

УДК 658.382

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРА РАСЧЕТНЫМ ПУТЕМ

И.П. Палатинская, А.И. Сидоров
e-mail: iren@bgd.susu.ac.ru

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Статья поступила 19 февраля 2005 г.

Материальные и зачастую людские потери являются обычными печальными последствиями любого пожара. Традиционно выявление причин, повлекших за собой возникновение пожара, устанавливаются при пожаро-технической экспертизе, проводимой на месте происшествия и в лабораторных условиях. Однако не всегда возможно определение причин возгорания опытным путем или установленные причины являются противоречивыми, требуют дополнительных теоретических исследований. Так, частыми случаями возгорания в производственных помещениях являются проведение огневых работ, связанных с возникновением искр и частиц расплавленного металла. Например, в городе N сгорело помещение чердака административного здания и часть деревянной крыши. В ходе следствия, а затем пожарно-технической экспертизой было установлено, что возможным иницирующим событием были электросварочные работы, которые проводились в помещении чердака. Однако, «заинтересованная сторона» утверждала невозможность возгорания из-за кратковременности проведенных работ.

Современная наука пожаробезопасности, на основе накопленного огромного опыта, позволяет проводить расчеты, выявляющие возможные причины возгорания [1]. Рассмотрим пример расчета пожароопасности кратковременного проведения электросварочных работ в замкнутом помещении.

Исходными данными для последующих исследований являются следующие установленные условия.

1. Источником возгорания предполагаются электрические искры и (или) капли металла, образовавшиеся при электросварке и попавшие в щели, в стыки между досками пола чердачного помещения, под которым находится утеплитель из шлаковаты.

2. Электросварочные работы проводились по времени от 3 до 5 с, на высоте, максимально приближенной к уровню пола.

3. Высота падения искр (капель металла) составляет 150 мм (толщина утеплителя из шлаковаты).

4. Температура окружающей среды в помещении от 5—10 °С, при условии, что дверь в помещении была открыта.

5. Деревянный пол изготовлен из сосновых досок толщиной 40 мм, влажность которых на момент пожара составляла 12 %.

6. Рассмотрим возможные технологические процессы при электросварке — резка или сварка металла. Для проведения расчетов принимаем: плавление электрода возможно при сварке $I_{св}=150$ А и напряжении на дуге $U_{св}=26$ В; при резке $I_p=200$ А и напряжении на дуге $U_p=26$ В.

7. Рабочий материал (пруты) изготовлен из арматурной стали класса А-1 и А-2 — сталь Ст.3 и сталь Ст.5.

При электросварке образуются электрические искры и (капли расплавленного металла). Размер капель металла при этом достигает 3 мм (при потолочной сварке — 4 мм). При электросварке частицы расплавленного металла вылетают во всех направлениях, и их скорость не превышает $4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Температура капель зависит от химического состава металла и равна температуре плавления. Температура сварочных частиц достигает $2100 \text{ }^\circ\text{C}$. Размер капель при резке металла достигает 15–26 мм, скорость — $1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, температура $1500 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура дуги при сварке и резке достигает $4000 \text{ }^\circ\text{C}$, поэтому дуга является источником зажигания всех горючих веществ [1].

Определим энергию, отдаваемую каплей металла твердому горючему материалу и температуру капель металла в момент контакта их с деревянной поверхностью пола [2]. Количество теплоты, которое капля металла способна отдать горючей среде при остывании до температуры ее самовоспламенения, рассчитываем по методике, приведенной в [1].

Энергия, выделившаяся при электросварке, определяется [2].

$$W = IU, \quad (1)$$

при резке: $I_p = 200 \text{ А}$ и $U_p = 26 \text{ В}$ $W = 5266,2 \text{ Дж}$;

при сварке: $I_{св} = 150 \text{ А}$ и $U_{св} = 26 \text{ В}$ $W = 4213 \text{ Дж}$.

Количество теплоты, выделившееся при электросварке, определяется:

$$Q_{\text{выд}} = Wt, \quad (2)$$

где t — время электросварки, с;

при резке: $Q_{\text{выд}} = 26000 \text{ Дж}$;

при сварке: $Q_{\text{выд}} = 19500 \text{ Дж}$.

Энергия, затраченная на излучение и потери:

$$Q_{\text{из}} = 20\% Q_{\text{выд}}, \quad (3)$$

при резке: $Q_{\text{из}} = 5200 \text{ Дж}$;

при сварке: $Q_{\text{из}} = 3800 \text{ Дж}$.

Максимально возможное количество энергии, затраченное на нагрев и на расплав металла составляет Q_M :

$$Q_M = Q_{\text{выд}} - Q_{\text{из}}, \quad (4)$$

при резке: $Q_M \approx 21000 \text{ Дж}$

при сварке: $Q_M \approx 15700 \text{ Дж}$

Тогда, максимально возможная масса расплавленного металла, образовавшаяся при электросварке, за время 5 с, может быть определена как

$$Q_M = m_k C_p (T_{\text{пл}} - T_0) + m_k L_{\text{плав}}, \quad (5)$$

отсюда

$$m_k = \frac{Q_M}{C_p (T_{\text{пл}} - T_0) + L_{\text{плав}}}, \quad (6)$$

где m_k — масса капли, кг; C_p — удельная теплоемкость расплава металла, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\text{К}^{-1}$; $T_{\text{пл}}$ — температура плавления металла, К; T_0 — температура окружающей среды (К); $L_{\text{плав}}$ — энергия плавления металла, $\text{Дж}/\text{кг}$;

Температура плавления углеродистых сталей обыкновенного качества $T_{\text{пл}} \approx 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ [3—5].

Средняя теплоемкость углеродистых сталей: $C_p \approx 0,16 \text{ ккал}\cdot\text{кг}^{-1}\text{ }^\circ\text{C}^{-1} \approx 0,67 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Энергия плавления углеродистых сталей: $L_{\text{плав}} = 64 \text{ ккал}\cdot\text{кг}^{-1} \approx 268,16 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$.

Плотность углеродистых сталей $\rho = 7860 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Масса расплавленного металла при резке металла в данном диапазоне температур приблизительно одинакова $m_k^p \approx 17$ г:

$$m_k^p \approx 16,6 \cdot 10^3 \text{ кг} \quad \text{при } T_0 = 5 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$m_k^p \approx 16,4 \cdot 10^3 \text{ кг} \quad \text{при } T_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C};$$

Масса расплавленного металла при сварке металла в данном диапазоне температур приблизительно одинакова $m_k^{CB} \approx 12,5$ г:

$$m_k^{CB} \approx 12,5 \cdot 10^3 \text{ кг} \quad \text{при } T_0 = 5 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$m_k^{CB} \approx 12,3 \cdot 10^3 \text{ кг} \quad \text{при } T_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C},$$

– Среднюю скорость полета капли металла при свободном падении (ω_k), м·с⁻¹, вычисляют по формуле:

$$\omega_k = 0,5 \sqrt{2gH} \quad (7)$$

где $g = 9,81 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ — ускорение свободного падения; H — высота падения, м.

При $H = 0,15 \text{ м}$ $\omega_k = 0,858 \cdot \text{с}^{-1}$.

– Объем капли металла (V_k), м³, вычисляют из формулы

$$m_k = V_k \rho_k, \quad (8)$$

где ρ — плотность металла, кг·м⁻³.

$$V_k^p = 0,002 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3;$$

$$V_k^{CB} = 0,0016 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

– Диаметр капли металла

$$V_k = \frac{\pi d_k^3}{6} = 0,524 d_k^3, \quad (9)$$

где d_k — диаметр капли, м.

$$d_k^p = 0,016 \text{ м} \quad \text{и} \quad d_k^{CB} = 0,0146 \text{ м}.$$

– Взаимосвязи от продолжительности полета капли возможны три ее состояния: жидкое, кристаллизации, твердое.

Определим состояние капель металла в данном случае. Время полета капли (τ), с при $H = 0,15 \text{ м}$:

$$\tau = \frac{H}{\omega_k}. \quad (10)$$

Время полета капли: $\tau = 0,17 \text{ с}$.

Время полета капли в расплавленном (жидком) состоянии (τ_p), с,

$$\tau_p = \frac{C_p m_k}{\alpha S_k} \ln \frac{T_H - T_0}{T_{пл} - T_0}, \quad (11)$$

где $S_k = 0,785 d_k^2$ — площадь поверхности капли, м²; T_H , $T_{пл}$ — температура капли в начале полета и температура плавления металла соответственно, К; α — коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К⁻¹.

Площадь поверхности капель: $S_{k1} = 0,113 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ и $S_{k2} = 0,38 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Температуру капли в начале полета при резке и при сварке считаем равной температуре плавления, тогда $T_H = T_{пл} = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$. В этом случае $\tau_p = 0 \text{ с}$.

Коэффициент теплоотдачи α определяется в следующей последовательности:

а) вычисляется число Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega_k d_k}{\nu}, \quad (12)$$

где d_k — диаметр капли м; ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха при данных температурах, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

б) вычисляется критерий Нуссельта

$$Nu = 0,62 Re^{0,5}; \quad (13)$$

в) вычисляется коэффициент теплоотдачи

$$a = \frac{Nu \lambda_B}{d_k}, \quad (14)$$

где λ_B — коэффициент теплопроводности воздуха при данных температурах, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot (\text{К}^{-1})$.

Результаты расчетов

| Условие образования | Резка | | | Сварка |
|---|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Масса капли, m_k , г | 17 | | | 12,5 |
| Воздух в чердачном помещении | | | | |
| Температура окружающей среды, T_0 , °С | 5 | 10 | 5 | 10 |
| Коэффициент кинематической вязкости воздуха, ν , $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ | $\approx 13,73 \cdot 10^{-6}$ | $\approx 14,16 \cdot 10^{-6}$ | $13,73 \cdot 10^{-6}$ | $\approx 14,16 \cdot 10^{-6}$ |
| Коэффициент теплопроводности воздуха, λ_B , $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ | $24,8 \cdot 10^{-3}$ | $25,1 \cdot 10^{-3}$ | $24,8 \cdot 10^{-3}$ | $25,1 \cdot 10^{-3}$ |
| Критерий Рейнольдса, Re | ≈ 1000 | 970 | 912 | 885 |
| Критерий Нуссельта, Nu | $19,6 \approx 20$ | 19,3 | 18,7—19 | 18,4 |
| Коэффициент теплоотдачи, α , $\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1}$ | 31 | 31,4 | 32,3 | 31,6 |
| Время полета капли в расплавленном состоянии, τ_p | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Конечная температура капли, $T_{\text{кон}} = T_{\text{пл}}$, °С | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 |

Время полета капли, в течение которого происходит ее кристаллизация, определяют для каждого процесса при разных температурах

$$\tau_{кр} = \frac{m_k C_{кр}}{\alpha S_k (T_{пл} - T_0)}, \quad (15)$$

где $C_{кр}$ — удельная теплота кристаллизации металла, Дж · кг⁻¹; $C_{кр} = T_{пл}$:

– Если $\tau_p < \tau \leq (\tau_p + \tau_{кр})$, то конечная температура капли $T_{кон} = T_{пл}$.

– Количество тепла (W), Дж, отдаваемое каплей металла твердому или жидкому горючему материалу, на который она попала:

$$W = V_k \rho_k C_k (T_{кон} - T_{св}) K, \quad (16)$$

где $T_{св}$ — температура самовоспламенения горючего материала, К; K — коэффициент, равный отношению тепла, отданного горючему веществу, к энергии, запасенной в капле.

Если отсутствует возможность определения коэффициента K , то принимают $K = 1$.

Температура самовоспламенения горючего материала $T_{св} = 1000$ °С [1]. Следовательно, количество тепла (W), Дж, отдаваемое каплей металла древесине:

при резке $W = 5266,2$ Дж;

при сварке $W = 4213$ Дж.

Результаты расчетов представлены в таблице.

Заключение

Проведенные расчеты позволяют утверждать, что в установленных условиях, даже при кратковременном проведении различных технологических электросварочных процессов возможно возгорание досок, образующих основание чердачного помещения административного здания.

Список литературы

1. ГОСТ 12.1.004–91.ССБТ. Пожарная безопасность. (Переиздание (январь 1996 г.) с Изменением № 1, утвержденным в октябре 1993 г. (ИУС 1 — 95)). — М.: Изд-во стандартов, 1991.
2. Сварка в машиностроении. Справочник в 4-х т. / Под редакцией Николаева Г.А. М.: Изд. Зорина, 1979. Т. 4.
3. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1986. С. 65.
4. Справочник металлиста / Под редакцией Н.С. Ачеркана. М.: Машиностроение, 1965. Т. 1.
5. Пискунов М. В., Десипри А.И. Металловедение. М.: Металлургия, 1980. С. 30—50.