

# Горение металлов

Лекция 9 по теории горения и  
взрыва для гр. ДБЖ-09

На способность металлов возгораться и гореть большое влияние оказывают химические и физические свойства металлов и их оксидов.

### Свойства летучих горючих металлов и их оксидов

Металлы	Температура, °С			Оксиды металлов	Температура, °С	
	плавления	кипения	воспламенения		плавления	кипения
калий	64	760	69	$K_2O$	527	1477
натрий	98	883	114	$Na_2O$	920	1277
литий	179	1370	190	$Li_2O$	1610	2500
магний	651	1107	623	$MgO$	2800	3600
кальций	851	1482	550	$CaO$	2585	3527

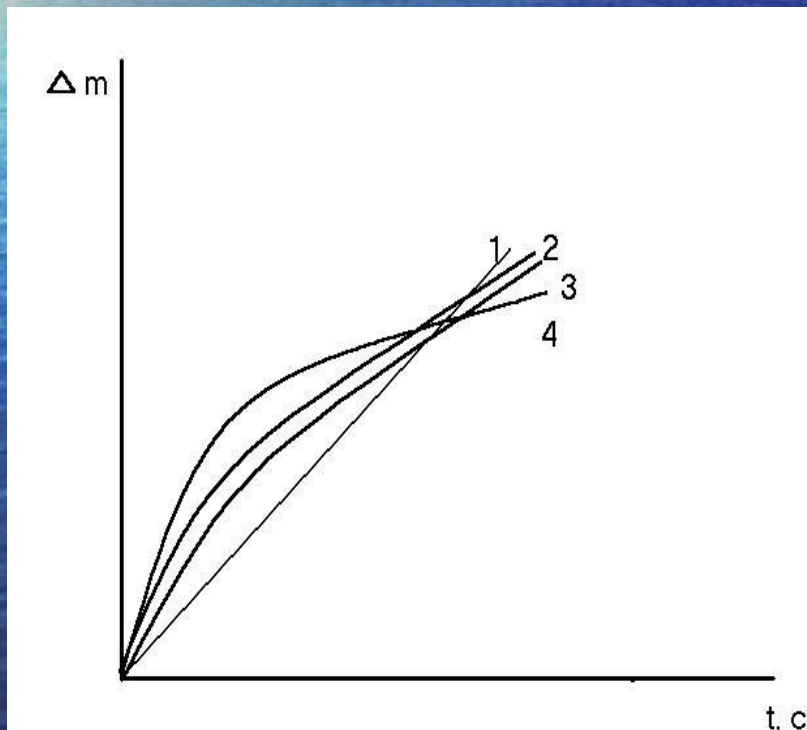


## Свойства нелетучих горючих металлов и их оксидов

Металлы	Температура, °С			Оксиды металлов	Температура, °С	
	плавления	кипения	воспламенения		плавления	кипения
<b>Нерастворимые оксиды</b>						
алюминий	600	2500	1000	$Al_2O_3$	2050	3527
кремний	1412	3309	-	$SiO_2$	1610	2727
<b>Растворимые оксиды</b>						
титан	1677	3277	300	$TiO_2$	1855	4227
цирконий	1852	4477	500	$ZrO_2$	2687	4927

Рассмотрим кинетические законы окисления и механизм самовоспламенения одиноких частиц металла. В преднагревательном периоде (от  $T_0$  до  $T_1$ ) ведущая роль отводится процессу окисления металла. При окислении частиц образуется твердый оксид металла и поглощается большое количество тепла, которое препятствует горению. Большое влияние оказывает также толщина оксидной пленки и ее дисперсность. Пирофорные металлы – это металлы без оксидной пленки.

Стадия образования оксидной пленки – диффузионное препятствие для процессов горения и взрывов, при этом увеличивается плотность кристаллической решетки оксидной пленки.



Зависимость скорости окисления от времени;

1 – линейная; 2 – параболическая;  
3 – кубическая; 4 – логарифмическая



# Кинетические законы

Пусть: масса оксида –  $x$ ; константа скорости окисления –  $k$ , время –  $t$

## 1. Линейный закон

$$x = k_1 \cdot t \rightarrow \frac{x}{t} = k_1$$

Скорость окисления не зависит от толщины оксидной пленки, и оксидная пленка не является защитной. Скорость окисления пропорциональна времени нарастания оксидной пленки, этот закон характеризует окисление щелочных и щелочноземельных металлов.

## 2. Параболический закон

$$x^2 = k_2 \cdot t \rightarrow \frac{x}{t} = \frac{k_2}{x}$$

Скорость окисления обратно пропорциональна толщине оксидной пленки; оксидная пленка замедляет процессы окисления.

## 3. Кубический закон

$$x^3 = k_3 \cdot t \rightarrow \frac{x}{t} = \frac{k_3}{x^2}$$

Скорость окисления обратно пропорциональна квадрату толщины оксидной пленки.

## 4. Логарифмический закон

$$x = k_4 \cdot \lg(c_1 \cdot t + 1) \rightarrow c_1 - const$$

## 5. Обратнологарифмический закон

$$\frac{k_5}{x} = c_2 - \lg t$$

Закон окисления с учетом зависимости константы скорости реакции от температуры:

$$\frac{dm}{dt \cdot S_x} = \frac{B \cdot e^{-E/RT}}{\delta_x \cdot x^n}$$

где  $\frac{dm}{dt \cdot S_x}$  – скорость окисления определяется экспериментально;  $\delta_x$  – толщина оксидной пленки в данный момент времени;  $x^n$  – показатель закона окисления;  $S_x$  – удельная площадь поверхности.

$$S_x = S_0 \cdot \left(\frac{R_x}{R_0}\right)^2$$

где  $R_x$  – текущий радиус частицы, который приблизительно равен сферическому;  $R_0$  – начальный радиус частицы. Массу окисляемого металла рассчитывают по уравнению:

$$\frac{m \cdot A \cdot y}{M_0 \cdot z} = m \cdot k$$

где  $A$  – атомная масса металла;  $y$  – число атомов металла в молекуле оксида;  $M_0$  – атомная масса кислорода;  $z$  – число атомов кислорода в молекуле оксида.



Масса оксида –  $m(k+1) Me_y O_z$ .

Число частиц в 1 грамме вещества

$$\frac{1}{\frac{3}{4} \cdot \pi \cdot R_0^3 \cdot \rho_{Me}}$$

Объем оксида приходящего на 1 часть исходного вещества

$$\frac{m \cdot (k+1) \cdot \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot R_0^3 \cdot \rho_{Me}}{\rho_{Me, O_2}} = \frac{3}{4} \pi \cdot (R_x + \delta_x)^3 - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_x^3$$

Толщина оксидной пленки в определенный момент времени будет равна:

$$\delta_x = \sqrt[3]{\frac{\rho_{Me}}{\rho_{Me, O_2}} \cdot R_0^3 \cdot m(k+1) + R_x^3}$$

Масса металла, оставшегося неокисленным в каждой отдельной частице:

$$\frac{(1 - mk) \cdot \frac{3}{4} \pi \cdot R_0^3 \cdot \rho_{Me}}{\rho_{Me}} = \frac{3}{4} \pi \cdot R_x^3$$

Выражаем значение:

$$R_x = R_0 \sqrt[3]{1 - mk}$$

Подставим  $R_x$  в выражение для нахождения удельной площади поверхности и толщины оксидной пленки, получаем:

$$F = \ln\left(\frac{dm \cdot \delta_x^n}{dT \cdot S_x}\right)$$

Классификация металлов по механизму горения: летучие (кальций, магний) – горящие в паро-фазном режиме; нелетучие: с растворимой оксидной пленкой (в самом расплавленном металле – цирконий); с нерастворимой, но легкокипящей пленкой (бор) воспламенение протекает уже сложнее; с нерастворимой и трудно- кипящей пленкой (алюминий, кремний) воспламенение этих металлов наиболее сложное.

Процессы горения металла не зависят от первоначальной формы металла, металлы горят в шарообразной форме, поэтому ошибки в вычислениях почти нет. Если объем оксидной пленки больше объема металла, то оксидная пленка покрывает весь металл и является защитной; если объем оксидной пленки меньше объема металла, то оксидная пленка не является защитной.

$$k_{\text{ПБ}} = \frac{M_{\text{ок}} \cdot \rho_{\text{Мг}}}{\rho_{\text{ок}} \cdot A \cdot n} \geq 1$$

$k_{\text{ПБ}}$  – коэффициент Пиминга-Бевордса, если этот коэффициент  $\geq 1$ , то оксидная пленка защитная. Например, Mg  $k_{\text{ПБ}} = 0,8$ , Ca  $k_{\text{ПБ}} = 0,6$ .



При исследованиях было выявлено несколько механизмов потери защитных свойств оксидной пленки:

- общий механизм: у оксидной пленки и металлического ядра различные коэффициенты термического расширения (у оксидной пленки этот коэффициент меньше), при увеличении температуры возникают напряжения, которые ведут к растрескиванию оксидной пленки;
- растворение пленки в металле; при нагревании частички титана и циркония в вакууме или в атмосфере аргона, извлекают в среду и поджигают, при этом увеличивается воспламеняемость (кислород из поверхности частично диффундирует внутрь ядра);
- фазовые и агрегатные переходы в оксидной пленке и в металле; испарение (Mg), плавление (Al) металла – пленка лопается объем жидкости больше чем объем твердого вещества – пленка разрушается; при плавлении оксида увеличивается способность кислорода диффундировать через пленку внутрь металла; например, испарение оксида молибдена при переходе из  $\alpha$  в  $\beta$  модификации (модификационный переход) изменяется объем оксидной пленки;
- химические превращения; в состав оксидной пленки входят гидроксиды, карбонаты; при достижении температуры распада, защитные свойства пленки теряются (рис. 36). Схема разрушения оксидной пленки.
- Инертные примеси; некоторые резко увеличивают скорость окисления и снижают температуру самовоспламенения; те добавки, которые дают с оксидом сплавы с низкой температурой плавления (сплав алюминия с фторидами).

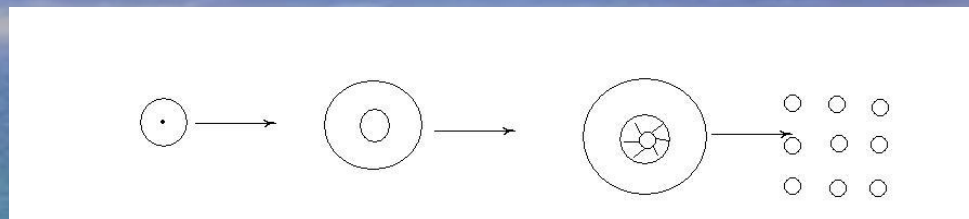


Схема разрушения оксидной пленки.



Для сплавов получены корреляционные зависимости между положениями линий солидуса на диаграмме состояния и характеристиками воспламеняемости (то есть, чем ниже точка солидуса, тем ниже температура самовоспламенения и ниже НКПР и выше давление взрыва). Например, сплав Al-Mg, область более низкой температуры самовоспламеняемости соответствует соотношениям компонентов (50%-50%), ниже чем температура самовоспламенения чистых металлов (алюминий и магний); сплав наиболее взрывоопасен, вследствие появления жидкой фазы происходит нарушение свойств оксидной пленки.

Кислород диффундирует к атомам металла и происходит образование оксидов, также наблюдается и диффузия металла через оксидную пленку к кислороду. Вся температура сосредоточена в слое оксида, затем она распределяется по всему объему. Реальная температура образования оксида проходит через всю диаграмму состояния.

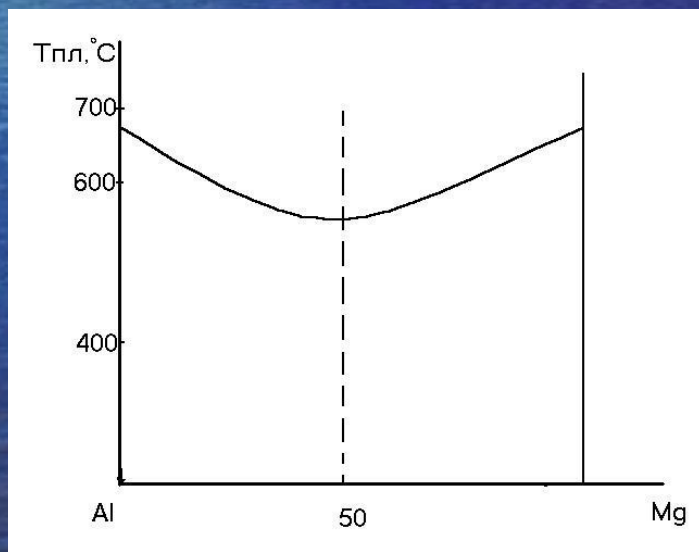


Диаграмма состояния сплава  $Al - Mg$