

**ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОГРАФИЯ РАСТЯНУТЫХ  
СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОНСТРУКТИВНО-  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ**  
*Infrared thermography stretched steel elements with structural  
and technological defects*

Мойсейчик Е.К., Мойсейчик Е.А., Мойсейчик А.Е.  
*Ekaterina Moysesychik, Evgueni Moisseitchik, Aliaksandr Maiseichyk*

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 упруго 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 начальной стадии работы элемента, при отсутствии других внешних признаков.

*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 the initial stage item, if no other outward signs.*

### **Введение**

При механическом нагружении стальных элементов конструкций происходят изменения на различных уровнях внутреннего строения материала [1], определяющие величину сопротивления конкретной стали напряжениям от внешних нагрузок и воздействий. Существующие методы прочностного расчета элементов стальных кон-

струкций основываются на работе материала как континуума и не учитывают многие особенности процесса деформирования конструктивных элементов из стали. Характеристики сопротивления металлов, определяемые по ГОСТ 1497, рассчитываются по данным испытаний стандартных образцов. Эти величины 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 [2, 3], 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 (1896 г.) Л. Гартман [3]. Возникновение таких фигур, отмечено в экспериментах с деформированием различных конструктивных форм стальных элементов. 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 [3, 4]. Последовательное развитие полос деформации по длине рабочей зоны образца получено в опытах J. Dudley Jevons [5]. Полосы скольжения появляются и при внецентренном растяжении, сжатии, изгибе, других видах деформационного воздействия [3–11].

**Механизм упругопластического деформирования и  
теплообразования в элементах из низкоуглеродистых сталей  
при статическом нагружении**

Поставляемый в строительство стальной полуфабрикат уже деформирован прокаткой при металлургическом переделе. Остаточные деформационные полосы можно выявить по толщине листа как вдоль, так и поперек прокатки при отсутствии нагрузки [7]. Образование фигур деформации, полос скольжения, происходит в элементах стальных конструкций как при их изготовлении, так и при эксплуатации. Изменение кривизны поверхности в местах пересечения ее с полосой скольжения ослабляет сцепление окалины с основным ме-

таллом, 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.).

Низкоуглеродистые строительные стали при климатических условиях эксплуатации представляют собой сложный конгломерат из взаимодействующих зерен размером не более долей миллиметра, имеющими 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 [12, 13]. 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 развиваются в пластически активированных объемах материала, т.е. при развитии полос пластичности [12, 13], и протекают как физико-химические реакции в твердом теле [13]. Такие активированные объемы твердого тела изменяют свою температуру в зависимости от скорости протекания реакций [3, 18]. 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.

Современная техника позволяет изучать полосы сдвига в отдельных кристаллах зерен, выявлять дислокационную природу процесса деформирования и разрушения [14]. Механика зарождения и развития полос сдвига в кристаллах во многом напоминает подобные процессы в объемах различных сплавов [15]. С использованием законов теплопередачи в твердом теле и современных компьютерных технологий можно воспроизвести кинетику процесса зарождения и движения фронта пластичности вдоль рабочей зоны образца [16].

Эксперименты по механике разрушения показали, что полосы сдвига создают условия для зарождения трещин в элементах конструкций и их развития [17]. Поэтому актуальным является изучение кинетики зарождения и развития полос скольжения, выявление расположения и механизма взаимодействия полос скольжения.

Целью настоящей работы является анализ деформирования стальных элементов на предшествующей появлению трещин стадии и выявление механизма локализации деформаций в элементах с конструктивно-технологическими дефектами методами инфракрасной термографии.

### **Данные инфракрасного термографирувания опытных образцов**

Полосы скольжения можно проявить экспериментально, например, при компьютерном термографировании растянутых образцов в инфракрасном диапазоне. Для этого конструкция образцов выбиралась так, чтобы в процессе эксперимента полосы сдвига могли зародиться 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 рисунке 1а. После разрушения замерялись характерные размеры зоны излома и фотографировались изломы и элементы образца. Общий вид экспериментальных образцов до нагружения и после зарождения дефекта в сдвигаемой пластине показан на рисунках 1б–1е, 2а, 2б.

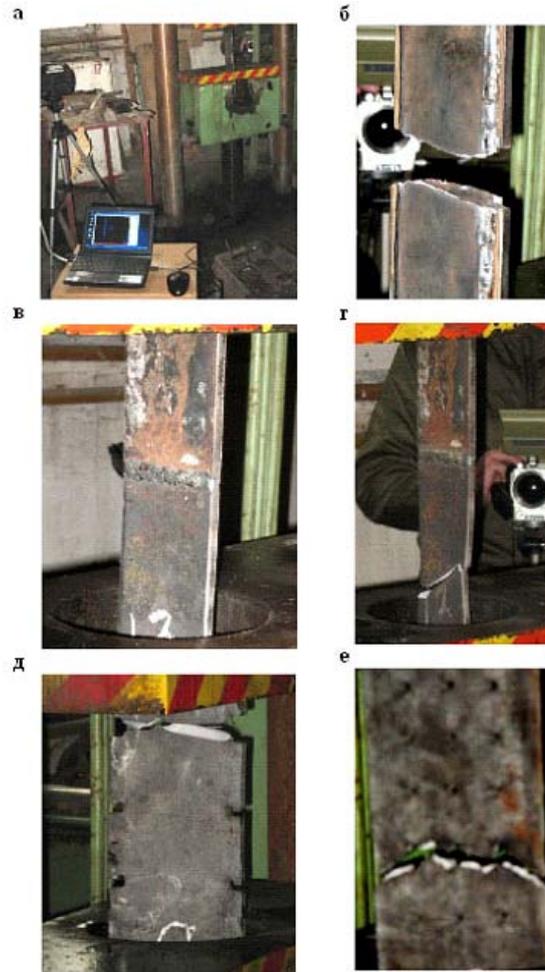


Рисунок 1

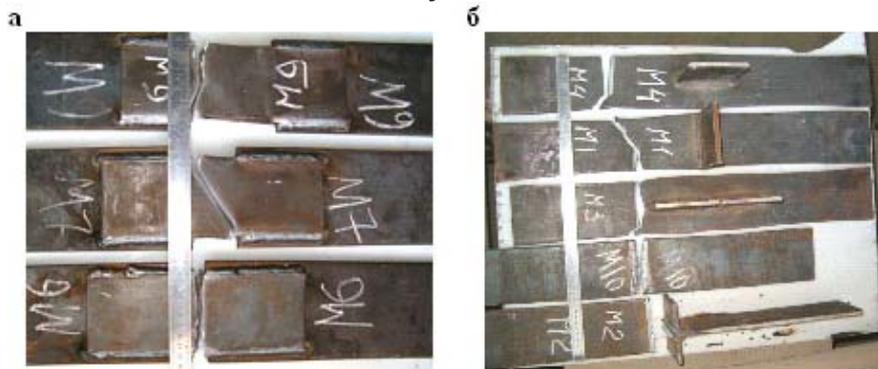


Рисунок 2

На рисунках 3а–3м показаны кадры термофильма деформирования сварного соединения (рис. 2а, 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

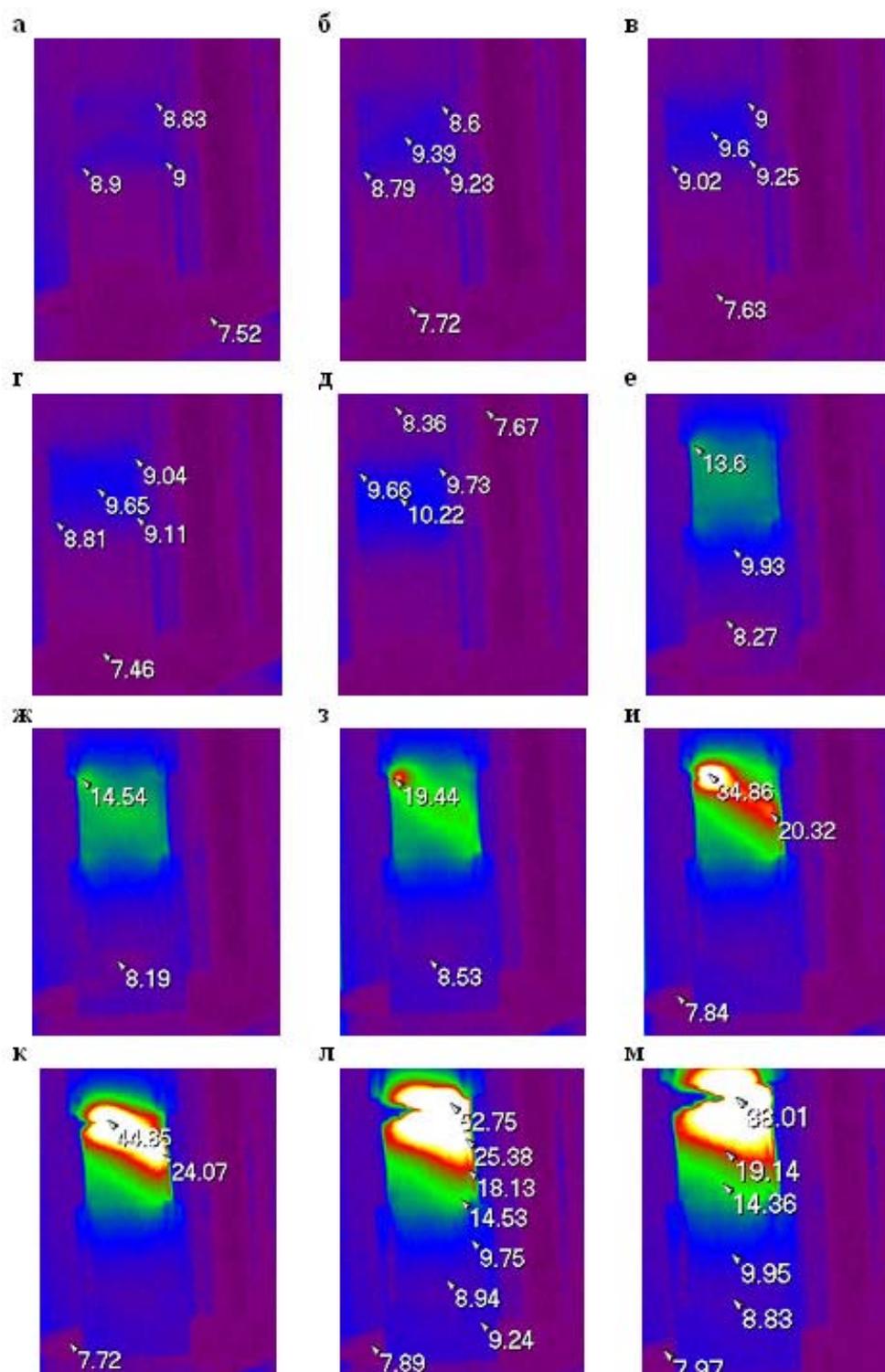


Рисунок 3

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 стыкуемы-

ми пластинами (рис. 2а, образцы М6, М7) изменяет угол наклона полос

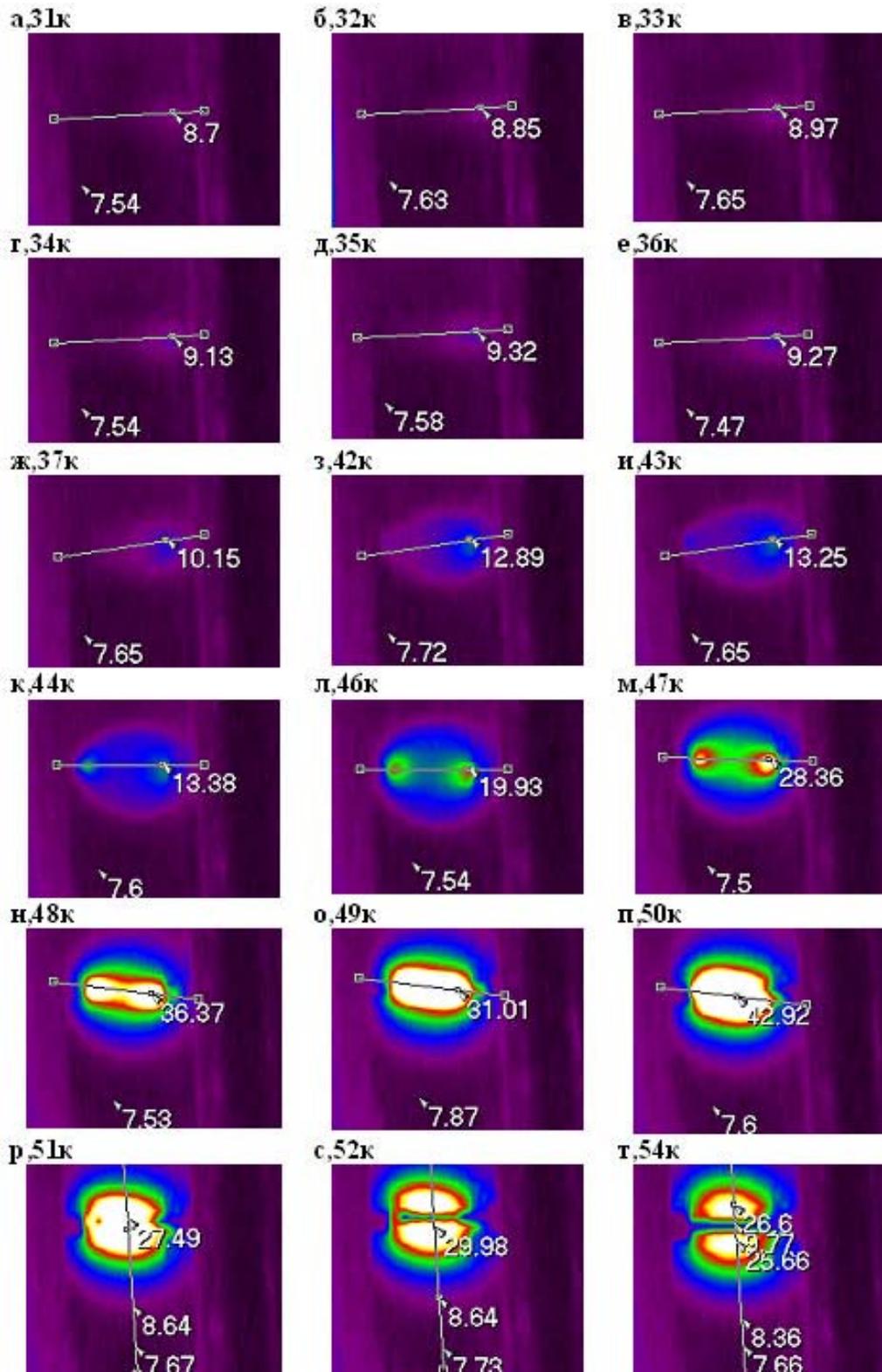


Рисунок 4

деформации и приводит к росту разрушающей нагрузки. При «нулевом» зазоре (рис. 2а, 1б, образец М6) излом становится квазихрупким

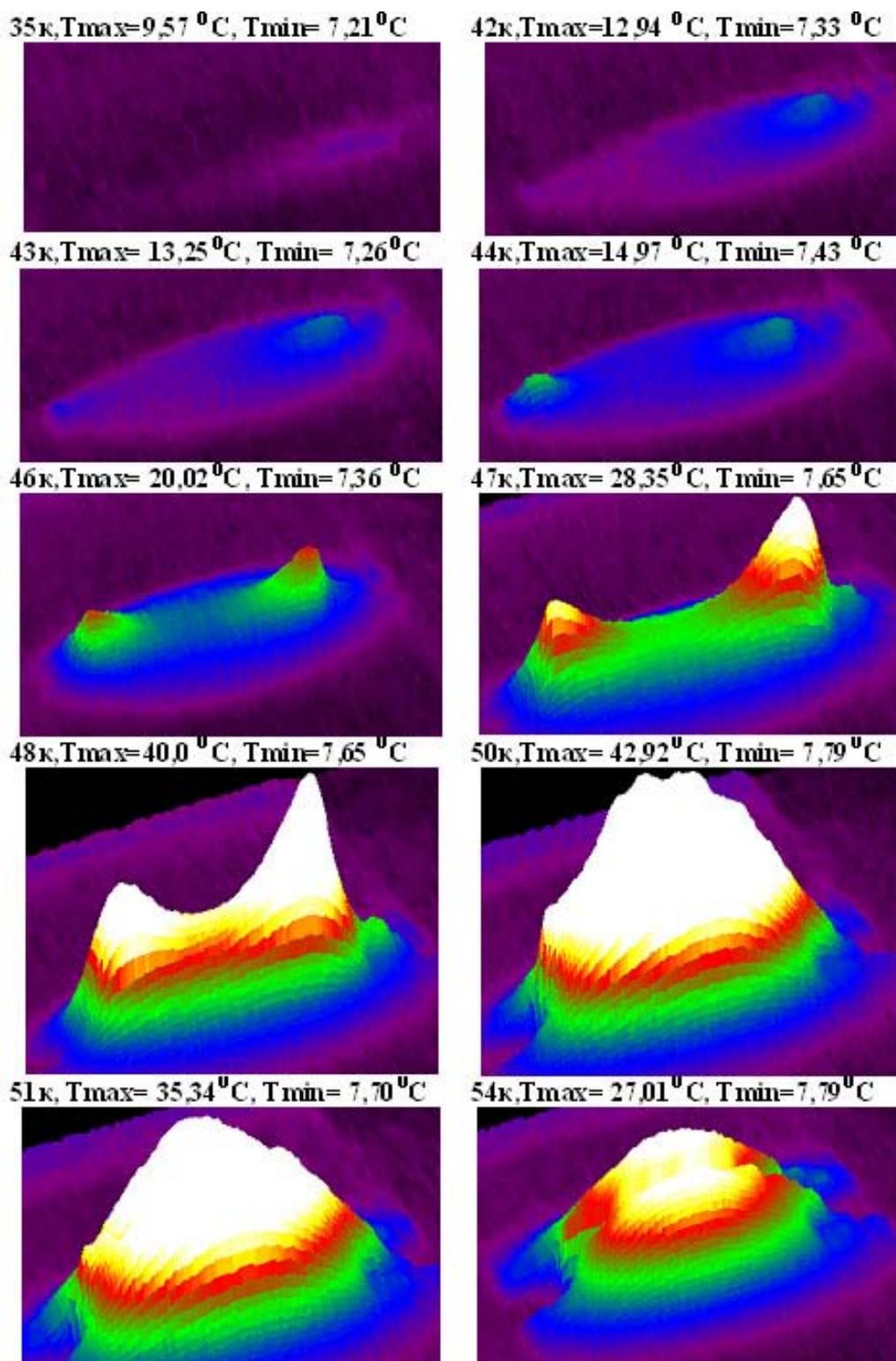


Рисунок 5

(рис. 1а), разрушение начинается от двух очагов. Максимальная температура поверхности при доломе снижается до 43°C (рис. 4а-4т). Пространственные эпюры распределения температуры в процессе деформирования образца М6 с указанием величин максимальных и минимальных температур на поверхности показаны на рисунке 5.

На рисунке 6 приведены отдельные кадры термофильмов нагружения образцов с боковыми надрезами (а-в) и группой отверстий (г-е). Фотографии этих образцов после разрушения показаны на рисунке 1д и 1е. Сопоставление указанных кадров со следами отслаивания окалина на поверхности образцов (рис. 1, 2) показывает, что термография позволяет выявить образование полос сдвига при деформировании элемента.

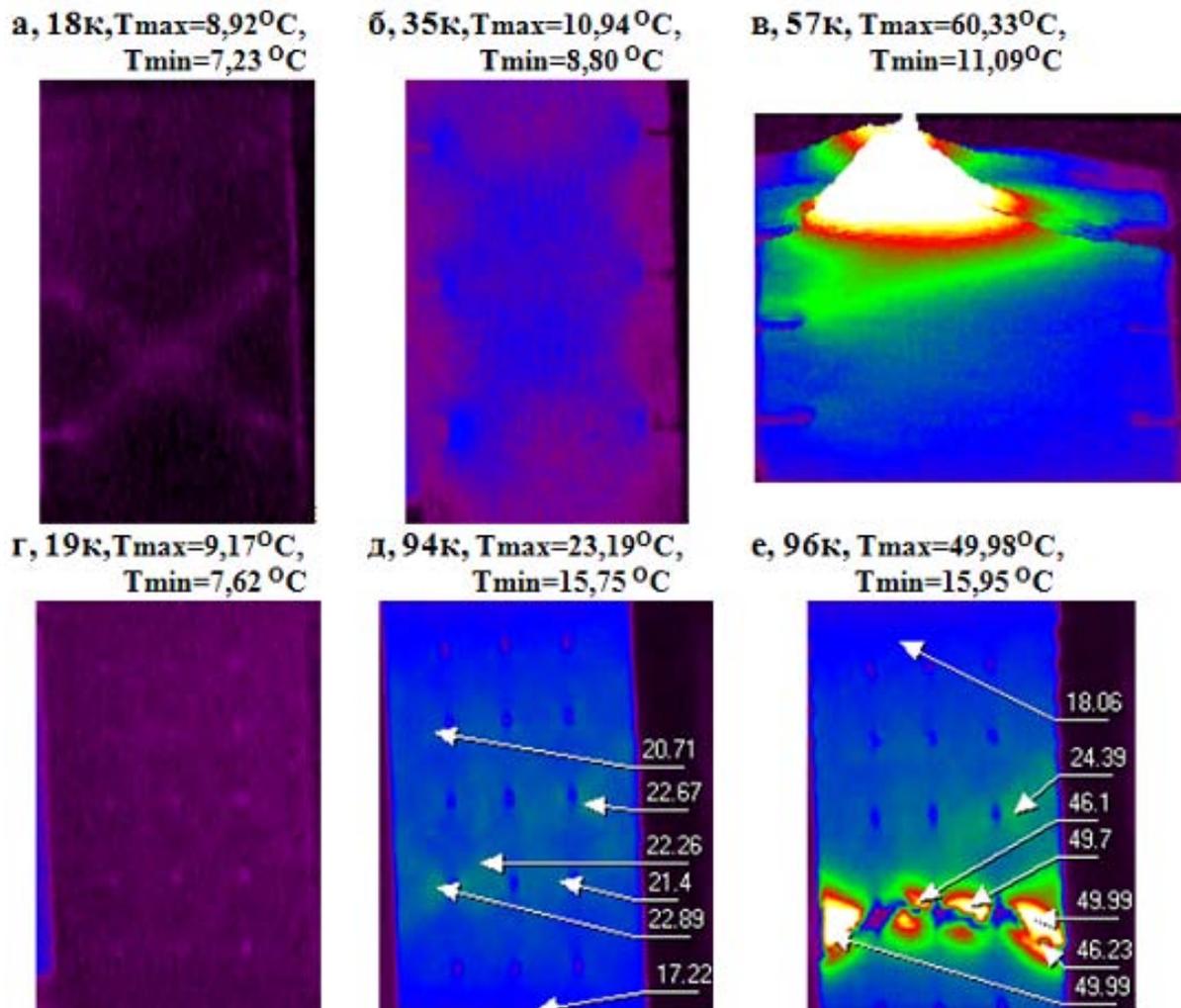


Рисунок 6

Внимательное рассмотрение фигур деформации позволяет выявить их характерные для механики деформирования твердого тела

особенности. 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 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. Угол наклона полосы к направлению действия силы при свободном деформировании близок к  $45^\circ$ , 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 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.

### **Выводы**

При статическом растяжении и термографировании в инфракрасном диапазоне стальных образцов с конструктивно-технологическими дефектами процесс деформирования 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 методами компьютерной термографии с применением термографа «ИРТИС-2000» 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 элементах стальных конструкций с различными типами соединений элементов [18, 19].

**Список литературы**

1. Панин, В.Е. Структурные уровни деформации твердых тел/В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев. - Новосибирск: Наука, 1985. – 229 с.
2. Макклинток, Ф. Деформация и разрушение материалов /Ф. Макклинток, А. Аргон.-М.: Мир,1970.-444 с.
3. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел/А. Надаи.-М.:ИЛ,1954.-648 с.
4. A. Nadai. Der Bildsame Zustand der Werkstoffe.-Berlin: Verlag von J. Springer, 1927.-171 s.
5. Одинг, И.А. Современные методы испытания металлов/И.А. Одинг.-Л.: изд-во «С.-зап. промбюро ВСНХ», 1927.-269 с.
6. 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.
7. Straus, B. Rißbildung in Kesselblechen/B. Straus, Ad.Fry// Stahl und Eisen.-1921.-№33.-S. 1133-1137.
8. Fry, Ad. Kraftwirkungsfiguren im Flußeisen, dargestellt durch ein neues Aetzverfahren/ Ad. Fry// Stahl und Eisen.-1921.-№32.-S. 1093-1097.
9. Пашков, П.О. Периодичность деформации при пластическом растяжении и сжатии крупнозернистой стали/П.О. Пашков//Журнал технической физики.-Т. XIX.-Вып. 3.-1949.-С. 391-398.
10. M. Rudeloff. Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau. Ausgabe A. Heft 3. Versuche mit Ausschlüssen steifer Stübe.- Berlin: Verlag von J.Springer, 1921.-84s.
- 11.Graf, O. Aus dem Unterricht in Baustofflehre und Materialprüfung/ O.Graf //Bautechnik.- 1933.-№ 47 S. 123-127.
12. Гриднев, В.Н. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали/ В.Н. Гриднев, В.Г. Гаврилюк, Ю.Л. Мешков/. Киев: Наукова думка, 1974. – 231 с.
13. Курдюмов, Г.В. Превращения в железе и стали/Г.В. Курдюмов, Л.М. Утевский, Р.И. Энтин.-М.:Наука, 1977.-267 с.
14. Ежов, А.А. Разрушение металлов/А.А. Ежов, Л.П. Герасимова.-М.:Наука, 2004.-400с.
15. Степанов, А.В. Основы практической прочности кристаллов/ А.В. Степанов.- М.:Наука. 1974.-132 с.
16. Романова, В.А. Модель зарождения и развития макролокализации пластической деформации на основе двупредельного критерия пластичности/В.А. Романова, Р.Р. Балохонов//Деформация и разрушение материалов.-2007.-№12.-С. 2-11.
17. Броек, Д. Основы механики разрушения/Д. Броек. Пер. с англ.-М.:Высш. школа, 1980.-368 с.
18. Maugin, G. The Thermomechanics of Plasticity and Fracture/ G. Maugin.- Cambridge: Cambridge University Press, 1992.-р. 350.
19. Мойсейчик, Е.А. Выявление дефектов стальных пролетных строений автодорожных и железнодорожных мостов с использованием инфракрасных технологий неразрушающего контроля/Е.А. Мойсейчик// Автомобильные дороги и мосты.-2010.-№6.-С. 85-94.

*Статья поступила в редакцию 05.01.12*