

УДК 614.841.2.001.2

fire-risk1@mail.ru

**РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ СТЕПЕНИ ТЕРМИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ
ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННЫХ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

**REGRESSION MODEL OF THE THERMAL DAMAGE DEGREE
OF COLD-FORMED VEHICLES STEEL ELEMENTS**

*Моторыгин Ю. Д., доктор технических наук, профессор,
Сикорова Г. А., Санкт-Петербургский университет Государственной
противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург*

*Motorygin Yu., Sikorova G.,
Saint-Petersburg university of state fire service
of EMERCOM of Russia, Sankt-Peterburg*

В статье предлагается методика исследования корпуса транспортного средства для определения зоны наибольшего термического с помощью трех полевых методов: индукционной толщинометрии, магнитного метода и метода определения микротвердости.

С помощью вихретокового метода исследования удалось установить связь между температурой отжига стали и толщиной высокотемпературного окисла или окалины. Слой окалины увеличивался по мере роста температуры и длительности нагрева. С помощью магнитного метода исследования удалось установить связь между нагревом стальных конструкций и потерей магнитных свойств сталей. Время выдержки в печи на итоговые показатели практически не повлияло.

Метод определения микротвердости выявил общую тенденцию снижения твердости изделия по мере роста температур обжига.

По итогам проведенного комплексного исследования можно сделать вывод о том, что эти методы оптимально дополняют друг друга. Во-первых, они снимают показания независимых друг от друга изменений, которые происходят со стальными холоднодеформированными изделиями при нагревании: толщину слоя окалины, магнитные свойства и микротвёрдость. Во-вторых, эти методы применяются в разных температурных диапазонах. Магнитные свойства постепенно уменьшаются до температуры примерно 700 °С, а окалина, наоборот, при этой температуре только начинает образовываться. И только метод измерения микротвердости охватывает весь диапазон температур, нарастающих в процессе горения автомобиля.

Совместное применение описанных выше методов поможет повысить точность границ зоны наибольших термических повреждений для определения причины возникновения горения.

Ключевые слова: транспортное средство, горючая среда, место возникновения горения, полевые приборы, линейная регрессия.

The article proposes a method for studying the vehicle body to determine the zone of the greatest thermal damage using three field methods: induction thickness measurement, magnetic method and method for determining microhardness.

Using the eddy current method of research, it was possible to establish a relationship between the annealing temperature of steel and the thickness of a high-temperature oxide or scale. The scale layer increased with increasing temperature and duration of heating. Using the

magnetic research method, it was possible to establish a connection between the heating of steel structures and the loss of magnetic properties of steels. The exposure time in the oven practically did not affect the final indicators.

The method of determining microhardness revealed a general tendency to decrease the hardness of the product as the firing temperatures increase.

Based on the results of a comprehensive study, it can be concluded that these methods optimally complement each other. First, they take readings of independent changes that occur with cold-formed steel products when heated: the thickness of the scale layer, magnetic properties and microhardness. Secondly, these methods are used in different temperature ranges. The magnetic properties gradually decrease to a temperature of about 700 °C, but on the contrary, scale at this temperature is just beginning to form. And only the method of measuring microhardness covers the entire range of temperatures that increase during the gorenje car.

The joint application of the methods described above will help to increase the accuracy of the boundaries of the zone of greatest thermal damage to determine the cause of gorenje.

Keywords: vehicle, combustible medium, place of gorenje, field devices, linear regression.

По данным аналитического агентства «Автостат», российский автопарк за период 2010–2020 гг. увеличился примерно на 30 %. Наибольшее количество всех транспортных средств приходится на легковые автомобили, на втором месте по численности находится легковой коммерческий транспорт. На начало 2021 г. средний возраст автомобилей в России составил около 15 лет [8].

Несмотря на достаточно небольшие размеры, современный автомобиль – сложное техническое устройство, он является продуктом передовых технологий, которые делают его совершеннее.

Однако совершенствование узлов и систем не исключает возможности возникновения неисправностей, приводящих к горению. Это происходит не только в результате поджога, но и вследствие образования в отсеках автомобиля горючей среды, соприкасающейся с различными источниками зажигания.

Окончательный вывод о месте возникновения горения может быть сделан с учетом расположения сгораемых материалов и закономерности протекания процессов горения в условиях пространства внутри транспортного средства. Сгораемые материалы или пожарная нагрузка в транспортном средстве делится на два вида: стационарная и привнесенная. К стационарной пожарной

нагрузке относятся горючие материалы, которые уже имеются внутри автомобиля: в моторном и багажном отсеке, внутри салона. В подкапотном пространстве сосредоточена основная масса узлов и агрегатов, в которых используются горючие жидкости, соединительные трубопроводы и емкости, выполненные из различных горючих материалов: пластик, резина. Также имеется разветвленная система электропитания, сгораемым материалом которой является изоляция проводов, изготовленная в основном из поливинилхлорида. Из горючей пластмассы сделаны платы и радиодетали электронных узлов и материал воздушного фильтра. Самыми пожароопасными материалами моторного отсека являются различные привнесенные горючие жидкости: топливо, незамерзающая жидкость для обмывания окон, смазочные материалы.

В салоне автомобиля располагаются пластмассовая приборная панель, под которой сосредоточено большое количество электропроводов, плотно примыкающих друг к другу; сиденья, состоящие из значительного объема поролона и обивочного материала. Верхняя часть салона отделана шумоизоляционным материалом: пенополиуретаном, поролон, ткань и пластик, иногда искусственная кожа. В салоне на полу находятся термошумоизоляционные прокладки и резиновые коврики.

Багажный отсек отделан тканью и пластиком, под ними проходят электропровода с горючей изоляцией. По сравнению с салоном, сгораемых материалов не много, до тех пор, пока в багажнике нет груза. В случае его заполнения привнесенную горючую нагрузку нужно учитывать отдельно. Обычно там находятся запасное колесо и емкости с горюче-смазочными материалами [4–6].

При установлении места загорания, кроме расположения горючих материалов, следует учитывать конструкционные особенности транспортного средства. В основном легковые автомобили характеризуются наличием нескольких изолированных друг от друга объемов моторного, пассажирского отсеков, багажного или грузового отсеков. В настоящее время существует множество автомобилей с различными вариантами исполнения кузова и салона. По этому принципу можно разделить все автомобили на следующие группы: с открытым кузовом; с закрытым однообъемным кузовом; с закрытым многообъемным кузовом. Примером автомобиля с открытым кузовом может служить кабриолет, к закрытым однообъемным кузовам относятся легковые автомобили с кузовом минивэн и микроавтобусы. Такие автомобили не имеют внутри салона жестких изолирующих перегородок, разделяющих моторный, пассажирский на багажный отсеки.

К многообъемным автомобилям можно отнести легковые автомобили с кузовами типа седан и универсал. Конструктивные особенности типа кузова будут вносить коррективы в следовую картину пожара [5, 6].

Термические изменения на корпусе автомобиля образуются неравномерно, там, где температура была выше и время воздействия больше, изменения свойств стали выражены сильнее. На практике с местом наибольших термических повреждений связывают место начала горения.

Место наибольшего обжига на металлических конструкциях и изделиях характеризуется визуальными признаками, такими

как степень и направленность деформации, выгорание лакокрасочного покрытия на корпусе, образование на поверхности высокотемпературного окисла (окалины), расплавление металла. Кроме видимых признаков существуют и скрытые, но не менее значимые изменения степени наибольшего термического повреждения: снижение магнитных свойств, изменение структуры и твердости. При позднем тушении визуальные признаки нивелируются и зону больших термических повреждений можно выявить только по скрытым изменениям корпуса автомобиля. После точного определения зоны, откуда началось горение, приступают к поиску неисправности, приведшей к горению [2,3].

При определении места первоначального возникновения горения необходимо изучить его конструктивные особенности и расположение стационарной и привнесенной пожарной нагрузки, а также показатели их пожарной опасности. После этого необходимо провести визуальное исследование термических повреждений транспортного средства после пожара, если автомобиль погорел частично. Если на автомобиле огнем уничтожены все сгораемые материалы, то информативными будут инструментальные полевые методы исследования. В настоящее время для поиска зоны начала горения применяются: индукционная толщинометрия, магнитный метод и метод измерения микротвердости. Следует отметить, что индукционная толщинометрия предназначена для исследования горячекатаных изделий из сталей. Метод основан на том, что при воздействии высоких температур, примерно 700 °С, на поверхности стального изделия в атмосфере кислорода образуется пленка окисла буро-рыжего цвета, иначе называемая окалиной. По мере нарастания температур или при длительном воздействии на стальное изделие толщина слоя окалины увеличивается, при этом цвет покрытия чернеет. Толщину слоя можно измерить и получить зону наибольшего термического повреждения, она будет там, где слой окалины окажется толще. Магнитный метод предназначен для исследования стальных изделий,

подвергшихся холодной деформации. По мере нагревания стальное изделие на основе железа теряет магнитные свойства, пока они не исчезнут совсем, происходит это при возрастании температуры обжига до 700 °С. Метод измерения микротвердости применяется для исследования трубчатых нагревательных элементов (ТЭНов). Все три метода исследуют стали на основе железа после воздействия высоких температур. Если холоднодеформированное изделие было нагрето до температур выше 700 °С, то на нем, так же как и на горячекатаном изделии, появится окалина, соответственно, может быть уместно применение метода индукционной толщинометрии. Если метод измерения микротвердости успешно применяется

на ТЭНе, значит, он должен показать результат и при исследовании других холоднодеформированных стальных изделий. Обобщив методики исследования стальных конструкций и изделий, можно сделать вывод, что все три метода можно применить при определении зоны наибольшего термического повреждения корпуса транспортного средства [1, 4].

В качестве объектов для исследования степени термического воздействия на корпус автомобиля выбрано десять стальных пластин, вырезанных из двери ВАЗ–2107. Пластины представляют собой металлические полосы размером примерно 5×25 см с лакокрасочным покрытием на внешней части, на внутренней – остатки мастик-битумного композита (рис. 1).



Рисунок 1. Стальная полоса из двери автомобиля ВАЗ–2107

Образцы по очереди помещались в муфельную и выдерживались по 20 минут каждая в диапазоне температур от 500 °С до 950 °С с шагом 50 °С (рис. 2).

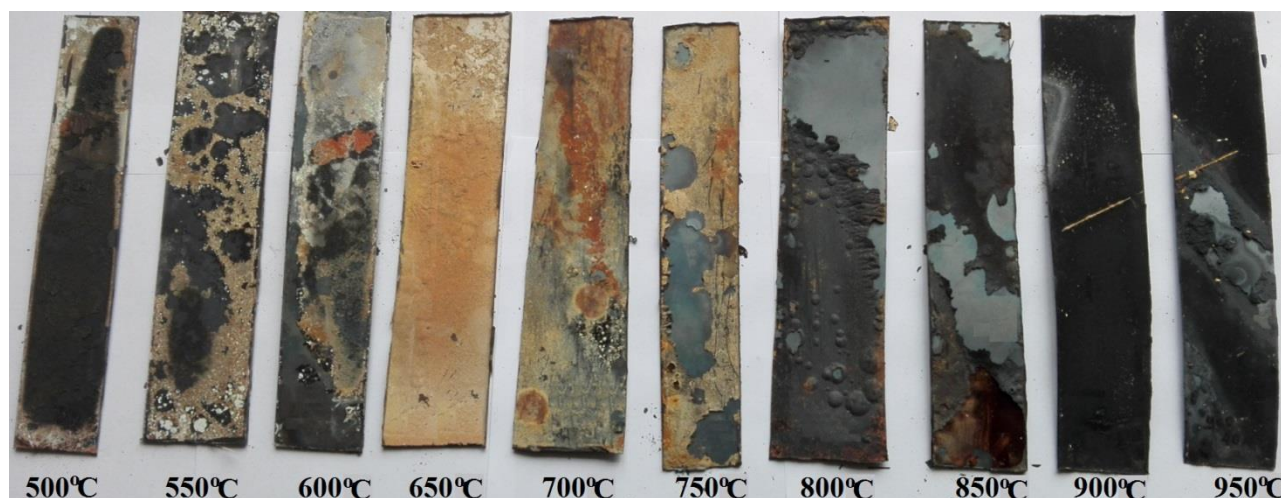


Рисунок 2. Пластины из корпуса автомобиля, обожженные в муфельной печи

После нагрева образцов, на поверхности постепенно выгорело лакокрасочное покрытие с одной стороны и мастикобитумные остатки с другой. При температуре обжига около 700 °С начинает образовываться окалина. Далее фрагменты транспортного средства исследовались тремя различными полевыми методами. В первую очередь были проведены индукционная толщинометрия вихретоковым многофункциональным МВП-2М, так как для этого метода не

нужна предварительная обработка поверхности образца. Метод позволяет измерить толщину не токопроводящего слоя на магнитном основании, в нашем случае измерялся слой окалины на металле. Как уже упоминалось выше, окалина образуется на поверхности стали при температуре примерно 700 °С. При дальнейшем нагреве толщина слоя увеличивается. Результаты исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Изменение толщины слоя окалины в зависимости от температуры отжига

Температура отжига, °С	Толщина окалины, мкм										Среднее значение	СКО
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
700	8	9	11	6	5	7	11	9	10	6	8	2
750	12	10	11	12	13	12	14	15	14	12	13	2
800	15	14	17	11	13	14	16	17	15	16	15	2
850	16	20	18	15	19	16	19	21	17	22	18	2
900	24	22	21	23	22	23	24	25	26	27	24	2
950	27	29	30	31	28	29	30	29	26	28	29	1

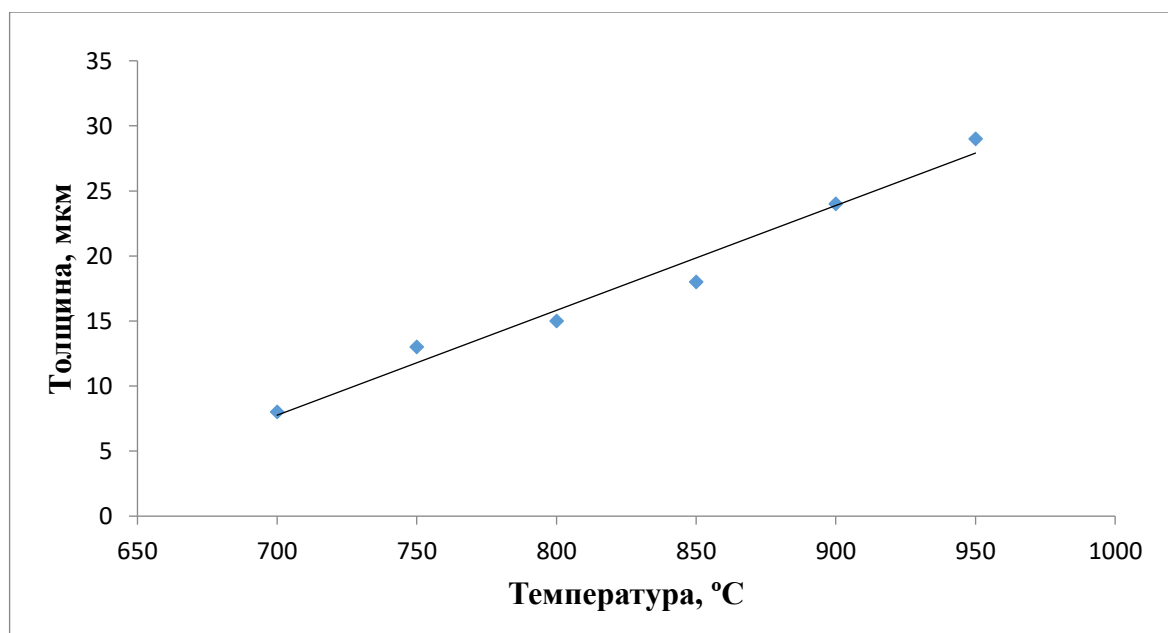


Рисунок 3. Зависимость толщины слоя окалины от температуры обжига в печи

По итогам исследования было установлено, что рост толщины слоя окалины в зависимости от повышения температуры обжига в печи описывается линейным уравнением:

$$h = 0,08 \cdot T - 48,6, \quad (1)$$

где h – толщина слоя окалины, мкм; T – температура нагрева образцов, °С. Величина достоверности аппроксимации полученной зависимости составила 0,98.

На следующем этапе изучались магнитных свойств пластин корпуса автомобиля прибором коэрцитиметр-структуроскоп портативный КСП-01. Перед снятием показаний поверхность стального образца была зачищена от остатков сгоревшей краски, грунта под покраску и окалины. По мере повышения температуры воздействия обжига, стальные изделия на основе

железа постепенно теряют магнитные свойства. После 700 °С магнитные свойства нивелируются, поэтому исследования стальных пластин с обжигом выше этой температуры не дают результат.

Итоги измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты исследования изменения магнитных свойств стальных пластин, обожженных при температуре в диапазоне от 500 до 700 °С

Температура отжига, °С	Токи размагничивания, А										Среднее знач.	СКО
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
500	0,042	0,04	0,038	0,042	0,044	0,041	0,042	0,04	0,042	0,044	0,042	0,002
550	0,038	0,041	0,04	0,039	0,044	0,042	0,038	0,042	0,041	0,042	0,041	0,002
600	0,032	0,027	0,028	0,03	0,032	0,026	0,026	0,03	0,028	0,026	0,029	0,002
650	0,022	0,022	0,026	0,022	0,028	0,028	0,026	0,026	0,02	0,016	0,024	0,004
700	0,011	0,01	0,01	0,01	0,012	0,01	0,01	0,011	0,011	0,01	0,011	0,001

На каждом образце показатель снимался десять раз, для формирования итоговой графической зависимости рассчитано среднее арифметическое значение измерений (рис. 4).

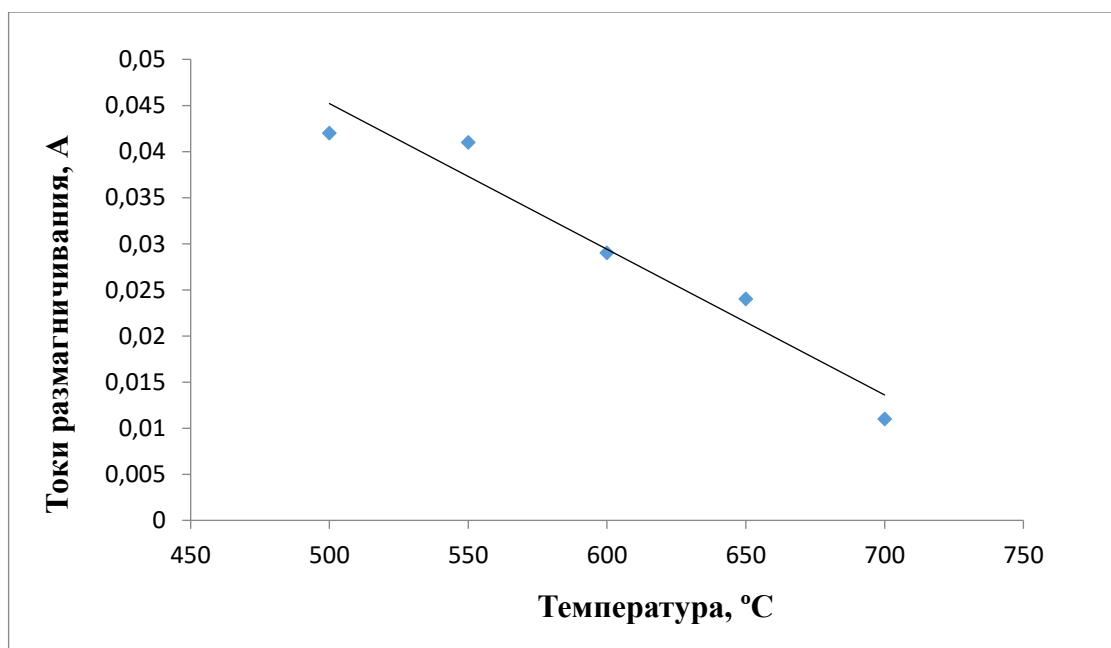


Рисунок 4. Зависимость токов размагничивания стальных пластин из двери автомобиля от температуры обжига в печи

Зависимость описывается линейным уравнением:

$$I_p = -0,0002 \cdot T + 0,124, \quad (2)$$

где I_p – величина тока размагничивания, А; T – температура нагрева образцов, °С. Величина достоверности аппроксимации – 0,94.

На завершающем этапе исследования снимались показания микротвердости стальных пластин портативным динамическим твердомером ТЭМП-4, оснащенный выносным датчиком. Измерения проводятся по шкале Бринелля в диапазоне 100–450

НВ. Пробоподготовка заключается в шлифовке уже очищенной поверхности, которая была проведена перед снятием показателей магнитных свойств. Для обеспечения достоверности снятых значений микротвердости, величина шероховатости не должна превышать показатель R 2.5.

Таблица 3
Результаты исследования микротвердости по Бринеллю стальных пластин, обожженных при температуре в диапазоне от 500 до 950 °С

Температура отжига, °С	Микротвердость, НВ										Среднее	СКО
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
500	285	291	301	287	280	271	277	283	278	287	284	8
550	264	255	269	262	276	266	259	290	269	262	267	10
600	256	278	264	248	275	258	260	254	251	256	260	13
650	240	243	272	257	255	270	271	267	250	263	259	13
700	245	236	267	236	263	260	279	253	236	267	254	15
750	227	241	246	223	236	227	248	230	234	220	235	9
800	219	210	211	211	194	197	199	211	197	194	204	9
850	185	187	176	188	172	175	209	208	203	188	189	13
900	180	194	174	162	179	168	188	180	172	182	178	9
950	174	168	184	166	180	170	184	182	178	168	175	7

Графическая зависимость среднего арифметического значения микротвердости по Бринеллю от температуры обжига представлена на рис. 5.

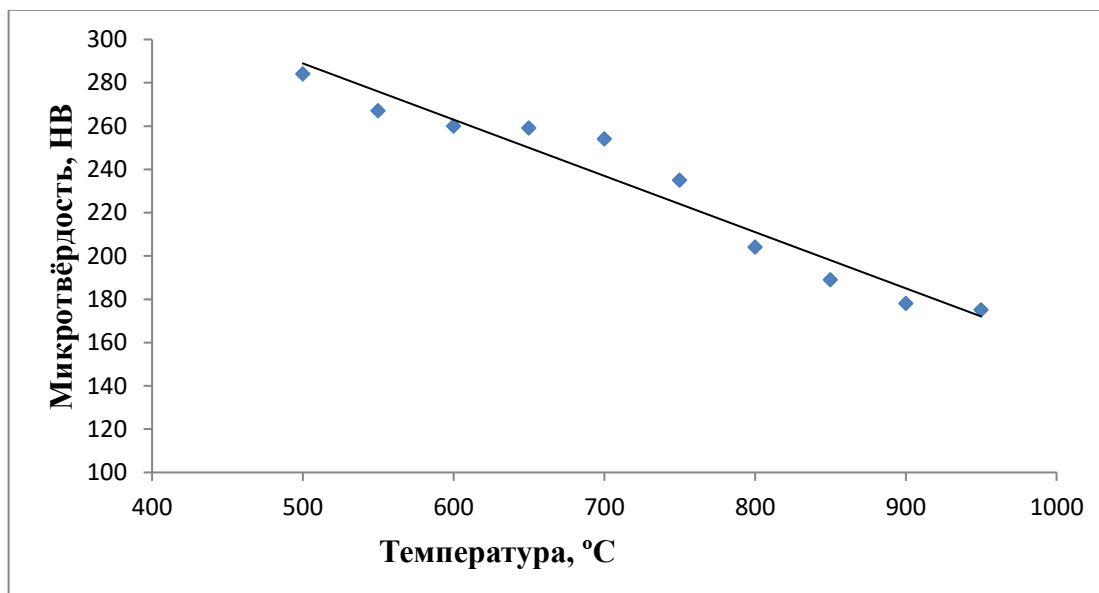


Рисунок 5. Зависимость микротвердости стальных пластин из двери автомобиля от температуры обжига в печи

Зависимость описывается линейным уравнением:

$$НВ = -0,26 \cdot T + 419, \quad (3)$$

где НВ – значение микротвердости по Бринеллю, НВ; Т – температура нагрева образцов, °С. Величина достоверности аппроксимации - 0.95.

Далее результаты были представлены в виде сводной табл. 4. Для построения многопараметрической регрессии с целью соблюдения разрядности между параметрами вводились поправочные коэффициенты.

Таблица 4
Результаты исследования металлических изделий различными методами

Температура, °С	твёрдость, усл. ед./10	магнит, А*1000	толщина, мкм
500	28,4	42	0
550	26,7	41	0
600	26,0	29	0
650	25,9	24	0
700	25,4	11	8
750	23,5	0	13
800	20,4	0	15
850	18,9	0	18
900	17,8	0	24
950	17,5	0	29

Экспериментальные значения (табл. 4) были обработаны с помощью программного пакета Stadia. Многопараметрическая линейная регрессия имеет вид

$$T = 1117 - 17,1 \cdot НВ - 2,582 \cdot I_p + 3,748 \cdot h, \quad (4)$$

где Т – температура нагрева образцов, °С; НВ – значение микротвердости по Бринеллю, НВ; I_p – величина тока размагничивания, А; h – толщина слоя окалины, мкм. Достоверность аппроксимации полученной модели составляет 0,97, что говорит об ее адекватности.

Полученная зависимость позволяет по результатам комплексного исследования холоднодеформированных стальных изде-

лий выбранными методами оценить температуру нагрева, для дальнейшего выявления зон максимального поражения на пожаре. Данная информация наряду со знанием распределения горючей нагрузки в автомобиле необходима для решения задачи поиска очага пожара. Совместное применение описанных выше методов поможет повысить точность доказательной базы при расследовании пожаров на автотранспорте.

Литература

1. Сикорова Г. А., Лебедев А. Ю., Дементьев Ф. А. и др. Полевые инструментальные методы исследования объектов пожарно-технической экспертизы. СПб., 2018. 136 с.
2. Моторыгин Ю. Д. Моделирование пожароопасных режимов в электросети автомобилей для принятия решения при проведении пожарно-технической экспертизы // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25. № 9. С. 45–51.
3. Моторыгин Ю. Д., Литовченко И. О., Максимов А. В. и др. Оценка эффективности принятия решений по повышению пожарной безопасности на открытых автостоянках // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 1. С. 25–31. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.25-31.
4. Галишев М. А., Бельшина Ю. Н., Дементьев Ф. А. и др. Пожарно-техническая экспертиза. СПб., 2014. 453 с.
5. Чешко И. Д., Плотников В. Г. Анализ экспертных версий возникновения пожара. СПб., 2010. Кн. 2. 708 с.
6. Чешко И. Д., Голяев В. Г. Комплексная методика установления очага пожара. Л., 1987. 114 с.
7. Аналитическое агентство Автостат. Date Views. URL: www.autostat.ru (дата обращения: 15.06.2021).

References

1. Sikorova G. A., Lebedev A. YU., Dement'yev F. A. и др. Polevyye instrumental'nyye metody issledovaniya ob"yektov pozharno-tekhnicheskoy ekspertizy. SPb., 2018. 136 p.
2. Motorygin YU. D. Modelirovaniye pozharoopasnykh rezhimov v elektroseti avtomobiley dlya prinyatiya resheniya pri provedenii pozharno-tekhnicheskoy ekspertizy // Pozharovzryvobezopasnost'. 2016. T. 25. № 9. P. 45–51.
3. Motorygin YU. D., Litovchenko I. O., Maksimov A. V. et al. Otsenka effektivnosti prinyatiya resheniy po povysheniyu pozharnoy bezopasnosti na otkrytykh avtostoyankakh // Pozharovzryvobezopasnost'. 2017. T. 26. № 1. P. 25–31. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.25-31.
4. Galishev M. A., Bel'shina YU. N., Dement'yev F. A. et al. Pozharno-tekhnicheskaya ekspertiza. SPb., 2014. 453 p.
5. Cheshko I. D., Plotnikov V. G. Analiz ekspertnykh versiy vozniknoveniya pozhara. SPb., 2010. Kn. 2. 708 p.
6. Cheshko I. D., Golyayev V. G. Kompleksnaya metodika ustanovleniya ochaga pozhara. L., 1987. 114 p.
7. Analiticheskoe agentstvo Avtostat. Date Views. URL: www.autostat.ru (date accessed: 15.06.2021).