

КОНТРОЛЬ СООРУЖЕНИЙ И МАШИН МЕТОДОМ ПАССИВНОЙ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

¹Мойсейчик Е. А., ¹Василевич Ю. В., ²Можаровский В. В., ¹Мойсейчик А. Е.,
³Неумержицкая Е. Ю.

¹Белорусский национальный технический университет, Минск

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель

³Академия последипломного образования, Минск

Введение. Во всех структурных частях сооружений, машин и механизмов происходит потеря энергии, проявляющаяся через тепловыделение, связанное с деформированием элементов объекта и трением в его частях. Внешними признаками этого является нагрев узлов и деталей машин.

Нормальная работа сооружения, машины характеризуется установившимся режимом теплообмена между их элементами и наружной средой в процессе эксплуатации. При таком режиме работы количество выделяемого тепла равно количеству тепла, рассеиваемого элементами в окружающее пространство. Переход в аварийный режим работы характеризуется неустановившимся теплообменом и повышением поверхностной температуры T_n . Изменение T_n зависит от конструкции узла, наличия дефектов в нем, нагрузки на узел, температуры и других факторов среды и может изменяться в широких пределах.

Выделяющееся при деформировании тепло создает поле температур соответствующих изделий. Величины поверхностных температур можно рассматривать в качестве диагностического параметра для оценки технического состояния структурных частей, узлов и деталей. Для одних объектов температура и ее изменение напрямую количественно отображает внутренний процесс в контролируемом элементе (изменение напряженного состояния деформируемого элемента и др.), в других случаях (температура масла в узле машины, температура шины и т. д.) соответствующая зависимость имеет корреляционную природу. Так как нагретые тела излучают тепловую энергию в инфракрасном волновом диапазоне, то проявление соответствующих температурных поверхностных полей может производиться с использованием методов компьютерной инфракрасной термографии [1]. При этом температурные поля фиксируются дистанционно, в виде термофильма, а его отдельные кадры (термограммы) отображают распределение температуры точек поверхности в конкретный момент времени. Анализ температурных полей и сопоставление его результатов с данными конечно-элементного термомеханического расчета в ряде случаев приводит к значительному сокращению затрат на экспериментальные испытания. Такая технология теплового контроля позволяет достоверно выявлять опасные зоны в стальных изделиях, находить дефекты, контролировать их развитие, зарождение разрушения.

При компьютерных технологиях проектирования машин и сооружений значительную часть средств и времени занимают натурные испытания запроектированных объектов. К сокращению затрат ресурсов приводит замена натуральных испытаний виртуальными [2]. Виртуальные испытания производятся над моделями объекта, которые не являются полностью идентичными натурному объекту. Для обеспечения адекватности модели натурному изделию при ее создании можно использовать данные по адекватности отдельных элементов модели и объекта. Актуально приложение дистанционного теплового контроля при испытаниях опытных образцов машин, исследовании долговечности изделий [2], планировании ремонтов [3].

Целью настоящей статьи является демонстрация возможностей дистанционной инфракрасной термографии применительно к композитным элементам машин и стальным элементам конструкций.

Термография композитных элементов машин. Автомобильные шины являются наиболее ответственными деталями машин, обеспечивающими их активную безопасность. В процессе эксплуатации на шину действует сложная система динамических нагрузок, являющихся результатом взаимодействия дороги и автомобиля. Эти воздействия вызывают в элементах шины повторяющиеся большие перемещения и деформации. Для различного типа шин (легковые, грузовые, крупногабаритные) характерны индивидуальные типы нагрузок и условия их работы. Для легковых шин – высокие скорости движения и относительно небольшие нагрузки. Шины грузовых автомобилей воспринимают высокие нагрузки при длительном движении, предельные скорости движения и значительные температуры саморазогрева шины. Крупногабаритные и сверх крупногабаритные шины характеризуется предельными режимами нагрузок и воздействий. Автомобили с такими шинами предназначены для работы вне дорог с твердым покрытием (карьерные и др. дороги). При эксплуатации требуется учитывать особые условия их работы (ограничение скоростного режима движения, дополнительное время для остывания шин, повышенная вероятность порыва шин).

Конструктивно шина представляет собой предварительно-напряженную композитную конструкцию, состоящую из резиновых деталей разной жесткости и резинокордных слоев (каркас, брекер, усиливающие элементы).

В пневматических шинах существуют зоны концентрации напряжений (конструктивных, технологических, эксплуатационных). В этих заранее неизвестных зонах возникают усталостные дефекты, приводящие к преждевременным разрушениям в процессе эксплуатации. По данным [4] значительное число пневматических шин в процессе эксплуатации выходит из строя в результате усталостных разрушений (причины выхода: усталостные разрушения – 34 %; механические повреждения – 34 %; износ – 13 %; прочие отказы – 19 %).

Тепловое состояние шины при ее движении определяется многими факторами (размерами и геометрией рисунка протектора, упругими, гистерезисными, тепловыми характеристиками исходных материалов, внутренним давлением, вертикальной нагрузкой, скоростью, температурой окружающей среды и дороги, тепловыми характеристиками, шероховатостью и влажностью опорной поверхности) [5]. Температура шины оказывает значительное влияние на ее сопротивление качению и срок службы [5–7]. Нагрев шины при качении происходит в основном в результате внутреннего трения в элементах шины. Внешнее трение шины о дорожное покрытие также превращается в тепло и вызывает ускоренный износ протектора.

Анализ эксплуатации крупногабаритных шин показал, что основным критерием их работоспособности является температура разогрева каркаса, подканавки и протектора, которая при нормативных режимах эксплуатации карьерных автосамосвалов достигает 110–130 °С. Такая температура вызывает ускоренную термодеструкцию материала шин [4, 8].

На (рисунке 1) показано изменение температуры шин карьерного автосамосвала БелАЗ-75131 с пневматическими шинами размерности 3, зафиксированное дистанционным инфракрасным термометром Raytek-МТ6 с базовой погрешностью измерений $\pm 0,1$ °С [8].

Авторами работы [8] установлено, что при средней скорости движения автосамосвала $V_{cp} = 17$ км/ч и средней температуре окружающего воздуха $t_{cp} = 20$ °С наибольшее количество теплоты выделяется в середине брекерного слоя шины и на его краях, а общая величина теплообразования в шине распределяется по ее основным элементам

следующим образом: протектор (включая подканавочный слой) – около 50 %; каркас – от 12 до 33 %; бреккерный слой – от 7 до 15 %; боковины и примыкающий к ним борт – от 5 до 25 %.

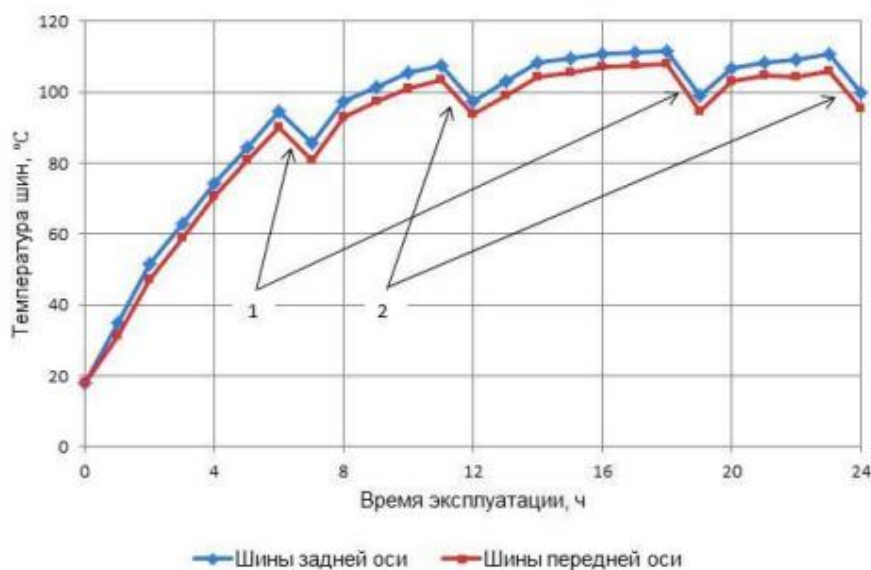


Рис. 1. Нагрев шин при эксплуатации карьерного автосамосвала БелАЗ-75131 [8]: 1 – перерыв на обед; 2 – перерыв на пересменку

Теплообразование при деформировании стальных изделий определяется механизмом и скоростью деформирования и физико-химическими процессами в зонах локализации деформаций.

Процесс теплообразования в стали при ее упругом, упруго-пластическом, пластическом деформировании и разрушении можно качественно отобразить схемой (рисунок 2). Теплообразование в стали (рисунок 2) изменяется от ее охлаждения (стадия 1) до заметного нагрева при развитии пластических деформаций (стадии 2, 3). При этом изменяется макроструктура стали, растет повреждаемость ψ (рисунок 2, а), в материале происходят экзотермические твердотельные физико-химические реакции, инициированные пластическим деформированием. При упругом деформировании (стадия 1) происходит охлаждение стали (не больше 1 °C). При этом линейная зависимость ΔT – ϵ наблюдается при напряжениях σ , меньших предела пропорциональности σ_p . Выше σ_p начинаются отклонения от линейной зависимости, увеличивающиеся при напряжениях в стали, превышающих предел упругости σ_e (рисунок 2, б). Параллельно в выделенном объеме материала увеличивается число линий скольжения, в которых развиваются пластические деформации (рисунок 2, в). При напряжениях, превышающих предел текучести σ_y , линии скольжения заполняют весь выделенный объем. Работа пластического деформирования превращается в тепло и инициирует экзотермические физико-химические реакции в деформированном слое. Поэтому при деформировании выделенного объема (рисунок 2, в) изменение его средней температуры (ΔT_d) будет зависеть от стадии деформирования.

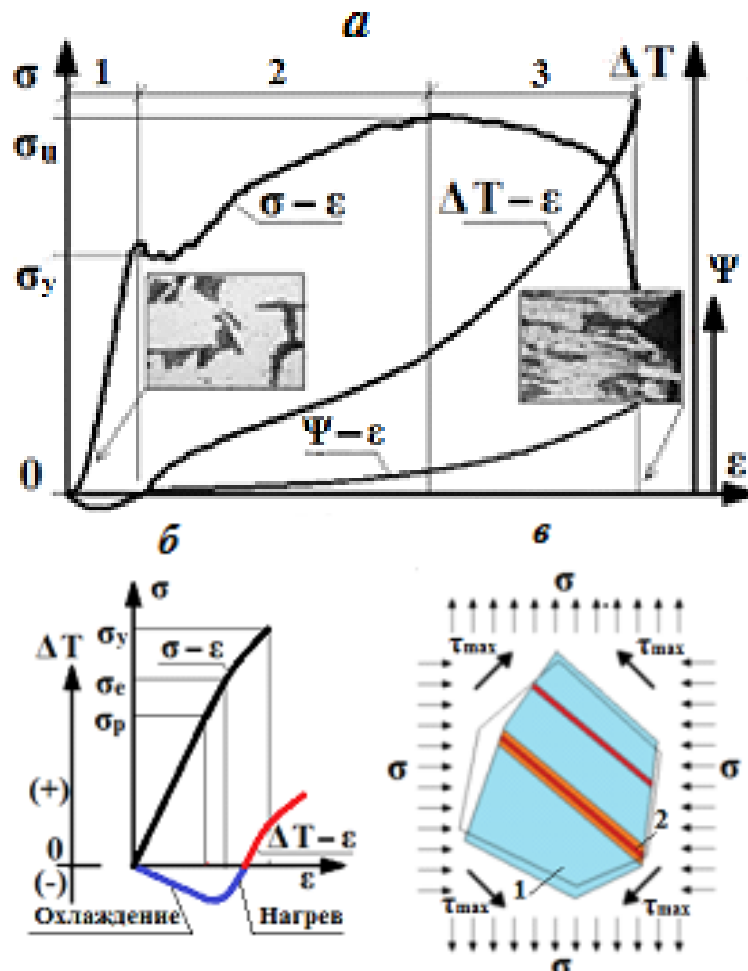


Рис. 2. Взаимосвязь между диаграммами растяжения, теплообразования, повреждаемости (а, б) и зоны охлаждения: а – диаграммы растяжения ($\sigma - \epsilon$), нагрева ($\Delta T - \epsilon$) и развития повреждаемости ($\psi - \epsilon$); б – нагрев–охлаждение при упругом деформировании (участок 1); в – участок стержня с зонами упругого охлаждения (1) и нагрева в полосе сдвига (2), (1, голубой цвет) и нагрева (2, красный цвет) контролируемого объема стального изделия

Если допустить, что доля пластически деформированного материала в выделенном объеме в текущий момент времени равна n , а упруго деформированного – $(1 - n)$, то ΔT_d определится по выражению

$$\Delta T_d = (1 - n) \cdot \Delta T_e + n \cdot (\Delta T_p + \Delta T_r), \quad (1)$$

где ΔT_e , ΔT_p , ΔT_r – соответственно, изменение температуры выделенного объема за счет упругой, пластической деформаций и экзотермических твердотельных физико-химических реакций. В первом приближении можно принять $n = 1$ (при $\sigma \geq \sigma_y$) и $n = 0$ (при $\sigma < \sigma_y$).

Изменение температуры деформируемых участков изделий в соответствии с формулой (1) происходит при возрастающей или убывающей во времени квазистатической, переменной, динамической нагрузке на изделие и при возникновении в нем внутренних тепловых источников, инициированных деформацией. Внутренние источники тепловой стимуляции могут действовать непрерывно или в отдельные периоды функционирования объектов пассивного теплового контроля. Наиболее часто это происходит в периоды пуска-наладки, испытаний, кратковременных технологических циклов и в аварий-

ных ситуациях. В такие периоды работы изделий в их элементах происходит диссипация энергии в форме тепла, а содержащиеся в объекте контроля дефекты становятся активными, выделяют или поглощают тепловую энергию, и их можно диагностировать в пассивном режиме. Отсюда следует, что диагностирование объекта контроля в пассивном режиме должно производиться при инициировании в нем тепловых источников в результате технологического функционирования и поэтому на него затрачивается меньше ресурсов, чем при активном режиме.

Особенности теплообразования и разрушения листовых элементов с дефектами [9–11]. Проследим развитие такого разрушения при термографировании растянутых образцов из стали Ст.3 с характерными для стальных строительных конструкций конструктивно-технологическими дефектами. Для этой цели конструкцию образцов в настоящем и следующих разделах принимаем такой, чтобы в процессе эксперимента полосы сдвига могли зарождаться у моделей дефектов. Размеры образцов и скорость их деформирования должны позволять фиксировать нагрев поверхности тепловизионным методом от начала приложения нагрузки до разрушения образца. В эксперименте образцы нагружались растягивающим усилием в машине «Р-100» с записью диаграммы «нагрузка-удлинение». Испытания и обработка данных проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 1497. Деформирование образцов отображалось в термофильме компьютерным термографом «ИРТИС-2000», а результаты обрабатывались программным пакетом IRTIS. На рисунках 3–7 показаны виды образцов и кинетика изменения температуры их поверхности в процессе нагружения (при начальной температуре металла 7,6 °С).

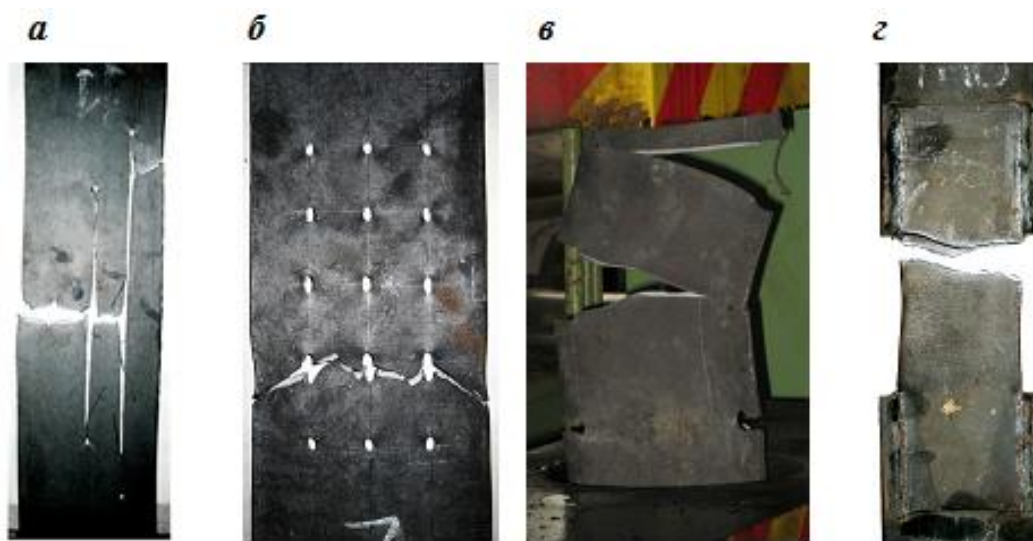


Рис. 3. Виды образцов *а, б, в, г* после разрушения

Пластины с отверстиями и продольными разрезами. На рисунке 4 представлены кадры термофильма образца из листа толщиной 10 мм, рабочая зона которого разделена продольными разрезами на три полосы (конструкция образца показана на рисунке 3, *а*). При этом наиболее узкая полоса с одной стороны ограничена свободной кромкой, образованной гильотинной резкой, а с другой стороны разрез выполнен на длину 300 мм. Средняя полоса ограничена с двух сторон разрезами. В третьей, наиболее широкой, полосе просверлено отверстие диаметром 4 мм.

На кадрах термофильма (рисунк 4) прослеживаются все стадии развития деформаций в образце. Отверстие приводит к частичному сковыванию деформаций. Видно, что пластины без отверстия нагреваются быстрее и до более высокой температуры. В

окрестности отверстия деформации развиваются под углом 35–40 °С к горизонтальной оси. К моменту зарождения разрушения полосы без отверстия имеют температуру поверхности, на 3–4 °С превышающую температуру рабочей зоны полосы с отверстием. Разрушение зарождается в полосе, ослабленной отверстием. После разрыва полосы с отверстием происходит дополнительный разогрев гладких полос и их разрушение. Из термограмм (рисунка 4) следует, что температура в наиболее нагретых точках монотонно растет в процессе нагружения, а в момент зарождения и развития разрушения она скачкообразно повышается примерно на 4 °С и после разрыва за доли секунды падает на (10–11) °С. Из эксперимента следует, что стержни различной податливости нежелательно включать по параллельной схеме в состав растянутых элементов стальных конструкций.

На рисунках, 3, б и 5 показана **пластина с группой отверстий** диаметром 8 мм. Аналогично этой пластине работают листовые элементы болтовых и заклепочных соединений. На кадрах термофильма (рисунок 5) прослеживается кинетика и особенности температурного поля поверхности образца при растяжении. Деформации в образцах этой формы развивались при нагружении с небольшим эксцентриситетом, что прослеживалось по растрескиванию окалины. При испытании образца было видно, что в предельном состоянии возникает два потенциально опасных сечения (наклонное и нормальное относительно растягивающего усилия). В двух наиболее нагретых точках (кадр 95, рисунок 5) температура повышается монотонно до зарождения трещины в их окрестностях, а в момент разрушения происходит скачок температуры поверхности на 10–25 °С (большая величина соответствует точке, ближе расположенной к очагу разрушения). В упругой стадии образцы на десятые доли градуса охлаждаются. Данные термографии и картина растрескивания окалины выявляют на поверхности образца полосы сдвига, имеющие более высокую температуру, чем примыкающий металл. Полосы сдвига разделяют образец на блоки с более низкой температурой, чем в полосе сдвига, т. е. сталь образца при деформировании приобрела неоднородность (деформационную анизотропию).

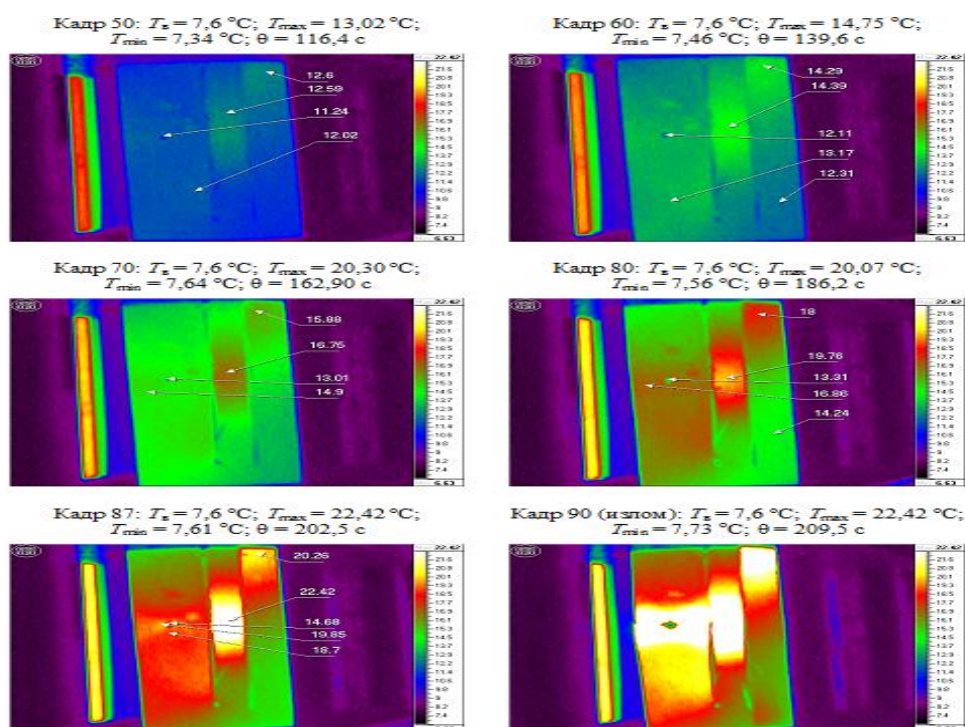


Рис. 4. Кадры термофильма растяжения образца (а), рисунок 3

Пластина с боковыми вырезами. Такая пластина толщиной 18 мм и данные ее термографии при растяжении показаны на (рисунок 3, в). В начальной стадии нагружения пластины изотермы приближались к окружностям, но с ростом растягивающих напряжений произошел лучеобразный «выброс» тепла к противоположному боковому вырезу. Моментальная температура поверхности достигает 70 °С. Разрушение происходит по ослабленному сечению, с хрупким изломом. После пересечения ослабленного сечения образца магистральной трещиной тепло волной рассеивается на упругие зоны образца. В отдельных точках поверхности наблюдался скачок температуры на 25 °С.

Кадры термофильмов нагружения образцов выявили, что в упругой стадии в материале образцов с боковыми надрезами зарождаются полосы сдвига, направление которых соответствует наибольшим сдвигающим напряжениям. Ширина полос росла с увеличением нагрузки. Полосы сдвига при деформировании являлись источниками теплообразования. При возникновении свободных поверхностей при росте зародившейся трещины температура поверхности образца значительно возростала.

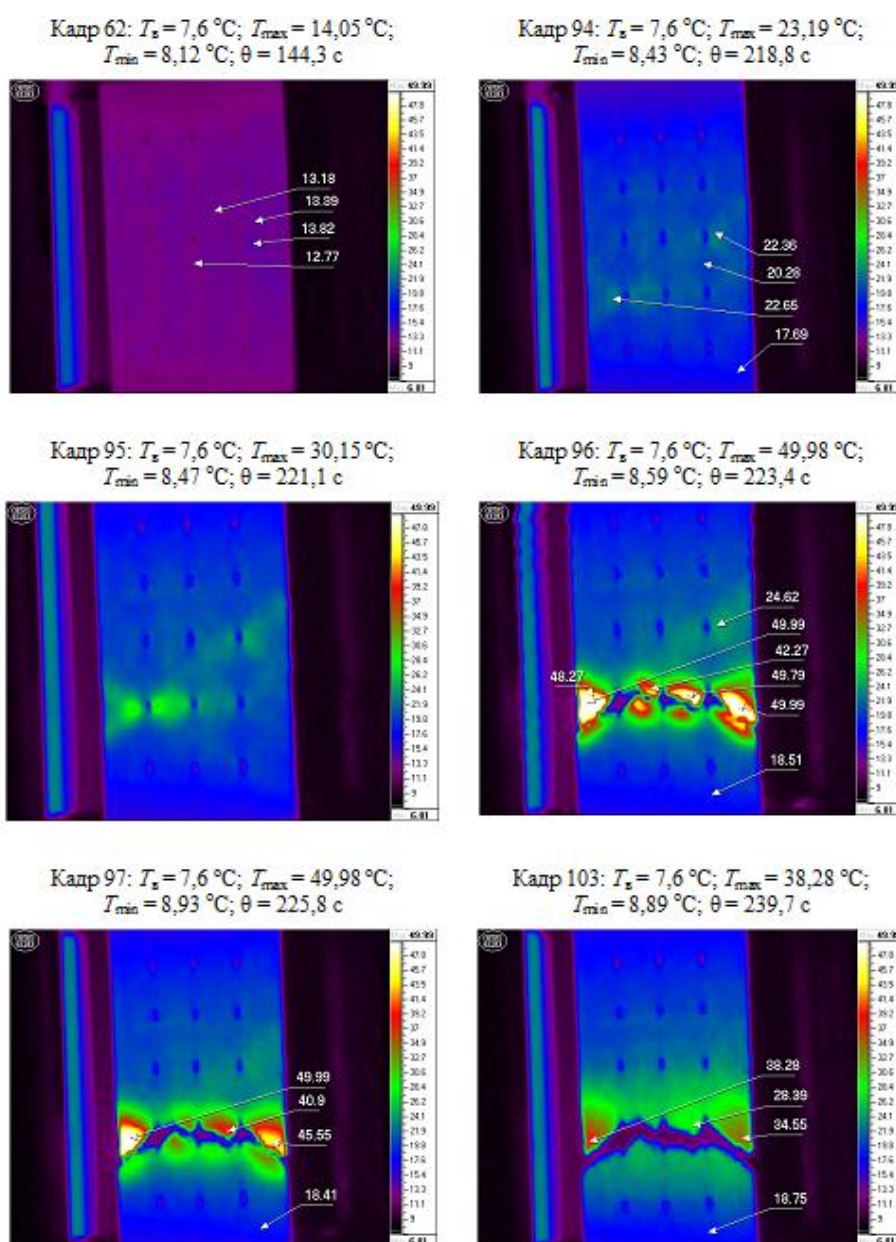


Рис. 5. Кадры термофильма растяжения образца (б), рисунок 3

При вязком разрушении образцов толщиной 6 и 12 мм с боковыми вырезами температура поверхности достигала в стадии долома 88 °С. Видимо, причиной такой аномалии температуры является недостаточное быстроедействие тепловизора. Приведенные кадры термофильмов показали, что при нагружении всех образцов происходило деформационное структурирование материала на блоки, размеры и форма которых определяются видом и расположением дефектов.

Квазихрупкое разрушение пластин с боковыми вырезами. Возможность появления вязкого, квазихрупкого или хрупкого изломов определяется напряженно-деформированным состоянием блока, в котором зародилась начальная трещина, и его тепловым состоянием (рисунок 6).

В образце, показанном на рисунке 6, разрушение начало развиваться сколом у надреза 6, а затем произошел хрупкий отрыв по сечению 3–4 с очагом в начальной трещине у дефекта 3.

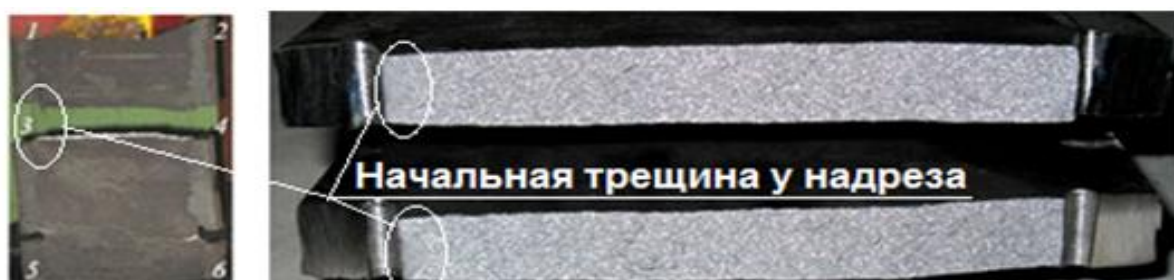


Рис. 6. Вид образца из стального листа толщиной 18 мм и его хрупкого излома

Распространение трещины произошло по диагонали 3–4 ромбовидного блока, ограниченного полосами скольжения (кадры 25–40, рисунок 7).

Быстрому развитию начальной трещины у надреза 3 (рисунок 6) предшествовал «проскок» полос деформирования от надрезов 6 и 2 к надрезу 3 и их наложение в окрестности начальной трещины у дефекта 3. Кадры термофильма (рисунок 7) показывают, что при хрупком разрушении повышение температуры в изломе значительно меньше, чем при вязком.

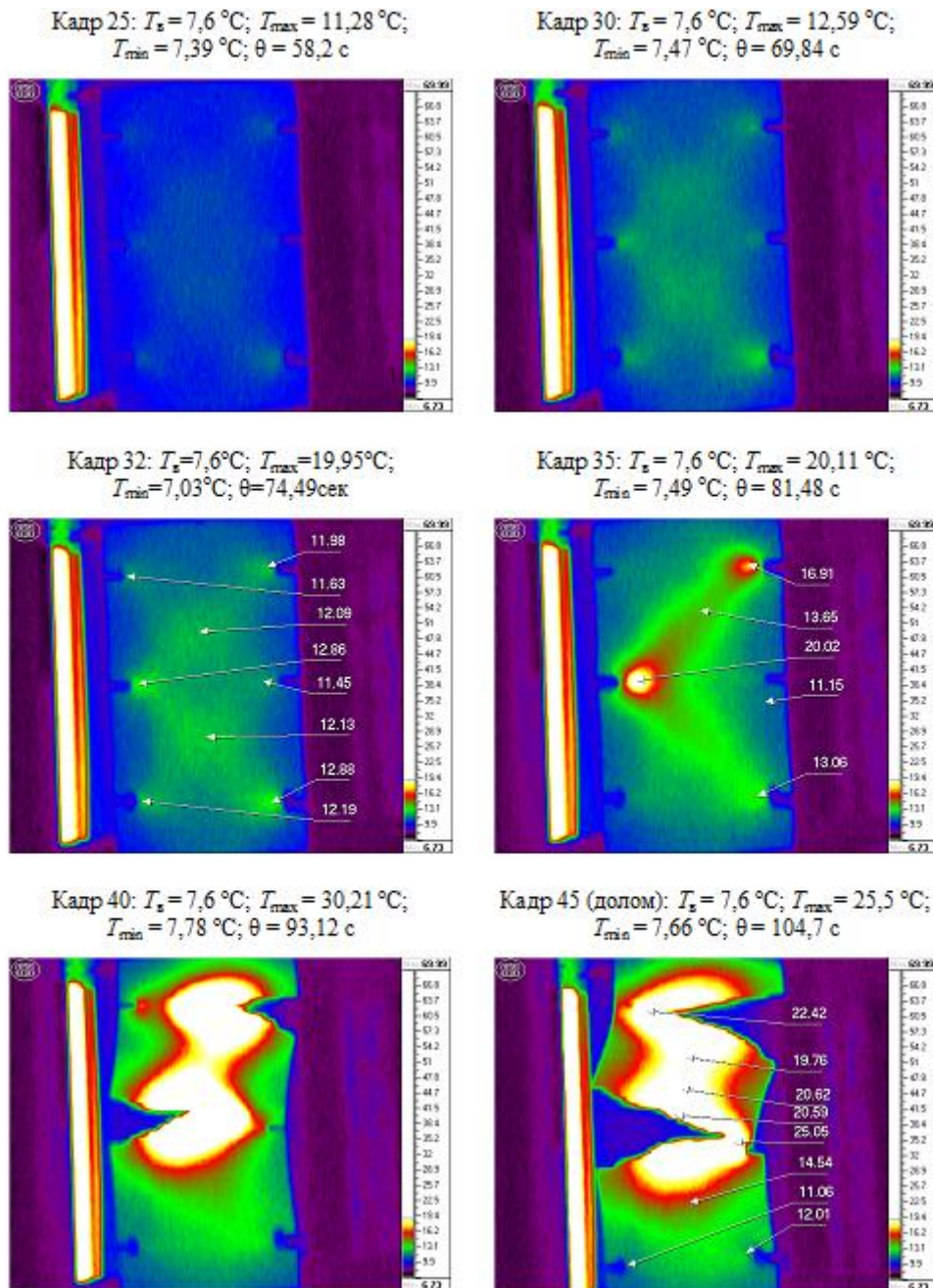


Рис. 7. Кадры термофильма растяжения образца (в), рисунок 3

Заключение.

1. Показано, что при работе композитных и стальных элементов сооружений и машин в них происходит деформационное теплообразование, отображением которого является температурное поле поверхности изделий.

2. Температурное поверхностное поле можно фиксировать и исследовать методами инфракрасной компьютерной термографии.

3. Величины поверхностных температур деформируемых элементов следует рассматривать в качестве диагностического параметра и использовать для оценки технического состояния структурных частей, узлов и деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилов, В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. – 2-е изд. – М.: Спектр. – 2013. – 575 с.
2. Высоцкий, М. С. Научное обеспечение компьютерного проектирования и виртуальных испытаний автотракторной техники/ М. С. Высоцкий, С. В. Харитончик, А. В. Шмелев // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 3 (20) – 4 (21). – С.19 – 29.
3. Эксплуатация и ремонт крупногабаритных шин / Э. С. Скорняков, Э. Н. Кваша, А. А. Хоменя, В. П. Бойков. – М.: Химия, 1991. – С. 128.
4. Соколов, С. Л. Расчетно-экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния и циклической долговечности пневматических шин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры / С. Л. Соколов // Институт машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН. – М., 2011. – 56 с.
5. Кнороз, В. И. Работа автомобильной шины / В. И. Кнороз, Е. В. Кленников, И. П. Петров и др. – Под ред. В. И. Кнороза. – М.: «Транспорт». – 1976. – 238 с.
6. Стариков, В. М. Лабораторные исследования тепловых полей при деформации шины, взаимодействующей с твердой плоской опорой, при комбинированном нагружении / В. М. Стариков, Т. А. Тарасова // Молодой ученый. 2021. №21 (363). С. 45–49. URL: <https://moluch.ru/archive/363/81261>.
7. Dimitrov, Kalin. Thermographic analysis of tires during chassis dynamometer test / Kalin Dimitrov, Iliyan Damyanov // Proc. 27–th National Conference with International Participation "TELECOM 2019", October 30 – 31, 2019, Sofia, Bulgaria.
<https://yandex.by/search/?text=Thermographic+analysis+of+tires+during+chassis+dynamometer+test&clid=2411726&lr=157>
8. Горюнов С. В. Разработка методики прогнозирования долговечности крупногабаритных шин карьерных автосамосвалов: автореферат диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.05.06 / Горюнов С. В.// ФГБОУ ВО «КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева». – Кемерово, 2021. – 24 с.
9. Moiseychik, E. A. Analyzing patterns of heat generated by the tensile loading of steel rods containing discontinuity-like defects / E. A. Moiseychik, V. P. Vavilov // International Journal of Damage Mechanics. – 2018. – Vol. 27. – Iss. 6. – P. 950–960.
10. Moiseychik, E. A., Vavilov V. P., Kuimova M. V. Nondestructive testing of steel and constructions by using the phenomenon of deformation heat release // Journal of Nondestructive Evaluation. – 37 (2), [28]. DOI: 10.1007/s10921-018-0482-4.
11. Василевич, Ю. В. Расчетное обоснование использования свойств препрегов в условиях производства изделий из композиционных материалов / Ю. В. Василевич и др. // Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. – М.: РАН. – 2019. – 299 с.

Поступила: 26.02.2022