Oxidação em Alta Temperatura

1. Introdução

O Oxigênio reage com o aço Carbono e outras ligas em altas temperaturas, transformando o metal em carepa de óxido do próprio metal.
É mais frequente externamente, embora haja situações de oxidação interna em tubulações e equipamentos, e acontece quando o Oxigênio, que está no ar ambiente (aproximadamente 20%vol.), é usado para combustão em fornos e caldeiras.
Todos os materiais à base de Ferro, incluindo aço Carbono e aços de baixa liga, fundidos, laminados ou forjados, são suscetíveis à oxidação em alta temperatura.
E as ligas de aço inoxidável da série 300, série 400 e ligas à base de Níquel, também oxidam em graus variados, dependendo da composição e da temperatura.

2. Referência

- API Recommended Practice 571

Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry

3. Características da corrosão por oxidação em alta temperatura

A maioria das ligas, incluindo aços Carbono e aços de baixa liga, sofre de desgaste geral (perda de metal) devido à oxidação em alta temperatura.
Normalmente, o componente é recoberto na superfície com uma carepa de óxido, dependendo da temperatura e do tempo de exposição.
Aços inoxidáveis da série 300 e ligas de Níquel geralmente têm uma carepa escura muito fina, a menos que expostas a altas temperaturas, quando as taxas de perda de metal por oxidação são excessivas.
Há um aumento significativo da taxa de oxidação com o aumento da temperatura.

Características principais:

- Os principais fatores que afetam a oxidação à alta temperatura são a temperatura do metal e a composição da liga metálica.
- A oxidação rápida do aço Carbono começa a cerca de 540°C (1000°F).
- As taxas de perda de metal aumentam com o aumento da temperatura.
- Em geral, a resistência do aço Carbono e de outras ligas é determinada pelo teor de Cromo do metal. O aumento do teor de Cromo produz um depósito ou incrustação de óxido mais resistente e protetor. Os aços inoxidáveis da série 300 são capazes de resistir na prática até 815°C (1500°F).
- A presença de vapor de água pode acelerar significativamente as taxas de oxidação de algumas ligas metálicas.
- A resistência à oxidação é melhorada pelo uso de ligas mais resistentes às altas temperaturas.
- O Cromo é o principal elemento de liga que aumenta a resistência à oxidação, porém outros elementos de liga, incluindo Silício e Alumínio, são eficazes, mas de uso limitado, pois resultam em efeitos negativos nas propriedades mecânicas do metal.
- As condições do processo devem ser monitoradas para o estabelecimento de tendências em equipamentos que operam às altas temperaturas, em que a oxidação pode ocorrer.
- As temperaturas podem ser monitoradas através do uso de termopares e/ou termografia.
- A perda de espessura devido à oxidação é geralmente medida com inspeção externa por ultrassom.

4. Componentes sujeitos à corrosão por oxidação em alta temperatura

A oxidação ocorre em tubos e suportes na câmara de radiação de fornos, assim como em

outros equipamentos e tubulações que operam em ambientes de alta temperatura de metal acima dos limites da Tabela 1.
As temperaturas listadas na Tabela 1 são passíveis de alteração dependendo da severidade da taxa de oxidação, que é diretamente influenciada pela composição da atmosfera ambiente e de outros fatores operacionais.
Exemplos de variáveis operacionais que podem acarretar alterações: ciclo térmico, presença de umidade e de gases contendo Cloreto e Enxofre.

Tabela 1 – **Limites de temperatura de oxidação em alta temperatura**
São as temperaturas máximas de utilização contínua de várias ligas em atmosfera oxidante, isto é, em presença de Oxigênio.
Adaptado de ASM Metals HandBook vol 11 (*Failure Analysis and Prevention*).

Material	Temperatura máxima de utilização	
	ºC	ºF
Aços ao Carbono e Ligados		
SAE 1010	480	900
SA-178, Gr A	510	950
SA-192, SA-210, GrA	510	950
$1^{1/4}$Cr-1/2Mo-Si; SA-213, Gr T-11	565	1050
$2^{1/4}$Cr-1/2Mo-Si; SA-213, Cr T-22	600	1115
7Cr-Mo	650	1200
9Cr-1Mo-V; SA-213, Gr T-91	650	1200
Aços Inoxidáveis		
201, 202	845	1555
302, 304	925	1695
310	1150	2100
316, 317, 321, 347	925	1695
405, 410	705	1300
430	815	1500
446	1095	2005
Superligas		
N-155 (Superliga a base de ferro)	1040	1900
S-816 (Superliga a base de Cobalto)	980	1800
Hastelloy X (base de Niquel)	1205	2200
HX (17Cr-66Ni-bal Fe)	1150	2100

5. Taxas de oxidação em alta temperatura de metais
Os valores absolutos de taxa de corrosão para faixas de temperaturas de uso continuo, dos materiais mais utilizados, estão relacionados na Tabela 2.

Tabela 2 - Taxa de corrosão (em mpy) dos metais para faixas de temperaturas de operação de uso continuo
Nota:
Taxa de corrosão por oxidação em mpy-mils per year (igual a um milésimo da polegada)
1 mpy = 0,001 pol/ano = 0.0254 mm/ano.

Material Utilizado	Taxa de corrosão (mpy) Faixas de Temperatura (°C)				
	452 - 510	558 - 603	622 - 649	677 - 704	705 - 732
Aço Carbono	2	9	22	48	NA
1,25% Cr	2	7	16	46	NA
2,25% Cr	1	4	14	41	NA
5% Cr	1	2	6	35	65
7% Cr	1	1	2	6	17
9% Cr	1	1	1	2	5
12% Cr	1	1	1	1	3
304 SS	1	1	1	1	1
309 SS	1	1	1	1	1
310 SS/HK	1	1	1	1	1
800H/HP	1	1	1	1	1

NA – Não aplicável para esta faixa de temperaturas.

Anexos

Taxas de corrosão por oxidação em altas temperaturas (mpy)
Referência API RP 581, Risk-Based Inspection Technology
Nota:
1 mpy = 0,001 pol/ano = 0.0254 mm/ano

Material	Temperatura máxima de metal (°F)											
	925	975	1025	1075	1125	1175	1225	1275	1325	1375	1425	1475
CS	2	4	6	9	14	22	33	48	--	--	--	--
1 1/4 Cr	2	3	4	7	12	18	30	46	--	--	--	--
2 1/4 Cr	1	1	2	4	9	14	24	41	--	--	--	--
5 Cr	1	1	1	2	4	6	15	35	65	--	--	--
7 Cr	1	1	1	1	1	2	3	6	17	37	60	--
9 Cr	1	1	1	1	1	1	1	2	5	11	23	40
12 Cr	1	1	1	1	1	1	1	1	3	8	15	30
304 SS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	4
309 SS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3
310 SS / HK	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
800 H / HP	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2

Material	Temperatura máxima de metal (°F)											
	1525	1575	1625	1675	1725	1775	1825	1875	1925	1975	2025	2075
CS	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
1 1/4 Cr	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2 1/4 Cr	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5 Cr	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
7 Cr	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
9 Cr	60	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
12 Cr	50	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
304 SS	6	9	13	18	25	35	48	--	--	--	--	--
309 SS	4	6	8	10	13	16	20	30	40	50	--	--
310 SS / HK	3	4	5	7	8	10	13	15	19	23	27	31
800 H / HP	3	4	6	8	10	13	17	21	27	33	41	50