Научная статья
УДК 614.841
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.57.16.014

Современные методы исследования металлических изделий

Александр Сергеевич Горбунов
Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия
Автор, ответственный за переписку: *Александр Сергеевич Горбунов, gorbunovgps@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы исследования металлических изделий, применяемые в экспертизе пожаров, с акцентом на их эффективность и точность. Автор подробно описывает ключевые подходы, включая оптическую спектроскопию, рентгенофазовый анализ, магнитные методы исследования и металлографию, а также их применение при расследовании пожаров. Особое внимание уделяется преимуществам и ограничениям каждого метода, таким как чувствительность к загрязнениям, скорость анализа и возможность получения детальной информации о состоянии металла. Исследование направлено на определение очага пожара и причин его возникновения, что важно для реконструкции событий, принятия мер по предотвращению пожаров и повышения уровня пожарной безопасности. Автор также обсуждает междисциплинарный подход, включающий сотрудничество экспертов из различных областей, таких как пожарная безопасность, химия, физика и материаловедение. Это позволяет разрабатывать комплексные методики, учитывающие все особенности конкретного случая. Заключение подчеркивает важность интеграции современных технологий и междисциплинарного взаимодействия для повышения эффективности и точности пожарно-технической экспертизы. Статья будет полезна не только специалистам в области пожарной безопасности и криминалистики, но и всем заинтересованным в вопросах анализа материалов и причин чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: экспертиза пожаров; металлические изделия, методы исследования, преимущества методов, недостатки методов

Для цитирования: Горбунов А.С. Современные методы исследования металлических изделий // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 2 (37). С. 167-176. https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.57.16.014.

Original article.

Modern methods of metal products research

Alexander S. Gorbunov
Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia
Corresponding author: *Alexander S. Gorbunov, gorbunovgps@mail.ru*

Abstract. The article discusses modern methods of studying metal products used in the examination of fires, with an emphasis on their effectiveness and accuracy. The author describes in detail the key approaches, including optical spectroscopy, X-ray phase analysis, magnetic research methods and metallography, as well as their application in the investigation of fires. Special attention is paid to the advantages and limitations of each method, such as sensitivity to contamination, speed of analysis, and the ability to obtain detailed information about the metal's condition. The study is aimed at determining the source of the fire and the causes of its occurrence, which is important for reconstructing events, taking measures to prevent fires and increase the level of fire safety. The author also discusses an interdisciplinary approach involving the collaboration of experts from various fields such as fire safety, chemistry, physics, and materials science. This allows us to develop comprehensive techniques that take into account all the features of a particular case. The conclusion highlights the importance of integrating modern technologies and interdisciplinary collaboration to improve the efficiency and accuracy of fire technical expertise. The article will be useful not only for specialists in the field of fire safety and criminology, but also for anyone interested in analyzing materials and the causes of emergencies.

Keywords: fire expertise; metal products, research methods, advantages of methods, disadvantages of methods

For citation: Gorbunov A.S. Modern methods of metal products research // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 2 (37). С. 167-176. (In Russ.) https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.57.16.014.

Экспертиза пожаров – это комплекс мероприятий, направленных на всестороннее исследование причин, обстоятельств и механизмов возникновения и развития пожара. В ходе экспертизы специалисты анализируют различные объекты и данные, включая остатки сгоревших материалов, фрагменты оборудования, следы на месте происшествия и другие улики. Это позволяет установить место первичного возгорания, причины пожара (например, неисправность электропроводки, перегрев оборудования, поджог) и факторы, способствовавшие его распространению.

Особое внимание в пожарно-технической экспертизе уделяется металлическим изделиям. Металлы обладают высокой теплопроводностью и могут сохранять следы воздействия высоких температур, таких как плавление, деформация, образования окислов. Эти следы помогают экспертам определить, подвергались ли металлические конструкции или оборудование воздействию огня, и как это повлияло на развитие пожара.

Металлические изделия могут быть частью строительных конструкций, технологического оборудования или систем пожаротушения. Их исследование позволяет выявить не только очаг возгорания, но и возможные пути распространения огня, так как они сохраняются после пожара.

Для проведения экспертизы пожаров используются различные методы исследования, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Эти методы можно классифицировать по следующим критериям:

1. Точность и объективность. Современные технологии, такие как спектрометрия и металлография, позволяют получать точные и объективные данные. Это способствует более точному определению очага пожара и его причин.

2. Скорость. Некоторые методы, такие как магнитные методы, позволяют быстро получить результаты. Это особенно важно при проведении оперативных расследований.

3. Комплексность. Комбинация нескольких методов исследования позволяет получить более полное представление о пожаре. Например, анализ металлических конструкций на месте пожара в сочетании с лабораторными методами может дать исчерпывающую картину событий.

4. Стоимость. Некоторые методы, такие как лабораторные анализы или сложные компьютерные модели, могут быть дорогостоящими. Это ограничивает их использование в случаях, когда бюджет расследования ограничен.

5. Сложность интерпретации. Результаты некоторых методов могут быть сложными для интерпретации без глубоких знаний и опыта. Например, металлографический анализ требует высокой квалификации специалистов для правильной интерпретации данных.

6. Ограничения по времени. Некоторые методы не могут быть применены, если пожар произошел давно или место происшествия сильно повреждено. Например, дальнейшее окисление окалины и рекристаллизация при отжиге.

Экспертиза пожаров – это сложная и многогранная задача, требующая применения различных методов и подходов. Выбор методов исследования зависит от конкретных обстоятельств дела, доступных ресурсов и целей расследования. Комплексный подход и использование современных технологий позволяют максимально точно установить причины и обстоятельства пожара, что способствует предотвращению подобных происшествий в будущем.

Актуальность данной статьи обусловлена растущими требованиями к точности и достоверности экспертных заключений в области пожарной экспертизы. В условиях, когда пожары становятся всё более сложными и разрушительными, необходимо разрабатывать и совершенствовать методы исследования металлических изделий, подвергшихся термическим повреждениям. Традиционные методы, такие как визуальный осмотр, часто оказываются недостаточными для интерпретации сложных процессов, происходящих при высоких температурах.

Современные технологии, такие как сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), оптические методы исследования, рентгеноструктурный анализ (РСА) и методы математического моделирования, открывают новые горизонты для детального изучения термических повреждений металлов. Эти методы позволяют не только фиксировать структурные изменения в материале, но и проводить количественную оценку параметров, таких как степень окисления, градиент температур и другие характеристики.

Цель данной статьи — систематизировать современные методы исследования металлических изделий в контексте пожарной экспертизы и оценить их эффективность для идентификации очага возгорания. Особое внимание уделяется междисциплинарному подходу, который объединяет достижения материаловедения, химической физики и криминалистики. Такой подход способствует повышению надёжности и объективности экспертных выводов.

Научная новизна работы заключается в систематизации современных методов исследования и их оценке для использования в пожарно-технической экспертизе. В статье также предложены перспективы дальнейших исследований, включая разработку и оптимизацию оптических методов контроля степени термических повреждений металлических изделий.

В статье рассматриваются различные аспекты применения современных технологий в исследовании металлов. Сканирующая электронная микроскопия позволяет получать высокоразрешающие изображения микроструктуры металлов, что помогает выявлять мельчайшие детали повреждений. Оптические методы, такие как контроль изменения RGB характеристик. Рентгеноструктурный анализ позволяет определить фазовый состав и кристаллическую структуру металлов, что важно для понимания процессов, происходящих при пожаре. Методы математического моделирования позволяют прогнозировать поведение

металлов при различных температурных условиях и оценивать их устойчивость к термическим воздействиям.

Особое внимание уделяется вопросам идентификации очага возгорания. Методы исследования металлических изделий позволяют определить место и время начала пожара, а также оценить его интенсивность и продолжительность. Это важно для расследования причин пожаров и разработки мер по их предотвращению.

Таким образом, данная статья представляет собой обзор современных методов исследования металлических изделий в контексте пожарной экспертизы. Она показывает, как междисциплинарный подход и использование передовых технологий могут повысить точность и достоверность экспертных заключений, а также предлагает перспективы для дальнейших исследований в этой области.

Одним из наиболее характерных признаков термического воздействия на стальные конструкции при пожаре является их деформация. Этот процесс обусловлен низкой огнестойкостью стали, особенно при воздействии высоких температур. При нагреве до 300–350°С сталь начинает проявлять повышенную пластичность, что может привести к её деформации, ползучести и снижению прочностных характеристик. При дальнейшем повышении температуры до 500–600°С прочность стали снижается вдвое, а при более высоких температурах — многократно. Уже при температуре около 300°С стальные конструкции начинают заметно деформироваться [1, 2].

Деформации стальных конструкций обычно происходят в направлении наиболее интенсивного теплового воздействия. Это связано с неравномерным распределением температуры по поверхности и в объёме материала. Для анализа деформаций необходимо определить основное направление их распространения и рассчитать относительную величину деформации, представляющую собой отношение величины прогиба конструкции к длине участка, на котором этот прогиб наблюдается. Такой подход позволяет более точно оценить степень повреждения конструкции и её способность сохранять несущую способность [3, 4, 5].

При высокотемпературном окислении углеродистой стали в воздушной среде на её поверхности образуется плотный слой окислов, известный как окалина. Формирование окалины начинается при температуре около 700°С и происходит по параболическому закону, что приводит к быстрому увеличению её толщины [6,7,8].

Для исследования состава окалины широко применяется рентгенофазовый анализ. Этот метод основан на идентификации кристаллических фаз материала по характерным значениям межплоскостных расстояний и интенсивностям линий в рентгеновском спектре (Рис.1). Рентгенофазовый анализ позволяет определить химический состав окалины, выявить наличие различных оксидов и оценить их количественное соотношение. Это даёт возможность более точно понять процессы, происходящие на поверхности, стали при её окислении в условиях пожара [1]

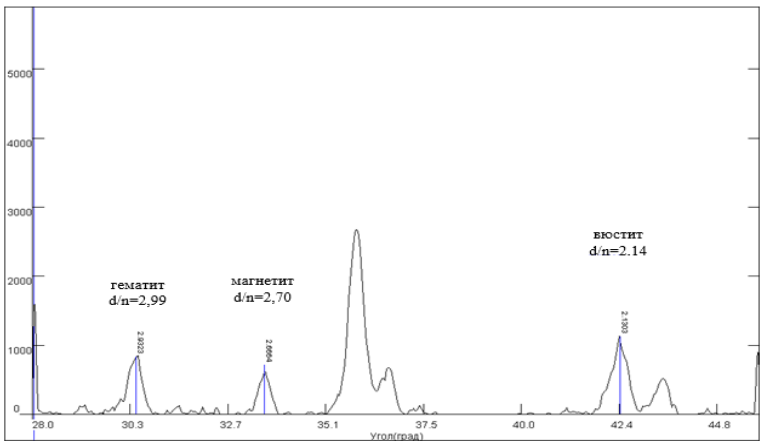

Рис.1. Дифрактограмма окалины

Рентгенофазовый анализ (РФА) — это мощный инструмент для изучения состава окалины, образующейся на поверхности стальных изделий при воздействии высоких температур. Этот метод позволяет не только определить фазовый состав окалины, но и оценить условия, при которых она сформировалась. Например, РФА помогает установить температуру и продолжительность теплового воздействия на сталь, что особенно важно при анализе последствий пожаров. Для проведения анализа требуется тщательная пробоподготовка, а сам метод реализуется только в лабораторных условиях.

Для оценки толщины окалины на поверхности углеродистых сталей используется метод вихретокового контроля. Этот подход основан на взаимодействии электромагнитного поля с металлом и его окислами. Вихревые токи, индуцируемые в материале под воздействием внешнего магнитного поля, проникают в металл и взаимодействуют с его структурой. Окалина, в отличие от основного материала, имеет иные физико-химические свойства, что приводит к изменению характера взаимодействия вихревых токов и, как следствие, к изменению величины электромагнитной индукции (ЭДС) [1, 2].

При увеличении температуры и длительности воздействия на сталь происходит рост окалины, что снижает эффективность прохождения вихревых токов, уменьшая величину ЭДС. Таким образом, метод вихретокового контроля позволяет количественно оценить термические повреждения стали, вызванные высокими температурами. Важно отметить, что данный метод применим только для анализа окалины, сформированной при температурах выше 700°С, так как при более низких температурах изменения на поверхности стали могут быть незначительными или отсутствовать.

Для наглядного представления результатов анализа часто используются карты распределения значений измеряемых параметров. Эти карты позволяют визуализировать термические повреждения конструкций и выявить участки с наибольшими повреждениями. На Рис.2 представлена карта распределения значений ЭДС для однотипных металлических конструкций после пожара.

Рис.2. Карта распределения значений ЭДС в точках измерения

В работе [1] представлен метод оценки термических повреждений металлических конструкций и изделий после пожара, основанный на измерении твёрдости по Бринеллю или Виккерсу. Однако применение этого метода ограничено горячекатаными сталями, поскольку они проходят термическую обработку, и воздействие пожара не существенно изменяет их твёрдость.

Для оценки термических повреждений холоднодеформированных стальных конструкций и изделий в пожарно-технических исследованиях используют магнитный метод, основанный на измерении коэрцитивной силы [1, 8, 9, 10]. Коэрцитивная сила — это минимальная напряжённость магнитного поля, необходимая для полного размагничивания предварительно

намагниченного материала. Магнитный метод включает измерение тока размагничивания образца или определение относительной степени рекристаллизации. В результате получают значение коэрцитивной силы, которое является индикатором термического воздействия на сталь. Изменение коэрцитивной силы позволяет оценить степень повреждений и определить, насколько материал подвергся воздействию высоких температур.

Этот метод широко применяется в металлургии и машиностроении для неразрушающего контроля качества металла, оценки его структуры и твёрдости поверхностно-упрочнённых слоёв [1, 2]. В пожарно-технических исследованиях магнитный метод позволяет выявить и оценить термические повреждения холоднодеформированных стальных конструкций.

На Рис.3 показана карта термических повреждений двери холодильника после пожара, полученная с помощью магнитного метода. Она демонстрирует распределение коэрцитивной силы по поверхности изделия, что позволяет определить зоны наибольших термических повреждений и оценить их степень.

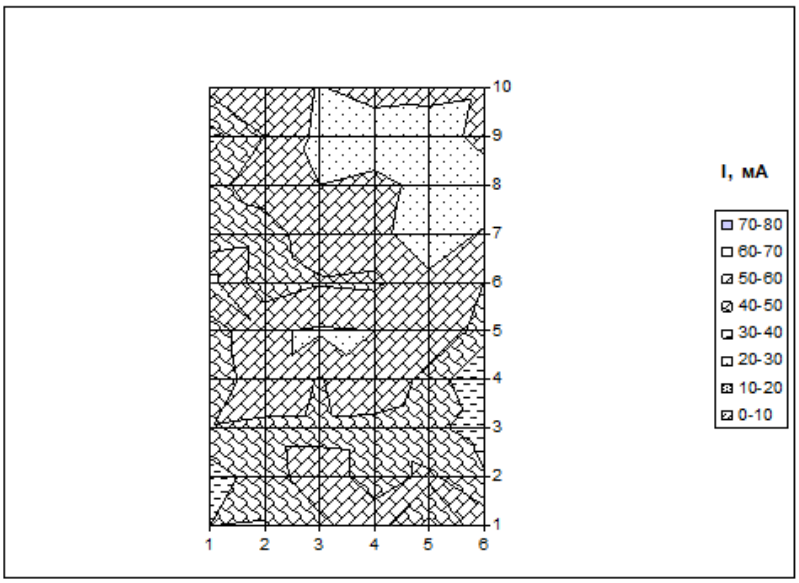

Рис.3. Карта термических повреждений двери холодильника путем измерения тока размагничивания

В источниках [11,12] представлены результаты экспериментов с образцами стали, которые были подвергнуты термическому воздействию (Рис.4). В ходе исследований использовались методы спектрофотометрии для анализа цветовых характеристик материалов. Для этого применялся специализированный прибор, который позволяет разложить цвет на составляющие RGB, что даёт возможность детально изучить изменения на поверхности образцов.

Эксперименты включали термическую обработку образцов в течение 10, 20 и 30 минут при различных температурах. Полученные данные о цветовых изменениях фиксировались с помощью спектрофотометра. График зависимости значений красного канала (R) от температуры (Рис.5) демонстрирует, как изменяются цветовые параметры стали при нагревании. Этот график позволяет проследить динамику изменения цвета в зависимости от температуры и времени термического воздействия.

Результаты экспериментов показывают, что термическая обработка стали приводит к изменению её цветовых характеристик, что может быть связано с физическими и химическими процессами, происходящими в материале при нагревании.

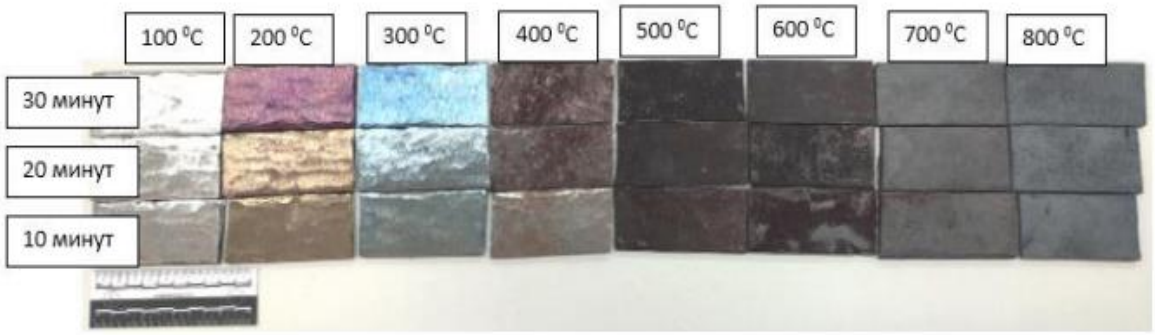

Рис.4. Вид образцов стали после термического воздействия [12]

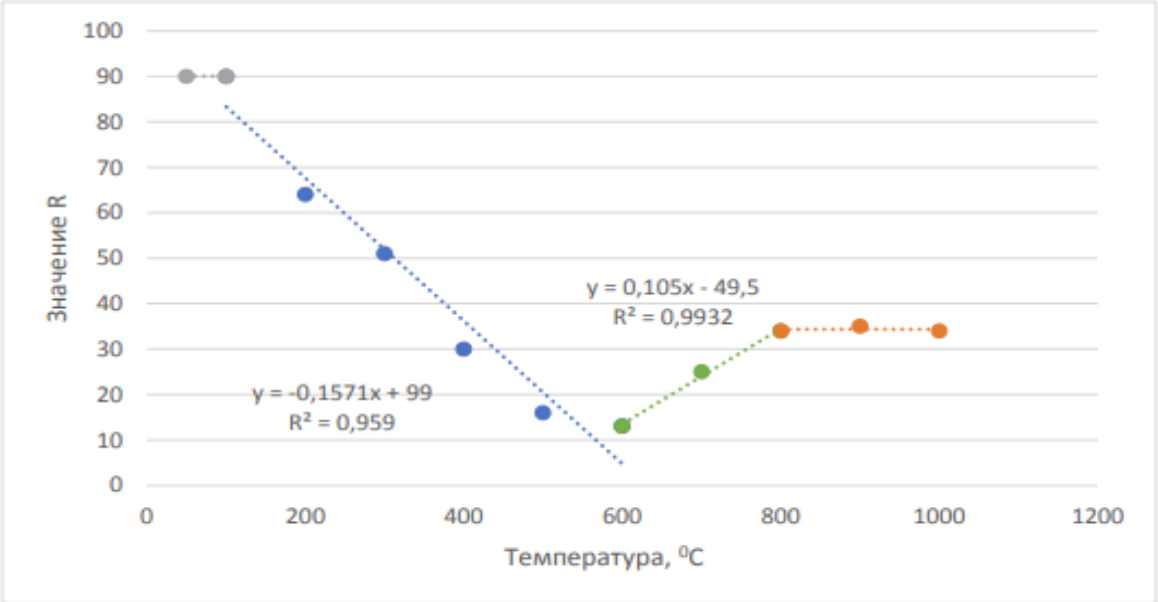

Рис.5. График зависимости значений красного канала (R) от температуры для 10 минут воздействия на образцы стали [12]

Металлографический анализ – ключевой метод исследования микроструктуры стали, позволяющий детально изучить её внутреннее строение под микроскопом. Этот метод незаменим для понимания влияния термической обработки на свойства стали, выявления дефектов и оценки качества материала. Термическая обработка стали, включающая нагрев и охлаждение, изменяет её микроструктуру, влияя на прочность, пластичность и другие характеристики. Например, закалка повышает твёрдость, но делает сталь хрупкой, а отжиг возвращает пластичность. Металлографический анализ помогает оценить глубину и характер изменений, вызванных термической обработкой. Метод выявляет фазовые превращения, анализирует распределение фаз и дефекты, такие как оксидные плёнки, трещины и включения.

На Рис.6 показан пример исследования оплавления медного проводника. Здесь видны следы быстрой кристаллизации в форме дендритного строения зёрен меди, что указывает на высокую скорость охлаждения. Этот метод информативен для оценки степени повреждения металлов и широко применяется в металлургии, машиностроении и других отраслях.

Однако металлографический анализ требует специального оборудования, такого как металлографические микроскопы, и квалифицированных специалистов, способных правильно подготовить образцы и интерпретировать результаты. Современные технологии, включая автоматизированные системы анализа изображений, упрощают процесс и повышают точность.

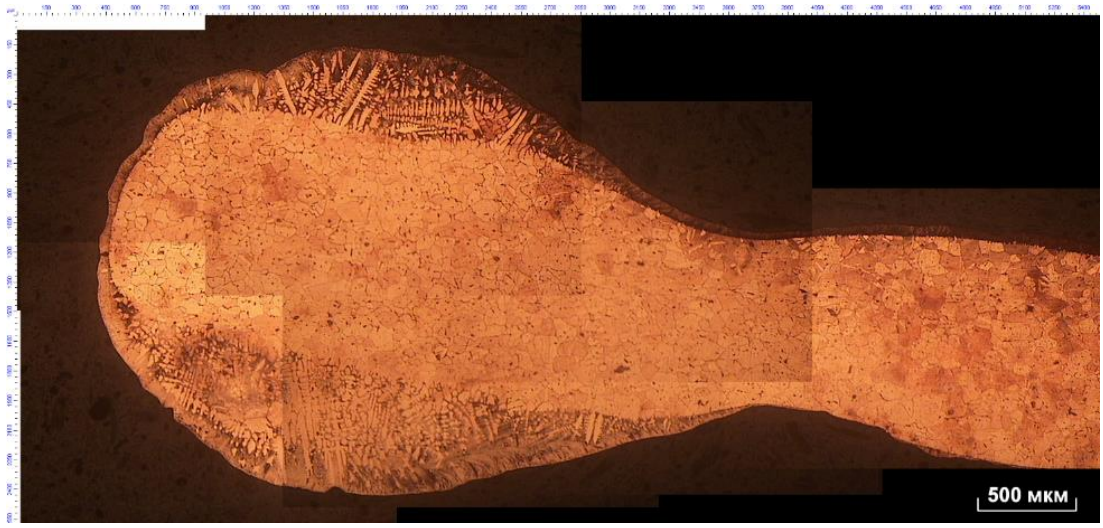

Рис.6. Панорамный снимок микрошлифа оплавления

Таким образом, оценка термических повреждений стальных изделий при пожарах требует применения современных инструментальных методов. Наиболее распространенными полевыми методами исследования являются магнитный вихретоковый метод и метод измерения коэрцитивной силы.

Магнитный вихретоковый метод позволяет анализировать состояние сталей, покрытых окалиной, что часто встречается на месте пожара.

Метод измерения коэрцитивной силы применяется для холоднодеформированных сталей.

Для дальнейшего развития методов исследования термических повреждений металлов необходимо:

1. Совершенствование приборной базы: разработка новых, более точных и чувствительных приборов для анализа магнитных свойств материалов.
2. Развитие методических подходов: создание новых методик, которые позволят более точно и надежно оценивать степень термических повреждений различных металлов.
3. Применение оптических методов: использование оптических технологий для анализа структуры и свойств металлов, что может дать дополнительную информацию о характере термических изменений.
4. Разработка методик качественной и количественной оценки: создание комплексных методик, которые позволят не только определить степень повреждений, но и оценить их влияние на свойства материала.

Междисциплинарный подход представляет собой сотрудничество экспертов из разных областей науки и техники для решения сложных задач. В исследовании металлов такой подход позволяет объединить знания и методы из различных дисциплин, таких как пожарная безопасность, химия, физика и материаловедение.

При изучении свойств металлов, важных для обеспечения пожарной безопасности, специалисты из области пожарной безопасности могут анализировать, как металлы ведут себя при высоких температурах и воздействии огня. Химики исследуют химический состав металлов и их соединений, чтобы определить их устойчивость к коррозии и другим химическим воздействиям. Физики изучают физические свойства металлов, такие как теплопроводность, электропроводность и прочность, что важно для понимания их поведения в различных условиях.

Материаловеды разрабатывают новые сплавы и композитные материалы с улучшенными свойствами, включая повышенную огнестойкость. Они также исследуют процессы старения и деградации металлов под воздействием внешних факторов, что позволяет создавать более надёжные и долговечные материалы.

Сотрудничество экспертов из разных областей позволяет не только глубже понять свойства металлов, но и разработать более эффективные методы их обработки и применения. Например, результаты исследований могут быть использованы для создания новых технологий защиты металлических конструкций от пожаров, что повышает безопасность зданий и сооружений.

Междисциплинарный подход также способствует обмену знаниями и опытом между специалистами разных профилей. Это создаёт условия для появления инновационных идей и решений, которые могут привести к прорыву в области исследования металлов и их применения в различных отраслях.

Исследование термических повреждений металлических изделий в контексте экспертизы пожаров имеет огромное значение как с теоретической, так и с практической точек зрения. Это направление способствует развитию технологий, улучшению методов расследования и повышению уровня пожарной безопасности.

Практическая значимость состоит в разработке и внедрении новых технологий, которые могут быть использованы для оперативной и точной оценки причин и очагов пожаров. Это включает:

1. Анализ влияния различных факторов пожара на материалы.
2. Создание и использование баз данных для сравнения результатов исследований.
3. Усовершенствование существующих методик для повышения их эффективности.

Таким образом, развитие методов исследования термических повреждений металлов и сплавов является важным шагом на пути к более глубокому пониманию процессов, происходящих при пожарах, и к созданию более надежных и точных инструментов для их анализа.

Список источников

1. Чешко И.Д. Расследование и экспертиза пожаров / И.Д. Чешко. – СПб: СПбИПБ МВД РФ, 1997. – 562 с.
2. Зенков Н.И. Строительные материалы и их поведение в условиях пожара / Н.И. Зенков // ВИПТШ МВД СССР. – М., 1974.
3. Комплексная методика определения очага пожара / Смирнов К.П., Чешко И.Д., Егоров Б. С. и др. – Л.: ЛФ ВНИИПО МВД СССР, 1987. – 114 с.
4. Поль Д.К. Естественно-научная криминалистика: (Опыт применения научно-технических средств при расследовании отдельных видов преступлений) / Д.К. Поль. – М.: Юридическая литература, 1985. – 304 с.
5. Чешко И.Д. Технические основы расследования пожаров: Методическое пособие / И.Д. Чешко. – М.: ВНИИПО, 2002. – 330 с.
6. Елисеев Ю.Н. Применение инструментальных методов при исследовании последствий пожаров транспортных средств / Ю.Н. Елисеев, Е.В. Копкин, Е.Н. Бардулин // Управление рисками в техносфере. – 2017. – С. 75.
7. Граненков Н.М. Комплексное определение параметров нагрева полимерных материалов и металлических изделий, используемых на железнодорожном и авиационном транспорте: Методические рекомендации / Н.М. Граненков, О.О. Денисова, Г.А. Дюбаров // ВНИИПО МВД СССР. – М., 1991.
8. Способ выявления скрытых очаговых признаков пожара: пат. № 2329077 С2 Рос. Федерация, МПК A62C 3/00, G01N 29/04 / И.Д. Чешко, А.Н. Соколова, Ю.Н. Елисеев; заявка № 2006108124/12; заявл. 16.03.2006; опубл. 20.07.2008.
9. Кулагин В.Н. Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии / В.Н. Кулагин, В.Ф. Матюк // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – № 3.
10. Елисеев Ю.Н. Экспресс-методы экспертного исследования неорганических материалов при установлении очага пожара / Ю.Н. Елисеев, И.Д. Чешко, В.Г. Плотников и др. – СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019. – 61 с.

11. Горбунов А.С. Разработка метода и прибора для контроля степени термических повреждений материалов на месте пожара: дис. канд. техн. наук / А.С. Горбунов. – Омск, 2023. – 187 с.

12. Исследование изменений цветовых характеристик стали при термическом воздействии / А.С. Горбунов, М.В. Елфимова, Ю.Н. Безбородов // Омский научный вестник. – 2022. – № 2 (182). – С. 119–124.

References

1. Cheshko I.D. Investigation and examination of fires / I.D. Cheshko. – St. Petersburg: St. Petersburg Institute of Fire Protection, Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, 1997. – 562 p.

2. Zenkov N.I. Building materials and their behavior in fire conditions / N.I. Zenkov // VIPTSH Ministry of Internal Affairs of the USSR. – Moscow, 1974.

3. Comprehensive Methodology for Determining the Source of a Fire / Smirnov K.P., Chesko I.D., Egorov B.S. et al. – Leningrad: LF VNIIPO Ministry of Internal Affairs of the USSR, 1987. – 114 p.

4. Pol D.K. Natural Science Forensics: (Experience in the Application of Scientific and Technical Means in the Investigation of Certain Types of Crimes) / D.K. Pol. – Moscow: Legal Literature, 1985. – 304 p.

5. Cheshko I.D. Technical Foundations of Fire Investigation: Methodological Guide / I.D. Cheshko. – Moscow: VNIIPO, 2002. – 330 p.

6. Eliseev Yu.N. Application of Instrumental Methods in investigating the consequences of vehicle fires / Yu.N. Eliseev, E.V. Kopkin, E.N. Bardulin // Risk management in the technosphere. – 2017. – P. 75.

7. Granenkov N.M. Comprehensive determination of the parameters for heating polymer materials and metal products used in railway and air transport: Methodological recommendations / N.M. Granenkov, O.O. Denisova, G.A. Dyubarov // VNIIPO MVD USSR. – Moscow, 1991.

8. Method for detecting hidden focal signs of fire: patent No. 2329077 C2 Russian Federation, IPC A62C 3/00, G01N 29/04 / I.D. Chesko, A.N. Sokolova, Yu.N. Eliseev; application No. 2006108124/12; filed 16.03.2006; published 20.07.2008.

9. Kulagin V.N. Control of the structure, mechanical properties and stress state of ferromagnetic products by the method of coercitometry / V.N. Kulagin, V.F. Matyuk // Non-destructive testing and diagnostics. – 2010. – No. 3.

10. Eliseev Yu.N. Express methods of expert research of inorganic materials in determining the source of a fire / Yu.N. Eliseev, I.D. Chesko, V.G. Plotnikov et al. – St. Petersburg: St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019. – 61 p.

11. Gorbunov, A.S. Development of a method and device for monitoring the degree of thermal damage to materials at the scene of a fire: dissertation. Cand. Tech. Sci. / A.S. Gorbunov. – Omsk, 2023. – 187 p.

12. Study of changes in the color characteristics of steel under thermal exposure / A.S. Gorbunov, M.V. Elfimova, Yu.N. Bezborodov // Omsk Scientific Bulletin. – 2022. – No. 2 (182). – P. 119–124.

Информация об авторах
А.С. Горбунов – кандидат технических наук
Information about the author
A.S. Gorbunov – Ph.D. of Engineering Sciences

Статья поступила в редакцию 20.05.2025, одобрена после рецензирования 15.06.2025, принята к публикации 18.06.2025.

The article was submitted 20.05.2025, approved after reviewing 15.06.2025, accepted for publication 18.06.2025.