

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 539.3

ЯКОВЛЕВ
Александр Александрович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ЛИСТОВЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ КИНЕТИКИ ПАССИВНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Минск, 2025

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель

МОЙСЕЙЧИК Евгений Алексеевич,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
«Мосты и тоннели» Белорусского национального технического университета

Официальные
оппоненты:

ЖУРАВКОВ Михаил Анатольевич,
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» Белорусского государственного университета;

ШИЛЬКО Сергей Викторович,
кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией механики композитов и биополимеров Государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого» НАН Беларуси

Оппонирующая
организация

Учреждение образования «Брестский государственный технический университет»

Защита состоится 20 июня 2025 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.07 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1, аудитория 202. Телефон ученого секретаря (+37517) 275-74-26; e-mail: Pavel.Shirvel@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 20 мая 2025 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.07,
кандидат физико-математических наук, доцент



П. И. Ширвель

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших проблем механики твердого деформируемого тела является разработка методов выявления опасных состояний в локальных объемах тел (конструкционных материалов) и предотвращение зарождения и развития разрушения в них. Экспериментальные и теоретические аспекты этой проблемы изучались в работах отечественных ученых (Будадин О. Н., Вавилов В. П., Давиденков Н. Н., Качанов Л. М., Махутов Н. А., Морозов Е. М., Мухелишвили Н. Н., Новожилов В. В., Одинг И. А., Панин В. Е., Писаренко Г. С., Плехов О. А., Работнов Ю. Н., Серенсен С. В., Фридман Я. Б., Черепанов Г. П. и др.), в т.ч. белорусских (Богданович А. В., Василевич Ю. В., Журавков М. А., Ишин Н. Н., Шилько С. В., Красневский С. М., Леоненко Д. В., Марукович Е. И., Можаровский В. В., Мойсейчик Е. А., Сосновский Л. А., Пантелеенко Ф. И., Плескачевский Ю. М., Старовойтов Э. И., Чижик С. А., Щербаков С. С., Яровая А. В. и др.), и зарубежных ученых (Belgen M. H., Burdekin F. M., Compton K. T., Dillon O. W., Dugdale D. S., Griffiths A. A., Jordan E. H., Irwin G. R., McGonagle W. J., Oliver D., Orowan E., Broek D., Hill R., Rice J. R., Weiss V., Wells A. A. и др.).

В работах названных ученых показано, что разрушения в элементах конструкций происходят в локальных объемах, расположенных в окрестностях концентраторов напряжений (отверстий, вырезов, дефектов прокатки, сварки, эксплуатации). Некоторые из опасных локальных объемов могут быть установлены современными методами расчета. Однако, традиционные методы трудоемки, мало информативны для прогнозирования локализации зон зарождения разрушения. Основной их недостаток состоит в том, что прогнозирование разрушения выполняется без учета связи напряженно-деформированного состояния в опасных зонах исследуемых элементов и физических явлений в них. При этом пренебрегают тепловыми явлениями и их кинетикой в зонах расположения концентраторов напряжений при деформировании стержней и плит.

Исследование тепловых процессов в окрестности концентраторов напряжений при силовом нагружении стальных стержней и плит поэтому является актуальной задачей, направленной на развитие термомеханики. Такой подход позволяет получить новую информацию о природе теплообразования в деформируемых элементах, разработать методологические основы прогнозирования разрушения в стальных элементах на основе закономерностей деформационного теплообразования.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует пунктам 3 (экологические и энергетические технологии в архитектуре и строительстве), 4 (машиностроение и машиноведение; лазерные, плазменные, оптические технологии и оборудование; композиционные и многофункциональные материалы), 6 (социогуманитарная, экономическая и информационная безопасность) приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы», утвержденных Указом Президента Республики Беларусь 07.05.2020 № 156.

Диссертационные исследования частично проведены в рамках государственных программ:

– ГБ 06-269 «Совершенствование конструктивно-технологических решений транспортных сооружений» (2006–2010 гг.);

– ГБ 11-230 «Конструктивно-технологические решения реконструкции эксплуатируемых транспортных сооружений и совершенствование методов их расчета» (2011–2015 гг.);

– ГБ 16-282 «Совершенствование методов оценки работоспособности транспортного сооружения с применением информационного моделирования» (2016–2020 гг.).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью работы является научное обоснование прогнозирования и предупреждения разрушения деформируемых листовых элементов стальных конструкций с концентраторами напряжений на основе кинетики тепловых полей, что позволяет снизить риски их аварий и повысить безопасность сооружений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

1. На основе анализа повреждений и аварий стальных конструкций выявить потенциально опасные зоны, в которых наиболее часто зарождаются трещины, с оценкой пригодности современных методов для прогнозирования их предельных и запредельных состояний в процессе деформирования и установить направления развития методов тепловой диагностики опасных зон нагруженных элементов конструкций посредством исследования и корректной интерпретации тепловых полей поверхности.

2. Разработать контрольные образцы и научные основы прогнозирования опасных предельных состояний деформируемых стальных стержней и плит с выявлением размеров и глубины расположения внутренних концентраторов напряжений по результатам бесконтактных измерений температурных полей поверхности экспериментальных образцов цифровыми компьютерными термографами.

3. Численно проанализировать напряженно-деформированное состояние и энергию деформирования стальных элементов с концентраторами при упруго-пластической работе материала и выявить форму, размеры и расположение областей материала в окрестности различных внутренних дефектов, являющихся сосредоточенными деформационными источниками тепла.

4. Экспериментально исследовать изменение температурных полей поверхности деформируемых стальных образцов с конструктивно-технологическими концентраторами напряжений при квазистатическом нагружении и работе материала в упругой, упруго-пластической и стадии разрушения и внешних температурных воздействиях и сформулировать критерий наступления опасных предельных состояний.

5. Разработать научно-методические основы выявления тепловым методом опасных предельных и запредельных состояний и их изменений в процессе деформирования элементов стальных конструкций.

Объект исследования – конструктивные и технологические дефекты в упруго-пластически деформируемых элементах стальных изделий, являющиеся потенциальными очагами теплообразования, зарождения и развития разрушения.

Предмет исследования – процессы упругопластического деформирования, развития разрушения и закономерности деформационного теплообразования и их

кинетики, дистанционно измеряемые по их инфракрасному излучению, в окрестности конструктивно-технологических дефектов элементов стальных стержней и плит из низкоуглеродистых сталей.

Научная новизна результатов диссертационной работы.

1. Разработаны, изготовлены и апробированы контрольные образцы для выявления закономерностей деформационного теплообразования в стальных стержнях прямоугольного сечения, отличительной особенностью которых являются несквозные засверливания (глухие отверстия) с варьируемой глубиной засверливания, деформационное теплообразование в которых инициируется растяжением образца, и определены закономерности теплообразования в дефектных зонах, заключающиеся в том, что при активном методе исследования можно уверенно выявлять дефекты в металле образцов при глубине расположения дефекта не более 5 мм, а при пассивном методе – при глубине расположения дефекта не более 6 мм и при диаметре глухого отверстия не менее 4 мм.

2. Проведены расчетно-экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния специально разработанной стальной трехслойной ортотропной плиты и ее фрагментов при статическом и повторно-переменном нагружении по аномалиям инфракрасного излучения, в результате которых установлено, что при упругой работе стальной ортотропной плиты, нагружаемой поперечной нагрузкой, температура растянутого пояса понижается от 0,1 °С до 0,2 °С, а сжатого – повышается от 0,2 °С до 0,3 °С. Нагружение ортотропной плиты повторно-переменной нагрузкой с размахом 0–1000 кН приводит к более значительному изменению температуры (до 1 °С) при увеличении количества циклов нагружения от 1 до 10.

3. Экспериментально установлены закономерности процесса деформирования и теплообразования в опасных зонах стальных стержней и плит из низкоуглеродистых сталей Ст3, 09Г2С с конструктивно-технологическими дефектами, выявляемые дистанционно по инфракрасному излучению, и заключающиеся в возникновении температурных аномалий в окрестности концентраторов напряжений в материале и соединениях при их деформировании и развитии разрушения. Увеличение скорости деформирования приводит к увеличению температуры поверхности на участках расположения дефектов в экспериментальных стержнях, образцах, в том числе при квазистатическом нагружении (скорость траверсы не выше 0,05 мм/сек) – от 3 °С до 10,4 °С, при ускоренном нагружении (средняя скорость траверсы 0,5 мм/сек) – от 16,1 °С до 67 °С.

4. Квазистатические испытания на растяжение предварительно охлажденных от -40 °С до -70 °С образцов выявили новые закономерности изменения температурного поля, заключающиеся в снижении величин температур поверхности в потенциально опасных зонах при зарождении разрушения и изменении вида изломов листовых образцов (от скола к квазихрупким).

5. Экспериментально установлено, что деформирование стальных образцов и элементов конструкций всегда сопровождается деформационным теплообразованием, соответствующими температурными полями на их поверхностях и в запрелдльном состоянии завершается изломом. При этом определено, что бездефектная работа стали связана с максимальной величиной деформационной температуры T_m , развивающейся в потенциально опасных зонах как охлажденных до -70 °С, так и при более высоких температурах элементов при квазистатическом нагружении.

Деформируемый элемент является работоспособным до тех пор, пока T_m не достигнет критической величины деформационной температуры T_{ct} (величины T_m и T_{ct} измеряются в шкале Кельвина), характерной для конкретной конструктивной формы элемента. Отношение T_m к T_{ct} позволяет в критериальной форме оценивать работоспособность стального изделия под нагрузкой.

Положения, выносимые на защиту

1. Контрольные образцы для исследования напряженно-деформированного состояния стальных конструкций, состоящих из пластин и стержней, методом пассивной термографии, представляющие собой пластины с модельными дефектами в форме глухих отверстий различной глубины и диаметра, и выявленные на основе моделирования с помощью метода конечных элементов закономерности локализации пластической деформации и деформационного тепловыделения в контрольных образцах, заключающиеся в формировании у основания отверстий зон пластической деформации, которые являются источниками теплообразования и могут быть приближенно представлены в форме шара с диаметром kd , где d – диаметр отверстия, а $k = 0,75..1,4$ – коэффициент, зависящий от размеров пластины, свойств ее материала и размеров отверстия (модельного дефекта), что позволяет на основе экспериментальных исследований и расчетов прогнозировать возможность выявления зон пластической деформации термографическим методом.

2. Методика экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния и деформационных тепловых полей образцов в виде стержней и пластин из низкоуглеродистых сталей Ст3 и 09Г2С с модельными дефектами в форме отверстий, надрезов и сварных швов, основанная на видеорегистрации инфракрасного излучения с длинами волн $8..14$ мкм, возникающего при квазистатическом (скорость деформирования не более $0,05$ мм/с) и ускоренном (скорость деформирования $0,05..0,5$ мм/с) нагружении образцов на испытательной машине и начальной температуре образцов от -70 °С до $+20$ °С, с последующей обработкой машинной диаграммы деформации и покадровой обработкой термофильма, позволяющая исследовать локализацию зон повышенного тепловыделения и их взаимосвязь с пластической деформацией материала образцов, а также влияние климатических условий и скорости деформирования на процессы разрушения образцов и тепловыделения в них.

3. Закономерности деформационного тепловыделения в стальных образцах с конструктивными и технологическими дефектами, установленные с помощью предложенной методики экспериментального исследования и заключающиеся в том, что повышенное тепловыделение возникает в окрестностях этих дефектов, являющихся областями зарождения пластической деформации материала и его последующего разрушения, а интенсивность тепловыделения увеличивается с ростом скорости деформирования: при квазистатическом нагружении нагрев составляет до $+10$ °С, а при ускоренном $+70$ °С. При испытании образцов при пониженной начальной температуре от -40 °С до -70 °С максимальная температура их деформационного нагрева снижается примерно на величину начального охлаждения. При разрушении предварительно охлажденных образцов наблюдается изменение вида излома с вязкого на хрупкий, что может приводить к значительному увеличению скорости роста трещин в зонах пластической деформации.

4. Закономерности деформационного тепловыделения при упругом деформировании стальной трехслойной ортотропной плиты, заключающиеся в понижении

температуры на 0,1..0,2 °С в растянутом поясе и ее повышении на 0,2..0,3 °С в сжатом поясе при статическом нагружении сосредоточенной поперечной нагрузкой в середине плиты и позволяющие путем дистанционного измерения температуры определять стадию деформирования плиты. При приложении к плите повторно-переменной нагрузки с размахом 1000 кН происходит повышение температуры покрывочных листов до 1 °С при увеличении количества циклов нагружения до 10.

5. Критерий определения работоспособности стальных деформируемых элементов конструкций, основанный на сравнении измеренной максимальной величины деформационной температуры с ее критическим значением, определяемым для конкретных конструктивных форм деформируемых элементов экспериментальным методом в условиях воспроизведения параметров механической нагрузки и температурных воздействий среды, возникающих при эксплуатации, позволяющий прогнозировать развитие разрушения в зонах повышенного тепловыделения.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации

Все основные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично. Научный руководитель – д.т.н., доцент Мойсейчик Е. А. принимал участие в постановке задач и анализе полученных результатов, д.ф.-м.н., профессор Василевич Ю. В. и д.т.н., профессор Пастушков Г. П., оказывали консультативное содействие по вопросам процессов деформационного тепловыделения, к.т.н. Мойсейчик А. Е. консультировал по вопросам компьютерного моделирования образцов, к.т.н., доцент Пастушков В. Г., Калыска А. О., Язневич А. М., Белый В. А. оказывали помощь в проведении экспериментальных исследований. Участие соавторов работ отражено в совместных публикациях, представленных в автореферате и диссертации, и заключается в обсуждении научных результатов или решении задач, не включенных в данную работу.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации докладывались на научно-технических конференциях в Беларуси и России:

Международная научно-практическая конференция «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (г. Пермь, 14–15 апреля 2016 г.);

XVI Международная научно-техническая конференция «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» (г. Новосибирск, 18–20 апреля 2023 г.);

Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию В.Г. Шухова (г. Белгород, 16–17 мая 2023 г.);

Международная конференция «Проблемы современного строительства» (г. Минск, 23 мая 2023 г.);

IX Научно-техническая конференция кафедры «Теоретическая механика и механика материалов» БНТУ (г. Минск, 7 февраля 2023 г.);

IV Международная научно-техническая конференция «Дорожное строительство и его инженерное обеспечение» (г. Минск, 27 апреля 2023 г.).

Разработана технология технической диагностики стальных конструкций на основе диссертационных исследований методами дистанционной пассивной компьютерной термографии опасных зон деформируемых элементов и выявлены трещиноопасные конструктивные решения элементов трехслойной плиты большой грузоподъемности. С учетом экспериментальных данных, полученных в диссертации,

в ООО «ПроектГарантИнжиниринг» разработано техническое задание на проектирование и скорректированы решения узлов и соединений трехслойной плиты.

Разработаны рекомендации по прогнозированию работоспособности элементов стальных пролетных строений автодорожных мостов и переданы ГП «БелдорНИИ» и ООО «ЭКОМОСТ» для применения при обследовании мостовых сооружений.

Внесены предложения для ОАО «Трест №15 «Спецстрой» по совершенствованию диагностики выполняемых работ по устройству защитного экрана тоннелей минского метрополитена посредством комбинирования традиционной системы мониторинга строительных конструкций с диагностированием методами дистанционной компьютерной термографии.

Оптимизированы конструктивные решения полимерных элементов крепления железнодорожных рельсов к шпалам по запросу ЗАО «ДОР-МПЗ» на основании исследований температурных полей по данным дистанционных инфракрасных измерений при воздействии положительных и отрицательных климатических температур.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 18 изданиях. Из них 14 в рецензируемых научных журналах (общий объем статей 3,4 авторских листа), 4 статьи – в сборниках материалов конференций.

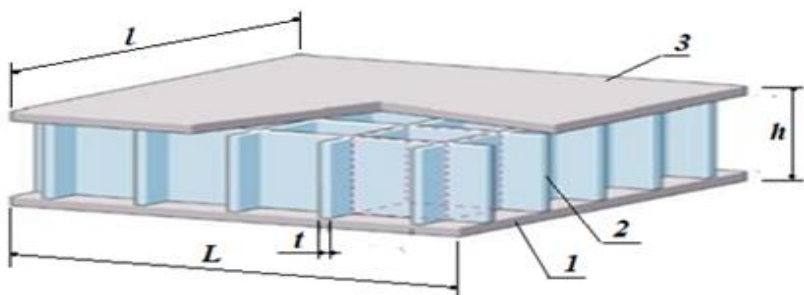
Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Полный объем диссертационной работы составляет 173 страниц, из них 92 рисунка занимают 65 страниц, 8 таблиц, количество используемых библиографических источников составляет 178 наименований. Собственные публикации автора на 3 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе выполнен аналитический обзор литературы по теме диссертации, выявлены недостаточно изученные вопросы, определены задачи исследования.

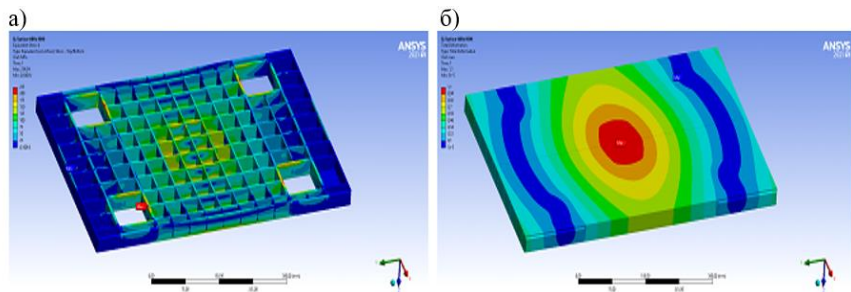
Во второй главе проведено расчетное и экспериментальное исследование физической модели стальной трехслойной плиты. Такая плита и ее физическая модель (1/5 натуре) представляют собой систему, состоящую из двух внешних листов и среднего слоя с соединениями на электродуговой сварке (рисунок 1). Плита позволяет воспринимать большие нагрузки (до 1000 кН/м²) при небольшой относительной высоте ($h/L \approx 1/20 - 1/40$). В физической модели трехслойной плиты опасные зоны выявлялись конечно-элементным расчетом в программном комплексе ANSYS (рисунок 2) и экспериментальным нагружением модели плиты. Установлено, что большое количество сварных швов вызвало начальные перемещения модели плиты и технологические дефекты в соединениях, вследствие чего превышение экспериментальных величин прогибов модельной плиты над расчетными достигало 50 % и уменьшалось по мере выработки начальных прогибов. В потенциально опасных зонах физической модели и натурной плиты возникают деформации растяжения, среза, изгиба; в окрестности дефектов - сложное напряженное состояние. Работу стальных элементов натурной плиты исследовали расчетом и экспериментально на образцах, в опасных зонах которых реализуются перечисленные деформации.



1 – нижний слой; 2 – средний слой; 3 – верхний слой (покрывочный)
Рисунок 1 – Схема модели стальной трехслойной ортотропной плиты с прямоугольными ячейками в среднем слое

Для этого разработано 20 типоразмеров образцов с конструктивными (вырезы, отверстия и т. д.) и технологическими (сварочными) дефектами. Образцы изготавливались из листового проката толщиной 8 и 20 мм. Виды отдельных образцов и испытательного стенда показаны на рисунке 3.

Результаты испытания модели получали на электронном и бумажном носителях и обрабатывали в соответствии с требованиями ГОСТ 1497 – 84 и ГОСТ 11150 – 84. Аналогично испытывались и образцы (рисунок 3). Термограф 2 (рисунок 3 в) фиксирует все тепловое излучение, поступающее с поверхности образца. Относительная погрешность определения температуры термографом IRTIS-2000CH рассчитывалась по данным испытания образца и составляла не более 0,05 % в диапазоне измерений. Одновременно со съемкой термофильмов в характерных реперных точках температура измерялась термопарами.



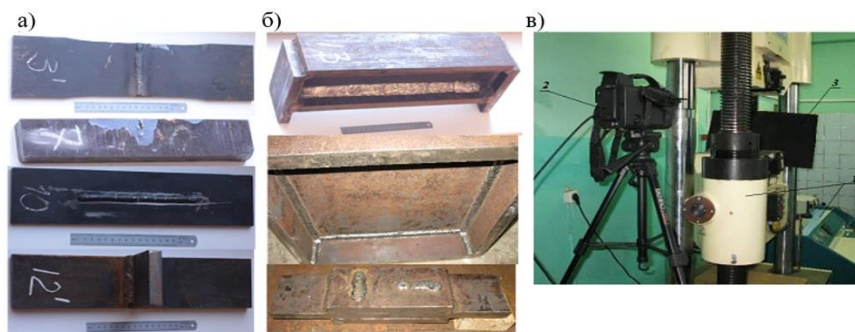
а – распределение эквивалентных напряжений в ребрах и нижнем листе 3-слойной плиты (покрывочный лист не показан);

б – вертикальные перемещения плиты 3-слойной плиты

Рисунок 2 – Результаты конечно-элементного расчета модели 3-слойной ортотропной плиты

Для настройки и периодической проверки термографической аппаратуры использовали контрольные образцы, содержащие дефекты. Информационным признаком наличия неоднородности является аномалия температурного поля ΔT на исследуемой поверхности. Для активных тепловых методов существуют контрольные

образцы, содержащие разнообразные дефекты. В литературных источниках не выявлено таковых для пассивных методов теплового контроля. Поэтому такие образцы предложены и исследованы в диссертации.



**1 – испытательная машина WAW-1000; 2 –термограф IRTIS-2000CH;
3 –экран;**

***а* – образцы для нагружения растяжением; *б* – сложные образцы для нагружения на изгиб, исследования работы сварных швов и наплавов, работы плиты на изгиб; *в* – вид испытательного стенда для испытаний на растяжение, сжатие, изгиб**

Рисунок 3 – Вид отдельных образцов и испытательного стенда

В третьей главе рассмотрены особенности моделирования в ПК ANSYS. С использованием этого комплекса выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния и теплообразования в экспериментальных и контрольных образцах при их силовом нагружении. Показано, что изменение деформационной температуры материала твердотельных моделей образцов и изделий можно определить расчетными методами и затем очертить границы опасных зон. При этом необходимо использовать истинную диаграмму деформирования металла, действительные граничные условия, а нагрузку задавать возрастающей с постоянным шагом до максимального значения, соответствующего достижению предела прочности в области концентрации. В результате расчета получали поля эквивалентных деформаций, напряжений, плотности энергии и деформационных температур при упругопластическом деформировании моделей. В расчетах учитывался эффект пластического тепловыделения. Первое повышение расчетной температуры произошло в окрестности точки «К» (рисунок 4 в). С ростом нагрузки нагрев в зоне «К» приостановился. С достижением напряжениями в околошовной зоне «К» предела текучести температурные аномалии проявились у концов сварного шва. При напряжениях в 257,3 МПа в пластине наибольший нагрев локализовался в центральной части зоны, отмеченной красным цветом на рисунке 4 в. Температура поверхностных точек материала изменялась в интервале от 22,0 °С до 25,3 °С. На рисунке 4 приведены расчетные поля эквивалентных деформаций, напряжений и температуры при действии центрально растягивающей силы 198,21 кН.

Аналогично рассчитывались соответствующие поля при упругопластическом деформировании 20 типоразмеров образцов с конструктивными и технологическими концентраторами, повреждениями (рисунок 5), присущими трехслойным плитам.

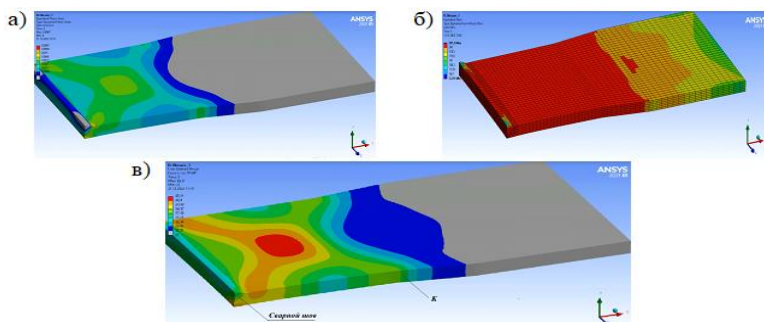


Рисунок 4 – Эквивалентные деформации (а), напряжения (б), температурное поле поверхности (в) при пластическом деформировании расчетной модели сварного образца растягивающим усилием 198,21 кН

Выявленные расчетом закономерности изменения зон расположения температурных аномалий при растяжении и диапазоны изменения температуры поверхности допускают экспериментальную проверку с использованием компьютерного термографирования. На рисунке 6 показана конструктивная форма контрольного образца с глухими отверстиями различной глубины для использования при пассивном тепловом контроле, разработанная на основе 5 предложенных вариантов.

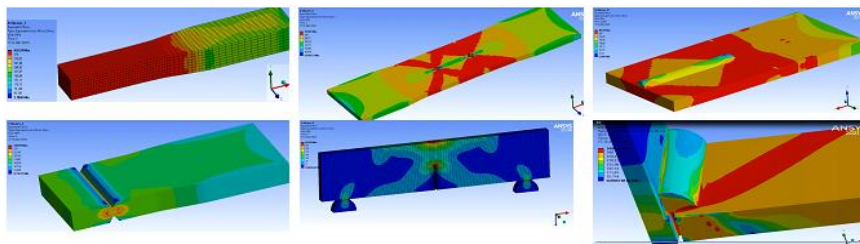


Рисунок 5 – Поля эквивалентных напряжений на поверхности опасных зон листовых образцов

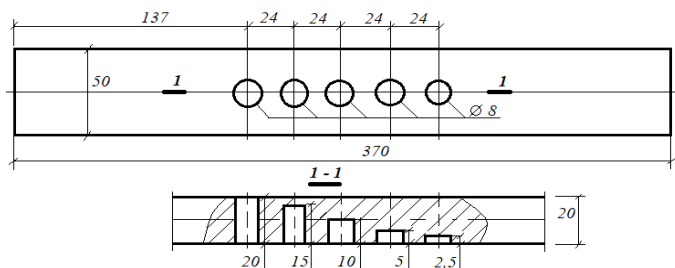


Рисунок 6 – План и сечение 1- настроечного образца (размеры в мм)

Образцы подвергали квазистатическому растяжению при скорости деформирования 10-50 мм/мин с параллельной съемкой термофильма. Тепло в зоне дефектов исходило от деформационных источников.

На рисунке 7 а показано распределение эквивалентных напряжений по Мизесу. Видно, что упругопластические деформации и основное количество деформационного тепла возникают в небольшом объеме металла, примыкающем к подошве глухих отверстий.

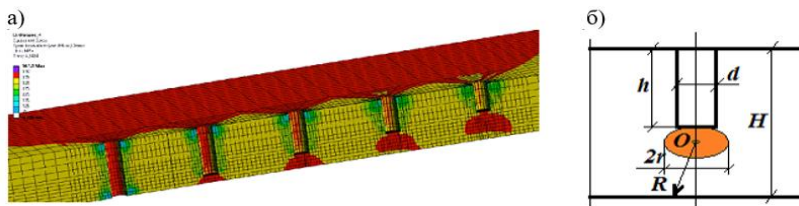


Рисунок 7 – Распределение эквивалентных напряжений в продольном сечении 1-1 надрезного образца (а) и схематизация дефекта (б)

Распространение тепла от сосредоточенного источника Q запишем в виде:

$$T(R, t) = \frac{Q}{c\gamma(4\pi at)^{1,5}} e^{-\frac{R^2}{4at}}, \quad (1)$$

где $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ – квадрат расстояния от источника тепла O до точки тела с координатами x, y, z .

Из выражения (1) следует, что температура произвольной точки тела определяется ее радиус-вектором R . Изотермические поверхности представляют собой сферы радиуса $R = \text{const}$ с центром в точке O . Размеры области выделения деформационного тепла (рисунок 7 б) зависят от относительной глубины (h/H) засверленного отверстия, диаметра отверстия (d/h), напряженно-деформированного состояния в основании выточки, свойств материала. В первом приближении примем эту область сферической, диаметром kd (k – числовой коэффициент, зависящий от d/h , определяемый численным расчетом или экспериментальным путем). Для модели по рисунку 7 а величина коэффициента k может быть принята $k = 2,4-3,0$. Тогда Q можно рассчитать по зависимости:

$$Q = q V = q (1/6\pi k^3 d^3), \quad (2)$$

где q – количество тепла, выделяемого объемом dV ; V – объем шара радиусом kr .

Минимальное значение радиус-вектора определили по выражению

$$R_{\min} = H - h - 0,5 k d. \quad (3)$$

Допустим, что $h/H < 1$, т. е. выражение (2) справедливо для всех цилиндрических выточек, кроме сквозного отверстия. Для фиксированного момента времени t_f можно найти отношение температур на гладкой поверхности образца по осям i -го и k -го глухих засверливаний (при $R_k > R_i$):

$$\frac{T_k(R_k, t_f)}{T_i(R_i, t_f)} = \frac{q_k(k_k, d_k)^3}{q_i(k_i, d_i)^3} e^{\frac{R_i^2 - R_k^2}{4at_f}}. \quad (4)$$

Выражение (4) применимо для контрольных образцов (при условии $h/H < 1$). Для пластин конечной толщины H с засверленными отверстиями использовать выражения (2), (3) затруднительно из-за выхода сосредоточенных деформационных источников тепла на исследуемую поверхность образца. В контрольном образце на зоны деформаций могут действовать несколько источников тепла. Допуская, что мощность тепловых источников, коэффициенты теплопроводности и коэффициенты теплообмена не зависят от температуры, определим температуру T_i в любой i -й точке образца с учетом принципа суперпозиции температурных полей по выражению (5):

$$T_i = T_0 + \sum_{j=1}^n P_j k_{ji}, \quad (5)$$

где T_0 – начальная температура (среды, материала образца);

n – число источников;

P_j – мощность j -го теплового источника;

k_{ji} – числовые коэффициенты, не зависящие от температуры внешней среды, мощности источников, определяемые экспериментальным путем или расчетом.

Изложенный подход показал, что при **активном методе** исследования имеется заметное изменение перепада температур $\Delta t/h$ при остывании образца с ростом h (рисунок 8 а, б). Таким образом, можно уверенно выявлять неоднородности в металле при $h \leq 5$ мм или при $d \geq 4$ мм. При большей величине h (или меньшей – d) измеряемые величины Δt будут сопоставимы с внешними помехами. При **пассивном методе** теплообразование в контрольном образце происходит в результате деформирования при различных внешних температурных воздействиях. В эксперименте создавались два уровня начальных температур стали: при «комнатной» и охлажденными до -40 °С. Поверхность охлажденного образца покрывалась инеем, который частично сохранялся и после разрушения. При этом таяние инея выделяло контуры поверхностей с положительными температурами.

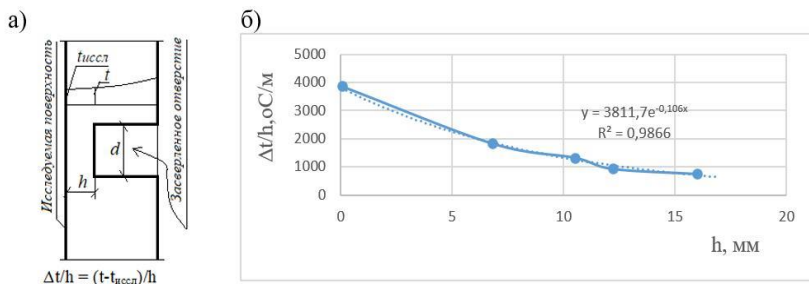


Рисунок 8 – Изменение перепада температур $\Delta t/h$ при остывании образца с ростом h

Из графиков температур по выделенной линии и изменения $\Delta t/h$ при растяжении образца с увеличением h (рисунок 9) следует, что в образце при пассивном тепловом методе исследования можно уверенно выявлять внутренние дефекты диаметром более 6–8 мм, расположенных от исследуемой поверхности на расстоянии $h \leq 6$ мм.

Экспериментальные данные позволяют определить характерные особенности температурного поля поверхности при активном и пассивном тепловых методах.

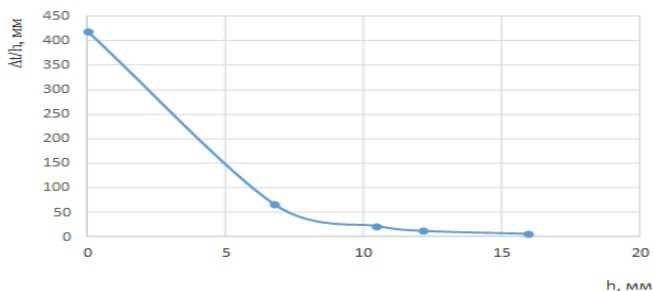


Рисунок 9 – Изменение $\Delta t/h$ при растяжении образца с увеличением h

В четвертой главе экспериментально доказано наличие устойчивой взаимосвязи участков аномальных изменений температурных полей поверхности с зонами локализации опасных состояний и развитием разрушений в деформируемых экспериментальных образцах. Показано, что при деформировании образцов в опасных зонах происходят изменения на всех структурных уровнях, начиная от атомного. При появлении текучести в материале опасные зоны образцов покрываются следами полос скольжения (полосы Чернова – Людерса). Эти полосы скольжения в пластинах, их соединениях появлялись при различных деформированных состояниях. Вид полос в образцах зависит от конструктивной формы. Полосы являлись тепловыми источниками. Вследствие этого температурные поля в потенциально опасных зонах деформируемых образцов имеют характерный вид на каждой стадии их развития. Закономерности, установленные при квазистатическом деформировании образцов воспроизводят деформированное состояние и температурное поле, характерное для соответствующих зон реальных сварных конструкций.

При деформировании пластин без конструктивных дефектов и надрезов были уточнены механические характеристики стали, выявлена кинетика изменений температурного поля в процессе деформирования и использованы эти данные при конечно-элементном расчете. Вид образца в стадии «шейкообразования» и соответствующие температурные поля показан на рисунке 10 а. Графики рисунка 10 б показывают, что температурное поле поверхности зависит от стадии деформирования материала образца. В конце упругой стадии работы образца температуры отличаются от начальной на 1,7 °С, а при разрушении повышение температур точек поверхности достигало 4,5 °С. В стадии образования шейки компьютерное термографирование позволило выявить полость в средней части опасного сечения (точка с температурой 32,87 °С). Данные термограмм показали, что зарождение разрушения в опасном сечении образца происходило в зоне проявления максимальной температуры поверхности.

Объяснить неодинаковый деформационный нагрев можно, исходя из различий в состоянии приповерхностных и внутренних слоев материала растянутого образца. Материал приповерхностных слоев имеет меньшее сопротивление деформированию, так как находится в плоском напряженном состоянии. В материале средней части толстого (16–20 мм) образца возникает состояние, близкое к плоскому деформированному, и возникает большее сопротивление сдвиговым деформациям. Так как нагрев материала происходит за счет теплообразования в полосах сдвигов, то

эту особенность деформирования приповерхностных слоев материала и проявляет их большая деформационная температура.

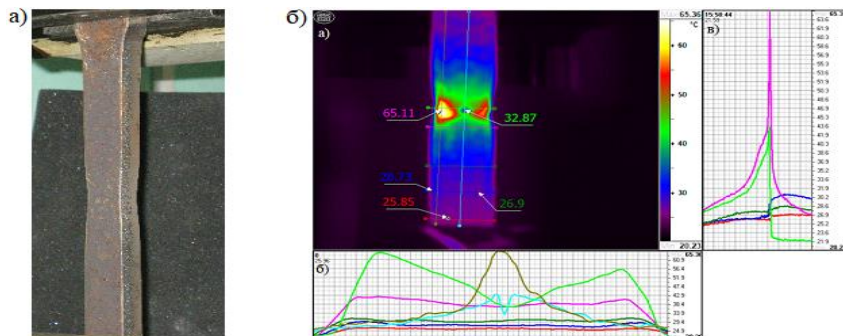


Рисунок 10 – Вид пропорционального образца при образовании шейки (а) и соответствующая термограмма (кадр 132) его деформирования (а), графики изменения температур поверхности по выделенным линиям (б) и отдельным точкам за время испытания образца (б)

Взаимосвязь между машинной диаграммой гладких образцов толщиной 8 и 20 мм и соответствующими максимальными деформационными температурами гладких образцов показана на рисунке 11.

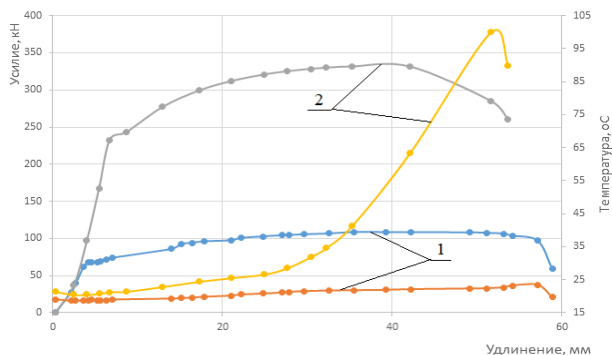


Рисунок 11 – Машинные диаграммы для пропорциональных образцов толщиной 8 (1) и 20 мм (2) и изменение соответствующих максимальных деформационных температур

Растяжение пластин с боковыми надрезами позволило выявить характерную особенность протекания процесса деформирования в зоне надреза и соответствующие аномалии температурного поля поверхности. На рисунке 10 а показан деформируемый образец с отслоившейся окалиной на участках, где произошли пластические деформации. Наблюдение поверхности при возрастании силы P показало, что отслоение началось у дна надреза и развивалось в областях, выделенных цифрой 1. При этом средняя часть образца, выделенная цифрой 2, сохраняла на поверхности окалину до

момента зарождения трещины в дне надреза, т. е. находилась в упругом состоянии. Пластические деформации развивались в средней части образца вне области 2.

Термокадр для пластины с надрезами на меньшей стороне (рисунок 12 б) проявляет следующую схему нагрева металла. При движении от захватов к опасному сечению увеличение температуры наблюдается в средних слоях образца на (6–7) °C выше, чем в крайних. Последовательные термо- и видеок кадры показали монотонное возрастание до максимума температуры у дна надреза, сопровождающееся первым отслоением окалины. Процесс изменения температуры поверхности в точке «38,13» за время нагружения образца до разрушения показан на графике (рисунок 12в, линия выделена красным цветом). В сечении, проходящем через зону отслоения окалины, температура в средней части образца выше на 3,0 °C–3,5 °C, чем в крайней. Максимальная температура металла поверхности достигала 70 °C.

Из рисунка 12 а следует, что примыкающие к надрезу участки образца в процессе деформирования силой P теряют устойчивость положения, выразившуюся в изменении первоначального положения (штриховые линии на рисунке 12 б) на новое (сплошные линии на рисунке 12 б), т. е. призма с основанием ABC и высотой, равной толщине листа, под действием напряжений σ и τ потеряла устойчивость. Металл в объеме призмы практически не деформировался. Температура ее основания начала незначительно возрастать только после зарождения трещины в надрезе.

Несколько иначе проходит процесс деформирования и теплообразования в пластине с парными надрезами по большей стороне сечения (рисунки 13, 14). Изменение температуры образца в выделенных точках 1 и 2 при деформировании образца при комнатной температуре показывает, что ее рост происходит во времени позже протекания соответствующих деформаций. Испытание образцов при низких температурах (начальная температура минус 70 °C) существенно не сказалось на процессе термографирования.

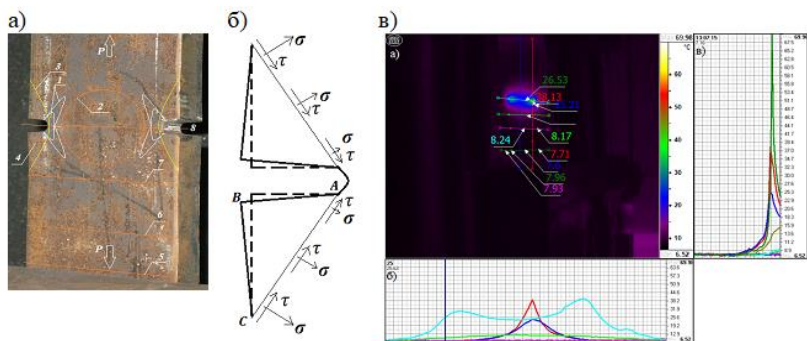


Рисунок 12 – Вид деформируемого образца с надрезами на меньшей стороне (а), поясняющая схема (б) и термограмма (кадр 48) деформирования образца при образовании шейки, графики изменения температур поверхности по выделенным линиям и точкам за время испытания образца

Массивные захваты испытательной машины, имеющие комнатную температуру, достаточно быстро нагревают примыкающие охлажденные части образца, что привело к повышению температуры образца на 20 °C примерно за 4,5 минуты. В очаге

зарождения трещины температура металла поднималась от $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ до максимального значения $+11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Особенностью было появление хрупких изломов в опасной зоне.

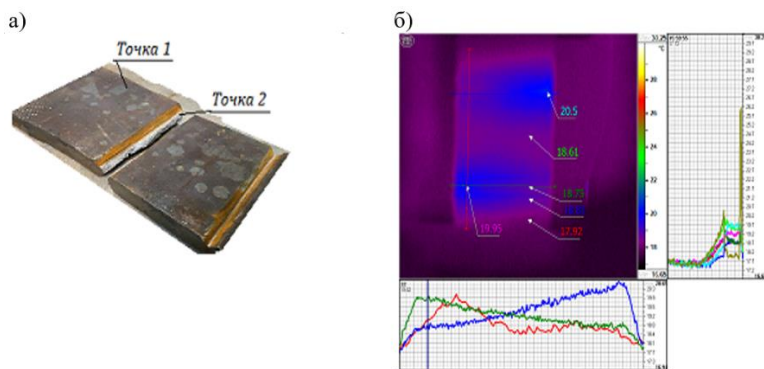


Рисунок 13 – Вид образца после излома (а) и распределение температур на поверхности образца за секунду до излома (б)

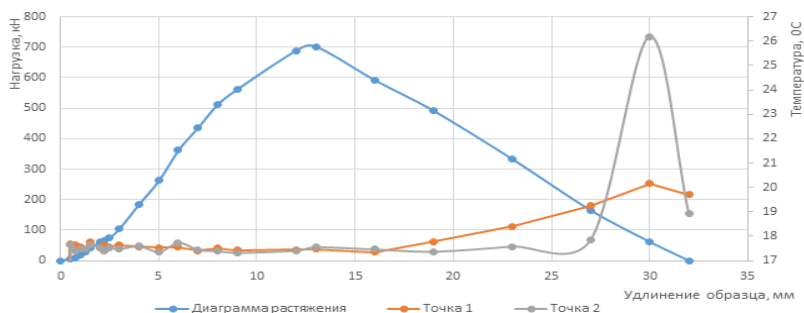


Рисунок 14 – Взаимосвязь максимальных температур в точках 1 и 2 с машинной диаграммой

Образцы со сварными швами используются в различных конструкциях. Температурные поля поверхности образцов со сварными стыковыми швами отображают равномерное поле температур в начальной стадии появления пластических деформаций в образце с повышением температуры металла на $3,76\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зарождение разрушения в сварном шве стыка произошло через 48 секунд с разогревом металла шва на $12,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ (начальная температура образца в $15,12\text{ }^{\circ}\text{C}$). Наибольший разогрев металла шва достигал $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ в стадии долома. Для образцов со сварными угловыми швами температура образца в начале нагружения на $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже начальной температуре образца, одинаковой с температурой окружающего воздуха. Наибольшая температура в шве достигала $31,33\text{ }^{\circ}\text{C}$ в стадии долома. При статическом нагружении комбинированного образца температурное поле поверхности является установившимся. Это подтверждает, что изменение деформационной температуры можно наблюдать только в процессе роста или уменьшения нагрузки.

При проведении инфракрасной термографии в целях контроля состояния и диагностики изделий и их элементов ГОСТ Р ИСО 18434-1-2013 рекомендует установить **критерии оценки температурного состояния**.

Приведенные выше экспериментальные данные показали, что нагружение стальных образцов сопровождается деформационным теплообразованием, характерными температурными полями на поверхностях и завершается вязким или хрупким изломом. Если при квазистатическом деформировании образца в потенциально опасных зонах температура металла T_m не превышала T_c , то зарождения разрушения не наступало. Представляя T_m и T_c в абсолютной термодинамической шкале (шкале Кельвина), критерий работоспособности стального изделия под нагрузкой можно записать в виде:

$$T_m \leq T_c \text{ или } T_m/T_c \leq 1. \quad (6)$$

Температурный запас работоспособности изделия ϑ_T тогда определится по формуле:

$$\vartheta_T = 1 - \frac{T_m}{T_c} = \frac{T_c - T_m}{T_c}. \quad (7)$$

С целью недопущения зарождения разрушения величина T_{cr} должна вводиться в формулу (7) с температурным коэффициентом запаса $\gamma_{cal} > 1$, т. е. $T_{cr} = \frac{T_c}{\gamma_{cal}}$. Выражения (6), (7) удобно использовать при мониторинге изделия с записью термофильма и покадровом вычислении температурного запаса работоспособности контролируемого изделия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами инфракрасной термографии установлена кинетика теплообразования при упругопластическом деформировании плоских образцов с конструктивно-технологическими дефектами из низкоуглеродистых конструкционных сталей, узлов и ортотропной плиты большой грузоподъемности, в том числе исследованы аномалии и получены новые закономерности в формировании температурных полей поверхности в окрестности дефектов в условиях внешних температурных воздействий. Расчетно-экспериментальным методом решены ряд задач, направленных на разработку научно-методических основ раннего выявления опасных состояний в деформируемых стальных элементах и ортотропной плите. Полученные результаты можно сформулировать в виде следующих научных и практических выводов.

Основные научные результаты диссертации

1. Установлено, что очаги повреждений стальных изделий различного назначения располагаются в опасных зонах, содержащих конструктивные, технологические, эксплуатационные концентраторы напряжений и деформаций. Традиционные методы технической диагностики не одинаково пригодны для выявления опасных зон, в которых могут зарождаться и развиваться процессы разрушения [1–18]. Наиболее перспективными являются волновые технологии диагностики (акустические, инфракрасные, лазерные, комбинированные), позволяющие в сочетании с расчетными методами разрабатывать регистрирующие системы для измерений полей деформаций в элементах конструкций в процессе их деформирования при минимальных требованиях к подготовке исследуемых изделий. Показано, что дистанци-

онное измерение и регистрация температурных полей поверхности изделий, возникающих при их квазистатическом деформировании, с высокой достоверностью осуществляется компьютерными измерительными термографами среднего инфракрасного диапазона (8–14 мкм) [7; 8; 10; 11; 14–16].

2. Впервые предложены контрольные образцы для выявления методом инфракрасной термографии закономерностей расположения модельных дефектов в стальных стержнях и закономерности теплообразования в этих зонах при использовании активных и пассивных тепловых методов и силовых и температурных воздействиях. Численно проанализировано их напряженно-деформированное состояние и выявлены форма и размеры области материала у основания искусственных дефектов в образцах, которая при растяжении является сосредоточенным деформационным источником тепла. Установлено, что при активном тепловом исследовании образцов можно выявлять искусственные дефекты (засверленные глухие отверстия различной глубины) и их параметры приборами инфракрасной термографии. При использовании деформационного тепла в образце при пассивном тепловом методе исследования можно уверенно выявлять внутренние дефекты диаметром более 6–8 мм, расположенные от исследуемой поверхности на расстоянии $h \leq 6$ мм. При активном методе исследования уверенно выявлять дефекты в металле можно при $h \leq 5$ мм и при диаметре дефекта $d \geq 4$ мм. При большей величине h (или меньшей – d) измеряемые величины Δt сопоставимы с внешними помехами [11–14].

3. Численным расчетом с использованием ПК ANSYS установлено, что напряженно-деформированное состояние и форма пластической зоны в основании цилиндрических глухих выточек (дефектов) в конструктивных элементах при их растяжении зависят от глубины выточек, их диаметра, напряженно-деформированного состояния в основании выточек, свойств материала. Образование тепла при деформировании элементов происходит в объеме материала в основании выточки, находящемся в пластическом состоянии. В первом приближении этот объем можно представить сферой, диаметр которой kd зависит от диаметра отверстия выточки d , а k изменяется в пределах от 0,75 до 4 и уточняется расчетом для конкретных форм дефектов [5; 7; 11; 13; 14].

4. Экспериментально установлены закономерности теплообразования в деформируемых растяжением образцах из низкоуглеродистых сталей Ст3, 09Г2С заключающиеся в том, что процесс деформационного теплообразования происходит на участках локализации пластических деформаций в окрестности конструктивно-технологических концентраторов напряжений или концентраторов, возникших в процессе деформирования. Увеличение скорости деформирования приводит к увеличению температуры поверхности на участках расположения дефектов в экспериментальных стержнях, образцах, в том числе при квазистатическом нагружении (скорость травессы не выше 0,05 мм/сек) – на 3 °С–10,4 °С, при ускоренном (средняя скорость травессы 0,5 мм/сек) – на 16,1 °С–67 °С. При использовании современных тепловизионных приборов появляется возможность дистанционно, с минимальными затратами ресурсов и экологически безопасно выявлять расположение дефектов, прогнозировать наступление предельного состояния, зарождение и развитие разрушения по температурному полю поверхности деформируемых стальных изделий [6–8; 10–15].

5. Экспериментально установлено, что при упругой работе стальной ортотропной плиты нагруженной поперечной нагрузкой температура растянутого пояса понижается на 0,1 °С–0,2 °С, а сжатого – повышается на 0,2 °С–0,3 °С. Нагружение

ортотропной плиты повторно-переменной нагрузкой с размахом «0–1000» кН приводит к более значительному изменению температуры при увеличении количества циклов нагружения (до 1 °С) [6; 9; 11].

6. Квазистатические испытания на растяжение предварительно охлажденных до -40 °С образцов выявили новые закономерности изменения температурного поля, заключающиеся в уменьшении величин деформационных температур, возникающих на исследуемых поверхностях элементов, и изменении вида изломов листовых образцов (от вязкого к хрупкому) [10–18].

7. Показано, что в качестве критерия появления опасных предельных и запрещенных состояний в зонах конструктивно-технологических дефектов и их изменений в процессе деформирования стальных элементов можно рассматривать условие $T_m \leq T_{cr}$, где T_m – температура металла элемента в потенциально опасных зонах при его квазистатическом деформировании, а T_{cr} – критическая величина температуры в потенциально опасной зоне, определяемая экспериментально для исследуемых конструктивных форм элементов [6; 7; 10–15].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработана технология технической диагностики стальных конструкций на основе диссертационных исследований методами дистанционной пассивной компьютерной термографии опасных зон деформируемых элементов и выявлены трещиноопасные конструктивные решения элементов трехслойной плиты большой грузоподъемности. С учетом экспериментальных данных, полученных в диссертации, в ООО «ПроектГарантИнжиниринг» разработано техническое задание на проектирование и скорректированы решения узлов и соединений трехслойной плиты. Расчет в ПК ANSYS НДС типичных конструктивных форм плиты позволил обеспечить работоспособность и сократить срок проектирования трехслойной плиты с прямоугольными ячейками внутреннего слоя, усовершенствовать технологию их изготовления и эксплуатации.

Разработаны рекомендации по прогнозированию работоспособности элементов стальных пролетных строений автодорожных мостов и переданы ГП «БелдорНИИ» и ООО «ЭКОМОСТ» для применения при обследовании мостовых сооружений.

Внесены предложения для ОАО «Трест №15 «Спецстрой» по совершенствованию диагностики выполняемых работ по устройству защитного экрана тоннелей минского метрополитена посредством комбинирования традиционной системы мониторинга строительных конструкций с диагностированием методами дистанционной компьютерной термографии.

Оптимизированы конструктивные решения полимерных элементов крепления железнодорожных рельсов к шпалам по запросу ЗАО «ДОР-МПЗ» на основании исследований температурных полей по данным дистанционных инфракрасных измерений при воздействии положительных и отрицательных климатических температур.

Областями дальнейшего приоритетного применения результатов диссертационной работы являются стальные конструкции и изделия, для обеспечения работоспособности которых необходимо контролировать образование пластических деформаций, зарождение и развитие трещин в элементах, работающих при квазистатических, повторно-переменных, усталостных и динамических нагрузках в условиях воздействия климатических температур.



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Яковлев, А. А. Испытание сталежелезобетонного пролетного строения длиной 55 метров с применением инновационного измерительного оборудования / Г. П. Пастушков, В. Г. Пастушков, В. А. Белый, А. А. Яковлев. – Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – № 33. – С. 191–192.
2. Яковлев, А. А. Экспериментальное исследование бетонного элемента при одноосном сжатии с применением современных материалов / А. А. Яковлев, В. А. Белый // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – № 33. – С. 306–308.
3. Яковлев, А. А. Деформативность трубобетонных элементов с применением высокопрочных бетонов / А. А. Яковлев // Автомобильные дороги и мосты. – 2019. – № 1 (23). – С. 31–36.
4. Яковлев, А. А. Микротрещинообразование в трубобетонных колоннах / А. А. Яковлев // Автомобильные дороги и мосты. – 2019. – № 2 (24). – С. 77–83.
5. Мойсейчик, Е. А. Деформирование стальных стержней периодического профиля с эксплуатационными повреждениями / Е. А. Мойсейчик, Ю. В. Василевич, А. Е. Мойсейчик, А. М. Язневич, А. А. Яковлев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – Вып. 3 – С. 294–305.
6. Мойсейчик, Е. А. Выявление опасных состояний и контроль разрушения в стальных растянутых элементах тепловым методом / Е. А. Мойсейчик, А. Е. Мойсейчик, А. А. Яковлев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2023. – № 2 (48). – С. 22–29.
7. Василевич, Ю. В. Анализ напряженно-деформированного состояния и температурного поля деформируемого растяжением образца / Ю. В. Василевич, А. Е. Мойсейчик, Е. А. Мойсейчик, А. А. Яковлев // Теоретическая и прикладная механика. – 2023. – Вып. 38. – С. 61–71.
8. Мойсейчик, Е. А. Удельная энергоемкость и теплообразование в стальных образцах при квазистатическом растяжении / Е. А. Мойсейчик, А. Е. Мойсейчик, А. А. Яковлев // Теоретическая и прикладная механика. – 2023. – Вып. 38. – С. 112–117.
9. Яковлев, А. А. Стальная трехслойная ортотропная плита и ее работа при квазистатическом нагружении / А. А. Яковлев, Е. А. Мойсейчик, А. Е. Мойсейчик // Теоретическая и прикладная механика. – 2023. – Вып. 38. – С. 201–206.
10. Мойсейчик, Е. А. Визуализация кинетики пластических деформаций в стальных изделиях по инфракрасному излучению / Е. А. Мойсейчик, А. Е. Мойсейчик, А. А. Яковлев // Механика машин, механизмов и материалов. – 2024. – № 3(68). – С. 78–87.
11. Мойсейчик, Е. А. Деформационное тепло при растяжении стальных элементов / Е. А. Мойсейчик, А. А. Яковлев // Наука и техника. – 2024. – Т. 23, № 5. – С. 390–396.
12. Мойсейчик, Е. А. Визуализация развития пластических деформаций в стальных изделиях по инфракрасному излучению поверхности / Е. А. Мойсейчик, А. Е. Мойсейчик, А. А. Яковлев. – Машиностроение. – 2024. – Вып. 35. – С. 222–233.

13. Мойсейчик, Е. А. Разработка образца для оценки пассивным тепловым методом диаметра и глубины залегания дефекта / Е. А. Мойсейчик, А. Е. Мойсейчик, А. А. Яковлев, А. О. Калыска // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2024. – № 1. – С. 26–33.

14. Яковлев, А. А. Прочностной и деформационный анализ трехслойной ортотропной плиты с использованием программного комплекса ANSYS / Е. А. Мойсейчик, А. А. Яковлев // Наука и техника. – 2024. – Т. 23, № 6. – С. 473–480. – DOI 10.211222227-1031-2024-23-6-473-480

Материалы конференций

15. Яковлев, А. А. Устройство защитного экрана линии метрополитена мелкого заложения при строительстве транспортной развязки в г. Минске / А. А. Яковлев, В. Г. Пастушков, Г. П. Пастушков // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе : материалы международной научно-практической конференции; г. Пермь, 14–15 апреля 2016 г. – С. 330–334 с.

16. Яковлев, А. А. Выявление опасных состояний и дефектов в элементах стальных конструкций, находящихся под нагрузкой, по ИК-излучению / А. А. Яковлев // Фундаментальные и прикладные исследования в области естественнонаучных и технических дисциплин : сб. докл. Междунар. науч.-технич. конф. молодых ученых, посвящ. 170-летию со дня рождения В. Г. Шухова [Электронный ресурс] / БГТУ им. В. Г. Шухова; Белгород, 16–17 мая 2023 г. – Ч. 20. – С. 391–397. – Режим доступа: https://www.bstu.ru/research/graduation_candidacy/otdel_oonirs/conf. – Дата доступа: 28.06.2024.

17. Мойсейчик, А. Е. Расчет температуры поверхности и напряженно-деформированного состояния упруго-пластических тел из стали при их нагружении / А. Е. Мойсейчик, А. А. Яковлев // Фундаментальные и прикладные исследования в области естественнонаучных и технических дисциплин : сб. докл. Междунар. науч.-технич. конф. молодых ученых, посвящ. 170-летию со дня рождения В. Г. Шухова [Электронный ресурс] / БГТУ им. В. Г. Шухова ; Белгород, 16–17 мая 2023. – Ч. 20. – С. 218–224. – Режим доступа: https://www.bstu.ru/research/graduation_candidacy/otdel_oonirs/conf. – Дата доступа: 28.06.2024.

18. Яковлев, А. А. Расчет и испытания ортотропной плиты большой грузоподъемности / А. А. Яковлев // Проблемы современного строительства [Электронный ресурс] : сборник научных трудов, Минск, 23 мая 2023 г. / редкол.: В. В. Бондарь, В. Ф. Зверев, Е. А. Козловский. – Минск: БНТУ, 2023. – С. 45–58. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/138410?show=full&ysclid=m2q59yfwtf355519935>. – Дата доступа: 28.06.2024.

РЭЗІЮМЭ

Якаўлеў Аляксандр Аляксандравіч

Прагназаванне разбурэння сталых ліставых элементаў з канцэнтратарамі напружанняў на падставе кінетыкі пасіўных цеплавых палёў

Ключавыя словы: напружана-дэфармаваны стан, тэмпература, дэфармацыі, стрыжань, пласціна, трохслаёвая пліта, тэрмограф, кантрольная проба, дэфект, цеплавое даследаванне, метады, тэрмаграма, градыент, крытэрыі, зварка

Аб'ект даследаванняў – канструктыўныя і тэхналагічныя дэфекты ў прутка-пластычна дэфармаваных элементах сталёвых вырабаў, якія з'яўляюцца патэнцыйнымі крыніцамі цеплаўтварэння, зараджэння і развіцця разбурэння.

Мэта працы – навуковае абгрунтаванне прагназавання і папярэджання разбурэння дэфармуемых ліставых элементаў сталёвых канструкцый з канцэнтратарамі напружанняў на аснове кінетыкі цеплавых палёў, што дазваляе знізіць рызыкі іх аварый і павысіць бяспеку збудаванняў.

Упершыню прапанаваны кантрольныя пробы для выяўлення метадам інфрачырвонай тэрмаграфіі заканамернасцяў размяшчэння мадэльных дэфектаў у сталёвых стрыжнях і заканамернасці цеплаўтварэння ў гэтых зонах пры выкарыстанні актыўных і пасіўных цеплавых метадаў і сілавых і тэмпературных уздзеянняў. Устаноўлена, што пры актыўным цеплавым даследаванні пробаў можна выяўляць штучныя дэфекты (засвідраваныя адтуліны) і іх параметры прыборамі інфрачырвонай тэрмаграфіі. Устаноўлены заканамернасці лакалізацыі пластычнай дэфармацыі і змены аб'ёму дэфармуемага матэрыялу з выкарыстаннем цыліндрычных дэфектаў у мадэлях. Эксперыментальна абгрунтаваны заканамернасці цеплаўтварэння ў дэфармаваных расцяжэннем мадэлях з малавуглеродзістых сталей Ст3, 09Г2С. Нагрузэнне ортатропнай пліты паўторна-пераменнай нагрузкай з размахам 0–1000 кН прыводзіць да значнай змены тэмпературы пры павелічэнні колькасці цыклаў нагружэння (да 1 °С). Квасістатычныя выпрабаванні на расцяжэнне папярэдне астуджаных да мінус 40 °С пробаў выявілі новыя заканамернасці змены тэмпературнага поля, якія выражаюцца ў памяншэнні велічынь дэфармацыйных тэмператур паверхні і змене выгляду зломаў пробаў.

РЕЗЮМЕ

Яковлев Александр Александрович

Прогнозирование разрушения стальных листовых элементов с концентраторами напряжений на основе кинетики пассивных тепловых полей

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, температура, деформации, стержень, пластина, трехслойная плита, термограф, контрольный образец, дефект, тепловое исследование, методы, термограмма, градиент, критерий, сварка

Объект исследований – конструктивные и технологические дефекты в упруго-пластически деформируемых элементах стальных изделий, являющиеся потенциальными очагами теплообразования, зарождения и развития разрушения.

Цель работы – научное обоснование прогнозирования и предупреждения разрушения деформируемых листовых элементов стальных конструкций с концентраторами напряжений на основе кинетики тепловых полей, что позволяет снизить риски их аварий и повысить безопасность сооружений.

Впервые предложены контрольные образцы для выявления методом инфракрасной термографии закономерностей расположения модельных дефектов в стальных стержнях и закономерности теплообразования в этих зонах при использовании активных и пассивных тепловых методов и силовых и температурных воздействий. Установлено, что при активном тепловом исследовании образцов можно выявлять искусственные дефекты (засверленные отверстия) и их параметры приборами инфракрасной термографии. Установлены закономерности локализации пластической деформации и изменения объема деформируемого материала в основании цилиндрических дефектов образцов.

Экспериментально установлены закономерности теплообразования в деформируемых растяжением образцах из низкоуглеродистых сталей Ст3, 09Г2С. Нагружение ортотропной плиты повторно-переменной нагрузкой с размахом 0–1000 кН приводит к более значительному изменению температуры при увеличении количества циклов нагружения (до 1 °С). Квазистатические испытания на растяжение предварительно охлажденных до минус 40 °С образцов выявили новые закономерности изменения температурного поля, заключающиеся в меньшей величине температур поверхности и изменении вида изломов образцов.

SUMMARY

Yakovlev Alexander Alexandrovich

Prediction of Failure of Steel Sheet Elements with Stress Concentrators Based on Passive Thermal Field Kinetics

Keywords: stress-strain state, temperature, deformation, rod, plate, three-layer plate, thermograph, control sample, defect, thermal study, methods, thermogram, gradient, criterion, welding

The object of the research is design and technological defects in elastic-plastically deformable elements of steel products, which are potential sources of heat generation, initiation and development of destruction.

The purpose of the work is scientific substantiation of forecasting and preventing the destruction of deformable sheet elements of steel structures with stress concentrators based on the kinetics of thermal fields, which allows reducing the risks of their accidents and increasing the safety of structures.

For the first time, control samples have been proposed to identify, using infrared thermography, patterns in the location of model defects in steel rods and patterns of heat generation in these zones using active and passive thermal methods and force and temperature influences.

It has been established that with active thermal examination of samples it is possible to identify artificial defects (drilled holes) and their parameters using infrared thermography devices.

The patterns of localization of plastic deformation and changes in the volume of deformed material at the base of cylindrical defects in the samples have been established.

The regularities of heat generation in tensile-deformable samples made of low-carbon steels St3, 09G2S were experimentally established.

Loading an orthotropic slab with a repeatedly variable load with a range of 0–1000 kN leads to a more significant change in temperature with an increase in the number of loading cycles (up to 1 °C).

Quasi-static tensile tests of samples pre-cooled to minus 40 °C revealed new patterns of changes in the temperature field, consisting in lower surface temperatures and changes in the type of fractures of the samples.

Научное издание

ЯКОВЛЕВ

Александр Александрович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ЛИСТОВЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ КИНЕТИКИ ПАССИВНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ**

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

В авторской редакции

Подписано в печать 20.05.2025. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 1,57. Уч.-изд. л. 1,66. Тираж 60. Заказ 313.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск.