

Научная статья

УДК 343.98.062

EDN WIUHNA

DOI 10.17150/2411-6122.2025.3.97-108



Криминалистическое исследование поверхностей металлических изделий, подвергшихся газовой коррозии в процессе пожара

А.А. Шеков¹, В.В. Пеньков², Н.К. Чепурных³

¹ Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железнодорожск, Российская Федерация

² Экспертно-криминалистический центр МВД России, г. Москва, Российская Федерация

³ Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск, Российская Федерация

Автор, отвечающий за переписку: А.А. Шеков, shek@inbox.ru

Аннотация. Статья посвящена изучению процессов газовой коррозии изделий из углеродистых сталей в условиях пожаров. Основное внимание уделено механизму формирования высокотемпературных окислов на поверхности углеродистых сталей и их морфологическим характеристикам, зависящим от температуры и времени нагрева. Авторы проводят обзор литературы по данной тематике и предлагают новые подходы к определению степени термического повреждения металлов путем изучения внешнего вида окисных слоев. В статье подчеркивается важность учета факторов, влияющих на цвет побежалости и формирование окалины, таких как длительность теплового воздействия и условия протекания процессов газовой коррозии. Эти данные позволяют оценивать распределение температурных полей на металлических конструкциях и устанавливать очаг пожара в процессе раскрытия и расследования преступлений.

Ключевые слова: раскрытие и расследование поджогов, пожар; металлические изделия, сталь, газовая коррозия, очаг пожара, судебная пожарно-техническая экспертиза.

Для цитирования: Шеков А.А. Влияние газовой коррозии на внешний вид поверхностей металлических изделий, подвергшихся тепловому воздействию в процессе пожара / А.А. Шеков, В.В. Пеньков, Н.К. Чепурных. — DOI 10.17150/2411-6122.2025.3.97-108. — EDN WIUHNA // Сибирские уголовно-процессуальные и криминалистические чтения. — 2025. — № 3. — С. 97–108.

Original article

Forensic Examination of Metal Surfaces Exposed to Gas Corrosion During a Fire

A.A. Shekov¹, V.V. Penkov², N.K. Chepurnykh³

¹ Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, the Russian Federation

² Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, the Russian Federation

³ East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Irkutsk, the Russian Federation

Corresponding author: A.A. Shekov, shek@inbox.ru

Abstract. The authors examine the processes of gas corrosion of carbon steel products in the conditions of a fire. Key attention is paid to the mechanism of the formation of high temperature oxides on the surface of carbon steel and to their morphological characteristics dependent on the temperature and time of heating. The authors present an overview of publications on this topic and propose new

approaches to determining the degree of thermal damage to metals by studying the external appearance of oxide layers. The article stresses the importance of taking into account the factors influencing the color of iridescence and the formation of scale, such as the duration of thermal exposure and the conditions of gas corrosion processes. These data make it possible to access the distribution of temperature fields on metal structures and to establish the source of fire in the process of solving and investigating crimes.

Keywords: investigating and solving fires, fire; metal products, steel, gas corrosion, fire source, forensic fire technical expertise.

For citation: Shekov A.A., Penkov V.V., Chepurnykh N.K. The Effect of Gas Corrosion on the Appearance of Surfaces of Metal Products Exposed to Heat During a Fire. *Sibirskie Uголовно-Processual'nye i Kriminalisticheskie Chteniya* = *Siberian Criminal Procedure and Criminalistic Readings*, 2025, no 3, pp. 97–108. (In Russian). EDN: WIUHNA. DOI: 10.17150/2411-6122.2025.3.97-108.

В условиях затяжного пожара нередко наблюдается полное выгорание органических материалов (пластмасс, древесины и др.). В этом случае особую значимость для установления очага пожара, направленности распространения горения и дальнейшего решения вопроса о причине возгорания приобретает информация о степени термического повреждения неорганических материалов, среди которых наиболее распространенными являются строительные конструкции и изделия, изготовленные из металлов и их сплавов, преимущественно из низкоуглеродистых сталей.

При нагреве металлических изделий в условиях пожара происходит активное их взаимодействие с газами, прежде всего с кислородом, в результате чего на поверхности происходят процессы окисления, называемые газовой коррозией. Температура и продолжительность нагрева существенным образом влияет на состав и толщину формирующегося оксидного слоя. Состав и толщина продуктов газовой коррозии в свою очередь определяют их внешний вид, в частности, цвет и ряд других морфологических особенностей.

Имея подробную информацию о внешнем виде высокотемпературных оксидов железа, можно оперативно без

использования специального оборудования оценить распределение температурных полей на металлических конструкциях зданий, сооружений, иных технических объектов и соответственно установить направленность распространения горения и очаг пожара.

В настоящей статье проведен анализ публикаций отечественных и зарубежных изданий, посвященных исследованию механизма формирования высокотемпературных оксидов на поверхности углеродистых сталей, а также их морфологическим особенностям в зависимости от условий протекания процессов газовой коррозии. Анализ литературных источников позволил выявить ряд дополнительных криминалистически значимых признаков для определения степени термического повреждения изделий из углеродистых сталей методом морфологического исследования их поверхностей.

В результате взаимодействия кислорода с металлом при повышенной температуре окружающей среды на поверхности металла образуется оксидная (окисная) пленка. В зависимости от толщины пленки принято разделять [1]:

- тонкие (невидимые) толщиной от мономолекулярного слоя до 40 нм;
- средние (видимые как цвета побежалости) толщиной 40–500 нм;

– толстые (видимые) толщиной более 500 нм.

Температура оказывает большое влияние как на скорость газовой коррозии, так и на состав образующихся оксидных пленок. При температуре менее 400 °С образуется Fe₂O₃, в диапазоне температур 400–575 °С в составе пленок присутствует Fe₂O₃ и Fe₃O₄, при температурах от 575 до 730 °С пленка состоит из трех оксидов FeO, Fe₃O₄ и Fe₂O₃.

Первым визуально выявляемым признаком образования оксидных пленок вследствие теплового воздействия пожара на незащищенные стальные изделия является образование так называемых цветов побежалости.

Цвета побежалости обусловлены интерференцией света в окисных пленках, при этом окраска пленок зависит от их толщины. По мнению большинства авторов цвета побежалости на углеродистых сталях наблюдаются при нагреве в диапазоне 200–300 °С. При увеличении температуры нагрева цвет поверхности меняется от светло-желтого вплоть до синего (табл. 1) [2].

Таблица 1
Влияние температур нагрева на толщину и окраску оксидного слоя на поверхности углеродистых сталей

Цвет побежалости	Толщина слоя окисла, нм	Температура нагрева, °С
светло-желтый	40	220–230
соломенно-желтый	45	230–240
оранжевый	50	240–260
красно-фиолетовый	65	260–280
синий	70	280–300

В работе А. С. Горбунова, М. В. Елфимовой, Ю. Н. Безбородова [3] было

отмечено, что толщина оксидного слоя и, соответственно, цвета побежалости на поверхности изделий из углеродистых сталей зависит не только от температуры нагрева, но и от длительности теплового воздействия (рис. 1).

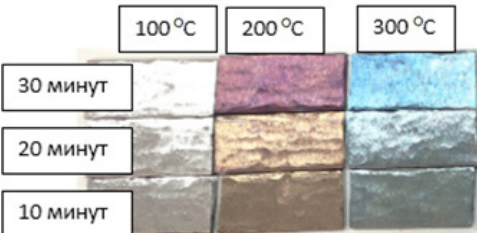


Рис. 1. Влияние длительности теплового воздействия на цвета побежалости у углеродистых сталей [3]

Анализ литературных источников показывает, что цвета побежалости могут образовываться на незащищенных стальных изделиях не только в узком температурном интервале от 200 до 300 °С, но и при более высоких температурах в случае кратковременного теплового воздействия. В качестве примера можно привести результаты исследования кинетики и термодинамики окисления железа при температуре 575°С, представленные в работе А.Г. Рябухина, Ю.Н. Теплякова и С.В. Гусевой (табл. 2) [4].

Таблица 2
Зависимость цветов побежалости на железе от времени теплового воздействия при температуре 575°С

№ п/п	t	Цвета побежалости
1	4,4	соломенный
2	7,3	красно-желтый
3	10,2	красно-коричневый
4	12,6	пурпурный
5	15,1	фиолетовый
6	17	синий

Приведенная выше информация о факторах, влияющих на цвет побежалости на поверхностях металлических изделий, наиболее актуальна в случае возникновения пожара в результате локального нагрева отдельных элементов технологического оборудования и деталей технических устройств.

При повышении температуры выше 400 °С скорость окисления возрастает, и при относительно длительном нагреве происходит образование значительного количества продуктов окисления, называемых окалиной. При температурах ниже 575°С на поверхности железной подложки обычно присутствуют два оксида: магнетит (Fe_3O_4), прилегающий к железной подложке, и гематит (Fe_2O_3), образующий внешний слой. При температурах выше 575°С образуется третья форма оксида железа вюстит (FeO), и формируется трехслойный окисел. В этом случае вюстит (FeO) примыкает к железной подложке, магнетит (Fe_3O_4) является центральным слоем, а гематит (Fe_2O_3) — внешним слоем (рис. 2).

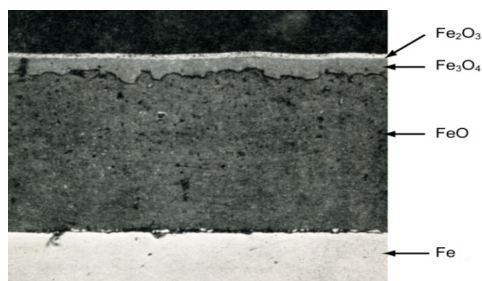


Рис. 2. Поперечный срез окалины, образовавшейся на поверхности железа на воздухе при температуре 625°С через 24 часа [5]

Скорость окисления и соответствующая толщина оксида связаны с диффузией вещества и прохождением заряда через оксидные слои и с кинетикой

реакции. Схема трехслойной модели окисления, иллюстрирующая важные зоны реакции и диффузионные процессы, показана на рис. 3. Ионы железа и электроны перемещаются от подложки к различным реакционным зонам через вакансии железа и электронные дырки соответственно.

Кислород вступает в реакцию с железом на внешней поверхности с образованием гематита (Fe_2O_3), а также диффундирует через слой гематита, вступая в реакцию с железом с образованием нового гематита на границе раздела гематит — магнетит (Fe_3O_4) и вблизи нее. Магнетит образуется в результате реакций с участием гематита, а вюстит образуется в результате реакций с участием магнетита. Также возможно внутреннее окисление, когда кислород или другие агрессивные вещества проникают глубже в оксидные слои или основной материал.

Когда оксидный слой очень тонкий, диффузия ионов и движение заряда через оксидные слои происходит быстро, ограничивающим скорость этапом является химическая кинетика на границах раздела оксидов, а зависимость между толщиной оксида и временем является линейной. Однако оксидный слой быстро становится достаточно толстым, так что диффузия является стадией, ограничивающей скорость, и общепризнано, что зависимость между толщиной оксида и временем является параболической. При постоянной температуре зависимость между толщиной оксида и временем равна:

$$x^2 = k'_p t,$$

где k'_p — константа скорости диффузии, которая соответствует уравнению Аррениуса:

$$k'_p = k_p e^{-Q/RT},$$

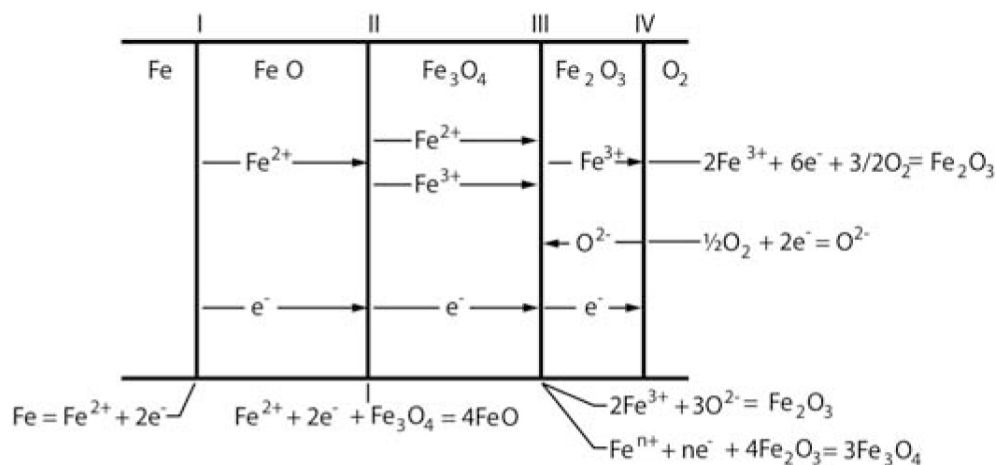


Рис. 3. Схема трехслойной модели окисления [6]

где k_p — предэкспоненциальный множитель, Q — энергия активации, R — газовая постоянная, T — температура нагрева.

Объединяя приведенные выше соотношения, очевидно, что толщина оксида зависит как от температуры, так и от времени, так что любая заданная толщина оксида может быть достигнута большим количеством комбинаций времени и температуры. Кроме того, очевидно, что температура в экспоненциальном выражении оказывает более сильное влияние на толщину оксида, чем время:

$$x = \sqrt{(k_p e^{-\frac{Q}{RT}})t}.$$

Скорости диффузии ионов железа и кислорода через различные оксидные слои значительно различаются. Самые низкие скорости диффузии наблюдаются в слое гематита, в то время как диффузия ионов железа в вюстит и магнетит более чем на порядок выше. Кроме того, диффузия существенно образом зависит от температуры. С повышением температуры скорости диффузии значительно увеличиваются.

Скорость диффузии определяет общую скорость реакций окисления. Так как скорость диффузии в слое гематита является самой низкой, то она контролирует общую скорость реакции.

На процессы диффузии также существенно образом влияет структура оксида и содержащиеся в нем примеси. Д. Каплан и соавторы [7] обнаружили, что меньший размер зерен в слое гематита усиливает диффузию вдоль границ зерен, что приводит к более высоким скоростям окисления.

Соотношение размеров рассмотренных оксидных слоев в значительной степени зависит от температуры. В работе А.Ю. Парийской и Т.Д. Тепляковой [8] представлены результаты исследования окалина с применением метода рентгенофазового анализа, формирующейся на поверхности металлических уголков, изготовленных из конструкционной углеродистой стали Ст.3.

В результате обжига образцов в муфельной печи с последующей выдержкой в течение 30 мин авторами было установлено, что увеличение температуры с 800 до 1000 °С сопровождается увеличением содержания вюstita с

7,2 % до 56,5 % и уменьшением содержания магнетита и гематита в окалине соответственно (табл. 3).

При длительном высокотемпературном воздействии окалина может состоять практически из одного вюстита (FeO). В работе Н. Биркса [8] отмечается, что при температуре 1000 °С приблизительное соотношение толщин слоев вюстита (FeO), магнетита (Fe₃O₄) и гематита (Fe₂O₃) для металлических строительных конструкций и кузовов транспортных средств составляет 95:4:1 соответственно.

Выше рассмотренные оксидные слои достаточно легко дифференцируются визуально по цвету. Вюстит и магнетит имеют черный цвет, а гематит — красно-оранжевый. В ряде случаев на стальных изделиях наблюдаются участ-

ки с оксидным слоем, имеющим цвет от красного до темно-фиолетового (рис. 4).

Появление данного оксидного слоя И.Д. Чешко, А.О. Антонов и Е.А. Чистов [9] объясняют модификацией оксида железа (III) в процессе развития пожара. Оксид железа (III) (сесквиоксид) существует в 3-х полиморфных модификациях: α-Fe₂O₃ — гематит, γ-Fe₂O₃ — маггемит, оксимагнетит, δ-Fe₂O₃ — оксид с тригональной кристаллической решеткой. При температуре 677°С α-Fe₂O₃ переходит в модификацию γ-Fe₂O₃, при температуре 777°С γ-Fe₂O₃ — в форму δ-Fe₂O₃. По мнению авторов [9], гематит и маггемит имеют кубическую кристаллическую решетку и рыже-коричневый цвет (цвет ржавчины), δ-Fe₂O₃ — тригональную решетку и цвет от темно-

Таблица 3

Влияние температуры на содержание вюстита в окалине

№ п/п	Температура, °С	Толщина окалины, мм	Содержание вюстита, %
1	800	0,12	7,2
2	850	0,20	7,46
3	900	0,21	27,1
4	950	0,32	37,04
5	1000	0,38	56,47



Рис. 4. Боковая стенка холодильника с внутренней стороны [9]

красного до черно-фиолетового. Таким образом, δ -форма оксида железа (III) является наиболее высокотемпературной, и ее образование на поверхности стального изделия в виде зон «предокалины» (δ -Fe₂O₃) красно-фиолетового цвета предшествует интенсивному образованию окалины черного цвета, содержащей вюстит, при температурах 800–1000 °С.

Представленная информация и данные о процессах, протекающих на поверхности изделий из углеродистых сталей в случае длительного нагрева при температурах более 400 °С, свидетельствуют о том, что на основании цвета и толщины окисных слоев может быть проведена оценка температуры и времени нагрева. Так, например, если на поверхности стальной конструкции либо элементах кузова автотранспортного средства выявлен достаточно толстый слой окалины черного цвета, то это указывает на высокую температуру нагрева более 730 °С. При длительном высокотемпературном воздействии такой слой окалины может отслаиваться от поверхности металла, иметь дефекты в виде трещин, пор и вздутий (рис. 5). Тонкие слои окалины красно-оранжевого цвета обычно свидетельствуют о более низких температурах теплового воздействия, не превышающих 730 °С.

В связи со склонностью металлов к химическому и электрохимическому взаимодействию с коррозионной средой на поверхность металлических изделий перед эксплуатацией, как правило, наносятся защитные покрытия, в частности лакокрасочные (ЛКП) или металлизированные. Поэтому при оценке температуры и продолжительности нагрева следует учитывать процессы разрушения защитных покрытий.

Термическое воздействие на ЛКП приводит к постепенному разложению (обугливанию) и выгоранию его органической составляющей. Процесс термического разложения начинается при температурах 150–200 °С и сопровождается изменением цвета покрытия.

При температурах 400–450 °С происходит полное обугливание (карбонизация) органических компонентов покрытия, следствием чего является его существенное потемнение (за исключением ЛКП темных цветов). При дальнейшем повышении температуры начинается процесс выгорания карбонизированного остатка ЛКП до полного его исчезновения. В большинстве случаев полное выгорание органических соединений наблюдается при температурах 500–600 °С. При данных температурах появляются незащищенные участки металла, на которых железо в условиях повышенных температур на-



Рис. 5. Отслоение окалины на металлическом уголке [10]

чинает активно взаимодействовать с коррозионной средой. Дальнейшее развитие пожара приводит к протеканию на поверхности металла физико-химические процессов и формированию визуальных признаков теплового воздействия, рассмотренных выше.

В качестве защитных металлизированных покрытий, как правило, применяются тонкие слои металлов, в меньшей степени подвергающихся коррозии по сравнению с защищаемым металлом [11]. Наиболее распространенным способом защиты металла от атмосферной коррозии является цинкование. Использование цинковых покрытий в отличие от ЛКП, содержащих органические пленкообразующие вещества, сопровождается изменением динамики газовой коррозии металла в более широком диапазоне температур.

При кратковременном воздействии в течение 15 минут изменение цвета оцинкованной стали наблюдается при температуре 900 °С, разрушение цинкового покрытия и окисление стали – при 1000 °С.

При обжиге оцинкованной стали в течение 1 ч (рис. 6) потемнение цинкового слоя происходит в интервале температур 415–450 °С. В интервале 525–600 °С поверхность приобретает однородный темно-серый цвет.

При температуре 750 °С на поверхности появляются небольшие пятна оксида железа черного цвета. Слой оксида крошится и легко удаляется. При температуре 900 °С диаметр пятна оксида железа увеличивается, слой цинка полностью окисляется и приобретает темно-желтый цвет. Оксиды как железа, так и цинка крошатся и легко уда-

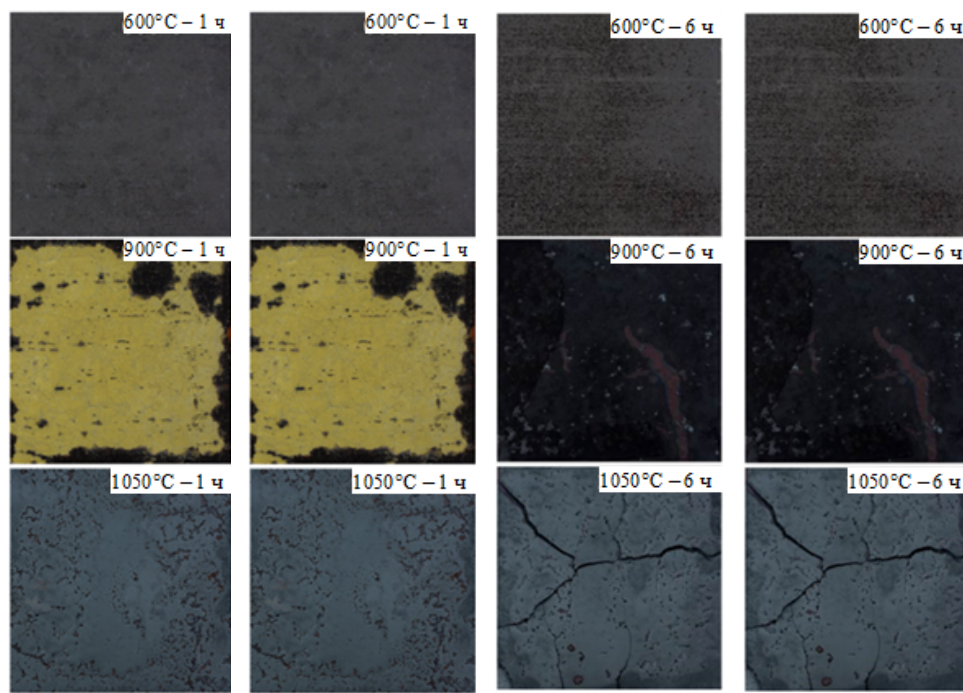


Рис. 6. Изменение цвета оцинкованной стали при времени теплового воздействия 1 ч и 6 ч [12]

ляются. При температуре 1050°С образцы деформируются и покрываются толстым слоем оксида железа, который отслаивается от поверхности.

Увеличение времени обжига оцинкованной стали до 6 ч приводит к проявлению аналогичных признаков термических повреждений на 100°С раньше, чем при выдержке в течение 1 ч (рис. 6) [12].

Выявленные особенности протекания газовой коррозии на поверхности оцинкованных металлических изделий согласуются с данными, представленными в работе С. Ф. Малышевой и Г.В. Плотниковой [13]. В результате обжига в течение 15 мин элементов оцинкованного каркаса гипсокартона, авторами установлена зависимость цвета металлических объектов от температуры (табл. 4).

Анализ представленных в работе фотографий показывает, что при температуре нагрева 1000°С цинковое защитное покрытие разрушается, а поверхность образца приобретает темно-серый цвет.

В результате анализа публикаций, посвященных исследованию механизма формирования высокотемпературных оксидов на поверхности углеродистых сталей, было установлено:

– процессы газовой коррозии на поверхности изделий из углеродистых ста-

лей оказывают существенное влияние на формирование следов теплового воздействия и, соответственно, на установление очага пожара и признаков направленности распространения горения;

– толщина и состав оксидных слоев зависят не только от температуры, но и от времени нагрева. Эти параметры влияют на внешний вид оксидных слоев, включая их цвет и морфологические характеристики;

– цвета побежалости могут образовываться на незащищенных поверхностях не только в узком температурном интервале от 200 до 300 °С, но и при более высоких температурах в случае кратковременного теплового воздействия;

– при оценке температуры и продолжительности нагрева следует учитывать наличие защитных покрытий (ЛКП, металлизированных покрытий)

Для выявления следов газовой коррозии на поверхности металлических изделий и правильной интерпретации результатов их исследования необходимо привлечение к осмотру места происшествия специалиста (эксперта), обладающего специальными познаниями в металловедении, процессах горения, термодинамике и других смежных областях науки. Это обусловлено влиянием на механизм и, соответственно, скорость газовой коррозии металлов и сплавов различных внешних (состав

Таблица 4

Зависимость цвета поверхности оцинкованных элементов металлического каркаса гипсокартона от температуры нагрева

№ п/п	Температура нагрева, °С	Цвет поверхности образца
1	20–400	без изменений
2	500–600	темно-серый
3	700–800	светло-желтый
4	900	темно-желтый
5	1000	белый

и давление газовой среды, скорость ее движения, температура, время теплового воздействия, динамика нагрева) и внутренних (элементный и фазовый состав сплава, механические напряжения, деформации) факторов.

Список использованной литературы

1. Шлугер М.А. Коррозия и защита металлов / М.А. Шлугер, Ф.Ф. Ажогин, Е.А. Ефимов. — Москва : Металлургия, 1981. — 216 с.
2. Осмотр места пожара : метод. пособие / И.Д. Чешко, Н.В. Юн, В.Г. Плотников [и др.]. — Москва : ВНИИПО, 2004. — 503 с.
3. Горбунов А.С. Исследование изменений цветовых характеристик стали при термическом воздействии / А.С. Горбунов, М.В. Елфимова, Ю.Н. Безбородов. — DOI 10.25206/1813-8225-2022-182-119-124. — EDN ZVOHKS // Омский научный вестник. — 2022. — № 2 (182). — С. 119–124.
4. Рябухин А.Г. Окисление железа на воздухе при температуре $575 \pm 0,2^\circ\text{C}$ (точка Шадрона) / А.Г. Рябухин, Ю.Н. Тепляков, С.В. Гусева. — EDN HBNIBJ // Известия Челябинского научного центра УРО РАН. — 2003. — № 1 (18). — С. 31–35.
5. Kubaschewski O. Oxidation of Metals and Alloys / O. Kubaschewski, B.E. Hopkins. — New York : Academic Press, 1962. — 319 p.
6. Colwell J.D. A Review of Oxidation on Steel Surfaces in the Context of Fire Investigations / J.D. Colwell, D. Babic. — DOI 10.4271/2012-01-0990 // SAE International Journal of Passenger Cars — Mechanical Systems. — 2012. — no. 5(2). — P. 1002–1015.
7. Oxidation of Fe-C Alloys at 500°C / D. Caplan, G.I. Sproule, R.J. Hussey, M.J. Graham. — DOI 10.1007/BF00609975 // Oxidation of Metals. — 1978. — No. 12(1). — P. 67–82.
8. Birks N. Introduction to the High Temperature Oxidation of Metals / N. Birks, G.H. Meier, F.S. Pettit. — 2nd ed. — Cambridge : Cambridge University Press, 2006. — 338 p. — DOI 10.1017/CBO9781139163903.
9. Чешко И.Д. Об оксидных слоях, образующихся на стали при пожаре / И.Д. Чешко, А.О. Антонов, Е.А. Чистов // Расследование пожаров : сб. статей. — Санкт-Петербург, 2014. — Т. 4. — С. 82–84.
10. Парийская А.Ю. Исследование окалины, образовавшейся на поверхности стальных конструкций после пожара, для целей пожарно-технических экспертиз / А.Ю. Парийская, Т.Д. Теплякова. — EDN QHBREI // Modern Science. — 2022. — № 6–4. — С. 216–221.
11. Использование метода коэрцитиметрии при исследовании холоднодеформированных стальных изделий для установления очага пожара / М.Ю. Гераськин, Л.В. Дашко, Г.В. Плотникова, А.А. Шеков. — DOI 10.25724/VAMVD.HCDE. — EDN LUJRSW // Судебная экспертиза. — 2019. — № 2 (58). — С. 80–91.
12. Metallurgical Analysis as a Useful Method for Fire Investigation: the Case of Galvanized Steel Sheets / A. Casaroli, M. Boniardi, R. Gerosa [et al.]. — DOI 10.1007/s10694-021-01158-2 // Fire Technology. — 2022. — Vol. 58. — P. 553–570.
13. Малышева С.Ф. Исследование каркаса гипсокартона магнитным методом при производстве пожарно-технической экспертизы / С.Ф. Малышева, Г.В. Плотникова. — EDN ZBAXOV // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. — 2017. — № 2 (81). — С. 114–124.

References

1. Shluger M.A., Azhogin F.F., Efimov E.A. *Corrosion and Protection of Metals*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 216 p.
2. Cheshko I.D., Yun N.V., Plotnikov V.G., Antonov A.O., Voronov S.P., Pavlov E.YU., Tolstykh V.I. *Inspection of the Fire Site*. Moscow, VNIPO Publ., 2004. 503 p.
3. Gorbunov A.C., Elfimova M.V., Bezborodov Yu.N. Study of Changes in Color Characteristics of Steel under Thermal Exposure. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2022, no. 2, pp. 119–124. (In Russian). EDN: ZVOHKS. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-119-124.

4. Ryabukhin A.G., Teplyakov Yu.N., Guseva S.V. Oxidization of Iron in Air at the Temperature of $575 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ (point of Shadron). *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra URO RAN = News of the Chelyabinsk Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2003, no. 1, pp. 31–35. (In Russian). EDN: HBNIBJ.

5. Kubaschewski O., Hopkins B.E. *Oxidation of Metals and Alloys*. New York, Academic Press, 1962. 319 p.

6. Colwell J.D., Babic D. A Review of Oxidation on Steel Surfaces in the Context of Fire Investigations. *SAE International Journal of Passenger Cars — Mechanical Systems*, 2012, no. 5(2), pp. 1002–1015. DOI: 10.4271/2012-01-0990.

7. Caplan D., Sproul G.I., Hussey R.J., Graham M.J. Oxidation of Fe-C Alloys at 500°C . *Oxidation of Metals*, 1978, no. 12(1), pp. 67–82. DOI: 10.1007/BF00609975.

8. Birks N. *Introduction to the High Temperature Oxidation of Metals*. 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 2006. 338 p. DOI: 10.1017/CBO9781139163903.

9. Cheshko I.D., Antonov A.O., Chistov E.A. *On Oxide Layers Forming on Steel During Fires. Collected Papers*. Saint Petersburg, 2014, vol. 4, pp. 82–84. (In Russian).

10. Pariiskaya A.Yu., Teplyakova T.D. The Study of Calces Formed on the Surface of Steel Constructions after a Fire for Fire-technical Examinations. *Modern Science*, 2022, no. 6–4, pp. 216–221. (In Russian). EDN: QHBREI.

11. Geras'kin M.Yu.E., Dashko L.V.E., Plotnikova G.V., Shekov A.A. Use of the Method of Coertsitometry While Examining Steel Products Deformed by Cold to Establish the Fire Source. *Sudebnaya ekspertiza = Forensic Examination*, 2019, no. 2, pp. 80–91. (In Russian). EDN: LU-JRSW. DOI: 10.25724/VAMVD.HCDE.

12. Casaroli A., Boniardi M., Gerosa R. [et al.]. Metallurgical Analysis as a Useful Method for Fire Investigation: the Case of Galvanized Steel Sheets. *Fire Technology*, 2022, vol. 58, pp. 553–570. DOI: 10.1007/s10694-021-01158-2.

13. Malysheva S.F., Plotnikova G.V. The Test of Gypsum Board Frame by Magnetic Method in the Performance of Fire-Technical Examination. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo instituta MVD Rossii = Vestnik of the Eastern Siberia Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation*, 2017, no. 2, pp. 114–124. (In Russian). EDN: ZBAXOV.

Информация об авторах

Шеков Анатолий Александрович — кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры химии и процессов горения, Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железногорск, Российская Федерация, shek@inbox.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2111-718X>, SPIN-код: 8439-1810, AuthorID РИНЦ: 673937.

Пеньков Валерий Владимирович — старший научный сотрудник, отдел научных исследований по специальным видам экспертиз и экспертно-криминалистического обеспечения противодействия наркопреступности управления научных исследований, Экспертно-криминалистический центр Министерства внутренних дел Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация, valerii2011@inbox.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-6099-1043>, SPIN-код: 8378-9150, AuthorID РИНЦ: 1045483.

Чепурных Наталия Камировна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судебно-экспертной деятельности, Восточно-Сибирский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, г. Иркутск, Российская Федерация, leonata3@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0005-0361-2381>, SPIN-код: 7445-3319, AuthorID РИНЦ: 769181.

Authors Information

Shekov, Anatoly A. — Ph.D. in Chemistry, Ass. Professor, Department of Chemistry and Combustion Processes, Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zhelezno-gorsk, the Russian Federation, shek@inbox.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2111-718X>, SPIN-Code: 8439-1810, AuthorID RSCI: 673937.

Penkov, Valery V. — Senior Researcher, Department of Scientific Research on Special Types of Expertise and Forensic Support for Combating Drug Crime of the Department of

Scientific Research, Forensic Expert Center of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Moscow, the Russian Federation, valerii2011@inbox.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-6099-1043>, SPIN-Code: 8378-9150, AuthorID RSCI: 1045483.

Chepurnykh, Natalia K. — Ph.D. in Technical Sciences, Ass. Professor, Department of Forensic Expertise, East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Irkutsk, the Russian Federation, leonata3@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0005-0361-2381>, SPIN-Code: 7445-3319, AuthorID RSCI: 769181.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 30.03.2025

Одобрена после рецензирования / Approved after reviewing 22.04.2025

Принята к публикации / Accepted 19.09.2025

Дата онлайн-размещения / Available online 16.10.2025