

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный технический университет

Е. А. Мойсейчик

**ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ
МАТЕРИАЛОВ, СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И
МАШИН**

Монография

Электронное научное
издание

Минск
БНТУ
2022

УДК [681.7.015.2+620.179.13]

ББК 30.13

М74

Мойсейчик, Е. А.

Тепловой контроль материалов, стальных конструкций и машин [Электронный ресурс] : монография / Е. А. Мойсейчик. – Минск : БНТУ, 2022.

Рассмотрены физические основы теплового контроля, как одного из направлений технического зрения и диагностики изделий, включая исторические сведения, методы контроля температуры тел, природу и возможности термографии, технику тепловидения. Приведены данные экспериментальных и теоретических исследований по неразрушающему контролю и диагностике стальных изделий пассивным тепловым методом. Изложены приложения этого метода к контролю и диагностике стальных мостовых конструкций, тоннельных сооружений, узлов и деталей машин.

Монография будет полезна широкому кругу специалистов, занимающихся обследованиями и диагностикой сооружений и машин, а также научным работникам, преподавателям, аспирантам, магистрантам и студентам.

Требования к системе:

IBM PC-совместный ПК стандартной конфигурации, дисковод CDROM.

Программа работает в среде Windows.

Открытие электронного издания производится посредством запуска файла *Терловой_kontrol*. Возможен просмотр электронного издания с компакт-диска без предварительного копирования на жесткий диск компьютера.

Дата доступа в сети: 15.09.2022. Объем издания: 4,9 Мб.

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор Ю. В. Василевич;

доктор технических наук, профессор А. В. Вавилов;

доктор физико-математических наук, профессор В. Г. Шепелевич.

Рекомендовано к изданию советом Факультета транспортных коммуникаций Белорусского национального технического университета (протокол № 10 от 27.07.2022)

© Е.А.Мойсейчик, 2022 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Раздел 1 Методы контроля температуры объектов	14
1.1. Измерение температуры контактными методами ...	20
1.2. Дистанционные методы теплового контроля и измерения температуры.....	29
Раздел 2 Термография, ее природа и возможности	39
2.1. Основные этапы развития термографии.....	39
2.2. Физическая природа термографии.....	41
2.2.1. Законы теплового излучения.....	45
2.2.2. Тепловое излучение твердых тел при физико-механических воздействиях.....	54
2.2.3. Поглощение теплового излучения различными средами.....	59
Раздел 3 Техника тепловидения	64
3.1. Классификация устройств тепловидения.....	64
3.2. Тепловизионные приборы.....	67
3.2.1. Пирометры.....	67
3.2.2. Тепловизоры.....	71
3.3. Погрешности при тепловизионных измерениях.....	76
Раздел 4 Неразрушающий контроль и диагностика стальных деформируемых изделий тепловыми методами	80
4.1. Тепловой контроль стальных изделий.....	83
4.1.1. Методы теплового контроля.....	83
4.1.2. Теплообразование при деформировании.....	88
4.2. Выявление опасных участков, контроль грешинообразования при растяжении	114
4.3. Определение напряжений в элементах конструкций	141
4.3.1. Соответствие полей напряжений, определяемых тепловым, тензометрическим методами и расчетом МКЭ	144
4.4. Тепловой контроль стальных конструкций	152
Раздел 5 Методы контроля изделий и машин с теплообразованием при их эксплуатации	162
5.1. Тепловой контроль мостовых конструкций.....	162
5.2. Тепловая диагностика тоннельных сооружений... ..	175
5.3. Тепловая диагностика узлов машин.....	181
Заключение	190
Список использованной литературы	193

ВВЕДЕНИЕ

Надежное функционирование современных технических систем и технологий обеспечивается работоспособностью инженерных сооружений, машин и механизмов, ответственные элементы которых выполняются из конструкционной стали и других материалов. В стальных элементах в процессе изготовления возникают начальные дефекты, поля напряжений и деформаций. При эксплуатации рабочие поля напряжений и деформаций суммируются с начальными и, как правило, достигают предельных состояний, превышение которых приводит к трещинообразованию в материале конструктивных элементов, их разрушению и аварийной ситуации для объекта. Предельные состояния локализуются чаще всего в зонах конструктивных неоднородностей элементов (отверстий, вырезов, дефектов изготовления, сварки и др.). Особенно опасно возникновение предельных состояний в стальных растянутых элементах. Поскольку от работоспособности таких зон зависит надежное функционирование конструкций и безопасность людей, то характерные параметры стали в предельном состоянии ответственных растянутых стальных элементов должны находиться под периодическим или непрерывным контролем.

Неразрушающий контроль и диагностика таких конструкций часто затруднена из-за неприспособленности или непригодности конструктивных форм к проведению исследований, неопределенности расположения опасных зон, отсутствия прямой зависимости между измеряемым физическим параметром и расчетной характеристикой работоспособности, незнанием фактического напряженно-деформированного состояния материала в контролируемых зонах, недостоверного выбора вспомогательного, определяющего и аварийного параметров контроля. Подобные ответственные элементы работают в соединениях сосудов, химических и ядерных реакторах и других сооружениях. В опасных зонах растянутых элементов и сварных соединений стальных конструкций сооружений и машин систематически выявляют магистральные трещины, разрывы элементов.

Элементы стальных конструкций сооружений и машин часто имеют низкий уровень контролепригодности по отношению к традиционным методам неразрушающего контроля, работают при экстремальных температурах (от -60 до $+300 - 600$ °С). Не всегда к ним применимы методы неразрушающего контроля из-за неприспособленности приборов к «полевым» условиям.

Дефекты, возникающие в процессе изготовления и испытаний конструкций, их эксплуатации и ремонтов, оцениваются по существующим нормативным документам, методикам неразрушающего контроля, регламентирующих допустимость и параметры тех или иных несовершенств. В статье [1] указывается, что «стандартная процедура дефектоскопического контроля достаточно сложна и, как правило, не охватывает объект полностью». «Актуальность рассматриваемой проблемы возрастает с увеличением срока эксплуатации, что диктует необходимость поиска более простых и эффективных методов решения задачи оценки состояния материалов эксплуатируемых или подвергающихся испытаниям конструкций» [1].

В работах [2; 3] на основе анализа существующих подходов к оценке остаточного ресурса выявлены новые тенденции в методах контроля работоспособности и безопасности стареющего оборудования. Отмечается [2], что при определении остаточного ресурса необходимо, во-первых, учитывать индивидуальные особенности конкретного изделия «на основе комплексного подхода, сочетающего результаты разрушающего и неразрушающего контроля с поверочными расчетами на прочность»; во-вторых, «заметна тенденция перехода от дефектоскопии к методам технической диагностики, основанным на сочетании механики разрушений, металловедения и НК»; в-третьих, появилась «необходимость 100 % обследования стареющего оборудования с целью определения потенциально опасных зон». В статье [2] на основе краткого анализа существующих методик поверочного расчета конструкций на прочность, возможностей и недостатков традиционных методов неразрушающего контроля напряжений делается вывод о необходимости «перехода от традиционной

дефектоскопии к технической диагностике с использованием принципиально других методов контроля и подходов», включающих определение параметров дефектов, **напряженно-деформированного состояния** (далее - НДС), определение фактических структурно-механических характеристик металла. Авторы [2; 3] считают, что оценить «фактическое НДС конструкции» могут «только “пассивные” методы диагностики». Существенным требованием при этом является наличие связи соответствующих полей с термодинамическим уравнением состояния твердого тела [4]. Последнее условие для твердых тел не всегда выполняется [5]. Поэтому в большинстве случаев между измеряемыми параметрами физических полей и компонентами тензоров напряженного и деформированного состояний зависимости могут быть корреляционными или полуэмпирическими. Для отдельных стадий работы материалов имеются теоретические разработки, связывающие изменения параметров физических полей и НДС [6; 7].

Переход от традиционных технологий неразрушающего контроля к технологиям технической диагностики конструкций и сооружений предполагает наличие теории, методов и средств определения технического состояния объектов [3; 8]. Определение технического состояния объектов может производиться последовательным решением трех задач: контроль технического состояния; поиск места и определение причин отказа (неисправности); прогнозирование технического состояния. Наиболее сложной и ответственной является третья задача, решение которой определяет техническое состояние объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени [8]. Так, для материалов несущих строительных конструкций обеспеченность нормативных значений их прочностных характеристик должна быть не менее 0,95 [9]. Задача прогнозирования технического состояния строительного объекта требует создания расчетных моделей, которые должны отражать действительные условия работы объектов [10]. При диагностировании применяются расчетные модели нагрузок и воздействий, расчетные модели НДС элементов конструкций и модели сопротивления материалов усилиям и воздействиям [10–12]. Огромное количество информации, используемой для

конечно-элементного анализа моделей сложных строительных систем, как правило, обрабатывается с применением тяжелых программных комплексов ANSYS, DEFORM, NASTRAN и др. [11; 12]. Задача прогнозирования технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени до настоящего времени не получила полного решения. Так, ведомственная методика определения предельных сроков службы железобетонных пролетных строений транспортных сооружений основывается на данных статистических подходов [13]. В работе [14] констатируется, что диагностика и продление срока службы стальных конструкций зданий и сооружений представляет собой сложную проблему, имеющую в настоящее время лишь частные решения. Важной особенностью технической диагностики элементов стальных конструкций является определение их реального НДС [15; 16]. А это предполагает, что техническое диагностирование объекта следует выполнять при нагрузках, равных рабочим или близким к ним.

Исходя из вышеизложенного и учитывая опыт работ по техническому диагностированию [3; 10; 11; 16, 17] можно составить принципиальную схему решения основных задач технической диагностики, например, стальных строительных систем (рис. В.1). Анализ состояния системы, выявление ее слабых звеньев охватывают блоки 2–5. Выявить группы опасности отдельных стальных конструктивных форм можно по данным статистического анализа повреждений и аварий стальных строительных конструкций [17]. Слабые места растянутых стальных строительных конструкций, в которых наиболее часто возникают трещины, показаны на рисунке В.2. Такие опасные конструктивные формы выявлены на основании статистического анализа многочисленных аварий стальных сооружений [17]. Они могут быть детализированы на основании экспериментальных исследований (блок 3), проанализированы аналитически или с использованием конечно-элементного расчета (блок 4). Изложенная последовательность действий приведет к объективному выявлению конструктивных форм (блоков), подлежащих дальнейшему инструментальному

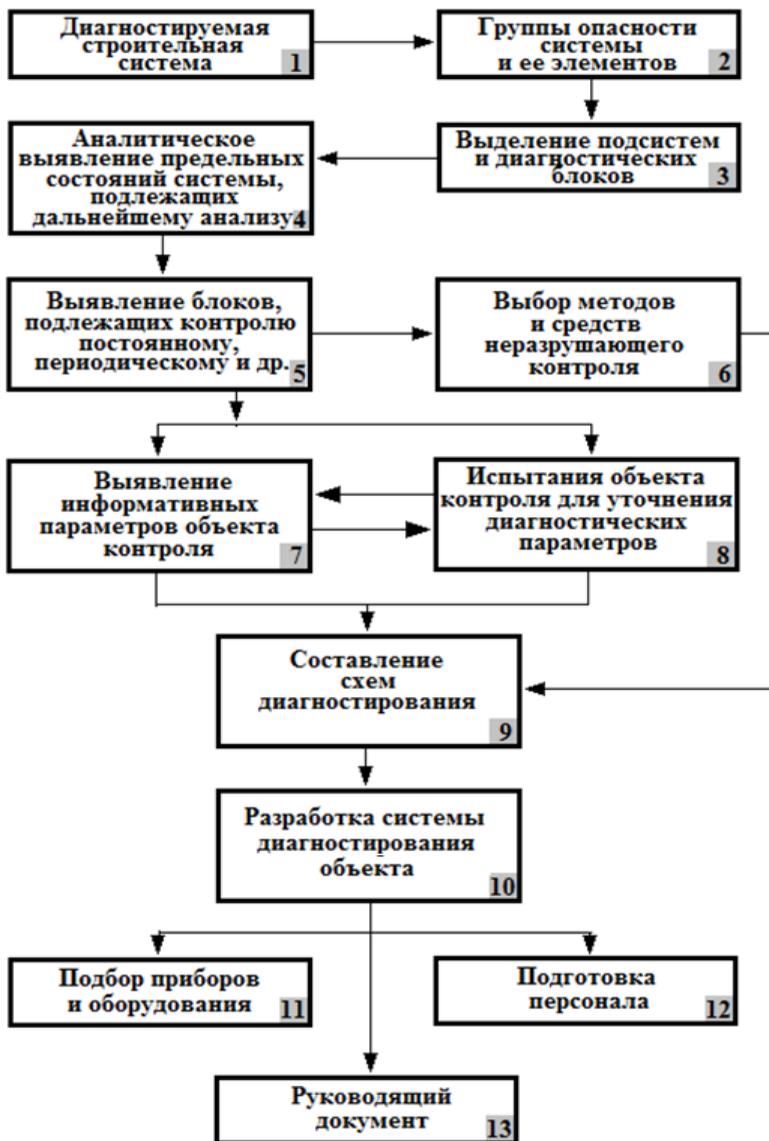


Рисунок В.1 – Принципиальная схема решения задач технической диагностики стальных строительных систем

Трещиноопасные зоны в растянутых элементах стальных конструкций

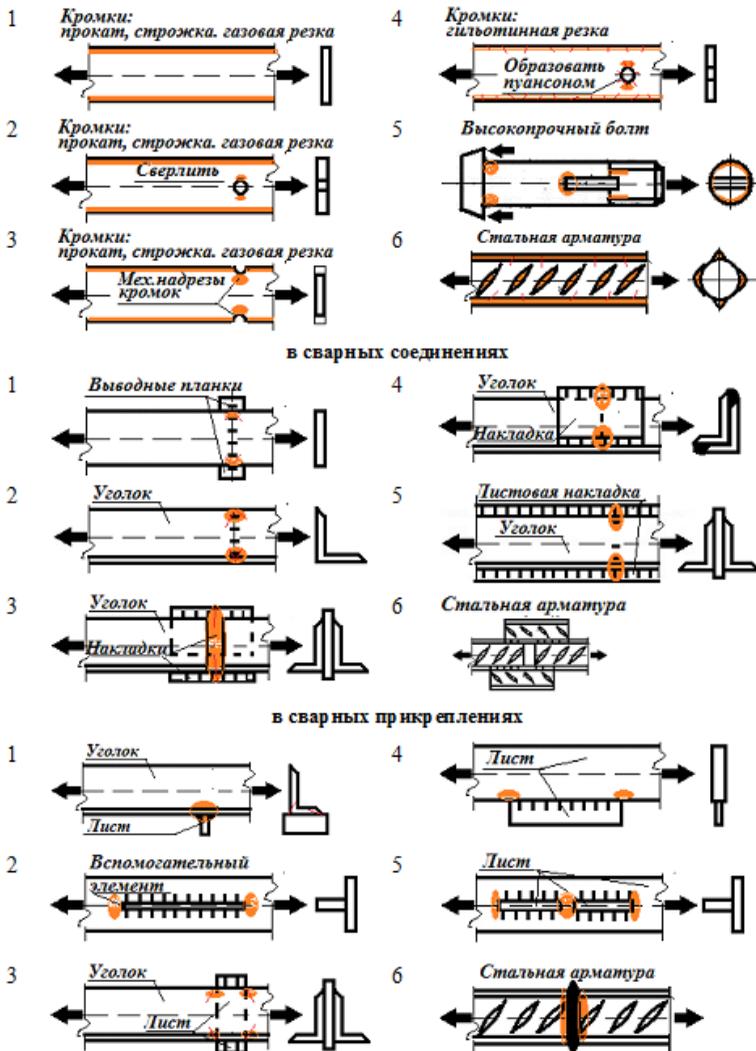


Рисунок В.2 – Места возникновения трещин в элементах стальных конструкций (по данным анализа аварий сооружений)

контролю (блок 5). Решению последующей задачи по выбору методов и средств неразрушающего контроля (блок 6) должно предшествовать (или выполняться параллельно) установление диагностических параметров объекта. Решение этой задачи предусматривают блоки 7 и 8. При этом выявление параметров (блок 7) возможно расчетными методами, на основании литературных данных, а испытания конструктивных форм (объектов контроля) позволят удостовериться в эффективности выбранных диагностических параметров, определить системность контроля, информативность, возможность контроля несколькими методами, определить экономические параметры контроля (блок 8). Блоки 9–13 отражают организационно-техническую часть процесса диагностирования.

Стальные конструкции, методы их контроля в процессе изготовления и эксплуатации должны соответствовать требованиям действующих нормативных документов. Технология контроля определяется проектной документацией и обычно назначается не сплошной, а выборочной. При такой технологии контроля невозможно выявить все возникшие в конструкции дефекты и проследить их развитие. С другой стороны, такая ситуация подтверждает необходимость исследования новых диагностических параметров (тепловых и других) зарождения и развития разрушения в стальных конструкциях [1–3; 10; 16; 18, 19].

Для решения обозначенных выше проблем перспективными могут быть **тепловые активные и пассивные неразрушающие методы**, в которых для контроля используются параметры, монотонно связанные с изменением напряженно-деформированного состояния при различных стадиях работы материала, сопровождающихся развитием трещинообразования в материале конструкций. Тепловые методы используют контактные и бесконтактные первичные преобразователи, позволяя вести наблюдения и измерения в режиме удаленного доступа. Кроме того, тепловой контроль позволяет получать информацию о макроструктуре материала, его дефектах на основе регистрации температурных полей, выявлении тепловых контрастов и аномалий, изменении плотности тепловых потоков. **Активные тепловые методы** применяются в тех случаях, когда

при функционировании объекта контроля в нем не возникают внутренние тепловые источники. Работоспособность стальных элементов при возрастающей или убывающей во времени квазистатической, переменной или динамической нагрузке и при возникновении в них внутренних тепловых источников исследуют **пассивными тепловыми методами**. Эти методы используют в качестве информативных параметров физические поля, характеризующие собственную (внутреннюю) энергию материала объекта. На основе пассивного теплового контроля прогнозируют напряженное состояние элементов с использованием вытекающей из термодинамической теории В.Томсона линейной зависимости между мгновенными изменениями температуры тела и напряжениями упругого деформирования. Теория В. Томсона не позволяет прогнозировать поведение конструкционной стали при ее работе в предельной и запредельных стадиях, характеризующихся возникновением пластических деформаций, зарождением и развитием трещин. Процесс охлаждения стали при упругом деформировании сменяется нагревом при появлении пластических деформаций. До недавнего времени тепловая энергия пластических деформаций не рассматривалась в качестве предвестника предельного состояния и разрушения в элементах из-за недостаточной изученности закономерностей теплообразования при деформировании стали на опасных участках элементов, узлов, соединений.

Тепловые методы неразрушающего контроля имеют длительную историю, в которой можно выделить несколько этапов. **Начальные исследования** были направлены на установление взаимосвязи изменения температуры материала при упругом растяжении–сжатии образцов с его механическими характеристиками (В. Вебер, Г. Вертгейм, Дж. Джоуль, Э. Эдлунд, В. Томсон, А. Надаи, А. Н. Динник, С. И. Дружинин).

В работах последующего периода исследуется физико-химическая природа теплообразования и деформирования конструкционных материалов (М. Адамс, З. Басински, Ц. Зенер, О. В. Клявин, А. Коттрел, Дж. Кристиан, О. П. Максимкин, Дж. Николас, В. Е. Панин, А. В. Степанов, А. С. Тихонов и др.), приложения деформационного нагрева к различным процессам

обработки сталей и сплавов (Н. Н. Савин, Н. Н. Давиденков, С. И. Губкин, А. Н. Резников, М. А. Зайков, В. Ф. Радзивончик и др.). Наиболее распространенными в исследованиях температурных полей образцов были контактные термопреобразователи (термопары, термосопротивления) и соответствующая измерительная аппаратура. С конца 60-х гг. для фиксации температурных полей материалов начинают применяться тепловизоры и жидкие кристаллы. **В современных исследованиях** заметен интерес к теплообразованию в конструкционных материалах как предвестнику деформирования и разрушения, использованию инфракрасной термографии при пассивном тепловом контроле и диагностике работоспособности изделий, конструкций и сооружений, технологических процессов (Е. В. Абрамова, Н. И. Базалеев, О. Н. Будадин, В. П. Вавилов, В. В. Клюев, А. В. Ковалев, В. И. Колганов, В. В. Котельников, Г. А. Куриленко, В. П. Ларионов, О. Б. Наймарк, Д. А. Нестерук, О. А. Плехов, В. Н. Пустовой, В.Е. Реморов, В. А. Стороженко, С. Д. Шафрай, М. И. Щербак и др.). Аналогичные работы проводятся и за рубежом (P. Broberg, A. Chrysochoos, L. Horvath, M. P. Luong, X. Maldague, G. A. Maugin, W. Oliferuk, H. Pasternak, E. Pieczynska, G. Riegert, D. Rittel, P. Rosakis, K. F. Stärk, A. Timofiejczuk, T. Uhl, A. A. Wells и др.). В работах ряда авторов рассматриваются перспективы дальнейших разработок в диагностике работоспособности и остаточного ресурса конструкций, неразрушающем контроле изделий и оборудования (В. Л. Венгринович, А. И. Голоднов, А. А. Дубов, К. И. Ерёмин, Н. Н. Коновалов, Б. Е. Патон и др.).

Расширению области применения тепловых методов контроля способствуют и дистанционные системы съема, хранения и передачи данных, встроенные датчики, приспособленность к работам на высоте, минимальные требования к качеству поверхности. Новые перспективы для расширения области применения тепловых методов предоставляет переход от традиционных методов контроля к технологиям технической диагностики пассивными методами, использующими собственную энергию металла объекта контроля в качестве информативных параметров и к

использованию комплексных методов неразрушающего контроля.

В связи с вышеизложенным в разделах 1-3 монографии рассмотрены физические основы теплового состояния тел, основы видения объектов, принципы и организация технического зрения, механизмы функционирования живого и неживого зрения и тенденции его развития. Подробно рассмотрена природа и средства теплового видения объектов как одного из направлений технического зрения и диагностики изделий, физические основы и особенности строения приборов и технологий их применения, возможные погрешности тепловых дистанционных измерений.

В разделе 4 рассмотрены измерения полей поверхностных температур элементов конструкций методом инфракрасной термографии и их применения для диагностики состояния стальных конструкций.

В 5-ом разделе исследованы приложения тепловых методов для неразрушающего контроля и диагностики стальных пролетных строений мостов, тоннелей, машин и механизмов.

Монография предназначена для студентов, магистрантов, изучающих и использующих контактные и бесконтактные тепловые измерения при исследованиях и испытаниях, а также для аспирантов, научных работников и специалистов различных специальностей, интересующихся методами и средствами систем технического зрения, неразрушающего теплового контроля конструкций и технической диагностики сооружений и машин.

РАЗДЕЛ 1. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТОВ

Слово «температура» (от лат. *temperatura* – надлежащее смешение, нормальное состояние) возникло в те времена, когда ученые считали, что в более нагретых телах содержится большее количество **теплорода**, чем в менее нагретых [20]. По распространенным в XVIII — начале XIX века воззрениям, невесомый флюид (теплорód), присутствовал в каждом теле и являлся причиной тепловых явлений.

Как физическая величина «температура» в современной физике рассматривается с разных позиций [21; 22]. В молекулярно-кинетической теории показывается, что температура – это величина, пропорциональная средней кинетической энергии частиц системы (кинетическая температура). В термодинамике она выражается через термодинамические понятия. В других разделах физики вводятся определения температуры, вытекающие из природы рассматриваемых явлений. Так, в статистическом методе описания физических систем, содержащих большое число невзаимодействующих частиц, движущихся по законам классической механики, температура определяет распределение частиц системы по уровням энергии (статистика Максвелла – Больцмана). В теории ионизации М.Саха температура связывается со степенью ионизации вещества (температура возбуждения). В формуле М.Планка температура находится во взаимосвязи со спектральной плотностью излучения. Закон Стефана – Больцмана связывает температуру с полной объёмной плотностью излучения абсолютно чёрного тела (радиационная температура) [23].

О температуре на практике судят по изменению соответствующих физических свойств исследуемых тел (объёма, давления, электрического сопротивления, ЭДС, интенсивности излучения и др.) однозначно с ней связанных (так называемых термометрических свойств). Количественное значение температуры определяется с помощью приборов (термометров), которыми в выбранной температурной шкале измеряется **эмпирическая температура** [24–27].

Возможность измерения температуры следует из взаимосвязи между определенными и точно воспроизводимыми тепловыми состояниями и приписанными им числовыми значениями. Для практического определения значения температуры произвольного тела необходимо выбрать **эталон** (фр.étalon – средство измерений) **температуры**, то есть тело, которое при фиксированных, равновесных и легко воспроизводимых, условиях имело бы определённое значение температуры. Это значение температуры является **реперной точкой** соответствующей **шкалы температур – упорядоченной последовательности значений температуры**, позволяющей количественно определять температуру того или иного тела. По температурной шкале можно косвенным образом определять температуру тела путем прямого измерения какого-либо его физического параметра, зависящего от температуры.

В температурной шкале Исаака **Ньютона** (1701г.) в качестве термометрической жидкости Ньютон использовалось льняное масло. За ноль градусов И.Ньютон принял температуру замерзания пресной воды, а температуру человеческого тела – за 12 градусов. В шкале Ньютона температура кипения воды равна 33 градусам.

Наиболее часто для создания шкалы температур используются свойства воды. **Точки таяния льда и кипения воды при нормальном атмосферном давлении выбраны в качестве реперных точек** в температурных шкалах, предложенных Андерсом **Цельсием** (1701 – 1744), Рене Антуаном Фершо **Реомюром** (1683 – 1757), Даниэлем Габриэлем Фаренгейтом (1686 – 1736). Температурные шкалы Реомюра (**°Re**) и Фаренгейта (**°F**) применяются до сих пор в США, Великобритании и некоторых других странах. В температурной шкале Цельсия температурный интервал между температурами таяния льда и кипения воды **при нормальном давлении (1 атм или 101 325 Па)** разделен на сто равных частей (градусов Цельсия). В шкале Цельсия температура таяния льда принимается равной **0°С**, а температура кипения воды становится приблизительно равной **99,975 °С**.

Создать **единую температурную шкалу**, не связанную с термометрическими свойствами конкретных веществ и

пригодную в широком интервале температур, можно с использованием второго закона термодинамики [21]. Такая шкала предложена в середине прошлого века и получила название **термодинамической температурной шкалы**. Единицей измерения температуры в этой температурной шкале является один кельвин (1 К), одна из семи основных единиц в системе СИ. Эта единица названа в честь английского физика Уильяма **Томсона** (лорда **Кельвина**) (1824 – 1907), который разрабатывал эту шкалу и сохранил величину единицы измерения температуры такой же, как и в температурной шкале Цельсия.

В основу построения термодинамической температурной шкалы положены следующие представления (рис. 1.1).

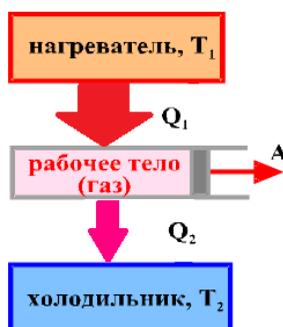


Рисунок 1.1 – К построению термодинамической температурной шкалы

Если в обратимом цикле Карно тело, совершающее цикл, поглощает теплоту Q_1 при температуре T_1 и отдает тепло Q_2 при температуре T_2 , то отношение термодинамических (абсолютных) температур T_1/T_2 равно отношению соответствующих количеств тепла Q_1/Q_2 . Численное значение этого отношения не зависит от свойств рабочего тела. Таким образом, для сравнения температур двух тел необходимо осуществить над рабочим телом обратимый цикл Карно, в котором одно тело используется в качестве нагревателя, другое – холодильника (рис. 1.1).

Отношение температур тел равно отношению отданного в этом цикле количества теплоты к полученному. Согласно теореме Карно химический состав рабочего тела не влияет на

результаты сравнения температур, поэтому такая термодинамическая шкала не связана со свойствами какого-то определённого термодинамического тела. Для цикла Карно можем записать

$$\eta = (Q_1 - Q_2)/Q_1 = (T_1 - T_2)/T_1, \quad (1.1)$$

или

$$\eta = 1 - Q_2 / Q_1 = 1 - T_2/T_1. \quad (1.2)$$

Из (1.2) следует

$$Q_2/Q_1 = T_2/T_1 \text{ и } T_2 = T_1 (Q_2/Q_1). \quad (1.3)$$

Таким образом, если измерить Q_1 и Q_2 , то можно найти отношение температур по выражению (1.3) и, соответственно, построить температурную шкалу. Однако создать такой обратимый цикл и провести точные непосредственные измерения Q_1 и Q_2 практически невозможно.

Единицей измерения температуры в термодинамической температурной шкале принят градус Кельвина, который равен $1/273,16$ части интервала между температурой тройной точки воды (температуры равновесного состояния водяного пара, жидкой воды и льда) и абсолютным нулем температуры (самой низкой возможной температуры в природе).

Соотношения температур в разных температурных шкалах определяются выражением (1.4)

$$^{\circ}C = K - 273,16 = \frac{5}{9} (^{\circ}F - 32) = \frac{100}{33} ^{\circ}N = \frac{5}{4} ^{\circ}R, \quad (1.4)$$

где C, F, N, R – условные обозначения температурных шкал, соответственно, Цельсия, Фаренгейта, Ньютона, Реомюра.

Термодинамическая температурная шкала, являющаяся чисто теоретической, не дает путей ее прямого практического использования. Реализовать на практике термодинамическую температурную шкалу возможно после установления ее связи с реальными приборами для измерения температур. В качестве таких приборов можно использовать газовые термометры, показания которых можно связать с термодинамической температурной шкалой посредством введения понятия шкалы идеального газа. Термодинамическая шкала совпадает со шкалой идеального газа, если принять при нормальном

атмосферном давлении точку таяния льда за 0, а точку кипения воды за 100. Этой шкале было присвоено название стогоградусной термодинамической температурной шкалы. Поскольку свойства реальных газов в широком интервале температур сравнительно мало отличаются от свойств идеального газа, поэтому, зная отступления конкретного газа (термометрического вещества) от законов идеального газа, можно ввести поправки на отклонения газового термометра от термодинамической стогоградусной температурной шкалы. Поэтому для получения температурной шкалы, не зависящей от свойств термометрического вещества, необходимо знать поправки к показаниям газовых термометров, для вычисления которых пользуются зависимостями, вытекающими из второго закона термодинамики. Эти поправки относительно невелики и лежат в пределах от 0,001 до 0,5°C [21].

Однако газовые термометры могут быть использованы для воспроизведения термодинамической стогоградусной температурной шкалы только до температур не выше 1200°C, что не может удовлетворить современные требования науки и техники [24]. Использование же газовых термометров для более высоких температур встречает большие технические трудности, которые в настоящее время непреодолимы. Кроме того, газовые термометры являются довольно громоздкими и сложными приборами и для повседневных практических целей весьма неудобны. Вследствие этого для более удобного воспроизведения термодинамической стогоградусной температурной шкалы в 1927г. была принята практическая шкала, которая была названа **Международной температурной шкалой** 1927г. (МТШ–27). Основу МТШ–27 составляют температуры реперных точек (фазовых переходов чистых веществ), определенные методами первичной термометрии. В данных точках градуируются практические термометры (например, термометры сопротивления), которые затем и служат для измерения температуры и передачи размера единицы температуры. С 1927 г. шкала несколько раз переопределялась (МТШ–48, МПТШ–68, МТШ–90): менялись реперные температуры, методы интерполяции, но принцип остался тот же – основой шкалы является набор фазовых переходов чистых

веществ с определенными значениями термодинамических температур и интерполяционные приборы, градуированные в этих точках.

В 1954г. X Генеральная конференция по мерам и весам установила термодинамическую температурную шкалу с одной реперной точкой – тройной точкой воды, температура которой принята 273,16 К (точно), что соответствует 0,01°С. По шкале Цельсия абсолютному нулю соответствует температура – 273,15°С. В МПТШ–68 различают международную практическую температуру Кельвина (символ T_{68}) и международную практическую температуру Цельсия (символ t_{68}). Соотношение между T_{68} и t_{68} [24]: $t_{68} = T_{68} - 273,15$ К.

Температура, определённая по МПТШ–68, в пределах современной точности измерений совпадает с температурой по термодинамической температурной шкале, принятой в физике за основную. Международная температурная шкала (МТШ–90) введена в соответствии с решением XVIII Генеральной конференции по мерам и весам. МТШ–90 по сути является практической температурной шкалой и заменяет собой предыдущую Международную практическую температурную шкалу МПТШ–68. Основные изменения в шкале связаны с изменением температур реперных точек, расширением диапазона определения шкалы, введением новых интерполяционных приборов и новых методик построения интерполяционных зависимостей для платиновых термометров сопротивления. Шкала считается очень близко аппроксимирующей термодинамическую шкалу температур, поэтому слово «практическая» было опущено в ее названии [24].

На практике измерения температуры производится приборами различных типов, прошедшими государственную метрологическую поверку [25 – 31]. Их классификация в зависимости от термометрических свойств приведена на рис.1.2. Измерение температуры любым из методов (рис.1.2) выполняется косвенно.



Рисунок 1.2 – Классификация средств измерения температуры

Значение определяемой приборами температуры находится по результатам прямых измерений другой физической величины (теплового расширения, изменения давления, электрического сопротивления, термоэлектрического эффекта, теплового излучения и других термометрических свойств). При этом процесс измерения может производиться как контактным, так и бесконтактным (дистанционным) методами.

1.1. Измерение температуры контактными методами

Измерение температуры контактными методами предполагает наличие надежного контакта с предметом, у которого снимается температура. При таком контакте пределы измеряемой температуры определяются механическими (жаропрочность) и химическими свойствами материала, из которого изготовлен чувствительный элемент термометра. Верхний предел измеряемых температур контактными методами поэтому не превышает 2500–3000 °С.

Контактные термометры делятся на термометры расширения, манометрические термометры, термопары и термометры сопротивления [25–28].

Термометр расширения – это прибор, измеряющий температуру объекта, принцип работы которого основан на свойствах тел увеличивать свой объем при нагревании. К термометрам расширения относятся жидкостные, биметаллические и стержневые термометры.

Работа жидкостного термометра (рис.1.3, а) основана на объемном расширении жидкости, заключенной в закрытом стеклянном резервуаре 1. Резервуар соединен с капилляром 2. В процессе нагревания резервуара жидкость, находящаяся в нем, расширяется и поднимается вверх по капилляру. Высота столба жидкости указывает на величину измеренной температуры среды по шкале 3. Чем тоньше капиллярная трубка, тем чувствительнее термометр. В качестве рабочей жидкости жидкостного термометра служат ртуть или спирт.

Достоинством жидкостных термометров является их простота и дешевизна изготовления при удовлетворительной точности. К недостаткам следует отнести неудобство отсчета, запаздывание показаний вследствие большой тепловой инерции, отсутствие возможности автоматической регистрации и передачи показаний на расстоянии, малая точность.

Стержневые (дилатометрические) термометры являются средствами измерения, работа которых заключается в преобразовании изменения температуры исследуемой среды в разность удлинений двух твердых тел, вызванную различием их коэффициентов температурного расширения. Диапазон измерения таких термометров составляет от минус 30 до 1000°С, с относительной погрешностью 1,5...2,5 %.

Принцип работы стержневого термометра, приведенного на рис. 1.3, б, основан на разности удлинения трубки и стержня. Трубку изготавливают из материала с малым коэффициентом линейного расширения (кварц, инвар и пр.), а стержень – с большим (алюминий, латунь, медь, сталь и др.). Стержень располагается внутри трубки, один его конец жестко скреплен с дном трубки. Трубка и стержень при нагреве удлиняются на разную величину. Измерение разности этих удлинений характеризует температуру нагрева, которая визуализируется на шкале измерительного прибора измерительной стрелкой.

Принцип работы **биметаллических термометров** основан на свойстве его биметаллических (т.е. изготовленных из двух материалов с разными температурными коэффициентами расширения) пластин, спиралей и пружин изгибаться, раскручиваться и скручиваться при изменении температуры среды (рис.1.3, в).

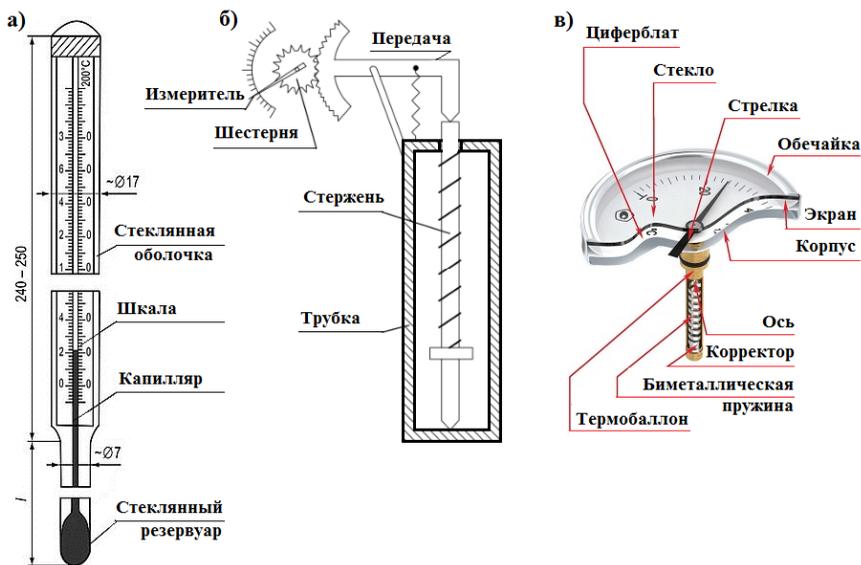


Рисунок 1.3 – Конструктивные схемы контактных термометров

Диапазон измерений биметаллических термометров составляет от минус 100 до 600 °С с относительной погрешностью 1...3 %. Биметаллические и стержневые термометры применяются в качестве сигнализаторов и регуляторов температуры, а не для визуализации показаний температуры среды.

Принцип работы **манометрических термометров** основан на использовании зависимости между температурой и давлением рабочего вещества в замкнутой герметической системе.

Схема устройства и внешний вид показывающего манометрического термометра представлена на рис.1.4. Термосистема прибора состоит из термобаллона, погружаемого

в среду, температура которой измеряется, капилляра и манометрической пружины. Один конец пружины впаян в держатель, канал которого соединяет полость манометрической пружины через капилляр с термобаллоном. Другой конец пружины герметизирован и соединен с сектором с помощью поводка. Сектор соединен с трибкой, на оси которой находится указательная стрелка. В передаточном механизме установлена спираль, предназначенная для выбора зазора, конец внутреннего витка которой закреплен на оси трибки.

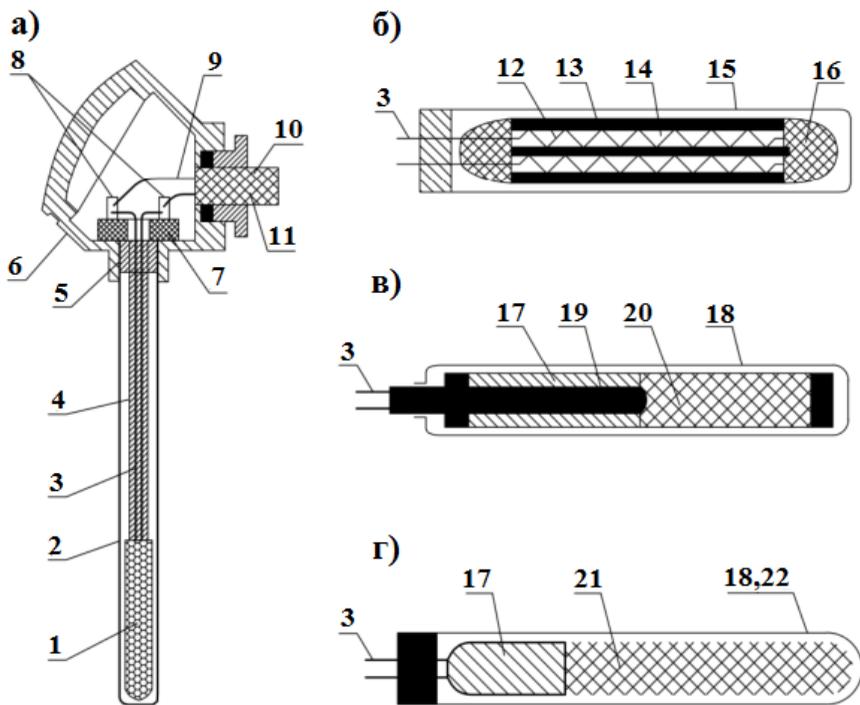


Рисунок 1.4 – Схема манометрического термометра

При нагревании термобаллона в замкнутой герметизированной системе увеличивается давление газа, в результате чего пружина раскручивается и её свободный конец получает перемещение. Движение свободного конца пружины преобразуется передаточным механизмом в перемещение стрелочного указателя относительно шкалы прибора. Изменяющееся положение указателя на шкале термометра указывает на значение текущей температуры среды. Манометрические термометры в зависимости от агрегатного состояния рабочего вещества, применяемого в термосистеме, подразделяются на газовые, конденсационные (парожидкостные) и жидкостные.

Из контактных методов наибольшее распространение получили **термоэлектрический и терморезистивный**, к достоинствам которых относятся их простота, надёжность, низкая стоимость и возможность получения достаточно высокой точности измерений. Кроме того, на их основе можно легко создать многоканальные измерительные системы для непрерывного измерения в режиме мониторинга параметров температурного поля сложных объектов, в том числе при высоких давлениях и в труднодоступных местах.

Терморезистивные термометры по используемому материалу разделяют на металлические и полупроводниковые [25 – 27]. Принцип действия таких термометров основан на измерении электрического сопротивления при варьировании температуры. Схема устройства термопреобразователя представлена на рис.1.5, а. Чувствительный элемент *I* погружается в исследуемую среду, после чего измеряется его величина сопротивления. Результаты измерений сопротивления чувствительного элемента передаются через выводы 3 к кабелю 10, который присоединяется к вторичному устройству. Устройство предназначено для записи и визуализации численных значений измеренной температуры, определяемых по функциональной зависимости $R_t = f(t)$. Чувствительный элемент представляет собой резистор, выполненный из металлической проволоки или пленки, с выводами для крепления соединительных проводов. Для изготовления чувствительных элементов термопреобразователей сопротивления используют платину, медь и никель. Наиболее распространены чувствительные элементы из меди и платины. Особенности конструкции таких элементов в зависимости от изготавливаемого материала представлены на рис. 1.5б, в, г [29]. Для измерения температур в диапазоне от минус 200 до 850 °С применяются платиновые термометры сопротивления; от минус 200 до 200 °С – медные; от минус 60 до 180 °С – никелевые. В отдельных случаях термометры сопротивления используют для измерения температур до 1000 °С.



а)–общая схема; б)–чувствительный элемент термопреобразователя платинового; в)–то же медного термопреобразователя с каркасной обмоткой; г) – то же медного термопреобразователя с бескаркасной обмоткой; 1 – чувствительный элемент; 2 – защитная арматура; 3 – выводы; 4 – изоляция; 5 – герметик; 6 – головка; 7 – клеммная сборка; 8 – зажимы; 9 – жилы кабеля; 10 – кабель; 11 – гайка; 12 – платиновая спираль; 13 – керамический каркас; 14 – изоляционный порошок; 15 – металлическая оболочка; 16 – глазурь; 17 – намотка; 18 – защитная оболочка; 19 – каркас; 20 – слой лака; 21 – фторопластовая оболочка; 22 – изолирующий порошок
Рисунок 1.5 – Конструктивная схема термопреобразователя сопротивления

Разновидностью термометров сопротивления являются **термисторы**, выполненные на основе смешанных оксидов переходных металлов. Два основных типа термисторов – NTC (с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления) и PTC (с положительным коэффициентом). Наиболее распространенный тип – NTC. PTC термисторы используются только в очень узких диапазонах температур, в несколько

градусов, в основном в системах сигнализации и контроля. Большим преимуществом термисторов является разнообразие форм и миниатюрность. Основные конструктивные типы: бусиновые (0,1–1 мм), дисковые (2,5–18 мм), цилиндрические (3–40 мм), пленочное покрытие (толщина 0,2–1 мм). Выпускаются бусиновые термисторы диаметром до 0,07 мм с выводами толщиной 0,01 мм. Такие миниатюрные датчики позволяют измерять температуру даже внутри кровеносных сосудов или растительных клеток. Термисторы представляют особый интерес для измерения низких температур благодаря своей относительной нечувствительности к магнитным полям. Некоторые типы термисторов могут применяться до температуры минус 100 °С. Диапазон наилучшей стабильности термисторов – от 0 до 100 °С. Термисторы характеризуются вибропрочностью, малыми размерами, малой инерционностью и невысокой стоимостью.

Термоэлектрические преобразователи являются одними из самых распространенных средств измерения температуры наряду с термопреобразователями сопротивления. Принцип их действия основан на эффекте термоэлектричества, который в 1821г. обнаружил немецкий ученый Т. Й. Зеебек (1770–1831). Суть эффекта состоит в том, что если спай двух разнородных металлов, образующих замкнутую электрическую цепь, имеют неодинаковую температуру, то в цепи возникает электрический ток. Принципиальная схема термопары, состоящей из двух разнородных проводников, приведена на рис. 1.6. В качестве проводников 2–3 часто используют следующие пары металлов: родий–платина, медь–константан, хромель–константан, хромель–копель, медь–копель, рений–вольфрам. Соединение (спай, скрутка) проводников Т1 (рабочий спай) при измерениях располагается в рабочей зоне исследуемого объекта, а другие два конца Т2 (свободные) проводников подключаются в измерительную цепь или непосредственно к измерительному прибору. Температура свободных концов Т2 должна быть заранее известна. Поэтому свободные концы размещают в термостате. При отсутствии термостатирования свободных концов в результаты измерений вносят поправку на температуру

окружающей среды. К измерительному прибору 1 термопару подключают по схемам рис.1.6, а или 1.6, б.

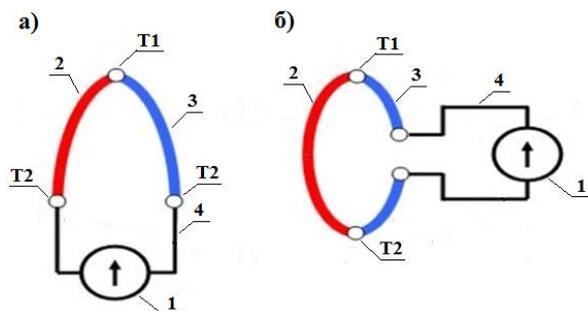


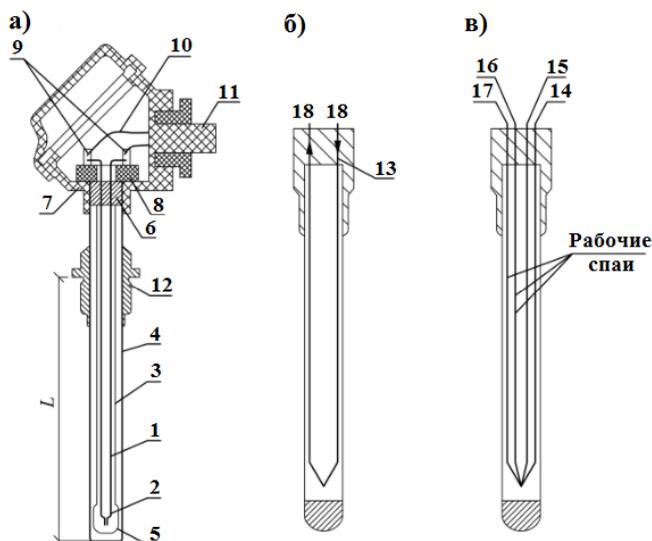
Рисунок 1.6 – Термопары и схемы их подключения

Термопара образует устройство (или его часть), использующее термоэлектрический эффект для измерения температуры. Термоэлектрические преобразователи подразделяются на термопреобразователи общепромышленного и специального назначения. На рис. 1.7, а [29] представлена схема устройства термоэлектрических преобразователей общепромышленного назначения. Электроды 1 термопреобразователя выполняют из проволоки, обеспечивающей пренебрежимо малое сопротивление термопары и достаточную механическую прочность. Для изоляции термоэлектродов используются кварцевые или фарфоровые трубки 3. Рабочий спай 2 защищается механическим наконечником 5. Защитная арматура 4 присоединяется к головке 7, в которой располагается сборка 8 и зажимы 9. К зажимам 9 подводятся электроды термопары с одной стороны и термоэлектродные удлиняющие провода 10 через герметизированный ввод 11.

В современной термометрии разрабатываются и другие технологии измерения температуры контактным методом, например, на основе кварцевых [28], волоконно-оптических датчиков температуры [29]. Для измерения низких температур от 0,01 до 30 К с погрешностью от 1 до 5% используются термомагнитные преобразователи [25; 26]. В интервале от 0,001

до 2500 К для измерения температур используется термошумовой метод [25].

Достоинства и недостатки контактных методов измерения температуры. К достоинствам контактных методов измерений можно отнести их широкий температурный диапазон, простоту, надежность, работу в любых средах и возможность получения малых погрешностей измерений температуры чувствительного элемента.



а) – общая схема; б) – однозонный термоэлектрический преобразователь; в) – многозонный термоэлектрический преобразователь; 1 – электроды; 2 – рабочий пай; 3 – трубка; 4 – защитная арматура; 5 – керамический наконечник; 6 – заливка; 7 – головка; 8 – сборка; 9 – зажимы; 10 – удлиняющий провод; 11 – герметизированный ввод; 12 – элементы крепления; 13 – герметик; 14, 15, 16, 17, 18 – жилы кабельного преобразователя

Рисунок 1.7 – Термоэлектрический преобразователь

Главной особенностью таких методов и средств является то, что они преобразуют в сигнал измерительную информацию термометрического свойства термопреобразователя, а не объекта исследования, т.е. измеряют температуру, которая отлична от температуры объекта. Этим методам присуща инерционность, изменяющаяся от долей секунды до десятков секунд [25],

осредненное измерение температуры в области расположения термопреобразователя. Для контактных методов также характерны погрешности, обусловленные взаимодействием объекта и средства измерения, недостаточным тепловым контактом между преобразователем и объектом исследования, теплообменным излучением между термопреобразователем и окружающими его телами, паразитным теплообменом между объектом и окружающей средой за счёт теплопроводности термопреобразователя, собственным потреблением тепловой энергии преобразователем при помещении его в среду измерения и другие недостатки.

1.2. Дистанционные методы теплового контроля и измерения температуры

При любой температуре, отличной от абсолютного нуля, все физические объекты излучают электромагнитную энергию. Это излучение генерируется хаотическим движением заряженных частиц. Излучение энергии происходит в широком спектре частот (длин волн). При температурах, близких к условиям обитания людей, таких, как температура земной поверхности или температура окружающих предметов, основная доля излучения происходит в инфракрасной области (рис.1.8).

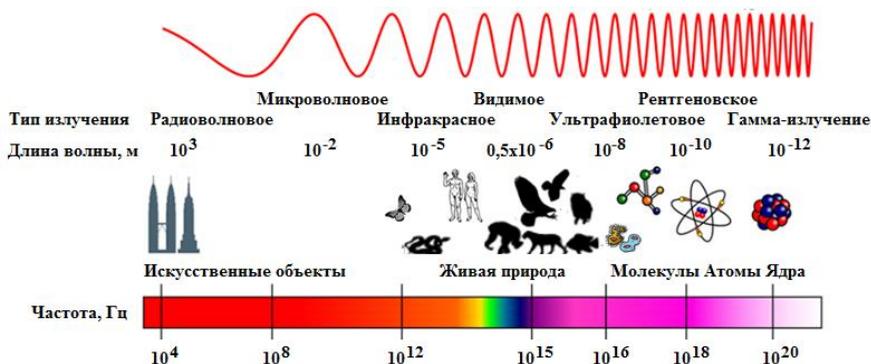


Рисунок 1.8 – Шкала электромагнитных волн

Распределение теплового излучения по спектру длин волн (или частот) зависит от температуры тела и природы вещества объектов. Дистанционная фиксация температуры может осуществляться благодаря инфракрасному излучению нагретых тел, которое можно фиксировать (визуализировать) приборами (пирометрами), чувствительными к инфракрасному излучению (рис.1.9).

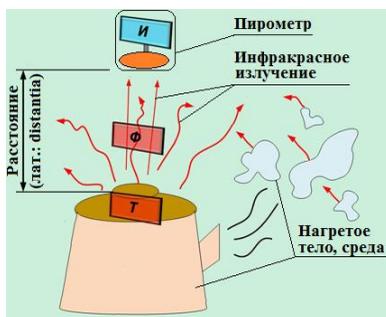


Рисунок 1.9 – Принципиальная схема дистанционной фиксации температуры объекта по инфракрасному излучению

Инфракрасное излучение занимает на шкале электромагнитных волн спектральную область между концом красного цвета видимой части спектра (с длиной волны равной 0,74 мм) и коротковолновым радиоизлучением (длина волны равная 1–2 мм). Для удобства инфракрасную область спектра условно разделяют на отдельные участки: ближнее ИК излучение (0,76–1,5 мкм), коротковолновое (1,5–5,5 мкм), длинноволновое (5,6–25 мкм) и дальнее (25–1000 мкм) [32].

На рис.1.8 схематически показано, что развитие органов зрения в живой природе происходило в интервале шкалы электромагнитных колебаний от 10^{12} Гц до 10^{16} Гц. При этом часть живых организмов имеют органы зрения в инфракрасном диапазоне шкалы электромагнитных колебаний (гремучие, ямкоголовые, ложноногие змеи, удавы, питоны, некоторые рыбы (черный малакост, пираньи, караси), другие – в видимом и ультразвуковом [33]. Инженеры и ученые, работающие в области создания и исследования сенсоров (англ. sensor – чувство; ощущение) зрения активно используют в своих

разработках зрительные системы, созданные природой в процессе эволюции. Первые системы технического (машинного, компьютерного) зрения (СТЗ), нашедшие применение в средствах робототехники, копировали органы зрения живых организмов, развиваясь в такой последовательности: черно-белые монокулярные СТЗ, цветные, стереоскопические и многоракурсные с различными вариантами аппаратной реализации. Современные СТЗ находят своё применение в космических, авиационных, наземных, надводных и подводных мобильных средствах, т.е. там, где необходим анализ внешней обстановки в режиме реального времени. Бурное развитие современных технологий в микроэлектронике привело к созданию миниатюрных и энергетически экономичных линейных и матричных приемников оптического излучения. Обладающие высокой чувствительностью и достаточно высоким уровнем пространственного и цветового разрешения (в том числе в инфракрасной области спектра), СТЗ, построенные на базе твёрдотельных датчиков видеoinформации, служат незаменимыми источниками информации при создании мобильных систем с супервизорным управлением [34].

Чтобы понять основные принципы дистанционного восприятия и оценки информации с использованием электромагнитного излучения кратко ознакомимся с восприятием зрительной информации глазом человека [35]. Человеческий глаз – сложный орган, служащий для восприятия световых раздражений (рис.1.10). Снаружи глаз покрыт **склерой** — достаточно прочной внешней белковой оболочкой. Она защищает глаз от повреждений и придает ему постоянную форму. Передняя часть склеры, **роговица**, более выпуклая и прозрачная, действует как собирающая линза с оптической силой +40 диоптрий. Склера обеспечивает до 75 % фокусирующей способности глаза. Ее толщина 0,6 – 1,0 мм, а показатель преломления –1,38.

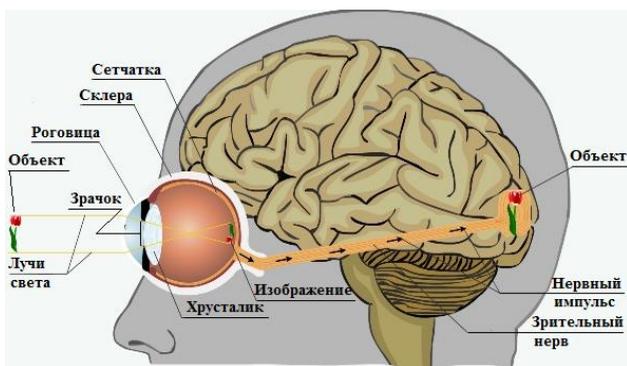


Рисунок 1.10 – Схема формирования человеком зрительного монокулярного объекта

Функционально действие глаза можно разделить на три этапа. **Первый этап** – сбор идущих от объекта лучей света. В передней части глаза располагается круглое отверстие в радужной оболочке (**зрачок**), пропускающее свет. Диаметр зрачка может изменяться от 2 до 8 мм. Радужная оболочка и зрачок играют роль диафрагмы, регулирующей поступление света внутрь глаза. Далее свет попадает на **хрусталик** – природную эластичную двояковыпуклую линзу диаметром 8–10 мм. Хрусталик находится за радужной оболочкой и имеет слоистую структуру с наибольшим показателем преломления 1,41. Хрусталик эластичен, он может менять свою кривизну с помощью специальной мышцы, благодаря которой обеспечивается фокусировка глаза на предметы, удаленные от него на разные расстояния. Это позволяет глазу человека сосредоточиться на объектах, которые либо далеки, либо близки к наблюдателю. За хрусталиком световые лучи проходят через стекловидное тело, заполняющее пространство между хрусталиком и **сетчаткой**. Таким образом, **светопроводящий аппарат глаза** образован роговицей, жидкостью передней камеры, хрусталиком и стекловидным телом. Первые три элемента подобны собирающим линзам, а последний – рассеивающей. Глаз – центрированная оптическая система, главная оптическая ось которой проходит через центры роговицы, зрачка, хрусталика. **Оптическая сила глаза**

складывается из оптических сил всех перечисленных элементов. В системе СИ оптическая сила линзы измеряется в диоптриях. Оптическая сила каждого элемента-линзы глаза – это величина, обратная ее фокусному расстоянию. При полностью расслабленной кольцевой мышце оптическая сила глаза – около +60 диоптрий, а при максимальном напряжении кольцевой мышцы (рассматривании близких предметов) – более 70 диоптрий. Поэтому, глаз приближенно можно рассматривать как тонкую линзу с переменной оптической силой в 60–70 диоптрий. Поскольку рассматриваемый глазом предмет располагается в большинстве случаев за двойным фокусным расстоянием, на сетчатке глаза получается действительное, уменьшенное и перевернутое изображение предмета. **Второй этап** – обработка визуального света. В глубине глаза, в его тыльной части, располагается сетчатка – светочувствительный слой, воспринимающий лучи света и преобразующий их в нервные импульсы. Сетчатка представляет собой «сетчатое» разветвление зрительного нерва с нервными окончаниями в виде палочек и колбочек. Самая чувствительная область сетчатки – это **желтое пятно (макула)** площадью около 3мм². Человек видит ясно те предметы, изображение которых проецируется на желтое пятно. В центре желтого пятна расположена центральная ямка – наиболее чувствительная часть желтого пятна. Это область диаметром примерно полмиллиметра, в которой сетчатка углублена. Здесь палочки совсем отсутствуют, а концентрация колбочек максимальна. **Третий этап** – это процесс стимуляции мозга. Слепое пятно расположено в том месте, где зрительный нерв входит в глаз. Здесь нет ни палочек, ни колбочек, и лучи, попадающие на эту область, не вызывают световых ощущений (отсюда и название «слепое пятно»). После рецептора стимулированный электрический импульс направляется через зрительный нерв к соответствующему визуальному участку коры головного мозга. Видеоинформация в виде пачек частотно модулированных импульсов поступает с каждого глаза через свой зрительный нерв в **многослойные подкорковые структуры** зрительной системы [34]. При этом в зрительную кору правого полушария поступает информация от зрительного поля левого глаза за исключением части этого поля

с края сетчатки со стороны виска. Вместо нее такая же информация поступает от своего глаза. В зрительную кору левого полушария, наоборот, поступает информация от правого глаза и так же частично от левого. Функции подкорковых структур зрительной системы человека заключаются в опознании отдельных объектов внешней среды – их формы, цвета, взаимного расположения, движения. Следующий этап обработки зрительной информации осуществляется в **первичной зрительной коре** головного мозга, имеющей толщину около 2 мм. Она содержит 6 нейронных слоев, через которые проходят колонки сечением примерно 1–2 мм², послонно обрабатывающие информацию с определенных участков зрительного поля, выявляя отрезки прямых линий с оценкой их длины и углового положения, дуги разной крутизны, крестообразные участки и т. п. [34–36]. Дальнейшая обработка зрительной информации является функцией другой структуры головного мозга (**широкой зрительной сферы**). Она включает в каждом полушарии по три функциональных системы: проекционную (в затылочной области мозга), предметного анализа, т. е. узнавания отдельных объектов (в височно-затылочных областях) и анализа пространственных отношений, т.е. целых сцен с несколькими объектами (в теменно-затылочных областях). В правом полушарии эти структуры используют образные представления, а в левом – вербальные (от лат. *verbalis* – словесный; глагольный). При предметном анализе в правом полушарии – это узнавание отдельных предметов, а в левом – букв и т. п. знаков. При пространственном анализе правое полушарие превосходит левое в формировании представлений о целом по его фрагментам, включая восстановление целого при недостатке последних. Необходимым структурным элементом зрительной системы в процессе распознавания образов является **память**, хранящая прототипы и эталоны этих образов и их фрагментов. Это ассоциативная память является образной в правом полушарии и вербальной – в левом.

Глаза человека – это два одинаковых органа зрения, расположенные на некотором расстоянии друг от друга и формирующие единый зрительный образ предмета после

обработки информации в зрительной зоне коры головного мозга (рис. 1.11).

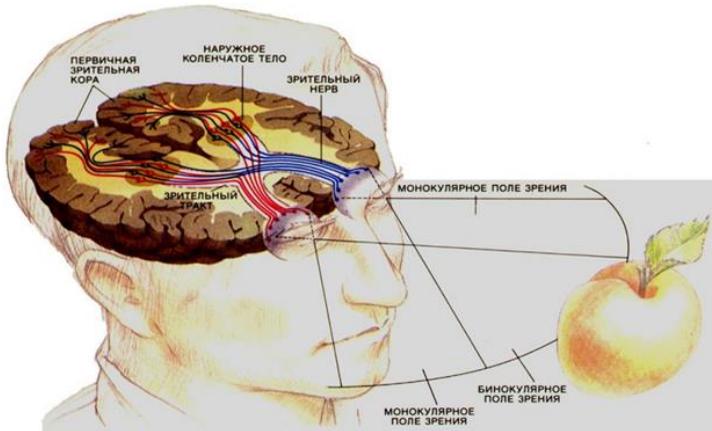


Рисунок 1.11 – Схема формирования человеком бинокулярного зрения

Способность к формированию единого образа из двух монокулярных изображений называется **бинокулярным зрением** (лат. *binī* – два, *oculus* – глаз). Благодаря бинокулярному зрению мы ощущаем три измерения: ширину, высоту, глубину; отличаем предметы близкие от далеких. Один глаз с монокулярным полем зрения неспособен воспринимать глубину и разницу в расстояниях. Механизм восприятия разницы в расстояниях заключается в следующем. Когда мы фокусируем взгляд на какой-либо точке, глазные яблоки поворачиваются так, чтобы на нее были направлены зрительные оси обоих глаз. Чем ближе к глазам находится точка, тем больше угол сведения осей и тем больше напряжение глазных мышц. Величина этого напряжения и является тем признаком, по которому мозг оценивает удаленность предметов. Оба глаза человека работают как согласованная система, формируя единый зрительный образ видимого предмета из изображений, формирующихся в каждом глазу.

Краткое рассмотрение зрительной сенсорной системы человека позволило убедиться в ее сложности, эффективности, компактности и множестве белых пятен в ее познании [34–36].

Вместе с тем основные структурные элементы этой системы можно представить схемой рис. 1.12. Полезно сопоставить структурную схему рис. 1.12 с соответствующими схемами, отображающими работу большинства современных систем технического зрения (СТЗ) и инфракрасных приборов дистанционного измерения и фиксации температур. С этой целью на рис. 1.13 показана структура типовой СТЗ: датчик (сенсор) изображения, устройство преобработки (последнее может быть объединено с датчиком в цифровой датчик) и процессор, выходная информация от которого поступает в систему управления и к человеку-оператору для дальнейшего использования.

Основной тип современных СТЗ – это однопроцессорные системы на базе персонального компьютера [34]. Основные задачи, которые решают СТЗ следующие [34]: получение общей зрительной картины окружающей внешней среды; выделение в этой картине отдельных объектов и их распознавание, включая кластеризацию (разбиение на классы по близости по некоторым важным признакам), классификацию (отнесение к определенным заданным классам), верификацию (обнаружение конкретного искомого объекта); определение характеристик тех из выявленных объектов, которые нужны для выполнения конкретных заданий. Датчик изображения (рис.1.13) – это дистанционный оптоэлектронный преобразователь, работающий в различных диапазонах электромагнитного излучения (видимого света, инфракрасного, радиоизлучения, ультрафиолетового, рентгеновского и гамма излучений). Предварительная обработка осуществляется специальным устройством ввода (цифровая плата с памятью изображения).



Рисунок 1.12 – Схема зрительной сенсорной системы человека

В соответствии с назначением в СТЗ последовательно решаются следующие задачи обработки зрительной информации: предварительная обработка видеозображения, получаемого от датчика, в виде его фильтрации с целью повышения качества изображения, сглаживания, повышения контрастности с усилением границ объектов и их частей; преобразование аналогового сигнала в цифровой; декомпозиция изображения с последовательным выделением отдельных объектов из общей картины, затем их частей и т.д.; определение характеристик выделенных объектов для их последующего распознавания; распознавание, т. е. кластеризация, классификация или верификация.

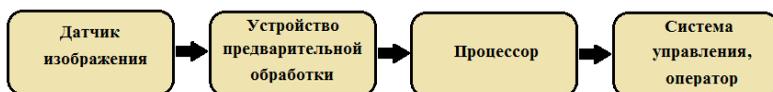
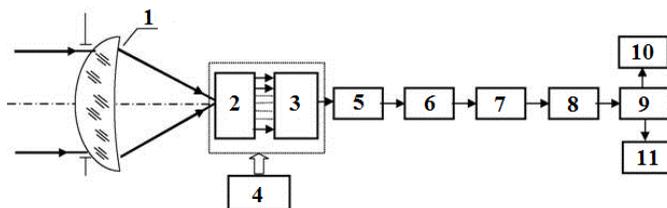


Рисунок 1.13 – Структура типовой СТЗ

Большинство способов и приемов обработки изображений в СТЗ скопированы с существующих в живой природе [34].

Физическими основами, методами и приборами дистанционного измерения и фиксации температур, получением видимого изображения объекта по его собственному, или отраженному от него излучению инфракрасной (ИК) части электромагнитного спектра занимается современное научно-техническое направление, называемое **тепловидением (инфракрасной термографией)** [37–40]. В настоящее время разработано и активно используется большое количество тепловизоров средневолнового и длинноволнового ИК поддиапазонов, создаются приборы ближнего и коротковолнового ИК поддиапазонов, комбинированные и комплексированные приборы, сочетающие в своём составе несколько каналов приёма теплового излучения. На рис.1.14 представлена обобщенная функциональная схема тепловизора с фокальной матрицей [37–40]. Сопоставляя блоки схемы (рис. 1.14) с блоками рис.1.12 видим, что по назначению имеется следующее соответствие: блок «1» (рис.1.14) – блок «светопроводящий и фокусирующий аппарат глаза»; блоки «2–

9» (рис.1.14) – «фоторецепторы и нейроны сетчатки»; блоки «9–11» (рис.1.14) соответствуют блокам «зрительные нервы» и частично блокам «зрительные зоны коры головного мозга» и «формирование, распознавание, анализ, запоминание зрительных образов». Можно отметить, что блок 4 (рис.1.14) не имеет соответствия на рис.1.12 и допустить, что блоки 1–11 (рис.1.14) по сложности используемых процессов для восприятия, преобразования, передачи информации, ее хранения и анализа существенно уступают соответствующим блокам рис. 1.12. Использование матричных фотоприемников (блоки 2–3, рис.1.14), состоящих из множества чувствительных элементов, расположенных по рядам и столбцам прямоугольной матрицы и устанавливаемых в фокальной плоскости объектива, в грубом приближении отображает работу чувствительных элементов сетчатки глаза. В тепловизорах первого поколения эту функцию выполняло оптико-механическое сканирование с использованием вращающихся во взаимно перпендикулярных направлениях кремниевых призм или с применением колеблющихся зеркал [37–40].



1 – оптическая система; 2 – фокальная матрица с предусилителями; 3 – мультиплексор; 4 – система охлаждения; 5 – корректор неоднородности характеристик чувствительных элементов; 6 – аналого-цифровой преобразователь; 7 – цифровой корректор неоднородности; 8 – корректор неработающих ячеек; 9 – формирователь изображения; 10 – дисплей; 11 – цифровой выход.

Рисунок 1.14 – Обобщенная функциональная схема тепловизора с фокальной матрицей

РАЗДЕЛ 2. ТЕРМОГРАФИЯ, ЕЕ ПРИРОДА И ВОЗМОЖНОСТИ

В этом разделе рассмотрим основные физические закономерности и возникшие на их основе инженерные решения, которые обеспечили современный уровень тепловидения и его разнообразное применение [22; 40; 41].

2.1. Основных этапах развития термографии

Гипотезу о существовании невидимых тепловых лучей высказывал еще древнеримский ученый Тит Лукреций Кар в своем сочинении "О природе вещей" [38]. В 1758г. М.В.Ломоносов изобрел телескоп для ночного видения (*tubo noctoptico*), а в 1762г. - создал зеркала с высокой отражающей способностью. На существование невидимых глазом тепловых лучей указывал в 1791г. швейцарский физик Пьер Прево (1751–1839), однако честь их открытия в 1800 году принадлежит У.Гершелю (1738–1822), который дал им название «инфракрасные лучи». В 1800 г. У.Гершель работал над защитой своих глаз от солнечного света и обнаружил эффект нагрева ртутного термометра, который был расположен за красной полосой спектра.

Инфракрасное излучение – один из частных видов электромагнитных волн, существование которых в 1832г. предположил М.Фарадей (1791–1867). В 1865г. Дж.Максвелл (1831–1879) теоретически доказал, что электромагнитные волны распространяются в вакууме со скоростью света. Из этого следовал вывод, что свет представляет собой электромагнитные волны. Г.Герц (1857–1894) в 1888г. в опытах подтвердил правильность теории Максвелла. Эти открытия доказали, что радиоволны, видимый спектр света, рентгеновские лучи и гамма лучи – это проявления электромагнитных колебаний с различной длиной волны.

Новым этапом в развитии тепловидения можно считать с изобретение в 1857г. А. Сванбергом приемника ИК излучения –

болометра. Усовершенствование этого прибора позволило Л.Ленгли в 1880г. регистрировать тепловое излучение животных на расстоянии до 400 м. В 1895 г. российский физик П.Н.Лебедев, прославившийся исследованием светового давления, предложил вакуумный термоэлемент, который оставался длительное время самым чувствительным детектором излучения. В 1898 г. другой известный российский физик А.Г.Столетов разработал газонаполненную фоточайку, работавшую на основе внешнего фотоэффекта. В 1900 г. произошло второе рождение ИК техники в качестве строгой научной дисциплины. Это было обусловлено, с одной стороны, фундаментальными исследованиями М. Планка, А. Эйнштейна, Г. Кирхгофа, Б.Б. Голицына, В. Вина в области теории теплового излучения, а с другой стороны – прогрессом в технологии ИК приемников. Патентная литература начала XX-го века содержит множество предложений по созданию ИК приборов для обнаружения кораблей, самолетов и людей, а также систем связи и автоматического наведения на цель средств поражения [38].

С началом 20 века связывается бурное развитие тепловизионной техники. Появились первые рабочие ИК системы, которые могли обнаруживать людей и технические объекты на расстояниях до километра. В это время создается фотоприемник на основе сернистого таллия. В 1917 – 1920 гг. Т.Кейз создал фоторезисторы для ближнего ИК диапазона. Эти приемники использовались в аппаратуре системы связи, принятой Германией на вооружение в 1935г. Перед Второй мировой войной начались систематические исследования воздействия теплового излучения на твердотельные приёмники. Были разработаны охлаждаемые фоторезисторы на основе сульфида свинца. Объем их выпуска в Германии достигал 4 тысяч штук в месяц [37; 39]. В годы Второй мировой войны в СССР системы ИК обнаружения были использованы при охране конвоев союзников, а в Красную армию поступили первые образцы приборов ночного видения. В Берлинском Университете в те же годы был создан первый тепловизор – эвапорограф "ЭВА" [38].

Первые измерительные тепловизоры (англоязычный термин - scanning radiometers, т.е. сканирующие радиометры) появились

в 1960-х годах в качестве побочного продукта военных разработок. В 1970-х годов шведская фирма – AGA (ныне – FLIR Systems, США) выпустила первый портативный измерительный тепловизор, Thermovision-650. В 1986 г. эта фирма отказалась от охлаждения ИК приемника жидким азотом и ввела в модель Thermovision-870 термоэлектрический холодильник, а также встроенный процессор для расчета температуры и калибровки в реальном времени [38].

В 60-е годы прошлого века благодаря работам М.М.Мирошникова, П. В. Тимофеева, В.И. Архангельского и других происходило становление советского тепловидения, которое в 80 – 90-х годах прошлого столетия развивались по нескольким направлениям [38].

В Беларуси научные и прикладные исследования с применением тепловизионной техники проводятся в ИТМО НАНБ, БГУ, БНТУ, БГУИР, а ряд задач энергосбережения, работоспособности технических изделий, контроля технологических процессов выполняются специалистами производственных предприятий.

В современных условиях в мире производится большое количество разнообразных инфракрасных приборов (Англия, Германия, Китай, Россия, Франция, Япония). Общеизвестным же лидером является американская компания FLIR Systems Inc.(США). В СНГ известна как производитель тепловизоров фирма «Иртис» и другие. В Беларуси исследованием и разработкой тепловизоров занимается кафедра квантовой физики и оптоэлектроники БГУ (трехзональный термограф ИТ-3СМ).

2.2. Физическая природа термографии

При температуре, превышающей абсолютный нуль, всякая поверхность будет испускать электромагнитное излучение. С увеличением температуры поверхностная плотность испускаемого потока излучения (светимость) тел быстро возрастает, а длины волн смещаются в более коротковолновую область. Так, если температура достигает тысяч градусов, то тела начинают излучать в видимом диапазоне волн. Это

свойство с незапамятных времен и до настоящего времени используется для определения по цвету поверхности температуры при горячей обработке стали, железа. Данные [42; 43], показывающие соотношение цвета нагретой поверхности стали (рис.2.1, 2.1, а). При этом после охлаждения стальных изделий на их поверхности образуется слой окислов, цвета (цвета побежалости, рис.2.1, б) которых также несут информацию о максимальной величине нагрева [42]. Нужно иметь в виду, что цвета побежалости зависят как от температуры нагрева, так и от времени выдержки изделия при этой температуре [42].

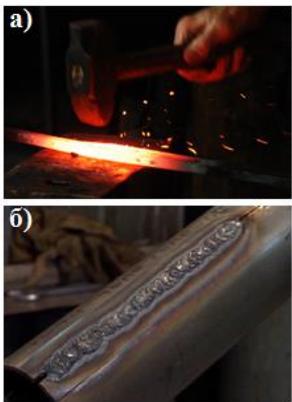
Палитра	Цвет поверхности	Температура, °С	Примеры нагретых поверхностей
	Темнокоричневый	530-580	
	Коричнево-красный	580-650	
	Темно-красный	650-730	
	Темновишнево-красный	730-770	
	Вишнево-красный	770-800	
	Светловишнево-красный	800-830	
	Светлокрасный	830-900	
	Оранжевый	900-1050	
	Темножелтый	1050-1150	
	Светложелтый	1150-1250	
	Ослепительно-белый	1250-1300	

Рисунок 2.1– Определение температуры поверхности стали по цветам побежалости

Раскаленные твердые тела испускают сплошной спектр излучения, состоящий из электромагнитных волн различной длины. Сплошной или непрерывный спектр означает, что нагретое тело испускает некоторое количество энергии излучения в любом диапазоне длин волн или частот. Видимое человеческим глазом электромагнитное излучение (рис.1.8) представляет собой диапазон спектра шириной 0,35 мкм ($\lambda=0,4 - 0,8$ мкм). Лучи с большей длиной волны относятся к инфракрасному участку спектра (диапазон от 0,8 до 400 мкм).

Далее инфракрасный участок переходит в диапазон радиоволн. Невидимые лучи с меньшей длиной волны (менее 0,4 мкм) относятся к ультрафиолетовому участку спектра излучения.

В обычных условиях (комнатная температура 300 К) тепловое излучение тел происходит в инфракрасном диапазоне длин волн. При этом тепловое излучение отличается от других видов излучения тем, что оно способно находиться в термодинамическом равновесии с излучающим телом, т.е. оно является **равновесным излучением**. Поэтому равновесному излучению можно приписать температуру тела, с которым оно находится в равновесии, и применить к нему законы равновесной термодинамики. Равновесное тепловое излучение имеет во всех точках полости одинаковую плотность энергии, то есть оно однородное. В механизме излучения твердого нагретого тела участвуют не только поверхностные частицы, но и очень тонкий приповерхностный слой (поверхностное излучение). Излучение газов производят все частицы из занимаемого газом объема (объемное излучение). Для характеристики излучения используются величины **энергетической светимости** (излучательности) и **энергетической яркости** (лучистости). При этом различают **полную** и **спектральную светимость** и **яркость**. Полная энергетическая светимость есть полная или интегральная поверхностная плотность излучаемой мощности. Энергетической яркостью тела называется мощность излучения в единичный телесный угол с единицы площади проекции поверхности тела на плоскость, перпендикулярную данному направлению. Энергетическая яркость непосредственно воспринимается человеческим глазом, а также приборами, основанными на измерении температуры по тепловому излучению. Тепловое излучение тел подчиняется законам излучения **абсолютно черного тела (АЧТ)**, под которым понимают тело, поглощающее всё падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах. Хотя в природе таких тел не существует, модель черного тела широко используется с достаточной степенью приближения. Реальное же тело всегда отражает часть падающего на него излучения. Из известных тел даже сажа приближается к абсолютно черному телу только в оптическом диапазоне.

В теории теплового излучения абсолютно черное тело является эталонным телом. Реализовать модель абсолютно черного тела можно, изготовив тело в виде замкнутой полости любой формы с малым отверстием, диаметр которого значительно меньше размеров полости (рис.2.2, а). В этом случае малое отверстие почти полностью поглощает падающее на него излучение, а чем меньше диаметр отверстия, тем больше поглощательная способность стремится к единице. Это обусловлено тем, что до выхода из полости луч претерпевает множество отражений, вследствие чего излучение, попавшее в полость, практически полностью поглотится. Следует отметить, что если стенки полости имеют постоянную температуру, то излучение из отверстия можно считать с большой степенью точности излучением абсолютно черного тела с этой температурой. На рисунке 2.2, б показан общий вид одной из моделей абсолютно черного тела (АЧТЭ-70, рис.2.2, б).

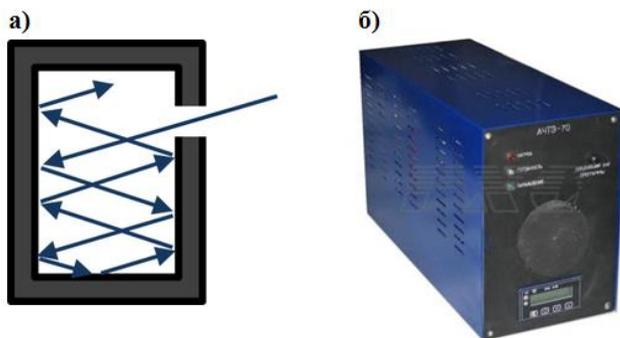


Рисунок 2.2 – Модель (а) и общий вид АЧТ (б)

Большинство бесконтактных температурных измерений производится в диапазонах инфракрасных и видимых лучей. При бесконтактном методе измерения температуры используются теплотехнические средства, основанные на измерении теплового излучения тел. При этом температурное поле объекта излучения со сплошным спектром не искажается, так как измерение не требует непосредственного контакта термоприемника с телом. Бесконтактные методы измерения

температур теоретически не имеют верхнего температурного предела применения. Температура излучения во всем диапазоне излучения измеряется одними и теми же методами. Различие заключается только в технике измерения.

Соотношения между температурой тела и характеристиками его излучения теоретически устанавливаются с помощью законов излучения.

2.2.1. Законы теплового излучения

Тепловое излучение абсолютно черного тела происходит в соответствии с законами: Планка, Вина, Стефана–Больцмана. Закон Кирхгофа действует для всех материальных тел.

Приведем несколько используемых далее определений. **Спектральная излучательная способность** W_λ – мощность излучения единицы площади поверхности тела за единицу времени в единичном интервале длин волн. Спектральная излучательная способность характеризует распределение мощности излучения по длинам волн, поэтому иногда W_λ называют спектральной плотностью энергии излучения (в литературе встречаются названия-синонимы: спектральная энергетическая светимость, спектральная плотность потока излучения, спектральная плотность энергетической светимости, испускательная способность). При этом могут использоваться различные буквенные обозначения g_λ , E_λ , R_λ). Здесь символом W_λ будем обозначать спектральную излучательную способность тела. **Интегральная излучательная способность** W_T – мощность излучения единицы площади поверхности тела за единицу времени во всем интервале длин волн от 0 до ∞ .

Формула Планка.

Формула Планка описывает распределение энергии в спектре излучения абсолютного черного тела:

$$W_{\lambda-b}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \cdot 10^{-6}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot \text{мкм}, \quad (2.1)$$

где $W_{\lambda-b}(\lambda, T)$ – спектральная излучательная способность черного тела (b – black body) на длине волны λ ; h – постоянная Планка, $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$; k – постоянная Больцмана, $k = 1.4$

10^{-23} Дж/К; c – скорость света, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; T – абсолютная температура черного тела; λ – длина волны.

Семейство зависимостей спектральной излучательной способности $W_{\lambda,b}$ от длины волны λ для различных температур (в полулогарифмическом масштабе) приведено на рис.2.3 [44]. Эти кривые (рис. 2.3.) показывают, что для каждой температуры имеется максимум на определенной длине волны λ_{max} , а при $\lambda \rightarrow 0$ и при $\lambda \rightarrow \infty$ спектральная излучательная способность стремится к нулю. Чем выше температура, тем короче длина волны, при которой достигается максимум.

Закон Вина.

Продифференцировав формулу Планка (2.1) по λ и приравняв полученное выражение нулю, найдем выражение для длины волны, соответствующей максимумам спектральной излучательной способности при различных температурах, которое выражает закон смещения Вина:

$$\lambda_{max}(T) = \frac{2898}{T}, \text{ мкм.} \quad (2.2)$$

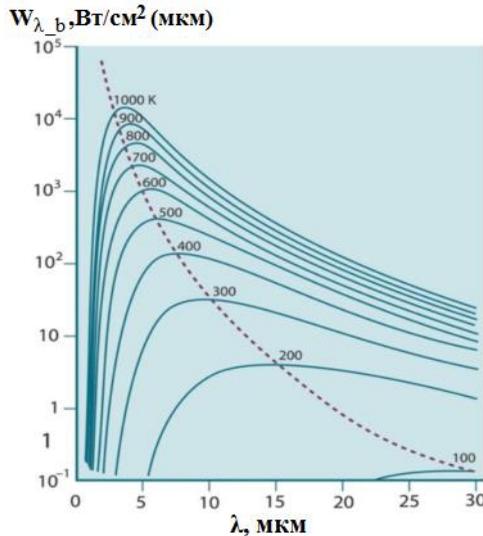


Рисунок 2.3 – Зависимость спектральной излучательной способности $W_{\lambda,b}$ от длины волны λ и абсолютной температуры T

В соответствии с законом Вина при повышении температуры тела максимум спектральной излучательной способности смещается в сторону коротких длин волн. Из формулы (2.2) следует, что тело при комнатной температуре 300 К имеет максимум спектральной излучательной способности на длине волны 9.7мкм (длинноволновая инфракрасная область). Спектральная излучательная способность Солнца (Т около 6000К), излучающего преимущественно желтый свет, достигает максимума на длине волны около 0.5 мкм.

Закон Стефана–Больцмана.

Интегрирование формулы Планка (2.1) от $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$ дает выражение для интегральной излучательной способности черного тела

$$W_b(T) = \sigma T^4, \text{ Вт} \cdot \text{м}^2. \quad (2.3)$$

Выражение (2.3) описывает закон Стефана–Больцмана: интегральная излучательная способность черного тела (W_b) пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры (Т).

Величина $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} \approx 5.6696 \cdot 10^{-8}$, Вт/(м²·К) – постоянная Стефана-Больцмана. На рис.2.4 приведена зависимость $W_{\lambda b}(\lambda)$. Величина W_b равна площади под кривой $W_{\lambda b}(\lambda)$ в интервале длин волн от $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$.

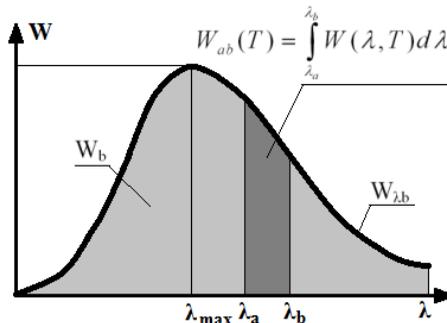


Рисунок 2.4 – Вид зависимости интегральной излучательной способности черного тела от длины волны

Излучение реальных (нечерных) тел. Обычные тела не являются абсолютно черными, им присуще не полное поглощение падающего излучения, поэтому сформулированные законы Планка и Стефана–Больцмана могут применяться к ним с введением некоторых уточнений. На рис.2.5 схематически изображены процессы взаимодействия объекта с энергией падающего излучения W_0 . Индексами ρ , α , τ выделены, соответственно, падающее на тело, отражённое, поглощенное, прошедшее через тело излучение.

Пусть мощность падающего излучения W_0 при взаимодействии с телом разделяется на потоки (рис. 2.5): 1) частично отражается от тела (W_ρ), 2) частично поглощается (W_α) и 3) частично проходит сквозь тело (W_τ), тогда $W_\rho + W_\alpha + W_\tau = W_0$. Разделив обе части этого равенства на W_0 , получим

$$\frac{W_\rho}{W_0} + \frac{W_\alpha}{W_0} + \frac{W_\tau}{W_0} = 1. \quad (2.4)$$

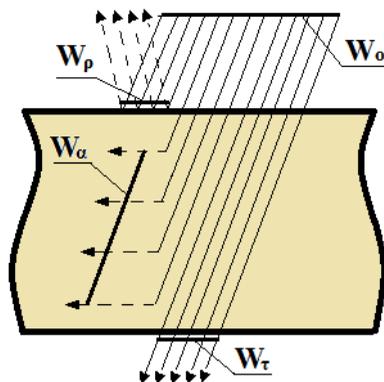


Рисунок 2.5 – Схема взаимодействия энергии падающего излучения с веществом объекта

Выражение (2.4) представим в виде

$$\rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1. \quad (2.5)$$

В формуле (2.5) для описания взаимодействия мощности или энергии падающего излучения с объектом используются три коэффициента:

$\rho_\lambda(\lambda) = \frac{W_\rho}{W_0}$ – спектральный коэффициент отражения, который

находится как отношение мощности, отраженной на определенной длине волны W_ρ , ко всей падающей мощности W_0 ,

$\alpha_\lambda(\lambda) = \frac{W_\alpha}{W_0}$ – спектральный коэффициент поглощения. Он

определяется как отношение мощности поглощенной на определенной длине волны W_α ко всей падающей мощности W_0 .

$\tau_\lambda(\lambda) = \frac{W_\tau}{W_0}$ – спектральный коэффициент пропускания, равный отношению мощности, прошедшей сквозь объект на определенной длине волны W_τ , ко всей падающей мощности W_0 .

Иногда коэффициенты ρ_λ , α_λ , τ_λ называют, соответственно, спектральной отражательной, поглощательной и пропускательной способностью [45]. Для описания части излучения черного тела, испускаемого реальными телами, вводят **спектральный коэффициент излучения** – $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$, который представляет отношение спектральной мощности излучения объекта к спектральной мощности излучения черного тела при одних и тех же температуре и длине волны. Выражение для спектрального коэффициента излучения можно записать как отношение спектральной излучательной способности объекта W_{λ_Obj} к спектральной излучательной способности черного тела W_{λ_b} :

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{W_{\lambda_Obj}(\lambda, T)}{W_{\lambda_b}(\lambda, T)}. \quad (2.6)$$

Коэффициент излучения $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ характеризует тип излучателя (рис.2.6):

- черное тело $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$;
- серое тело $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = \text{const}$, $\varepsilon < 1$;
- избирательный излучатель $\varepsilon_\lambda = f(\lambda, T)$, $\varepsilon_\lambda \leq 1$.

ε – обозначение постоянного коэффициента излучения, не зависящего от длины волны.

Таким образом, коэффициент ε_λ (2.6), принимая значения от 0 до 1, показывает какая доля энергии черного тела излучается объектом на длине волны λ , то есть ε_λ характеризует степень

черноты тела. Введение спектрального коэффициента излучения ε_λ позволяет записать законы Планка и Стефана–Больцмана для тел, не являющимися черными. Так, для серого тела формула Планка переписется в виде

$$W_{\lambda_gray}(\lambda, T) = \varepsilon \cdot W_{\lambda_b}(\lambda, T), \quad (2.7)$$

а для избирательного излучателя –

$$W_{\lambda_sel}(\lambda, T) = \varepsilon_\lambda(\lambda, T) \cdot W_{\lambda_b}(\lambda, T). \quad (2.8)$$

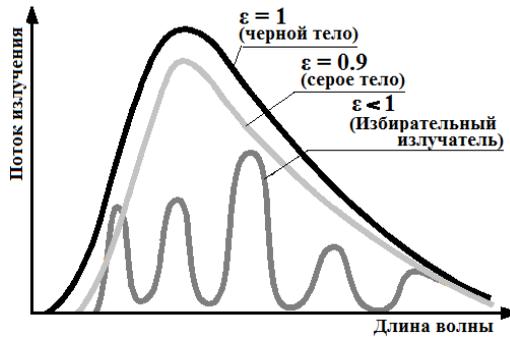


Рисунок 2.6 – Взаимосвязь потока излучения и длины волны для различных излучателей

Закон Стефана–Больцмана для серого и избирательного излучателя примет вид

$$W_{gray}(T) = \varepsilon \cdot W_b(T), \quad (2.9)$$

$$W_{sel}(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda(\lambda, T) \cdot W_{\lambda_b}(\lambda, T) d\lambda. \quad (2.10)$$

Помимо спектрального коэффициента излучения ε_λ используют интегральный коэффициент излучения ε_{T_0} (T_0 – от англ. Total – полный), определяемый как отношение энергии излученной объектом при температуре T к энергии излученной черным телом при той же температуре:

$$\varepsilon_{T_0, \Delta}(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda(\lambda, T) \cdot W_{\lambda_b}(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_{\lambda_b}(\lambda, T) d\lambda}. \quad (2.11)$$

Формулы (2.10) и (2.11) могут быть рассчитаны как для предельных значений $\lambda_1 = 0$ и $\lambda_2 = \infty$, так и для произвольной спектральной полосы $\Delta\lambda = [\lambda_1, \lambda_2]$. В первом случае коэффициент излучения называется интегральным – ϵ_{σ} , во втором – коэффициент излучения в выбранной спектральной полосе – $\epsilon_{\Delta\lambda}$.

Закон Кирхгофа.

Введенные выше понятия: спектральная излучательная способность W_λ и коэффициент спектрального поглощения – $\alpha_\lambda(\lambda, T)$ позволяют сформулировать закон Кирхгофа для теплового излучения любых материальных тел. Если поместить несколько различных тел с неравными температурами в откачанную адиабатическую оболочку с идеально отражающими стенками, то обмен энергией между телами возможен только за счет излучения и поглощения ими электромагнитных волн. Излучение, испускаемое одним телом, может частично или полностью отражаться, поглощаться или проходить сквозь другие тела. Температура более нагретых тел при излучении будет понижаться, а температура менее нагретых тел, поглотивших излучение, будет повышаться. По законам термодинамики через некоторое время все тела будут иметь одну и ту же температуру и установится равновесное состояние между тепловым излучением тел и поглощением ими электромагнитных волн. Для этого случая Кирхгоф сформулировал один из основных законов теплового излучения: **отношение спектральной излучательной способности объекта – $W_{\lambda_obj}(\lambda, T)$ к спектральному коэффициенту поглощения объекта – $\alpha_\lambda(\lambda, T)$ не зависит от природы тела и является универсальной функцией $W_{\lambda_b}(\lambda, T)$, зависящей только от температуры и длины волны.** При этом отдельно взятые W_{λ_obj} и α_λ могут меняться от одного тела к другому, тогда как их отношение универсально [37 – 41]:

$$\left(\frac{W_{\lambda_obj}(\lambda, T)}{\alpha_\lambda(\lambda, T)}\right)_1 = \left(\frac{W_{\lambda_obj}(\lambda, T)}{\alpha_\lambda(\lambda, T)}\right)_2 = \left(\frac{W_{\lambda_obj}(\lambda, T)}{\alpha_\lambda(\lambda, T)}\right)_3 = \dots = W_{\lambda_b}(\lambda, T). \quad (2.12)$$

Если отношение $\frac{W_{\lambda_Об\gamma}(\lambda,T)}{\alpha_{\lambda}(\lambda,T)}$ зависело бы от природы тела, то равновесное излучение не могло бы существовать там, где есть различные вещества. Из закона Кирхгофа следует, что излучательная способность тела $W_{\lambda_Об\gamma}$ тем больше, чем больше его спектральный коэффициент поглощения – α_{λ} . Также из закона Кирхгофа следует, что всякое тело при данной температуре излучает преимущественно на тех длинах волн, которые оно при той же температуре сильнее всего поглощает. Другими словами, если тело является сильным поглотителем, то оно одновременно является хорошим излучателем и наоборот. Абсолютно черное тело поглощает все падающее на него излучение, поэтому его спектральный коэффициент поглощения $\alpha_{\lambda} = 1$. Для всех других тел $\alpha_{\lambda} < 1$.

Связь коэффициента излучения и коэффициента отражения можно установить следующим образом. Сравнивая формулы (2.6) и (2.12) видим, что спектральный коэффициент излучения ε_{λ} совпадает со спектральным коэффициентом поглощения α_{λ} :

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda,T) = \alpha_{\lambda}(\lambda,T). \quad (2.13)$$

Для черного тела они оба равны единице. Равенство $\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$ удовлетворяет закону Кирхгофа.

Рассмотрим отражательную способность непрозрачных тел. Пользуясь формулой (2.5) ($\rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1$) и учитывая, что спектральный коэффициент пропускания τ_{λ} для непрозрачных тел равен нулю, получаем $\rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} = 1$. Если $\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$, то спектральный коэффициент отражения ρ_{λ} запишется:

$$\rho_{\lambda} = 1 - \alpha_{\lambda}. \quad (2.14)$$

Из выражения (2.14) следует, что чем лучше тело излучает электромагнитные волны, тем худшим отражателем оно является и наоборот.

Закон Ламберта. Влияние угла наблюдения на коэффициент излучения. Измерение потока теплового излучения может проводиться под различными углами по отношению к нормали поверхности объекта. Если объект

подчиняется закону Ламберта, то интенсивность его излучения I_θ по направлению задаваемому углом θ , связана с интенсивностью по направлению нормали I_0 , соотношением:

$$I_\theta = I_0 \cos \theta. \quad (2.15)$$

Закон Ламберта также называется косинусным, а подчиняющиеся ему тела – косинусными излучателями. Для косинусных излучателей яркость плоского объекта для любого угла наблюдения остается постоянной, так как уменьшение интенсивности излучения I_θ при увеличении угла θ компенсируется увеличением наблюдаемой площади (рис.2.7.). При сохранении угла обзора φ площадь наблюдаемой поверхности $b > a$. По сравнению с размером «а» поверхность размера «b» будет содержать большее количество излучателей, но яркость каждого источника будет меньше. Элемент dS поверхности объекта S (рис. 2.7.) излучает поток I_0 в телесный угол $d\Omega$ в направлении перпендикулярном поверхности. При отклонении направления от перпендикулярного на угол θ для ламбертовского излучателя поток будет равен $I_0 \cos(\theta)$. Это означает, что определение температуры тепловизором по измеренному потоку излучения от косинусного источника не будет зависеть от угла наблюдения.

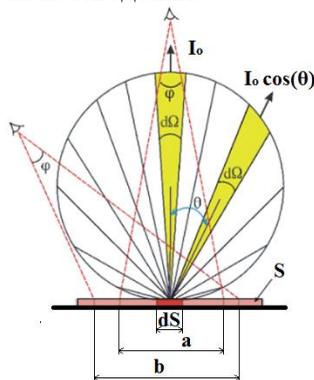


Рисунок 2.7 – Схематическая иллюстрация к закону Ламберта

Однако, закон Ламберта строго справедлив лишь для абсолютно черного тела. Близкими к косинусным являются

источники с сильно матированной поверхностью и мутные среды. Отклонение реальных излучающих объектов от закона Ламберта приводит к зависимости коэффициент излучения от угла наблюдения.

2.2.2. Тепловое излучение твердых тел при физико-механических воздействиях

При любых внешних воздействиях на твердые тела в их внутренней структуре возникают точечные, линейные, плоские и объемные изменения, являющиеся реакцией тела на произведенное на него воздействие [46]. Такая реакция проявляется и на атомно-молекулярном уровне в виде электромагнитного излучения [47]. Электромагнитные явления, возникающие, например, в твердых телах при воздействии на них внешних сил изучаются как в фундаментальном плане, так и в связи с многообразными прикладными задачами [47]. Одним из интересных эффектов в деформируемых телах является излучение электромагнитных волн, сопровождающее движение дислокаций при упругом и пластическом деформировании тел, а также зарождение в них и развитие трещин.

На рис. 2.8 показаны процессы деформирования (изменения формы и размеров, от лат. *deformatio* — «искажение») и разрушения горных пород, минералов, конструкционных материалов, которые сопровождаются инфракрасным и другим излучением.



Рисунок 2.8 – Инфракрасное излучение при различных видах механических воздействий

В статье [48] излагается механизм образования землетрясений на основе энергии ядерных реакций в Земле. При этом вода, проникая вглубь Земли через разломы, трещины и другие дефекты достигает щелочных и щелочно-земельных элементов, галогенов, а также первородного вещества и вступает с ними в химическую экзотермическую реакцию. Первородное вещество разогревается, появляются высокие давления и температура, способствующие возникновению на объемных границах аномалии множества ядерных реакций с небольшими объемами первородного вещества. В результате возникает температурное поле (электромагнитное излучение в инфракрасном спектре), вызывающее подогрев эпицентральной части будущего землетрясения. Это инфракрасное излучение регистрируется в режиме мониторинга и по его масштабам и интенсивности, можно судить о месте и ожидаемой магнитуде будущего землетрясения, т.е. диагностировать возможное землетрясение. В работе [49] экспериментально показано, что для образцов из гипса, цемента повышение температуры при разрушении (Δt_{cp}) максимально при механических испытаниях образцов в условиях объемного напряженного состояния. При одноосном сжатии Δt_{cp} получает меньшие значения, чем при объемном напряженном состоянии. При одноосном растяжении величины Δt_{cp} – наименьшие. Так, для гипса средняя температура на поверхности образца при испытаниях его в условиях объемного напряженного состояния увеличилась на $\Delta t_{cp} = 1,0^\circ\text{C}$ по сравнению с начальной температурой образца, в условиях одноосного сжатия на $\Delta t_{cp} = 0,8^\circ\text{C}$, при растяжении на $\Delta t_{cp} = 0,5^\circ\text{C}$. С ростом прочности образцов в условиях объемного напряженного состояния температура материалов в зоне разрушения возрастает. В образцах, сложенных гипсом, при средней прочности $\sigma_1 = 20,6$ МПа температура материала (Δt_{cp}) в зоне разрушения составляет 1,0 градус Цельсия. При увеличении же прочности образцов до 30,3 МПа (цемент М-400) температура увеличилась в 1,4 раза и достигла $\Delta t_{cp} = 1,4^\circ\text{C}$. В условиях одноосного растяжения наблюдается подобная же закономерность: с увеличением прочности материала температура в зоне разрушения возрастает. При средней прочности на растяжение (σ_p) образцов из цемента М-400 $\sigma_p =$

0,08 МПа температура материала составляет $\Delta t_{cp} = 0,2^{\circ}\text{C}$. При увеличении прочности до 0,14 МПа (гипс) температура увеличивается в 2,5 раза и составляет $\Delta t_{cp} = 0,5^{\circ}\text{C}$.

В работе [50] в лабораторных экспериментах по измерению инфракрасного излучения при разрушении угля использовался компьютерный тепловизор ТКВр–ИФП “СВИТ”, разработанный и изготовленный в Институте физики полупроводников СО РАН. Этот прибор предназначен для исследований в реальном масштабе времени с предельной температурной чувствительностью 0,007 К и частотой кадров 100 Гц в диапазоне измерения температуры 10 – 42 $^{\circ}\text{C}$. Его оптическое поле зрения 128×128 пикселей, диапазон фокусировки от 250 мм до “бесконечности”. Авторами работы [50] получено, что приращение тензора напряжений прямо пропорционально приращению температуры для образцов угля с различными физико-химическими свойствами. На основании экспериментов сделан вывод, что ИК-радиометрия позволяет дистанционно и оперативно контролировать изменение напряженно-деформированного состояния угольных образцов при их нагружении в реальном масштабе времени.

В работах [51; 52] отмечается, что электромеханические явления в природных диэлектриках имеют большую практическую значимость в связи с трактовкой электромагнитных предвестников землетрясений. Кроме того, они позволяют понять физические процессы мощных откликов на слабые воздействия, в том числе и электромагнитных на сейсмичность, и особое состояние твердых тел. Показано, что появление электрического поля при механическом нагружении твердых диэлектриков имеет много общего с их поляризацией в слабых электрических полях. Это подтверждено экспериментами на образцах из кварцевого стекла и мрамора [52]. Схема экспериментальной установки, использованной в работе [52], приведена на рис. 2.9. Образец из мрамора 1 в виде призмы размером 40×40×100 мм нагружался сжимающей нагрузкой F в гидравлическом прессе через ситалловые изоляторы. На две противоположные боковые поверхности образца эпоксидной смолой с серебряным порошком крепились электроды 2. Потенциалы на электродах создавались

источником постоянного напряжения, а электроды обеспечивались заземлением 5. Регистрация потенциалов электрического поля в образце производилась бесконтактным способом при помощи специально изготовленного электрометра 4. Зонд 3 электрометра крепился на стойке с микрометрической подачей для сканирования вдоль поверхности исследуемого образца при зазоре 2мм между поверхностью образца и зондом. Результаты экспериментов позволили авторам работы [52] допускать, что любое динамическое явление в материалах, в том числе и образование трещин, должно приводить к резкому изменению локальных механических полей и к изменению индуцированных электрических полей и сопровождающих излучение электромагнитных (в т.ч. инфракрасных) импульсов. Этот механизм позволяет объяснить электромагнитные явления (как статические, так и динамические) в очагах горных ударов и землетрясений.

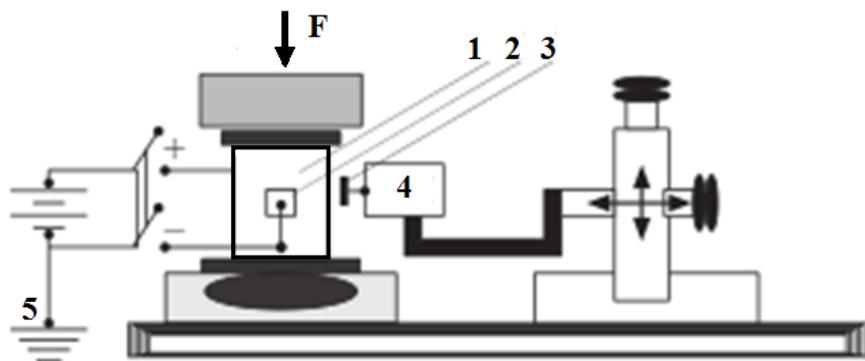


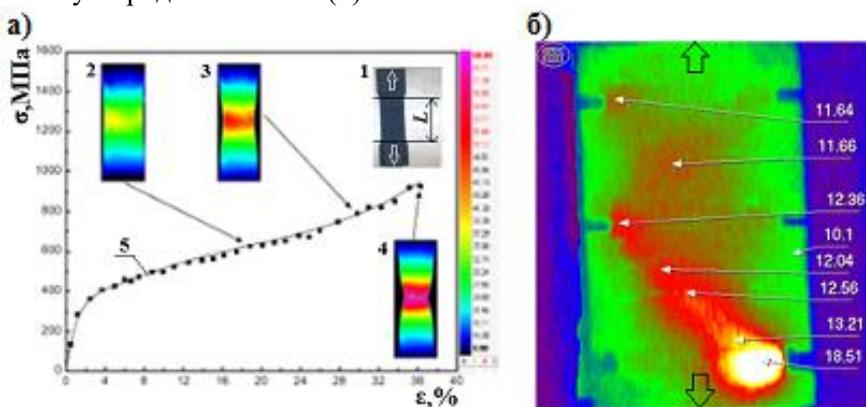
Рисунок 2.9 – Схема экспериментальной установки [52]

Представляет интерес возникновение стационарных и импульсных электрических полей при деформировании твёрдых тел с позиций прогнозирования их несущей способности (композиционные материалы, сплавы, горные породы и др.). В этом направлении авторы работы [53] экспериментально получили данные, связывающие кинетику трещинообразования в минералах с развитием колебательных процессов в материале.

При деформировании гранодиорита ими установлено, что образование микротрещин происходит при нагрузках выше $0,5 \sigma_p$, а до этого развивается процесс накопления дефектов. Причём при нагрузке, не превышающей половину разрушающей нагрузки (σ_p), выделяющиеся импульсы малы по амплитуде и характеризуются временем нарастания 100 мкс [53]. Эти данные были подтверждены и в опытах по разрушению ионных кристаллов и оргстекла. Для этих материалов на начальной стадии нагружения импульсы электромагнитного излучения появляются до образования микротрещин. При росте нагрузки до $0,6 - 0,7$ от предельной начинают появляться микротрещины, размеры которых можно измерять с помощью микроскопа. Одновременно развитие микротрещин сопровождается появлением импульсов.

Появление в последнее время высокоточных инфракрасных камер стимулировало широкое применение метода инфракрасного сканирования в задачах механики сплошных сред, исследовании работы металлических и композитных конструкций. Методы анализа теплового излучения оказываются эффективными при мониторинге микроповреждений, изучении термодинамических особенностей эволюции микродефектов при пластическом деформировании и разрушении, в процессе определения усталостных свойств материала, неразрушающем контроле. По инфракрасному излучению деформируемой стали можно судить об особенностях эволюции температурного поля, а по нему – о напряженном состоянии, предельном состоянии и развитии разрушения [54 – 57]. В результате экспериментальных исследований, проведенных на кольцевых образцах, выполненных из конструкционных материалов (медь, дюралюминий, цирконий и др.), показано, что при их разрывном нагружении в момент нарушения сплошности возникают сигналы электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) с амплитудами, значительно превышающими значения уровней шумов регистрирующей аппаратуры и внешних помех. В момент нарушения сплошности металлических образцов возникающие сигналы имеют наибольшие значения для образцов из дюралюминия, а наименьшие – для образцов из меди. Метод, основанный на регистрации сигналов ЭМЭ, может быть

использован для контроля целостности металлических конструкций, находящихся под нагрузкой, в машиностроении, в строительстве и других отраслях [54 – 57]. Тепловая (инфракрасная) диагностика имеет преимущества перед другими методами, так как позволяет проводить исследование изделий, расположенных в труднодоступных местах, без непосредственного контакта с ними. На рис.2.10 даны примеры термограмм, полученных при съемке в инфракрасном свете (термографировании), при растяжении изделий и титана (а) и низкоуглеродистой стали (б).



а) – результаты термографирования титанового образца 1[56]; термограммы 2,3,4 в указанных точках графика деформирования 5; б) – температурное поле поверхности стального изделия с боковыми дефектами в стадии предразрушения [57]

Рисунок 2.10 – Примеры термограмм, полученных при растяжении металлических образцов

2.2.3. Поглощение теплового излучения различными средами

Среду, через которую проходит инфракрасное излучение, можно рассматривать как динамическую систему, структурные частицы которой (молекулы, атомы) испытывают вынужденные колебания от действия излучения. В результате этого меняются

параметры электрического поля среды и интенсивность проходящего через среду инфракрасного (теплого) излучения. Количественно это характеризуется уменьшением энергии прошедшего потока W_t и происходит вследствие поглощения и рассеивания энергии падающего излучения (W_0) средой (рис.2.5). Спектральный коэффициент пропускания в этом случае $\tau_\lambda(\lambda, T) = W_t / W_0 < 1$.

Очень часто средой распространения электромагнитного сигнала является атмосфера [58]. Общее ослабление излучения 2 в газовых средах 3, расположенными на расстоянии L между источником 1 и приемником 4 (рис.2.11), обусловлено двумя основными процессами: 1) поглощением газовыми компонентами, в результате которого происходит преобразование энергии излучения в другие ее виды; 2) молекулярным и аэрозольным ослаблением, или рассеянием. Поглощение вызвано наличием в атмосфере ряда веществ (воды, углекислого газа, озона и др.), имеющих спектральные полосы поглощения в инфракрасной области спектра. Рассеяние энергии излучения на частицах среды происходит отклонением потока от первоначального направления с некоторым поглощением энергии веществом среды. Во многих случаях могут происходить случайные изменения оптических свойств атмосферы из-за флуктуаций показателя преломления атмосферы [58]. Их влияние проявляется в мерцании (случайном изменении яркости наблюдаемого источника) и дрожании (случайном изменении пространственного положения изображения наблюдаемого источника). Кроме того, возможны и другие явления, связанные с неоднородностью атмосферы [58]. Уменьшение температуры воздуха вызывает небольшое увеличение пропускания излучения (обычно им пренебрегают).

Сухой и чистый воздух практически прозрачен для теплового излучения. Наличие в воздухе многоатомных газов (углекислый газ, озон, метан), мельчайших частиц (паров воды, аэрозолей) делает среду частично прозрачной. В диапазоне длин волн свыше 1 мкм и в диапазоне высот до 1 км наибольшее значение имеет селективное (избирательное) поглощение излучения молекулами водяных паров и углекислого газа.

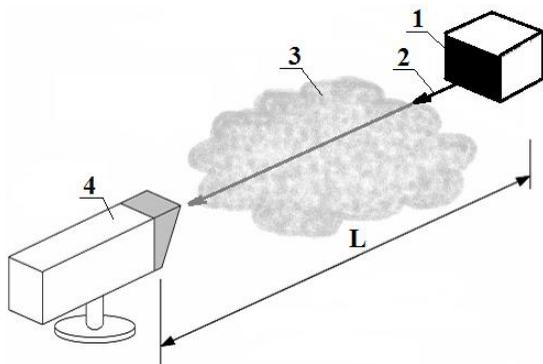


Рисунок 2.11 – Схема прохождения инфракрасного сигнала через среду от источника к приемнику

Концентрация водяных паров и названных газов в атмосфере постоянно изменяется и зависит от географического положения, высоты, местных условий [58 – 61]. Содержание водяных паров колеблется в пределах (0,001 – 4) объемных процентов, а углекислого газа – изменяется от 0,03 до 0,05% по объему. В нижних слоях атмосферы концентрация озона составляет от 10^{-6} до $10^{-5}\%$. Для углекислого газа характерны три полосы поглощения в следующих пределах длин волн: 2,36 – 3,02; 4,01 – 4,8; 12,5 – 16,5 мкм, аналогичные полосы для воды – 2,24 – 3,27; 4,8 – 8,5; 12 – 25 мкм [59]. Для большинства практических целей поглощение инфракрасного излучения окисью углерода, закисью азота, метаном может не приниматься во внимание [58 – 61].

Лучистый поток при прохождении через среду рассеивается ее молекулами (молекулярное рассеяние). Рассеяние инфракрасного излучения зависит от соотношения между длиной волны излучения, размера рассеивающих частиц, концентрации частиц и их комплексного показателя преломления [37 – 41]. Это рассеяние в окнах прозрачности атмосферы учитывают на основании данных экспериментальных исследований. Туман и облака сильно рассеивают инфракрасное излучение. Солнечные лучи не проходят через слой облачности, толщиной более 20 м. Этот слой задерживает и все

инфракрасное излучение. Дождь сравнительно хорошо пропускает инфракрасное излучение. Коэффициент пропускания инфракрасного излучения на трассе длиной 1,8 км при слабом дожде равен 0,88; при среднем – 0,74; при сильном – 0,65, а при ливне – 0,38 [61]. Поэтому в дождливую погоду работа инфракрасной аппаратуры возможна, но при пониженных дальностях. Весьма значительное поглощение инфракрасного излучения наблюдается в жидкостях.

Схематически прозрачность атмосферного воздуха с основными примесями на горизонтальной трассе длиной 1,8 км на уровне моря показана на рис.2.12. В верхней части рис.2.12 указано, молекулами каких составляющих поглощается инфракрасное излучение. Из рисунка следует, что участки спектра, в пределах которых инфракрасное излучение практически не поглощается атмосферой, находятся в интервалах 0,95 – 1,05; 1,15 – 1,35; 1,5 – 1,8; 2,1 – 2,4; 3,3 – 4,2; 4,5 – 5,1; и 8 – 14 мкм (окна прозрачности атмосферы для инфракрасного излучения).

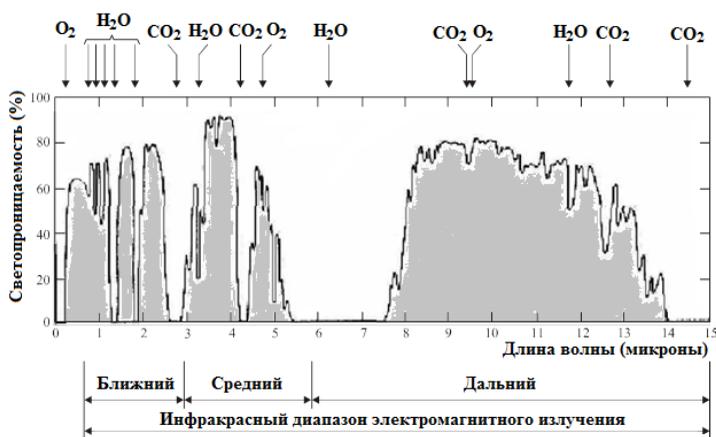


Рисунок 2.12 – Прозрачность атмосферного воздуха с основными примесями

Для твердых веществ различают несколько видов поглощения излучения [37 – 41; 58 – 61], основными из которых являются собственное (сплошное) поглощение и

характеристическое (избирательное, селективное). Собственное поглощение обусловлено взаимодействием электромагнитных волн с кристаллической решеткой, а характеристическое возникает вследствие колебаний и вращений молекул и является причиной появления полос поглощения. Внутреннее поглощение в полупроводниках возникает в результате возбуждения электронов, пересекающих запретные зоны, а внешнее вызывается как поглощением свободными электронами так и переходом электронов между примесными уровнями и зоной проводимости [62; 63]. Твердые вещества (германий, теллурид кадмия, арсенид галлия и другие [64]) нашли применение в инфракрасной аппаратуре.

Традиционное стекло непрозрачно для инфракрасного излучения с длиной волны 8 – 12 микрон. По этой причине нельзя производить тепловизионные измерения через оконное стекло, так как картина будет сильно искажаться [65].

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНИКА ТЕПЛОВИДЕНИЯ

Ограниченные возможности человеческого зрения явились причиной создания различных оптических приборов: устройств защиты глаз от чрезмерной солнечной засветки (кости с прорезями и др.), очки для коррекции зрения, подзорные трубы, бинокли, микроскопы, телескопы, а позже появились приборы ночного видения (ПНВ) и тепловизоры (ТПВ). Таким образом, человек вначале расширил диапазон своего зрения в дневное время, а затем и ночью. ПНВ, ТПВ – это электронные устройства для улучшения видения в темноте. Однако работа ПНВ и тепловизоров основана на разных физических явлениях: первые усиливают световую энергию, создаваемую на наблюдаемом объекте свечением ночного неба, звездами и луной, искусственной подсветкой и т.д., и преобразуют ее в видимый свет, а вторые обнаруживают тепловую энергию, излучаемую объектами. Поэтому оба устройства воспринимают энергию различных диапазонов электромагнитного спектра, из чего следуют различные возможности этих приборов по обнаружению, исследованию и идентификации объектов. В последнее время тепловизоры как в военных целях, так и в гражданском применении начинают постепенно стали вытеснять приборы ночного видения [22, 65].

Основные этапы развития оптических приборов, работающих в инфракрасном диапазоне, рассмотрены в источниках [38; 39; 65].

3.1. Классификация устройств тепловидения

В этом пункте рассмотрим классификацию пирометров и тепловизоров.

Пирометр – это средство (совокупность средств) измерений температуры по тепловому электромагнитному излучению, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для

непосредственного восприятия наблюдателем. Конструктивно пирометр может представлять собой совокупность пирометрического преобразователя и устройства отображения информации в аналоговой или цифровой форме (ГОСТ 28243-96. Пирометры. Общие технические требования).

По ГОСТ 28243-96 пирометры классифицируют:

- по принципу действия: пирометры полного излучения; пирометры частичного излучения; пирометры спектрального отношения;
- по конструктивному исполнению: стационарные; переносные; комбинированные;
- по числу диапазонов измерений: однодиапазонные; многодиапазонные;
- по числу каналов измерений: одноканальные; многоканальные;
- по виду выходного сигнала пирометры: аналоговые; дискретные.

Тепловизор (тепловизионный измерительный прибор) – это оптико-электронный прибор, предназначенный для бесконтактного (дистанционного) наблюдения, измерения и регистрации пространственного/ пространственно-временного распределения радиационной температуры объектов, находящихся в поле зрения прибора, путем формирования временной последовательности термограмм и определения температуры поверхности объекта по известным коэффициентам излучения и параметрам съемки (температура окружающей среды, пропускание атмосферы, дистанция наблюдения и т. п.) (СТБ ГОСТ Р 8.619-2009. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки).

Есть несколько подходов к классификации тепловизоров [38]: по техническим характеристикам, коммерческим параметрам. По техническим признакам тепловизионные системы можно классифицировать на следующие группы:

- по способу обзора – системы с линейным обзором (впередсмотрящие) и системы с двухкоординатным обзором (тепловизоры);

- по виду приемника инфракрасного излучения – оптико-механические (первое поколение) и матричные (второе поколение);
- по наличию охлаждения ИК приемника – с охлаждаемым (жидкий азот, микрохолодильник Стирлинга, термоэлектрический) или неохлаждаемым приемником;
- по способу представления информации – показывающие (текстово-цифровые) или измерительные (графические);
- по конструктивным особенностям – стационарные, портативные (переносные), контейнерные (передвижные);
- по волновому диапазону – коротковолновые, длинноволновые.

По коммерческим признакам тепловизионные системы разделяются на 3 категории: 1 – системы общего пользования с неохлаждаемыми приемниками; 2 – системы с охлаждаемыми приемниками, работающие в средневолновом ИК диапазоне и предназначенные для измерения температуры; 3 – длинноволновые высокоскоростные системы гибкой конфигурации, предназначенные для научных исследований.

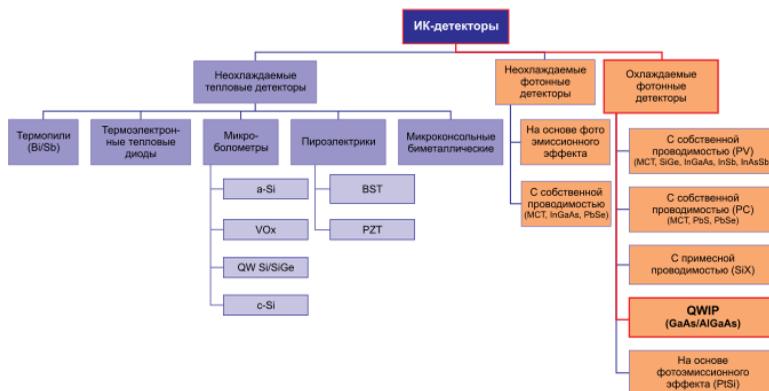


Рисунок 3.1 – Схема классификации тепловизионных систем [66]

Приведенная выше классификация базируется на основных признаках. Каждый из указанных признаков можно

детализировать. Так по наличию охлаждения ИК приемника (детектора) классификация может быть развита в соответствии с рис. 3.1.

3.2. Тепловизионные приборы

3.2.1. Пирометры

Среди существующих инфракрасных приборов наименьшей инерционностью (наибольшим быстродействием) обладают электронные пирометры. В работе [67] отмечается, что для различных типов пирометров быстродействие составляет 0,001–2,5 с. Пирометры используют обычно для измерений температур от 100 до 6000 °С. К главным достоинствам пирометров следует отнести возможность проведение дистанционного контроля температуры объектов, находящихся на значительном расстоянии от прибора, а также отсутствие влияния измерительного прибора на объект исследования. Пирометры подразделяются на пирометры частичного, полного излучения и спектрального излучения.

Пирометры частичного излучения измеряют яркостную температуру объекта. Яркостной температурой не черного тела, имеющего температуру T , называется такая температура $T_{\text{я}}$, абсолютно черного тела, при которой его яркость (светимость) для узкой области спектра равна яркости (светимости) исследуемого тела в той же спектральной области при температуре T . Действительная температура объекта измерений находится в следующей зависимости от яркостной температуры измеряемой пирометром [68]

$$T = \left(\frac{1}{T_{\text{я}}} - \frac{\lambda}{b} \ln \frac{1}{\varepsilon} \right), \quad (3.1)$$

где λ – длина волны монохроматического излучения, м; b – постоянная Вина, $b = 0,002897$ м К; ε – степень черноты тела для данной длины волны.

К данному типу пирометров относятся оптические и фотоэлектрические пирометры. Рассмотрим наиболее распространенный тип данных приборов – оптический пирометр с исчезающей нитью (рис.3.2 [69]). Принцип действия данного

пирометра основан на сравнении яркости монохроматического излучения эталонного тела (лампы накаливания) и объекта измерений. Оптическую систему прибора наводят на тело и передвигают объектив с целью получения четкого изображения объекта и нити лампы. Затем включают источник тока и регулируют яркость нити с помощью реостата до тех пор, пока её средняя часть не сольется с освещенным телом. С милливольтметра снимают показания, соответствующие яркостной температуре $T_{я}$.

Максимальная температура, измеряемая оптическими пирометрами, как правило, составляет $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, что связано с распылением материала вольфрамовой нити лампы при более высоких температурах. При установке серого светофильтра, обеспечивающего максимальную температуру нагрева нити не более $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, верхний предел измерений прибора может быть значительно увеличен. В современном приборостроении выпускаются пирометры с диапазоном измеряемых температур до нескольких тысяч градусов. Пирометры спектрального отношения применяются для определения цветовой температуры объекта измерения. Цветовая температура $T_{ц}$, К, – это температура реального тела, при которой отношения плотностей потоков излучения абсолютно черного тела и реального тела будут равны при действительной температуре T для двух длин волн λ_1 и λ_2 . Зависимость действительной температуры тела T от цветовой $T_{ц}$, измеряемой пирометром, имеет вид [68]

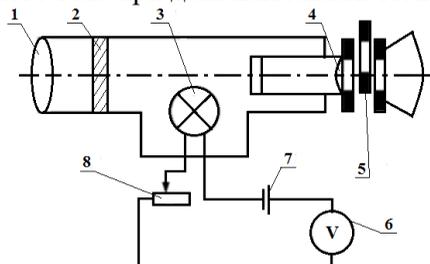
$$T = \left(\frac{1}{T_{ц}} - \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}\right)}{b\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)} \right)^{-1}, \quad (3.2)$$

где $\varepsilon_{\lambda_1}, \varepsilon_{\lambda_2}$ – степень черноты физического тела для лучей с длиной волны соответственно λ_1, λ_2 ; b – постоянная Вина.

Принципиальная схема пирометра спектрального отношения с фотоэлементом приведена на рис.3.3 [70]. Измеряемое излучение через защитное стекло объектива попадает на фотоэлемент. Между объективом и фотоэлементом установлен вращающийся обтюратор. Обтюратор представляет собой диск с двумя отверстиями, одно из них закрыто красным светофильтром, а другое – синим. При вращении обтюратора на

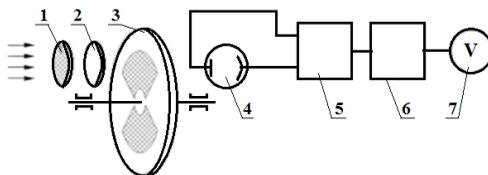
него попеременно попадают излучения, соответствующей спектральной энергетической яркости E_1 и E_2 , Вт / (м² ср·нм), так как $E_1 = f(\lambda_1)$ и $E_2 = f(\lambda_2)$, то $T_{ц} = f(E_1 / E_2)$. Вырабатываемые фотоэлементом попеременные импульсы электрического тока подаются на электронный усилитель и логарифмирующее устройство, где преобразуются в ток I , мА. Значения напряжения U , мВ, электрического тока I выводятся на милливольтметр, который отградуирован на показание цветовой температуры $T_{ц}$. Определив значение $T_{ц}$, рассчитывают температуру T по формуле (3.2). Предел измерения современных пирометров спектрального отношения составляет от 300 до 2800 °С с относительной погрешностью измерений ± 1 °С.

Пирометры полного излучения предназначены для измерения радиационной температуры объекта. Радиационная температура T_p – это такая температура, при которой полная мощность абсолютно черного тела равна полной энергии излучения данного тела при действительной температуре T .



1 – линза; 2 – поглощающий светофильтр; 3 – лампа накаливания; 4 – линза окуляра; 5 – красный светофильтр; 6 – милливольтметр; 7 – источник тока; 8 – реостат

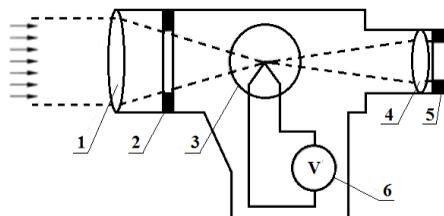
Рисунок 3.2 – Схема оптического пирометра с исчезающей нитью



1 – защитное стекло; 2 – объектив; 3 – обтюратор; 4 – фотоэлемент;
5 – электронный усилитель; 6 – логарифмирующее устройство;
7 – милливольтметр

Рисунок 3.3 – Схема пирометра спектрального отношения с фотоэлементом

В пирометрах полного излучения (рис. 3.4 [70]) используется тепловое действие полного излучения нагретого тела. Чувствительным элементом в радиационных пирометрах



1, 4 – линзы; 2 – диафрагма; 3 – термобатарея; 5 – окуляр;
6 – милливольтметр

Рисунок 3.4 – Схема пирометра полного излучения

является термобатарея из нескольких миниатюрных последовательно соединенных термопар. Рабочие спаи термопар нагреваются излучением, фокусируемым объектом измерения с помощью оптической системы. Возникающая термоЭДС измеряется с помощью милливольтметра, градуированного в градусах радиационной температуры T_p , К. Для перевода действительной температуры тела через радиационную температуру, измеряемую пирометром, используют зависимость [68]

$$T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}}, \quad (3.3)$$

где ε – степень черноты исследуемого объекта.

Пирометры полного излучения применяются для измерения объектов с невысокой температурой, при которых отсутствует видимое излучение, в том числе измерения температуры тел, более холодных, чем окружающая среда. Современные пирометры полного излучения применяются для измерения температур объектов в диапазоне от минус 40 до 3500 °С. Абсолютная погрешность измерения температуры с

применением пирометров полного излучения возрастает с увеличением измеряемой действительной температуры t , °С, и составляет: при $t = 1000$ °С – $\Delta t = \pm 12$ °С; при $t = 2000$ °С – $\Delta t = \pm 20$ °С; при $t = 3000$ °С – $\Delta t = \pm 35$ °С.

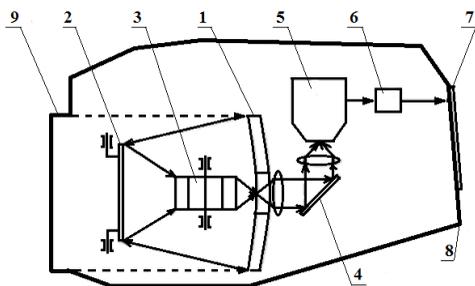
3.2.2. Тепловизоры

Тепловизоры – это оптико-электронные приборы пассивного типа, работающие в инфракрасном диапазоне спектра излучения. Тепловизоры предназначены для теплового исследования и неразрушающего контроля наружных ограждающих конструкций, материалов, оборудования, изделий и систем [31; 37–41]. Принцип работы тепловизоров заключается в принятии и обработке инфракрасного излучения объекта исследования с преобразованием его в видимое изображение теплового поля (термограмму). По способу получения изображения тепловизоры подразделяются на сканирующие (оптико-механические) и матричные. В зависимости от спектрального диапазона тепловизоры делятся на коротковолновые (длина волны от 3 до 5 мкм соответствует средневолновому инфракрасному диапазону) и длинноволновые (длина волны от 8 до 14 мкм).

Оптико-механические тепловизоры производятся с 50-х годов XX века. Наибольшее распространение получили два типа оптико-механического сканирования: использование вращающихся во взаимно перпендикулярных направлениях кремниевых призм; использование колеблющихся зеркал. Схема работы оптико-механического тепловизора приведена на рис.3.5.

Излучение изделия попадает в объектив, в котором происходит его сканирование по кадрам с помощью плоского колеблющегося зеркала, а по строке – вращающейся пропускающей призмой. Затем излучение направляется через плоское зеркало и систему линз в одноэлементный приемник. С целью поддержания оптимальной рабочей температуры приемника его охлаждают жидким азотом. От приемника полученный сигнал направляется к блоку, в котором происходят усиление, аналого-цифровое преобразование, корректировки и

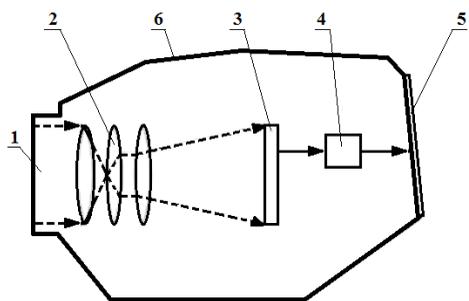
формирование изображения термограммы, выводимой на дисплей.



1 – зеркальный объектив; 2 – плоское колеблющееся зеркало; 3 – вращающаяся призма; 4 – плоское зеркало; 5 – приемник; 6 – блок усиления, аналого-цифрового преобразования, корректировки и формирования изображения; 7 – дисплей; 8 – корпус; 9 – вход объектива

Рисунок 3.5 – Схема опико-механического тепловизора

В конце XX века были разработаны матричные фотодетекторы, не имеющие движущихся механических частей. Современные матрицы используют фотонные и тепловые ИК-приемники. Наибольшее распространение в настоящее время получили фотонные матрицы на основе таких соединений, как силицид платины PtSi, антимонид индия IsSb и арсенид галлия GaAs (рис.2.13). Принципиальная схема работы матричного тепловизора приведена на рис.3.6.



1 – объектив; 2 – система линз объектива; 3 – матричный фотодетектор; 4 – блок аналого-цифрового преобразования, корректировки и формирования изображения; 5 – дисплей; 6 – корпус

Рисунок 3.6 – Принципиальная схема матричного тепловизора

Принцип его работы заключается в фокусировке инфракрасного излучения исследуемого объекта, попавшего в область зрения тепловизора, с помощью оптической системы линз объектива на матричный фотодетектор, выполненный из кристаллов кремния, в котором происходит изменение электрического сопротивления или напряжения. Изменения обрабатываются в блоке аналого-цифрового преобразования. Сформированное изображение распределения температуры визуализируется дисплеем. Температуры, отображаемые на дисплее тепловизора $T_{\text{теп}}$ находятся в следующей зависимости от фактической температуры объекта T [38]

$$T_{\text{теп}} = [\varepsilon T^n + (1 - \varepsilon) T_{\text{отр}}^n]^{\frac{1}{n}}, \quad (3.4)$$

где ε – коэффициент излучения объекта измерения; $T_{\text{отр}}$ – отраженная температура, К; T – температура объекта измерения, К; n – показатель степени, характеризующий зависимость функции Планка при изменении температуры. Отраженной температурой $T_{\text{отр}}$ является средняя температура окружающей среды и объектов излучения, определяемая по методу диффузно отражающей алюминиевой фольги. Отраженная температура является важным показателем, который вводится в интерфейс тепловизора при проведении измерений.

За последние десятилетия тепловизионные камеры претерпели значительные усовершенствования. Так, если первые поколения камер имели недостаточное для многих приложений пространственное разрешение, высокий уровень шума, малое быстродействие, ограниченное хранилище данных, то современные камеры стали портативными, оснащены инфракрасными детекторами с лучшим разрешением и точностью, с программным обеспечением, использующим принципы технического зрения, работают в нескольких спектрах и имеют значительное применение [38; 40; 71].

Основными целями разработки программного обеспечения для неразрушающего контроля и диагностики, использующего принципы технического зрения, являются следующие:

- переход от контроля с участием оператора к автоматизированной системе оперативного выявления дефектов;
- улучшение условий труда;
- уменьшение влияния человеческого фактора;
- увеличение разрешающей способности системы.

Программное обеспечение, использующее принципы технического зрения, выполняет следующие функции:

- захват изображения с камер;
- предоставление в реальном времени оператору изображений, полученных с ИК-камер;
- анализ полученных с камер изображений для контроля наличия дефектов;
- автоматическое обнаружение и маркирование дефектных элементов, сигнализация оператору и управление возможным продвижением ИК-камеры;
- сжатие исходного изображения;
- запись изображений в базу;
- запись служебных сообщений в базу;
- поиск, просмотр изображений, сообщений в базе по заданным параметрам и их обработка.

Современные тепловизоры изготавливаются в стационарном и переносном исполнении с функцией аудиозаписи и видеотермографирования. Диапазон измерений большинства тепловизоров, применяемых для решения профессиональных задач теплового неразрушающего контроля зданий, сооружений и инженерных систем, составляет от минус 30 до 650 °С с абсолютной и относительной погрешностью ± 2 °С и ± 2 % соответственно.

При выборе современных тепловизионных камер для конкретных приложений можно ориентироваться на следующие основные характеристики: спектральный диапазон, пространственное разрешение, температурное разрешение, температурный диапазон, частота кадров и другие в зависимости от решаемых задач (мощность, вес, размер, программное обеспечение для обработки изображений, калибровка, объем памяти, стоимость, обслуживание и т. д.).

Спектральный диапазон в котором предполагается эксплуатация камеры. Известно, что различные материалы при

температуре окружающей среды излучают волны длиной 7,5-14 мкм. При повышении температуры объекта испускаемое тепловое излучение характеризуется более короткими длинами волн. Максимум интенсивности спектрального диапазона электромагнитного излучения Солнца приходится на видимую коротковолновую часть спектра (жёлто-зелёную). Поэтому камеры, рассчитанные на работу в волновом диапазоне 7,5-14 мкм будут предпочтительнее для выполнения работ в условиях солнечной радиации. В этом случае погрешности измерений из-за солнечной радиации будут меньше. С другой стороны, камеры с коротковолновыми системами (2–5 мкм) могут лучше использоваться в пасмурные дни или ночью, т.е. при отсутствии солнечного излучения.

От пространственного разрешения, т.е. способности тепловизионной камеры различать два объекта в ее поле зрения, существенно зависит качество изображения. Пространственное разрешение камеры определяется системой линз, размером детектора, расстоянием между тестируемым объектом и камерой. Чем больше это расстояние, тем меньше пространственное разрешение.

Температурное разрешение камеры — это минимальный температурный перепад, который может быть обнаружен с помощью тепловизионной камеры. Температурное разрешение зависит от многих параметров: температуры объекта и окружающей среды, расстояния от камеры до объекта, фильтров.

Температурный диапазон определяется максимальным и минимальным значениями температур, которые может измерить камера. Эти значения могут варьироваться в зависимости от технических характеристик прибора и учитываются при выборе камеры для конкретных условий ее работы.

Частота кадров, т.е. количество кадров которое может быть получено в секунду, является важной характеристикой для быстро протекающих процессов.

При выборе камер часто отдают предпочтение наиболее известным отечественным и зарубежным производителям тепловизионного оборудования, в ряду которых FLIR Systems (США), Testo SE & Co. KGaA (Германия), ООО «ИРТИС/IRTIS» (Россия) и др.

3.3. Погрешности при тепловизионных измерениях

Измерение температуры поверхности твердого тела 1 компьютерной термографической системой 4 основывается на исследовании его собственного инфракрасного излучения и производится дистанционно, в соответствии со схемой рис.3.7. Электрический сигнал, фиксируемый преобразователем термографической системы 4 пропорционален суммарному потоку излучения W , падающему на преобразователь: $W = W_1 + W_{23} + W_4$. Слагаемые W_1, W_{23}, W_4 соответственно равны потоку излучения с контролируемой поверхности элемента 1; потоку фоновой засветки посторонними тепловыми излучателями 2, 3; потоку собственного излучения термографической системы 4. Поток W_4 стабилизируется разработчиками термографической системы 4 [38 – 40]. Поэтому возможные погрешности при измерении этим способом температуры тел определяются ходом собственного излучения поверхности, фиксируемые по изменению суммарного коэффициента излучения [22; 38; 72], и фоновыми помехами.

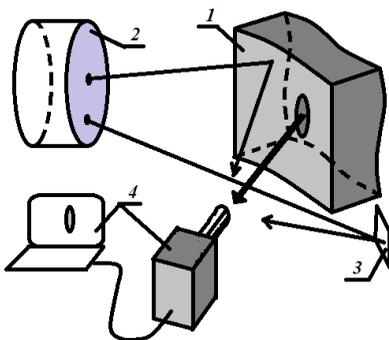


Рисунок 3.7 – Схема измерения тепловизором поверхностной температуры изделия при наличии помех

Точность измерения температуры контролируемой поверхности элемента, расположенного в воздушной среде, по инфракрасному излучению зависит от черноты излучения, фоновой засветки, поглощения инфракрасного излучения в

воздухе, его ослабления оптической системой и чувствительности приемников излучения выбранной термографической системы. Рассмотрим влияние названных факторов на процесс измерения температуры поверхности.

Коэффициент теплового излучения ε связан с коэффициентом отражения ρ зависимостью $\varepsilon + \rho = 1$, из которой следует, что при высоком коэффициенте отражения ($\rho \cong 1$) тепловизионные измерения температуры невозможны (без специальных мероприятий). Поэтому в работе [38] измерение температуры по инфракрасному излучению рекомендуется для неметаллов, черных металлов и сплавов, имеющих высокие коэффициенты излучения. Поверхность элементов стальных конструкций, как правило, покрыта окислами, антикоррозионными составами, слоем пыли, водяной пленкой и т.д. Коэффициенты теплового излучения защищенной такими слоями поверхности достаточно высокие [38 – 41; 60; 61]. При необходимости черноту поверхности контролируемых элементов можно существенно повысить нанесением тонких равномерных слоев технологических покрытий. В качестве таковых применяют «лаки, краски различных цветов и типов, суспензию графитового порошка в воде, гравировальную эмаль, сажевые эмульсии, воду, масло» [38 – 40]. Коэффициенты ε при этом можно поднять до 0,93 – 0,98 [38; 60; 61].

Контролируемые элементы поверхности стальных конструкций могут иметь различную ориентацию относительно приемника теплового излучения термографической системы. Обычно стальные элементы находящихся в эксплуатации конструкций за счет естественных и технологических покрытий имеют коэффициенты излучения не ниже 0,70–0,98. Для таких поверхностей обеспечивается достаточно равномерная величина коэффициента излучения при произвольной ориентации излучающих поверхностей [72].

Фоновая подсветка может возникать от предметов, расположенных сбоку от контролируемого элемента (2, рис.3.7) и быть отраженной другими предметами (3, рис.3.7). Источники засветки (лампы, солнечное освещение, приборы отопления, нагретые элементы оборудования, люди и т.д.) вносят существенные погрешности в измеряемые величины температур.

Так тепло, излучаемое человеком, находящимся на расстоянии (1 – 4) м от контролируемого элемента, вносит погрешность в тепловизионные измерения соответственно в пределах (0,4 – 6,7)%. Лампы накаливания, расположенные на таком же расстоянии, дают погрешность в (0,2 – 3,1)% [38]. В работе [38] рекомендуется набор мер, позволяющих устранить или снизить до приемлемых величин погрешности измерений от фоновой засветки. Такими мероприятиями являются: ограничение расстояний между контролируемым элементом и теплоизлучающими предметами, уменьшение отражения с контролируемой поверхности «чернением», использование экранов, выполнение измерений при отсутствии солнечного и другого теплового излучения. Методы «отстройки от влияния фонового излучения» подробно, с практическими рекомендациями, рассмотрены в монографии В.Б Ранцевича [73].

Математическое выражение погрешности измерения температуры поверхности стальных элементов с использованием инфракрасного излучения вытекает из следующих соображений. В монохроматическом интервале длин волн от λ до $\lambda + \Delta \lambda$ величина плотности потока энергии черного тела с температурой T определяется законом Планка (формула 2.1), а при $\exp \frac{c}{\lambda T} \gg 1$ – можно представить формулой Вина (2.2). Учитывая, что яркостную температуру T_y серого тела ($\epsilon_{\lambda T} < 1$) определяют такой температурой T абсолютно черного тела ($\epsilon_{\lambda T} = 1$), при которой их яркости равны в условиях облучения обоих тел лучами с длиной волны λ , и используя формулу (2.2) для обоих тел, несложно получить выражение, связывающее яркостную T_y и действительную T температуры реального тела

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_y} = \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln \epsilon_{\lambda T}. \quad (3.5)$$

Правая часть выражения (3.5) для реальных тел, у которых $\epsilon_{\lambda T} < 1$, будет всегда отрицательной. Поэтому действительная температура таких тел больше их яркостной температуры. Дифференцируя выражение (3.5) находим

$$\Delta T = \frac{\lambda}{c} \cdot T^2 \cdot \frac{\Delta \varepsilon_{\lambda, T}}{\varepsilon_{\lambda, T}}. \quad (3.6)$$

Из формулы (3.6) получим выражение для относительной ошибки определения действительной температуры реального тела

$$\left| \frac{\Delta T}{T} \right| = \frac{\lambda \cdot T}{c} \cdot \left(\frac{1 - \exp\left(\frac{c}{\lambda T}\right)}{\exp\left(\frac{c}{\lambda T}\right)} \right) \cdot \left(\left| \frac{dE_{\lambda, T}}{E_{\lambda, T}} \right| + \left| \frac{d\varepsilon_{\lambda, T}}{\varepsilon_{\lambda, T}} \right| \right). \quad (3.7)$$

Выражение (3.7) выявляет структуру относительной ошибки для действительной температуры T тела. Определить расчетным путем правую часть выражения (3.7) затруднительно из-за неопределенности относительных величин монохроматической плотности $\left(\left| \frac{dE_{\lambda, T}}{E_{\lambda, T}} \right| \right)$, излучательной способности $\left(\left| \frac{d\varepsilon_{\lambda, T}}{\varepsilon_{\lambda, T}} \right| \right)$ и их изменений. Поэтому при измерениях температуры поверхностей с переменной излучательной способностью необходимо производить проверку точности с использованием тестовых объектов. В качестве тестовых объектов можно применить чистые вещества (металлы), температуры плавления которых хорошо известны. Измерение комбинированным способом температур поверхности реперных зон показывает, что в лабораторных экспериментах погрешность измерения величин температур поверхности образцов по инфракрасному излучению не превышает $\pm 2,0$ градуса.

Характеристики современных термографических систем, применяемых для измерения температуры поверхности стали и других материалов при статических и более быстрых процессах, приведены в работах [38 – 40]. Тепловизор для конкретных измерений обычно выбирают, руководствуясь техническими данными прибора, приводимыми изготовителями (угол обзора по горизонтали и вертикали, частота кадров, диапазон измеряемых температур, возможности программного обеспечения и другие). Правильный выбор тепловизора позволяет обеспечить требуемую точность измерений и уменьшить системные погрешности.

РАЗДЕЛ 4. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА СТАЛЬНЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ТЕПЛОВЫМИ МЕТОДАМИ

Целью диагностирования объектов является определение их фактической работоспособности и возможности надежной и безопасной работы в расчетный период эксплуатации. Достижение такой цели возможно посредством решения ряда задач: контроль технического состояния объекта; выявление мест и причин неисправностей (отказов); прогнозирование технического состояния. Решение таких задач важно в первую очередь для объектов, выработавших установленный ресурс, для объектов после аварий и восстановительных ремонтов. Это может проводиться методами и средствами неразрушающего и разрушающего контроля в соответствии со схемой рис. 4.1.



Рисунок 4.1 – Технологическая схема работ по диагностированию и оценке работоспособности объектов

Из рис.4.1 следует, что технология расчетно-экспертной оценки работоспособности объекта в значительной мере зависит от используемых экспресс-методов неразрушающего контроля (НК). К таким методам относят пассивные физические методы НК, использующие в качестве информативных параметров физические поля, характеризующие собственную (внутреннюю) энергию материала объекта контроля. Одним из таких экспресс-методов является тепловой контроль [22; 38 - 41].

Суть тепловизионного метода диагностики заключается в бесконтактной регистрации температурного поля на поверхности объекта измерительной аппаратурой, построении и анализе термограмм с использованием ЭВМ для обнаружения дефекта, его классификации и последующего принятия решения. Место расположения дефекта при такой диагностике характеризуется резким изменением температуры в локальной зоне по сравнению с бездефектными областями. Методика тепловизионной диагностики включает следующие шаги: 1) определение начальных условий диагностики и параметров окружающей среды; 2) методом бесконтактного измерения температуры поверхности диагностируемого объекта производится регистрация температурных полей в виде термофильма или набора термограмм; 3) на основе технической документации и данных расчетного моделирования диагностируемого объекта выполняется сравнение термограмм (термофильма) с конструктивными особенностями и техническими характеристиками объекта; 4) в результате анализа обнаруженных тепловых аномалий на поверхности диагностируемого оборудования определяются степень его дефектности и характеристики выявленных дефектов.

Первым шагом в процессе визуализации невидимых невооруженным глазом дефектов, несоответствий, отклонений и т.д. является правильный выбор тепловизора, технические характеристики которого должны полностью соответствовать программе работ. При выборе тепловизора обычно учитывают основные параметры, характеризующие диагностическую тепловизионную систему (тепловизор):

- диапазон температур тепловизора - определяет предельные температуры, которые способен измерять и записывать тепловизор;

- температурная чувствительность тепловизора - характеризует чувствительность тепловизора к разнице температур между двумя соседними точками (чем ни же этот показатель, тем выше разрешающая способность прибора и тем лучше качество снимка);

- частота обновления кадров тепловизора - информирует о том, сколько раз в секунду происходит обновление кадров на дисплее тепловизора (чем выше этот показатель, тем лучше качество картинки на экране прибора);

- матрица тепловизора – определяет разрешающую способность тепловизора;

- функция определения минимальной/максимальной температуры объекта – эта функция полезна для определения температурных аномалий.

- наличие в тепловизоре встроенной цифровой камеры: используемая в конкретных исследовательских или производственных целях инфракрасная тепловизионная система принимается для решения планируемого спектра задач, для которых обычно важны следующие технические характеристики: температурный диапазон, температурная чувствительность, точность измерений, разрешение сенсора, скорость сбора данных и другие.

Тепловой диагностический контроль объектов проводится в соответствии с методиками, изложенными в государственных стандартах и других технических нормативных актах.

Тепловые методы диагностики объектов имеют ряд преимуществ перед другими методами:

- широкая область применения - возможность осуществления контроля как с тепловым нагружением объекта (активный тепловой контроль), так и без теплового нагружения (пассивный тепловой контроль);

- большая возможность автоматизации процесса контроля вследствие его дистанционности - наличие некоторого определенного (иногда значительного) расстояния между объектом исследования и аппаратурой контроля;

- высокая производительность контроля при практически любой величине разрешения вследствие его дистанционности и применения современных средств тепловизионной техники, обеспечивающих регистрацию миллионов элементов в секунду;

- возможность несложной мобильной аппаратурной реализации;

- в большинстве случаев малые временные и финансовые затраты на внедрение, т.к. отсутствует необходимость в специальных дорогостоящих и сложных системах сканирования.

Наиболее широкое применение тепловая диагностика нашла в следующих областях:

- научные исследования (интроскопия и др.);

- промышленность (диагностика температурного режима объектов, исследования материалов);

- строительство и транспорт (энергоаудит, обнаружение утечек тепла, дефектов футеровки, теплоизоляции зданий и сооружений, электродвигателей, контактных соединений, участков перегрузки кабелей, состояния трансформаторов, энергетических объектов различного назначения, подшипниковых узлов, их уплотнений и т.д. в процессе эксплуатации, работоспособность транспортных объектов);

- военная техника (обнаружение и распознавание объектов в условиях тепломаскировки, оценка качества тепловой маскировки, исследование излучения целей и фонов, сигнатурная разведка, исследование систем противодействия, диагностика работоспособности систем и узлов).

- экология (экологический мониторинг, обнаружение лесных пожаров); медицина (ранняя диагностика сложных заболеваний), ветеринария.

4.1. Тепловой контроль изделий

4.1.1. Методы теплового контроля

Первоначально тепловые методы неразрушающего контроля, основанные на регистрации тепловых полей объектов различных отраслей деятельности людей, нашли широкое применение в военных технологиях [74–76]. С развитием теории теплового

неразрушающего контроля, приборного, нормативного и организационного обеспечения получили дальнейшее развитие **активные и пассивные тепловые методы** в гражданских технологиях [38; 40; 74–77].

В настоящее время тепловые пассивные методы применяются для первичной диагностики [78] стальных несущих элементов, контроля напряженного и деформированного состояний [79–81], выявления зон пластических деформаций в нагруженных элементах, зарождения и развития в них трещин [82–84]. Тепловой пассивный контроль применяется при определении остаточного ресурса конструкций [85]. Имеются примеры его использования в технологии изготовления стальных изделий [86–88]. В статье [86] на основании анализа современных методов и средств неразрушающего контроля сварных соединений, выполненных контактной точечной сваркой (капиллярных, оптических, вихретоковых, магнитных, электрических, тепловых, радиационных, акустических), отмечается, что недостатки каждого из перечисленных методов не позволяют гарантировать надежное выявление дефекта. Авторы [86] считают, что перспективным направлением неразрушающего контроля является развитие и использование бесконтактных методов, а тепловые методы могут применяться как для контроля сварных соединений, так и для управления технологическим процессом сварки.

В работе [87] экспериментально подтверждается, что по тепловому излучению можно выявлять непровары, глубины проплавления, линейные соотношения между поверхностным нагревом и глубиной проплавления при электродуговой сварке в среде защитного газа. На основе инфракрасных термографических измерений возможна оптимизация параметров сварки [88]. Ее эффективность возрастает при совместном использовании тепловых методов и численного моделирования [88].

Решение задач технической диагностики стальных строительных систем предполагает выполнение анализа и оценку напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов и всей системы, а также кинетики

его изменения с учётом имеющихся дефектов и повреждений [89; 90]. Экспериментальные методы определения напряженно-деформированного состояния металлоконструкций (механическое тензометрирование, методы сверления, покрытий, рентгеновского, лазерно-компьютерного, магнитного, акустического тензометрирования, спекл-интерферометрия и др.) являются средствами наиболее достоверной оценки технического состояния объектов [91]. Каждый из этих методов имеет конкретную область применения. К универсальным можно отнести механическую тензометрию, рентгеновские и ультразвуковые методы. Названные методы трудоемки, сложны в применении, характеризуются невысокой достоверностью результатов исследования вследствие зависимости от случайных факторов [91; 92]. Кроме того, эти методы не применимы при появлении пластических деформаций стали. Существенным недостатком большинства методов неразрушающего контроля является то, что: 1) при испытаниях производятся измерения качественных параметров, не имеющих прямой связи с НДС; 2) такие испытания позволяют обнаружить дефект или проследить процесс зарождения и разрушения в элементе, но они не дают возможности определения прочности элементов, разрушающих нагрузок и срока службы.

Вместе с тем при рассмотрении недостатков методов неразрушающего контроля следует иметь в виду функции строительных, в том числе стальных, конструкций, прежде всего их несущую способность, характеризующуюся недопущением установленных предельных состояний [93]. Выполнение таких требований производится посредством сопоставления левой и правой сторон расчетных неравенств (их отношения), определяющих условия реализации предельных состояний [93]. Стандарт [93] разделяет предельные состояния конструкций на две категории: 1) когда после достижения предельных состояний дальнейшая эксплуатация недопустима из-за последующего наступления аварийного состояния или аварий с катастрофическими последствиями; 2) когда невозможна дальнейшая нормальная эксплуатация из-за сверхнормативных деформаций, прогибов, перемещений с отсутствием вероятных аварийных состояний или аварий. Особенно опасны по своим

последствиям разрушения растянутых элементов конструкций (хрупкие, усталостные и др.). При диагностике состояния элементов строительных стальных конструкций, находящихся под действием растягивающих усилий, важно инструментально выявлять действительное напряженно-деформированное состояние в конструкционных элементах пониженной трещиностойкости, зоны появления пластических деформаций, участки зарождения трещин, контролировать рост трещин. Также необходима оценка сопротивляемости стального проката, соединений растяжению в зонах расположения концентраторов напряжений при различных воздействиях на конструкцию (температурных, радиационных, ударных и др.). Выявляемые при испытаниях или неразрушающем контроле характеристики разделяются на количественными или качественными [94]. Тепловые пассивные методы неразрушающего контроля можно также разделить на количественные и качественные, а по способу получения зависимостей между диагностическими параметрами и НДС – на детерминированные и корреляционные (рис. 4.2). Источником тепла в методах рисунка 4.2 являются деформации, возникающие при испытаниях, эксплуатации контролируемых стальных элементов. При постоянной нагрузке на элемент деформационные источники тепла не возникают. В этом случае для теплового неразрушающего контроля можно использовать активные методы. Тепловую активацию контролируемых зон элементов в этом случае производят с использованием дополнительных тепловых источников различной физической природы [38].

Наиболее распространены методы нагрева объектов контроля под действием оптического излучения, вихревых и электрических токов, электромагнитного излучения сверхвысокой частоты, горячих газов или жидкостей, вибрации и колебаний, лазерного излучения и других воздействий [38]. Источники тепловой стимуляции могут проявляться постоянно или в отдельные периоды функционирования объектов контроля. Наиболее часто сооружения испытывают временные воздействия и нагрузки в периоды пуска-наладки, испытаний, кратковременных технологических циклов. В такие периоды работы сооружений в элементах происходит диссипация

энергии, возникающей при функционировании объекта контроля, в тепловую, 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 производится при инициировании в нем тепловых источников в результате технологического функционирования и поэтому на него затрачивается меньше ресурсов, чем при активном режиме.

Отсюда также вытекает, что для повышения точности и достоверности определения НДС элементов металлоконструкций, зарождения и развития в них дефектов целесообразно развивать пассивные методы теплового контроля.

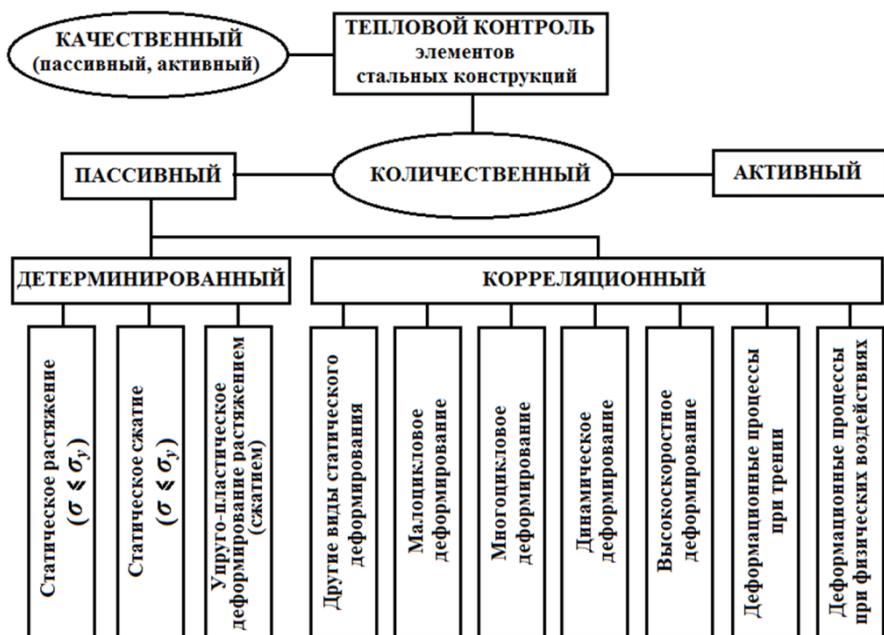


Рисунок 4.2 – Классификация методов теплового контроля элементов стальных конструкций

4.1.2. Теплообразование при деформировании

На тепловые эффекты при деформировании твердых тел обращали внимание многие ученые еще в начале XIX в.: Д. Гаф (1805), Г. Вертгейм, Г. Кориолис (1830), В. Вебер (1830), Дж. Джоуль (1857) [95; 96]. Если выполненные до 1830 г. экспериментальные исследования по теплообразанию в материалах можно отнести к качественным, то уже первая экспериментальная работа В. Вебера [97] стала классической, рассматриваемой в исторических исследованиях по механике в качестве основополагающей для термоупругости как науки [95]. В. Вебер впервые установил [97], что растяжение металлической струны приводит к её охлаждению, а усилия сжатия вызывают ее нагрев. Для материалов, исследованных Дж. Джоулем, получено, что температура материала уменьшалась с увеличением объема при осевом растяжении и росла при сжатии. Э. Эдлундом экспериментально доказано, что при увеличении в процессе деформации объема материала происходит снижение его температуры и наоборот при разгрузке [95]. Точные калориметрические исследования тепловыделений при растяжении гладких цилиндрических образцов впервые выполнил Хорт [98]. Опыты с выделением тепла при переменных нагрузках изложены в работе [99]. Измерения температуры в работах [98; 99] выполнялись ртутными термометрами (с точностью до $0,01^{\circ}\text{C}$).

В послевоенные годы исследовательские работы по теплообразанию в конструкционных металлах в значительной мере определялись уровнем развития измерительной техники по термометрии металлических материалов. Наиболее распространенными в исследованиях температурных полей в это время стали контактные термопреобразователи и соответствующая измерительная аппаратура, в которых термометрическим признаком является электрический сигнал (термопары, термосопротивления). С конца 60-х гг. прошлого века для фиксации тепловых полей поверхностей твердых тел начинают применяться приборы, использующие инфракрасное излучение (тепловизоры и жидкие кристаллы).

Рассмотрим литературные сведения по теплообразованию при различных стадиях деформирования металлических материалов: упругой, упруго-пластической, пластической и разрушении.

Теплообразование при упругой работе материала. В 1855г. В. Томсон опубликовал свои теоретические идеи по термоупругому деформированию твердых тел и показал, что между мгновенными изменениями температуры тела и напряжения существует линейная зависимость [100]. Выводы В. Томсона хорошо подтверждались экспериментами Дж.Джоуля. В опытах Хорта, Тейлора, Фаррена, Квинни [101; 102] показывается, что около 90 % всей механической работы деформирования образцов из пластичных металлов превращается в тепло, а другая часть работы накапливается в испытываемом деформационное упрочнение материале.

В это же время появляются исследования по применению теплового эффекта при анализе различных видов деформаций стержней [101–105]. А. Надаи [101] в опытах по растяжению и сжатию стержней из низкоуглеродистой стали, выполненных в рамках его диссертационной работы, подтвердил формулу Томсона и предложил по изменению температуры деформации определять предел текучести. Он установил, что в появляющихся при деформировании растянутого стального стержня поверхностях скольжения происходит локальный рост температуры [101]. В 1908 г. А. Н. Динник находил предел упругости, измеряя термопарой температуру образца, растягиваемого в машине Гагарина [103]. Профессор С.И.Дружинин обосновал возможность определения предела упругости стали по данным измерения температуры растягиваемого стандартного образца с большей точностью, чем это достигалось механическими методами [104]. До середины XIX в. были исследованы механические характеристики основных конструкционных металлов и сплавов в функции температуры и процессы образования тепла при упругих и упругопластических деформациях [105], разработаны основы теории термоупругости [101].

Нагрев материала при упругопластическом деформировании. В послевоенное время в физике [106–108] и в

прикладных науках [109–121] значительно возросло количество экспериментальных и теоретических исследований тепловых эффектов при упругопластическом деформировании металлов и сплавов. Наибольшее их число относится к процессам обработки материалов (штамповке, резанию, обработке электрической дугой, лазером и др.) [109–120]. Начало этим исследованиям положили работы Н. Н. Савина (1910) и Я.Г. Усачева (1916), а с 50-х гг. предшествующие знания силами многих ученых выкристаллизовывались в теорию теплофизики резания [109].

Теплообразование при обработке металлов и сплавов давлением представляет значительный интерес и для металлургов [110; 117; 118; 122]. При этом было установлено [110], что энергия деформирования тела превращается: 1) в потенциальную энергию упругой деформации, часть которой освобождается при разгрузке тела, а другая – остается в теле как связанная потенциальная энергия; 2) в тепловую энергию пластической деформации. Отношение (η) количества работы деформирования тела A_m , превратившейся в тепло, к количеству работы A , затраченной на формоизменение тела, называют [102; 110] выходом тепла

$$\eta = A_m/A. \quad (4.1)$$

С учетом (4.1) тепловой эффект (Q) пластической деформации выразится так:

$$Q = A_m = \eta \cdot A. \quad (4.2)$$

Отсюда следует, что тепловой эффект при прочих равных условиях тем выше, чем больше выход тепла, сопротивление деформированию и деформированный объем и чем меньше связанная потенциальная энергия. Выход η тепла в случае пластического сжатия дуралюмина при 20 °С составляет $\eta = 0,77$; для технического алюминия $\eta = 0,93$, для стали $\eta = 0,84–0,88$ и для меди $\eta = 0,92$.

В случае пластического сжатия при 20 °С принимают: для магния, алюминия, меди и железа $\eta = 0,85–0,9$; для сплавов из указанных металлов $\eta = 0,75–0,85$ [110]. Повышение температуры

в процессе деформации может достигать весьма значительных величин, особенно если деформация протекает кратковременно и тепло не успевает рассеиваться в окружающую среду. Экспериментально показано, что при комнатной температуре нагрев образца из дуралюмина диаметром и высотой 11,1 мм при ударе по нему падающим с высоты 3 м бойком весом 50 кг (степень деформации – 89,2 %) происходит с 13 до 317 °С [110]. Стальной образец при неупругом ударе на копре Амслера нагревался до температуры порядка 650 °С за тысячные доли секунды [111]. Если ковать брусок металла при температурах, когда металл сохраняет темный цвет, то при первых сильных ударах наблюдается свечение полос, возникающих на боковой стороне бруса, примерно под углом 45° к направлению действующей силы [110]. При динамическом воздействии на образцы отожженной стали (0,35 % С) за доли секунды (10^{-3} – 10^{-2}) на поверхности появляются светлые полосы толщиной до 100 мкм, температура средней части которых достигает 1200 °С и выше. В материале полосы происходят фазовые превращения [112]. При динамическом сдвиге стальной пластины в зоне максимальных касательных напряжений наблюдалось повышение температуры до 900 °С [113]. В отдельных случаях следствием деформирования является образование новых фаз [110; 112; 114].

Значительные тепловыделения происходят и при внешней трении двух тел [115]. Пластическое деформирование поверхностных слоев материала сопровождается образованием тепла, приводящим к изменению физических, механических и других свойств материалов и к образованию связей между трущимися поверхностями [115; 119].

При высоких скоростях деформирования материалов в процессе сварки взрывом в зоне соединения происходит значительное выделение тепла, приводящее к расплавлению металла [116]. При более низких скоростях и усилиях деформирования также проявляется значительное тепловыделение [117; 118; 123]. Температура металла при циклических нагружениях достигает нескольких сотен градусов [124 – 127]. В работе [125] сделана попытка прогнозирования долговечности элементов с использованием их разогрева при усталости.

При статическом растяжении элементов стальных конструкций с дефектами (концентраторы напряжений, механические, технологические дефекты), образцов авторами работ [128 – 131] отмечается теплообразование как на участках с конструктивными надрезами, дефектами, так и на бездефектных. При этом в пределах упругой работы материала в образцах без дефектов заметно охлаждение материала на несколько десятых градуса, а с момента образования площадки текучести наблюдалось линейное во времени увеличение температуры гладкого образца (примерно до 6 °С).

Статическое растяжение крупноразмерных образцов с надрезами и элементов стальных конструкций в зонах дефектов также сопровождается образованием тепла [128; 129]. Нагрев зон зарождающегося разрушения в конструктивно-технологических формах зависит от деформации металла у надреза и изменяется от нескольких градусов до 40 – 70 °С [133]. В работе [128] показано, что ключом к уяснению механизма действия температуры на прочность надрезанных образцов является локализация пластической зоны у надреза. Чем больше объем пластически деформированного металла и величина деформаций, тем выше его температура. Так как при теплофизических процессах существенную роль играет время, то следует ожидать противоположных эффектов при больших и очень маленьких скоростях деформирования. Этим в работе [128] объясняется наличие максимума на температурной кривой прочности образцов и ее зависимость от комплексного действия скорости деформирования.

В работах [132 – 134] показано, что диссипативные процессы можно использовать для исследования природы пластического деформирования металлических материалов. При этом пластическую деформацию следует рассматривать как коллективный процесс образования и эволюции самоорганизующихся диссипативных структур, протекающий на различных взаимосвязанных уровнях [134]. По американским данным [135], доля запасенной (латентной) энергии в телах при холодном деформировании изменяется в пределах от 1 до 90% (в большинстве случаев 15 %).

Системные экспериментальные исследования процессов диссипации энергии при деформировании различных металлов, после облучения в исследовательском реакторе и необлученных проводились в Казахстане О. П. Максимкиным с сотрудниками [136 – 151]. Исследования выполнялись с использованием калориметрической установки, которая позволяла определять в широком интервале температур и скоростей испытаний энергетические характеристики деформационных процессов: работу деформации, рассеяние тепла, запасание энергии в металлических материалах; восстанавливать кривую «истинного» тепловыделения и получать зависимость энергетических характеристик деформирования от степени деформации по результатам непрерывного одноосного растяжения одного образца. Частота снятия показаний приборов варьировалась от 10 до 40 Гц [139]. С использованием установки выполнена серия работ по изучению деформационных и температурных закономерностей накопления и рассеяния энергии для ряда металлов и сплавов, включая низкоуглеродистую сталь [136 – 138]. Полученные экспериментальные результаты изложены в статьях [139–150] и частично обобщены в диссертации Д.А.Токтогуловой [151]. Авторами работ [139–150] экспериментально исследованы на малых образцах диссипативные процессы на различных стадиях пластической деформации металлических сплавов и металлов (армко-железо, стали 12Х18Н10Т, 08Х16Н1М3, Ст3, сплав 0Н45М4БЧ, никель, ниобий) без облучения и облученных нейтронами до различных флюенсов. Получено, что диссипативные процессы идут наиболее интенсивно на стадиях деформационного упрочнения и локализации деформации [139–150]. Установлено, что переходы материала от упругого к упругопластическому состоянию и обратно сопровождаются тепловыми эффектами, обусловленными эволюцией его дефектной структуры. Показано, что в ходе статического растяжения образцов из Ст3 размером 10×3,5×0,3 мм в установке [138] процессы деформирования и тепловыделения взаимосвязаны [139]. Выделение тепла локализуется в полосах сдвига. Плотность тепловыделения в них выше средней плотности в объеме образца примерно на порядок.

Величина энергии, запасенной в полосах сдвига, достигает 70 % от затраченной на деформирование образца работы.

Подобные зависимости получены для железа технической чистоты, ниобия [142], армко-железа, никеля и хромоникелевых сплавов [143; 146; 148].

В работе [143] для облученных и необлученных аустенитных коррозионно-стойких сталей экспериментально выявлены деформационно-силовые границы стадий пластического течения. Допуская, что каждая структурная реакция развивается по циклу «зарождение – развитие – доминирование – убывание – прекращение», ее эволюцию авторы [143] описывают выражением

$$V_{xi} = \exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{oi}}{2d_i}\right)^n, \quad (4.3)$$

а результирующую функцию представляют в виде суперпозиции спектров поглощения механической энергии для каждой структурной реакции:

$$dP(\varepsilon) = \sum_{i=1}^N d_{pi} V_{xi}, \quad (4.4)$$

где $\sum_{i=1}^N V_{xi}$ – количество структурных реакций; $2d_i$ – дисперсия; ε_i – средняя величина деформации, связанная с i -й реакцией.

По данным анализа зависимостей работы (A), теплоты (Q), поглощенной энергии (Es) от относительной деформации (ε) для исследуемой стали и расчетов по выражению (1.4) выделены пять стадий деформирования материала. Показано [143], что с ростом степени деформации растянутого образца диссипативные характеристики материала существенно изменяются при переходе от первой стадии к последующим: повышается способность материала рассеивать подводимую извне механическую энергию, уменьшается возможность ее аккумуляирования. Анализируя изменение диаметра деформируемого образца в различных точках, авторы [143] установили, что деформация уже на ранних этапах растяжения образца становится неоднородной. Оже-анализ поверхности разрушения образца позволил авторам [143] установить, что после разрушения образца концентрация углерода, бора, серы, фосфора на поверхности излома значительно выше их среднего содержания по объему. При этом наиболее значительным является рост концентрации углерода. В

работах [144; 151] экспериментально показано, что при деформации облученных нейтронами металлов и сплавов может выделяться количество теплоты, значительно превышающее работу деформации.

В работах [144; 145; 149] исследованы особенности процесса пластического деформирования облученных сталей. При этом установлено, что в облученном растянутом образце образование шейки начинается непосредственно после достижения предела текучести с дальнейшим развитием пластической деформации за счет одной-двух полос скольжения.

Требует отдельного обсуждения выявленный в работах [144; 151] эффект превышения выделившегося тепла над работой деформации $Q > A$ (аномальное тепловыделение). Дополнительных исследований требует и поведение пластических деформаций при электронном воздействии [152–154].

Экспериментально установлено [155–161], что активация процессов рождения, взаимодействия и аннигиляции дефектов в результате пластических деформаций различной природы, особенно в условиях, близких к порогу разрушения материала и при разрушении, сопровождается эмиссией частиц и света (электронов, ионов, атомов, кластеров и фотонов). Эффекты люминесценции проявляются и при других воздействиях на металлы, при которых происходит быстротекущее искажение кристаллической решетки [160; 161]. Различают механолюминесценцию, определяемую излучением фотонов, и тепловую эмиссию (экзоэмиссию), вызываемую излучением частиц [156; 157; 160, 162–168]. Явление механолюминесценции первоначально исследовалось на многих металлах и сплавах, в основном, при деформировании растяжением и сдвигом [162]. Установлено [163], что интенсивность механолюминесценции зависит от величины и скорости внешних воздействий, а также от концентрации и подвижности дефектов, и в разных материалах (при одинаковых механических нагрузках) может отличаться на порядки. Возбуждение механолюминесценции в результате пластической деформации проводилось в основном на пластичных металлах (Ag, Au, Pt, Cu), и первоначально для объяснения соответствующих экспериментов был предложен

«дислокационный» механизм ее возбуждения, основанный на излучении энергии деформирования в процессах аннигиляции дислокаций противоположного знака в тонком поверхностном слое при выходе их на поверхность [164–167]. В работе [163] сделан вывод, что причиной механолюминесценции металлов являются реакции взаимодействия зернограницных дислокаций с примесями, локализованными в межзеренной области. Экспериментальные данные были объяснены [163 – 168] в рамках «дислокационного» механизма возбуждения механолюминесценции, основанного на излучательных процессах аннигиляции дислокаций противоположного знака в тонком поверхностном слое и с выходом их на поверхность. Согласно этому механизму, способность металла люминесцировать при пластической деформации определяется наличием подвижных (слабозакрепленных) дислокаций в образце, а интенсивность люминесценции должна зависеть от количества «проаннигилировавших» или вышедших на поверхность дислокаций в единицу времени. При разрушении материала вблизи вершины трещины образуются пластические зоны с высокой концентрацией дислокаций. После снятия нагрузки происходит дислокационный возврат деформируемого слоя, связанный с аннигиляцией пар дислокаций противоположного знака и с выходом подвижных дислокаций на поверхность. Реальные дислокации в металлах имеют сложную структуру, поэтому их полная аннигиляция маловероятна. В каждой дислокационной реакции возможна аннигиляция только отдельных параллельных отрезков. Аннигиляция таких отрезков сопровождается выделением значительной энергии, достигающей нескольких электрон-вольт на одно межатомное расстояние [160; 162]. Если исходить с позиций этого механизма, то для хрупких металлов, подвижность дислокаций в которых значительно ниже, чем в вязких, следовало бы ожидать очень слабую люминесценцию. Также должна быть незначительной механолюминесценция в образцах, имеющих микронные размеры, так как в их объеме дислокаций практически нет (дислокации выходят на поверхность), что в основном подтверждается экспериментально [168].

Сопоставление величин, а также временных и пространственных распределений напряжений и температур с временными зависимостями эмиссии фотонов (механолюминесценция) и частиц (экзоэмиссия), полученных различными исследователями, позволило авторам работы [160] установить, что: 1) динамика эмиссионных процессов коррелирует с динамикой напряжений – чем больше скорость изменения напряжений, тем выше интенсивность процессов механолюминесценции и экзоэмиссии; 2) механолюминесценция и экзоэмиссия начинаются тогда, когда напряжения в материале близки к его пределу текучести. В работе [161] отмечается, что интенсивность механолюминесценции зависит от скорости деформации и концентрации различных структурных дефектов.

Деформационный нагрев в зонах дефектов и трещин. Дефекты в нагруженных объемах материалов приводят к развитию деформации в их окрестностях, структурным изменениям, значительному росту температуры в деформированной области [110; 112; 169–179]. По теоретическим оценкам в элементах с трещиной, деформируемых при 300 К (27 °С), средняя температура в вершине трещины может достигать для титанового сплава $\Delta T = 120$ °С, для алюминиевого сплава $\Delta T = 80$ °С, для мягкой стали $\Delta T = 60$ °С [170].

При увеличении скорости движения трещины в титановом сплаве до 900 м / с возможен рост температуры на $\Delta T = 1\ 400$ °С [173].

Макроскопический и локальный нагрев элементов конструкций при их деформировании в условиях низкотемпературного охлаждения. Рассмотренные выше исследования по теплообразованию в деформируемых конструкционных металлах и сплавах проводились в условиях положительных температур. При низких температурах пластическая деформация протекает неравномерно как во времени, так и по всему объему материала [171]. Поэтому должно возникать значительное локальное повышение температуры в зонах скольжения. Однако механизм влияния локальных нагревов на возникновение и развитие пластической деформации во многом неясен до сих пор. Это связано с тем, что в настоящее время практически отсутствуют сведения о размерах областей

локального скольжения и скоростях деформации в них. От этих величин в значительной степени зависит повышение температуры в зоне скольжения, зарождение и развитие дислокаций. А. В. Степанов еще в 1933 г. высказал гипотезу о том, что выделяющееся в кристаллах при пластической деформации тепло локализуется в узких участках материала вдоль плоскостей скольжения [172–174]. Допуская, что эти слои в кристаллах каменной соли имеют толщину 10^{-6} см, он в адиабатическом приближении оценил их нагрев в 2800 К, что примерно в три раза выше температуры плавления кристалла. Подтверждение своей гипотезы А.В. Степанов нашел по резкому повышению электропроводности указанных кристаллов в процессе их деформирования [174].

Теплообразование при температурах близких к абсолютному нулю имеет самостоятельную научную и практическую значимость для технологий при криогенных температурах [169]. Наряду с этим оно позволяет более глубоко изучить механизмы образования и рассеяния тепла в твердых телах и учитывать их как при теоретическом анализе, так и при экспериментальном изучении механического поведения твердых тел и при более высоких температурах.

В области криогенных температур выполнен ряд исследований по деформационному нагреву твердых тел из различных материалов [169; 170; 175–178; 180; 181]. С использованием зачеканенной термопары установлено, что при растяжении чистых ГЦК-металлов (Al, Si, Ni) их температура при скоростях деформации около 10^{-4} с⁻¹ возрастает на 1–2 К выше температуры жидкого гелия, в котором они находились ($T = 4,2$ К) [169]. При пластическом деформировании металлов и сплавов растяжением в жидком гелии процесс сопровождается значительным макроскопическим повышением температуры деформируемых образцов.

З.Басинский [176] показал, что температура растягиваемых образцов из алюминиевого сплава превышает температуру гелиевой ванны (4,2 К) не менее чем на 4,8 К. Повышение температуры образцов в жидком гелии наблюдалось также и на других материалах [169; 170; 175–181]. Максимальные измеренные величины нагревов достигали: при растяжении – 35

К для медно-никелевых сплавов и 40 К – для сжатых образцов из ниобия и тантала.

Немалый интерес вызвало влияние теплообразования на скачкообразное развитие деформаций в различных металлах и сплавах при криогенных и более высоких температурах [139; 169; 170; 175–181]. Наиболее непротиворечиво природа скачков объясняется исходя из термической нестабильности процесса деформации, приводящей к локальному разогреву материала при очень низких температурах и малых значениях его теплоемкости и теплопроводности [169].

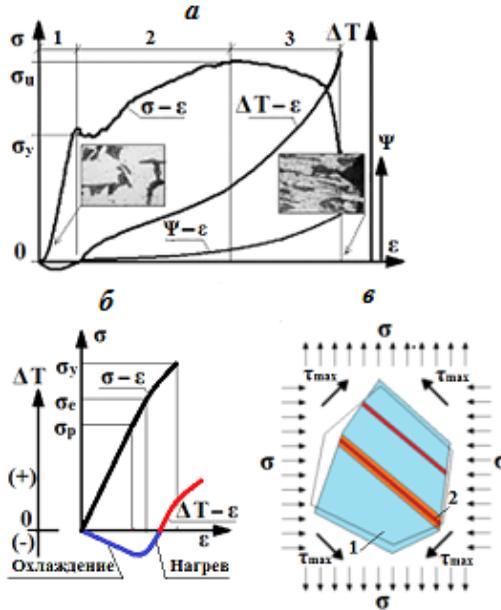
Для выявления закономерностей процесса скольжения в кристаллах при криогенных температурах авторы работы [169] применили метод пузырьков, основанный на использовании особенностей жидкого гелия, теплота парообразования которого при весьма низких температурах составляет 20 Дж/г. Энергия образования газового пузырька критического радиуса равна 10^{-7} – 10^{-5} Эрг при критических размерах пузырька порядка 10^{-7} – 10^{-6} см. Это позволяет использовать газовые пузырьки в качестве детекторов источников тепла малой интенсивности и местоположения последних на поверхности твердых тел. Наблюдения показали [169], что общее количество пузырьков и их размер зависят от температуры жидкого гелия (давления газа над свободной поверхностью жидкости) и скорости деформации. При понижении температуры размер пузырьков в несколько раз увеличивается, а их число значительно уменьшается. При скорости деформации, не превышающей $0,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, устойчивых пузырьков возникает мало, а при увеличении скорости происходит интенсивное вскипание гелия на поверхности кристаллов. При остановке силонагружения появление новых пузырьков на поверхности прекращалось, а «старые» постепенно уменьшались в диаметре, конденсировались, не меняя своего местоположения. При повторном включении экспериментальной установки пузырьки появлялись вновь. Из рассмотренных экспериментов следует [169], что образование газообразного гелия из его жидкой фазы происходит за счет теплоты, образующейся при деформировании кристаллов.

Из вышеизложенного следует, что **теплообразование при деформировании твердых тел 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 рисунка 4.3.

Процесс теплообразования в стали (рис.1) изменяется от ее охлаждения (стадия 1) до заметного нагрева при развитии пластических деформаций (стадии 2, 3). При этом изменяется макроструктура стали, растет повреждаемость ψ (рис.4.3, а), в



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)

Рис.4.3 – Взаимосвязь между диаграммами растяжения, теплообразования, повреждаемости (а, б) и зоны охлаждения (1, голубой цвет) и нагрева (2, красный цвет) контролируемого объема стального изделия

материале происходят экзотермические твердотельные физико-химические реакции, инициированные пластическим деформированием. При упругом деформировании (стадия 1) происходит охлаждение стали (не больше 1 °С). 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 (рис.4.3, б). Параллельно в выделенном объеме материала увеличивается число линий скольжения, в которых развиваются пластические деформации (рис.4.3, 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 (рис.4.3, в) изменение его средней температуры (ΔT_d) будет зависеть от стадии деформирования. 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

$$\Delta T_d = (1-n) \Delta T_e + n(\Delta T_p + \Delta T_r), \quad (4.5)$$

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 (4.5) 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 аварийных 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 производится при иницировании в нем тепловых источников в результате технологического функционирования и поэтому на него затрачивается меньше ресурсов, чем при активном режиме.

Механизм упругопластического деформирования элементов из низкоуглеродистых сталей при статическом нагружении.

Сталь в прокате является поликристаллическим материалом, механические свойства которого в процессе эксплуатации зависят как от начального строения (исходный химический состав, структура), так и от изменений начального строения при изготовлении и работе элементов конструкций [182-186]. При механическом нагружении стальных элементов конструкций происходят изменения на различных уровнях внутреннего строения материала [187], определяющие величину сопротивления конкретной стали напряжениям от внешних нагрузок и воздействий. Существующие методы прочностного расчета элементов стальных конструкций основываются на работе материала как континуума и не учитывают многие особенности процесса деформирования конструктивных элементов из стали. Так, в большинстве расчетных моделей материал представляется упругоработающим от начала загрузки до предела пропорциональности (текучести), т.е. при сопротивлении материала, соответствующего остаточным деформациям 0,005...1 %. Экспериментально показано, что в определяемой таким образом упругой области работы стали деформирование протекает с некоторым развитием пластической деформации (порядка 10^{-5} [185]), т.е. пластическая деформация появляется с самого начала нагружения. Характеристики сопротивления металлов, определяемые по ГОСТ 1497, рассчитываются по данным испытаний стандартных образцов. Они соответствуют кинетике деформирования объема металла конкретной формы при фиксированных условиях нагружения. **Используемые в расчетах стальных конструкций критерии пластичности также основываются на работе материала как континуума. В элементах реальных конструкций процессы возникновения предельных состояний в значительной мере связаны с явлениями локализации пластической деформации [182, 188-190], 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 Л. Гартман (1896 г.) [191]. Возникновение таких фигур зафиксировано в экспериментах с деформированием различных конструктивных форм стальных элементов (рис. 4.4, рис.4.5). При растяжении образцов первые фигуры деформации возникают в окрестности дефектов. Для образца из плоского стального листа последовательность появления линий деформации на поверхности в месте перехода от рабочей зоны к уширению описана А. Надаи [190, 192] и показана на рис.4.4. При росте растягивающего усилия на левой стороне образца (рис. 4.4, в) первой появляется линия «а» (рис. 4.4, а). После ее формирования происходит уменьшение примерно на 5% нагрузки, при которой она появилась и которая соответствует верхнему пределу текучести. Последующее

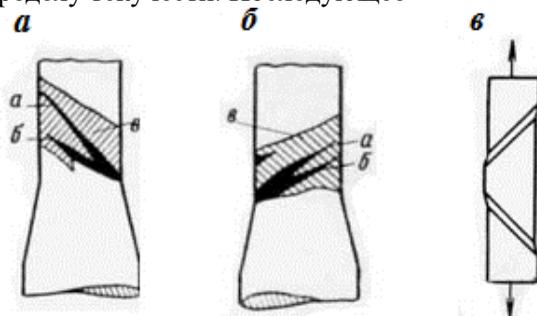


Рис. 4.4. Последовательность появления линий скольжения у дефекта [191; 192]

снижение этой нагрузки еще на 2 % завершилось образованием линии «б» (рис. 4.4, а). При постоянной величине растягивающего усилия от полос «а» и «б» текучесть распространяется в их окрестности и зрительно просматривается в виде широкой матовой полосы «в» (рис. 4.4, а). С другой стороны образца также образуются соответствующие фигуры деформации (рис. 4.4, б). Текучесть распространяется на рабочую зону образца. Две такие полосы деформации приводят к

смещению участка рабочей зоны образца (рис. 4.4, в). В зонах выхода полос деформации на поверхность первоначальная форма поверхности искажается (образуются профили в виде бороздок, выступов, откосов). При дальнейшем развитии местных осевых деформаций (от 2 до 4 %) нагрузка практически не изменяется (после первоначального падения), а рабочая зона полосы деформации образца продолжает вытягиваться в продольном направлении и сужаться в поперечном. Остаточному удлинению в 2...4 % соответствует поперечное сужение в 1...2 %. Прилегающие к полосе участки не изменяют своих размеров, т.е. остаются в упругой стадии работы. Полоса скольжения составляет с направлением растягивающего усилия угол, близкий к 45°. Последовательное развитие полос деформации по длине рабочей зоны образца получено в опытах J. Dudley Jevons [191] и показано на рис. 4.5. Это развитие происходит при напряжениях, соответствующих пределу текучести (рис. 4.5, а – деформация рабочей зоны на 1 %; рис. 2,б – на 2 %). В конце площадки текучести вся рабочая зона оказывается покрытой следами полос деформации.

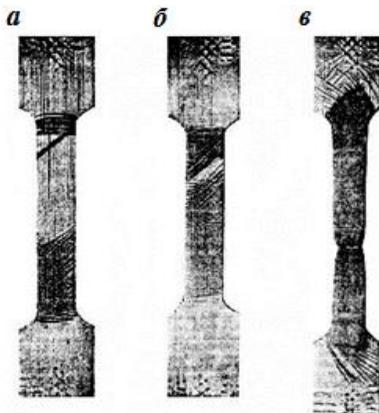


Рис.4.5. Развитие полос скольжения при растяжении [191]

Полосы скольжения появляются и при внецентренном растяжении (рис. 4.6, а), сжатии (рис. 4.6, б), изгибе (рис. 4.6, в), других видах деформационного воздействия [190-198]. Поставляемый в производство изделий стальной полуфабрикат

уже деформирован при металлургическом переделе. Остаточные деформационные полосы можно выявить по толщине листа как вдоль (рис. 4.6, ж), так и поперек прокатки (рис. 4.6, з) при отсутствии нагрузки [198]. Образование фигур деформации,

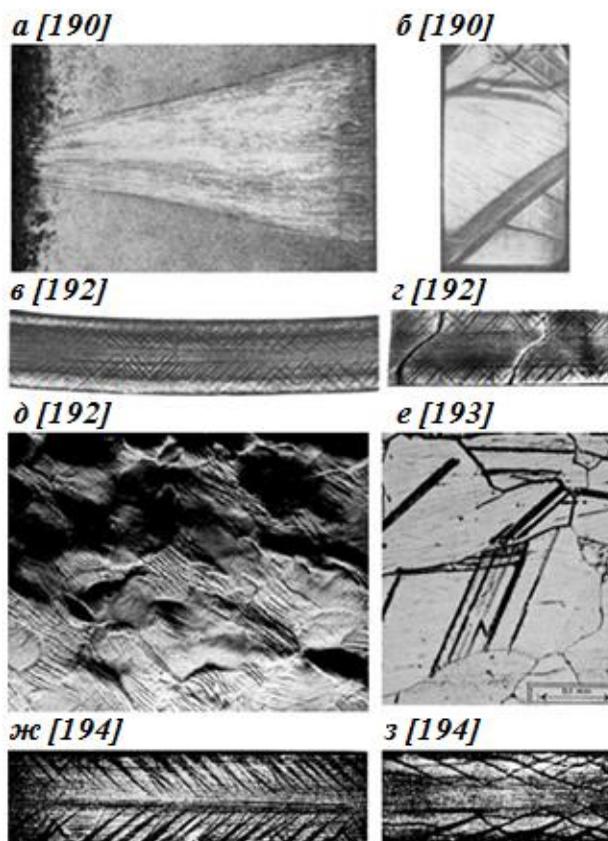


Рис. 4.6. Виды полос скольжения в зернах и элементах при различных напряженных состояниях

полос скольжения, происходит и в элементах различных конструкций как при их изготовлении, так и при эксплуатации [184; 190; 192; 195]. Изменение кривизны поверхности в местах пересечения ее с полосой скольжения ослабляет сцепление окалины с основным металлом, что ведет к проявлению на

поверхности элементов и узлов фигур деформации в виде шелушения окалины. В этих же местах может разрушаться антикоррозионное покрытие (краска, оцинковочный слой и т.д.). Основные контуры показанных на рис. 4.7 фигур могут возникать в заклепочных и болтовых соединениях мостов. Их четкое проявление в полевых условиях возможно только при механико-химической подготовке соответствующего участка поверхности.

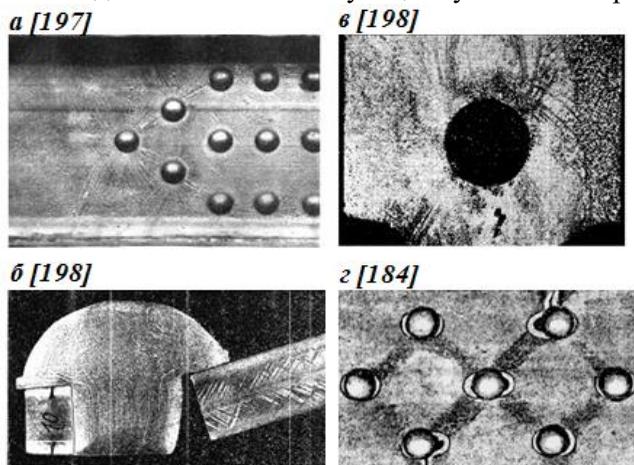


Рис. 4.7. Виды полос скольжения в элементах конструкций

Внимательное рассмотрение фигур деформации позволяет выявить их характерные особенности для механики деформирования твердого тела. Так, полосы скольжения всегда зарождаются у свободной поверхности. Их траектории прямолинейны, если на поверхности зарождения полосы отсутствует нагрузка; при наличии нагрузки – полосы криволинейные. Ширина полос изменяется вдоль ее траектории и на отдельных участках принимает клинообразную форму. Ширина полосы большая на участках, где должно быть большим относительное удлинение материала (рис. 4.6, а) при деформировании. Предельная ширина полосы скольжения определяется характерным размером дефекта, ответственного за ее образование (например, диаметр отверстия, рис. 4.7, г). Угол наклона полосы к направлению действия силы при свободном

деформировании близок к 45° , при стеснении деформационного процесса величина угла может увеличиваться или уменьшаться. Схема траекторий полос скольжения в элементе определяется расположением очагов их образования (дефектов). Начальная анизотропия материала и процессы старения приводят к изменению этого угла (рис. 4.6, ж, з). Полосы скольжения разделяют материал на блоки: в полосах скольжения материал находится в пластически активированном состоянии; вне полос скольжения материал работает в упругой стадии. Неупругая стадия деформирования материала представляет собой процесс возникновения очагов скольжения и их волноподобного развития в следящем за изменением внешних (граничных) перемещений режиме.

Низкоуглеродистые стали при обычных условиях эксплуатации также представляют собой сложный конгломерат [191; 196; 199; 200] из взаимодействующих зерен размером не более долей миллиметра, имеющих различный химический состав и физико-механические свойства. Наиболее прочные и жесткие из этих зерен (цементит) содержат предельное количество химически связанного и свободного углерода; зерна, состоящие из железной матрицы, имеют минимальное содержание углерода (феррит), обладают наименьшей прочностью и высокой пластичностью. Часть зерен стали состоит из цементита, другая - из феррита; значительное количество зерен имеет слоеный состав с перемежающимися прослойками феррита и цементита (перлит). Присутствуют в стали и зерна с иным составом [199; 200]. С физико-химических позиций сталь представляет собой твердый раствор различных элементов в железе. С изменением термодинамических параметров (давление, температура, объем и др.) химический состав и свойства зерен и их границ изменяются. В основном такие изменения (реакции) протекают в пластически активированных объемах материала, т.е. при развитии полос пластичности [199; 200]. Очевидно, что, если после прохождения фронта скольжения по всей рабочей зоне материала, последний обладает способностью к созданию новых полос скольжения, то может образоваться отраженная (новая) волна скольжения и т.д. На развитие этого процесса накладывают ограничения: 1) величина граничного перемещения элемента, 2)

соотношение скоростей граничного перемещения с фазовой и групповой скоростью волны скольжения, 3) способность пластически активированного материала к упрочнению.

Микрофотография незначительно деформированного фрагмента поверхности мягкой стали сразу после достижения предела текучести показана на рис. 4.6, д. Видно, что полосы скольжения в зернах расположены вдоль определенного направления (полосы сдвига).

Схема взаимодействия зерен в полосе сдвига отражена на рис.4.6, е, из которого видно, что полосы сдвига в зернах возникают в местах взаимного давления зерен. Это же подтверждается и рис. 4.8, а. Из рис.4.8, б следует, что сдвиги могут образовываться во всем зерне или его части, а полосы сдвига разделяются между собой упруго деформированными цепочками зерен (заштрихованные области).

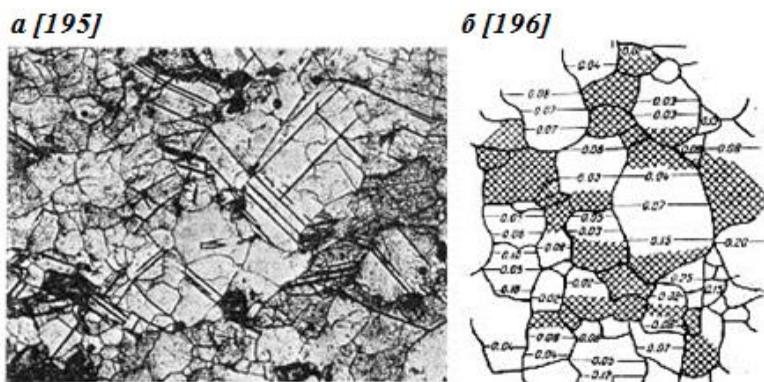


Рис. 4.8. Распределение полос скольжения в структуре зерен

Современная техника позволяет изучать полосы сдвига в отдельных кристаллах зерен, выявлять дислокационную природу процесса деформирования и разрушения [201]. Механика зарождения и развития полос сдвига в кристаллах во многом напоминает подобные процессы в объемах различных сплавов [202]. С использованием компьютерных технологий можно в некотором приближении воспроизвести кинетику процесса

зарождения и движения фронта пластичности вдоль рабочей зоны образца [203].

Эксперименты по механике разрушения показали, что полосы сдвига создают условия для зарождения трещин в элементах конструкций и их развития [204]. Поэтому актуальным является понимание кинетики зарождения и развития полос скольжения, выявление расположения и механизма взаимодействия полос скольжения, понимание процесса деформирования при различных видах НДС и его взаимосвязи с процессом теплообразования и развитием разрушения.

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

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

Теоретические исследования, начало которым было положено работами Б. Сен-Венана (1870 г.), М. Леви (1871 г.), Г. Генки (1923 г.), Л. Прандтля (1923 г.), а дальнейшее развитие получили в более поздних работах ряда выдающихся ученых, привели к созданию математически строгого метода решения плоских задач при пластическом деформировании твердого тела, называемого **методом характеристик**. Этот метод позволяет построить линии скольжения для наиболее характерных моделей конструктивных элементов [205].

Для решения задачи плоского напряженного состояния имеем следующие условия и уравнения [206].

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

Уравнения равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

В дополнение к уравнениям (4.6) при решении конкретных задач можно использовать условие пластичности, например, Треска-Сен-Венана:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4\tau_s^2 \quad (4.7)$$

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

$$\sigma_\alpha = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha, \quad (4.8)$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha - \tau_{xy} \cos 2\alpha. \quad (4.9)$$

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

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2\tau_{xy}} = \frac{2\operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (4.10)$$

Равенство (4.10) определяет для произвольной точки плоскости два взаимно перпендикулярных направления, такие, что на нормальных к ним площадках касательные напряжения будут максимальными. Через каждую такую точку проходят две взаимно перпендикулярные линии, совпадающие с линиями скольжения. Полагая $dy/dx = \operatorname{tg} \alpha$, из выражения (4.10) находим дифференциальное уравнение линий:

$$\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2\tau_{xy}} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 + 2\frac{dy}{dx} - \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2\tau_{xy}} = 0 \quad (4.11)$$

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

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{\partial U}{\partial x} / \frac{\partial U}{\partial y} \quad (4.12)$$

Из выражений (4.11) и (4.12) следует дифференциальное уравнение линий скольжения при плоском напряженном состоянии:

$$(\sigma_y - \sigma_x) \left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 - 4\tau_{xy} \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial y} - (\sigma_y - \sigma_x) \left(\frac{\partial U}{\partial y}\right)^2 = 0. \quad (4.13)$$

Из (4.9) и (4.10) получаем величину максимального скальвающего напряжения:

$$\tau_{max} = 0,5 \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}. \quad (4.14)$$

Из (4.8) – (4.10) вытекает, что линии скольжения образуют с главными осями угол 45° .

Для плоского деформированного состояния дифференциальные уравнения линий скольжения приведены в [190; 205]. В [205] даны сетки линий скольжения для пластин с надрезами.

Физико-химические процессы в зонах локализации деформаций при нагружении образцов и стальных элементов как причина деформационного теплообразования. Выше установлено, что нагрев конструкционных сталей происходит при развитии пластических деформаций. Поскольку процесс пластической деформации в твердых телах обусловлен перемещениями, генерацией и уничтожением дислокаций, в ряде работ предлагаются различные механизмы, теории образования тепла при деформировании [110; 207–223].

Так, согласно Никольсу [217], возможны четыре механизма, по которым энергия движения дислокаций может переходить в другие формы энергии:

1) кинетическая энергия быстродвижущихся дислокаций превращается в тепло в стадии их перехода в состояние покоя; 2) при торможении дислокаций энергия рассеивается звуковыми волнами; 3) происходит перераспределение энергии при образовании и аннигиляции дислокаций; 4) превращается в тепло энергия аннигиляции точечных дефектов, генерированных движением дислокаций через лес дислокаций, которые пересекают плоскость скольжения.

Эшелби и Платт [218] показали, что существенного повышения температуры деформируемого тела можно достичь только в том случае, когда скольжение происходит одновременно в ряде параллельно расположенных плоскостей.

Один из механизмов выделения тепла при пластической деформации рассмотрен в работе [219]. Авторы [219] допускают, что в областях интенсивного сдвига отдельные пары дислокаций с антипараллельными векторами Бюргерса способны аннигилировать с восстановлением совершенной структуры и выделением энергии порядка энергии дислокации. Вследствие близкодействия атомных сил зона выделения энергии ограничивается радиусом порядка одного межатомного расстояния. При плотноупакованной структуре это составляет 8–12 атомов. Тем самым в среднем на каждый атом в зоне аннигиляции приходится энергия $\sim 0,1$ эВ, что соответствует интенсивности локального разогрева примерно 103 К [223].

Раскол кристаллов сопровождается сбросом упругой энергии на поверхностях разрушения, которая, не совершая работы против внешних сил, превращается в тепло. Оценка температур, возникающих на поверхностях разрушения, проведена Фоксом [222] на основании определения количества продуктов разложения при расколе термически неустойчивых веществ в источнике масс-спектрометра. Им предполагалось, что разложение происходит по тому же самому механизму, который имеет место при термическом разложении. Время, в течение которого существует возбуждение поверхностных атомов, сопоставимо со скоростью разрыва связи. Поэтому тепловое равновесие установиться не может. В этом случае говорят об эффективной (эквивалентной) температуре, величина которой

может достигать на поверхностях раскола отдельных солей 1000–1500 °С.

В работе [221] экспериментально наблюдали локальное выделение тепла при деформировании сжатием монокристаллов NaCl при температурах от 2,5 до 3,0 К. Это явление фиксировалось с применением метода пузырьков, основанного на вскипании жидкого гелия на нагретых участках поверхности образцов.

Экспериментально установлено [178; 224], что разрушение и деформация металлов и сплавов (сталь У8, сплав ВТ 8, медь) сопровождаются инфракрасным излучением и излучением в видимом диапазоне. На разных стадиях разрушения возникают различные свечения. При ударном нагружении на копре МК-30 локальный разогрев в деформируемых зонах достигает сотен градусов (800–1 000 °С для сплава ВТ 8 и 100 °С – для У8); при малых скоростях нагружения вспышки температуры составляют (25–52) °С. Вместе с тем отмечается [110; 123; 214; 215; 220], что не вся энергия пластического деформирования металла превращается в тепло. Часть этой энергии аккумулируется в металле. Н. Ф. Куниным установлено [123], что при одинаковых степенях деформирования величины поглощенной энергии A_m при растяжении и сжатии медных, серебряных и кадмиевых образцов имеют одинаковый порядок. Энергия деформирования, отнесенная к единице массы металла, при растяжении меньше, чем при сжатии [123]. Поэтому выход тепла (η) выше для растягиваемых образцов.

При упругом адиабатическом растяжении происходит охлаждение металла. Для низкоуглеродистой стали охлаждение достигало 0,3–0,4 °С [131; 215]. Другие авторы [220] зафиксировали меньшую величину охлаждения при упругой деформации (не больше 0,2 °С) небольших образцов.

Авторы работ [132; 220] на основании изучения литературных источников рассмотрели термодинамику холодного деформирования, проанализировали факторы, влияющие на количество скрытой энергии, механизм накопления и рассеяния энергии деформирования и другие сведения о скрытой энергии и пришли к выводу, что можно допускать связь между скрытой энергией и прочностью деформируемого

материала. В работе [220] отмечается, что механизм накопления и выделения энергии при деформировании нельзя объяснить фазовыми превращениями. В монографии [110], напротив, показывается существенная роль фазовых превращений при пластической деформации. Фазовые превращения при пластической деформации происходят вследствие изменения температуры тела в процессе деформации [110; 112; 114; 223].

4.2. Выявление опасных участков, контроль трещинообразования при растяжении

Рассмотрим основные закономерности тепловых явлений в зонах локализации деформаций и их взаимосвязь с зарождением разрушения в конструктивных изделиях и моделях с использованием экспериментальных данных со стальными листовыми растянутыми, сдвигаемыми элементами, круглыми стержнями, простейшими балочными и другими конструкциями [225 - 235].

Нагружение экспериментальных элементов, образцов производилось до разрушения на различных испытательных машинах («Р-50», «Р-100», «ЦДМ-100» и др.) с записью диаграммы «нагрузка–удлинение». Испытания и обработка данных выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 1497. Температурные поля при деформировании образцов отображались в термофильмах с помощью компьютерного термографа «ИРТИС-2000» (рис. 4.9). Обработка результатов велась программным пакетом IRTIS. Для отдельных экспериментов использовались приборы других изготовителей.

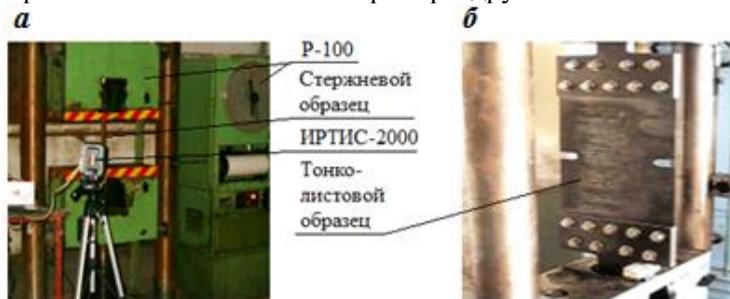


Рисунок 4.9 – Испытание стержневого (а) и тонколистового образцов (б)

Теплообразование и развитие разрушения в тонких листах с надрезами. Экспериментальное исследование теплообразования в растянутых образцах из тонколистовой стали (рис. 4.9, б) выполнялось с помощью тепловизионной камеры IR SnapShot, модель 525. Образцы нагружались до полного разрушения на разрывной машине «Р-50» с записью диаграммы «нагрузка–удлинение». Изменение температуры на поверхности берегов движущейся трещины приведено на рисунке 4.10. На рисунке видно повышение температуры в зоне локализации пластической деформации (от $t_{\text{нач}} = 18,4$ оС до $t_{\text{ср}} = 22,4$ °С). На термограмме рисунка 4.10, б видно медленное развитие трещины с повышением средней температуры в ее вершине от $t_{\text{ср}} = 23,8$ °С (при зарождении трещины) до $t_{\text{ср}} = 25,2$ °С (при медленном развитии трещины). Сближение полей пластических деформаций дефектов (см. рис. 4.10, в) привело к повышению температуры в материале до $t_{\text{ср}} = 25,3$ °С. Встречное развитие трещин повышает температуру металла у вершин до $t_{\text{ср}} \geq 30,4$ °С (рис. 4.10, в).

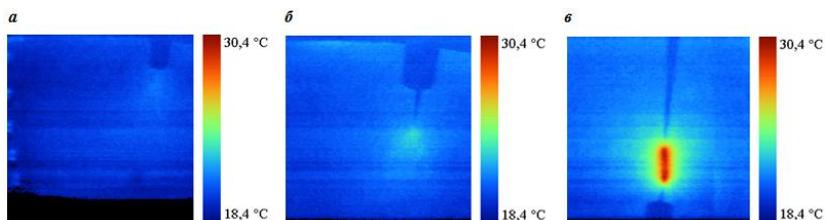


Рисунок 4.10 – Стадии развития трещины в стальном листе шириной 500 мм и толщиной 1 мм (предразрушение (а), медленный рост (б), наложение тепловых полей двух трещин (в))

Увеличение толщины листа образцов до 1,5 и 3 мм проявляет те же процессы, но рост средней температуры у надрезов и в окрестности трещины происходит более интенсивно. Из кадров термофильма следует, что процесс перехода от стадии предразрушения к зарождению магистральной трещины сопровождается небольшим всплеском температуры, после чего зарождается видимая трещина и следует ее медленное развитие. Резкий всплеск перед устьем трещины максимальной температуры в стадии излома объясняется как наложением

мощностей двух встречных источников теплообразования, так и ростом температуры при выходе полос сдвига на поверхность листа. Очаг пластического деформирования стенки появляется в ослабленном сечении. В дефектных зонах зарождается трещина, температура в устье которой поднялась от 24 до 64 °С за 0,8 с. Из рисунка 4.11 следует, что скорость распространения трещины – 0,035 м / с. Температура в вершине при пересечении трещиной второй кромки пластины примерно на 20 °С (левая сторона) и 40°С (правая сторона) превышает начальную температуру материала. Наибольшая температура устья трещины зависит от скорости ее движения и для стали пластины толщиной 3 мм составляет примерно 60 °С. В эксперименте зафиксировано, что по лучам, направленным под углом примерно (+/-)23° к горизонтали, распространяется тепловая волна со значительным опережением движущейся вершины трещины.

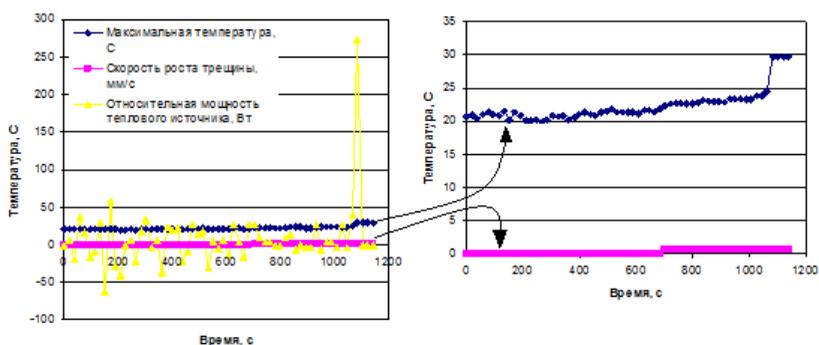


Рисунок 4.11 – Графики изменения максимальной температуры, скорости роста и относительной мощности трещины в листовом образце с боковыми надрезами

Особенности теплообразования и разрушения толстых листов. Проследим развитие такого разрушения при термографировании растянутых образцов 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 4.12–4.19 показаны виды образцов и кинетика изменения температуры их поверхности в процессе нагружения (при начальной температуре металла 7,6 °С).

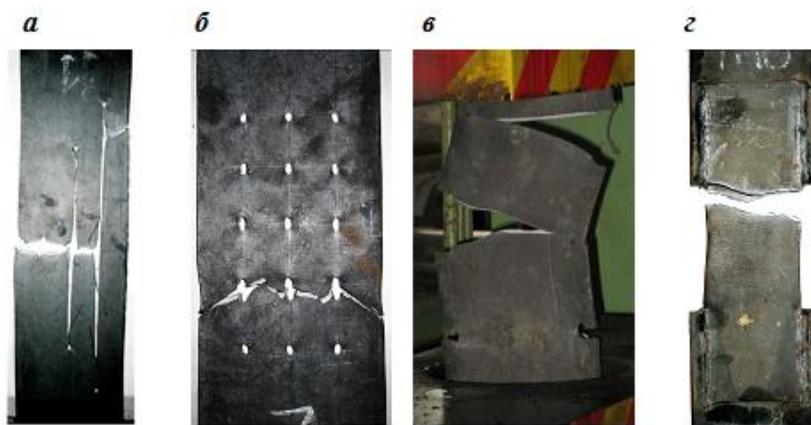
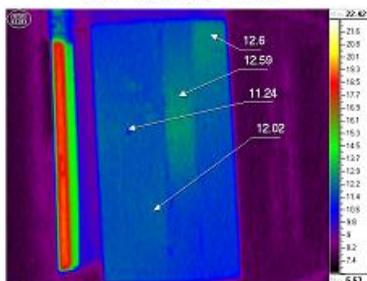


Рисунок 4.12 – Виды образцов № 11.11, 15.7, 12.10, 7.15 после разрушения

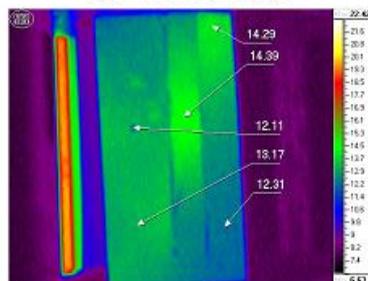
Пластины с отверстиями и продольными разрезами. На рисунке 4.13 представлены кадры термофильма образца из листа толщиной 10 мм, рабочая зона которого разделена продольными разрезами на три полосы (конструкция образца показана на рисунке 4.12, а). При этом наиболее узкая полоса с одной стороны ограничена 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 (рис. 4.13) прослеживаются все стадии развития деформаций в образце. Отверстие приводит к

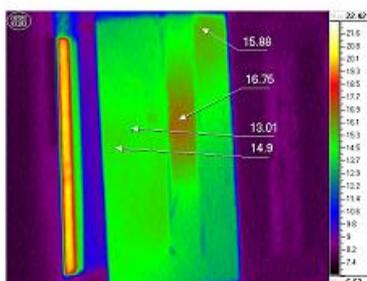
Кадр 50: $T_{\Sigma} = 7,6\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{max}} = 13,02\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 $T_{\text{min}} = 7,34\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\theta = 116,4\text{ c}$



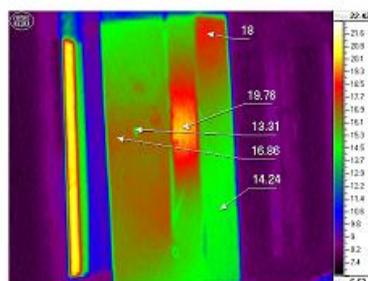
Кадр 60: $T_{\Sigma} = 7,6\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{max}} = 14,75\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 $T_{\text{min}} = 7,46\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\theta = 139,6\text{ c}$



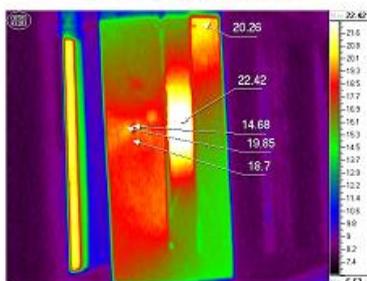
Кадр 70: $T_{\Sigma} = 7,6\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{max}} = 20,30\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 $T_{\text{min}} = 7,64\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\theta = 162,90\text{ c}$



Кадр 80: $T_{\Sigma} = 7,6\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{max}} = 20,07\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 $T_{\text{min}} = 7,56\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\theta = 186,2\text{ c}$



Кадр 87: $T_{\Sigma} = 7,6\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{max}} = 22,42\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 $T_{\text{min}} = 7,61\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\theta = 202,5\text{ c}$



Кадр 90 (излом): $T_{\Sigma} = 7,6\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{max}} = 22,42\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 $T_{\text{min}} = 7,73\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\theta = 209,5\text{ c}$

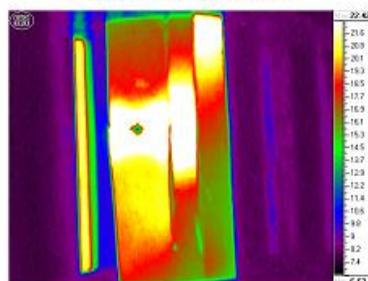


Рисунок 4.13 – Кадры термофильма растяжения образца № 11.11

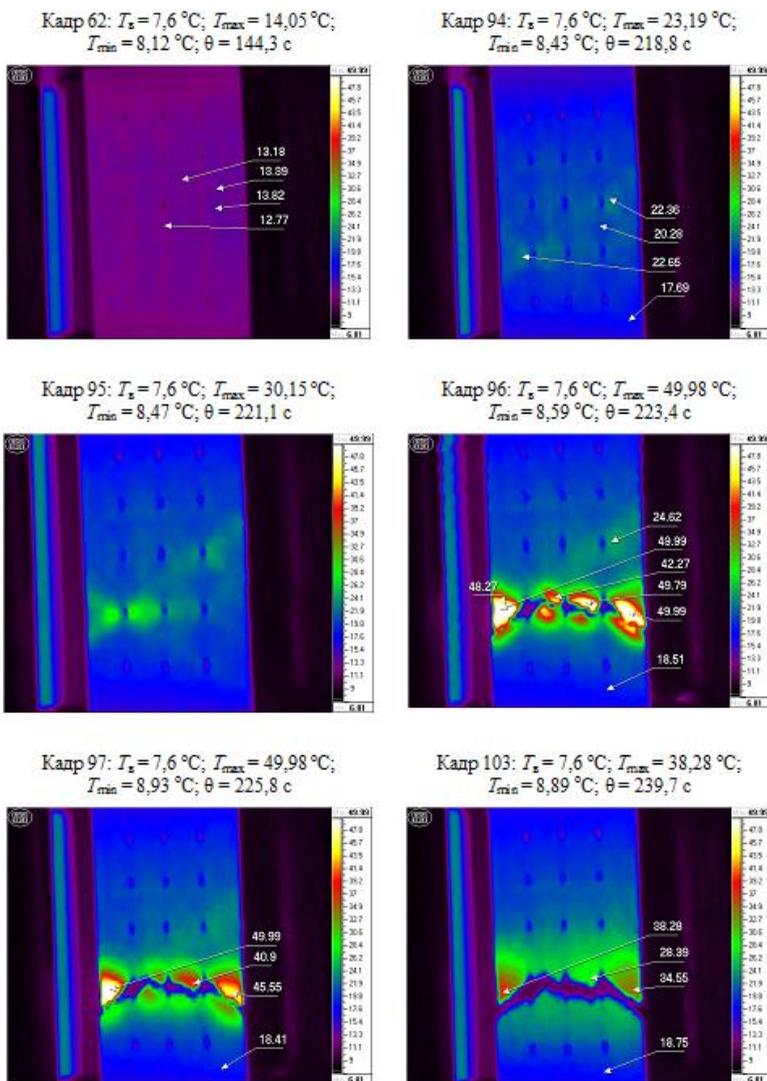


Рисунок 4.14 – Кадры термофильма растяжения образца № 15.7

частичному сковыванию деформаций. Видно, что пластины без отверстия нагреваются быстрее и до более высокой температуры. В окрестности отверстия деформации развиваются под углом $35\text{--}40^\circ$ к горизонтальной оси. К моменту зарождения разрушения

полосы без отверстия имеют температуру поверхности, на $(3-4)^\circ$ 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 4.19 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° и после разрыва за доли секунды падает на $(10-11)^\circ$. Из эксперимента следует, что стержни различной податливости нежелательно включать по параллельной схеме в состав растянутых элементов стальных конструкций.

На рисунках 4.12, б и 4.14 показана пластина с группой отверстий диаметром 8 мм.

Аналогично этой пластине работают листовые элементы болтовых и заклепочных соединений. На кадрах термофильма (рис. 4.14) 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, рис. 4.14) температура повышается монотонно до зарождения трещины в их окрестностях, а в момент разрушения происходит скачок температуры поверхности на $10-25^\circ$ (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).

Пластина с боковыми вырезами. Такая пластина толщиной 18 мм и данные ее термографии при растяжении показаны на рис.4.12, 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 возрастала. 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 (рис.4.15–4.17).

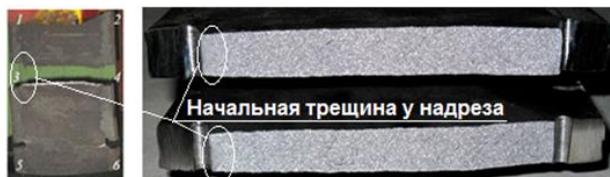


Рисунок 4.15 – Вид образца из стального листа толщиной 18 мм и его хрупкого излома

В образце, показанном на рисунке 4.15, разрушение начало развиваться сколом у надреза б, а затем произошел хрупкий отрыв по сечению 3–4 с очагом в начальной трещине у дефекта 3.

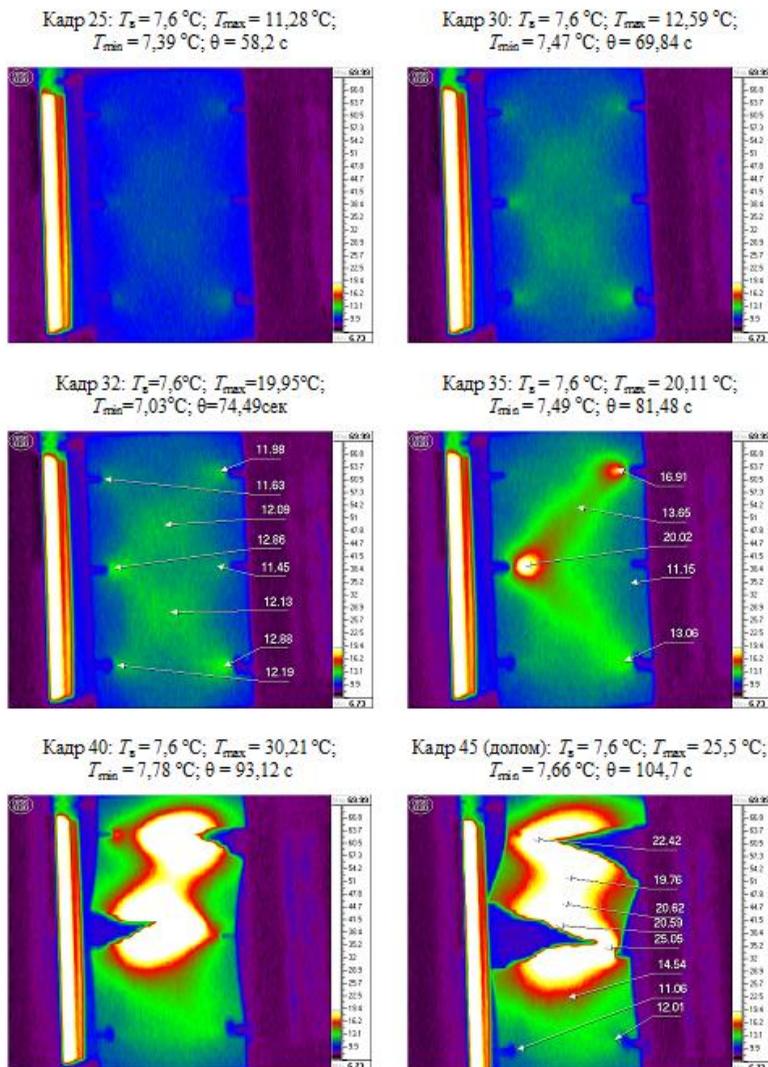


Рисунок 4.16 – Кадры термофильма растяжения образца №12.10

Распространение трещины произошло по диагонали 3–4 ромбовидного блока, ограниченного полосами скольжения (кадры 25–40, рис. 4.16).

Быстрому развитию начальной трещины у надреза 3 (рис.4.15) предшествовал «проскок» полос деформирования от надрезов 6 и 2 к надрезу 3 и их наложение в окрестности начальной трещины у дефекта 3. На рисунке 4.17, а показан

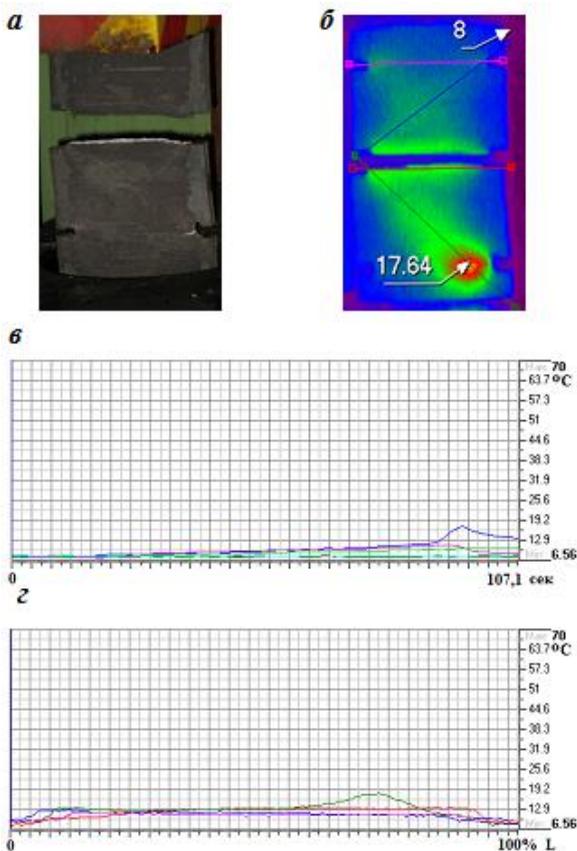


Рисунок 4.17 – Схема образца № 14.8 (а), температурное поле поверхности (б) для кадра 41 после разрушения и графики изменения температуры по выделенному направлению (v) и в выделенной точке (17.64) (r) за время нагружения 107,1сек

деформированный растяжением образец с боковыми надрезами из пластины толщиной 18 мм, разрушение которого произошло хрупко. Кадры термофильма (рис.4.16) и графики температур (рисунок 4.17, б–г) показывают, что при хрупком разрушении повышение температуры в изломе значительно меньше, чем при вязком.

Зарождение и развитие разрушения в образцах с накладками. На рисунке 4.18 показаны схемы образцов с парными накладками. Результаты термографии образца, показанного на рисунке 4.18, а, приведены на рисунке 4.19, из которого следует, что поверхность излома таких образцов может проходить под углом или нормально к направлению действия растягивающей силы.

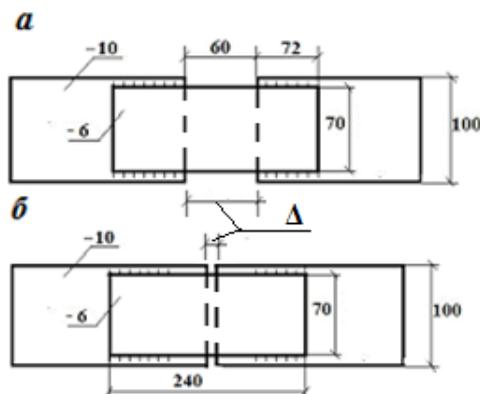


Рисунок 4.18 – Конструктивная форма экспериментальных образцов с парными накладками и регулируемой величиной зазора в стыке пластин (а, б)

Термография процесса деформирования образцов с парными накладками (рис.4.19) показывает, что их разрушение начиналось от флангового шва. Следы скольжения, проявленные расположением трещин в окалине, выявляют, что при нулевом зазоре деформируется узкая полоска металла, примыкающего к поверхности излома. При 60-миллиметровом зазоре деформируется вся часть накладки, перекрывающая зазор, и вытягивается часть стали накладки, примыкающая к зазору и расположенная между фланговыми сварными швами,

соединяющими накладку с пластинами. Сопоставляя между собой различные образцы, можно отметить, что влияние сварочных дефектов и конструктивных решений элемента на зарождение и развитие трещины является существенным. Объяснить излом образца с зазором 120 мм можно с учетом

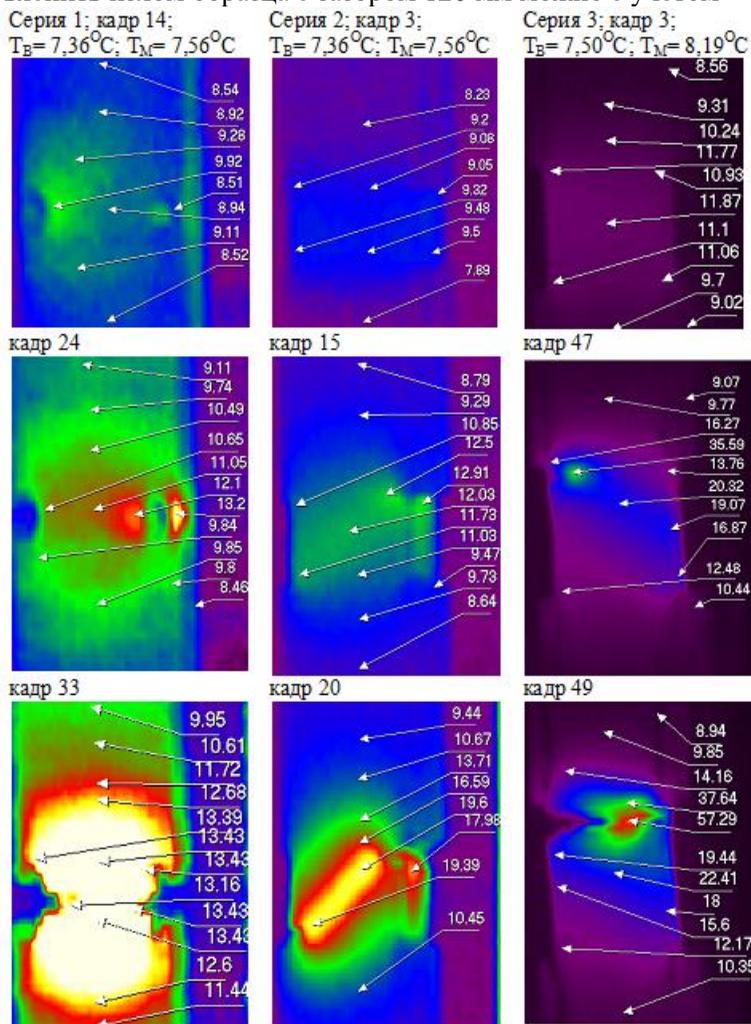


Рисунок 4.19 – Характерные кадры термофильмов с визуализацией различных стадий зарождения и развития полос сдвига, разрушения в накладке

кинетики разрушения. В этом случае тоже имелась возможность разрушения под углом $35\text{--}40^\circ$, но она не была реализована из-за практически одновременного зарождения двух трещин и их движения навстречу одна другой. Из рассмотренного следует, что сопротивление разрушению и трещиностойкость соединений с парными накладками зависит от величины зазора Δ .

Зарождение разрушения в образцах с дефектами и его связь с теплообразованием и распределением деформационного тепла. В ходе экспериментов, изложенных выше, установлено, что в зоне зарождения трещины повышение температуры достигало $30\text{--}90^\circ\text{C}$. При этом более высокие температуры фиксировались на поверхности образцов без надрезов, у которых пластические деформации охватывали намного большую область, чем у надрезанных образцов такой же толщины. У тонких листов трещина скола зарождалась у основания надреза и при дальнейшем нагружении развивалась в поперечном направлении относительно оси растягивающего усилия. Наибольшая температура металла фиксировалась впереди устья трещины. Наложение полей двух встречных трещин приводит к значительному росту температуры металла.

Данные компьютерной термографии плоских образцов из стали СтЗсп (рис. 4.13, 4.14, 4.16, 4.17, 4.19) показывают, что физико-химические процессы, сопровождающиеся теплообразованием, в растянутых пластинах протекают не во всем деформируемом объеме равномерно, а развиваются по отдельным направлениям АВ, CD, на которых действуют наибольшие касательные напряжения τ (рис. 4.20). Полосы $a_1a_2b_2b_1$ зарождались от боковых вырезов (макрodefектов), расположенных в точках А, В, С, D. При этом одна из отмеченных полос сдвига обычно проявлялась раньше другой. Зарождение полосы происходило у одного из вырезов (точки А, В, С, D) и быстро (скорость – не менее $0,1\text{ м / с}$) распространялось вдоль оси полосы сдвига. Температура деформированного металла полосы была заметно выше, чем в смежных зонах. Более высокое повышение температуры отмечалось в зоне пересечения двух полос скольжения АВ, CD. После такого, ограниченного

шириной полосы сдвига Δ , всплеска температуры, как правило, следовало разрушение полосы сколом, в отдельных случаях – отрывом. Клинообразные области, примыкающие к полосам сдвига, например, $d_2 \alpha d_1$, находились в упругом состоянии и смещались полосами скольжения к началу координат так, что после разрушения образца выполнялось условие $b_0 > b$.

При деформировании такой пластины можно выделить две особенности: первая – в пластической области в окрестности надреза (дефекта) образовывался начальный зародыш, в котором при достижении предельной для данного зародыша температуры поверхности металла зарождалась магистральная трещина.

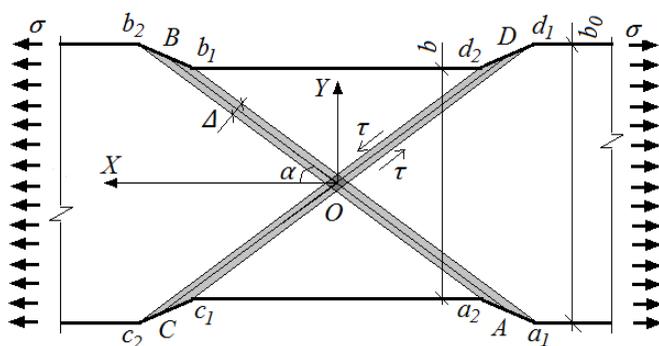


Рисунок 4.20 – Схема развития полос сдвига при растяжении листового элемента

При движении этой трещины в пределах полосы сдвига температура поверхности повышалась. Вторая особенность – это вышеотмеченный температурный всплеск и его быстрое движение вдоль полосы сдвига. Видимо, эти особенности теплообразования объясняются тем, что твердофазные химические процессы протекают в несколько этапов и зарождаются, как правило, на участках, где кристаллические решетки разрыхлены дефектами строения. Такие дефекты упаковки в фрагментированных при деформации цементитных составляющих стали имеются в большом количестве. В дефектных местах возникают зародыши. Первоначальные зародыши, определяющие топологию теплообразования, возникают в пластической зоне у дефектов поверхности, формы

образца (элемента), а затем происходит образование, развитие и слияние зародышей по траектории действия максимальных касательных напряжений. В экспериментах на образцах с боковыми вырезами наблюдались «прострелы» (моментальное перемещение) тепловой волны вдоль линий АВ, СD. Прямых объяснений указанному явлению в литературных источниках не выявлено. Характерными чертами его является неоднородное развитие пластической деформации по объему деформируемого образца и высокая скорость распространения тепловой волны по направлениям действия максимальных касательных напряжений в стальном образце. При этом материал образца, расположенный вне полос скольжения, остается не вовлеченным в процесс деформирования. Возможно, по указанным направлениям возникает дислокационное каналирование, связанное с физико-химическими процессами в полосе сдвига. Это явление отображено на соответствующих кадрах термофильма и проявляется как на упругом участке диаграммы, так и на участках упругопластического деформирования и долома. Особенность этого процесса состоит в том, что на пластической стадии деформирования определяется тот конкретный канал из нескольких возможных, в котором зарождается магистральная трещина и проходит ее начальное движение. Можно предполагать, что величина средней температуры образца должна существенно зависеть от теплообмена с упруго напряженным металлом, примыкающим к полосам скольжения. Сталь при упругом растяжении охлаждается и в то же время в пластическом состоянии нагревается. Поэтому среднюю температуру конгломерата, состоящего из упругих и пластически деформированных областей, можно определить из уравнения теплового баланса.

Теплообразование в элементах стальной балки. Рассмотрим процесс образования деформационного тепла в элементах экспериментальной стальной сварной балки. (рис.4.21). Поперечное сечение балки двутавровое. Материал элементов балки Ст3сп. Размеры балки: пролет $L = 1192$ мм, высота-150мм, ширина поясного листа -152мм, толщина поясных и опорных листов - 8мм, стенки - 3мм. Балка нагружается статически, двумя силами P (рис.4.21). Поперечные ребра разделяют балку на три

отсека 1, 2, 3. В первом отсеке (1) при нагружении двумя равными силами P возникает чистый изгиб (изгибающий момент



Рис.4.21- Вид экспериментальной балки в процессе нагружения

(M) не равен нулю, а поперечная сила (Q) равна нулю). В пределах отсека 1 напряжения сжатия возникают в верхнем поясе, растягивающие – в нижнем. В отсеках 2 и 3 величина M незначительна. Стенка балки в пределах отсеков 2 и 3 воспринимает поперечное усилие Q и работает на сдвиг. Нагружение балки производилось в испытательной машине до момента потери местной устойчивости стенки в приопорных отсеках 2 и 3. Изменение поверхностной температуры элементов балки при нагружении отображалось в термофильме компьютерным термографом «ИРТИС-2000», а результаты обрабатывались программным пакетом IRTIS. Распределение деформационных температур поверхности элементов балки показано на рис.4.22.

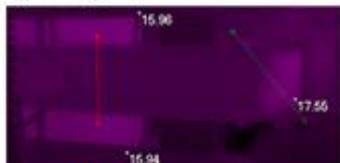
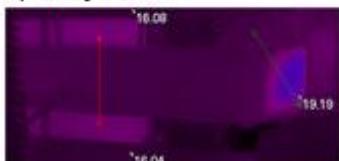
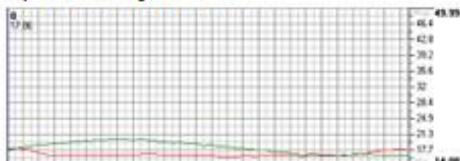
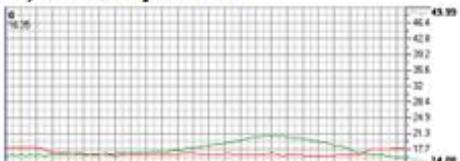
а, кадр 500**з, Δt кадра 500****б, кадр 540****д, Δt кадра 540****в, кадр 575****е, Δt кадра 575**

Рис.4.22- Распределение поверхностной температуры Δt в приопорном (зеленый цвет) и пролетном (красный цвет) сечениях балки в различных стадиях работы и графики изменения температуры Δt по выделенным направлениям за время нагружения в выделенных кадрах

Изменение состояния балки (рис.4.21) при нагружении также исследовалось конечно-элементным методом с использованием программного комплекса ANSYS. Так как достоверность результатов расчета напрямую зависит от точности описания геометрии балки, то основным критерием при создании ее конечно-элементной модели было ее максимальное приближение к фактическим размерам и форме. В свою очередь, ограниченность программных и аппаратных ресурсов вынуждает использовать упрощения путем исключения или изменения формы отдельных элементов. Поэтому балка разбивалась на 13500 конечных тетраэдральных элементов. Создание сетки КЭ осуществлялось в автоматическом режиме с предварительным указанием количества КЭ на характерных ребрах модели. В местах сопряжений и возможных надразов производилось измельчение сетки. В расчетном алгоритме предполагалось, что

не происходит потери местной устойчивости элементов и общей устойчивости балки при нагружении.

Расчет с использованием метода конечных элементов осуществляли в программной среде ANSYS. Данные расчета нормальных и касательных напряжений в балке приведены на рисунках 4.23, 4.24. На рисунке 4.23 видно, что нормальные напряжения в поясах модели составляют: в сжатом - до 35 МПа; в растянутом - до 100 МПа. Большие касательные напряжения, превышающие расчетное сопротивление стали (130 МПа) возникают в приопорном отсеке балки. При этом большие напряжения возникают в местах скачкообразного изменения жесткости модели и зависят от площади контакта и др. факторов.

Из конечноэлементного расчета следует, что при термографическом исследовании поверхностной температуры элементов балки наибольший нагрев стенки следует ожидать в приопорных участках балки (до момента потери местной устойчивости стенки). После потери местной устойчивости стенки основной нагрев будет происходить в направлении большей диагонали приопорного отсека балки. На участке чистого изгиба пояса балки работают на сжатие (верхний пояс) и растяжение (нижний пояс), что может проявиться в небольших различиях в температуре соответствующей поверхности.

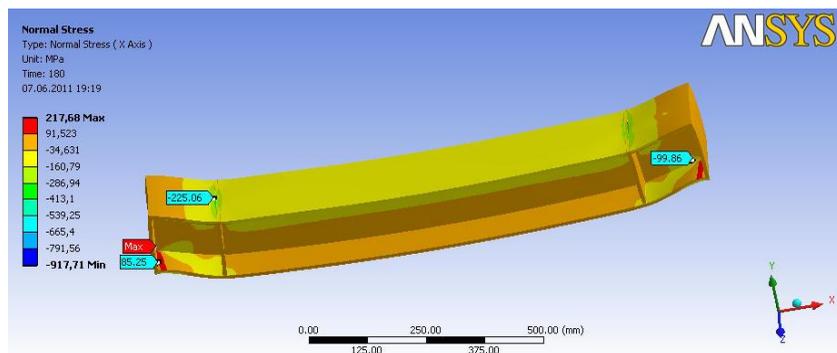


Рис.4.23 - Распределение нормальных напряжений в точках модельной балки

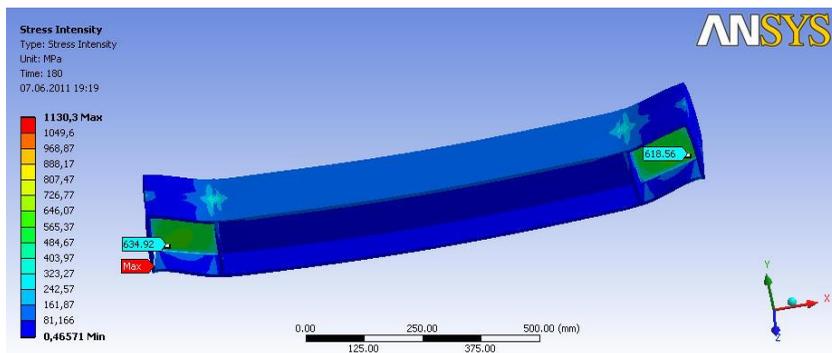


Рис.4.24 - Распределение касательных напряжений в точках модельной балки

Форма теплового поля в припорном участке балки на рис.4.22 (а, б, в) выявляет ту часть стенки, которая работает на сдвиг. В процессе значительного времени нагружения температура в выделенных точках припорного участка стенки не изменялась. Ее рост на 3-5°C замечен только на последней стадии приложения нагрузки (перед потерей устойчивости). В пролетной части сжатая верхняя полка и примыкающая часть стенки балки имеют более высокую температуру, чем нижняя, растянутая (примерно на 0,4 °С).

Испытание балки и расчет методом конечного элемента показали, что основное теплообразование в балках происходит в отсеках, подверженных сдвигу.

Тепловые процессы в пластинах, воспринимающих преимущественно сдвиговые усилия. В таких условиях работают стенки арочных, рамных, балочных элементов в отсеках с большими поперечными усилиями. При этом в однопролетных балках работа стенки приближается к условиям чистого сдвига. Аналогичные условия возникают в многопролетных балках, стенка которых у опор работает на сдвиг. Работа стальной пластинки на сдвиг используется в различных типах поглотителей (демпферов) сейсмической энергии [237]. В этом случае реализуется превращение механической энергии колебаний зданий и сооружений в тепловую в энергопоглотителях, например, сдвигового типа.

Рассмотрим экспериментальные данные по деформационному теплообразованию стальных образцов, общий вид которых приведен на рис.4.25. Видно, что образцы (рис.4.25,а-в) по форме представляют отсек балки, стенка которого по внешним кромкам нагружается сдвигающими усилиями. Образец, показанный на рисунке 4.25 г, позволяет моделировать работу стенки на растяжение. Экспериментальные образцы изготовлены из листовой стали ВСтЗсп толщиной 10 мм. Размеры стенки – 200 × 200 мм.

Нагружение сварных образцов производилось квазистатически, растягивающим усилием до разрушения, на испытательной машине «Р-100» с записью диаграмм «нагрузка–удлинение» (рис. 4.26). Испытания и обработка данных проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 1497. При испытаниях фиксировались машинные диаграммы, которые в дальнейшем обрабатывались в программе EXEL. Процесс деформирования образцов в испытательной машине «Р-100» отображался в термофильмах с помощью компьютерного термографа «ИРТИС-2000», а обработка результатов велась программным пакетом IRTIS.

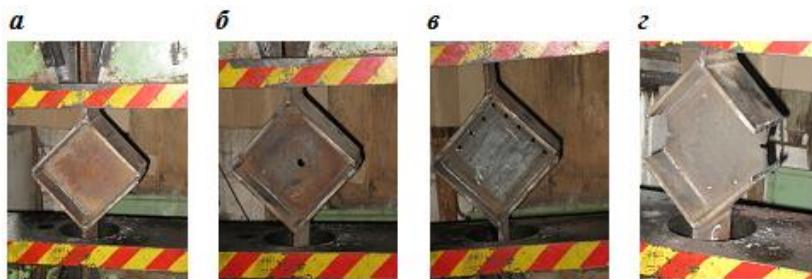
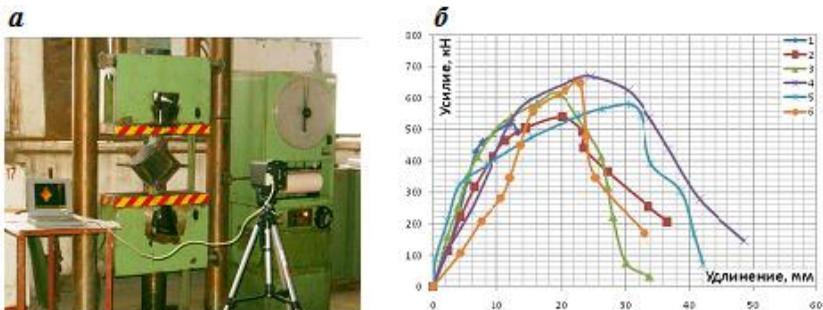


Рисунок 4.25 – Вид экспериментальных образцов, нагружаемые сдвиговыми усилиями

Образец «а» (рис. 4.25, а). Предельное состояние такого образца характеризуется потерей устойчивости стенки, при которой в гребне основной волны образуется растяжение на выпуклой стороне и сжатие на вогнутой стороне при пластической стадии работы материала. Изменение температуры поверхности



1 – образец (рис. 4.25, а); 2 – образец (рис. 4.25,г); 3 – образец (рис. 4.25,в, 2 отверстия); 4 – образец (рис. 4.25,а, сварка полок); 5 – образец (рис. 4.25,б); 6 – образец (рис. 4.25,в)

Рисунок 4.26 – Испытательная система на основе машины «Р-100» и компьютерного термографа «ИРТИС-2000»

стенки таких образцов, работающих на сдвиг, при нагружении показано на кадрах рисунка 4.27. При упругой работе стали температура поверхности близка к равномерной. В окрестности нагруженных сдвигающими усилиями кромок температура несколько ниже, чем в середине пластины. Это является результатом повышенного отвода теплоты в более холодные окаймляющие пластины. При дальнейшем деформировании диагональ в направлении растягивающей силы увеличивается, а в перпендикулярном – уменьшается. Возникающие из-за сжатия в направлении, перпендикулярном к оси действия нагружающего усилия, изгибные напряжения вызывают дополнительное охлаждение в растянутых кромках и нагрев – в сжатых.

Вследствие этого значительно повышается температура в средней части пластины, в растянутых кромках (рис. 4.28).

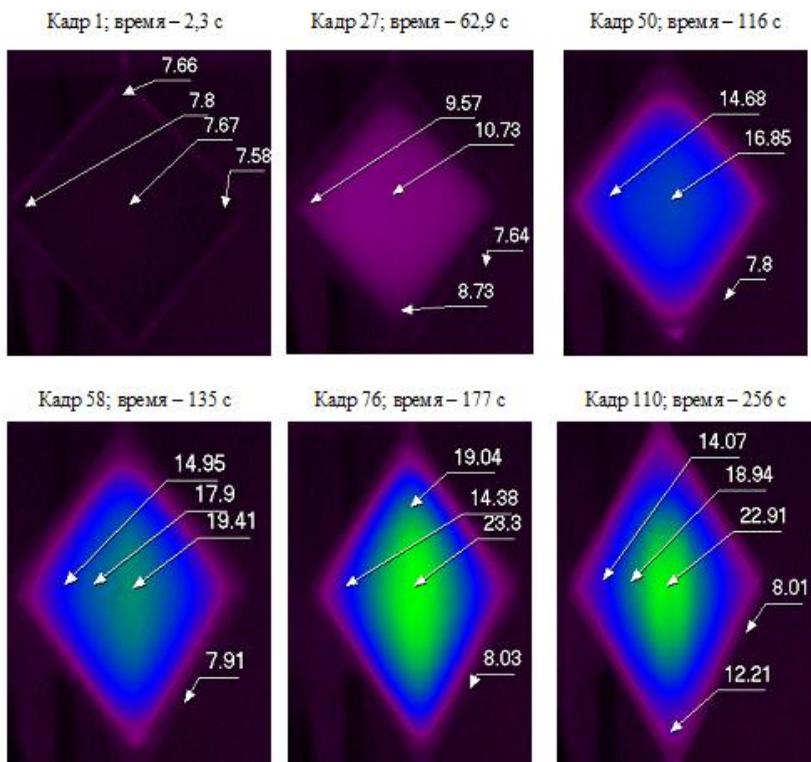
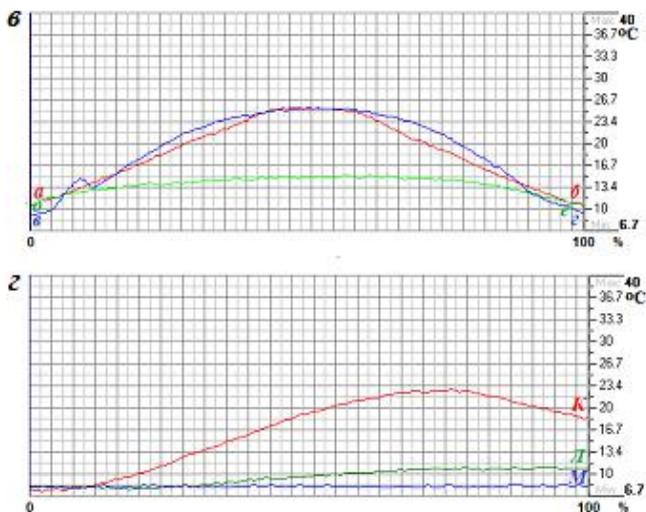
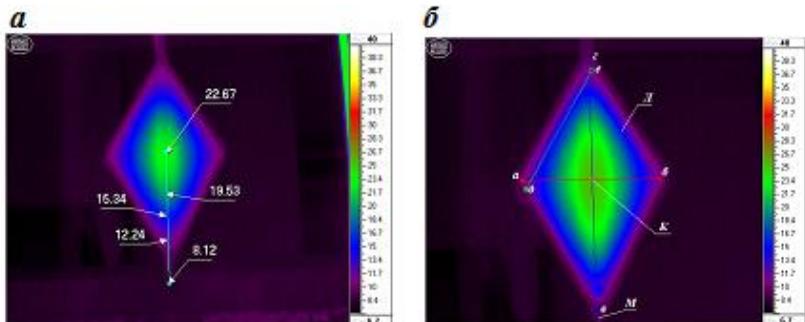


Рисунок 4.27 – Кадры термофильма деформационного нагрева образца № 16.6

Образец «б» (рис. 4.25, б). Изменение температуры поверхности такой пластины при нагружении показано на рисунках 4.29, 4.30, из которых следует, что при упругой стадии работы пластины распределение температуры по поверхности равномерное. Увеличение деформационного нагрева в окрестности отверстия происходит при появлении и развитии пластических деформаций в средней части пластины и сопровождается превращением круглого отверстия в овальное. На рисунке 4.30 это отражено увеличением наклона кривой изменения температуры при приближении к отверстию. При дальнейшем деформировании диагональ в направлении растягивающей силы увеличивается, а в перпендикулярном направлении появляется зона



а – температура по диагонали стенки, б – зоны температур и направления а–б, в–г, д–е, в – температура поверхности пластины вдоль линий а–б, в–г, д–е, г – изменение температуры точек К, Л, М поверхности стенки за время нагружения образца (286,3 с, кадры от 0 до 123)

Рисунок 4.28 – Термограмма и графики изменения температуры образца № 16.6

предразрушения, а на расстоянии нескольких миллиметров от кромки отверстия возникает зона локального повышения температуры поверхности. На графике 5 рисунка 4.26, б этому состоянию соответствует наибольшая величина растягивающей силы. При дальнейшем деформировании образца и росте возникшей трещины зона локального повышения температуры

перемещается, оставаясь впереди острия трещины на несколько миллиметров. Жесткость пластины и величина деформирующей силы снижаются в соответствии с ходом кривой 5 рисунка 4.26, б. Мощность деформационных источников тепла уменьшается, происходит понижение температуры поверхности пластины.

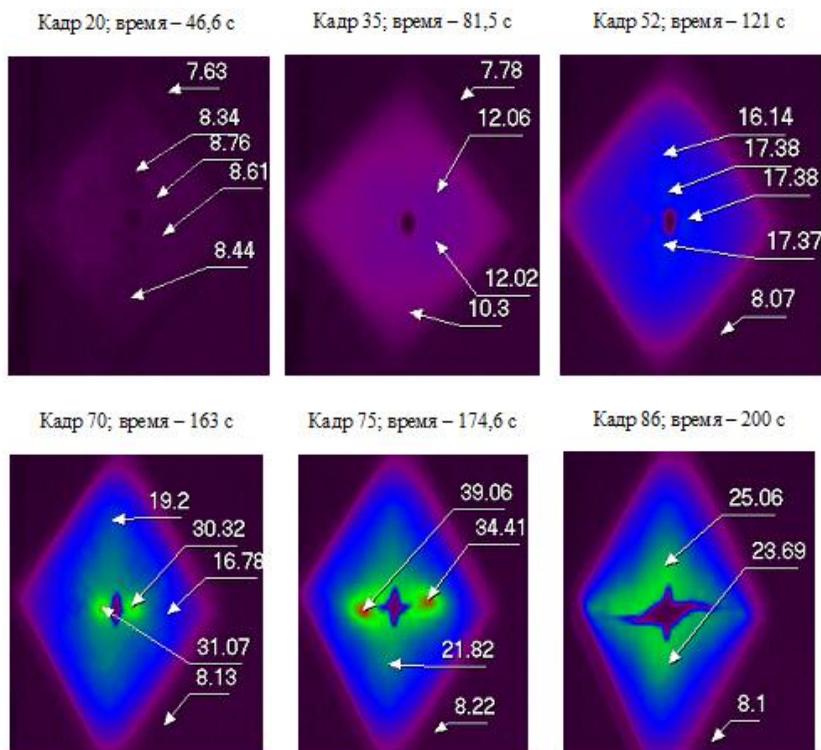
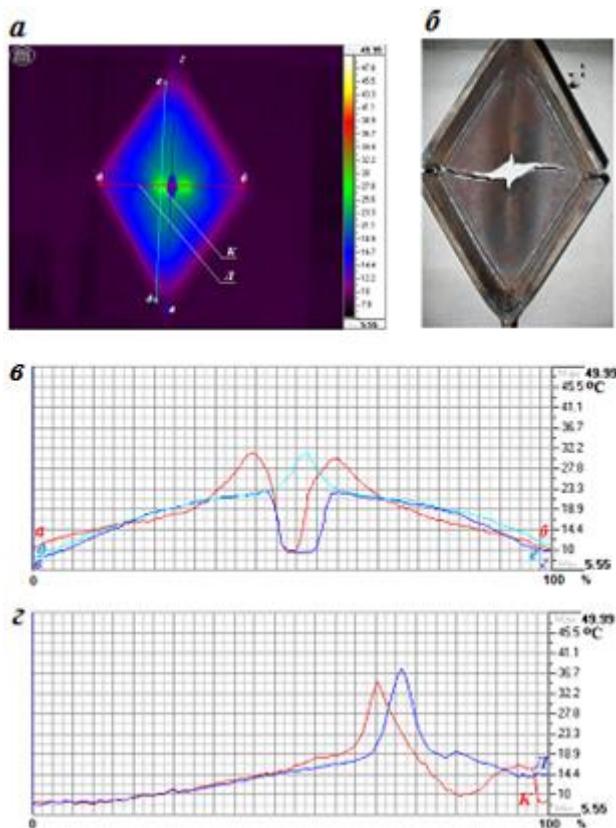


Рисунок 4.29 – Кадры термофильма деформационного нагрева образца № 17.4

Образец «г». Схема и общий вид пластины с двумя боковыми вырезами показаны на рисунке 4.25, г. Изменение температуры поверхности пластины при нагружении показано на кадрах рисунка 4.31. Из рисунка следует, что уже при упругой стадии работы пластины боковой вырез вносит искажение в распределение температуры по поверхности (кадр 45, рис. 4.31).

Деформационное охлаждение стали у устья надреза при упругой работе находится в пределах погрешности термографа (0,05 °С).



а – термограмма стенки с указанием обозначений; б – вид излома стенки, в – температура поверхности стенки вдоль линий а–б, в–г, д–е, кадр 70, г– графики изменения температуры точек К, Л поверхности стенки за время нагружения образца (кадры 0 - 107)

Рисунок 4.30 – Термограмма образца № 17.4 и графики изменения температуры

Полосы скольжения, инициированные вырезом, приводят к росту деформационного нагрева в его окрестности. Зарождение трещины в этой зоне сопровождается локальным повышением температуры, которое более чем в 2 раза превышает температуру

поверхности примыкающих участков (кадр 59, рис. 4.31). При дальнейшем деформировании образца «пятно» локального повышения температуры опережает видимую вершину трещины на 6–8 мм и разогревается до 47,11 °С и более (кадр 62, рис. 4.31).

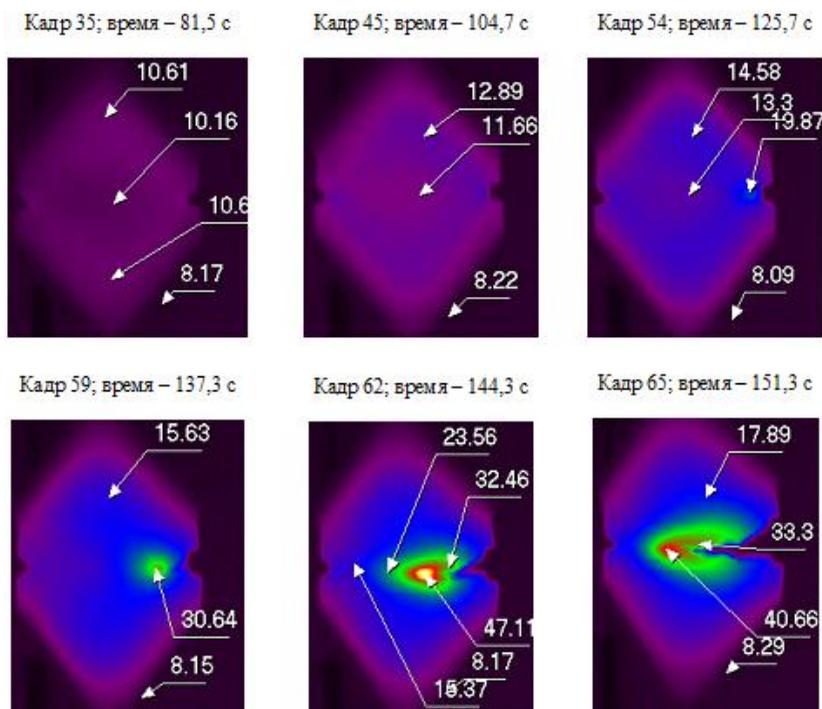


Рисунок 4.31 – Кадры термофильма деформационного нагрева образца № 18.3

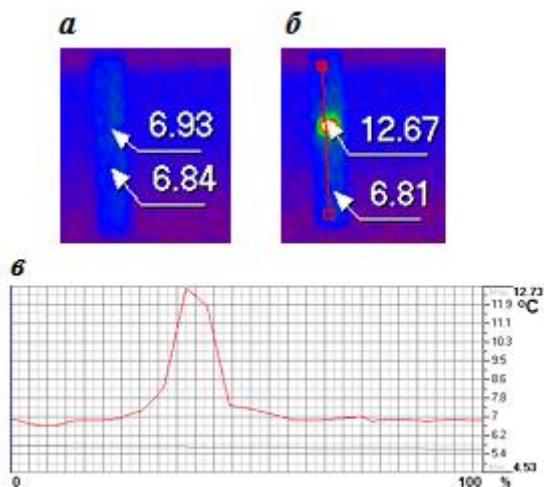
На графике 2 рисунка 4.26, г наибольшая величина растягивающей силы соответствует стадии зарождения трещины в вершине надреза. Значительное увеличение длины трещины приводит к снижению жесткости пластины и величины деформирующей образец силы (кривая 2, рис. 4.26, г). При этом мощность деформационных источников тепла снижается и уменьшается температура поверхности пластины.

Предельное состояние пластинки наступает в результате потери устойчивости с последующим зарождением трещин у

отверстия. При движении трещины скола происходит периодический поворот фронта трещины относительно срединной плоскости пластины (аналогично рисунку 4.30, б).

Оссимметричные стержни. К таким изделиям можно отнести круглые элементы (с выточками и без них), арматуру (гладкую и с периодическим профилем), болты и др.

Данные термографирования арматурных стержней приведены на рисунках 4.31, 4.32. Кадры термофильма (рис. 4.32) показывают, что образование тепла при растяжении арматурного стержня с кольцевой выточкой до разрыва локализовано в зоне выточки. При этом тепло образуется на ослабленном участке, где происходит пластическое деформирование стали. Отсюда тепло распространяется в примыкающие участки стержня. Излом в ослабленном сечении произошел сколом с развитием шейки. Рост температуры в выточке происходил от 7,36 до 12,87 °С, а температура примыкающего к выточке металла стержня поднималась до 9,28 °С. Резкий всплеск температуры (рис. 4.13)

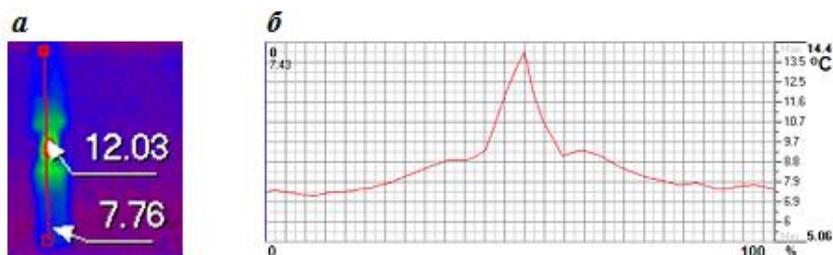


а – температурное поле поверхности стержня при упругой стадии; б – температурное поле поверхности стержня перед разрывом; в – изменение температуры вдоль оси (красная линия)

Рисунок 4.31 – Температура поверхности стержня без выточки при растяжении

на 5,5 °С происходил только в зоне будущего излома стержня. Аналогичный всплеск на 5,7 °С наблюдался и в ненадрезанном стержне (рис. 4.31).

Теплообразование в сварных соединениях осесимметричных стержней (соединения арматуры и др.) в значительной мере определяется их конструктивной формой. В соединении с односторонней накладкой стержень работает на внецентренное растяжение. Пластические деформации раньше появляются у конца верхнего стержня в месте его соединения с накладкой. В этом месте происходит и больший нагрев стержня. В фланговых швах нагрев неодинаков по длине шва: больший нагрев на конечных участках соединения и меньший в его средней части. Концевые участки такого соединения имеют на 1,5 °С более высокую температуру, чем в средней части швов. Это соответствует распределению сдвиговых деформаций по длине такого шва. При развитии разрушения теплообразование локализуется в месте разрыва.



а – температурное поле поверхности стержня; б – изменение температуры вдоль оси стержня

Рисунок 4.32 – Изменение температуры поверхности стержня с выточкой

4.3. Определение напряжений в элементах конструкций

Определение напряжений в стальных элементах пассивным тепловым методом можно производить используя теоретически установленную и экспериментально подтвержденную взаимосвязь между изменением напряженного состояния контролируемого малого элемента и его температуры

(ΔT). Эту зависимость впервые установил У. Томсон в 1857 г. [100]. Запишем ее в виде

$$\Delta T = -\frac{T\alpha}{c_p\rho} \Delta(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (4.15)$$

где T – абсолютная температура элемента в градусах Кельвина; α – коэффициент теплового расширения стали; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; ρ – плотность стали; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Вид формулы (4.15) можно изменить с использованием понятия первого инварианта тензора напряженного состояния (I_1) и обозначения $K_m = \frac{\alpha}{c_p\rho}$:

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{c_p\rho} \cdot T \cdot \Delta I_1 = -K_m \cdot T \cdot \Delta I_1. \quad (4.16)$$

Величину ΔI_1 представим в виде

$$\Delta I_1 = \Delta(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \Delta\sigma_1(1 + K_{21} + K_{31}), \quad (4.17)$$

где $K_{21} = \frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1} \leq 1, K_{31} = \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1} \leq 1$.

При одноосном напряженном состоянии $\Delta I_1 = \Delta\sigma_1$. Упругое растяжение-сжатие однородного, изотропного шара для элемента в центре шара дает $(1 + K_{21} + K_{31}) = 3$. Для других ситуаций $(1 + K_{21} + K_{31}) < 3$. Отмеченная неопределенность не имеет места только при $K_{21} + K_{31} = 0$. Для других конкретных ситуаций сумму $K_{21} + K_{31}$ можно определять на основании конечно-элементного расчета изделия. Коэффициент K_m определяется расчетом или экспериментально для конкретной марки стали и соответствующего температурного диапазона. Для температур от 223 до 373 К величины K_m для нелегированных и слаболегированных сталей при комнатной температуре $K_m = 3,09 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$; для высоколегированных сталей - $K_m = 4,36 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$. Для других сталей их величины можно принимать по данным [236]. Например, если температура поверхности статически растягиваемого элемента из стали 22К изменится на $\Delta T = 0,1 \text{ К}$, то это будет соответствовать при $T = 293\text{К}$

изменению напряжений $\Delta\sigma_1 = 110,6$ Па. Из расчета следует, что при определении напряжений по температурному полю поверхности изделия высокие требования должны предъявляться к приборам измерения температуры и соответствующему программному обеспечению.

Выражение (4.16) справедливо при адиабатическом нагружении в упругой стадии деформирования однородных изотропных материалов при температуре T .

При деформировании металлов, других материалов поверхности разрушения излучают энергию [238, 239], в основном инфракрасного диапазона. Изменение потока фотонов инфракрасного излучения ($\Delta\Phi$) можно получить, дифференцируя уравнение Стефана-Больцмана [238]:

$$\Delta\Phi = 13eB^*T^2\Delta T. \quad (4.18)$$

Заменяя ΔT выражением (4.16) представляем (4.18) в виде

$$\Delta\Phi = -13eB^*T^2K_m \cdot T \cdot \Delta I_1 \quad (4.19)$$

где: B^* – постоянная Стефана-Больцмана для фотонной эмиссии ($1,52041 \cdot 10^{15}$ фотон \cdot с $^{-1}$ \cdot м $^{-2}$ \cdot К $^{-3}$ [238]).

Зависимость (4.16) экспериментально подтверждена для различных стадий работы материалов [238] и позволяет использовать ИК термографию для определения напряжений. Выражение (4.19) положено в основу определения напряжений методами SPATE, Sira [238].

Проверка формулы У. Томсона тремя способами (по данным термографии, тензометрирования при упругой работе материала и на основании конечно-элементного анализа, см. 4.3.1) позволила авторам работ [6; 240; 241] сделать вывод, что тепловой и конечно-элементный методы дают близкие результаты и применимы при работе стали вплоть до разрушения, а тензометрический метод – только при упругой работе.

Теория У. Томсона [100] не позволяет прогнозировать поведение конструкционной стали при ее работе в предельной и запредельных стадиях, характеризующихся возникновением

пластических деформаций, зарождением и развитием трещин, разрушением [242].

4.3.1. Соответствие полей напряжений, определяемых тепловым, тензометрическим методами и расчетом МКЭ

Сопоставительные исследования напряжений различными методами выполнялись в 1993-2003г.г. на кафедрах стальных конструкций Будапештского технического университета и Брандербургского технического университета. Под руководством профессора Г.Пастернака [6; 240; 241] с применением этого метода исследовались как отдельные элементы обычных конструкций, так и элементы легких тонкостенных систем.

Схемы образцов и конструкций показаны на рис.4.33. Конструктивные особенности и основные размеры образцов из низкоуглеродистой стали приведены на рис. 4.33 - рис.4.37. Образцы нагружались по схемам рис.1 переменной нагрузкой F . Напряженное состояние в характерных зонах определялось 3-мя способами: по данным термографии (TV), тензометрированием (DMS) при упругой работе материала и на основании конечно-элементного анализа (FEM).

Термография поля поверхностных температур велась термографом Агента 900 с температурным разрешением $0,08^{\circ}\text{C}$. Пересчет изменений температур (ΔT) в изменения суммы главных напряжений ($\Delta\sigma$) при температуре материала (T) и экспериментально определенном коэффициенте $K_m=3,32 \cdot 10^6$ МПа выполнялся по формуле:

$$\Delta\sigma = -\frac{\Delta T}{T \cdot K_m}. \quad (4.20)$$

Тензометрирование выполнялось с использованием датчиков DMS11-20, DMS1-10, DMS No. Конечно-элементный расчет (FEM-расчет) производился по программам ABAQUS, версия 5.4, и MSC-PATRAN 3.

Конструктивные особенности и основные размеры образца серии «а» приведены на рис.4.34. Образец растягивался малоцикловой нагрузкой с коэффициентом асимметрии $0,1-0,2$ и амплитудой – $20-47,35$ кН. Число циклов нагрузки на различных ступенях нагрузки составляло 14, 20,100 [6]. Максимальная

растягивающая сила изменялась от 50,0 кН до 105,6 кН; минимальная-10,0 - 10,9 кН.

Изменение температур, напряжений в зависимости от удлинения образца показаны на рис.5 (при $F=50$ кН), рис.4.36 (при $F=80$ кН), рис.4.37 (при $F=100$ кН).

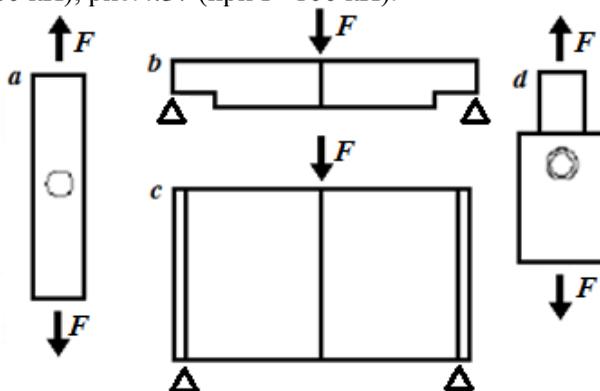


Рисунок 4.33 - Опытные образцы, использованные в работе [6] и схемы их нагружения: а-плоский образец с отверстием; б-прокатной двутавр с приопорными вырезами нижней полки; с-сварная балка; д-образец-проушина

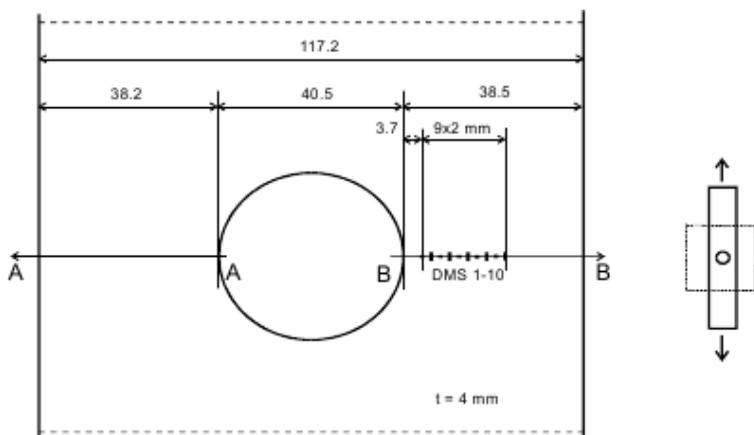


Рисунок 4.34- Конструктивные особенности образца типа «а» [6]

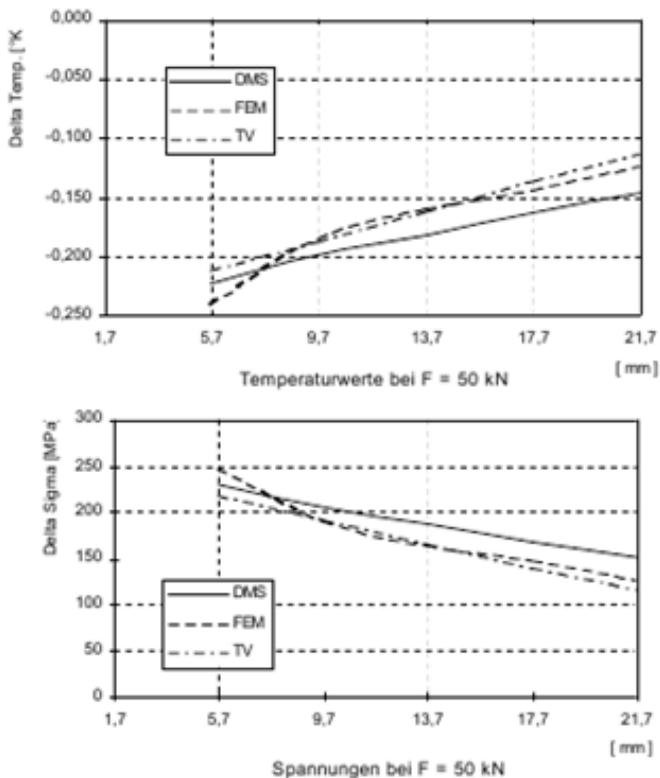


Рисунок 4.35 - Данные эксперимента при $F = 50$ кН [6]

Из рис.4.35 видно, что погрешность при определении изменения температуры поверхности при упругой работе металла составляет (0,01-0,02) К, а напряжений –(10-25) МПа, на стадии самоупрочнения материала – соответственно, (0,04-0,07)К и (30-70) МПа, в стадии зарождения разрушения-соответственно, (0,01-0,07) К и (10-70) МПа. При этом TV- и FEM-методы работают на всех стадиях, а DMS-метод – только на упругой стадии.

Конструктивные особенности и основные размеры образца серии «b» приведены на рис. 4.38. Образец растягивался малоцикловой нагрузкой, начиная с 73 кН, с коэффициентом

асимметрии 0,028 - 0,18 и амплитудой – 29,7 - 131,1 кН. Число циклов нагрузки на различных ступенях нагрузки составляло 14, 20,100 [6]. Максимальная растягивающая сила изменялась от 72,6 кН до 272,2 кН; минимальная - 3,4 - 16,2 кН.

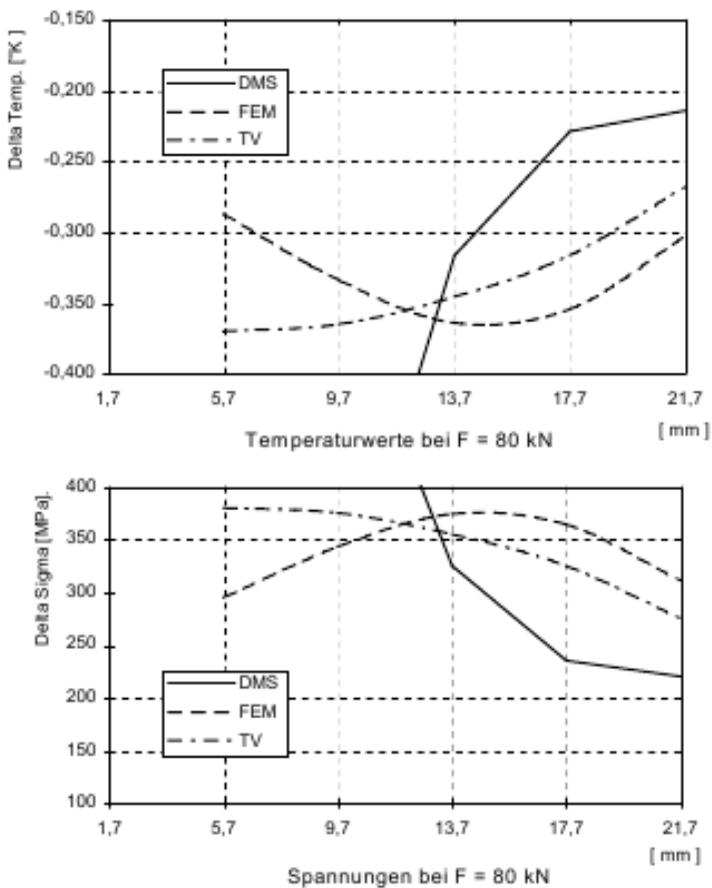


Рисунок 4.36-Данные эксперимента при F=80 кН [6]

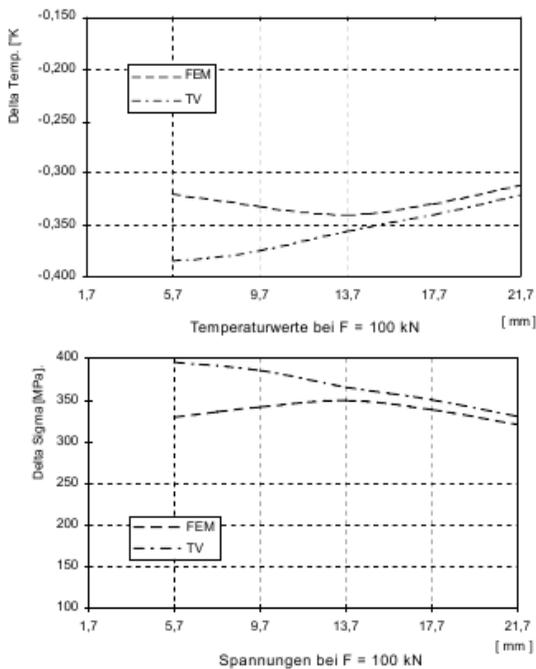


Рис.4.37. Данные эксперимента при $F=100$ кН [6]

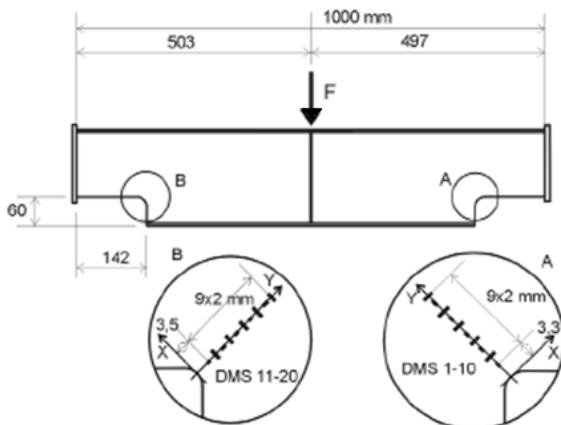


Рисунок 4.38 - Конструктивные особенности образца типа «b» из прокатного двутавра №20 [6]

Изменение температур, напряжений в зависимости от удлинения составляет: при $F=75$ кН $-(0,05-0,08)$ К, а напряжений $-(50-90)$ МПа; при $F=135$ кН $-(0,03-0,08)$ К и $(25-80)$ МПа. Предельное состояние образца наступило вследствие образования и развития трещины в зоне А.

Конструктивные особенности и основные размеры образца серии «с» приведены на рис.4.39. Образец растягивался малоцикловой нагрузкой, начиная с 90,5 кН, с коэффициентом асимметрии 0,065 - 0,1 и амплитудой $- 42,3 - 71,85$ кН. Число циклов нагрузки на различных ступенях нагрузки составляло 5-100 [6]. Максимальная растягивающая сила изменялась от 90,5 кН до 154,5 кН; минимальная-5,9-14,6 кН.

Изменение температур, напряжений в зависимости от удлинения составляет : при $F = 75$ кН $-(0,05-0,08)$ К, а

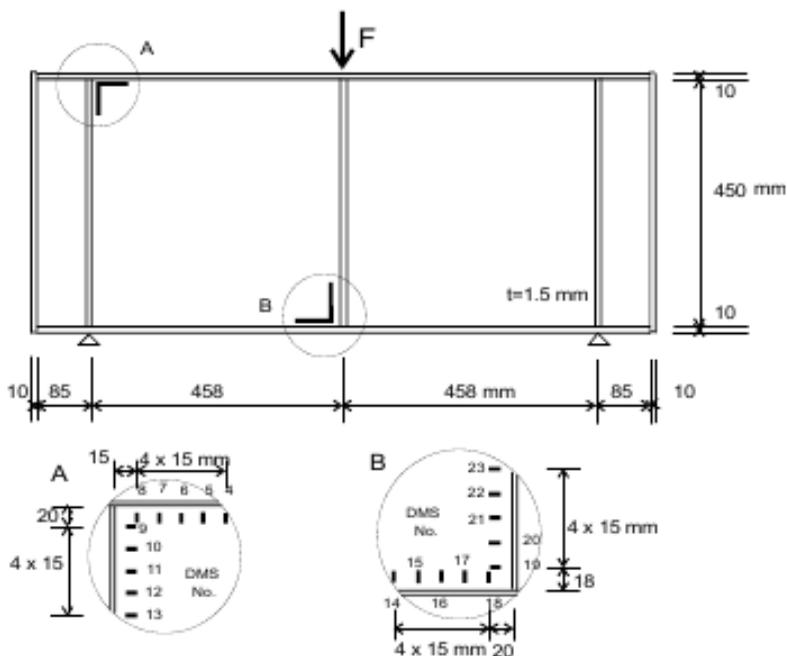


Рисунок 4.39 - Конструктивные особенности образца типа «с» (балка-стенка) [6]

напряжений – (50 - 90) МПа; при $F=135$ кН –, соответственно, (0,03-0,08) К и (25-80) МПа. Предельное состояние образца наступило вследствие образования и развития трещины в зоне А.

При этом TV- и FEM-методы также работают на всех стадиях, а DMS-метод – только на упругой стадии. На рис.4.40 показаны результаты расчета FEM-методом отсека балки-стенки(сверху) и балки-стенки -TV- методом (снизу).

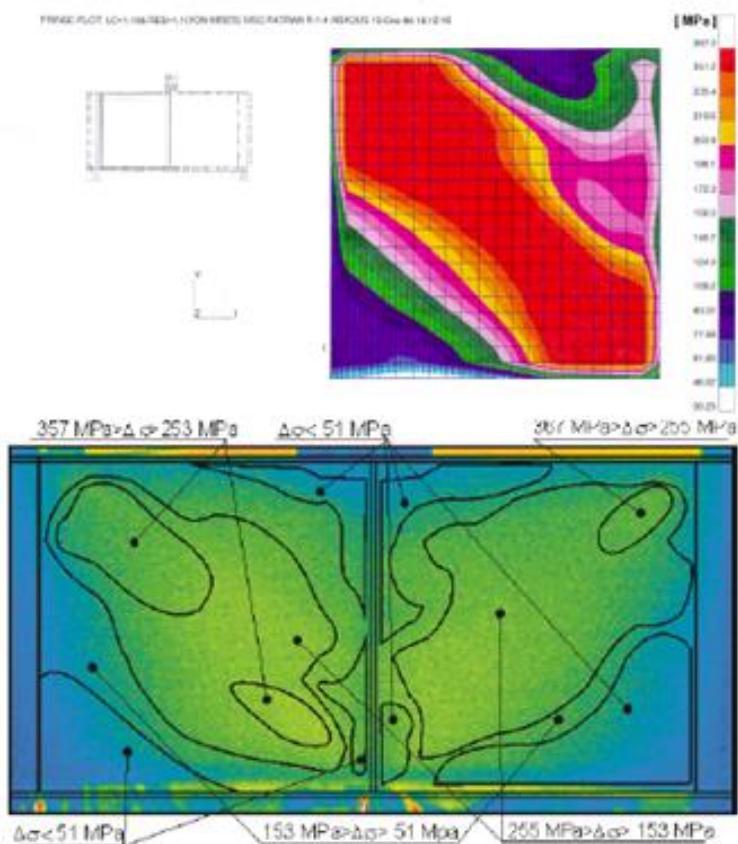


Рисунок 4.40 - Результаты расчета FEM-методом отсека балки-стенки (сверху) и балки-стенки -TV- методом (снизу) [6]

Конструктивные особенности и основные размеры образца серии «d» приведены на рис.4.41 (тонколистовой образец).

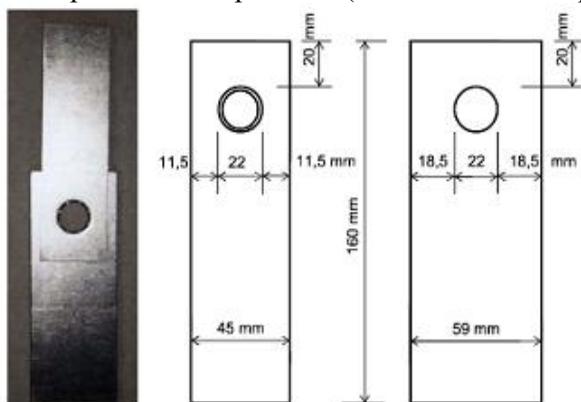


Рисунок 4.41 - Конструктивные особенности образца типа «d» [6]

Образец изготовлен из оцинкованной стали S350GD+Z толщиной 1,5мм. Образец растягивался малоцикловой нагрузкой по изложенной выше схеме. Частота приложения нагрузки составляла 4 Гц. Нагрузка прикладывалась в интервале 7 - 9 кН с амплитудой 0,5кН при 100 циклах на каждой ступени, далее до разрушения соединения при $F = 12,0$ кН – амплитудой 0,2кН и 80 циклах на каждой ступени.

На рисунках 4.42, рис.4.43 приведены изолинии напряжений в образце.

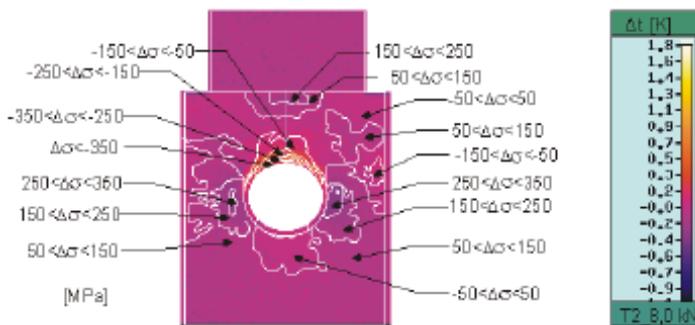


Рисунок 4.42 - Результаты расчета соединения из тонколистовых элементов -TV- методом [6]

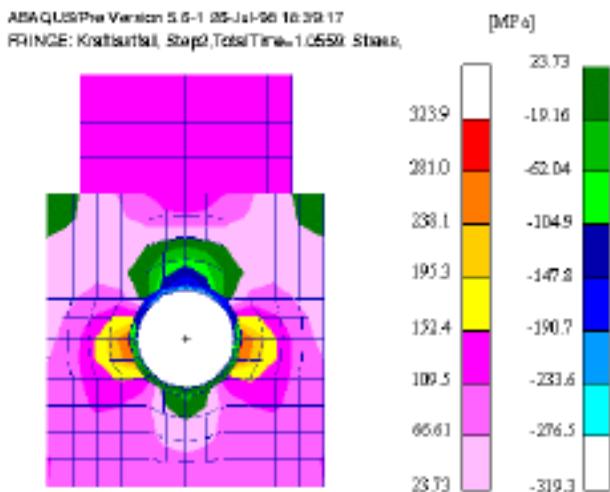


Рисунок 4.43 - Результаты расчета FEM-методом соединения из тонколистовых элементов [6]

4.4. Тепловой контроль стальных конструкций

В процессе изготовления, монтажа и эксплуатации элементов стальных конструкций в них возникают и развиваются различные дефекты [17; 242]. Поэтому далее рассмотрим особенности применения ИК-термографии для выявления дефектов в элементах стальных конструкций с помощью **пассивных и активных методов теплового контроля**.

Традиционные инструментальные методы выявления дефектов в конструкциях предполагают наличие непосредственного доступа к поверхности обследуемых элементов и достаточно трудоемки. Многие дефекты в процессе восприятия нагрузки способны генерировать тепло или рассеивать и изменять интенсивность теплового потока в материале. Эти изменения теплового потока можно использовать для неразрушающего контроля конструкций (НКК) методами термографии [18; 19; 38 - 41]. Термография, и ИК-термография в частности, является альтернативой традиционным методам НКК. Она безопасна, не требует непосредственного контакта датчика с

поверхностью элемента и дает результаты за более короткие сроки в сравнении с другими методами. Термографические методы НКК основаны на принципе передачи тепла в твердых телах. Данная технология в последнее время начала привлекать к себе повышенный интерес, чему способствовали успехи в развитии инфракрасных технологий и систем формирования изображений.

Выявление неоднородностей по температурному полю поверхности. При отсутствии движения тела и его элементов уравнение распространения тепла по объему представляется в виде [243]:

$$\rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} - q_v - \operatorname{div}(\bar{\bar{\lambda}} \operatorname{grad} T) = 0, \quad (4.21)$$

где q_v - интенсивность (плотность) внутренних источников тепла различной природы (химические реакции в теле, фазовые превращения и др.);

ρ - плотность материала;

$\bar{\bar{\lambda}}$ - матрица теплопроводности для неоднородного тела;

c_p - удельная теплоемкость среды при постоянном давлении.

Для изотропного тела $\bar{\bar{\lambda}} = \lambda \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, λ - коэффициент

теплопроводности.

Распределение температуры для изотропного стержня без внутренних источников вытекает из уравнения:

$$\frac{\delta T}{\delta t} - \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\delta^2 T}{dx^2} = 0, \quad (4.22)$$

где: $\frac{\lambda}{\rho c_p}$ - коэффициент температуропроводности среды, представляющий собой меру скорости изменения температуры единицы объема тела при прохождении через него теплового потока, пропорционального λ .

Аналитическое решение уравнения (2) имеет вид:

$$T(x, t) = T_L + \frac{4(T_0 - T_L)}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \sin\left(\frac{2n+1}{L} \pi x\right) \exp\left(-\frac{(2n+1)^2}{L^2} \pi^2 \frac{\lambda}{\rho c_p} t\right). \quad (4.23)$$

Выражения (4.21 - 4.23) показывают, что распределение температур должно соответствовать особенностям внутреннего строения неоднородного тела. Действительно, при его нагревании

тепловая энергия будет передаваться теплопроводностью (в твердой части тела), конвекцией (в жидкой фазе) и излучением (в пустотах). Различие в теплопроводности между составляющими (фазами) тела может в значительной степени влиять на распространение тепла, и, следовательно, на распределение объёмной и поверхностной температуры объекта.

Тепловое состояние неоднородного тела часто исследуется в инфракрасном (ИК) электромагнитном волновом диапазоне ($3\mu\text{m}$ - $5\mu\text{m}$ и $8\mu\text{m}$ - $12\mu\text{m}$) и характеризуется совокупностью следующих параметров: размеры тела; теплопроводность; излучательная способность поверхности, форма и размеры дефектов; теплопроводность в месте дефекта. Распределение температуры в теле зависит от перечисленных параметров, а также от геометрии тела и временной диаграммы нагрева/охлаждения. Если в теле нет дефекта, то температурный градиент должен быть «плавным», но если имеется дефект, то он вызовет более резкое отклонение температурного градиента вследствие разности теплопроводности на смежных участках. Так, при растяжении стального стержня диаметром d с внутренним (рис.4.44, а) или внешним (рис.4.44, б)

дефектами температура T по его длине (сечения x_1 - x_n) распределяется в соответствии с рис.1, а при движении трещины в стальном листовом элементе в вершине трещины возникает значительный нагрев (рисунки 4.10, 4.16, 4.29 – 4.31).

Благодаря ИК термографическому изображению можно обнаружить дефекты (типа трещин, другие неоднородности), потому, что их теплопроводность отличается (обычно в меньшую сторону) от теплопроводности окружающего их металла. Теплопроводность материала может локально меняться в тех областях, которые подвергались механическому или тепловому воздействию. Такие изменения зачастую являются более заметными, и поэтому их легче обнаружить, чем изменения в свойствах материалов. Тепловой поток наблюдается в веществах всякий раз, когда температуры на каких-то смежных участках

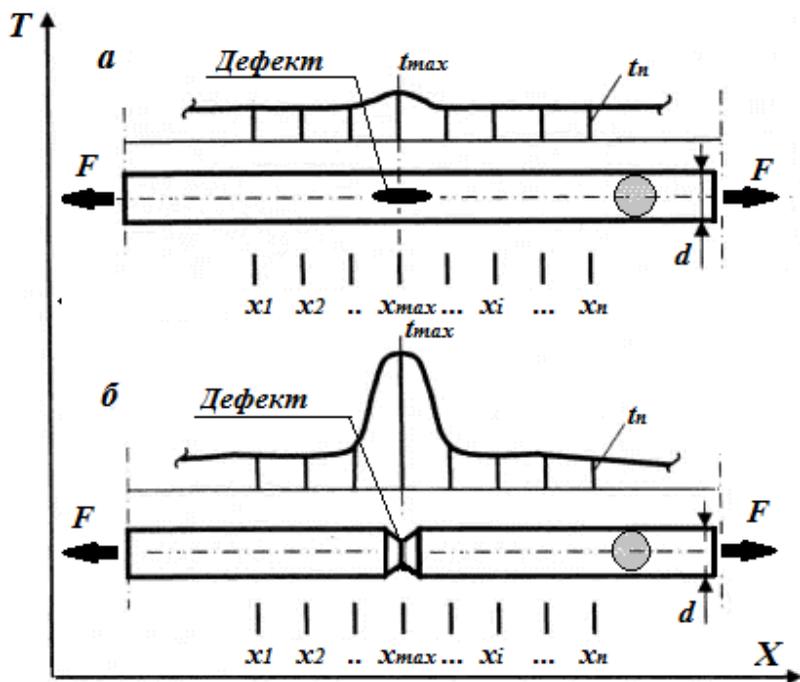


Рисунок 4.44 - Схема распределения температуры по длине гладкого (а) и надрезанного (б) стержней при их растяжении

отличаются. Тепловая энергия перемещается от участка с более высокой температурой к участку с более низкой температурой. Поток тепловой энергии будет в этом направлении до тех пор, пока температуры участков не станут одинаковыми. Увеличение разницы температур между двумя участками приводит к увеличению скорости теплового потока. Будем далее различать понятия градиента и контраста. Тепловой градиент (температурный градиент) - это разница температур между двумя точками, которые разделены единицей расстояния. Температурный (тепловой) контраст, т.е. разница между температурами в различных точках объекта, определяет видимость подповерхностного дефекта. Тепловой контраст увеличивается с разницей между теплопроводностью дефекта и теплопроводностью основной массы материала тела.

Посредством теплового сканирования воспроизводится изображение, которое соответствует распределению температурных полей по поверхности объекта. Способ передачи тепла через объект зависит от свойств такого объекта. Так, дефект, который будет препятствовать движению силового потока через элемент, будет также сдерживать поток тепла через этот элемент.

Распределение температуры на поверхности деформируемого силами F изделия можно использовать для выявления места расположения дефекта, его размеров, глубины залегания в изделии, изменения геометрии дефекта во времени, так как поток деформационного тепла соответствует изменению напряженно-деформированного состояния в окрестности дефекта, его геометрических размеров.

Особенности технологии ИК термографического контроля дефектов в стальных элементах. Для обнаружения дефекта в конструктивном элементе часто достаточно наблюдать за установившимся распределением температуры на поверхности тела. В иных случаях дефект можно нагреть или охладить, чтобы усилить внутренний теплообмен. Поэтому методы неразрушающего контроля с использованием инфракрасной термографии разделяют на активные и пассивные.

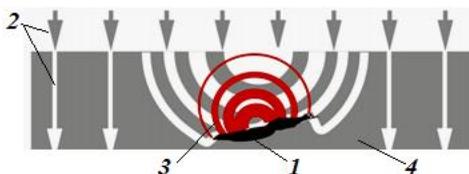
При этом могут использоваться разнообразные приемы возбуждения теплового контраста между дефектными и бездефектными зонами элемента. Эти приемы можно разделить на **внешние**, при которых волна тепловой энергии поступает извне на поверхность, а затем распространяется через материал, пока не столкнется с дефектом, и **внутренние**, в которых энергия в различной форме вводится в исследуемый элемент с целью стимулирования дефекта к возбуждению электромагнитных колебаний ИК диапазона. В качестве внешних источников служат различные оптические устройства, (фотовспышки - для импульсного теплообразования и галогенные лампы - для периодического возбуждения тепла). Внутренние возбуждения могут достигаться возбуждением деформаций в теле, которые по различным механизмам «внутреннего трения» на дефектах возбуждают теплообразование (механические колебания различной частоты и амплитуды).

Подготовительные работы для теплового контроля. ИК-камера фиксирует тепло, как излучаемое так и отражаемое объектом. Эмиссионная способность элемента определяется распределением тепла по образцу, а отражаемое от поверхности тепло - состоянием и цветом поверхности элемента, освещением и т.д. (см. разделы 2, 3). Внутреннее состояние объекта можно выявлять только по эмиссионной способности. Поэтому влияние отражения на термоизображение должно быть минимизировано. Этого добиваются изменением отражающей способности поверхности элемента соответствующей окраской, покрытием. Повышения качества изображения и чувствительности можно достичь, если на поверхность напылить матовое красочное покрытие. Перед нанесением покрытия с поверхности исследуемого объекта удаляется окалина и она обезжиривается. Поверхность должна быть достаточно гладкой, чтобы обеспечить нанесение равномерного слоя краски. Кроме этого, она должна испускать инфракрасные лучи равномерно под большим углом зрения, иметь хорошую теплопроводность, легко наноситься и удаляться. Толстые покрытия могут вызывать затухание сигнала. Наиболее часто используется черная матовая краска. Однако, эмиссионная способность матовых красочных покрытий при любых цветах выше, чем у поверхностей металла с покрытиями или без покрытий.

Активный и пассивный методы термографии. Выбор конкретных тепловых методов контроля объектов зависит от многих факторов, в т.ч. особенности объекта, его контролепригодность, длительность, трудозатраты, стоимость работ и др. Активный метод термографии чаще применяется при статическом состоянии объекта. При изменении нагрузок и воздействий на объект контроля, его деформировании и появлении соответствующего теплообразования может оказаться более эффективным пассивный метод.

Активный метод термографии [19; 38; 40; 41; 244; 245]. Активный ИК термографический метод требует использования внешнего источника для стимуляции тепла на дефектах контролируемого объекта и получения желаемого изображения. Во многих случаях тепловой импульс направляется на образцы. Поток тепла, перемещающийся через объект, инструментально

контролируется. Дефект в объекте выявляется по изменению и аномалиям температурного поля поверхности изделия (рис.2).



1 – дефект; 2 – воздействие от внешнего источника; 3 – наведенные внешним воздействием тепловые волны; 4 – объект контроля

Рисунок 4.45 - Схема выявления дефекта при активном ИК термографировании

Пассивный метод термографии. Пассивный метод не требует использования дополнительного источника тепла для получения желаемого теплового изображения. Тепло возникает в процессе работы объекта (деформирование, трение, возникновение и развитие трещин, тепловые и механические технологические воздействия (сварка, тепловая резка, правка) и др.). При пассивном методе увеличение температуры, которое производится дефектом, отслеживается на тепловом ИК изображении. Имеется много способов возбуждения инфракрасных волн внутренними дефектами исследуемого элемента (рис.3). В последнее время активно разрабатываются методы, основанные на эффекте возбуждения в твердых телах тепловых волн дефектом при его облучении упругими волнами ультразвукового и других диапазонов.

Особенности технологии мониторинга стальных конструкций с использованием неразрушающего контроля на основе пассивного метода ИК термографии. Технология мониторинга заключается в сборе с заданной периодичностью информации по температурному полю исследуемого сооружения, его элементов, экспериментальному и расчетному анализу тепловой информации и подготовке предложений по обеспечению требуемой работоспособности, термографическому контролю за качеством ремонтно-восстановительных работ. В наиболее полном виде процесс мониторинга предполагает анализ проектной документации сооружения; определение

количественных значений температуры в точках поверхности контролируемой конструкции и дополнительных теплотехнических характеристик материала элементов; качественный и количественный анализ температурных полей на исследуемой поверхности; выявление зон с аномальной температурой, обусловленной наличием дефектов в контролируемых элементах; численном моделировании теплотехнических параметров элементов конструкции и сопоставлении их с данными термографирования; идентификацию дефектов. Тепловой инструментальный контроль выполняют в соответствии с технологическими картами или технологическими инструкциями, разрабатываемыми на основе действующих технических нормативно-правовых актов и содержащих технологию сканирования. Тепловой контроль совмещают с фиксацией состояния конструкции и ее дефектов в видимом диапазоне, и, при необходимости, - с другими методами неразрушающего контроля. Взаимосвязь названных этапов и их последовательность показана на рис. В.1. Следует иметь в виду, что к настоящему времени достаточно детально разработана технология сканирования надземных строительных и иных объектов с целью оптимизации теплопотерь, особенности которой зафиксированы в ряде нормативных документов. Для тепловых исследований стальных конструкций подобные нормативные документы отсутствуют, что определяется прежде всего многофакторностью решаемых задач.

В силу этого на основании предварительного изучения технической документации по конкретному сооружению приходится разрабатывать технологию производства работ по ИК-сканированию. Существенным ограничением при этом является необходимость производства работ на открытом воздухе, в сжатые сроки из-за постоянно изменяющейся температуры окружающего воздуха. Это требует увязки технических параметров сканирующей тепловизионной аппаратуры со скоростью (v) ее продвижения вдоль конструкции (элемента), расстоянием от поверхности исследуемого элемента и т.д.. Предварительно скорость движения термографической установки вдоль конструкции можно определить по зависимости:

$$v = \frac{k b}{T}, \quad (4.24)$$

где: b – размер пятна поверхности элемента конструкции, сканируемого за один кадр;
 $k = 0,8-0,9$ - коэффициент, учитывающий перекрытие кадров;
 T - время сканирования полосы поверхности конструкции или время формирования кадра. Окончательно скорость (v) назначается в процессе сканирования. При этом оптимальной будет скорость, при которой разрешение записи в направлении движения столь же высоко, как и в обратном. При повышении скорости происходит потеря детальности; понижение же не дает выигрыша в информации. Это существенно для получения качественного изображения конкретных дефектов. Опыт показывает, что при использовании термографов с частотой вращения зеркала 30-300 Гц наиболее приемлемое качество термоизображений можно получить при скорости движения в пределах $v = 0,5-7$ км/час. Во время съемки изменение температурного напора не должно превышать 30% от начального значения. Поверхности объекта в период тепловизионных измерений не должны подвергаться дополнительному тепловому воздействию от биологических объектов, источников освещения. С целью снижения тепловых помех на контролируемый объект следует контролировать приближение к нему нагретых тел. Так, минимально допустимое приближение оператора тепловизора к обследуемой поверхности должно составлять не менее 1 м, электрических ламп накаливания - 2м. В этих же целях следует использовать защитные экраны. Идентификацию объектов на термограмме можно производить путем сравнения термоизображений с видимыми изображением той же зоны поверхности, полученной с помощью съемки в видимом свете. Тепловизионную съемку желательно выполнять при отсутствии движения транспортных средств, в предрассветные или ночные часы, когда тепловое влияние окружающей среды минимально.

Качество термоизображения зависит от расстояния (L) приемника до исследуемой поверхности. С увеличением расстояния L возрастает поле обзора, ухудшается детальность изображения и искажаются значения истинной температуры за счет поглощения в атмосфере. Последний эффект можно не учитывать при расстояниях менее 30 м. При больших расстояниях

следует применять соответствующие поправочные формулы, учитывающие поглощение ИК-излучения.

Расстояние (L , в метрах) установки тепловизора от поверхности объекта можно определить по формуле:

$$L \leq \frac{\Delta H N_c}{10\varphi}, \quad (4.25)$$

где: φ - угловой вертикальный размер поля обзора тепловизора, в радианах;

ΔH - линейный размер подлежащего выявлению участка конструкции.

N_c - число строк развертки в кадре тепловизора.

Расположение термографа желательно назначать так, чтобы поверхность объекта измерений находилась в прямой видимости.

При анализе термограмм дефектов решающими факторами являются сведения о тепловом режиме элементов и узлов конструкции, опыт оператора и вид изображения соседних зон, на фоне которых обнаруживается конкретная аномалия. Целесообразно при этом использовать следующие вытекающие из опыта рекомендации:

- использовать компьютерное совмещение видимого и теплового изображения одного и того же участка поверхности, или оконтуривание дефектных зон на видимом изображении после их обнаружения на термограммах;

- для анализа тепловых аномалий использовать эталонные изображения дефектов, которые должны находится в тех же условиях теплообмена, что и исследуемый участок;

- необходимо учитывать, что поверхности, визируемые под большим углом, выглядят на изображении более холодными, аналогичный эффект проявляется и относительно снятых под большим углом удаленных зон, при больших расстояниях съемки;

- неокрашенные металлические элементы при отсутствии внешней подсветки выглядят на термоизображении, как правило, более холодными, чем они есть на самом деле;

- роль тепловых аномалий могут играть архитектурные детали, выступы; неоднородностям коэффициента излучения поверхности; неоднородности теплообмена с окружающей средой, различного рода дефекты поверхности.

РАЗДЕЛ 5. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ И МАШИН С ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕМ ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В пункте 1.2 изложены основные принципы технического зрения. В последние годы ему уделяется большое внимание с целью использования в дистанционных системах неразрушающего контроля дефектов. Основываясь на принципах технологий технического зрения, различные исследователи создают такое оборудование для контроля и диагностики сооружений, машин. Вместе с тем высокие требования к точности и быстродействию таких систем, жесткие требования по оперативному управлению ими и высокая стоимость используемого оборудования ограничивают их широкое применение в технологиях контроля ответственных объектов (мостов, тоннелей, отдельных типов машин).

5.1. Тепловой контроль мостовых конструкций

При эксплуатации стальных мостовых конструкций обращают пристальное внимание на развитие повреждений конструкций, дефекты в металле элементов, в заклепочных, болтовых, сварных соединениях (коррозия, трещины, различные повреждения соединений, расслаивание металла, «распучивание» клепанных листовых пакетов и сдвоенных элементов), на проверку состояния элементов конструкций (искривленных, деформированных с потерей устойчивости и др.).

Особое внимание уделяют местам, в которых наиболее вероятно появление трещин. **В заклепочных соединениях конструкций** трещинообразованию предшествует ослабление заклепок соединений. Трещины в таких соединениях появляются:

- в узлах прикрепления элементов сквозных пролетных строений;
- в связях и пересечениях упругих плоских элементов;
- во втором, третьем и четвертом рядах заклепок узлов сопряжения продольных и поперечных балок;
- в соединительных накладках продольных балок и в соединениях, узлах прикрепления элементов связей к продольным балкам;

- в клепаных элементах, усиленных сваркой;
- в плитах верхнего и нижнего балансирования опорных частей пролетных строений;
- в верхних узлах прикрепления поперечных балок к главным балкам пролетных строений с ездой поверху.

При болтовых соединениях трещины часто появляются в тех же местах, что и при заклепочных соединениях.

В сварных соединениях конструкций трещины возможны как в сварных швах, так и в основном металле. Наиболее вероятно зарождение и развитие трещин в зонах:

- резкого изменения сечения элементов;
- на концах сварных швов горизонтальных и вертикальных ребер жесткости;
- вблизи стыков, ребер, диафрагм, накладок;
- в соединительных швах и швах, расположенных поперек усилий в соответствующем элементе, околошовной зоне;
- в сварных швах с технологическими дефектами - непроварами, подрезами по углам, протечками расплавленного металла, шлаковыми включениями, порами, прогарами, незаполненными кратерами и др.

Обнаружение трещин в стальных элементах устанавливается визуально-оптическим методом или посредством неразрушающего контроля. Технология визуально-оптического контроля достаточно сложная. При визуальном осмотре обращают внимание на трещины в краске, на подтеки ржавчины как косвенные признаки присутствия трещин. Эти места очищают от краски и исследуют с помощью лупы или дефектоскопа. Более уверенные результаты получают при снятии тонкой стружки металла по предполагаемому направлению расположения трещины. Раздвоение стружки свидетельствует о наличии трещины. При снятии стружки нельзя допускать резких и глубоких надразов металла.

Дефекты на концах сварных швов можно выявить инструментальным исследованием предварительно очищенной до металлического блеска и промытой 10-20% водным раствором азотной кислоты.

Изложенная технология обнаружения трещин должна повторяться для всех опасных зон. Эта «ручная» технология

весьма трудоемкая, с большими затратами времени, дорогостоящая.

Кроме существующих трещин в элементах стальных пролетных строений мостов имеются и другие дефекты, в окрестности которых сталь находится в состоянии зарождения трещин. Выявить такое состояние металла традиционными методами неразрушающего контроля затруднительно. К тому же такие опасные зоны часто контроленепригодны.

Для исследования труднодоступных мест элементов стальных пролетных строений новые возможности предоставляет использование тепловых пассивных технологий неразрушающего контроля в комбинации с визуально-оптическими методами. Действительно, теплообразование в зонах дефектов, трещин происходит при действии переменной технологической нагрузки. Так, при прохождении по мосту поезда возникает переменное нагружение конструкций и металл нагревается в местах ослабленных заклепок, болтов, конструктивных дефектов, трещин и др. Такого нагрева достаточно, чтобы зафиксировать положение его источника высокочувствительным тепловизионным прибором и удостовериться в существовании дефекта смежным методом.

Тепловая диагностика фрикционных соединений элементов стальных пролетных строений мостов. К таким элементам относятся сопряжения и узлы стальных конструкций на заклепках и с соединениями на высокопрочных болтах. Особенности их работы на сдвиг иллюстрируются схемами (рис.5.1).

Работу заклёпок можно разделить на три стадии. В первой стадии сила на соединение распределяется на листы пакета фрикционными усилиями, которые возникают на контактных поверхностях листов при обжатии пакета заклёпками. При дальнейшем увеличении нагрузки на соединение происходит сдвиг соединяемых листов пакета до касания с поверхностью стержня заклепки. Вторая стадия завершается искривлением оси стержня заклепки, возникновением силы смятия и среза заклёпки. Увеличение нагрузки на соединение усиливает изгиб стержня заклепки, вызывает внецентренное растяжение в зонах сопряжения головок со стержнем заклепки. Начальные силы

трения на этой стадии ослабевают. На 3 стадии внешнее усилие воспринимается смятием металла листов в зоне контакта со стержнем заклепки и срезом стержня заклепки по сечениям $a-a$ и $b-b$ (рис.5.1).

Аналогично заклепочному соединению могут работать соединения на высокопрочных болтах. Для мостовых конструкций с такими соединениями расчет ведут по первой стадии (работа сил трения).

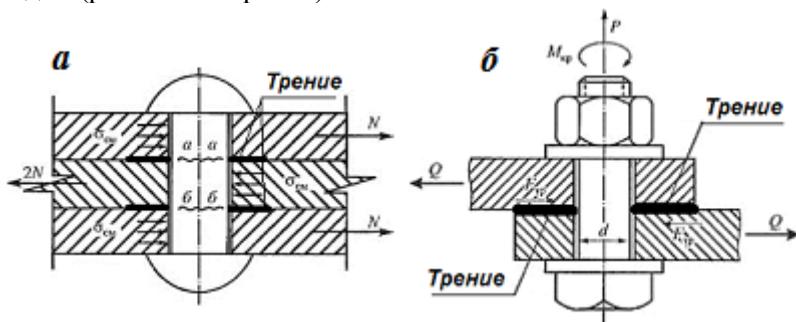


Рисунок 5.1 – Схема работы заклепочного (а) и фрикционного (б, с высокопрочным болтом) соединений

При статическом растяжении образцов со стыком стальных листовых элементов на заклепках (рис. 5.2, а) и на фрикционных болтах (рис. 5.2, б) установлено [246], что в сопоставимых сечениях листов проявляется большая неравномерность напряжений в соединении с заклепками. Также получено, что выносливость соединений на фрикционных болтах выше, чем у заклепочных [246]. Можно предполагать, что такие особенности работы двух типов сопряжений объясняются их конструктивным исполнением и различиями в состоянии зоны контакта трущихся поверхностей.

Теплообразование при работе на статическую и переменную нагрузку. Для обеспечения более высоких коэффициентов трения соединений на высокопрочных болтах используют различные виды обработки контактных поверхностей (дробеструйную, пескоструйную, газопламенную, дробеметную и др.). Относительное смещение таких шероховатых контактных поверхностей приводит к пластическому деформированию металла в плоскости контакта и его разогреву [247]. Повышение

температуры в зоне контакта за десятитысячные и меньшие доли секунды достигает в микрообъемах температуры плавления металла. Тепло от разогретых очагов распространяется вглубь контактирующих тел. Величина температуры в объемах металла, примыкающих к поверхностям трения, зависит от теплофизических свойств тел, их размеров, условий теплоотвода, мощности трения и величины площадки, на которой производится тепло. Экспериментально получено, что в тепло переходит до 90% всей мощности трения [247].

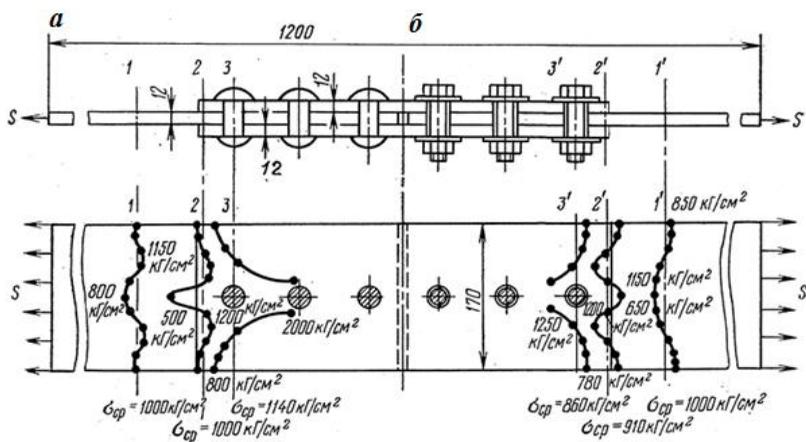


Рисунок 5.2– Эпюры напряжений в сопоставимых сечениях соединений стальных листов на заклепках (а) и высокопрочных болтах (б) [246]

Расчеты тепловыделения при трении выполняют в рамках различных модельных представлений [248; 249]. При проведении расчетов трущиеся тела принимаются гомогенными, а их теплофизические характеристики постоянными. Предполагается, что работа сил трения полностью переходит в тепло. Сравним зону прогрева тела у поверхности трения с толщинами соединяемых мостовых конструкций (h_i) по выражению (5.1) [249]:

$$h_i > \sqrt{a_i t}. \quad (5.1)$$

Принимая a_i по [250] при $t = 1$ сек получим для низкоуглеродистой стали условие $h_i > 7$ мм, которое для

несущих элементов мостовых конструкций выполняется. Это позволяет трущиеся тела моделировать полупространствами [249]. Принимая простейшую одномерную модель сплошного фрикционного контакта, работающего при больших давлениях на трущиеся тела и допуская постоянную мощность тепловыделения, можно в первом приближении определить среднюю поверхностную температуру T в плоскости сухого трения по выражению (5.2) [249]:

$$T = T_0 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{q_1 \sqrt{t}}{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}} \quad (5.2)$$

где $q_1 = 0.5 f p V$; f – коэффициент трения; p – контактное давление; V – скорость относительного скольжения тел трения.

Для фрикционного соединения двух одинаковых листов из низкоуглеродистой стали, стянутых высокопрочным болтом диаметром 24 мм, с поверхностью трения, обработанной дробеструйным способом, получаем по формуле (5.2), что $T - T_0 = 680$ °С. Такое повышение температуры во фрикционном соединении происходит в тонком слое толщиной в два-три десятка микрон. На поверхности листа толщиной 12 мм повышение температуры тогда будет немного выше одного градуса. При прохождении поезда по мосту нагрузка периодически повторяется, что может вызвать более значительное повышение температуры в фрикционных соединениях. Кроме того, на величине повышения температуры поверхности могут сказаться и другие факторы, например, смятие металла соединяемых листов, деформирование заклепок и др.

О тепловой диагностике фрикционных соединений. Из формулы (5.2) следует, что фрикционный нагрев пропорционален мощности трения. При предельном сжатии контактируемых элементов температура поверхности будет выше, чем в зонах с ослабленными заклепками или болтами. Это позволит выполнять тепловую диагностику фрикционных соединений. При этом измерение поверхностной температуры элементов необходимо вести тепловизионными приборами с точностью не ниже 0,1 °С, с записью термофильма, в течение всего процесса нагружения фрикционного соединения. Следует принимать меры по устранению помех термографированию [38] (выбирать удобное время суток, применять экраны для защиты от солнечного и

рассеянного теплового излучения и т.д.). Расстояние от объектива камеры до исследуемой поверхности должно быть минимальным (0.7 – 1.5 м). Беспольными для исследований температурных полей являются панорамные термокадры (например, всего моста, отдельной пролетной конструкции). Для систематизации узлов, расшифровки результатов полезно использовать контрастные маркеры, выполнять съемку в двух спектрах (видимом и инфракрасном).

Обнаружения усталостных трещин в стальных мостовых конструкциях с использованием метода инфракрасной термографии. В работе [251] изложены результаты лабораторных и полевых (натурных) исследований возможностей обнаруживать усталостные трещины активным и пассивными тепловыми методами. Натурные испытания проводились на пролетных строениях стального моста (рис.5.3). На ИК-диагностику трещин в элементах моста влияют многие факторы. В число этих факторов входят размеры трещин, расстояние до камеры, величина приложенного напряжения, время нагрева, время задержки, состояние поверхности (неокрашенный и матово окрашенный образец). Трещины обнаруживались при активном и пассивном тепловом контроле.

В качестве источника тепла при активном методе (рис.5.4) использовалась галогенная лампа кварта-Т3 (quart-Т3) [251]. Потребляемая лампой мощность - около 500 Вт при напряжении 120 вольт. Лампа излучает большую часть своей энергии в ближнем инфракрасном диапазоне (ниже 3 мкм), что существенно не противоречит диапазону чувствительности типичной ИК-камеры (3–5 мкм и 8–12 мкм). Проектор преобразует излучение линейного источника в одну полосу света с помощью плоскоцилиндрических выпуклых линз размером 1 на 2 дюйма (длина фокуса - 80 см). Линзы изготовлены из стекла ВК7, которое может выдерживать высокие температуры и имеет высокую эффективность (90%) в передаче энергии ближнего инфракрасного диапазона по сравнению с другими типами материалов. Для управления режимом и периодом подачи тепла (время нагрева и время задержки) использовался контроллер.

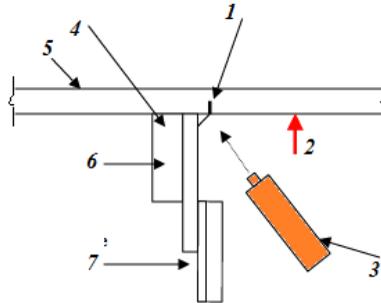
Фиксация температурных полей велась ИК-камерой, которая могла обнаруживать изменение температуры приблизительно в $0,1^{\circ}\text{C}$ с быстродействием 434 кадра в секунду. ИК-камеру и контроллер можно было настроить, контролировать и калибровать с помощью программного обеспечения DeltaTherm, разработанного StressPhotonic, Inc.

Результаты полевых испытаний показывают, что наименьшая трещина, обнаруживаемая ИК-камерой, больше, чем наименьшая трещина, обнаруживаемая невооруженным глазом. Результаты полевых испытаний показали, что глубина трещины является важным фактором, влияющим на обнаружение трещины. Сквозные трещины можно четко обнаружить с помощью ИК-камеры. Однако трещины, не проходящие по всей толщине, нелегко обнаружить при использовании ИК-камеры. Поверхность и условия освещения существенно повлияли на результаты. Время нагрева в полевых условиях больше, чем то, которое использовалось в лабораторных испытаниях. Это было необходимо из-за повышенной температуры поверхности стенки балки и из-за отражения тепла от глянцевой поверхности стенки балки. Основным недостатком, замеченным при полевых испытаниях, является то, что эта система ИК-обнаружения трещин требует соответствующего физического пространства и времени для надлежащей калибровки приборов перед использованием. Калибровка должна выполняться в закрытом помещении с минимальным освещением, чего трудно добиться в полевых условиях. Таким образом, использованный комплекс приборов для ИК-обнаружения трещин не совсем подходит для применения в полевых условиях. Приборная система для полевых условий должна быть устройством портативным, объединяющим источник тепла, ИК-камеру и компьютер в одном модуле.

В результате лабораторных исследований и результатам выявления трещин в элементах мостовых конструкций установлены следующие особенности неразрушающего теплового контроля мостовых сооружений.



Рисунок 5.3 - Тепловой контроль узла соединения поперечной связевой рамы со стенкой стальной балки автодорожного моста (с использованием подъемника) [251]



1- ИК-камера, 2- внешний источник тепла , 3 –трещина в зоне сварки, 4 – ребро жесткости , 5-элемент конструкции, 6- соединительная пластина , 7- связевой элемент

Рисунок 5.4 - Инспекция трещины методом активного теплового контроля (ИК-камера на том же уровне, что и трещина).

Влияние критических факторов на эффективность ИР. Размер трещины.

1. Глубина трещины по отношению к толщине элемента является важным фактором, влияющим на обнаружение ИК-трещины. Для пассивного подхода разная глубина трещин дает разные коэффициенты интенсивности напряжения. При активном подходе, независимо от длины трещины, чем выше отношение глубины трещины к толщине элемента, тем сильнее затруднен тепловой поток и тем легче обнаружить трещину.

2. Значительное падение температурного профиля проявляется только после того, как трещина становится сквозной. Неглубокие трещины, как правило, не могут быть обнаружены.

3. Наименьшая трещина, которую можно обнаружить при активном или пассивном подходе с помощью использованной системы больше наименьшего размера трещины, которую можно обнаружить невооруженным глазом.

Расстояние от ИК-камеры до образца.

1. Существует ограничение на максимальное эффективное расстояние как при активном, так и при пассивном методах. Самое длинное эффективное расстояние активного подхода больше, чем самое длинное эффективное расстояние пассивного подхода для того же размера трещины.

2. Трещина, обнаруженная по эффектам заторможенного теплового потока (эффекты излучательной способности), может быть обнаружена с расстояния большего, чем трещина, обнаруженная по эффектам контрастного отражения на поверхности. Другими словами, самое длинное эффективное расстояние активного подхода больше, чем самое длинное эффективное расстояние пассивного подхода для одного и того же размера трещины.

3. Матовая и глянцевая поверхности обеспечивают одинаковое эффективное расстояние при проведении теста в закрытых лабораторных условиях, но эффективное расстояние от матовой поверхности значительно больше, чем от глянцевой поверхности при той же длине трещины, времени нагрева и времени задержки при тестировании на открытом воздухе. из-за помех от отражения.

Величина приложенного напряжения.

1. Существует минимальное значение напряжения, при котором трещина обнаруживается тепловыми методами. Более высокий уровень приложенного напряжения делает трещину более заметной.

2. Эффект концентрации напряжения из-за трещины неотличим от эффектов концентрации напряжения из-за окружающей неправильной геометрии (отверстие под заклепку, сварной шов и т. д.), когда приложенное напряжение ниже минимального значения.

3. Минимальное значение напряжения, которое делает трещину обнаруживаемой, часто намного выше, чем напряжение от эксплуатационных воздействий в реальной конструкции.

Время нагрева и время задержки

1. Начальная температура и начальное тепловое распределение в образце существенно влияют на активный подход. Если начальная температура образца повышена по отношению к калибровочной пластине, то при активном подходе обнаружение трещины затруднено.

2. Для обнаружения трещины необходимо минимальное время нагрева места вероятного нахождения трещины. Трещина не может быть обнаружена, если продолжительность нагрева меньше этого минимального времени.

3. Для сквозной трещины время нагрева, превышающее минимально необходимое время нагрева, не оказывает отрицательного влияния на ИК-детектирование при активном подходе. Отношение максимального температурного градиента в трещине к среднему градиенту существенно не изменяется при изменении времени прогрева.

4. Для сквозной трещины чем больше время нагрева, тем выше тепловой контраст из-за затрудненного теплового потока.

5. Сквозную трещину невозможно обнаружить ни при каком времени нагрева, если это время меньше минимально необходимого времени нагрева. Для времени нагрева, превышающего минимально необходимый период, изменение времени прогрева не оказывает существенного влияния на обнаружение трещины.

6. В случае очень мелкой трещины (глубина трещины менее 50 % толщины элемента) ее, как правило, невозможно обнаружить. В случае трещины средней глубины (трещина не сквозная, но имеет глубину более 50 % толщины элемента), тепловизионное изображение часто ее обнаруживает.

7. Для трещины с глубиной меньше толщины элемента или трещины на неровной поверхности сочетание времени нагрева и времени задержки оказывает существенное влияние на возможность ее обнаружения.

8. Различные времена нагрева приводят к различию максимального температурного градиента в трещине. Более того,

оптимальное время задержки дает максимальное значение температурного градиента в трещине.

Состояние поверхности.

1. Поверхности, окрашенные в матовый цвет, улучшают качество тепловизионных изображений и позволяют увеличивать максимальное эффективное расстояние между камерой и контролируемой поверхностью. Окрашивание матовым цветом уменьшает эффекты отражения от поверхности и другие ложные сигналы, исходящие от неоднородной поверхности образца.

2. Результаты для матовых образцов незначительно отличаются от результатов для более отражающих (глянцевых) образцов, когда исследования проводятся в закрытых лабораторных условиях. Однако результаты для матовых образцов отличаются от результатов для глянцевых образцов, когда испытания проводятся на открытом воздухе. Разница в результатах, наблюдаемых для образцов с глянцевой и матовой поверхностью, связана со значительными различиями в количестве света, отраженного двумя поверхностями.

Наблюдения по результатам полевых испытаний.

1. Наименьшая трещина, обнаруживаемая ИК-камерой в полевых условиях, больше, чем наименьшая трещина, обнаруживаемая невооруженным глазом.

2. Результаты полевых испытаний, соответствующие результатам лабораторных, показывают, что глубина трещины является важным фактором, влияющим на обнаружение трещины.

3. Только сквозные трещины могут быть четко обнаружены в полевых условиях с помощью ИК-камеры, используемой в этом исследовании.

4. Поверхность и условия освещения существенно влияют на результаты ИК-термографирования. Для создания заметного теплового контраста требовалось время нагрева, превышающее время, использованное в лабораторных испытаниях. Это было необходимо из-за отражения тепла и повышенной температуры поверхности стенки балки.

Общие выводы и рекомендации [251].

1. Трудно найти уникальный набор оптимальных значений критических факторов, таких как время нагрева, время задержки, расстояние от ИК-камеры до объекта и т. д., для каких-либо

конкретных условий тестирования. Многие факторы, такие как температура поверхности объекта, мощность и форма источника тепла, чувствительность ИК-камеры, условия тестирования, взаимосвязаны, а эффекты взаимодействия затрудняют установление набора оптимальных параметров, условий.

2. Существенным недостатком системы ИК-детектирования трещин, используемой в исследовании [251], является то, что для ее реализации требуется как физическое пространство, так и время для надлежащей калибровки перед использованием. Калибровка при этом должна выполняться в закрытом помещении с минимальной освещенностью, что в полевых условиях трудно выполнимо. Таким образом, рассмотренная в [251] система ИК-обнаружения трещин не совсем подходит для использования в полевых условиях. Более оптимальная система должна быть портативным блоком, объединяющим источник тепла, ИК-камеру и компьютер в одном модуле.

3. Наименьший размер трещины, обнаруживаемой при активном или пассивном подходе с помощью системы, использованной в [251], больше, чем наименьший размер трещины, обнаруживаемой невооруженным глазом.

4. В этом проекте наименьшая трещина, обнаруживаемая в лабораторных и полевых условиях, составляет 1,25 см и 70 мм соответственно. Однако возможность обнаружения небольшой трещины зависит от чувствительности ИК-камеры. Повысив чувствительность камеры, можно обнаружить более мелкие трещины.

5. Концепция обнаружения трещин с помощью ИК-термографии все еще считается жизнеспособной для определенных приложений. Результаты исследования [251] доказывают, что трещины можно обнаружить с помощью ИК-термографии. Мобильность оборудования является серьезной проблемой при использовании в полевых условиях. Кроме того, производительность ИК-системы можно увеличить, если использовать ИК-камеры с более высокой чувствительностью.

В работе [252] показано, что тепловыми методами в сочетании с визуальными и георадаром можно эффективно выявлять дефекты в железобетонных настилах канадских мостов. Такие настилы быстро приходят в негодность из-за воздействия

различных механизмов деградации. Воздействие циклов замерзания и оттаивания в сочетании с проникновением ионов хлорида из противобледенительных составов обычно повреждает настил моста с большей скоростью, чем другие воздействия.

Обнаружение подповерхностных дефектов с помощью дистанционного зондирования и сбора данных без физического контакта является преимуществом при комплексном применении инфракрасной термографии и георадарных исследований. Совместное использование двух методов позволяет достоверно выявлять подповерхностные расслоения, растрескивания, коррозионные дефекты. При этом данные инфракрасной термографии поверхности настила используются для получения местоположения дефектов (карты расположения) в настиле моста, а георадарные данные - для создания карты коррозионных дефектов.

5.2. Тепловая диагностика тоннельных сооружений

В железобетонных тоннелях метро основная часть дефектов связана с недостаточным качеством устройства обделки и гидроизоляции [253; 254]. Если первая группа дефектов может привести к нарушению целостности обделки, образованию в ней полостей, выпадению отдельных кусков обделки, то вторая вызывает изменение свойств железобетона, ведет к водопритоку в тоннели и затрудняет их нормальную эксплуатацию. Отказы гидроизоляции на ранней стадии эксплуатации объекта способствуют преждевременному износу железобетонных конструкций обделок [254]. Основными причинами попадания неорганизованной воды в тоннели являются [255]: несоблюдение технологических требований при ведении работ (около 60 % от общего количества протечек); низкое качество используемых гидроизоляционных материалов; ошибки при проектировании и планировании. По данным специалистов [255] различные нарушения технологии производства работ при строительстве тоннелей метро распространены практически на многих метрополитенах. Это приводит к тому, что уже после ввода в эксплуатацию сооружений эксплуатирующие службы

сталкиваются с проблемами, создаваемыми неорганизованными водопритоками (протечками) в тоннели. Так, «в 2005г. для обеспечения нормальной эксплуатации из всех метрополитенов СНГ было откачено более 50 миллионов кубических метров воды. Наибольший объем приходится на Московский метрополитен (более 20 млн. куб. м), а также Ташкентский, Казанский и некоторые другие» [255].

В процессе эксплуатации метрополитена дефектные участки обделки кроме воздействия воды испытывают давление окружающих пород и знакопеременные динамические нагрузки от движения и торможения поездов. Железобетонная обделка подвергается действию сжимающих, растягивающих и изгибающих (на криволинейных участках) напряжений. Эти напряжения при сочетании неблагоприятных факторов (выход из строя прорезиненных прокладок, пересечения активных геодинамических зон) могут привести к ускоренному нарушению гидроизоляции и обделки в целом [254].

Наличие указанных и других дефектов и недопустимость снижения несущей способности и эксплуатационных характеристик обделок до уровня, при котором существует опасность для пребывания людей, движения поездов и сохранности оборудования и устройств метрополитенов, требуют «постоянного и тщательного мониторинга всех подземных сооружений на всех метрополитенах России и СНГ» [255]. Под мониторингом обделки (англ. monitoring от лат. monitor-предостерегающий) при этом подразумевается определенная система наблюдения, оценки и прогноза состояния обделки и развития в ней и примыкающей грунтовой среде различных дефектов и явлений, позволяющих идентифицировать их с помощью пассивных и активных методов теплового контроля.

Особенности технологии термографического сканирования обделки тоннеля заключаются в сборе с заданной периодичностью информации по температурному полю исследуемого участка обделки метрополитена, ее экспериментальному и расчетному анализу и подготовке предложений по обеспечению требуемой работоспособности, термографическому контролю за качеством ремонтно-восстановительных работ. Процесс мониторинга разбивается на

ряд этапов (рис. 5.5). Если для надземных строительных и иных объектов достаточно детально разработана технология теплового исследования сканирования, особенности которой зафиксированы в нормативных документах [256], то для подземных сооружений подобные документы отсутствуют. В силу этого на основании предварительного изучения технической документации по конкретному объекту (тоннелю) приходится разрабатывать технологию производства работ по ИК-сканированию.



Рисунок 5.5 - Блок-схема ИК-сканирования обделки тоннеля

Существенными ограничениями при этом является необходимость производства работ в сжатые сроки из-за постоянно изменяющейся в тоннеле температуры, что требует увязки технических параметров сканирующей аппаратуры со скоростью (v) ее продвижения вдоль тоннеля, рассчитываемой по формуле 4.24. На рис.5.6 приведены две возможные схемы сканирования обделки тоннеля. Первая схема (рис.5.6, а) позволяет получить полную развертку термоизображения поверхности тоннеля. Вторая схема дает набор термоизображений в форме полос 1 (рис. 5.6, б) на развертке поверхности тоннеля. Вторая схема дает меньше информации по температурному полю поверхности тоннеля, но в этом случае можно использовать термографическую аппаратуру с охлаждением приемника жидким азотом.

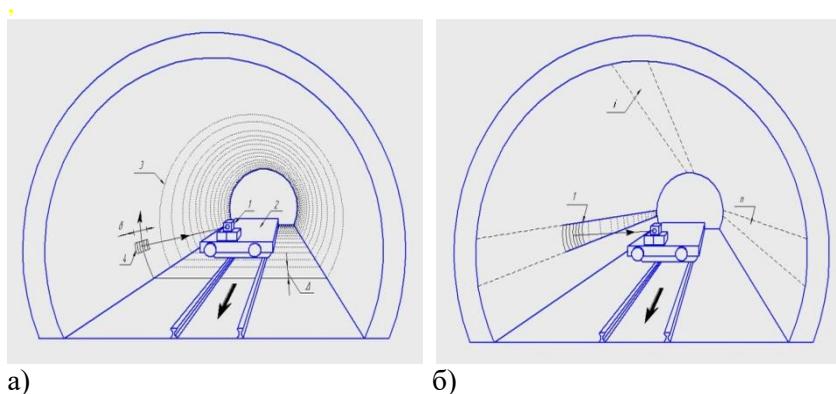


Рисунок 5.6 - Возможные схемы сканирования тоннеля

Окончательно скорость (v) назначается в процессе сканирования. Опыт показывает, что при использовании термографов с частотой вращения зеркала 30-300Гц наиболее приемлемое качество термоизображений можно получить при скорости движения термографической установки в пределах $v = 0,5-7$ км/час. Во время съемки изменение температурного напора не должно превышать 30% от начального значения. Идентификацию объектов на термограмме можно производить путем сравнения термоизображений с видимыми изображениями

той же зоны поверхности, полученной с помощью съемки в видимом свете. Тепловизионную съемку в тоннеле метрополитена желательно начинать спустя 2-3 часа после прекращения движения поездов, в предрассветные или ночные часы, когда тепловое влияние окружающей среды минимально.

Качество термоизображения зависит от расстояния (L) приемника до исследуемой поверхности (см. формулу 4.25).

Для количественной оценки тепловых аномалий поверхности обделки приходится использовать численное моделирование теплового состояния тоннеля с учетом фактических тепловых характеристик материалов обделки, свойств грунтов, особенностей инженерно-геологических характеристик оснований. Количественную оценку тепловых аномалий можно производить при необходимости оценить степень опасности дефектов для нормального функционирования тоннеля.

Обнаружение дефектов в обделке тоннеля (пустоты, каверны и т.д.) с помощью инфракрасной термографии зависит от разности температуры между поверхностью бетонной обделки и туннельным воздухом и разности температур поверхности бездефектного и дефектного участков обделки [257]. Тепловизионная камера может выявлять пустоты в бетонной обделке в том случае, когда разность температур между поверхностями бездефектным и нездоровыми бетонными поверхностями составляет более $0,03$ °C (относительно камеры, используемой для измерения данных).

В работах [257; 258] приводятся результаты исследований по обнаружению тепловыми методами в сочетании с численным анализом дефектов в бетонных обделках тоннелей и соответствующие практические рекомендации.

Исследовались открытые и закрытые полости в обделке, расположенные параллельно ее поверхности [257; 258]. В открытых полостях температура поверхности футеровки близка к температуре туннельного воздуха. На участке расположения закрытой полости поверхность футеровки имеет более низкую температуру по сравнению с открытой полостью. Это означает, что подобные закрытые полости могут быть легко обнаружены тепловым методом. Выявление тепловыми методами полостей с

другим угловым расположением по отношению к бетонной поверхности должны быть исследованы дополнительно.

При увеличении глубины залегания пустот в обделке разница температур поверхности, расположенными над бездефектными и дефектными зонами, становятся меньшими и соответственно снижается вероятность обнаружения пустот. Численные расчеты показали, что разность температур между бездефектными и дефектными участками зависит от глубины залегания пустот и от разницы температур поверхности бетона и тоннельного воздуха. Величина этой разности почти не изменяется с увеличением расстояния от пустот до поверхности. Для глубины залегания пустот более 30 мм эта разница температур практически не зависит от глубины. При разности температур между поверхностью бетона и туннельного воздуха более $0,35\text{ }^{\circ}\text{C}$ можно уверенно обнаруживать пустоты в обделке, вызванные коррозией арматуры и расположенные на глубине приблизительно до 30 мм [257].

В работе [259] в условиях Южной Африки пассивным тепловым методом исследовалось влияние глубины и размера расположения дефектов в железобетоне, расстояния и углов обзора, на которых эти дефекты были видны, а также влияние арматурной стали на тепловые контрасты, создаваемые внутренними дефектами под поверхностью бетона. Исследование подтвердило, что пассивная инфракрасная термография способна обнаруживать внутренние дефекты в железобетоне на глубине до 65 мм под поверхностью вертикальных поверхностей, обращенных на север. Для получения оптимальных результатов рекомендуется в [259] проводить термографические обследования при слабом ветре и отсутствии облачности, после достижения максимальной солнечной нагрузки на поверхность.

Авторы работы [260] показали, что комбинация теплового и ультразвукового методов неразрушающего контроля позволяет на ранней стадии развития коррозионных дефектов в железобетоне, до выхода трещин на поверхность, выявлять такие дефекты и принимать меры по усилению конструкций.

Исследовательские работы по выявлению дефектных зон тоннелей обычно проводят визуально, в видимом спектре [261]. Далее дефектные зоны исследуют более детально другими

методами неразрушающего контроля. При такой технологии достоверность и полнота выявления дефектных зон зависит от человеческого фактора. Возможности человеческого глаза ограничены. Так разрешающая способность зрения, т.е. способность различать мелкие детали изображения зависит от яркости, контраста, цветности и времени наблюдения объекта контроля. Поэтому совместное использование визуального осмотра и фиксации теплового излучения инфракрасными приборами позволяет с большей достоверностью выявлять дефектные зоны и составлять карты их расположения в тоннелях метрополитенов [257].

5.3. Тепловая диагностика строительных машин

Под тепловой диагностикой понимается процесс определения технического состояния машин, оборудования и их составных частей с определенной точностью. Совокупность средств, объекта диагностирования и, при необходимости, исполнителей, осуществляющих диагностирование в соответствии с действующими нормами, составляет **систему технического диагностирования**.

Программа диагностирования машин включает выбор метода диагностики, разработку правил диагностики, выбор и разработку средств диагностики, эксплуатационной и ремонтной документации по диагностированию и испытанию [262 - 267]. Процесс диагностирования строительных машин организуется с учетом взаимосвязи работ по общей и углубленной диагностике с основными работами по техобслуживанию и ремонту [262; 263].

Составными частями строительной машины (технологической, транспортирующей и грузоподъемной) являются следующие: **привод**, состоящий из силовой установки, передаточных устройств (трансмиссии) и **системы управления; рабочие органы** и **рама** (несущие конструкции). У передвижных машин имеется **ходовое устройство**, соединенное с рамой машины. Система управления служит для включения в действие и выключения машины и ее отдельных механизмов. Кроме перечисленных обязательных составных частей строительные машины могут содержать **дополнительные (вспомогательные)**

устройства (выносные опоры в конструкциях пневмоколесных кранов, экскаваторов и т. п.). Передача энергии от силовой установки к рабочим органам и движителям ходовых устройств машин производится механическими, электрическими, гидравлическими, пневматическими **трансмиссиями**.

Во всех структурных частях строительной машины происходит потеря энергии, проявляющаяся через **тепловыделение**, связанное с рабочим процессом машины и трением в ее механизмах. Внешними признаками этого является **нагрев узлов и деталей** машин.

В результате нагрева могут возникать следующие вредные явления в узлах и деталях:

- снижение прочности и несущей способности деталей, связанных с охрупчиванием, усталостью и появлением ползучести при высоких температурах;
- снижение защитной способности масляного слоя, разделяющего трущиеся детали машин, и появление повышенного износа или заедания;
- изменение свойств в контакте трущихся поверхностей (снижение коэффициента трения в тормозах и др.);
- снижение точности машин вследствие обратимых температурных деформаций.

Нормальная (предусмотренная конструкторской документацией) работа узлов и деталей машины характеризуется установившимся режимом теплообмена между его элементами и наружной средой в процессе эксплуатации. При таком режиме работы количество выделяемого тепла равно количеству тепла, рассеиваемого элементами машины в окружающее пространство. Переход в аварийный режим работы элементов машины характеризуется неустановившимся режимом теплообмена и повышением их поверхностной температуры T_n . Темп возрастания T_n зависит от конструкции узла, вида неисправности, нагрузки на узел, температуры и других факторов среды и может изменяться в широких пределах.

Выделяющееся при работе машины тепло создает **поле температур** соответствующих изделий. Величины поверхностных температур изделий можно рассматривать в

качестве **диагностического параметра** для оценки технического состояния структурных частей, узлов и деталей машин.

При нагружении изделий медленно изменяющимися силами (квазистатическими, повторно-переменными, малоцикловыми и т.п.) узлы и детали оборудования, несущих металлоконструкций машин, оборудования подвергаются нагреву-охлаждению. При изменении теплового состояния элементов металлических изделий излучается тепловая энергия в инфракрасном волновом диапазоне. Используя это явление В. Н. Пустовой [79] разработал метод исследования концентраций напряжений в крановых металлоконструкциях, его инженерные приложения и перспективные методы технического диагностирования металлоконструкций с применением тепловидения.

Действующие в Беларуси ТНПА требуют, чтобы техническое диагностирование грузоподъемных кранов проводилось по заранее разработанным программам [263], предусматривающим использование методов неразрушающего контроля (визуально-измерительного, ультразвукового (толщинометрия), капиллярного, магнитопорошкового и дополнительных методов, позволяющих с достаточной достоверностью выявлять недопустимые дефекты сварных соединений и основного металла) [263]. Таким образом нормативная база позволяет применять тепловые методы для диагностирования состояния строительных машин и конструкций оборудования. Вместе с тем в Беларуси отсутствуют методические разработки по тепловой диагностике машин и оборудования.

При разработке методик и соответствующих исследованиях по диагностике машин и оборудования могут использоваться наработки в смежных отраслях техники, в частности, **на железнодорожном транспорте** [264], ведущиеся с 60-х годов XX века. В железнодорожной практике успешно применяется тепловой метод контроля буксовых узлов грузовых вагонов и локомотивов. В современной тепловой диагностике подвижного состава достаточно широко используются тепловизионные камеры в качестве регистрирующих приборов. Через систему оптико-чувствительных элементов тепловизоры принимают инфракрасные излучения от контролируемых узлов и формируют термограммы, т.е. видимое для человеческого глаза изображение

распределения температурных полей по поверхности узлов. На основании соответствующих исследований установлены браковочные критерии, с использованием которых программное обеспечение подает сигналы тревог. Также установлена взаимосвязь между неисправностями колес, тележек и тормозного оборудования. Особенностью такого подхода, реализованного в аппаратно-диагностическом комплексе «ПАУК» [264], является то, что измерение температуры проводится не в точке, а в окне размером 320 x 240 мм со скоростью 30 кадров в секунду при скорости движения поездов до 25 км/ч. Такому тепловизионному бесконтактному контролю подлежат узлы локомотивов, работа которых сопровождается нагревом – выделением (поглощением) тепла в зонах возможного образования неисправностей [265].

Современный аппаратно-диагностический комплекс «АСТЕКО» состоит из следующих основных подсистем: напольные тепловизионные камеры, калибратор температуры, датчик захода поезда, датчик счета осей, путевой ящик, перегонное оборудование [264]. На рис. 5.7 изображена структурная схема, наглядно показывающая связь всех элементов комплекса.

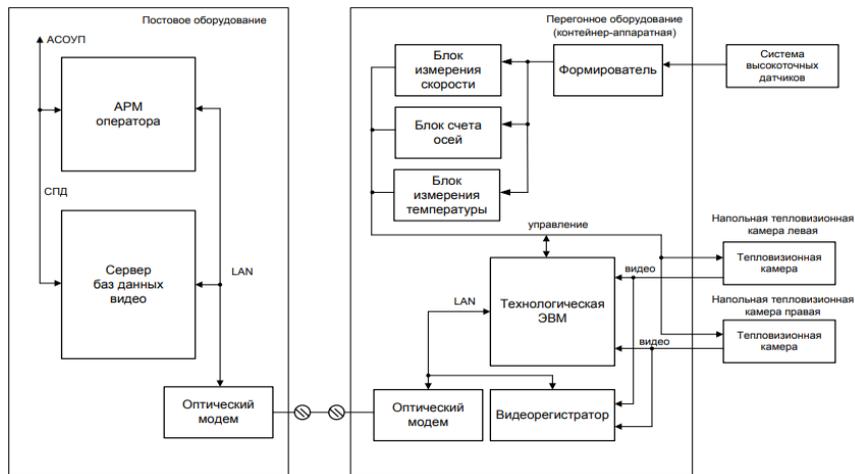


Рисунок 5.7 – Структурная схема АДК инфракрасной диагностики «АСТЕКО» [264]

Перед каждым включением комплекса проводится калибровка тепловизионных камер с применением специализированного датчика температуры и двух тепловых мишеней: одной нагретой (активной) и выключенной (пассивной). Это вызвано тем, что при попадании в поле зрения тепловизоров температурных полей различной интенсивности изменяется контрастность получаемого термофильма и соответствующих термограмм. Благодаря калибровке можно добиться стабильного отношения уровня градации цвета и температуры. Связь между основным оборудованием комплекса [264] осуществляется по оптоволоконному кабелю.

Комплекс [264] приводится в рабочее состояние при пересечении первой колесной парой локомотива зоны действия электромагнитного датчика регистрации захода поезда. В процессе контроля осуществляется регистрация проходящих колесных пар датчиком счета осей и одновременно ведется их съемкой тепловизионными камерами. Термофильм по оптоволоконному кабелю передается на перегонное оборудование и накапливается в технологической ЭВМ. Далее производится компьютерная обработка термофильма, выборка термограмм, считывание показаний температур с контролируемых точек обода и последующая их запись в базу данных.

После прохода подвижного состава технологический компьютер формирует из собранной информации итоговый отчет, в который включаются значения температур обода, боковых рам тележек, тормозных устройств и буксовых узлов. Отсчет осей ведется с головы поезда. После завершения обработки автоматически распечатывается готовый отчет.

Актуальной является проблема диагностики узлов и деталей для эксплуатирующихся карьерных автосамосвалов [267 - 274]. Использование температуры в качестве диагностического параметра оценки работоспособности узлов и агрегатов машин предопределено физической природой процессов, протекающих при их кинематической работе, в результате которой до 90 - 95% механических и других форм энергии

превращаются в тепловую и вызывают повышение температуры трущихся деталей, смазывающих и охлаждающих сред, пластически деформированных зон несущих элементов конструкций.

В основных агрегатах автомобилей и тракторов, например, двигателях внутреннего сгорания, температуру охлаждающей среды контролируют постоянно и по ней судят о его работоспособности. В остальных агрегатах, содержащих смазывающие среды (гидромеханические передачи, коробки переключения передач, редукторы ведущих мостов, гидравлические системы), постоянного контроля их температуры не ведется. Но для большегрузных карьерных автосамосвалов нагрузки на трансмиссионные узлы намного выше, чем соответствующие нагрузки для автомобилей других типов. Так, эксперименты [274] показали, что между температурой масла РМК автосамосвалов БелАЗ и коэффициентом использования их грузоподъемности существует тесная корреляционная зависимость. Нагрев масла в РМК часто превышает 120° , а в летнее время при температуре окружающего воздуха 30°C зафиксировано максимальное значение температуры масла в РМК около 161°C [274]. Нагрев масла в основном происходит за счет теплообмена с нагретыми поверхностями трущихся деталей и разогретыми металлическими частицами, попадающими в масло с поверхностей трения. При повышенных температурах трансмиссионное масло теряет свои смазывающие свойства и это приводит к ускорению износа поверхностей трения агрегатов. В других трансмиссионных узлах нагрев происходит по тому же механизму, что и в РМК. Другая группа узлов и конструкций машин работает при воздействии переменных и динамических нагрузок (пневматические шины, несущие рамы, балки, детали агрегатов и т.п.). В зонах изменений формы сечений, конструктивно-технологических дефектов,

трещин в металлических изделиях при работе возникают области пластических [57] или вязкопластических деформаций [272; 273], в которых протекают процессы внутреннего трения и происходит нагрев материала в таких зонах по механизму деформационного теплообразования [57].

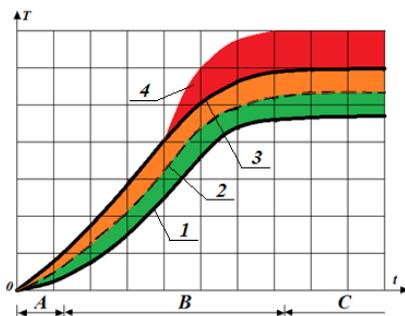
Высокая частота отказов шин карьерных автосамосвалов является причиной значительных затрат на поддержание работоспособности колес карьерных автосамосвалов (25...30% и более от суммы расходов на транспортирование массы [272]). Так, отказы шин карьерных автосамосвалов БелАЗ-75131 происходят, в основном, из-за износа протектора и порезов (около 96%). Появлению таких дефектов в шинах способствуют вздутия в материале шин, отслоения каркаса, расслоения и другие факторы, за появление которых ответственны процессы генерации теплоты при вязкопластических деформациях и термоактивация разрушения. В шинах модели 33.00R51 температура материала растет со средней скоростью 10°C/ч в первые 10 часов работы автосамосвалов БелАЗ-75131, а в дальнейшем увеличивается не более, чем на 1...3°C/ч, достигая за время работы примерно 110 °С [272]. Проведенные авторами работы [272] исследования зависимости температуры шин от средней температуры окружающего воздуха ($t_{ср}$, °С), средней эксплуатационной массы, приходящейся на шины колес передней ($Q_{по}$, °С) и задней оси ($Q_{зо}$, °С), средней эксплуатационной скорости автосамосвала БелАЗ-75131 ($V_{срз}$, км/ч) позволили получить регрессионные модели для ($t_{шпо}$, °С) и ($t_{шзо}$, °С) [272]:

$$t_{шзо} = 31,7 + 0,6 t_{ср} + 0,148 Q_{зо} V_{срз} \quad (5.3)$$

$$t_{шпо} = 26,5 + 0,6 t_{ср} + 0,172 Q_{по} V_{срз} \quad (5.4)$$

Тепловое состояние движущихся шин зависит от многих факторов (размеров шины, геометрии рисунка протектора, механических и теплофизических характеристик материала шины, внутреннего давления в шине, нагрузки на колесо,

скорости и продолжительности движения, температуры окружающего воздуха, температуры дорожного покрытия, его шероховатости и влажности) [275]. От температуры шины зависит сопротивление механическим воздействиям резины и корда шин, их сцепление, сопротивление качению колеса и долговечность шины [275]. Так, при повышении температуры от 0 до 100 °С прочность капронового корда снижается до 20%, а резины и ее адгезии к корду – примерно в 2 раза [275]. При температуре выше критической для данного материала это снижение значительно. При металлокордном каркасе шин максимальные температуры в шинах на 10-20 °С ниже, чем в шинах с неметаллическим каркасом. Такое явление объясняется большой теплопроводностью металлокорда, приводящей к распределению тепла на область шины, смежную с деформируемой. Нагрев произвольного агрегата (изделия) карьерного автосамосвала при различных режимах его работы можно схематически представить в пространстве «температура агрегата (Т) – продолжительность работы автосамосвала (t)» (рис.5.8). Отрезок А соответствует нагреву в начальной стадии работы агрегата.



1-кривая нормативной температуры агрегата; 2-допустимая температура агрегата; 3-критическая температура агрегата; 4-потенциально опасная температура агрегата

Рисунок 5.8 - Схема температурных режимов работы агрегата, изделия

Временной отрезок В соответствует регулярному нагреву, а на отрезке С происходит работа агрегата в стационарном режиме. Схему рисунка 5.8 иллюстрируют данные исследований О.М.Ларина [275], установившие различные температурные режимы работы материала шин. Оптимальной для долговечности и работоспособности шины является температура 70-75 °С (при температуре окружающего воздуха 20 °С). Температуру нагрева до 100 °С автор работы [275] считает допустимой, интервал температур от 100 до 121 °С – критическим, а температуры выше 121 °С – потенциально опасными для работоспособности шины. Для карьерных автосамосвалов БелАЗ критические температуры материала шин совпадают с данными [275].

Из двух изложенных примеров следует, что применение инфракрасной термографии для диагностики машин – дело ближайшего будущего. Основное препятствие на этом пути – недостаток методических разработок по технологии выполнения такой диагностики для конкретных узлов и деталей машин, разработанных в соответствии с требованиями стандартов [276 - 279]. При этом диагностирование состояния машины, ее узлов должно производиться с минимальным участием человека [280] .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии изложены теоретические основы теплового контроля материалов, элементов сооружений, машин и их узлов. Практика теплового контроля и возможные направления его развития рассмотрены применительно к мостовым пролетным сооружениям, тоннелям, строительным машинам.

Показано, что при работе элементов сооружений, силовых частей машин в них происходит деформационное теплообразование, отображением которого является температурное поле поверхности изделий. При этом участки поверхности, соответствующие расположению различных конструктивных, технологических и эксплуатационных дефектов, имеют иные характеристики температурного поля, чем бездефектные. По параметрам температурного поля можно исследовать напряженно-деформированное состояние металлических элементов при их упругой работе, выявлять опасные зоны, исследовать зарождение и развитие трещин, другие дефекты конструкций. Исследуя тепловые потоки от внешних источников можно также выявлять дефекты в материале конструкций и их соединений. В машинах, их узлах теплообразование происходит за счет сил трения, физико-химических процессов в смазочных материалах, что также создает поверхностное температурное поле. Исследуя температурные характеристики частей машин и их узлов можно также диагностировать их работоспособность.

Современные тепловизионные приборы позволяют измерять температурные поля дистанционно, по инфракрасному излучению поверхностных слоев. Это делает возможным использовать методы машинного зрения в технической диагностике сооружений, конструкций, машин.

Измеряемое тепловизором температурное поле подвержено влиянию различных факторов, т.е. обладает свойством случайности. При одинаковой температуре одни элементы могут быть более работоспособными, другие – менее.

Поэтому для однородных элементов, конструкций, узлов необходимо разрабатывать стандартизированные методики

теплового контроля и диагностики. Существенное значение для диагностики состояния исследуемого объекта имеют пороговые значения диагностических параметров.

В практике применения теплового контроля используются различные критерии предельных параметров температурного поля:

- абсолютная температура опасной зоны;
- разность абсолютной температуры опасной зоны и температуры окружающей среды;
- отношение максимальной температуры в опасной зоне к среднему значению температуры элемента;
- приращение температуры нагрева между смежными точками поверхности;
- приращение температуры в единицу времени и другие.

При разработке диагностических критериев для нагружаемых внутренними усилиями элементов конструкций машин следует иметь в виду тот факт, что температурное поле поверхности таких объектов определяется их напряженно-деформированным состоянием. Из этого следует, что целесообразно создавать математическую модель исследуемого объекта с функционирующими деформационными источниками тепла и с ее помощью анализировать поверхностное поле температур. При инженерных исследованиях такой анализ поверхностного поля температур можно выполнить с использованием существующих программных комплексов (ANSYS и др.).

Для оценки достоверности расчетных моделей, определения пороговых значений температурных полей определяющее значение надо придавать экспериментальным лабораторным и натурным исследованиям.

Также надо иметь в виду, что тепловые методы диагностики не являются универсальными. Поэтому конкретные методики должны использовать тепловые методы исследования в сочетании с другими методами неразрушающего контроля (визуально-оптическим, акустическим, ультразвуковыми, магнитными, тензометрическим и др.).

При разработке тепловых методов контроля необходимо учитывать и возможные ресурсные ограничения (финансовые и

др.). В таких условиях существенное значение приобретает создание диагностического обеспечения, включающего в себя перечень диагностических параметров, методов оценки их информативности, условия работоспособности, признаки наличия дефектов в объекте контроля, алгоритмы и программу диагностирования, показатели контролепригодности объекта и эффективности процесса диагностирования, приборное, программное и методическое обеспечение.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций (АЭ технология и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе) / Б. Е. Патон [и др.] // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2016. – № 2. – С. 3–18.
2. Дубов, А. А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования / А. А. Дубов // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – № 3. – С. 46–49.
3. Ерёмин, К. И. Особенности экспертизы и НК металлических конструкций эксплуатируемых сооружений / К. И. Ерёмин, С. А. Матвеев // В мире НК. – 2008. – № 4 (42). – С. 4–7.
4. Комаровский, А. А. Диагностика напряженно-деформированного состояния / А. А. Комаровский // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 2. – С. 22–27.
5. Бушман, А. В. Уравнение состояния металлов в широком диапазоне параметров / А. В. Бушман, В. Е. Фортов, И. И. Шарипджанов // Теплофизика высоких температур. – 1977. – Т. 15, № 5. – С. 1095–1097.
6. Horvath, L. Experimentelle Untersuchungen der im Stahlbau typischen Bauteile mit Thermovision. Dissertation zu Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs / L. Horvath. – Cottbus : BTU. – 2002. – 84 s.
7. Maugin, G. A. The thermomechanics of plasticity and fracture / G. A. Maugin. – Cambridge : Cambridge University press. – 1992. – 350 p.
8. Техническая диагностика. Термины и определения : ГОСТ 20911-89. – М. : Стандартинформ, 2009. – 10 с.
9. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения ГОСТ 27751-2014. – М.: Стандартинформ, 2015. – 14 с.
10. Венгринович, В. Л. Мониторинг технического состояния в проблеме обеспечения техногенной безопасности. Обратная задача / В. Л. Венгринович // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 1. – С. 57–81.

11. Диагностика и мониторинг состояния сложных технических систем: учеб. пособие / Н. А. Махутов [и др.]. – Тюмень: ТИУ, 2017. – 632 с.
12. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа: монография / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – М.: СКАД СОФТ : ДМК Пресс, 2011. – 736 с.
13. Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов: утв. М-вом транспорта Рос. Федерации 18.04.01: введ. в действие с 18.04.01. – М.: Транспорт, 2001. – 140 с.
14. Фомина, И. П. Обоснование продления срока эксплуатации стальных балок / И. П. Фомина, А. И. Голоднов // зб. наук. праць Україн. ін-ту сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського. – 2013. – В. 11. – С. 140–147.
15. Голоднов, А. И. Моделирование напряженно-деформированного состояния – составная часть работ по продлению ресурса строительных конструкций сооружений / А.И. Голоднов // Вісн. Придніпр. держ. акад. будів. та арх. – Дніпропетровськ : ПДАБтаА, 2004. – № 7–8. – С. 34–40.
16. Коновалов, Н. Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений / Н. Н. Коновалов. – М.: ГУП НТЦ ПБ, 2004. – 132 с.
17. Проектирование металлических конструкций / В. В. Бирюлев [и др.]. – Л.: Стройиздат, 1990. – 430 с.
18. Тепловой неразрушающий контроль изделий / О. Н. Будадин [и др.]. – М.: Наука, 2002. – 472 с.
19. Нестерук Д.А. Тепловой контроль и диагностика. Учебное пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня/ Д.А.Нестерук, В.П.Вавилов. – Томск: 2007. – 104 с.
20. Кричевский, И.Р. Понятия и основы термодинамики. – 2-е изд., пересм. и доп. – М.: Химия, 1970. – 440с.
21. Савельев, И.В. Курс общей физики. Т.1. Механика, колебания и волны, молекулярная физика/И.В.Савельев –М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит., 1970. – 508с.
22. Мойсейчик, Е. А. Физические основы теплового контроля изделий / Е. А. Мойсейчик. – Барановичи : Издатель Е. Г. Хохол, 2018. – 96 с.

23. Физика. Большой энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М.Прохоров. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1998.– 944с.
24. Шишкин, И.Ф. Теоретическая метрология. Часть 2. Обеспечение единства измерений/И.Ф.Шишкин. – СПб.: Питер, 2012. – 240 с.
25. Спектор, С.А. Электрические измерения физических величин. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
26. Измерения в промышленности. Кн.2. Способы измерения и аппаратура. Пер. с нем. / Под ред. П. Профоса. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1990. -384 с.
27. Электрические измерения неэлектрических величин / Под ред. В.П. Новицкого. – Л.: Энергия, 1975. – 576 с.
28. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры: ГОСТ 8.558 2009. – Введ. 11.11.2009. – М.: Издательство стандартов,2012.– 13с.
29. Иванов, Г.М. Теплотехнические измерения и приборы/ Г.М. Иванов, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М.: МЭИ, 2007. – 460 с.
30. Малов, В.В. Пьезо-резонансные датчики. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
31. Якушенко, Ю.Г. Теория и расчёт оптоэлектронных приборов.- М.: Логос, 1999. – 480 с.
32. Зарецкий, В.В. Клиническая термография /В.В. Зарецкий, А.Г.Выховская. – М. : Медицина, 1976. – 168 с.
33. Foundations of Vision/ Brian A. Wandell, Sinauer Associates, Inc., Sunderland, MA, 1995. – 476 p.
34. Юревич, Е. И. Сенсорные системы в робототехнике: учеб. пособие/Е. И. Юревич. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013.– 100 с.
35. Колосова Н.И. Биофизика сенсорных систем: Учебно-методическое пособие/ Н.И. Колосова, Е.Н. Денисов. – Оренбург: Изд-во ГБОУ ВПО ОрГМУ, 2015. – 101 с.
36. Физиология человека. Том 1/Под редакцией Р. Шмита и Г.Тевса. Издание 2-е. В 3-х томах. Перевод с английского. Под редакцией акад. П.Г. Костюка. – М.: Мир, 1996г. – 330с.

37. Коротаев, В.В. Основы тепловидения/ В. В. Коротаев, Г.С.Мельников, С. В. Михеев и др.. – СПб: НИУ ИТМО, 2012 – 122 с.
38. Вавилов, В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. – 2-е изд. – М.: Спектр. – 2013. – 575 с.
39. Криксунов, Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники: справочник /Л.З. Криксунов. – М.: Советское радио, 1978. – 400 с.
40. Неразрушающий контроль Справочник В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 5 В 2 кн. Кн. 1 Тепловой контроль. /В.П. Вавилов. - М. Машиностроение, 2004. – 679 с.
41. Maldague, X. P. V. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. John Wiley– Interscience, New York, 2001.–704 p.
42. Седов, Ю.Е. Справочник молодого термиста/ Ю.Е.Седов, А.М. Адашкин. – М.: Высш.школа, 1986. – 239 с.
43. Failure Analysis of Heat Treated Steel Components/ F.L.C.Canale. G.W.E., Totten, G.A. Mesquita. – ASM International, 2008. – 640 p.
44. Руководство пользователя к программе ThermaCAM™ Reporter. Профессиональное издание. Версия 8.1.– 2007.– 194 с.
45. Михеев, М.А. Основы теплопередачи/ М.А. Михеев, И.М.Михеева. Изд. 2–е, стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 162с.
46. Панин, В.Е. Основы физической мезомеханики. – Физическая мезомеханика. – 1998. - №1. – С.5-22.
47. Новацкий, В. Электромагнитные эффекты в твердых телах. – М.: Мир, 1986. – 157 с.
48. Ахундов, И.Д. К вопросу прогноза землетрясений/ И.Д.Ахундов, М.А.Гусейнов, Л.Н. Солодилов // seismology.az/journal/adminka/filemanager/files/custom_files/article/s/meq-7.pdf, режим доступа-08.06.2018. – С.7.
49. Хрулев, А.С. Изучение напряженного состояния горных пород в основании сооружений/ А.С. Хрулев, В.В. Середин// sbornikstf.pstu.ru/_engine/get_file.php?f=415&d.../art/&p...А.С.%20Хрулев..., режим доступа-08.06.2018. – С.4
50. Опарин В.Н. О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса/ В. Н. Опарин, Т. А. Киряева, В. Ю.

Гаврилов и др.// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. - №2. – С.3– 30.

51. Яковицкая, Г.Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. – Новосибирск: Параллель, 2008. – 315 с.

52. Махмудов, Х.Ф. Электромагнитные явления при деформировании и разрушении твердых диэлектриков/ Х.Ф. Махмудов, В.С. Куксенко//Физика твердого тела. –2005. – Том 47.– Вып. 5.–С.856–859.

53. Мальшин А.А. О характеристиках электромагнитного излучения при деформировании и разрушении твёрдых тел/ А.А. Мальшин, В.В. Дырдин, Т.И. Янина// Вестник Кузбасского государственного технического университета. Физика. – 2010. – С.22–24.

54.Плехов, О.А. Особенности выделения тепла и генерации сигналов акустической эмиссии при циклическом деформировании армо-железа/ О.А.Плехов, И.А.Пантелеев, В.А.Леонтьев// Физическая мезомеханика. – 2012. – Том 12. – Вып.5. – С.37–43.

55. Вострецов, А.Г. О некоторых характеристиках сигналов электромагнитного излучения при контроле разрушения конструкционных материалов/ А.Г. Вострецов, А.В. Кривецкий, А.А. Бизяев // Доклады АН ВШ РФ. Технические науки. – 2012. – № 2 (19). – С.61– 67.

56. Шаркеев, Ю.П. Исследование процесса деформирования и разрушения биоинертных сплавов на основе титана и циркония в различных структурных состояниях методом инфракрасной термографии/ Ю.П.Шаркеев, В.П.Вавилов, В.А.Скрипняк // <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/15346>. Режим доступа – 10.06.2018. – С.230– 245.

57. Мойсейчик, Е.А. Исследование теплообразования и зарождения разрушения в стальной растянутой пластине с конструктивно-технологическим дефектом// Прикладная механика и техническая физика. – 2013. – №1. – С.134–142.

58. Якушенков, Ю.Г. Основы оптико-электронного приборостроения: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. / Ю.Г.Якушенков. -М.: Логос, 2013. – 376 с.

59. Богомолов, А.И. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение/ А. И. Богомолов, Д. Я. Вигдорчик, М. А. Маевский. – М.: Стройиздат, 1967. – 255с.
60. Джемисон, Дж. Э. Физика и техника инфракрасного излучения/ Дж.Э. Джемисон, Р.Х.Мак-Фи, Дж.Н. Пласс и др. М.: Советское радио, 1965. – 640с.
61. Хадсон, Р. Инфракрасные системы. Пер. с англ. – М.: МИР, 1972. – 535 с.
62. Борисевич, Н.А. Инфракрасные фильтры/ Н.А.Борисевич, В.Г.Верещагин и др.. – Минск: Наука и техника, 1971. – 226с.
63. Мосс, Т. Полупроводниковая оптоэлектроника. Пер. с англ./ Т. Мосс, Г.Баррел, Б.Эллис – М.: Мир, 1976. – 432 с.
64. <https://www.iriss.com/wp-content/uploads/2017/.../ТВ006.pdf...> Режим доступа – 11.07.2018.
65. Бирюк, В.В. Применение тепловизора в энергетическом машиностроении: учеб. пособие/В.В. Бирюк, С. Г. Матвеев, М. Ю. Орлов [и др.]. – Самара: Изд-во Самар. ГАКУ, 2007. – 96с.
66. Смуk, С. Инфракрасные датчики длинноволнового диапазона на квантовых ямах компании IRnova/ С. Смуk, Ю. Кочанов, М. Петрошенко и др.//Компоненты и технологии. – 2014. - № 1. – С.152 – 157.
67. Якушенков, Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов/Ю.Г. Якушенков. – М.: Логос, 1999. – 480 с.
68. Чистофарова, Н.В. Технические измерения и приборы. Ч.1. Измерение теплоэнергетических параметров / Н.В. Чистофарова, А.Г. Колмогоров. – Ангарск: АГТА, 2008. – 200 с.
69. Мухин, В.С. Приборы контроля и средства автоматизации тепловых процессов/ В.С.Мухин, И.А. Саков.– М.: Высшая школа, 1988. – 256с.
70. Кулаков, М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств / М.В. Кулаков. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.
71. Геращенко, О.А. Тепловые и температурные измерения / О.А. Геращенко, В.Г. Федоров. – Киев: Наукова думка, 1965. – 305с.
72. Гордов, А.Н. Основы пирометрии.– М.: Металлургия, 1971.– 448с.
73. Ранцевич, В.Б. Пирометрия при посторонних источниках

излучения/ В.Б. Ранцевич. – Минск: Наука и техника, 1983. – 104с.

74. Бараночников, М. Л. Приемники инфракрасного излучения. Состояние разработок и промышленного выпуска, перспективы развития и прогнозы. Аналитический обзор [Электронный ресурс] / М. Л. Бараночников. – Режим доступа: www.radioliga.by/Books/Priemniki_infrakrasnogo_izlucheniya-pdf.pdf. – Дата доступа: 16.08.2018.

75. Михеев, С. В. Основы инфракрасной техники / С.В.Михеев. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 127 с.

76. Тарасов, В. В. Современные проблемы инфракрасной техники / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков. – М.: МИИГА и К, 2011. – 84 с.

77. Основы диагностики технических устройств и сооружений / Г. А. Бигус [и др.]. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – 445 с.

78. Тылкин, М. А. Температуры и напряжения в деталях металлургического оборудования / М. А. Тылкин, Н. И. Яловой, П. И. Полухин. – М.: Высш. шк., 1970. – 428 с.

79. Пустовой, В. Н. Металлоконструкции грузоподъемных машин. Разрушение и прогнозирование остаточного ресурса / В. Н. Пустовой. – М.: Транспорт, 1992. – 256 с.

80. Способ теплового контроля остаточных напряжений и дефектов конструкций: пат. 2383009 Рос. Федерации: 2007142919/28 ; бюл. № 9 / О. Н. Будадин, В. В. Котельников; дата опубл.: 22.11.2007.

81. Galietti, U. Application of thermal methods for characterization of steel welded joints [Electronic resource] / U.Galietti, D. Palumbo // 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, July 27–30, 2010, Québec (Canada). – Access mode: <http://https://www.ndt.net/article/qirt2010/papers/qirt2010-044.pdf>. – Access date: 25.08.2018.

82. Macroscopic evaluation of plastic deformation by thermography method [Electronic resource] / Nobuaki Nagatomo, Hidetoshi Sakamoto, Yoshifumi Ohbuchi // 9th International Conference on Fracture & Strength of Solids, June 9–13, 2013, Jeju, Korea. – Access mode: <http://https://www.ndt.net/article/qirt2010/papers/qirt2010-044.pdf>. – Access date: 25.08.2018.

83. Meneghetti, G. Energy dissipation in medium and high cycle fatigue of metallic and composite materials [Electronic resource] / G.Meneghetti, M. Quaresimin. – Access mode: https://www.researchgate.net/.../305186392_Energy_Dissipation_in_Medium_and_High... – Access date: 27.08.2018.
84. Experimental characterization of NiTi SMAs thermomechanical behaviour using temperature and strain full-field measurements [Electronic resource] / P. Schlosser [et al.]. – Access mode: https://www.researchgate.net/.../250360551_Experimental_C... – Access date: 07.08.2018.
85. Применение теплового контроля в экспертизе промышленной безопасности плавильной печи / Е. В. Абрамова [и др.] // докл. XX Всерос. конф. по неразрушающему контролю и техн. диагностике (Москва, 3–6 марта 2014 г.). – М.: Спектр. – С. 206–209.
86. Современные методы и средства неразрушающего контроля сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой (обзор) / Е. В. Шаповалов [и др.] // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – № 1. – 2013. – С. 10–22.
87. Петренко, В. Р. Обнаружение непровара и оценка глубины проплавления в режиме реального времени при электродуговой сварке/ В. Р. Петренко, В.В.Волков, Р. О. Волков // Вестник ВГТУ. 2011. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obnaruzhenie-neprovara-i-otsenka-glubiny-proplavleniya-v-rezhime-realnogo-vremeni-pri-elektrodugovoy-svarke> (дата обращения: 04.08.2022).
88. Application of Infrared Thermography to the Analysis of Welding processes [Electronic resource] / Janan Al-Karawi, Jürgen Schmidt. – Access mode: qirt.org/archives/qirt2004/papers/077.pdf . – Access date: 7.08.2018.
89. Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 1. Международный и отечественный опыт применения мониторинга/И. Г. Овчинников [и др.] // Транспортные сооружения. – 2014. – Т. 1, № 1.
90. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний: СП 79.13330.2012. – М.: Минрегион России, 2012.

91. Богданов, Е. А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования / Е. А. Богданов. – М.: Высш. шк., 2006. – 279 с.
92. Лимаренко, А. М. Экспериментальные методы исследования в механике/ А. М. Лимаренко, Г. А. Оборский, Н.Г. Сурьянинов; под ред. Н. Г. Сурьянинова. – Одесса: Астропринт, 2011.– 541 с.
93. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения: ГОСТ 27751-2014. – М.: Стандартиформ, 2015. – 14 с.
94. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения: ГОСТ 16504-81. – М.: Стандартиформ, 2011. – 23 с.
95. Белл, Ф. Дж. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел: в 2 ч. / Ф. Дж. Белл; пер. с англ.; под ред. А. П.Филина. – М.: Наука, 1984. – Ч. I: Малые деформации. – 600 с.
96. Белл, Ф. Дж. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел: в 2 ч. / Ф. Дж. Белл; пер. с англ.; под ред. А. П.Филина. – М.: Наука, 1984. – Ч. II: Конечные деформации. – 432 с.
97. Weber, W. Über die spezifische Wärme fester Körper, insbesondere der Metalle / W. Weber. – Annalen der Physik und Chemie. – 1830. – Zweite serie 20. – S. 177–213.
98. Hort, H. Die Wärm Vorgänge beim Recken von Metallen / H.Hort.– Mitt. Forschungsarbeit. Ing.Wes.– 1907. – Н. 41. – S. 1–53.
99. Stromeyer, C. E. The Determination of Fatigue Limits under Alternating Stress Conditions / C. E. Stromeyer. – Proceedings of Royal Society.Series A. – 1914. – 40. – S. 411–425.
100. Thomson, W. On the Thermoelastic and Thermomagnetic Properties of Matter / W. Thomson. – Quart. J. of Math. – 1857. – 1. – P. 57–77.
101. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел : в 2 т. / А. Надаи. – М.: Мир, 1969. – Т. 2. – 863 с.
102. Taylor, G. I. The Latent Energy Remaining in a Metal after Gold Working / G. I. Taylor, H. Quinney // Proceedings the Royal of Society. Series A. Vol. CXLIII, 1934. – P. 307–326.
103. Динник, А. Н. Удар и сжатие упругих тел: избр. тр. / А.Н.Динник. – Киев: АН УССР, 1952. – Т. 1. – 152 с.

104. Дружинин, С. И. Теория сопротивления материалов / С. И. Дружинин. –Л.: Кубуч, 1930. – 478 с.
105. Давиденков, Н. Н. Динамические испытания металлов / Н. Н. Давиденков. – М.; Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1936. – 151 с.
106. Cottrel, A. H. Effects of temperature on the plastic properties of aluminium crystals / A. H. Cottrel, R. J. Stokes // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. – 1955. – V. 233. – P. 17–34.
107. Adams, M. A. Effects of temperature on the flow stress of work-hardened copper crystals / M. A. Adams, A. H. Cottrel // Phil. Mag. – 1955. – V. 46. – P. 1187–1193.
108. Basinski, Z. S. Thermally activated glide in face-centred cubic metals and its application to the theory of strain hardening / Z.S. Basinski // Phil. Mag. –1959. – V. 4. – P. 393–432.
109. Резников, А. Н. Теплофизика резания / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1989. – 288 с.
110. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов: в 2 т. / С. И. Губкин. – М.: Metallurgizdat, 1961. – Т. 2: Физико-химическая теория пластичности. – 416 с.
111. Нескучаев, В. Д. О нагреве тел при неупругом ударе / В.Д. Нескучаев, Д. А. Штанько // Журн. техн. физики. – Т. 5. – Вып. 2. – 1935. – С. 374–384.
112. Растегаев, М. В. О гипотезе фазовых превращений, наблюдаемых в полоске Кравз-Тарнавского / М. В. Растегаев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1959. – № 7. – С. 19–23.
113. Zener, C. The Micro-Mechanism of Fracture / C. Zener // Fracturing of Metals. – Cleveland: American Society of Metals. – 1948. – P.3–31.
114. Тихонов, А.С. Элементы физико-химической теории деформируемости сплавов/А.С.Тихонов.–М.: Наука, 1972.–158 с.
115. Вавилов, А. Ф. Сварка трением / А. Ф. Вавилов, В. П. Воинов. – М.: Машиностроение, 1964. – 155 с.
116. Кудинов, В. М. Сварка взрывом в металлургии / В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев. – М.: Металлургия, 1978. – 168 с.
117. Красильщиков, Р. Б. Деформационный нагрев и производительность волочильного оборудования / Р.Б.Красильщиков. – М.: Металлургия, 1970. – 168 с.

118. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением / Н. И. Яловой [и др.]. – М.: Высш. шк., 1973. – 631 с.
119. Горбатов, Н. И. Пилы трения / Н. И. Горбатов. – Киев–М.: Машгиз, 1950. – 80 с.
120. Довнар, С. А. Термомеханика упрочнения и разрушения штампов объемной штамповки / С. А. Довнар. – М.: Машиностроение, 1975. – 255 с.
121. Вольченко, А. И. Тепловой расчет тормозных устройств / А. И. Вольченко. – Львов: Вища шк., 1987. – 136 с.
122. Кристиан, Дж. Теория превращений в металлах и сплавах / Дж. Кристиан. – М.: Мир, 1978. – Ч. 1. – 803 с.
123. Кунин, В. Н. Поглощение энергии металлом при пластическом растяжении / В. Н. Кунин // Физика металлов и металловедение. – Т. VII. – Вып. 5. – 1959. – С. 790–793.
124. Давиденков, Н. Н. Избранные труды: в 2 т. / Н. Н. Давиденков. – Киев: Наук. думка, 1981. – Т. 2: Механические свойства материалов и методы измерения деформаций. – 656 с.
125. Куриленко, Г. А. Контроль и прогнозирование индивидуального сопротивления усталости деталей машиностроения на основе кинетики пассивных тепловых полей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.04 / Г.А.Куриленко; Новосиб. гос. тех. ун-т. – Новосибирск, 2000. – 36 с.
126. Stärk, K. F. Thermometrische Untersuchungen zum zyklischen Vervormungsverhalten metalischer Werkstoffe / K.F.Stärk. – Diss. zur Erlangung der Würde Dr. – Ing. – Stuttgart Univ. – 1980. – S. 175.
127. Ранцевич, В. Б. Тепловой метод выявления трещин при стендовых испытаниях изделий на усталость / В. Б. Ранцевич // Дефектоскопия. – 1977. – № 5. – С. 102–108.
128. Мойсейчик, Е. А. Количественная оценка надежности статически-растянутых элементов строительных конструкций из малоуглеродистых сталей при низких температурах: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Е. А. Мойсейчик; НИСИ. – Новосибирск, 1980. – 205 с.
129. Сергеев, А. В. Связь величины нагрева зоны разрушения с относительным утонением и разрушающим напряжением / А. В.

Сергеев, С. Д. Шафрай // Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1998. – № 6. – С. 120–124.

130. Экспериментальное исследование особенностей процесса генерации тепла в вершине усталостной трещины / А. И. Терехина [и др.] // ПЖТФ. – 2012. – Т. 38, вып. 16. – С. 9–15.

131. Лукин, Е. С. Исследование предельного состояния конструкционных сталей по термопластическому эффекту: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Е. С. Лукин; Ин-т физ.-техн. проблем Севера РАН. – Якутск, 2005. – 23 с.

132. Титченер, Э. Л. Скрытая энергия при наклепе / Э.Л.Титченер, М. Б. Бевер // Успехи физики металлов. Вып. 4. – М.: Металлургиздат, 1961. – С. 290–395.

133. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / Е. В. Панин [и др.]. – Новосибирск: Наука. – 1990. – 250 с.

134. Большанина, М. А. Скрытая энергия деформации / М. А. Большанина, В. Е. Панин // Исследования по физике твердого тела. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – С. 193–234.

135. Аравас, Н. К расчетам накопленной энергии при холодной деформации / Н. Аравас, К. С. Ким, Ф. А. Леки // Современное машиностроение. Сер. Б. – 1991. – № 4. – С. 43–49.

136. Максимкин, О. П. Автоматизированная установка для определения энергии, запасаемой в процессе растяжения материалов / О. П. Максимкин. – Алма-Ата: ИЯФ АН КазССР, 1987. – 26 с. – (Препринт / ИЯФ АН КазССР № 4-87).

137. Астафьев, И. В. Восстановление калориметрических термограмм в экспериментах по изучению тепловыделения и запасаения энергии при деформировании / И. В. Астафьев, О. П. Максимкин // Заводская лаборатория. – 1994. – № 1. – С. 44–46.

138. Максимкин, О. П. Методика и установка для изучения тепловыделения и накопления энергии в процессе деформации облученных металлических материалов / О. П. Максимкин, М. Н. Гусев. – Вестник НЯЦ РК. – Вып. 4. – 2000. – С. 67–71.

139. Астафьев, И. В. Тепловые эффекты и аккумулялирование энергии в процессе прерывистого течения / И. В. Астафьев, О. П. Максимкин, М. Ж. Сакбаев // Проблемы прочности. – 1994. – № 11. – С. 26–31.

140. Астафьев, И. В. О роли латентной энергии в мартенситном $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении при деформировании облученной нержавеющей Fe–Cr–Ni стали / И. В. Астафьев, О. П. Максимкин // ФММ. – 1994. – Т. 77, вып. 3. – С. 90–95.
141. Гусев, М. Н. О корреляции температурных изменений физико-механических и энергетических характеристик деформируемой стали 12X18H10T / М. Н. Гусев, О. П. Максимкин // ФММ. – 1997. – Т. 84, вып. 3. – № 10. – С. 138–141.
142. Максимкин, О. П. Некоторые особенности диссипации энергии в процессе пластической деформации железа и ниобия / О. П. Максимкин, М. Н. Гусев // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27, вып. 24. – С. 85–90.
143. Стадийность пластической деформации и разрушения облученных нейтронами металлических материалов / О. П. Максимкин [и др.] // Металловедение. – 2002. – № 3. – С. 23–30.
144. Особенности пластической деформации армко-железа, облученного нейтронами / О. П. Максимкин [и др.] // Вестн. НЯЦ РК. – Вып. 1. – 2006. – С. 39–45.
145. Осипов, И. С. Особенности пластического течения и деформационного упрочнения металлических поликристаллов, облученных нейтронами / И. С. Осипов, О. П. Максимкин, М. Н. Гусев // Вестн. НЯЦ РК. – Вып. 3. – 2006. – С. 52–56.
146. Максимкин, О. П. Диссипативные процессы при пластической деформации никеля и хромоникелевых сплавов (12X18H10T, 03X20H45M4B2), облученных нейтронами / О. П. Максимкин, М. Н. Гусев, Д. А. Токтогулова // Ползун. альманах. – 2007. – Вып. 1–2. – С. 110–114.
147. Мартенситные $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения в стали 12X18H10T, облученной в реакторе ВВР-К / О. П. Максимкин [и др.] // Вестн. НЯЦ РК. – Вып. 3. – 2007. – С. 53–57.
148. Максимкин, О. П. Диссипативные процессы на различных стадиях пластического течения армко-железа и нержавеющей стали 12X18H10T, облученных нейтронами / О. П. Максимкин, М. Н. Гусев, Д. А. Токтогулова // Вестн. НЯЦ РК. – Вып. 3. – 2007. – С. 45–51.
149. Гусев, М. Н. Новое физическое явление в высокооблученных нержавеющей стали – «волны пластической

деформации» – и его практическое использование / М. Н. Гусев, О. П. Максимкин, Д. А. Токтогулова // Вестн. НЯЦ РК. – Вып. 4. – 2008. – С. 27–32.

150. Максимкин, О. П. Эмпирические закономерности и численное моделирование диссипативных процессов при деформации облученных металлических поликристаллов / О. П. Максимкин, М. Н. Гусев, Д. А. Токтогулова // Вестн. НЯЦ РК. – Вып. 4. – 2008. – С. 41–47.

151. Токтогулова, Д. А. Тепловые эффекты на различных стадиях пластического течения поликристаллических металлов и сплавов (Fe,Ni, 12X18H10T, 03X20H45M4БЧ), облученных нейтронами : автореф. дис.... канд. физ.-мат. наук / Д. А. Токтогулова. – Алматы, 2009. – 17 с.

152. Троицкий, О. А. Электромеханический эффект в металлах / О. А. Троицкий // Письма в ЖЭТФ. – 1969. – № 10. – С. 18–22.

153. Спицын, В. И. Электропластическая деформация металлов / В. И. Спицын, О. А. Троицкий. – М. : Наука, 1985. – 160 с.

154. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов / В. Е. Громов [и др.]. – М. : Недра, 1996. – 270 с.

155. Бурцев, В. А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В. А. Бурцев, Н. П. Калинин, А. В. Лучинский. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 289 с.

156. Марахтанов, М. К. Новый источник энергии / М. К. Марахтанов, А. М. Марахтанов // Вестн. МГТУ. Сер. Машиностроение. – 2000. – № 3. – С. 78–89.

157. Марахтанов, М. К. Перенос тепла и электрического тока в тонких металлических пленках / М. К. Марахтанов, А. М. Марахтанов // Вестн. МГТУ. Сер. Машиностроение. – 2001. – № 2. – С. 86–98.

158. Абрамова, К. Б. Излучение металлов при электрическом взрыве / К. Б. Абрамова, Б. П. Перегуд // ЖТФ. – 1971. – Т. 41. – № 10. – С. 2216–2225.

159. Спектр излучения, сопровождающего разрушение медных, алюминиевых и серебряных проводников током большой плотности / К. Б. Абрамова [и др.] // Опт. и спектр. – 1985. – № 58-4. – С. 809–814.

160. Молоцкий, М. И. Люминесценция меди при разрушении проводников с током МГД неустойчивостью / М. И. Молоцкий, Б. П. Перегуд // ЖТФ. – 1981. – Т. 51, № 3. – С. 618–627.
161. Tolman, R. C. The electromotive force produced by the acceleration of metal / R. C. Tolman, T. D. Stewart // Thin physical reviv. – 1916. – V. 8. – № 2. – Second series. – P. 97–116.
162. Ушеренко, С. М. Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов / С. М. Ушеренко. – Минск : НИИИПСОП, 1998. – 210 с.
163. Соболев, В. В. Образование плазмы в ударно-волновых процессах / В. В. Соболев, С. М. Ушеренко // Физика и техника высоких давлений. – 2005. – Т. 15, № 2. – С. 86–94.
164. Шестопалов, А. В. Механизм холодного ядерного синтеза на острие растущей трещины глубоко под землей / А. В. Шестопалов // материалы 15-й рос. конф. по холодной трансмутации ядер хим. элементов и шаровой молнии. Дагомыс, Сочи. 1–8 окт. 2008 г. – М., 2009. – С. 246–255.
165. Walton, A. J. Triboluminescence / A. J. Walton // Advances in Physics. – 1977. – V. 26. – № 6. – P. 887–914.
166. Крылова, И. В. Экзоэмиссия. Химический аспект / И. В. Крылова // Успехи химии. – 1976. – Т. 55, № 12. – С. 2138–2157.
167. Минц, Р. И. Экзоэлектронная эмиссия полупроводников / Р. И. Минц, И. И. Мильман, В. И. Крюк // УФН. – 1976. – Т. 119, № 4. – С. 750–769.
168. Dickinson, J. T. The emission of electrons and positive ions from fracture of materials / J. T. Dickinson, E. E. Donaldson, M. K. Park // Journal of Materials Science. – 1981. – V. 16. – P. 2897–2902.
169. Chapman, G. N. Triboluminescence of glasses and quartz / G. N. Chapman, A. J. Alan // J. Appl. Phys. – 1983. – V. 54. – № 10. – P. 5961–5977.
170. Эмиссионные процессы, сопровождающие деформирование и разрушение металлов/ К. Б. Абрамова [и др.] // Физика твердого тела. – 1999. – Т. 41, вып. 5. – С. 842–843.
171. Банишев, А. Ф. Нетепловое свечение поверхности металлов инициируемое термодетонациями при воздействии лазерных

- импульсов / А. Ф. Банишев, В. Я. Панченко, А. В. Шишков // ФТТ. – 1999. – Т. 41, вып. 9. – С. 1538–1543.
172. Mizuno, Y. Photon emission accompanying deformation and fracture of ice / Y. Mizuno, T. Mizuno // Canadian Journal of Physics. – 2003. – № 81 (1–2). – P. 71–80.
173. Банишев, А. Ф. Исследование деформационно-стимулированного, нетеплового свечения тонких металлических пластин и пленок / А. Ф. Банишев, В. Я. Панченко, А. В. Шишков // Изв. РАН. Сер. физическая. – 2002. – Т. 66, № 7. – С. 976–980.
174. Молоцкий, М. И. Дислокационный механизм люминесценции металлов при разрушении / М. И. Молоцкий // ФТТ. – 1978. – Т. 20, № 6. – С. 1651–1657.
175. Молоцкий, М. И. Дислокационная люминесценция поверхностных состояний в металлах / М. И. Молоцкий // ФТТ. – 1981. – Т. 23, № 7. – С. 2171–2176.
176. Молоцкий, М. И. Генерация дырок при распаде дислокаций и механолюминесценция металлов / М. И. Молоцкий // ФММ. – 1983. – Т. 55, № 1. – С. 43–49.
177. Molotskii, M. I. Electronic Excitation During the Plastic Deformation and Fracture of Crystals / M. I. Molotskii // Chemistry Reviews. – 1989. – № 13, part. 3. – P. 1–85.
178. Банишев, А. Ф. Люминесценция тонких металлических пластин и пленок, возбуждаемая пластическими деформациями при воздействии лазерных импульсов / А. Ф. Банишев, В. Я. Панченко, А. В. Шишков // Современные лазерно-информационные и лазерные технологии : сб. тр. ИПЛИТ РАН / под ред. член-кор. РАН В. Я. Панченко и проф. В. С. Голубева. – М. : Интерконтакт Наука, 2005. – С. 91–104.
179. Клявин, О. В. Физика пластичности кристаллов при гелиевых температурах / О. В. Клявин. – М. : Наука, 1987. – 256 с.
180. Райс, Дж. Р. Локальный нагрев за счет пластической деформации у вершины трещины / Дж. Р. Райс, Н. Левин // Физика прочности и пластичности ; пер. с англ. ; под ред. Л. К. Гордиенко. – М. : Metallurgia. – 1972. – С. 241–258.

181. Браун, А. Ф. Поверхностные явления при пластической деформации металлов /А. Ф. Браун // Успехи физ. наук. – 1957. – Т. 62, № 7. – С. 305–355.
182. Никольс, Р.В. Конструирование и технология изготовления сосудов давления. М.: «Машиностроение», 1975, 464 с.
183. Пригоровский, Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: Справочник. - М.: «Машиностроение». – 1983 . - 248 с.
184. Патон, Е.О. Стальные мосты. Т. 1. Фермы балочной системы. Материал и заклепки Е.О. Патон, Б.Н. Горбунов.- Харьков-Киев: ГНТИ Украины .- 1935. - 812 с.
185. Мюнзе, В.Х. Усталостная прочность сварных стальных конструкций. - М.: «Машиностроение». – 1968. - 273 с.
186. Копельман, Л.А. Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. - Л.: «Машиностроение», 1978. - 232 с.
187. Панин, В.А. Структурные уровни деформации твердых тел/ В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев. Новосибирск: «Наука», 1985 . – 229 с.
188. Макклиток, М.Ф. Деформация и разрушение материалов/ М. Ф. Макклиток, А. Аргон.: «Мир»,1970. - 444 с.
189. Шапошников, Н.А. Методика механических испытаний металлов и ее применение. Л.-М.-Свердловск: ГНТИ по черной и цветной металлургии, 1933, ч. 1. - 324 с.
190. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел. М.: изд-во иностр. лит.,1954 . - 648 с.
191. Одинг, И.А. Современные методы испытания металлов Л.: изд-во «Сев.-зап. промбюро ВСНХ»,1927. - 269 с.
192. A. Nadai. Der Bildsame Zustand der Werkstoffe. Berlin: Verlag von J. Springer, 1927, 171 S.
193. Handbuch der Physikalischen und technischen Mechanik. Band IV-2 Hälfte. Technische Physik der festen Körper / Herausgegeben von prof. F. Auerbach, W. Hort. Berlin: Verlag für J. Springer, 1931, 614 S.
194. B. Straus, Ad. Fry. Reißbildung in Kesselblechen // Stahl und Eisen. 1921,№33, S.1133-1137.
195. Ad. Fry. Kraftwirkungsfiguren im Flußeisen, dargestellt durch ein neues Aetzverfahren // Stahl und Eisen. 1921, №32, S.1093-1097.

196. Пашков, П.О. Периодичность деформации при пластическом растяжении и сжатии крупнозернистой стали // Журнал технической физики. – 1949. - т. XIX. - в. 3. - С. 391-398.
197. M. Rudeloff. Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau. Ausgabe A. Heft 3. Versuche mit Ausschlüssen steifer Stübe. Berlin: Verlag von J. Springer, 1921, 84 S.
198. O. Graf. Aus dem Unterricht in Baustofflehre und Materialprüfung // Bautechnik. 1933, № 47, S.123-127.
199. Гриднев, В.Н. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали/ В.Н. Гриднев, В.Г. Гаврилюк, Ю.Л. Мешков. Киев: «Наукова думка», 1974. - 231 с.
200. Курдюмов, Г.В. Превращения в железе и стали/ Г.В. Курдюмов, Л.М. Утевский, Р.И. Энтин. - М.: «Наука», 1977. - 267 с.
201. Ежов, А.А. Разрушение металлов А.А. Ежов, Л.П. Герасимова/. - М.: «Наука», 2004. - 400 с.
202. Степанов, А.В. Основы практической прочности кристаллов. М.: «Наука», 1974. - 132 с.
203. Модель зарождения и развития макролокализации пластической деформации на основе двупредельного критерия пластичности/ В.А. Романова, Р.Р. Балохонов// Деформация и разрушение материалов. - 2007. - №12. - С. 2-11.
204. Брок, Д. Основы механики разрушения / Пер. с англ. М.: «Высш. школа», 1980. - 368 с.
205. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности. М.: ГИТТЛ, 1956. - 324 с.
206. Михлин, С.Г. Основные уравнения математической теории пластичности. - Л.: Изд-во АН СССР, 1934 - 69 с.
207. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твёрдого тела / Ю. Н. Работнов ; 2-е изд., испр. – М. : Наука, 1988. – 712 с.
208. Циглер, Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды / Г.Циглер; пер. с англ. – М. : Мир, 1966. – 135 с.
209. Зайков, М. А. Режимы деформации и усилия при горячей прокатке / М. А. Зайков. – Свердловск : Metallurgizdat, 1960. – 302 с.

210. Радзивончик, В. Ф. Скоростное пластическое деформирование металлов / В. Ф. Радзивончик. – Харьков : Изд-во ХГУ, 1967. – 211 с.
211. Свелин, Р. А. Термодинамика твердого состояния / Р. А. Свелин ; пер. с англ. – М. : Metallurgia, 1968. – 314 с.
212. Шестопалов, Л. М. Деформирование металлов и волны пластичности в них / Л. М. Шестопалов. – М. : Изд-во АН СССР, 1958. – 268 с.
213. Taylor, G. I. The mechanism of plastic deformation of crystals / G. I. Taylor // Proc. Roy. Soc. – 1934. – V. A145. – P. 362–404.
214. Шермергор, Т. Д. Поглощение энергии сталью при пластическом сжатии / Т. Д. Шермергор // ФММ. – 1959. – Т. 7, вып. 1. – С. 146–150.
215. Хоткевич, В. И. Поглощение энергии при низкотемпературном деформировании металлов / В. И. Хоткевич, Э. Ф. Чайковский, В. В. Зашквара // ФММ. – 1955. – Т. 1, вып. 2. – С. 206–217.
216. Работнов, Ю. Н. Избранные труды. Проблемы механики деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – М. : Наука, 1991. – 196 с.
217. Nicholas, J. F. The dissipation of energy during plastic deformation / J. F. Nicholas // Acta metallurgica. – 1959. – V. 7. – P. 544–546.
218. Eshelby, I. D. Note on the heating effects of moving dislocations / I. D. Eshelby, P. L. Platt // Acta metallurgica. – 1956. – V. 4. – P. 560–562.
219. Дубнов, А. В. К вопросу о природе локальных микроочагов разложения в консервированных ВВ при механических воздействиях / А. В. Дубнов, В. А. Сухих, И. И. Томашевич // Физика горения и взрыва. – 1972. – Т. 7, № 1. – С. 147–149.
220. Николаев, В. И. Локальный разогрев при деформации в области гелиевых температур и его измерение с помощью тензодатчиков / В. И. Николаев, В. В. Шпейзман, М. В. Суханова // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, вып. 3. – С. 417–420.
221. Клявин, О. В. Наблюдение локального нагрева полос скольжения при деформировании кристаллов в жидком гелии / О. В. Клявин, А. В. Никифоров // Изв. АН СССР. Сер. физическая. – 1973. – Т. XXXVII. – № 11. – С. 2411–2416.

222. Fox, P. G. Fracture-induced thermal decomposition in brittle crystalline solids / P. G. Fox, I. Soria-Ruiz // Proc. Roy. Soc. – 1970. – V. A317. – P. 79–91.
223. Мешков, Ю. Я. Физические основы разрушения стальных конструкций / Ю. Я. Мешков. – Киев : Наук. думка, 1981. – 240 с.
224. Малыгин, Г. А. Локальные разогревы в кристаллах при низкотемпературной деформации / Г. А. Малыгин // Физика твёрдого тела. – 1977. – Т. 19, вып. 10. – С. 3152–3155.
225. Мойсейчик, Е. А. Исследование предельного состояния растянутых образцов из арматуры класса S500 с конструктивно-технологическими дефектами методами термографии / Е. А. Мойсейчик // Проблемы современного бетона и железобетона : докл. II Междунар. симпозиума, Минск, 21–23 окт. 2009 г. : в 2 ч. / Науч.-исслед. респ. унитар. предприятие по строительству «Институт БелНИИС» ; редкол.: М. Ф. Марковский [и др.]. – Минск, 2009. – Ч. 1. – С. 293–305.
226. Мойсейчик, Е. А. Природа теплообразования при холодном деформировании стальной арматуры / Е. А. Мойсейчик // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010. – № 3 (2). – С. 69–74.
227. Мойсейчик Е.А. Выявление дефектов стальных пролетных строений автодорожных и железнодорожных мостов с использованием инфракрасных технологий неразрушающего контроля // Автомобильные дороги и мосты. 2010, №6, с. 85-94.
228. Мойсейчик, Е. А. Теплообразование в элементах статически нагруженной стальной балки / Е. А. Мойсейчик, А. Е. Мойсейчик, И. А. Пахомчик // Вестн. НИЦ «Строительство». Исслед. по теории сооружений. – 2012. – № 6. – С. 53–62.
229. Мойсейчик, Е. А. Деформационное теплообразование в сдвигаемых пластинах с конструктивными дефектами / Е. А. Мойсейчик, С. Д. Шафрай // Вестн. МГСУ. – 2013. – № 9. – С. 7–15.
230. Мойсейчик, Е. А. Выявление опасных зон в стальных подкрановых балках по изменению деформационного температурного поля / Е. А. Мойсейчик // Вестн. гражд. инженеров. – 2013. № 6 (41). – С. 28–34.

231. Мойсейчик, Е. А. Кинетика тепловыделений при растяжении стального образца с надрезом и ее связь с зарождением разрушения / Е. А. Мойсейчик // Сучасні проблеми механіки та математики : в 3 т. / під заг. ред. Р. М. Кушніра, Б. Й. Пташника / Ін-т прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України. – Львів, 2013. – Т. 1. – С. 240–242.
232. Мойсейчик, А. Е. Основы теплового контроля несущих конструкций с использованием деформационного теплообразования / А. Е. Мойсейчик, Е. А. Мойсейчик // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 3–19.
233. Мойсейчик, Е. А. Моделирование работы и термография растянутых сварных соединений стальных конструкций с парными накладками / Е. А. Мойсейчик, С. Д. Шафрай // Вестн. гражд. инженеров. – 2014. – № 6 (47). – С. 58–63.
234. Мойсейчик, Е. А. Тепловые процессы в зонах предразрушения и расчет элементов стальных конструкций на хрупкую прочность / Е. А. Мойсейчик // Строит. механика и расчет сооружений. – 2015. – № 1. – С. 71–77.
235. Moysenchik, E. A. Analyzing patterns of heat generated by the tensile loading of steel rods containing discontinuity-like defects / E. A. Moysenchik, V. P. Vavilov // International Journal of Damage Mechanics. – 2018. – Vol. 27. – Iss. 6. – P. 950–960.
236. Moysenchik, 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.
237. Остриков, Г. М. Стальные сейсмостойкие каркасы многоэтажных зданий / Г. М. Остриков, Ю. С. Максимов. – Алма-Ата : Казахстан, 1985. – 120 с.
238. Экспериментальная механика: В 2-х книгах.: Кн.2. Пер. с англ./ Под ред. А.Кобаяси.-М.:Мир,1990.-552с.
239. Абрамова, К.В. А.В.Пахомов, Б.П.Перегуд, И.П.Щербаков. Инфракрасное излучение, возникающее при деформации и разрушении металлов/К.В. Абрамова, А.В.Пахомов, Б.П.Перегуд, И.П.Щербаков. // Журнал технической физики.-1988.-Т.58.-В.4.-С.817-821.

240. Pasternak, H., Horvath, L. Untersuchung zyklisch beanspruchter Stahlbauteile mit Hilfe der Thermovision/ H.Pasternak, L.Horvath //Stahlbau.-1997.-66.- S. 127-135.
241. Pasternak H.; Müller L. Untersuchung des thermoplastischen Verhaltens verschiedener Baustoffe mit Hilfe der Thermovision/ H.Pasternak, L.Müller //Bauingenieur.- 2003.-78.- S.221-230.
242. Лащенко,М.Н. Аварии металлических конструкций зданий и сооружений/М.Н.Лащенко.-М.Стройиздат,1969.- 181с.
243. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена/ С.С. Кутателадзе. - М.-Л.: Машгиз.-1962.-456с.
244. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер.с франц.-М.Мир, 1988.- 416с.
245. Riegert, G., Zweschper, Th. ; Busse, G. Induction-Lockin-Thermography: application and potential of an emerging NDE method.- Proc. Condition Monitoring Cambridge. Chipping Norton, UK: Coxmoor Publishing Company, 2005.-P. 433-439.
246. Протасов, К.Г. Металлические мосты/ К.Г. Протасов, А.В. Теплицкий, С.Я. Крамарев, М.К. Никитин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Транспорт», 1973. – 352 с.
247. Крагельский, И.В. Трение и износ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Машиностроение», 1968. – 480 с.
248. Амосов, А.П. Теплофизические модели трения инертных и взрывчатых материалов. – М.: Машиностроение, 2011. - 363 с.
249. Амосов, А.П. Элементарные теплофизические модели трения. – Известия Самарского научного центра Российской академии наук.– т. 13.– №4(3).– 2011.– С.656–662.
250. Казанцев, Е. И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования.– М.: Металлургия, 1975.– 368 с.

251. Trakulyingyong, V., and M. D. Bowman. The Examination of Infra-Red Techniques for Inspection of Steel Structures I & II. Publication FHWA/IN/JTRP-2000/18. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2002. doi: 10.5703/1288284313332.
252. T. Omar, M. L. Nehdi, Non-Destructive Testing of Bridge Deck Using Passive Infrared Thermography and Ground Penetrating Radar, (2016), Conference of the Transportation Association of Canada, Toronto, ON.
253. Иванов В.Ф. Проблемы проектирования и эксплуатации тоннелей метрополитенов/В.Ф.Иванов// Метро и тоннели, 2002, №2. – С. 42- 43.
254. Шилин А.А. Гидроизоляция заглубленных и подземных сооружений при строительстве и ремонте / А.А.Шилин, М.В.Зайцев, И.А.Золотарёв, О.Б.,Липидевская.- Тверь: Изд-во «Русская торговая марка», 2003. – 400 с.
255. Устюжский А. AquaStop-2006: гидроизоляция метрополитенов - в центре внимания/А.Устюжский// Петербургский строительный рынок, №5(90).
256. ГОСТ 26629-85 Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций.
257. Alireza Afshania, Koichi Kawakami, Shinji Konishib, Hirokazu Akagi. Study of infrared thermal application for detecting defects within tunnel lining/ Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 86, April 2019, Pages 186-197, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.01.013>.
258. Konishi, S., Kawakami K., Taguchi, M., 2016. Inspection method with infrared thermometry for detect void in subway tunnel lining. Procedia Eng. 165, 474–483. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.723>.
259. Scott, M., Luttig, H., Strydom, M., Gonelli, M., Kruger, D., Rankine, R.G.D., Broodryk, T., 2012. Passive infrared thermography as a diagnostic tool in civil engineering structural material health monitoring. CRC Press, pp. 274, [https://doi.org/10.1016/S1350-4495\(02\)00157-3](https://doi.org/10.1016/S1350-4495(02)00157-3).

260. D. G. Aggelis, E. Z. Kordatos, D. V. Soulioti, T. E. Matikas, Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete, (2010) Construction and Building Materials 24(10), 1888–1897.
261. Руководство по техническому диагностированию автодорожных тоннелей.- М.: Росавтодор.- 2001. - 132 с.
262. СП 12 – 105 – 2003. Механизация строительства. Организация диагностирования строительных и дорожных машин. Часть 1. Общие требования. – М.: Госстрой России. 2004.–14с.
263. Правила по обеспечению промышленной безопасности грузоподъемных кранов. Утверждены постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь 22.12.2018 № 66.
264. Автоматизированные средства технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава: учебно-методическое пособие к лабораторным и практическим занятиям / В.Ф. Криворудченко, Л.Г. Северинова, О.В. Кибальченко, А.В. Селезнев; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2016. – 56 с.
265. ТИ 250002.00001. Проведение тепловизионного контроля узлов и деталей локомотивов. Технологическая инструкция.
266. Мойсейчик, А.Е. Физические основы использования температуры как диагностического параметра агрегатов и конструкций машин/ А.Е.Мойсейчик, Е.А.Мойсейчик// Вестник БарГУ. Серия: Технические науки .- 2018.- Вып.6.- С.57-61.
267. Бобровицкий, В.И. Механическое оборудование: техническое обслуживание и ремонт/В.И. Бобровицкий, В.А. Сидоров.-Донецк: Юго-Восток.-2011.-238с.
268. Богданов, С.А. Разработка метода определения изменения изменения технического состояния агрегатов трансмиссии автомобилей по показателям их теплового состояния: автореф. дисс. ...канд.техн.наук. - Харьков, 1987. - 23с.

269. Зайцев, А.В. Разработка метода теплового расчета ведущих мостов автомобилей: автореф. Дис...канд.техн.наук.-Курган.-1999.-19с.
270. Бердик, Б.Г. Смазочное масло как элемент конструкции, неразрушающего контроля и диагностики техники при эксплуатации по состоянию//Контроль. Диагностика. - 2005.-№5.- С.23-26.
271. Хорешок, А.А. Влияние условий эксплуатации на тепловое состояние редукторов мотор-колес автосамосвалов БелАЗ/Хорешок А.А., Стенин Д.В., Стенина Н.А.//Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 2012. - №2.- С.28-30.
272. Горюнов, С.В. Прогнозирование эксплуатационной температуры пневматических шин карьерных автосамосвалов/С.В.Горюнов, В.М. Шарипов//Известия ИГТУ «МАМИ».- 2012.-Т.1.-№2(14).- С.89-92.
273. Шарипов,В.М. Прогнозирование долговечности пневматических шин карьерных автосамосвалов В.М. Шарипов, С.В.Горюнов.-2015.- С.127-130.
274. Стенин, Д.В. Оценка влияния загрузки на надежность редукторов мотор-колес карьерных автомобилей/Д.В. Стенин, Н.А. Стенина, Ю.Е. Воронов//Вестник Кузбасского государственного технического университета. -2017. - №2.- С.94-99.
275. Ларін, О.М. Теоретичні основи оцінки працездатності шин легкового автомобіля у експлуатації: Дис...д-ра техн. наук: 05.22.20.- К., 2001.-392с.
276. St ISO 18434-1-2013. Condition monitoring and diagnostics of machines - Thermography - Part 1: General procedures.
277. St ISO 18434-2-2019. Condition monitoring and diagnostics of machine systems -- Thermography -- Part 2: Image interpretation and diagnostics.

278. ГОСТ Р ИСО 18434 - 1 - 2013. Контроль состояния и диагностика машин. Термография. Часть 1. Общие методы. – М.: Стандартиформ.- 2014.
279. ГОСТ Р ИСО 18434-2-2021. Контроль состояния и диагностика машин. Термография. Часть 2. Интерпретация термограмм и диагностирование. – М.: Стандартиформ.- 2021.
280. Keerthi, M. Machine Health Monitoring Using Infrared Thermal Image by Convolution Neural Network/ M. Keerthi, R. Rajavignesh // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). Special Issue. – 2018.- Volume 6.- Issue 07.- <https://www.ijert.org/research/machine-health-monitoring-using-infrared-thermal-image-by-convolution-neural-network-IJERTCONV6IS07026.pdf>