

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В статье приведены результаты исследований образцов стали при термическом воздействии путем измерения цветовых характеристик с использованием модели разложения цвета на RGB составляющие. Полученные данные могут быть использованы при расследовании пожаров на объектах, выполненных из стальных строительных конструкций, и предметах, выполненных из стали. Таким образом специалист сможет подтвердить свои выводы по поводу установления очага пожара и путей его распространения.

Ключевые слова: RGB, термические повреждения стали, цветовые характеристики, расследование пожаров.

Введение. Согласно статистическим данным, в России произошло 439306 пожаров в 2020 году и 390411 пожаров в 2021 году. За последние два года в огне погибло 16726 человек [1, 2]. Пожары вредят не только обществу и экономике, но и экологии в целом. Пожары возникают по различным причинам, но в большинстве случаев в их возникновении виноваты действия или бездействия человека. Таким образом, существует ряд преступлений, связанных с пожарами. Также пожар является отличным орудием сокрытия следов других преступлений. При расследовании преступлений, связанных с пожарами, имеется ряд трудностей. Это установление первоначального места возникновения горения (очага пожара), а также причины его возникновения. Обстановка в результате пожара уничтожается или повреждается, что осложняет восстановление следовой картины при расследовании.

Необходимо отметить, что в России становится все более важно установление истинной причины и виновников пожара в связи с наличием частной собственности, системы страхования и совершенствования судебной системы в рамках гражданских дел. По этим причинам специалистам, проводящим расследование пожаров, необходимо подтверждать свои мысли и соображения объективными фактами. Специалисты не в полной мере используют на месте пожара весь технический арсенал, а основываются на органолептических методах и личном жизненном опыте, что приводит к ошибкам и недоверности доказательств.

Термическое воздействие на материалы приводит к изменению физических и химических свойств, характерных для каждого типа материала или вещества. Для описания и сравнения данных изменений необходима величина, называемая степенью термических повреждений. Данная величина

может быть описана в виде качественной или количественной оценки.

Степень термического повреждения любого материала определяется двумя основными параметрами: температурой и длительностью нагрева [3].

Сталь является сплавом железа и углерода (содержание углерода до 2,14 %) с примесями других элементов [4]. Стали широко используются в строительстве, машиностроении и в других областях, где необходимы свойства в виде прочности, твердости, пластичности, упругости и выносливости. Для исследования можно разделить стали на две группы: горячекатаные и холоднодеформированные. Основное отличие в термической обработке при производстве деталей и конструкций. Данное обстоятельство накладывает ограничения на температурные пределы для исследования после пожара.

Термическое воздействие на сталь в ходе пожара приводит к изменениям в структуре, свойствах, форме и внешнем виде. Деформация конструкций из стали на пожаре связана с малым пределом огнестойкости. При нагреве выше 350 °С пластичность стальной конструкции увеличивается. При большем нагреве происходят значительные деформации до полного обрушения. Оценка величины и направленности деформации дает информацию о направленности и интенсивности теплового воздействия.

По толщине образования высокотемпературных окислов (окалины) на поверхности стали с помощью замера магнитного поля вихревых токов возможно оценить температуру воздействия.

С помощью измерения твердости металла по Бринеллю или Виккерсу можно оценить степень отжига стали.

Наиболее удобным неразрушающим методом определения относительной степени рекристаллизации холоднодеформированных изделий в пожарно-криминалистических исследованиях следует

считать магнитный метод, основанный на измерении коэрцитивной силы (или тока размагничивания предварительно намагниченного изделия) [3].

Изменение цвета поверхности является одним из признаков, по которому можно судить о термическом воздействии на сталь.

При термическом воздействии на поверхности стали образуется слой оксидов. В температурных пределах 200–400 °С образуется тонкий слой оксида железа. При увеличении температуры толщина оксидной пленки увеличивается. Из-за интерференции белого света в тонких пленках оксида, на отражающей поверхности стали, последовательно возникают условия гашения лучей определенной длины волны. Из специальной литературы известно, что для углеродистой стали характерны следующие переходы цвета: соломенный (220 °С), коричневый (240 °С), пурпурный (260 °С), синий (300 °С), светло-серый (330–350 °С) [5, 6]. Данная особенность поведения металла называется «цвета побежалости». При более высоких температурах от 700 °С на поверхности металла образуется окалина. Окалина состоит из трех слоев: вустит (FeO), гематит (Fe_2O_3) и магнетит (Fe_3O_4). Чем больше на поверхности металла вустита, тем окалина черней, а значит, температура и длительность нагрева больше. Окалина рыжего и коричневого цвета образуется при более низких температурах 500–700 °С [7, 6]. Таким образом, по изменению цвета стали на пожаре можно определить зоны наибольших термических повреждений, в дальнейшем очаг пожара и пути его распространения.

Для количественной оценки цвета можно использовать различные колориметры или атласы цвета.

Наиболее распространёнными атласами цвета являются цветные атласы Манселла, Pantone, ICI. Цвет объекта сравнивается с помощью визуального метода с образцом из атласа, в котором указаны характеристики данного цвета. Таким образом, данный метод помогает субъективно оценить цветные характеристики, что может привести к ошибкам.

Колориметры — это оптические приборы, которые предназначены для определения и сравнения цвета. Данные приборы используют цветные модели (пространства) для описания цвета.

Цветовые пространства используют для идентификации цвета, воспроизведения в технике (компьютерной и телевизионной), а также для их обработки. Существуют различные цветные модели XYZ, CMYK, RGB, LAB и множество других. Каждая модель создана для определенных целей и области применения.

Для удобства обработки и воспроизведения цветов в компьютерной технике используют систему RGB. Данная модель является дискретной, и общее количество цветов, задаваемых в ней, равно 16777216. Данная модель легко переводится с помощью программ и алгоритмов в другие существующие модели.

В данной работе был использован прибор контроля степени термических повреждений путем цветоизмерения, основанный на датчике цвета TCS3472 [8].

Данный прибор позволяет определить цвет в виде математической модели RGB, соответствующей цветовому кубу с максимальными значениями сторон, равными 255.

Таким образом, задачей данной работы является установление зависимостей показателей цвето-

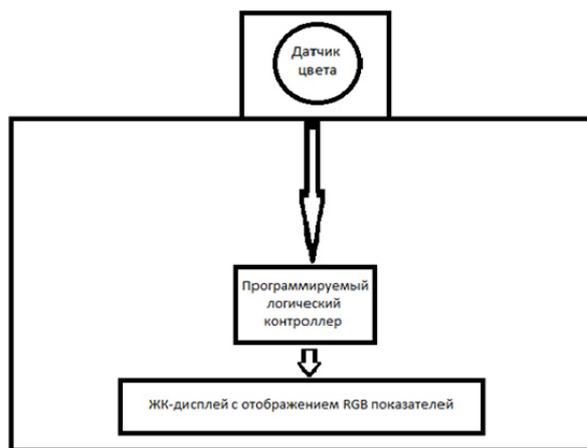


Рис. 1. Принципиальная схема прибора

вых характеристик образцов стали от температуры и длительности воздействия.

Лабораторные исследования. Для исследований было подготовлено 24 образца из стальной горячекатаной пластины (ГОСТ 19903-2015 [9]) в виде равных частей с размерами 80×40×5 мм, отклонение от размеров по длине и ширине не превышает 5 мм. Размеры образцов были обусловлены ограничениями оборудования — внутреннего пространства муфельной печи LOIP LF 7/13-G1 с цифровым терморегулятором.

Муфельная печь LOIP LF 7/13-G1 предназначена для проведения нагрева, закалки, обжига различных материалов в воздушной среде при температуре до +1300 °С. Размеры камеры 200×110×285 мм. Мощность 3300 Вт, точность поддержания температуры ±10 °С [10].

Образцы стали без видимых повреждений и загрязнений. Перед исследованием образцы были предварительно обработаны на шлифовальном станке для снятия окислов до металлического блеска.

План проведения эксперимента предусматривал 8 серий исследований (по 3 образца в каждой) и включал нагревание образцов от 100 °С до 800 °С (с шагом в 100 °С). В нагретую муфельную печь до определенной температуры для каждой серии помещали три исследуемых образца за промежуток времени, не превышающий 3 сек. Образцы из одной серии (при определенной температуре) выдерживали в течение 10, 20 и 30 минут соответственно, извлекая по одному образцу из муфельной печи при достижении временного промежутка. Охлаждение образцов проводилось при условиях окружающей среды в помещении естественным путем.

Температурные пределы исследования были выбраны исходя из физических свойств стали, а время — от средних промежутков времени развития и тушения пожара.

Измерения цветовых характеристик проводилось разработанным прибором контроля степени термических повреждений материалов путем цветоизмерения [8].

Прибор был предварительно откалиброван по белому цвету. Принципиальная схема прибора представлена на рис. 1.

Принцип работы прибора связан с преобразованием отраженного света от объекта в электрический сигнал по каналам R (красный цвет), G (зелёный цвет), B (синий цвет), C (количество отраженного света).

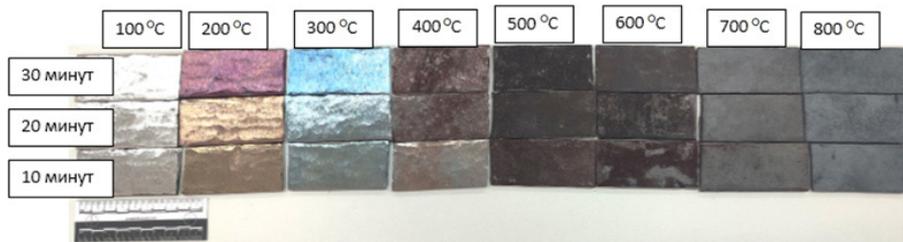


Рис. 2. Вид образцов стали после термического воздействия

Для описания изменений цветовых характеристик дополнительно вводится показатель модуля цветового вектора (1).

$$|Ц| = \sqrt{R^2 + G^2 + B^2}, \quad (1)$$

где $|Ц|$ — значение модуля цветового вектора; R — значение от 0 до 255 красного цвета; G — значение от 0 до 255 зеленого цвета; B — значение от 0 до 255 синего цвета.

Датчик цвета представляет собой программируемый преобразователь света в цифровой сигнал (к примеру, TCS3472), который состоит из фотодиодов и преобразователей тока в цифровой сигнал на одной монолитной CMOS — интегральной схеме. Выходной сигнал представляет собой прямоугольную волну с частотой, прямо пропорциональной интенсивности света (освещенности). Цифровые входы и цифровой выход обеспечивают прямой интерфейс с микроконтроллером или другой логической схемой.

Светоцифровой преобразователь TCS3472 содержит матрицу из 12 фотодиодов, четыре аналого-цифровых преобразователя (АЦП), регистры данных, конечный автомат и I2C интерфейс. Матрица 3×4 фотодиодов состоит из фотодиодов с красной, зеленой, синей фильтрацией и прозрачных (без фильтров) фотодиодов. Кроме того, фотодиоды покрыты фильтром, блокирующим ИК-излучение. Вся внутренняя синхронизация, а также состояние ожидания с низким энергопотреблением контролируются конечным автоматом.

Передача данных TCS3472 осуществляется быстро, до 400 кГц, двухпроводной последовательной шине I²C. Промышленный стандарт I²C упрощает прямое подключение к микроконтроллерам и встроенным процессорам.

Наличие логического программируемого контроллера позволяет минимизировать погрешность измерения путем программного усреднения результатов в каждом канале по выборке, состоящей из нескольких десятков циклов измерений.

Результаты исследований. На рис. 2 представлен внешний вид образцов после лабораторных исследований. По горизонтали, начиная с нижней строки, временные промежутки термического воздействия (10, 20, 30 минут), по вертикали в рядах температуры воздействия от 200 до 900 °С. Так, с помощью визуального осмотра выявлено, что изменение цвета стали начинает происходить при температурах от 200 °С серый цвет меняется на соломенный, бордовый, синий, а при температурах выше 500 °С сталь изменяет свой цвет от темно-коричневого до темно-серого. Также видно, что изменение внешнего вида зависит от времени и температуры.

В табл. 1 представлены результаты измерений цветовых характеристик образцов разрабо-

Таблица 1
Средние значения измерений
цветовых характеристик образцов из стали

№ образца	Температура, °С	Время, минут	R	G	B	C	Модуль цветового вектора
1	100	10	90	90	90	410	156
2	200	10	79	59	49	296	110
3	300	10	50	54	51	254	90
4	400	10	48	41	37	201	73
5	500	10	18	17	15	84	29
6	600	10	15	14	13	67	24
7	700	10	24	25	24	119	42
8	800	10	34	38	38	182	64
9	100	20	90	90	90	410	156
10	200	20	64	46	39	260	88
11	300	20	51	56	55	263	94
12	400	20	30	26	22	125	45
13	500	20	16	17	15	81	28
14	600	20	13	14	13	68	23
15	700	20	25	27	26	129	45
16	800	20	34	34	34	160	64
17	100	30	90	90	90	410	156
18	200	30	32	24	26	134	48
19	300	30	31	41	46	192	69
20	400	30	23	21	19	103	36
21	500	30	13	14	13	68	23
22	600	30	17	18	17	87	30
23	700	30	28	30	30	143	51
24	800	30	34	36	36	169	64

танным прибором для оценки термических повреждений после статистической обработки по ГОСТ Р 50779.22-2005 [11]. Измерения проводились на поверхности образцов путем замера в пяти точках на каждом образце. Достоверность результатов измерения цветовых характеристик оценивалась при трехкратном повторении серий на каждом образце. Средние значения измерений определяли как среднее арифметическое из полученных результатов. Для вычисления среднего значения для каждого образца, среднего квадратического отклонения, доверительных интервалов, средней относительной погрешности измерений использовалось программное обеспечение Microsoft Excel.

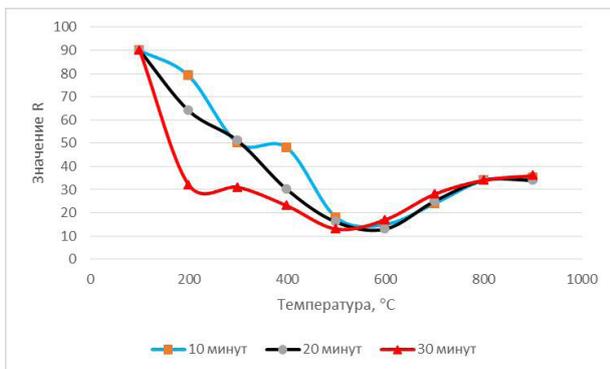


Рис. 3. Графики зависимости значений R (красный цвет) от температуры и времени воздействия на образцы стали

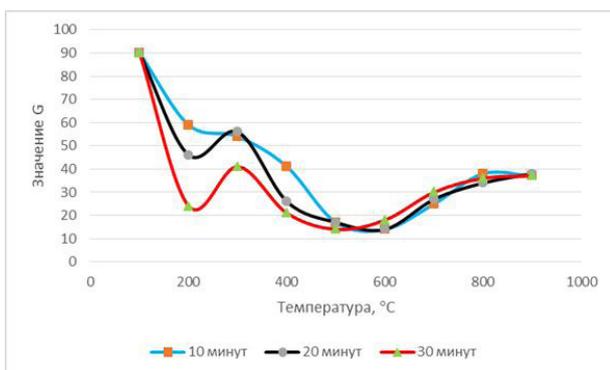


Рис. 4. Графики зависимости значений G (зеленый цвет) от температуры и времени воздействия на образцы стали

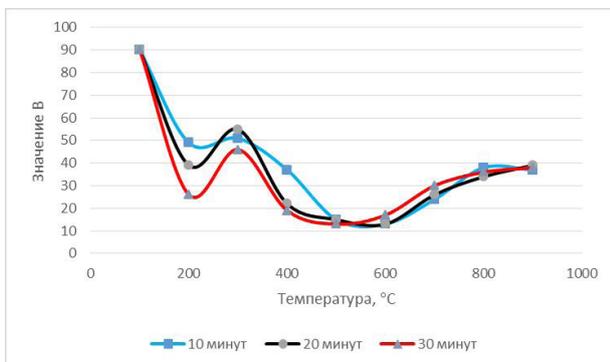


Рис. 5. Графики зависимости значений B (синий цвет) от температуры и времени воздействия на образцы стали

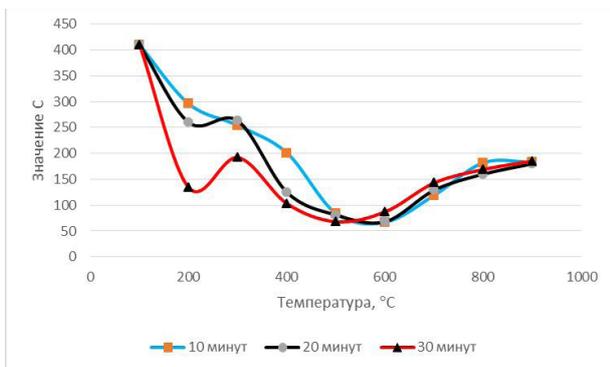


Рис. 6. Графики зависимости значений C (отраженный свет) от температуры и времени воздействия на образцы стали

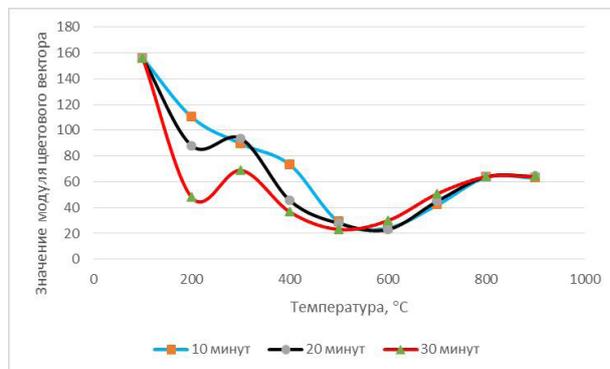


Рис. 7. Графики зависимости значений модуля цветового вектора от температуры и времени воздействия на образцы стали

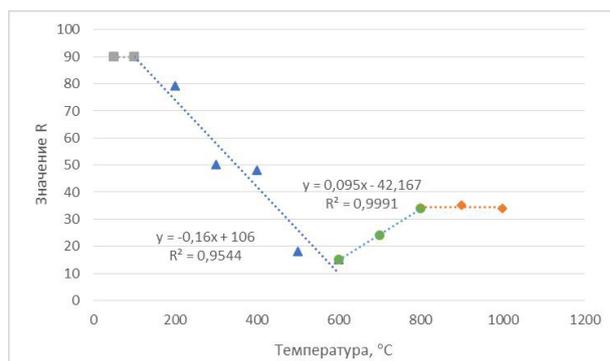


Рис. 8. График зависимости значений R от температуры для 10 минут воздействия на образцы стали

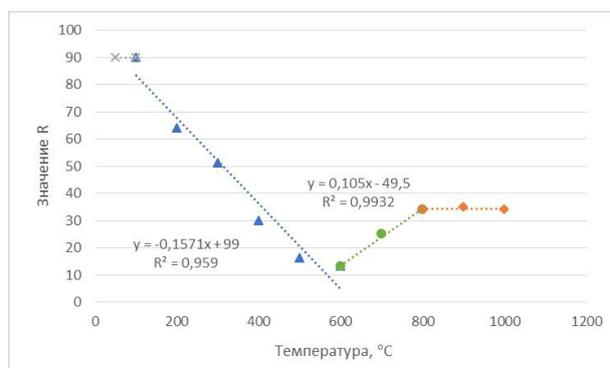


Рис. 9. График зависимости значений R от температуры для 20 минут воздействия на образцы стали

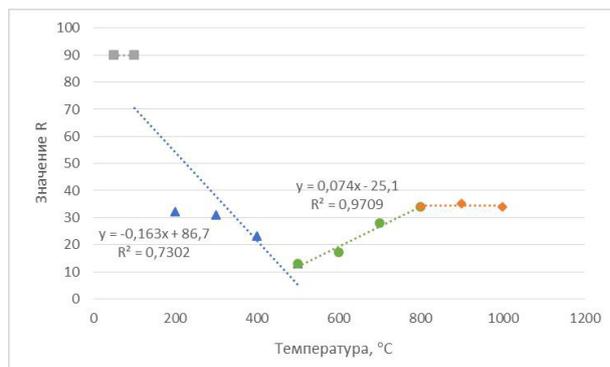


Рис. 10. График зависимости значений R от температуры для 30 минут воздействия на образцы стали

На рис. 3–7 представлены сводные графики зависимости цветовых характеристик от температуры и времени воздействия на образцы стали.

Из рис. 3–7 видно, что при увеличении температуры значения показателей R , G , B , C , модуль цветового вектора увеличиваются от 600 °С на всех временных промежутках температурного воздействия. Полученные данные совпадают с процессом образования окалины на поверхности углеродистой стали. В промежутке от 200 до 500 °С наблюдаются процессы образования «цветов побежалости» разных оттенков.

Далее графики были разбиты на отрезки для описания происходящих процессов. За основу были взяты графики показателя красного цвета R , так как их значения на промежутке от 200 до 500 °С только уменьшаются. Условно графики можно разделить на четыре отрезка.

На рис. 8–10 приведены уравнения зависимости значений R (красный цвет) от температуры, построенные путем аппроксимации методом наименьших квадратов с помощью Microsoft Excel. Из графиков и уравнений видно, что до температуры 100 °С изменений цветовых характеристик не происходит. При температурах от 100 до 600 °С значение R при увеличении температуры уменьшается, далее от 600 до 800 °С происходит увеличение значения R , за исключением графика 30 минут воздействия: рост начинается с 500 °С. При температурах выше 800 °С изменения значений R не происходит.

Первый отрезок до 100 °С соответствует термически не поврежденной холоднодеформированной стали.

На отрезке от 100 °С до 600 °С образуется тонкая пленка оксидов железа, которая формирует «цвета побежалости». Наименьшему значению R (составляющей красного цвета) соответствуют наибольшие термические повреждения для холоднодеформированной стали.

На отрезке от 600 °С начинают образовываться оксиды железа в виде окалины. При увеличении значений R , а также других показателей цветовых характеристик RGB , степень термических повреждений увеличивается. Данное условие можно использовать как для горячекатаных, так и для холоднодеформированных сталей. Увеличение значений цветовых характеристик происходит до температуры 800 °С, далее значения цвета остаются на одном уровне.

Полученные данные совпадают с температурными пределами образования «цветов побежалости» и окалины.

Данный метод оценки степени термических повреждений стали с помощью цветоизмерения позволяет построить карту распределения термических зон после пожара.

Полученные значения наносят на схему (помещения, конструкции, предмета), объединяя близкие значения в интервалы, и выделяют зоны, ограниченные изолиниями.

Для сравнительного анализа степени термических повреждений конструкции и материалы должны быть однородны и идентичны.

При анализе полученной информации с целью установления очага пожара необходимо помнить, что данным методом определяется зона с максимальными термическими поражениями. Образование данной зоны обусловлено действием двух факторов: температурой и длительностью горения, причем температура оказывает существенно боль-

шее влияние, чем длительность. По данной причине при установлении очага пожара необходимо учитывать пожарную нагрузку, воздухообмен в помещении, а также действия пожарных подразделений при тушении пожара [3].

Закключение. Полученные данные совпадают с физическими и химическими процессами, происходящими на поверхности стали при термическом воздействии. Таким образом, имеется возможность решения задачи определения и сравнения степени термического повреждения строительных конструкций и предметов из стали разработанным инструментальным методом и прибором по изменениям цветовых характеристик RGB .

Библиографический список

1. Полевин П. В., Чебуханов М. А., Козлов А. А. [и др.]. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году: стат. сб. / под общ. ред. Д. М. Гордиенко. Москва: ВНИИПО, 2021. 112 с.
2. Статистические данные по пожарам за 2020 и 2021 годы на территории РФ / МЧС России. URL: <https://www.mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/> (дата обращения: 10.02.2021).
3. Чешко И. Д. Расследование и экспертиза пожаров. 2-е изд., стер. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПБ МВД России, 1997. 562 с.
4. Краткий справочник металлурга. Гл. VIII. Механические свойства сталей / Под ред. Адрианова В. П. Москва: Металлургиздат, 1960. С. 325–347.
5. Серебряков В. Г., Таубкин И. С. К методике определения температуры и продолжительности нагрева изделий из металла // Экспертная практика и новые методы исследования. Экспресс-информ. Москва: ВНИИСЭ, 1979. Вып. 19. С. 1–7.
6. Чешко И. Д., Антонов А. О., Чистов Е. А. Об оксидных слоях, образующихся на стали при пожаре // Расследование пожаров: сб. ст. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та ГПС МЧС России, 2014. С. 82–84.
7. Тихомиров В. И. Окажинообразование на железе и железных сплавах при высоких температурах: дис. ... д-ра хим. наук. Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1959.
8. Горбунов А. С., Слепов А. Н., Пожаркова И. Н. Возможность применения оптического прибора для определения цвета в экспертизе пожаров // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: сб. тр. конф. Железногорск, 2021. С. 616–619.
9. ГОСТ 19903-2015. Прокат листовой горячекатаный. Введ. 2016–09–01. Москва: Стандартинформ, 2016. 15 с.
10. Паспорт на печи муфельные серии LOIP LF. URL: <http://labcompany.kz/doc/loip-lf-pechi-mufelnye.pdf> (дата обращения 08.02.2021).
11. ГОСТ Р 50779.22-2005 (ИСО 2602: 1980). Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего. Введ. 2005–05–31. Москва: Стандартинформ, 2005. 11 с.

ГОРБУНОВ Александр Сергеевич, преподаватель кафедры инженерно-технических экспертиз и криминалистики Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, г. Железногорск.

SPIN-код: 5731-4327

AuthorID (РИНЦ): 1077760

ORCID: 0000-0002-1971-3436,

Адрес для переписки: gorbunovgps@mail.ru

ЕЛФИМОВА Марина Владимировна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры

инженерно-технических экспертиз и криминалистики, заместитель начальника по учебной работе Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, г. Железногорск.

SPIN-код: 7614-7015

AuthorID (РИНЦ): 818459

Адрес для переписки: elfimar@mail.ru

БЕЗБОРОДОВ Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела научно-технического центра Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, г. Железногорск.

SPIN-код: 5195-4507

AuthorID (РИНЦ): 271274

Для цитирования

Горбунов А. С., Елфимова М. В., Безбородов Ю. Н. Исследование изменений цветовых характеристик стали при термическом воздействии // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 119–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-119-124.

Статья поступила в редакцию 05.02.2022 г.

© А. С. Горбунов, М. В. Елфимова, Ю. Н. Безбородов