сказывается на процессах зарождения начальной трещины отрыва и ее развития в элементах из строительных малоуглеродистых сталей [8]. Причиной этому является значительный нагрев металла в области развития пластических деформаций в окрестности дефекта [8]. На взаимосвязь такого нагрева с сопротивляемостью разрушению конструктивных элементов из стали впервые обратил внимание Уэллс [14]. На рис. 6 показано теплообразование в вершине движущейся в тонком листе (по схеме рис. 1) трещины.

Ключом к уяснению механизма появления вышеуказанных зависимостей разрушающих напряжений от характеристик напряженно-деформированного состояния в зоне надреза и температуры элементов является отмеченный выше факт локализации зоны пластических деформаций у надреза, превращение в этой зоне механической энергии деформации в тепловую и воздействие последней на механические свойства материала (рис. 7). Превращение энергии механического деформирования металла в зоне надреза в тепло приводит к весьма существенному повышению там средней тем-

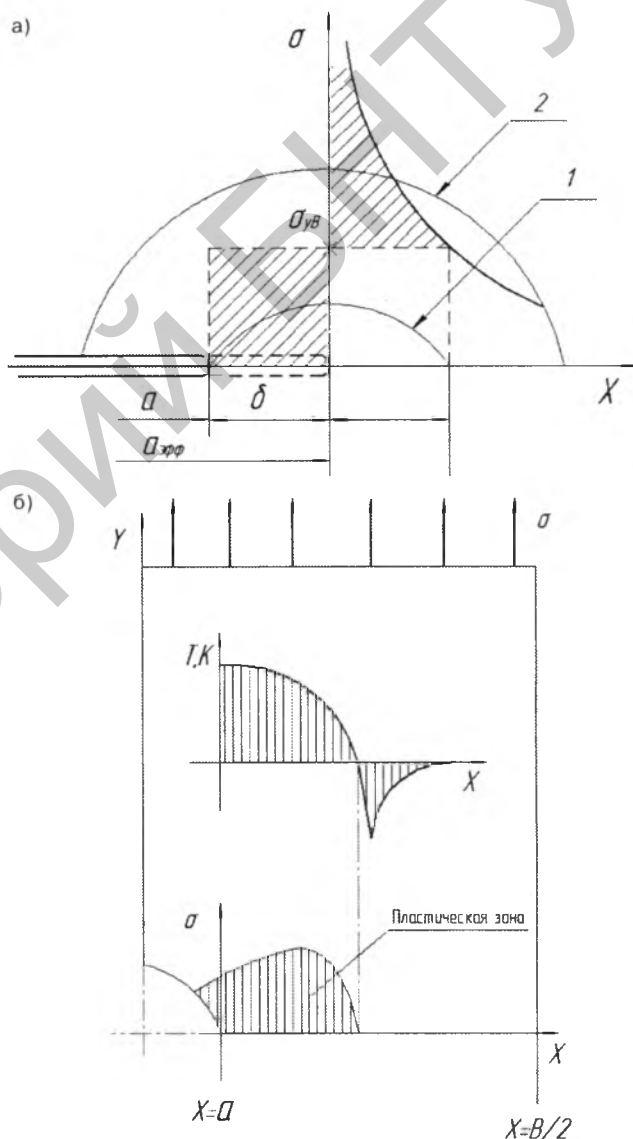


Рис. 7. Схема упруго-пластического роста трещины (а) и теплообразования в упругой и пластической зонах в вершине движущейся трещины (б)

пературы [15]. В работах Брока [16] показывается, что повышение температуры в вершине трещины и объемное напряженно-деформированное состояние существенно сказываются на динамике развития трещины.

На рис. 7б показан ход изменения температуры в окрестности вершины трещины: наибольшее повышение средней температуры (на десятки градусов)

достигается в непосредственной близости от вершины, до границы области пластических деформаций (см. рис. 7а, позиция 1) температура снижается до нуля, а в упруго-деформированном материале (см. рис. 7а, полоса 1–2) — снижается ниже нуля (до нескольких градусов). Следует иметь в виду, что источником тепла в металлическом образце является не весь объем зоны пластических деформаций у вершины трещины, а только участки скольжения (полосы Людерса—Чернова), занимающие относительно небольшую долю этой зоны [11–13]. Непосредственно в полосах скольжения температура повышается на сотни градусов (до температуры плавления). Продолжительность такого повышения температуры определяется законами теплопроводности [17], поэтому следует ожидать противоположных эффектов при больших и очень маленьких скоростях деформирования. Чем больше объем пластически деформированного металла, скорость и величина деформации, тем выше его температура. Зона разрушения будет более локализованной, если выделяющееся в месте надреза тепло поглощается окружающей средой, а не прилегающими объемами деформированного металла. Поэтому чем выше способность элемента отдавать тепло окружающей среде и чем ниже ее температура, тем меньше будет эта зона. Теплотворная способность при деформировании и теплофизические параметры различных марок малоуглеродистых строительных сталей примерно одинаковы. Это приводит к тому, что понижение температуры среды эксплуатации будет сильнее локализовывать деформированную зону у толстых образцов с острыми надрезами,

при большой скорости движения трещины и т. д., определяя более значительное падение их прочности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 С уменьшением толщины стальных листов (до 3–10 мм) и ростом радиуса надреза напряженное состояние приближается к плоскому. Увеличение толщины элементов с надрезами (30–40 мм и более) сопровождается появлением плоской деформации. Прочность листового элемента зависит от механизма зарождения и развития разрушения и при росте толщины листов изменяется с достижением максимума для пластин промежуточной толщины (для Ст3 — листы толщиной 12–20 мм). Аналогично изменяется сопротивление разрушению пластин при росте коэффициента концентрации напряжений в зоне зарождения трещины отрыва.
- 2 Источником теплообразования в металлическом образце является не весь объем зоны пластических деформаций у вершины дефекта, трещины, а только участки скольжения (полосы Людерса—Чернова), занимающие относительно небольшую долю этой зоны. В полосах скольжения температура металла повышается на сотни градусов (вплоть до температуры плавления). Условия распределения и отвода деформационного тепла из зоны пластического деформирования в окрестности вершины дефекта позволяют целенаправленно воздействовать на развитие механизма излома (вязкий, квази-хрупкий, хрупкий).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольденблат, И. И. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов / И. И. Гольденблат, В. А. Копнов. — М.: Машиностроение, 1968. — 191 с.
2. Беленя, Е. И. Металлические конструкции. Общий курс. Учебник для вузов / Е. И. Беленя [и др.]. — М.: Стройиздат, 1985. — 560 с.
3. Металлические конструкции: в 3 т. Т. 1: Элементы стальных конструкций / В. В. Горев [и др.]; под ред. В. В. Горева. — М.: Высшая школа, 1997–2002. — 527 с.
4. Фридман, Я. Б. Механические свойства металлов: в 2 ч. / Я. Б. Фридман. — М.: Машиностроение, 1974. — Ч. 2. — 368 с.
5. Вейс, З. В. Анализ разрушения в условиях концентрации напряжения / З. В. Вейс // Разрушение. Под ред. Г. Любовица. Т. 3. Инженерные основы и воздействие внешней среды. — М.: Мир, 1976. — С. 263–302.
6. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. — М.: Издательство иностранной литературы, 1954. — 647 с.
7. Ужик, Г. В. Сопротивление отрыву и прочность металлов / Г. В. Ужик. — М.: Издательство АН СССР, 1950. — 255 с.
8. Мойсейчик, Е. А. Количественная оценка надежности статически растянутых элементов строительных конструкций из малоуглеродистых сталей при низких температурах: дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / Е. А. Мойсейчик. — Новосибирск, 1980. — 205 с.
9. Аугустин, Я. Аварии стальных конструкций / Я. Аугустин, Е. Шледзевский. — М.: Стройиздат, 1978. — 183 с.
10. Лащенко, М. Н. Аварии металлических конструкций зданий и сооружений / М. Н. Лащенко. — М.: Стройиздат, 1969. — 181 с.
11. Нотт, Дж. Ф. Основы механики разрушения / Дж. Ф. Нотт. — М.: Металлургия, 1978. — 256 с.
12. Zehnder, A. Fracture Mechanics / A. Zehnder. — Ithaca: Cornell University, 2007. — 220 p.
13. Bilby, B. A. The spread of plastic yield from a notch / B. A. Bilby, A. H. Cottrell, K.H.Swinden // Proceedings of Royal Society London. — 1963. — Vol. A272. — P. 304–314.
14. Wells, A. A. The Mechanics of Notch Brittle Fracture / A. A. Wells // Welding Research. — 1953. — V. 7. — № 2. — P. 34–56.
15. Weichert, R. Heat generation at the tip of a moving crack / R. Weichert, K. Schoenert // J. Mech. Physics Solids. — 1978. — 26. — P. 151–161.
16. Brock, L. M. Effects of Thermoelasticity and a von Mises condition in rapid steady-state quasi-brittle fracture / L. M. Brock // Int. J. Structures. — 1996. — Vol. 33. — P. 4131–4142.
17. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. — М.-Л.: Машгиз, 1962. — 456 с.

Статья поступила в редакцию 20.09.2010.