

ДЕФОРМАЦИОННОЕ ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ С КОНСТРУКТИВНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ

Е.А. Мойсейчик
БНТУ, Минск, Беларусь
E-mail: emoisseitchik@mail.ru

С использованием термографии показано, что процесс деформирования определяется образованием и развитием полос деформации, в пределах которых сталь находится в пластически активированном состоянии. Вне этих полос материал работает в упругом или в упругопластическом состоянии. Зарождение полос деформации и их развитие определяется расположением дефектов. Вид излома элемента определяется взаимодействием (интерференцией) полос деформации в предельной стадии работы. Сопоставление данных тепловых исследований процесса деформирования стальных образцов с проявлениями полос Людерса на поверхности элементов показывает, что термография позволяет выявить образование полос сдвига на различных стадиях работы элемента при отсутствии других внешних признаков и локализовать участки конструкции с дефектами.

ВВЕДЕНИЕ

Дефекты материала и различные конструктивно-технологические надрезы в элементах стальных конструкций существенно изменяют работоспособность соответствующих инженерных систем. Своевременное выявление начальных дефектов и их изменений при работе особенно актуально для различных сосудов давления [1], для контроля качества которых на различных стадиях «жизни» конструкции проводят испытания следующих трех типов. При выборе конкретных материалов, расчетах и разработке технологии изготовления основными являются испытания механических свойств и контроль структуры металла. На последующих стадиях изготовления проводятся испытания для проверки сварных соединений и изменений качества материалов. Готовую к эксплуатации конструкцию часто подвергают приемочному (гидравлическому и т.д.) испытанию, а находящуюся в эксплуатации конструкцию исследуют с целью выявления новых или развития имеющихся дефектов. На второй и третьей стадиях применяются неразрушающие методы контроля (визуальный, магнитно-порошковый, капиллярный, радиографический, ультразвуковой), которые требуют значительных затрат времени и средств [1,2]. Снижения стоимости методов контроля и повышения достоверности их результатов можно достичь совместным применением различных способов контроля в сочетании с численным моделированием работы конструкций. К этой же цели ведет и разработка методов предварительного выявления участков конструкции, содержащих дефекты, и их дальнейшее исследование традиционными неразрушающими методами контроля.

Целью настоящей работы является анализ деформирования растянутых стальных элементов с конструктивно-технологическими дефектами на различных стадиях нагружения, выявление механизма локализации деформаций на участках зарождения трещин с использованием

компьютерной термографии и возможностей ее применения для локализации участков конструкций, содержащих дефекты.

МЕХАНИЗМ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Сталь в прокате является поликристаллическим материалом, механические свойства которого в процессе эксплуатации зависят как от начального строения (исходный химический состав, структура), так и от изменений начального строения при изготовлении и работе элементов конструкций [1-5]. При механическом нагружении стальных элементов конструкций происходят изменения на различных уровнях внутреннего строения материала [6], определяющие величину сопротивления конкретной стали напряжениям от внешних нагрузок и воздействий. Существующие методы прочностного расчета элементов стальных конструкций основываются на работе материала как континуума и не учитывают многие особенности процесса деформирования конструктивных элементов из стали. Так, в большинстве расчетных моделей материал представляется упругоработающим от начала загрузки до предела пропорциональности (текучести), т.е. при сопротивлении материала, соответствующего остаточным деформациям 0,005...1 %. Экспериментально показано, что в определяемой таким образом упругой области работы стали деформирование протекает с некоторым развитием пластической деформации (порядка 10^{-5} [4]), т.е. пластическая деформация появляется с самого начала нагружения. Характеристики сопротивления металлов, определяемые по ГОСТ 1497, рассчитываются по данным испытаний стандартных образцов. Они соответствуют кинетике деформирования объема металла конкретной формы при фиксированных условиях нагружения. Используемые в расчетах

стальных конструкций критерии пластичности также основываются на работе материала как континуума. В элементах реальных конструкций процессы возникновения предельных состояний в значительной мере связаны с явлениями локализации пластической деформации [1, 7-9], проявляющейся в образовании конкретных фигур деформации и скольжения при деформировании элемента в предельном состоянии. Такие фигуры для мягкой стали впервые были описаны В. Людерсом (1860 г.), возникновение их при различных операциях обработки сталей на Обуховском заводе систематизировал и обнаружил Д.К. Чернов (1885 г.), а детально исследовал их в своей книге Л. Гартман (1896 г.) [10]. Возникновение таких фигур зафиксировано в экспериментах с деформированием различных конструктивных форм стальных элементов (рис. 1–5). При растяжении образцов первые фигуры деформации возникают в окрестности дефектов. Для образца из плоского стального листа последовательность появления линий деформации на поверхности в месте перехода от рабочей зоны к уширению описана А. Надаи [9, 11] и показана на рис. 1. При росте растягивающего усилия на левой стороне образца (см. рис. 1,в) первой появляется линия «а» (см. рис. 1,а). После ее формирования происходит уменьшение примерно на 5 % нагрузки, при которой она появилась и которая соответствует верхнему пределу текучести. Последующее снижение этой нагрузки еще на 2 % завершилось образованием линии «б» (см. рис. 1,а). При постоянной величине растягивающего усилия от полос «а» и «б» текучесть распространяется в их окрестности и зрительно просматривается в виде широкой матовой полосы «в» (см. рис. 1,а). С другой стороны образца также образуются соответствующие фигуры деформации (см. рис. 1,б). Текучесть распространяется на рабочую зону образца. Две такие полосы деформации приводят к смещению участка рабочей зоны образца (см. рис. 1,в). В зонах выхода полос деформации на поверхность первоначальная форма поверхности искажается (образуются профили в виде бороздок, выступов, откосов). При дальнейшем развитии местных осевых деформаций (от 2 до 4 %) нагрузка практически не изменяется (после первоначального падения), а рабочая зона полосы деформации образца продолжает вытягиваться в продольном направлении и сужаться в поперечном. Остаточному удлинению в 2...4 % соответствует поперечное сужение в 1...2 %. Прилегающие к полосе участки не изменяют своих размеров, т.е. остаются в упругой стадии работы. Полоса скольжения составляет с направлением растягивающего усилия угол, близкий к 45°. Последовательное развитие полос деформации по длине рабочей зоны образца получено в опытах J. Dudley Jevons [10] и показано на рис. 2. Это развитие происходит при напряжениях, соответствующих пределу текучести (см. рис. 2,а – деформация рабочей зоны на 1 %; рис. 2,б – на 2 %). В конце площадки текучести вся рабочая зона оказывается покрытой следами полос деформации.

Полосы скольжения появляются и при внецентренном растяжении (см. рис. 3,а), сжатии (см. рис. 3,б), изгибе (см. рис. 3,в), других видах деформационного воздействия [9-17]. Поставляемый в производство изделий стальной полуфабрикат уже деформирован при металлургическом переделе. Остаточные деформационные полосы можно выявить по толщине листа как вдоль (см. рис. 3,ж), так и поперек прокатки (см. рис. 3,з) при отсутствии нагрузки [17]. Образование фигур деформации, полос скольжения происходит и в элементах различных конструкций как при их изготовлении, так и при эксплуатации [3, 9, 11, 14]. Изменение кривизны поверхности в местах пересечения ее с полосой скольжения ослабляет сцепление окалины с основным металлом, что ведет к проявлению на поверхности элементов и узлов фигур деформации в виде шелушения окалины. В этих же местах может разрушаться антикоррозионное покрытие (краска, оцинковочный слой и т.д.). Основные контуры показанных на рис. 5 фигур могут возникать в заклепочных и болтовых соединениях мостов. Их четкое проявление в полевых условиях возможно только при механико-химической подготовке соответствующего участка поверхности.

Внимательное рассмотрение фигур деформации позволяет выявить их характерные особенности для механики деформирования твердого тела. Так, полосы скольжения всегда зарождаются у свободной поверхности. Их траектории прямолинейны, если на поверхности зарождения полосы отсутствует нагрузка; при наличии нагрузки – полосы криволинейные. Ширина полос изменится вдоль ее траектории и на отдельных участках принимает клинообразную форму. Ширина полосы большая на участках, где должно быть большим относительное удлинение материала (см. рис. 3,а) при деформировании. Предельная ширина полосы скольжения определяется характерным размером дефекта, ответственного за ее образование (например, диаметр отверстия, рис. 4,г). 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 (см. рис. 3,ж, з). Полосы скольжения разделяют материал 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 развития в следящем за изменением внешних (граничных) перемещений режиме.

Низкоуглеродистые стали при обычных условиях эксплуатации также представляют собой сложный конгломерат [10, 15, 18, 19] из

взаимодействующих зерен размером не более долей миллиметра, имеющих различный химический состав и физико-механические свойства. Наиболее прочные и жесткие из этих зерен (цементит) содержат предельное количество химически связанного и свободного углерода; зерна, состоящие из железной матрицы, имеют минимальное содержание углерода (феррит), обладают наименьшей прочностью и высокой пластичностью. Часть зерен стали состоит из цементита, другая - из феррита; значительное количество зерен имеет слоеный состав с перемежающимися прослойками феррита и цементита (перлит). Присутствуют в стали и зерна с иным составом [18, 19]. С физико-химических позиций сталь представляет собой твердый раствор различных элементов в железе. С изменением термодинамических параметров (давление, температура, объем и др.) химический состав и свойства зерен и их границ изменяются. В основном такие изменения (реакции) протекают в пластически активированных объемах материала, т. е. при развитии полос пластичности [18, 19]. Очевидно, что, если после прохождения фронта скольжения по всей рабочей зоне материала последний обладает способностью к созданию новых полос скольжения, то может образоваться отраженная (новая) волна скольжения и т. д. На развитие этого процесса накладывают ограничения: 1) величина граничного перемещения элемента; 2) соотношение скоростей граничного перемещения с фазовой и групповой скоростью волны скольжения; 3) способность пластически активированного материала к упрочнению.

Микрофотография незначительно деформированного фрагмента поверхности мягкой стали сразу после достижения предела текучести показана на рис. 3,д. Видно, что полосы скольжения в зернах расположены вдоль определенного направления (полосы сдвига).

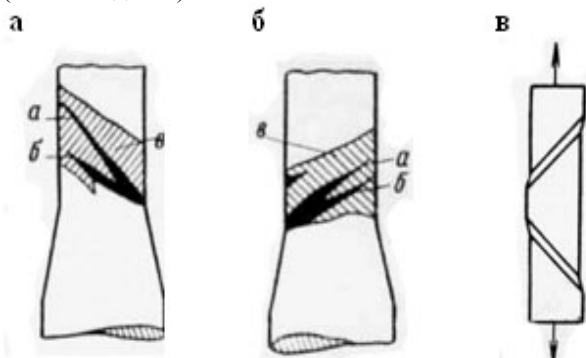


Рис. 1. Последовательность появления линий скольжения у дефекта [9, 11]

Схема взаимодействия зерен в полосе сдвига отражена на рис. 3,е, из которого видно, что полосы сдвига в зернах возникают в местах взаимного давления зерен. Это же подтверждается и рис. 5,а. Из рис. 5,б следует, что сдвиги могут образовываться во всем зерне или его части, а полосы сдвига разделяются между собой упругодеформированными цепочками зерен (заштрихованные области).

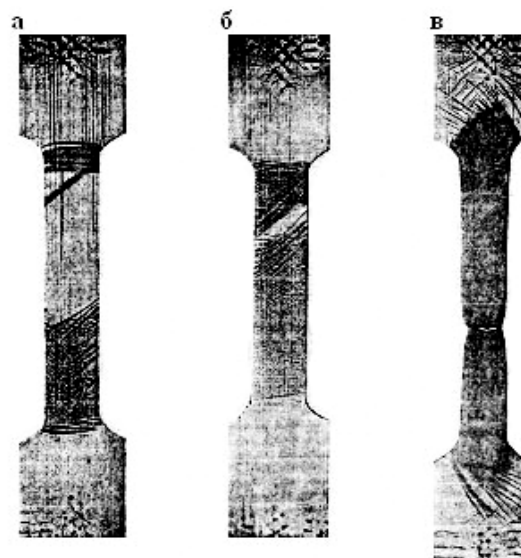


Рис. 2. Развитие полос скольжения при растяжении [10]

Современная техника позволяет изучать полосы сдвига в отдельных кристаллах зерен, выявлять дислокационную природу процесса деформирования и разрушения [20]. Механика зарождения и развития полос сдвига в кристаллах во многом напоминает подобные процессы в объемах различных сплавов [21]. С использованием компьютерных технологий можно в некотором приближении воспроизвести кинетику процесса зарождения и движения фронта пластичности вдоль рабочей зоны образца [22].

Эксперименты по механике разрушения показали, что полосы сдвига создают условия для зарождения трещин в элементах конструкций и их развития [23]. Поэтому актуальным является изучение кинетики зарождения и развития полос скольжения, выявление расположения и механизма взаимодействия полос скольжения.

ЛИНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ В КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Многие стержневые и другие стальные элементы сооружений компонуются из профилей, образуемых сочетанием листов с различными конструктивными и технологическими изменениями их размеров, дефектами. При этом ширина таких листов в ослабленных сечениях намного больше их толщины.

Процесс деформирования элементов, например при растяжении, с достаточной для инженерных расчетов точностью, во многих случаях можно свести к плоской задаче деформирования пластины с надрезом. При этом в случае плоского напряженного состояния толщина листа в ослабленном сечении должна быть достаточно малой по сравнению с его шириной. Если толщина элемента значительная по отношению к ширине, то элемент работает в условиях плоской деформации. При сопоставимых размерах толщины и ширины растянутого элемента задача сводится к осесимметричной деформации.

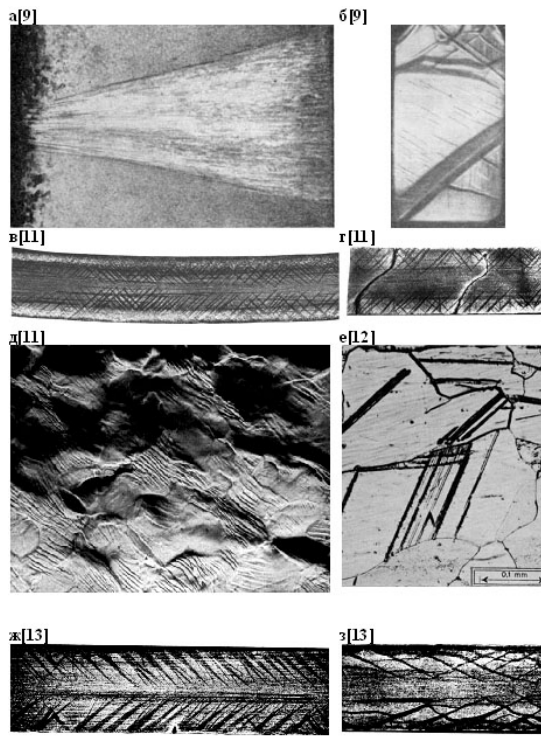


Рис. 3. Виды полос скольжения в зернах и элементах при различных напряженных состояниях

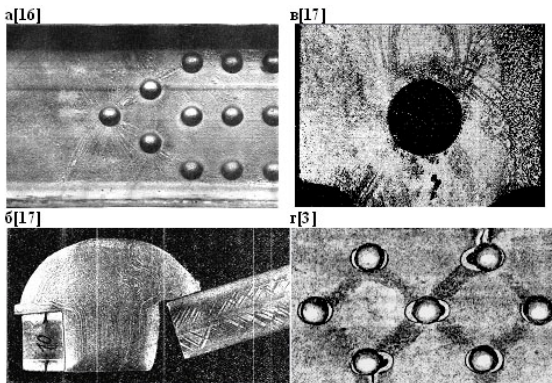


Рис. 4. Виды полос скольжения в элементах конструкций

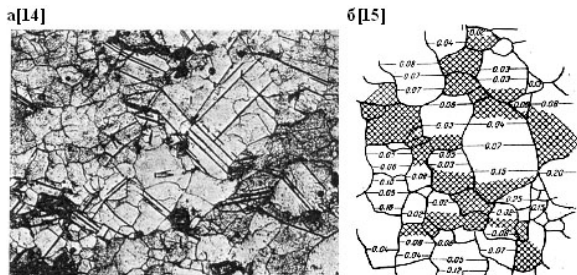


Рис. 5. Распределение полос скольжения в структуре зерен

Теоретические исследования, начало которым было положено работами Б. Сен-Венана (1870 г.), М. Леви (1871 г.), Г. Генки (1923 г.), Л. Прандтля (1923 г.), а дальнейшее развитие получили в более поздних работах ряда выдающихся ученых, привели к созданию математически строгого метода решения плоских задач при пластическом деформировании твердого тела, называемого методом характеристик. Этот метод позволяет построить линии скольжения

для наиболее характерных моделей конструктивных элементов [24].

Для решения задачи плоского напряженного состояния имеем следующие условия и уравнения [25].

Условия плоского напряженного состояния: в тензоре напряжений (T_σ) при плоском напряженном состоянии отсутствует одно из трех нормальных напряжений ($\sigma_j = 0, j = x, y, z$) и соответственно столбец и строка, на пересечении которых находится σ_j . Для определенности примем, что $\sigma_z = 0, \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$, т.е. σ_z - одно из главных напряжений. Направление осей: OX - вправо; OY - вверх. Первый инвариант T_σ равен сумме: $\sigma_x + \sigma_y$.

Уравнения равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В дополнение к уравнениям (1) при решении конкретных задач можно использовать условие пластичности, например, Треска-Сен-Венана:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4\tau_x^2 \quad (2)$$

и другие условия. Для площадки, перпендикулярной плоскости XOY , нормаль к которой составляет угол α с осью OX , имеем два выражения для определения соответственно нормальной (σ_α) и касательной (τ_α) составляющих полного напряжения:

$$\sigma_\alpha = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha, \quad (3)$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha - \tau_{xy} \cos 2\alpha. \quad (4)$$

Если главные напряжения обозначить через $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и допустить условие $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, то максимальное касательное напряжение на этой площадке равно: $\tau_{12} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$. Угол α , соответствующий α_{12} , определится выражением:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2\tau_{xy}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha} \quad (5)$$

Равенство (5) определяет для произвольной точки плоскости два взаимно перпендикулярных направления, такие, что на нормальных к ним площадках касательные напряжения будут максимальными. Через каждую такую точку проходят две взаимно перпендикулярные линии, совпадающие с линиями скольжения. Полагая $dy/dx = \operatorname{tg} \alpha$, из выражения (5) находим дифференциальное уравнение линий:

$$\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2\tau_{xy}} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 + 2 \frac{dy}{dx} - \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2\tau_{xy}} = 0. \quad (6)$$

Если уравнение линии скольжения записать в виде $U(x,y) = \text{const}$, то получим

$$\frac{dy}{dx} = - \frac{\partial U / \partial y}{\partial U / \partial x}. \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) следует дифференциальное уравнение линий скольжения при плоском напряженном состоянии:

$$(\sigma_y - \sigma_x) \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 - 4\tau_{xy} \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial y} - (\sigma_y - \sigma_x) \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 = 0. \quad (8)$$

Из (4) и (5) получаем величину максимального скальвающего напряжения:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_y - \sigma_x)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (9)$$

Из (3)–(5) вытекает, что линии скольжения образуют с главными осями угол 45° .

Для плоского деформированного состояния дифференциальные уравнения линий скольжения приведены в [9, 24]. В [24] даны сетки линий скольжения для пластин с надрезами.

ТЕРМОГРАФИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ РАСТЯЖЕНИЕМ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ

Полосы скольжения можно выявить экспериментально, например, при инфракрасном термографировании растянутых образцов. Для этого конструкция образцов выбиралась так, чтобы в процессе эксперимента полосы сдвига могли зарождаться у моделей конструктивно-технологических дефектов. Материал образцов – листовая сталь ВСтЗсп толщиной 10 мм. Соединение листовых элементов производилось полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа. Образцы всех типов нагружались статически растягивающим усилием до разрушения на испытательной машине Р-100 с записью диаграммы «нагрузка-удлинение». Испытание проводилось по методике ГОСТ 1497-84. При подготовке к испытаниям на образцы наносились метки кернером и фиксировались начальные размеры образцов с помощью измерительной линейки и штангенциркуля. В процессе нагружения фиксировалась машинная диаграмма «нагрузка-удлинение», и с помощью компьютерного термографа ИРТИС-2000 процесс деформирования каждого образца отображался в термофильме. Вид испытательной машины с установленным образцом и термографом показан на рис. 6,а. После разрушения замерялись характерные размеры зоны излома и фотографировались изломы и элементы образца. Общий вид экспериментальных образцов до нагружения и после зарождения дефекта в пластинах показан на рис. 6, б–е и 7,а, б.

На рис. 8,а–м показаны кадры термофильма деформирования сварного соединения (см. рис. 7,а, образец М9). Видно, что в упругой стадии в накладках зарождаются полосы сдвига, направление которых соответствует наибольшим сдвигающим напряжениям. Ширина полос растет с увеличением нагрузки. Полосы сдвига являются источником теплообразования. При этом температура поверхности полосы сдвига растет плавно до стадии зарождения трещины у конца флангового шва. На стадии образования свободных поверхностей при росте трещины температура поверхности увеличивается в несколько раз, достигая 88°C в стадии долома. Уменьшение зазора между стыкуемыми пластинами (см. рис. 7,а, образцы М6, М7) изменяет угол наклона полос деформации и приводит к росту разрушающей нагрузки.

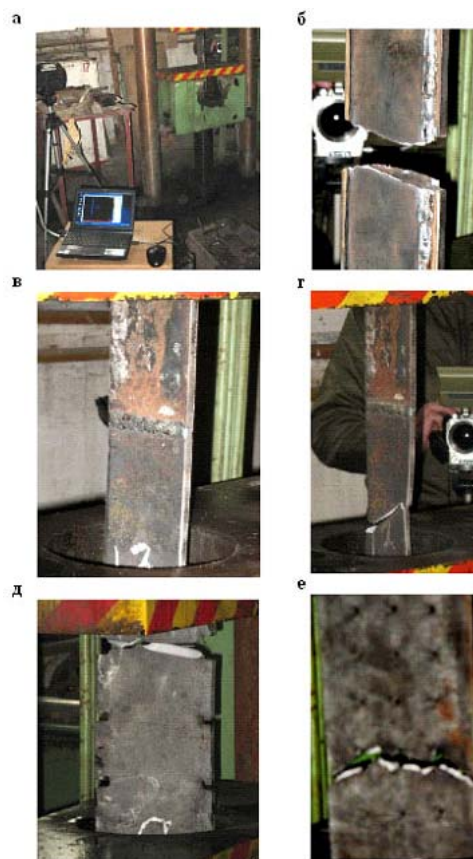


Рис. 6. Вид испытательной установки и образцов

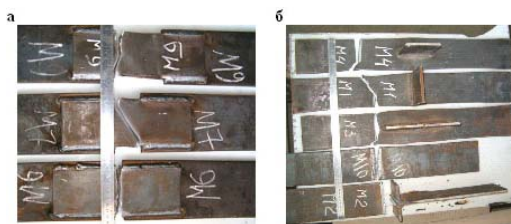


Рис. 7. Вид образцов и траекторий трещин после разрушения

При «нулевом» зазоре (см. рис. 7,а, б, образец М6) излом становится квазихрупким (см. рис. 6,а), разрушение начинается от двух очагов. Максимальная температура поверхности при доломе снижается до 43°C (рис. 9,а–г). Пространственные эпюры распределения температуры в процессе деформирования образца М6 с указанием величин максимальных и минимальных температур на поверхности показаны на рис. 10. На рис. 11 приведены отдельные кадры термофильмов нагружения образцов с боковыми надрезами (а–в) и группой отверстий (г–е). Фотографии этих образцов после разрушения показаны на рис. 6, д и е. Сопоставление указанных кадров с рис. 4 показывает, что термография позволяет выявить образование полос сдвига при упругой и упруго-пластической работе элемента и при деформировании образцов с реальными дефектами [26, 27].

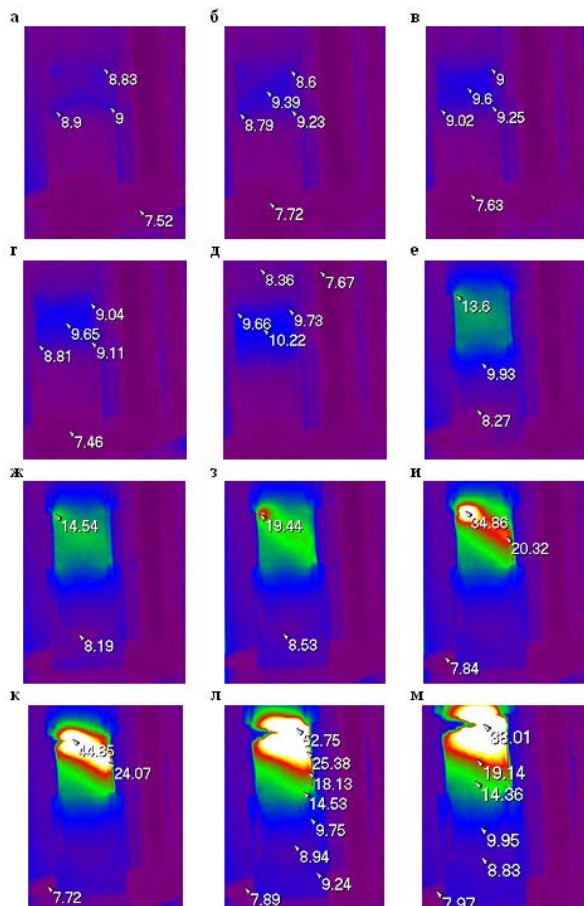


Рис. 8. Термограммы деформирования образца с накладками (смотреть совместно с рис. 7,а)

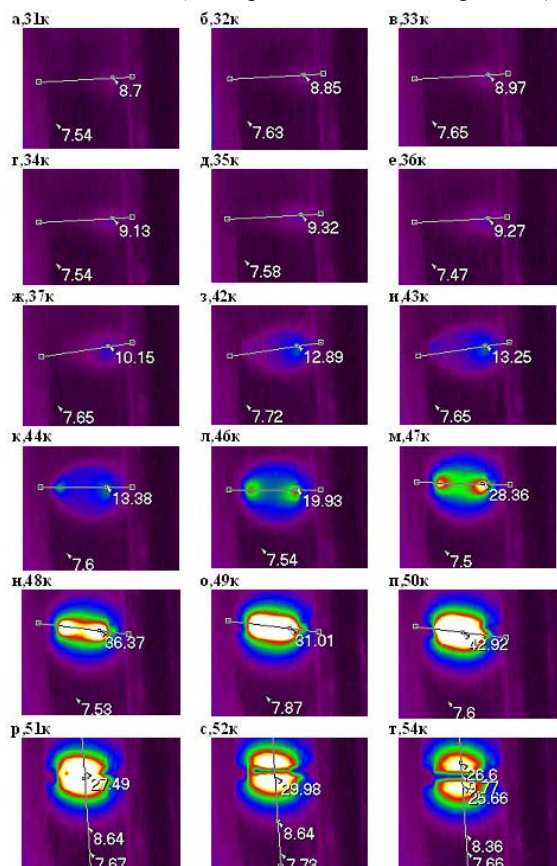


Рис. 9. Теплообразование на различных стадиях деформирования образца с боковыми вырезами

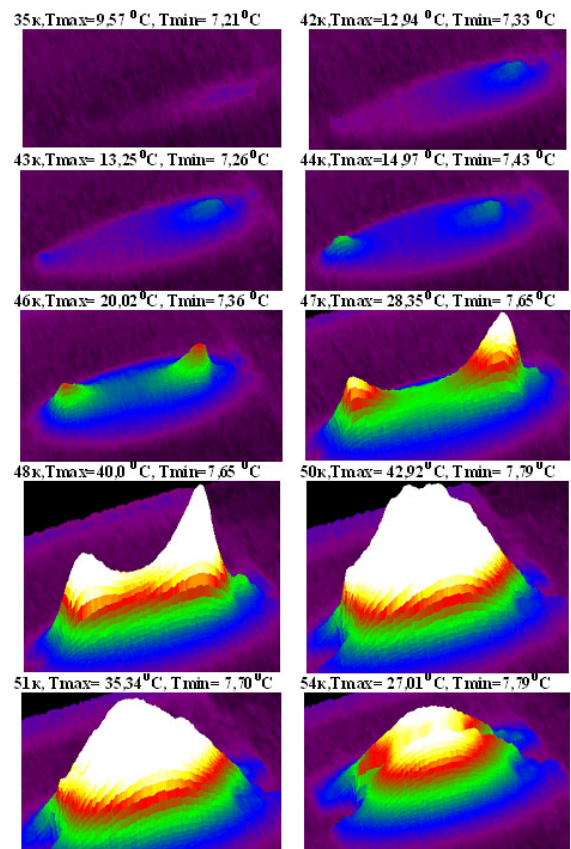


Рис. 10. Пространственная модель распределения тепла на поверхности образца с боковыми надрезами

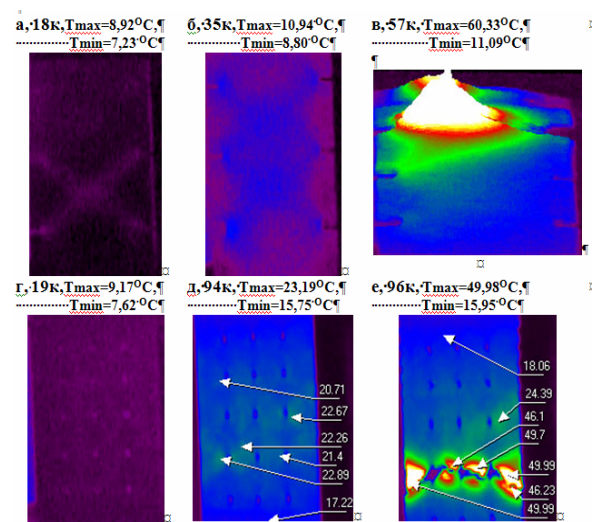


Рис. 11. Взаимодействие полос скольжения в образцах с отверстиями

ВЫВОДЫ

Процесс деформирования стальных элементов определяется образованием и развитием полос деформации, в пределах которых сталь находится в пластически активированном состоянии. Вне этих полос материал работает упруго или в упругопластическом состоянии. Зарождение полос деформации и их развитие определяется расположением дефектов. Вид излома элемента (вязкий-хрупкий) определяется взаимодействием

(интерференцией) полос деформации в предельной стадии работы.

Неразрушающий контроль дефектных участков стальных элементов на основе инфракрасного термографического сканирования обладает высокой чувствительностью, наглядностью и объективностью результатов и позволяет при упругой и упругопластической стадиях работы материала выявлять локализацию деформаций и возможные очаги зарождения разрушения в стальных конструкциях с различными типами соединений элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р.В. Никольс. *Конструирование и технология изготовления сосудов давления*. М.: «Машиностроение», 1975, 464 с.
2. Н.И. Пригоровский. *Методы и средства определения полей деформаций и напряжений*: Справочник. М.: «Машиностроение», 1983, 248 с.
3. Е.О. Патон, Б.Н. Горбунов. *Стальные мосты. Т. 1. Фермы балочной системы. Материал и заклепки*. Харьков-Киев: ГНТИ Украины, 1935, 812 с.
4. В.Х. Мюнзе. *Усталостная прочность сварных стальных конструкций*. М.: «Машиностроение», 1968, 273 с.
5. Л.А. Копельман. *Сопrotивляемость сварных узлов хрупкому разрушению*. Л.: «Машиностроение», 1978, 232 с.
6. В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев. *Структурные уровни деформации твердых тел*. Новосибирск: «Наука», 1985, 229 с.
7. Ф. Макклинтон, А. Аргон. *Деформация и разрушение материалов*. М.: «Мир», 1970, 444 с.
8. Н.А. Шапошников. *Методика механических испытаний металлов и ее применение*. Л.-М.-Свердловск: ГНТИ по черной и цветной металлургии, 1933, ч. 1, 324 с.
9. А. Надаи. *Пластичность и разрушение твердых тел*. М.: Изд-во иностр. лит., 1954, 648 с.
10. И.А. Одинг. *Современные методы испытания металлов*. Л.: Изд-во «Сев.-зап. промбюро ВСНХ», 1927, 269 с.
11. А. Nadai. *Der Bildsame Zustand der Werkstoffe*. Berlin: Verlag von J. Springer, 1927, 171 S.
12. *Handbuch der Physikalischen und technischen Mechanik. Band IV-2 Hälfte. Technische Physik der festen Körper* / Herausgegeben von prof. F. Auerbach, W. Hort. Berlin: Verlag für J. Springer, 1931, 614 S.
13. B. Straus, Ad. Fry. *Rißbildung in Kesselblechen* // *Stahl und Eisen*. 1921, N 33, S. 1133-1137.
14. Ad. Fry. *Kraftwirkungsfiguren im Flußeisen, dargestellt durch ein neues Aetzverfahren* // *Stahl und Eisen*. 1921, N 2, S. 1093-1097.
15. П.О. Пашков. *Периодичность деформации при пластическом растяжении и сжатии крупнозернистой стали* // *Журнал технической физики*. 1949, т. XIX, в. 3, с. 391-398.
16. M. Rudeloff. *Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau. Ausgabe A. Heft 3. Versuche mit Auschlüssen steifer Stübe*. Berlin: Verlag von J. Springer, 1921, 84 S.
17. O. Graf. *Aus dem Unterricht in Baustofflehre und Materialprüfung* // *Bautechnik*. 1933, N 47, S. 123-127.
18. В.Н. Гриднев, В.Г. Гаврилюк, Ю.Л. Мешков. *Прочность и пластичность холоднодеформированной стали*. Киев: «Наукова думка», 1974, 231 с.
19. Г.В. Курдюмов, Л.М. Утевский, Р.И. Энтин. *Превращения в железе и стали*. М.: «Наука», 1977, 267 с.
20. А.А. Ежов, Л.П. Герасимова. *Разрушение металлов*. М.: «Наука», 2004, 400 с.
21. А.В. Степанов. *Основы практической прочности кристаллов*. М.: «Наука», 1974, 132 с.
22. В.А. Романова, Р.Р. Балохонов. *Модель зарождения и развития макролокализации пластической деформации на основе двупредельного критерия пластичности* // *Деформация и разрушение материалов*. 2007, №12, с. 2-11.
23. Д. Броек. *Основы механики разрушения* / Пер. с англ. М.: «Высшая школа», 1980, 368 с.
24. Л.М. Качанов. *Основы теории пластичности*. М.: ГИТТЛ, 1956, 324 с.
25. С.Г. Михлин. *Основные уравнения математической теории пластичности*. Л.: Изд-во АН СССР, 1934, 69 с.
26. G. Maugin. *The Thermomechanics of Plasticity and Fracture*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992, p. 350.
27. Е.А. Мойсейчик. *Выявление дефектов стальных пролетных строений автодорожных и железнодорожных мостов с использованием инфракрасных технологий неразрушающего контроля* // *Автомобильные дороги и мосты*. 2010, №6, с. 85-94.

Статья поступила в редакцию 19.05.2011 г.

ДЕФОРМАЦІЙНЕ ТЕПЛОУТВОРЕННЯ ПРИ РОЗТЯГУВАННІ СТАЛЕВИХ ЗРАЗКІВ З КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ДЕФЕКТАМИ

Є.А. Мойсейчик

З використанням термографії показано, що процес деформування визначається утворенням і розвитком смуг деформації, в межах яких сталь знаходиться в пластично активованому стані. Поза цих смуг матеріал працює пружно або у пружнопластичній стані. Зародження смуг деформації та їх розвиток визначається розташуванням дефектів. Вид зламу елемента визначається взаємодією (інтерференцією) смуг деформації у граничній стадії роботи. Зіставлення цих теплових досліджень процесу деформування сталевих зразків з проявами смуг Людерса на поверхні елементів показує, що термографія дозволяє виявити утворення смуг зсуву на різних стадіях роботи елемента, за відсутності інших зовнішніх ознак і локалізувати ділянки конструкції з дефектами.

DEFORMATION HEAT BUILDUP IN TENSION STEEL SAMPLES WITH STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL DEFECTS

E.A. Moisseitchik

With the use of thermography is shown that the deformation process is determined by the formation and development of deformation bands within which the steel is plastically activated state. Outside of these bands of elastic material works or elastoplastic state. The origin of deformation bands and their development is determined by the location of defects. Kind of a break element is determined by the interaction (interference) deformation bands in the terminal stage. Comparison of the data of thermal studies of deformation of steel samples with the manifestations of Lüders bands on the surface of the elements shows that thermography can detect the formation of shear bands at different stages of the work element, if no other outward signs and to locate areas of design and defects.