

ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ В СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ПРИ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Е.А. MOISSEITCHIK

Belarusian National Technical University, Minsk

e-mail: emoisseitchik@mail.ru

The report contains data for the analysis of the stress-strain state of structural elements of mild steel, working on a shift. Using a thermograph «IRTIS-2000» experimental data on heat generation in such cells. Provides recommendations to improve the energy converters of the shear type.

Формоизменение металлических элементов при пластическом деформировании сопровождается образованием и развитием дефектов структуры материала, фазовыми и физико-химическими превращениями, вследствие которых происходит диссипация энергии [1, 2]. При этом большая часть выделяемой энергии преобразуется в тепловую, оказывает воздействие на развитие деформационных процессов в материале, и далее рассеивается в окружающей среде. Такой пластически деформируемый металл является преобразователем механической энергии в тепловую и может эффективно использоваться как в традиционных технических приложениях (процессы зарождения и развития разрушения, обработка изделий деформированием, резанием и т.п.), так и новых, в которых происходит преобразование (поглощение) механической энергии. К числу таких устройств можно отнести поглотители механической энергии, используемые для обеспечения сейсмостойкости ответственных инженерных сооружений. Наиболее часто применяются устройства из металлических сплавов, рабочий элемент которых деформируется в условиях сдвига [3, 4]. Опыт показывает, что при выборе материалов и разработке конструкций таких устройств, их расположении в конструктивной схеме сооружения не учитывается факт превращения механической энергии, в основном, в тепловую и возможности воздействия на процессы образования и отвода тепла с целью совершенствования и оптимизации таких устройств [3, 4].

Целью настоящей работы является исследование деформирования стальных элементов при сдвиге визуальными, расчетными и инструментальными методами на предшествующей появлению трещин стадии.

1. Механизм упругопластического деформирования стальных элементов и его визуализация

При механическом нагружении стальных конструктивных элементов происходят изменения на различных уровнях внутреннего строения материала [5], 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 стали. В элементах реальных конструкций процессы

возникновения предельных состояний в значительной мере связаны с явлениями локализации пластической деформации [6, 7], 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 обнародовал Д.К. Чернов (1885 г.), а детально исследовал их в своей книге (1896 г.) Л. Гартман [7] и другие ученые. Фигуры деформации зарождаются 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 [7, 8] и показана на рис. 1а, 1б. При росте растягивающего усилия на левой стороне образца (рис. 1в) первой появляется линия «а» (рис. 1а). После ее формирования происходит уменьшение примерно на 5% нагрузки, при которой она появилась и соответствующей верхнему пределу текучести. Последующее снижение

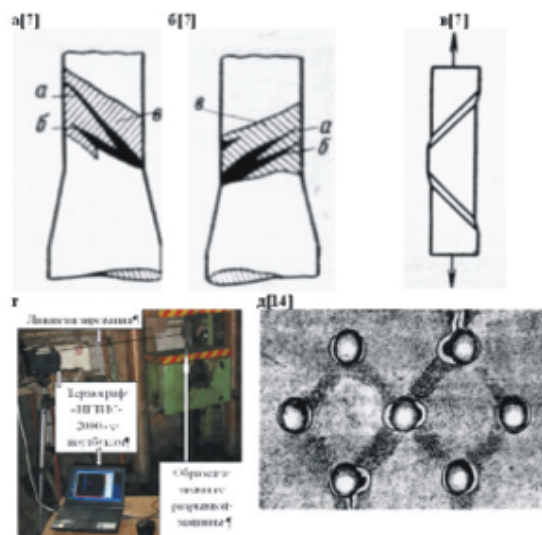


Рис. 1.

этой нагрузки еще на 2% завершилось образованием линии «б» (рис. 1а). При постоянной величине растягивающего усилия от полос «а» и «б» текучесть распространяется в их окрестности и зрительно просматривается в виде широкой матовой полосы «в» (рис. 1а). С другой стороны образца также образуются соответствующие фигуры деформации (рис. 1б). Текучесть развивается на рабочую зону образца. Две такие полосы деформации приводят к смещению участка рабочей зоны образца (рис. 1в). 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° . Полосы скольжения появляются и при других видах деформирования.

Сопоставление различных фигур деформации, полученных многими авторами экспериментально, 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 сколь-

жения определяется характерным размером дефекта, ответственного за ее образование (например, диаметр отверстия, характерный размер другого дефекта). 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). Приобретенная при прокатке 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. С физико-химических пози-

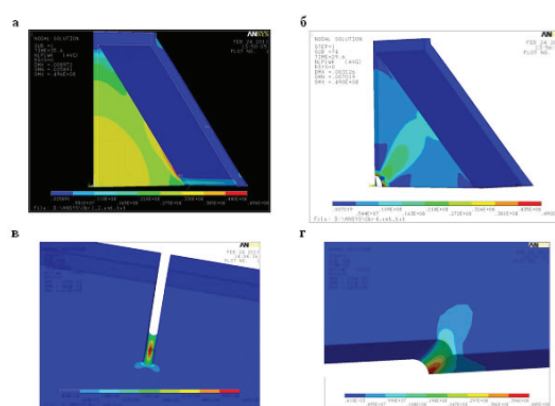


Рис. 2.

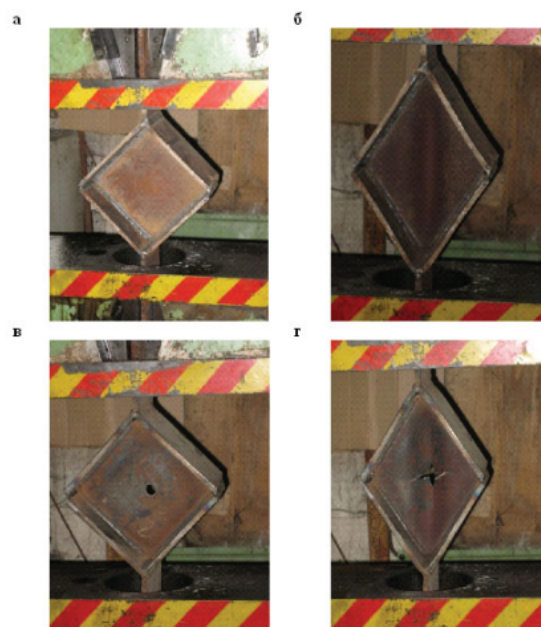


Рис. 3.

ций сталь можно рассматривать как твердый раствор различных элементов в железе. С изменением термодинамических параметров (давление, температура, объем и др.)

химический состав, свойства зерен и их границ изменяются. В основном такие изменения (реакции) протекают в пластически активированных объемах материала, т.е. при развитии полос пластичности [9, 10]. При этом, 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.

Сопоставление изложенных выше процессов зарождения и развития полос сдвига в конструктивных элементах с аналогичными явлениями в кристаллах [11] во многом выявляет подобие механики этих процессов на различных мезомеханических уровнях.

Физико-химические процессы, протекающие в активированной при пластической деформации области конструктивного элемента (образца) развиваются с образованием тепла [7, 12]. Это позволяет контролировать все стадии процесса деформирования материала элементов стальных конструкций методами современной компьютерной термографии [12, 13, 14].

2. Экспериментальные средства и методика выполнения работ

Конструкция образцов выбиралась так, чтобы в процессе эксперимента рабочие зоны нагружались преимущественно сдвигающими усилиями. Часть образцов при этом имела форму реальных сдвиговых энергопоглотителей [3]. При разработке образцов учитывались особенности процессов образования полос деформации в элементах реальных конструкций (рис. 1д, [14]), а на части образцов предполагалось проявить процесс образования полос деформации, наведенных конструктивными дефектами. 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 1г. После разрушения замерялись характерные размеры зоны излома и фотографировались изломы и элементы образца. Геометрическую модель соответствующего образца создавали в программе T-Flex CAD 3D v11.0.28. Расчет с использованием метода конечных элементов осуществляли в программной среде ANSYS.

3. Результаты моделирования и эксперимента

В процессе конечно-элементного моделирования работы в упруго-пластической стадии образцов типа сдвигового энергопоглотителя [3] определялись компоненты тензоров напряжений и деформаций в нагруженной сдвигающими усилиями пластине и рас-

пределение в пластине плотности энергии деформирования (по Мизесу). На рисунке 2 приведены данные расчета плотности энергии деформирования в элементах модели (синий цвет – минимальная плотность; красный – максимальная). При этом на рис. 2а приведены данные для бездефектной пластины, а на рисунках 2б-2г – для пластин с различными дефектами-отверстиями (на рисунках приведены схемы 1/8 модели образца). На рисунках 2д, 2е показано расчетное распределение в дефекте плотности энергии упруго-пластического деформирования листовых образцов с боковыми U-образными надрезами. Общий вид экспериментальных образцов до нагружения и после зарождения дефекта в сдвигаемой пластине показан на рисунках 3а-3г, 4а-4г.

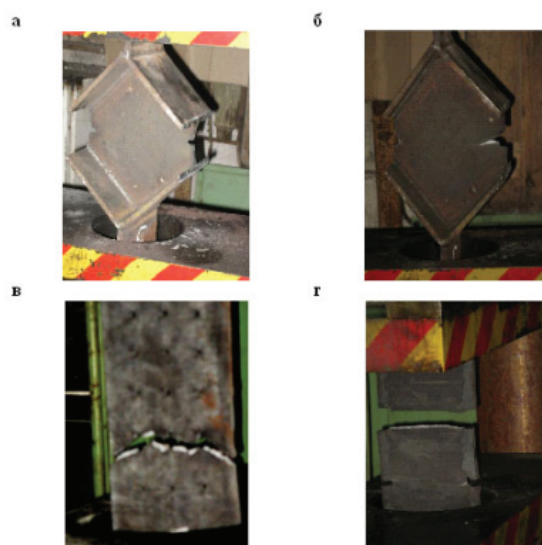


Рис. 4.

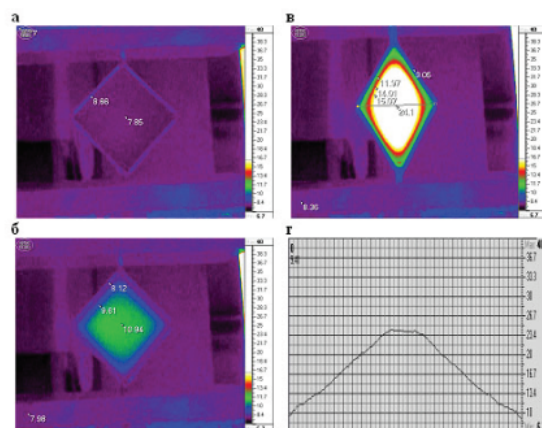


Рис. 5.

4. Выводы

Показанные на рисунках 3-5 данные статического растяжения и термографирования образцов при нагружении хорошо соответствуют выводам теории упругости [6, 7]. При

упруго-пластической работе процесс деформирования определяется образованием и развитием полос деформации, в пределах которых сталь находится в пластически активированном состоянии. Вне полос деформации материал работает упруго или в менее нагруженных стадиях. Зарождение полос деформации и их развитие определяется расположением надразов. Вид излома образца (вязкий - хрупкий) зависит от взаимодействия (интерференции) полос деформации в предельной стадии работы элемента.

Стальные энергопоглотители сдвигового типа целесообразно проектировать с использованием искусственного теплоотвода, не допуская появления дефектов в рабочей пластине. С учетом изложенного целесообразно дополнительно исследовать процесс теплообразования и теплоотвода при изменении гибкости сдвигаемых элементов и других конструктивных параметров.

Список литературы

- [1] ROSAKIS P. A thermodynamic internal variable model for the partition of plastic work into heat and stored energy in metals/ P. Rosakis, A.I. Rosakis, G. Ravichandran, J. Hodowanec//J.Mech.Phys.Solids. - 2000. - V. 48. - P. 581-607.
- [2] ПЛЕХОВ О. Экспериментальное исследование процессов накопления и диссипации энергии в железе при упругопластическом переходе/О. Плехов, N. Santier, O. Наймарк//ЖТФ. - 2007. - Т. 77. - № 9. - С. 135-137.
- [3] ОСТРИКОВ Г.М. Стальные сейсмостойкие каркасы многоэтажных зданий/Г.М. Остриков, Ю.С. Максимов. - Алма-Ата:Казахстан, 1985. - 120 с.
- [4] PANICO S. Aluminium shear panels for seismic protection numerical analysis and experimental tests. -Tesi di Dottorato. Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Strutture. - Universita degli Studi di Napoli Federico II. Facolta di Ingegneria. - 2004. - 165 p.
- [5] ПАНИН В.Е. Структурные уровни деформации твердых тел/В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев. - Новосибирск: Наука, 1985. - 229 с.
- [6] МАККЛИНТОК Ф. Деформация и разрушение материалов/Ф. Макклинток, А. Аргон. - М.:Мир, 1970. - 444 с.
- [7] НАДАИ А. Пластичность и разрушение твердых тел/А.Надаи. - М.:ИЛ, 1954. - 648 с.
- [8] NADAI A. Der Bildsame Zustand der Werkstoffe. -Berlin: Verlag von J.Springer, 1927. -171s.
- [9] ГРИДНЕВ В.Н. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали/ В.Н. Гриднев, В.Г. Гаврилюк, Ю.Л. Мешков/. Киев: Наукова думка, 1974. - 231 с.
- [10] КУРДЮМОВ Г.В. Превращения в железе и стали/Г.В. Курдюмов, Л.М. Утевский, Р.И. Энтин. - М.: Наука, 1977. - 267 с.
- [11] СТЕПАНОВ А.В. Основы практической прочности кристаллов/ А.В.Степанов. - М.:Наука. 1974. - 132 с.
- [12] MAUGIN G. The Thermomechanics of Plasticity and Fracture/ G. Maugin. - Cambridge: Cambridge University Press, 1992. - p. 350.
- [13] 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.
- [14] ПАТОН Е.О. Стальные мосты. Т. 1. Фермы балочной системы. Материал и заклепки: 5-е издание / Е.О. Патон, Б.Н. Горбунов. - Харьков-Киев: ГНТИ Украины, 1935. - 812 с.