



Spectru Instrumental Científico Ltda
Informática para Ciência, Ensino e Pesquisa

Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa



REVESTIMENTOS DUROS RESISTENTES AO DESGASTE DEPOSITADOS POR SOLDAGEM UTILIZADOS NA RECUPERAÇÃO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS

André Luís de Brito Baptista⁽¹⁾
Ivaldo de Assis do Nascimento⁽²⁾

- (1) Técnico Industrial Metalúrgico – Técnico de Ensino do Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos / Deptº de Ciências dos Materiais – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda – Universidade Federal Fluminense.
(2) Engenheiro Mecânico – Diretor Técnico da Spectru Instrumental Científico Ltda

Av. Paulo de Frontin,631 – CEP 20261 – 241 – Rio Comprido – Rio de Janeiro
TELS.: (21) 2293 – 5016 – FAX: (21) 2293 – 3607 – CEL.: (21) 9983 - 4887

www.spectru.com.br

e – mail : spec@spectru.com.br



INTRODUÇÃO AO DESGASTE

O desgaste de componentes e equipamentos industriais, agrícolas, bem como de inúmeros outros ramos de atividade, representa um grande fator de depreciação de capital e de fonte de despesas com manutenção e reposição de componentes mecânicos. Sobre os custos de produção, o desgaste influi diretamente através do custo de peças desgastadas e de sua reposição. Muitas vezes exige ainda o superdimensionamento de componentes, a limitação da produção devido aos equipamentos depreciados, ou pior, a interrupção drástica da produção. Estes fatores influem significativamente sobre as perdas indiretas do rendimento de produção.

Como o desgaste é um fenômeno essencialmente superficial, envolvendo a remoção mecânica indesejável de material de superfícies, as soluções encontradas através de solda de revestimento tem-se mostrado altamente valiosas, tanto para prevenir como para minimizar ou recuperar as diferentes formas de desgaste de metais.

Em inúmeras situações, peças e componentes podem ser fabricados com materiais convencionais, dentro das especificações normais do projeto. Posteriormente, pode-se aplicar sobre a superfície, camadas ou cordões de solda, com consumíveis adequados para resistir às solicitações de desgaste.

A resistência ao desgaste é considerada como parte de um sistema tribológico sendo muitos os parâmetros que acabam por influir na taxa de desgaste, incluindo as características de projetos, condições de operação, tipo de abrasivo e propriedades do material.

Nas propriedades dos materiais, as características microestruturais têm particular importância, tanto nas propriedades mecânicas, quanto nas taxas de desgaste.

Murray estudou a resistência ao desgaste de aços tratados termicamente para vários níveis de dureza e também de alguns metais puros. Para metais puros, a resistência ao desgaste aumenta linearmente com a dureza.

Nos materiais ferrosos, esta relação (resistência ao desgaste X dureza) não é simples. O aumento no teor de carbono faz a resistência ao desgaste aumentar. Para os aços com a mesma porcentagem de carbono, a resistência ao desgaste de um aço ligado é maior do que de um aço sem liga, mas este aumento é pequeno quando comparado com outro em que aumentou a porcentagem de carbono.

A resistência ao desgaste geralmente aumenta conforme a microestrutura é mudada de ferrita para perlita, desta para bainita e finalmente bainita para martensita; isto, desde que seja acompanhada de aumento de dureza. Entretanto, para um mesmo valor de dureza, a estrutura bainítica tem maior resistência ao desgaste do que a martensítica.

A microestrutura tem maior influência no desgaste do que a dureza da matriz. Tem sido mostrado que a presença de austenita retida tem melhorado a resistência ao desgaste da martensita revenida. A austenita fornece um melhor ancoramento aos carbonetos, ocasionando um baixo arrancamento do carboneto da matriz austenítica.

Os carbonetos parecem ser particularmente importantes na resistência à abrasão, principalmente em materiais como os aços e ferros fundidos brancos ligados ao Cr. A influência deles está relacionada com sua dureza, tamanho e distribuição. Carbonetos duros, e finamente dispersos, aumentam a resistência ao desgaste, enquanto que os grosseiros, diminuiriam-se.

Estruturas deformadas por trabalho a frio, não aumentam a resistência ao desgaste, enquanto que o aumento da dureza pelo refinamento dos grãos, agiria favoravelmente.

Existem ainda muitos outros fatores que influenciam a taxa de desgaste. O tamanho da partícula abrasivo e o coeficiente de atrito são exemplos deles. Estes trabalhos têm demonstrado que o estudo dos fenômenos de desgaste é bastante complexo.

Na especificação e normalização de ligas para resistir ao desgaste, as maiores dificuldades residem na inexistência de ensaios padronizados, para discriminar os níveis de aceitação ou rejeição, conforme as aplicações particulares.



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

Estas dificuldades estão associadas principalmente à natureza complexa do fenômeno de desgaste. Este, além de envolver a deformação e corte superficial por partículas abrasivas, ou o atrito entre superfícies metálicas, muitas vezes ocorre devido a vários mecanismos concomitantes de desgaste da superfície, os quais também podem estar associados a outros fenômenos de degradação tais como impacto, corrosão, fluência ou fadiga.

Para maior facilidade de análise e prevenção, procura-se geralmente identificar o(s) mecanismo(s) predominante(s) de remoção de material. Para tanto, os tipos gerais de desgaste podem ser classificados como:

- Desgaste por Abrasão – ocasionado por partículas abrasivas (duras) sob tensão, deslocando-se sobre a superfície;
- Desgaste por Erosão – devido ao choque contra a superfície, de partículas sólidas ou gotas líquidas presentes em correntes de fluidos;
- Desgaste por Cavitação – associado à formação e implosão de bolhas gasosas em correntes de fluidos, na interface líquido - metal, devido à variação súbita de pressão ao longo do percurso;
- Desgaste por Adesão ou Fricção – resultante da fabricação metal - metal, quando superfícies ásperas deslizam entre si;
- Desgaste Corrosivo – que envolve a ocorrência de reações químicas superficiais no material, além das ações mecânicas de desgaste;
- Desgaste por impacto – ocasionado por choques ou cargas aplicadas verticalmente sobre a superfície.

Estima-se que quase 50% dos problemas industriais de desgaste estão associados ao desgaste por abrasão. Ao mesmo tempo, pode-se salientar que a solda de revestimento tem como um dos maiores campos de aplicação a prevenção, minimização e recuperação de peças e componentes sujeitas ao desgaste por abrasão, e as formas de erosão abrasiva, que são similares ao desgaste por abrasão.

Como o desgaste abrasivo é um fenômeno complexo, no qual partículas ou asperidades duras penetram na superfície dos componentes mecânicos, gerando perda de matéria e resultando em gastos avaliados entre 1 a 5% do PIB [1, 2]. A grande maioria dos materiais utilizados em aplicações que requerem elevada resistência ao desgaste são do tipo polifásicos. Esses são constituídos, normalmente, de uma fase dura com características próximas às dos materiais cerâmicos, envolvida por uma matriz dútil.

O estudo desses materiais tem mostrado, que o tamanho, a distribuição, a dureza, a ductilidade, a tenacidade e a fração volumétrica das fases presentes são parâmetros determinantes no desenvolvimento tribológico [3, 4]. Na medida em que esses parâmetros são alterados, os mecanismos de desgaste, quais sejam: microsulcamento, microcorte e microlascamento podem ser modificados.

DESGASTE POR ABRASÃO

Definição Geral

Ocorre quando partículas não metálicas escorregam sobre partes metálicas, acompanhada de forte pressão, ocasionado por deslocamento ou por amassamento, a retirada do metal. Tais abrasivos, podem ser representados por: Vegetais ou Minerais.

As características e dimensões dos corpos ou partículas estranhas e a maior ou menor pressão de escorregamento ou esmagamento sobre as superfícies abrasadas determinam a classificação da abrasão e as formas como deve ser combatida.

No combate à abrasão não é suficiente empregar materiais mais duros do que os materiais abrasivos, como a melhor solução. É necessário, também, levar em consideração os elementos que compõem o metal sujeito à abrasão e o tamanho dos respectivos grãos, como as causas, muitas vezes de importância decisiva. Um exemplo disto é:



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

- Uma peça feita de ferro fundido Branco quando exposto a ação de um abrasivo tipo areia, sofrerá um desgaste mais acentuado do que uma peça feita em carboneto de tungstênio. Isto se explica porque o carboneto de tungstênio é muito mais duro do que a areia e suporta a sua ação. O Ferro Fundido Branco é constituído de carboneto de ferro (cementita Fe_3C) mais dura do que a areia, porém é desgastado mais rapidamente do que o carboneto de tungstênio, por conter Perlita que é mais mole do que a areia.
- Ligas de aço com 50Rc de dureza, mas de granulação grossa, quando sujeitas à um jato de areia, oferecerão maior resistência ao desgaste, do que se fossem compostas de um “Aço Rápido”, a base de tungstênio. Apesar de possuírem uma dureza de 60Rc, estas ligas, pequeninas partículas de tungstênio, não conseguem enfrentar a ação deslocadora dos grãos maiores de areia. Assim, podemos afirmar que nem somente a dureza é ponto decisivo para se escolher ligas resistentes à desgastes por abrasão.

Devido às diferenças importantes entre os diversos tipos de abrasão, encontra-se ainda grande dificuldade na sua classificação e inclusive a terminologia não é precisa. Dentre as classificações, a mais utilizada é a proposta por Avery. Tal classificação baseia-se na configuração mecânica atuante. Segundo essa classificação, os processos abrasivos podem ser divididos em duas categorias:

- abrasão a dois corpos
- abrasão a três corpos

A abrasão a dois corpos se produz, quando partículas abrasivas fixas ou asperidas dura são animadas de movimento relativo em relação à superfície em estudo. A abrasão a três corpos, por sua vez, representa a interposição de partículas abrasivas livres entre duas superfícies animadas de movimento relativo. Ressalta-se que, muito embora os casos de abrasão a três corpos sejam mais comumente encontrados, sendo inclusive uma etapa na evolução do processo a dois corpos, a grande maioria dos estudos dedicados à abrasão reproduzem a configuração a dois corpos.

Tipos de Abrasão

- Abrasão por Goivagem
- Abrasão por Moagem ou a Alta Pressão
- Riscamento ou a Baixa Pressão

Abrasão por Goivagem

É o desgaste que ocorre partículas abrasivas grosseiras e de grandes dimensões, principalmente dotadas de regiões pontiagudas cortantes com dureza maior do que a parte metálica que está que está sendo desgastada. Pode acontecer quando há um contato entre as partes, com pressões mais ou menos violentas e repetitivas.

É possível acontecer com fracas ou fortes velocidades. Fraca quando manuseia partículas com tamanhos acima de 20 cm e forte, quando opera partículas com tamanho até 10 cm. Exemplo de partes que sofrem desgaste por abrasão por Goivagem: Dentes de caçambas que trabalham em lugares onde há areia, rochas ou argila.

É o ensaio que envolve a ação de materiais abrasivos geralmente com dimensões grandes, sob condições de altas tensões e envolvendo impacto. Estes fatores propiciam a penetração mais profunda do abrasivo na superfície desgastada, com a formação de sulcos profundos. Este tipo de abrasão ocorre por exemplo em moinhos de mandíbulas, em estreitas transportadoras de minério bruto quando há transferência do material por queda etc.. Os aços austeníticos ao manganês são em geral, as ligas preferidas para combater este tipo de abrasão;



Abrasão por Moagem ou Alta Pressão

É o desgaste que ocorre entre partículas abrasivas e metal ocasionando, o esmagamento do abrasivo ou não.

A prensagem da partícula contra o metal, pode ser exercida por pressões fortes ou médias, que provocam superfícies de pequenos fragmentos.

Neste tipo de abrasão, as partículas abrasivas poderão ser de dimensões médias, isto é, inferiores a 5 cm, ou pequenas, inferiores à 1cm.

A moagem, provocada por partículas médias, exerce a sua ação abrasiva superficial, arrancando fragmentos do metal, as partículas pequenas, por sua vez, provocam o desgaste superficial pelo deslocamento de pequenos fragmentos do metal.

A constituição do metal influi na classificação da “moagem”. Se é dúctil, terá uma abrasão que tira cavacos, se é frágil ou se torne frágil, haverá um deslocamento superficial de pequenos fragmentos.

É normal que, ocasionalmente, poderão ocorrer as duas modalidades ao mesmo tempo. Exemplo das partes sujeitas ao desgaste por “abrasão por moagem”. Caçamba de escavação ou carga, lâminas niveladoras, arados raspadores e peneiras vibratórias.

É o tipo de desgaste onde o material abrasivo é fragmentado durante o contato abrasivo com a superfície desgastada. As tensões envolvidas são portanto superiores à tensão de fragmentação do abrasivo, promovendo ainda uma maior penetração do abrasivo na superfície, maior deformação plástica das fases dúcteis e fratura das fases frágeis presentes no material. Tipicamente, esta forma de abrasão ocorre em equipamentos de moagem de minérios, que envolvem partículas de pequeno tamanho, em mancais contaminados com areia etc. Para prevenir este tipo de abrasão, empregam-se normalmente ferros – fundidos ou aços – liga, que possuam maior tenacidade do que no caso anterior;

Abrasão por riscamento ou a baixa pressão

Tipo de abrasão na qual a superfície desgastada é riscada pelo material abrasivo, que ao penetrar na superfície, promove a remoção de material. As tensões impostas sobre as partículas abrasivas, são inferiores à tensão necessária para a fragmentação do abrasivo. Tipicamente, a abrasão a baixa pressão ocorre na superfície dos componentes de equipamentos, que direta ou indiretamente manuseiam terras, areias ou minérios, tais como máquinas agrícolas, equipamentos de escavação, transporte, da indústria de açúcar e álcool, de mineração, siderúrgicos etc. Para prevenir a ocorrência deste tipo de abrasão, empregam-se normalmente ferros fundidos com alto teor de cromo (martensíticos ou austeníticos), às vezes contendo outros elementos de liga, além de ligas a base de cobalto – tungstênio – carbono.

Fatores que aceleram desgastes por abrasão:

- a) tamanho da partícula (grossa, fina e média);
- b) formato da partícula (angulares, redondas);
- c) dureza da partícula;
- d) dureza do metal base;
- e) acabamento do metal base;
- f) velocidade e frequência do contato entre a partícula abrasiva e metal base;
- g) tamanho de grão da estrutura do metal base;
- h) ângulo de incidência da partícula do metal base.



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

Normalmente é sabido que partículas de grande tamanho provocam desgastes por abrasão acompanhado de impacto, isto leva a termos um desgaste acentuado que na verdade foi muito mais por impacto do que abrasão.

Partículas médias, dependendo da dureza e formato são menos agressivas, porém, partículas finas são mais abrasivas ocasionando abrasão muito incidente. Toma-se com exemplo o cimento, talco e outros que são compostos de partículas finas e altamente abrasivas. É claro que a dureza destas partículas também são significativas. A forma dos materiais abrasivos varia desde arredondados até ângulos vivos.

Os minerais mais duros possuem formações agudas, enquanto que em contraposição, os mais dúcteis apresentam formações arredondadas. Quanto mais agudas forem as arestas, maior será a ação abrasiva também, no caso de impactos ou pressões fortes, as formas agudas podem penetrar no metal, provocando um desgaste por “Goivagem” ou fratura da peça.

Mesmo no caso de areias, aquelas que forem sujeitas a um processo mais longo de rolamento, terão formas arredondadas, menos nocivas que as areias agudas.

Recomenda-se assim, observação cuidadosa dos materiais abrasivos, pois, a ocorrência das formas citadas, contribui na escolha das ligas protetoras de adição.

A dureza de uma liga metálica é de grande importância na resistência oposta a uma ação abrasiva. As maiores durezas correspondem à resistências maiores.

Logicamente, os abrasivos menos duros terão ação menos violenta. Com referência às ligas metálicas, são encontradas com facilidade, tabelas de dureza das várias alternativas. Também as diversas escalas de durezas com referência aos abrasivos, quando é possível conjugar proteções através de adições de películas metálicas, com finalidade de melhor proteger a peça em ação de trabalho. Quando é possível, unir dureza maior com uma granulação adequada, serão atingidos os mais elevados índices de resistência à abrasão.

É importante quando se proteger contra abrasão, preparar a área de tal forma a deixá-la a mais lisa possível, sem protuberâncias, e nem rugosidades, pois, a abrasão inicia-se e acentua os desgastes nesta região.

Por isso, ligas de alto teor de carboneto de tungstênio e cromo, além da elevada dureza, apresentam depósitos lisos e brilhantes compatíveis com estas características mencionadas. É natural que, quanto maior a velocidade e a frequência do contato da partícula com o metal, levando-se em conta o já mencionado, maior será ação abrasiva e conseqüentemente o desgaste.

Além de tudo o que foi citado, resta relembrar que o tamanho de grão do metal é importante, pois, quanto menor maior será a tendência a ser desgastado.

Citaremos alguns pontos de interesse:

- A maioria das rochas (quartzo, feldspato, mica) é composta de sílica e alumínica (minerais muito duros). Ex.: Areia, saibro, basalto, argila.
- Carboneto (calcáreo), que entram em boa parte na composição das rochas sedimentares, são produtos macios. Entretanto, estão, às vezes misturados às areias e argilas.
- Os minérios são compostos de óxidos, carbonetos e sulfetos. Os óxidos são geralmente, duros (bauxita, hematita), enquanto que os sulfetos são, geralmente, macios (galena ou sulfetos de chumbo).
- As rochas combustíveis (hulha, turfa) e os fosfatos, contém proporções mais ou menos elevadas de sílica e alumínica.

Escala Mohs

DUREZA: MINERAIS TÍPICOS	CONSEQUÊNCIAS PRÁTICAS	MATERIAIS GERALMENTE ENCONTRADOS
1- Talco 2- Gipsita	Riscado com a unha	Grafita - Turfa Esteadita – Antracita
3- Calcita 4- Fluorita	Riscado pelo Aço	Mármore Branco de Carrara- Hulha Saibro - Calcário Areia - Calcário Cal – Bauxita (Alumina Hidratada) - Hematita (Minérios de Ferro)
6- Ortoclasita 7- Quartzo	Não riscado pelo Aço Não risca o vidro	Grés (Quartzo + sílica + Mica) Rutilo - Magnesita - Granito dos Alpes Gneiss dos Alpes – Cimentos – Areias de quartzo
8- Topázio 9- Corindo 10- Diamante	Riscam o vidro	Xistos (Quartzo + Mica + Silicatos) Alumina Pura

Dureza de alguns outros minerais:

- Hematita – 5 à 6
- Cal – 4,5
- Magnésio – 6,5
- Rutilo – 6 à 6,5

DESGASTE POR EROSÃO

É o desgaste provocado por partículas com dimensões não superiores à 25 mm, sem pressão. Estas partículas podem agir por movimentação própria, quando em um plano inclinado, ou conduzidas por um meio gasoso, líquido.

- **Meio Gasoso** – quando as partículas sólidas ou gotas líquidas são carregadas por ar ou gás. Exemplo: ciclones, pás de ventiladores, dutos de transportes pneumáticos, etc.
- **Meio Líquido** – as partículas sólidas ou gotas líquidas, quando carregadas por água ou outro líquido qualquer. Exemplo: roletes de draga, rodas de turbinas hidráulicas, bombas para lama de alumínio, instalações de lavagem de areia, etc.

Quando o desgaste da superfície metálica ocorre pela ação cortante de partículas em movimento carregadas por um fluido, o fenômeno é denominado **erosão por colisão**. Em geral a resistência dos materiais a



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

este tipo de desgaste varia com o ângulo de colisão ou de incidência das partículas cortantes sobre a superfície de desgaste.

Um outro tipo de desgaste ocorre como resultado de um fenômeno presente em válvulas e bombas usadas na movimentação de fluidos: é a chamada **erosão por cavitação**, resultante de fluxo turbulento. As bolsas de ar criadas pela turbulência explodem junto à superfície metálica e as ondas de choque resultante arrancam partículas da superfície. É o caso típico de bombas de alta velocidade e de válvulas sujeitas a grandes variações de pressão.

DESGASTE POR CAVITAÇÃO

Quando a pressão e temperatura locais em um líquido atingem valores críticos, bolhas de vapor (e eventualmente de gás, dissolvido anteriormente no líquido) são formadas. Com a mudança rápida das condições de equilíbrio, por exemplo em fluxo do líquido em alta velocidade, estas bolhas entram em colapso: rapidamente, quando se trata de vapor, mais lentamente tratando-se de gás ou mistura de ambos.

A interação desta implosão, chamada cavitação, com uma superfície sólida em sua proximidade foi objeto de intensa pesquisa. Desde a sua primeira observação, por volta de 1894, os danos causados pela cavitação – e frequentemente identificados com ela – exigiam uma explicação.

A primeira teoria baseia-se em cálculos de Lord Rayleigh, de 1917, que admite, supondo as cavidades perfeitamente esféricas existindo em um líquido incompressível, que a pressão gerada pelas ondas de choque no colapso de uma bolha era infinitamente grande. Análises posteriores ainda chegam a pressões de onda de choque da ordem de 300 a 2200 atmosferas.

Apesar da teoria de Lord Rayleigh receber algum esforço pela hipótese da translação da cavidade, durante a sua implosão, na direção da superfície sólida e, conseqüentemente, a aproximação de pressões mais elevadas, pesquisas posteriores evidenciam a formação de um microjato de líquido através da bolha assimétrica em colapso. Já sugerida, em 1944, por Kornfeld e Suvarov, a formação de microjatos foi experimentalmente comprovada por Naudé e Ellis em 1961, na observação de bolhas geradas por faíscas elétricas. Dos danos causados por estas bolhas em uma superfície de alumínio concluiu-se que as pressões correspondentes excederam aquelas provenientes da compressão do conteúdo da bolha. A observação direta, através de cinematografia de alta velocidade, permitiu avaliar a velocidade do microjato produzido, situando-se esta entre 100 e 500 m/s. Mostrou também que após o colapso de uma bolha era formada outra, tendo a primeira como núcleo. Assim uma sucessão de bolhas era gerada numa frequência que dependia basicamente da velocidade do fluxo do líquido e da pressão hidroestática.

DESGASTE POR ADESÃO (FRICÇÃO)

Definição

É o desgaste provocado entre duas superfícies metálicas em contato direto, que deslizam, rolam ou se esfregam entre si.

Qualquer destas ações podem provocar a retirada da película de óxidos que revestem os metais, pondo em contato direto os seus átomos que compõe. Uma pressão normal será, então, suficiente para fazer com que as poderosas forças de atração atômica se manifestem, provocando uma espécie de soldagem superficial localizada.

A continuação do contato e pressão entre as partes, provocarão o arrancamento de fragmentos superficiais de um dos metais.

Estes fragmentos, penetrando na outra superfície metálica, promoverão absorção de mais metal e conseqüentemente imobilização em gripamento das partes em contato.



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

Se a constituição dos metais em contato não permitir que tal possa acontecer, o resultado será que um dos metais, ou os dois, sejam literalmente consumidos, exigindo reparação ou substituição.

Para a situação do desgaste adesivo, uma expressão quantitativa foi desenvolvida, em função dos fatores do processo. Esta expressão é dada por:

$$V = \frac{KLD}{H}$$

Com:

V = volume do material desgastado;

L = carga aplicada;

D = distância percorrida no escorregamento;

H = dureza do material;

K = coeficiente de desgaste por aderência.

Tipos de desgastes por fricção – (Adesão)

a) Por rolamento

São desgastes onde as partes são fixas, sendo uma girando sobre a outra. Exemplo: Rodas de pontes rolantes, rodas de trem, roletes de trator.

b) Por deslizamento

São desgastes que ocorrem entre partes móveis entre si, não ocorrendo rolamento por parte de uma delas. Exemplo: Pistões, cilindros, eixos, mancais, sapatas, etc.

c) Por roçadura

São desgastes onde ocorrem a goivagem de uma das partes pela outra, formando canais. Exemplo: Pinos, centrais de guindastes, navalhas de corte, etc.

Desgastes por Fretagem

É o desgaste que ocorre quando duas superfícies metálicas em contato, sofrem pequenos movimentos oscilatórios. Alguns fragmentos são arrancados da superfície por Adesão e podem ser impedidos de escaparem pela pouca facilidade de escorregamento e expulsão.

Os fragmentos do desgaste, podem contudo, permanecer agarrados na superfície, fazendo com que a superfície fique fosca, ou pode fluir pela junta resultando na perda de metal.

Estes fragmentos estão muitas vezes em estado de elevada oxidação e se mostram como um depósito vermelho cor vermelho-amarronzado em ligas ferrosas e preto em ligas de alumínio.

Normalmente, desgaste por fretagem são comuns em juntas, assentos estacionários que agem sob ação de vibrações, mancais e áreas de assentos em eixos.

O índice de desgaste proveniente do fenômeno de adesão, tende a cair após certo tempo, devido à formação de uma zona tampão pelos fragmentos do desgaste, e um outro subsequente desgaste por fadiga e abrasão dará continuidade ao fenômeno. um aumento na aplicação da carga, pode algumas vezes cessar o processo de fretagem através de prevenção de certo movimento relativo da superfície.

A fretagem pode ser reduzida ou eliminada pela mudança no projeto ou retirando as vibrações, mas quando isto for impraticável, outros métodos para reduzir o desgaste deverão ser utilizados.



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

Proteção temporária poderá ser encontrada através da selagem ou lubrificação adequada, que reduz a tendência ao atrito.

Isto pode ser conseguido através da aplicação de revestimentos especiais na região, usando metais dissimilares para manterem contato entre si, afim de reduzir a fricção entre as superfícies.

Revestimentos com características de manter empregnado na superfície camadas de lubrificantes, tem se mostrado meficiente.

Revestimentos através de fosfatização, nitretação, sulfatação em aços e anodização em alumínio, são próprios para estas situações.

Metalização por alumínio e a aplicação de camadas de borracha, tem sido adotado em algumas situações para separar superfícies foscas e retirar movimentos relativos entre elas.

Fatores que aceleram desgaste por fricção (adesão)

- a) Lubrificação – Meios anti – fricção e coeficiente de deslizamento;
- b) Dureza e tipos de metais;
- c) Relação das áreas em contato;
- d) Pressão e velocidade entre as partes em contato.

a) Lubrificação

O uso de lubrificantes adequados é a defesa mais eficaz para reduzir a incidência de fricção entre partes metálicas. Pode-se empregar:

- 1) Graxa
- 2) Óleo (com ou sem aditivos)
- 3) Lubrificante sólido, como grafite, bissulfeto de molibdênio, etc.

Quando partes em contato trabalham sem lubrificação, estarão submetidas a uma fricção maior do que a possuírem a mesma composição metalúrgica.

Partes de constituições diferentes, com composições superficiais diferentes, sofrerão, em menor proporção, o desgaste friccional.

Os coeficientes de deslizamento são, também, fortemente dependentes das características de usinabilidade e de perfeição com que a usinagem é executada.

É natural que certas ligas metálicas são mais eficientes quanto ao seu coeficiente, sofrendo na ação de trabalho, menor desgaste.

Algumas ligas são citadas como exemplo:

Mancal de Ferro Fundido – eixo de aço (com lubrificação), pequena perda de eficiência por fricção.

Mancal de Bronze – eixo de aço (com lubrificação), pequena perda por fricção.

Rolamento de esferas

Alumínio – Alumínio (sem lubrificação) gripamento.

Aço doce – Aço doce (sem lubrificação) gripamento.

b) Dureza e tipos de metais

Os revestimentos destinados a conferir proteção contra esta forma de desgastes devem possuir resistência a gripamentos ou ao deslocamento de pequenas partículas superficiais.

Para isto, devem dedicar a maior atenção à limitação do aquecimento e às possibilidades de ocorrência simultânea de outros desgastes, como: erosão e corrosão.



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

O desgaste por fricção para ser combatido com máxima eficiência, requer duas propriedades antagônicas:

- 1 – Dureza, para resistir ao desgaste propriamente dito.
- 2 – Macieza, para possuir a indispensável plasticidade.

Para resolver esta aparente incongruência, o revestimento protetor deverá possuir elementos duros e macios, reunidos em uma estrutura de granulação fina, para atender o seguinte:

A) Resistência ao Gripamento

a) Duas ligas ferrosas:

Evitar ligas de grande afinidade, capazes de se “soldarem” em estado sólido. Para isto, não devem ser usadas ligas austeníticas ou ferríticas.

- 1) Os Ferros Fundidos possuem superfícies usinadas com maior capacidade de deslizamento que os aços. Isto é devido não só a presença de grafita em qualquer forma, como à sua estrutura não homogênea, que não possui afinidade com a estrutura martensítica dos aços temperados, com as quais geralmente são postas em contato.
- 2) As estruturas intrinsecamente melhor preparadas para enfrentar a fricção são obtidas pelo revenimento de ligas martensíticas (bainita, sorbita, troostita ou perlita final).
- 3) Quanto maior for o risco de afinidade cristalina entre as peças em contato, maior deverá ser a camada superficial deformada por martelamento, etc.
- 4) Os elementos de maior incidência na resistência à fricção são:

GRAFITA: esferoidal, lamelar podem atuar:

- formando uma camada superficial absorvida;
- facilitando a absorção de moléculas lubrificantes;
- constituindo-se em um lubrificante poderoso.

A ação mais eficiente da grafita é obtida quando ela se apresenta uniformemente distribuída e com menor granulação possível – a porcentagem mais adequada é 3,2 à 3,3%.

CROMO: pela formação do óxido de cromo, que é de grande utilidade em aços especiais.

b) Duas ligas não ferrosas

Como resultado de uma melhor compreensão das possibilidades de ocorrências de indesejáveis soldagens sólidas, os metais são classificados aos pares, em função das suas maiores ou menores compatibilidade em formar compostos intermetálicos ou formarem soluções sólidas.

FERRO E ESTANHO: Formam compostos intermetálicos = Bom resultado.

CROMO E PRATA: Não são solúveis = Bom resultado.

CROMO E FERRO: São solúveis = Perigoso, podendo ocasionar um gripamento.

FERRO E ALUMÍNIO: São solúveis: O gripamento pode ser evitado, quer substituído o Al por uma liga Al Si, quer efetuando um tratamento de sulfatação do ferro.

NÍQUEL E FERRO: São solúveis = Somente quando em ligas auto fluxantes que contém Ni, Cr, B, Si e a capacidade de deslizamento é melhorada.

c) Melhores tipos de superfícies metálicas:

Algumas considerações:

- Duas superfícies cilíndricas postas a girar em contato uma dentro da outra, em regime hidrodinâmico, devem possuir as melhores condições possíveis.



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

- Quando o deslizamento ocorrer em superfícies em contato no sentido plano é necessário que em pelo menos uma delas, mantenha em suas imperfeições, reservas de lubrificantes, capazes de permitir o impulso inicial.
- A usinagem deve ser sempre feita na direção do deslizamento.

A) Resistência a deslocamentos superficiais

Para este fim, é necessário evitar as deformações de camadas inferiores, causadas por pressão, choques, fraturas ou encruamentos excessivos.

- a) Determinando as tolerâncias.
- b) Prevendo as deformações resultantes de dilatações.

É importante lembrar que o coeficiente de dilatações de um corpo sólido, é representado pelo aumento unitário de comprimento do corpo, com a elevação de 1°C de temperatura.

Em geral, quanto mais baixo for o ponto de fusão de um metal, maior será o seu coeficiente de dilatação.

- c) Cuidando das dilatações da fibra neutra.
- d) Não permitindo que duas arestas se encontrem, quebrando as quinas.
- e) Escolhendo um dos metais com um módulo de elasticidade baixo.
- f) Levando em consideração a resistência à fadiga das camadas superficiais.

Relação das áreas em contato

Entre duas superfícies metálicas em contato, com ausência de aquecimento excessivo, a superfície de menor dimensão é a que se deformará por estiramento e em profundidade com maior rapidez, possuirá ainda, a maior microdureza e a película oxidada mais sólida.

Consequentemente, a maior superfície é a que sofrerá o maior desgaste, pois teve o estiramento menos rápido.

Assim sendo, sempre devemos escolher combinações de conjuntos metálicos quando em contato, segundo:

- o cursor, ou menor superfície, com uma estrutura mais macia.
- A superfície de deslizamento, isto é a menor superfície com estrutura mais dura.

Pressão e velocidade entre as partes em contato

A película de óxido existentes nas superfícies metálicas não será retirada, até uma determinada relação pressão-velocidade.

Entre elas o contato será, então, na base óxido-óxido, com uma resistência muito maior à fricção.

Um exemplo disto, um aço revestido com cromo, empregado na fabricação de matrizes de embutimento.

Ultrapassada a relação permitida, ocorrerá a ruptura da película e óxidos, ocasionando o contato direto de estruturas cristalinas, com a conseqüente manifestação da atração atômica, soldagem superficial e gripamento final.

DESGASTE CORROSIVO

Definição

É um desgaste gradual e contínuo provocado por um meio circunvizinho, ocasionado por reação química direta ou eletro – química, ou indireta, pelo meio ambiente.

Fatores que aceleram desgastes por corrosão



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

- a) Tipo de corrosão
- b) Concentração do corrosivo
- c) Estado do corrosivo
- d) Temperatura do corrosivo

a) Tipo do corrosivo

- 1) Corrosão por agentes secos
- 2) Corrosão por agentes líquidos
- 3) Corrosão química direta
- 4) Corrosão eletro – química
- 5) Corrosão pelo meio ambiente

1) Corrosão por agentes secos

A corrosão por agentes secos ocorre, naturalmente na ausência de líquidos ou acima do ponto de condensação, incluindo gases ou vapores. Geralmente, está relacionada com temperaturas elevadas.

Poeira contida na atmosfera, alimentos contribuem para aumentar a ação corrosiva, que dificultando a aeração das peças atacadas, depositando sobre as mesmas substâncias higroscópicas que aceleram a corrosão.

2) Corrosão por agentes líquidos

A corrosão por agentes líquidos se manifesta por meio de líquidos e em temperaturas abaixo do ponto de condensação.

Águas do mar, águas naturais, constituem os líquidos, que contém agentes corrosivos, tais como gases dissolvidos, sais dissolvidos, matérias orgânicas e outros mais que influem no processo corrosivo.

3) Corrosão química direta

A corrosão química direta, ocorre em razão de uma reação química entre a superfície metálica e agentes não metálicos. Pode ocorrer em temperaturas normais, por meio de ataques ácidos ou alcalinos ou em altas temperaturas, por intermédio de vapores.

4) Corrosão eletroquímica

A diferença de potencial existente entre um anodo e catodo, através da presença de um eletrólito, ácidos ou água do mar, com a passagem de uma corrente elétrica, provocam uma corrosão conhecida como: **GALVÂNICA OU ELETROQUÍMICA.**

A corrente elétrica desloca átomos do metal no anodo e os transporta através da solução líquida, para o catodo, provocando a corrosão do primeiro em benefício do segundo.

Uma escala galvânica oferece o posicionamento de cada metal com relação aos demais.

b) Concentração do corrosivo



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

É um fator importante, pois certos agentes quando no estado concentrado são menos agressivos, como por exemplo o ácido sulfúrico (H_2SO_4). Em geral, isto é uma exceção, pois, quanto maior é a concentração, maior será a tendência de aumentar a corrosão.

Dependendo do metal base, a “passividade” é um fator muito importante a considerar.

c) Estado corrosivo

Podemos encontrar na natureza, os agentes em três formas:

- 1) Estado sólido
- 2) Estado líquido
- 3) Estado gasoso

No estado sólido, o agente é menos agressivo por não ter um contato perfeito com o metal, enquanto que o líquido mantém este contato, atacando e corroendo.

O gasoso é o mais agressivo, pois, atinge locais estratégicos, como microfissuras ou mesmo reagindo com outras substâncias no meio ambiente, formando outros compostos químicos que agredem o metal. Exemplos: CO_2 , SO_2 , SO_3 , NH_3 , NO_2 , H_2S . Destes, o mais perigoso é o SO_2 , produzido pela queima de combustíveis, que combina com ar e umidade, formando H_2SO_4 , ácido sulfúrico.

d) Temperatura do corrosivo

O calor é um fator que acelera o desgaste por corrosão, como em todos outros tipos de desgastes.

Outros tipos de corrosão que podem ocorrer são:

- 1) Corrosão generalizada
- 2) Corrosão localizada (Pitting)
- 3) Corrosão sob tensão
- 4) Corrosão por fadiga
- 5) Corrosão intergranular

DESGASTE POR IMPACTO

Definição

É um desgaste provocado por choques ou cargas aplicadas verticalmente sobre superfícies metálicas. Estas cargas podem ser resultantes de martelamento, pancadas, apiloamentos ou outros quaisquer meios de concentração de esforços.

Estas cargas aplicadas em velocidade e em áreas localizadas, podem provocar o desgaste de um metal por trituração, pulverização, quebra, fragmentação, lascamento ou escamação.

Ao contrário dos outros tipos de desgastes, cuja ação depende das propriedades superficiais dos metais, o impacto tem sua atuação diretamente relacionada com as propriedades dos metais abaixo das suas superfícies.

Exemplo: Num sistema de jato de areia, a passagem da partícula pelo bico, provoca desgaste por abrasão, porém, a medida que a partícula toca o metal à ser jateado, ocasiona um desgaste por impacto.



Fatores que aceleram desgaste por impacto

- a) Frequência do impacto
- b) Velocidade do impacto
- c) Dureza do metal (dos metais)

Quanto maior a frequência e a velocidade do impacto, maior será o desgaste, principalmente quando a partícula tiver maior dureza e for angular.

Com relação a dureza do metal (dos metais), podemos afirmar que há duas formas de resistência ao desgaste.

- a) Empregando materiais que possuam a ductilidade suficiente para absorver o impacto em lugar de ele tentar se opor. Materiais com estas características, ao receberem uma pancada ou uma carga concentrada, deformam-se por expansão, aumentando a área de contato. Desta forma, a carga unitária é diminuída, fazendo com que a resistência à ruptura, sob compressão, não seja ultrapassada. Este processo é o mais eficaz e hoje largamente usado.
- b) Empregando materiais duros e resistentes do que os que produzem choques. Desta forma, o desgaste se transfere para o outro material, permanecendo inalterado o material duro. Um exemplo típico do que foi mencionado, é o aço manganês austenítico, que é dúctil e absorve impacto encruando pelo trabalho a frio, aumentando sua dureza e permanecendo tenaz assim mesmo.

Desgastes Mistos

Em geral quando se pensa em revestir contra desgastes, após uma análise criteriosa das causas e fatores, a solução somente deverá ser dada quando se tem conhecimento de qual é o desgaste de maior incidência no caso.

Para um diagnóstico preciso, é possível adotar o sistema de atribuir valores a cada uma causa.

Apode ser em porcentagem ou mesmo unidade simples, o que é importante neste caso, é conseguir distinguir quais os maiores causadores dos desgastes para se procurar a solução através de metal de adição que atenda à solicitação.

Quando se procura solução para abrasão + impacto, torna-se simples buscar consumíveis, pois, grande parte das que depositam carbonetos mistos de cromo e nióbio, de uma certa forma, são compatíveis para ambos os desgastes. Neste caso, a abrasão se mostra como sendo de maior incidência.

Nos casos onde o impacto vem acompanhado de abrasão, ligas mais tenazes são indicadas, especificamente aço manganês austenítico, que também resiste à abrasão, considerada como desgaste auxiliar, neste caso.

Fricção e impacto, pode ser analisado considerando-se os mesmos valores que foram dados ao caso anterior, sempre salientando que os consumíveis para abrasão e fricção são quase os mesmos, apenas incluindo para fricção as ligas de bronzes que não são recomendados para abrasão.

Para situações onde encontramos desgastes por abrasão + fricção + corrosão, quanto aos dois primeiros, fica fácil buscar consumíveis, pois, como já dito, as ligas são quase as mesmas, apenas é necessário lembrar que a corrosão como desgaste auxiliar, pode ser atenuada com ligas com alto teor de carboneto de cromo, sendo que o cromo é o elemento indicado para nos inoxidáveis proteger contra abrasão.

De uma certa forma, os desgastes mistos não devem atemorizar os profissionais de manutenção, pois, se analisarmos criteriosamente os casos, são sempre com consumíveis usuais do mercado.

Salienta-se aqui que, o uso de camadas de almofadas ajudam não só a minimizar problemas de descompatibilidade de solda e metal base, mas também onde ocorrem desgastes mistos.



PROPRIEDADES MECÂNICAS DO METAL QUE INFLUEM NO DESGASTE

Módulo de elasticidade – a resistência ao desgaste de metais puros aumenta diretamente com o módulo de elasticidade. Para os aços perlíticos, martensíticos ou revenidos, essa relação não é válida, porque o tratamento térmico não afeta o módulo de elasticidade.

Dureza – o desgaste de metais puros é diretamente proporcional à sua dureza. Nas ligas, a proporcionalidade é válida até determinado valor da dureza do material, a partir do qual a resistência ao desgaste cresce com menor intensidade, podendo até mesmo vir a diminuir após certo valor.

Dureza superficial – na superfície desgastada existe um grau de encruamento e, conseqüentemente, um aumento de dureza no local. A resistência à abrasão pode ser considerada como proporcional a essa dureza, chamada de dureza máxima.

Propriedades de escoamento – análises de tensão/deformação mostraram que, para metais puros, também vale a relação

$$\vartheta = A \cdot \varepsilon^\eta$$

onde:

ϑ = tensão de escoamento

A = constante

ε = deformação verdadeira

η = coeficiente de encruamento

Estudos mostram que a resistência à abrasão é proporcional à dureza (ou dureza superficial) e varia exponencialmente com a tenacidade.

Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

Variáveis que afetam os mecanismos de desgaste abrasivo e adesivo

Mecanismo de desgaste	Variáveis que influem		Velocidade de desgaste	
ADESIVO Deformação superficial Nucleação da trinca Propagação da trinca	Força de atrito	Tangencial (↑)	↑	
		Normal (↑)	↑	
	Microestrutura	Monofásica (solução sólida)	↑	
		2ª fase	↑↓	
	Dureza do abrasivo (↑)		↑	
	Tamanho do abrasivo		↑↓	
	Forma do abrasivo	Arredondada	↓	
		Angular	↑	
	Velocidade relativa (↑)		↑	
	Pressão		↑	
	Umidade		↑	
	ABRASIVO Formação de sulcos na superfície por deformação plástica Remoção de material como pequenos cavacos (40%) Remoção de material por cisalhamento (60%)c	Módulo de elasticidade (↑)		↓
		Dureza superficial (↑)		↓
Propriedade de escoamento (↑) (encruamento)		↓		
Propriedade de fratura (↑) (tenacidade)		↑		
Estrutura metalúrgica		% C (↑)		↓
		% carbonetos (↑) (s/ choque)		↓
		Martensita revenida (até 230°C)		↓
		Martensita revenida acima de 350°C-50HRC		↑
		↑ colônia de perlita – 50 HRC		↓
		Bainita – 50 HRC		↗
Ferrita com carboneto		↑		
Austenita com carboneto		↓		

Obs: ↑ = aumenta ↓ = diminui ↗ = aumento intermediário

Estrutura Metalúrgica

Influência no desgaste

O teor de carbono aumenta a resistência ao desgaste dos aços perlíticos com o aumento do endurecimento.

Os carbonetos aumentam a resistência ao desgaste com o aumento na quantidade, distribuição uniforme e forma mais adequada. Não são adequados, porém, quando existe o choque associado ao desgaste por abrasão.

A martensita não revenida ou revenida abaixo de 230°C é a estrutura que melhor resiste ao desgaste na temperatura ambiente. Se o revenido for acima de 350°C, a perlita apresenta um resultado melhor para a mesma dureza (50HB). Uma estrutura bainítica da mesma dureza e composição química resiste melhor ao desgaste que uma estrutura martensítica nas mesmas condições.



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

A perlita aumenta a resistência à abrasão com o aumento das colônias de perlita e com o aumento da fração volumétrica de cementita. Para a mesma dureza, a perlita lamelar resiste melhor que a esferoidizada.

A resistência ao desgaste da ferrita aumenta com o aumento dos carbeto dispersos na matriz. Um aço austenítico, com mesma fração de carbeto que um que um ferrítico, resiste melhor ao desgaste.

REVESTIMENTOS DUROS RESISTENTES AO DESGASTE

A principal característica deste tipo de revestimento que são aplicadas para resistirem ao desgaste é a sua elevada dureza.

Alguns dos materiais aplicados serão descritos a seguir, juntamente com os processos de aplicação.

Materiais para Recobrimento Duro

Recobrimento duro é o nome dado ao processo que consiste em produzir por soldagem uma camada dura e resistente ao desgaste na superfície da peça sujeita a desgaste. O processo pode ser aplicado a peças novas e também e também na recuperação de peças desgastadas pelo uso. É um processo de aplicação simples, necessitando apenas das varetas das ligas de recobrimento e de uma chama oxiacetilênica ou de um arco elétrico. O processo tem a vantagem de poder ser aplicado a áreas localizadas da peça que sejam mais sujeitas ao desgaste.

As varetas dos materiais de recobrimento são fornecidas em dois tipos: revestidas, para soldagem a arco, e não revestidas, para soldagem oxiacetilênica. A soldagem oxiacetilênica produz depósitos mais uniformes e que podem ser melhor posicionados na peça, com velocidades de aquecimento e resfriamento relativamente baixas. Por outro lado, a soldagem a arco é um processo menos caro, mais rápido e se presta melhor à utilização de equipamentos automáticos. Os depósitos obtidos com arco elétrico em geral são mais grosseiros e apresentam maior tendência à formação de poros. Há também maior probabilidade de formação de trincas, em função dos gradientes de temperatura criados para altas velocidades de aquecimento e de resfriamento.

O material de recobrimento é fundido durante a soldagem e se espalha sobre o metal base, ligando-se com este e formando uma nova superfície, com uma camada que varia entre 1,5 mm a 6,0 mm. Apenas uma camada superficial da peça atinge a temperatura de fusão, o que evita uma contaminação muito acentuada do recobrimento pelo metal base, que diminuiria as propriedades de resistência ao desgaste da camada depositada.

O recobrimento duro pode ser aplicado à maioria dos metais não ferrosos. Por outro lado, com algumas exceções, não se recomenda o recobrimento de ligas não ferrosas com o ponto de fusão inferior a 1100°C. Os aços-carbono podem ser recobertos com relativa facilidade, em especial se o teor de carbono for inferior a 0,35%. A soldagem se torna mais difícil à medida que o teor de carbono aumenta, sendo que os aços de alto carbono e os aços ligados devem sofrer um pré-aquecimento e após recobrimento devem ser recozidos. Os aços inoxidáveis, os ferros fundidos e os aços rápidos também podem ser recobertos, utilizando-se técnicas adequadas na soldagem. Os moneis podem ser recobertos por soldagem, já o cobre, latões e bronzes apresentam maiores dificuldades em vista de seus pontos de fusão baixos e de sua alta condutividade.

O recobrimento duro é muito usado nas aplicações em que uma lubrificação regular contra abrasão seja impossível ou inviável, como em ferramentas de perfuração de poços de petróleo, equipamentos para a agricultura e para terraplenagem, ferramentas para mineração, válvulas de motores e equipamentos para a indústria química e petroquímica. O processo também é usado para ampliar a duração de peças que recebem lubrificação, tais como matrizes de conformação mecânica e áreas localizadas de órgãos de máquinas extremamente sujeitas a desgaste. Superfícies com recobrimento duro são em geral mais resistentes ao desgaste, ao calor, e à corrosão que superfícies cementadas ou temperadas por chama.

Além disso, áreas de difícil acesso em componentes grandes, praticamente impossíveis de serem submetidas a um tratamento térmico, podem receber um recobrimento duro. A técnica pode também ser empregada para a recuperação de componentes de equipamentos pesados sem a necessidade de desmontá-los.



Classificação dos Materiais para Recobrimento Duro

De acordo com o Metals Handbook, os materiais para recobrimento duro são classificados em cinco grandes grupos, em função do teor total de elementos de liga (além do ferro). Em geral, a resistência ao desgaste e o custo crescem com o número do grupo. A escolha de uma liga específica dependerá da aplicação e do tipo de soldagem utilizado.

As ligas do grupo 1A são aços de baixo teor de liga, quase sempre tendo cromo como principal elemento de liga. O teor total dos elementos de liga, incluindo o carbono, fica entre 2% e 6%. Estas ligas são empregadas freqüentemente como uma camada de base para um recobrimento duro com ligas de teor de liga mais elevado.

As ligas ferrosas do subgrupo 1B são semelhantes às do grupo 1A, porém com maior teor de elementos de liga (6% a 12%) e com teor de carbono até 2% ou mais. Muitos aços- ferramenta e alguns ligados fazem parte deste grupo.

Os materiais do grupo 1 apresentam maior tenacidade entre as ligas de recobrimento duro, executando-se os aços- manganês austeníticos. Possuem também melhor resistência ao desgaste que os aços de baixo e médio carbono, que são as ligas usualmente recobertas pelo grupo 1. São mais baratos que as outras ligas de recobrimento duro e muito empregados nos casos em que se necessita da usinabilidade e de apenas um aumento moderado da resistência ao desgaste.

As ligas do subgrupo 2A são ligas em que o principal elemento de liga é o cromo, com teor total de elemento de liga entre 12% e 25%. Algumas delas têm um certo molibdênio. Este grupo inclui ainda alguns não ferros fundidos de médio teor em liga. O molibdênio é o principal elemento de liga em quase todos os materiais do grupo 2B, que contam também com teores relativamente altos de cromo.

O subgrupo 2C, é constituído pelos aços- manganês austeníticos. Manganês é o principal elemento de liga, estando também presentes o níquel, para maior estabilização da austenita.

Classificação dos materiais para revestimento duro

Teor total de elementos de liga %	Elementos de liga principais
Materiais ferrosos de baixa liga 1A 2 a 6 1B 6 a 12	Cr, Mo, Mn Cr, Mo, Mn
Materiais ferrosos de alta liga 2A 12 a 15 2B 12 a 25 2C 12 a 25 2D 30 a 37 3A 25 a 50 3B 25 a 50 3C 25 a 50	Cr, Mo Mo, Cr Mn, Ni Mn, Cr, Ni Cr, Ni, Mo Cr, Mo Co, Cr
Ligas à base de níquel e à base de cobalto 4A 50 a 100 4B 50 a 100 4C 50 a 100	Co, Cr, W Ni, Cr, Mo Cr, Ni, Mo
Carbonetos 5 75 a 96	WC ou WC em combinação com outros carbonetos, como TiC e TaC, sempre em uma matriz metálica

As ligas dos subgrupos 2A e 2B são mais resistentes ao desgaste, menos tenazes e mais caras que os materiais do grupo 1. Já os subgrupos 2C e 2D são muito tenazes, porém apresentam limitada resistência ao desgaste, que pode ser muito aumentada pelo encruamento. As ligas do subgrupo 2D possuem um teor total de elementos de liga entre 30% e 37%, variando o carbono entre 0,10% e 1%.

Os materiais de grupo 3 apresentam 25% a 50% de elementos de liga. São ligas com alto cromo, várias delas com níquel e/ou molibdênio. Os teores de carbono variam entre 1,75% a 5%. Este grupo é caracterizado pela presença maciça de carbonetos hipereutéticos, que conferem às ligas uma alta resistência ao desgaste e uma razoável resistência à corrosão e ao calor. São ligas mais caras que as dos grupos 1 e 2.

O grupo 4 compreende as ligas à base de cobalto e à base de níquel com teor total de elementos não ferrosos entre 50% e 99%. As ligas à base de cobalto, subgrupo 4A, são consideradas como os mais versáteis materiais de revestimento duro. Resistem ao calor, à abrasão, à corrosão, ao impacto, à descamação, à oxidação, ao choque térmico, à erosão e ao desgaste metal-metal.

Algumas destas ligas mantêm uma dureza elevada até 825°C e resistem à oxidação até temperaturas da ordem 1100°C. As ligas à base de níquel, subgrupo 4B, são especialmente indicadas para peças sujeitas ao mesmo tempo à corrosão e ao desgaste. São superiores a outros materiais de revestimento duro em aplicações nas quais o desgaste é causado pelo contacto metal-metal, como no caso de mancais. Mantêm durezas elevadas até cerca de 650°C e resistem à oxidação até temperaturas da ordem de 875°C.

Os materiais do grupo 5 consistem de grânulos duros de carbonetos distribuídos em uma matriz metálica. São muito indicados para aplicações de abrasão intensa e de corte. Inicialmente se empregavam apenas os carbonetos de tungstênio. Mais recentemente, outros carbonetos, principalmente titânio, tântalo e cromo, passaram a ser usados com bons resultados. Como matriz metálica, vários materiais têm sido



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

utilizados, tais como ferro, aço- carbono, ligas à base de níquel, à base de cobalto e bronzes. Os materiais do grupo 5 possuem a máxima resistência à abrasão em peças sujeitas a impactos pequenos ou moderados.

Seleção do Material para Recobrimento Duro

A primeira medida é caracterizar bem as condições de serviço nas quais deverá trabalhar o recobrimento duro. Em seguida deve-se analisar com cuidado as interações dos materiais *candidatos* e do metal base, bem como o processo de soldagem a ser usado no recobrimento. Um guia geral para a seleção de ligas de recobrimento duro, preparado pelo Metals Handbook, é reproduzido na tabela exemplificada abaixo:

Para a seleção adequada, os seguintes pontos devem ser observados:

- analisar as condições de serviço para determinar os tipos de resistência ao desgaste e de resistência ao ambiente necessários;
 - selecionar alguns materiais *candidatos*;
 - analisar a compatibilidade entre estas ligas e o metal base, inclusive fazendo considerações sobre tensões térmicas e eventuais trincamentos;
 - testar componentes recobertos com os materiais candidatos;
 - selecionar a melhor liga, considerando tanto o custo como a duração do recobrimento;
- selecionar o processo de recobrimento duro, considerando a taxa de deposição, o grau de diluição (o metal base *dilui* a liga de recobrimento durante a soldagem), eficiência de deposição e custo total. O custo total inclui o preço dos eletrodos e o processamento

Tipos de revestimento

Os tipos de revestimento mais aplicados em soldagem podem ser classificados em:

- endurecimento superficial;
- resistentes à corrosão;
- resistentes ao desgaste e/ou impacto;
- para recuperação ou reparos de manutenção.



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

Guia para a seleção de ligas para revestimento duro

Condições de serviço	Materiais para revestimento duro
Escorregamento metal-metal; altas tensões de contato	Stellite 1, ligas Tribaloy
Escorregamento metal-metal; baixas tensões de contato	Aços de baixa liga para revestimento duro
Escorregamento metal-metal combinado com corrosão e oxidação	Ligas à base de cobalto ou à base de níquel, dependendo da agressividade do ambiente
Abrasão sob baixa tensão; erosão por colisão de partículas com pequeno ângulo	Ferros fundidos de alta liga
Abrasão severa sob baixa tensão, retenção do gume	Materiais com altos teores de carbonetos
Erosão por cavitação e por colisão	Ligas à base de cobalto
Choques mecânicos intensos	Aços-manganês de alta liga
Choques mecânicos intensos combinados com corrosão ou oxidação	Stellite 21. Stellite 6
Abrasão por sulcamento Descamação	Aços – manganês austeníticos Stellite 21, Stellite 6, Tribaloy T-400, Tribaloy T-800
Estabilidade térmica e/ou resistência à fluência à altas temperaturas	Ligas à base de cobalto, ligas de níquel com carbonetos

Alguns exemplos de famílias de componentes em que a soldagem de revestimento é utilizada na fabricação ou recuperação destes podem ser citadas como: fabricação de tubulações e acessórios destas, recuperação de carcaças, eixos, rotores e componentes de bombas hidráulicas e compressores, reparos e fabricação de rolos cilíndricos de laminação em processos de lingotamento contínuo nas indústrias siderúrgicas, recuperação de lâminas e dentes de máquinas do tipo escavadeiras e terraplanagem.

Revestimento por deposição de solda

Esses revestimentos consistem, como o próprio nome indica, na deposição direta de solda do material de revestimento sobre o metal base, no interior do equipamento durante a fabricação do mesmo. A deposição de solda é usada nos seguintes casos:



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

- em superfícies pequenas ou confinadas, onde não é possível outro tipo de revestimento metálico, tais como o lado interno dos bocais e a face dos flanges;
- em equipamentos com paredes de grande espessura (mais de 50mm), para os quais não existe fabricação corrente de chapas cladeadas;
- no caso de revestimentos para os quais não existe fabricação de chapas cladeadas, e também para o revestimento de chumbo;
- por motivo de economia, mesmo quando é possível a construção cladeada.

A deposição direta de solda do metal de revestimento sobre o metal base só é possível quando os dois metais diluem-se mutuamente. Este é o caso, por exemplo, da deposição de qualquer tipo de aço inoxidável sobre aço carbono ou os aços liga. Quando os dois metais não se diluem, pode-se resolver o problema pela deposição de uma camada intermediária de um terceiro metal que seja compatível com ambos.

A deposição de solda pode ser feita por soldagem por arco submerso (com eletrodo de arame ou de fita), por soldagem com proteção de gás inerte (processo MIG, por exemplo) ou por projeção com plasma. Dependendo do processo, a espessura do revestimento pode ir de 4 a 7mm, a penetração no, metal base de 1 a 1,5mm e a diluição de 10 a 20%.

Devem ser depositadas, no mínimo, duas camadas de solda, para prevenir a possível diluição excessiva do revestimento no metal base, bem como trincas, falhas e outros defeitos na primeira camada de solda. Em superfícies usinadas (face de flanges, por exemplo), a primeira camada não deve ficar exposta após usinagem.

Para a execução da deposição de solda, é geralmente necessário0 colocar a máquina de solda no interior do equipamento, que, por este motivo, estará, via de regra, aberto em duas metades, isto é, com a fabricação quase concluída, faltando apenas uma solda circunferencial. Essa solda final será feita após a conclusão do revestimento, fazendo-se depois uma deposição manual do material de revestimento sobre essa solda, para garantir a continuidade do mesmo.

Soldagem de revestimento

A soldagem de revestimento ou de recobrimento consiste na deposição de um consumível de soldagem com características em geral mais nobres ao metal base, visando aplicações específicas como maiores dureza, resistência ao desgaste e/ou à corrosão, as quais o metal base não seria tão performante quanto o material do recobrimento. A deposição do consumível pode ser executadas em passes simples ou múltiplos, aplicando-se a tarugos, barras, tubulações, chapas e perfis, dentre outras formas de metal base. Neste sentido, alguns parâmetros devem ser especialmente controlados, além daqueles normalmente monitorados como tensão, corrente elétrica, velocidade de soldagem, etc... O problema crítico é conciliar as altas tensões do material para amplas faixas de temperaturas que resistem às acomodações de contração deste. A aplicação da soldagem de revestimento necessita estar bem definida pois a altura do cordão de solda não pode ser excessiva que implique na perda acentuada de material do revestimento num processo de fabricação subsequente à soldagem (exemplo: usinagem), conciliando uma penetração do cordão que não produza uma zona afetada pelo calor larga e com regiões de alta dureza, bem como baixa diluição para não mudar as características do revestimento.

Escolha do processo de soldagem

A escolha do processo de soldagem mais adequado para a aplicação de um revestimento depende de diversos fatores, conforme tabela abaixo.

Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

Comparação e seleção do processo de soldagem

Características	Eletrodo revestido	TIG	MIG	Eletrodo contínuo tubular	Arco submerso	Oxiacetilênica	Plasma	Deposição por chama
Versatilidade	4	2	2	3	1	4	2	1
Custo	1	4	3	2	3	1	4	1
Fator operacional (tempo soldagem/ tempo total)(%)	30	25	45	45	50	25	25	-
Habilidade de operador	3	4	3	3	1	4	1	1
Energia de soldagem	2	2	3	3	4	3	1	1-4
Diluição(%)	10-30	2-20	10-50	20-40	30-80	2-20	20	-
Taxa de deposição (kg/h)	1-5	0,2-1,3	1-15	1-15	6-20	0,2-1,0	2-6	0,2-2,0
Tamanho da peça	Q	L	Q	Q	Q	L	Q	L (rotação)
Posição de soldagem	todas	todas	todas	P, V, H	P, H	todas	H, V descendente	H, V
Frequência de revestimento	NF	NF	F	F	F	NF	F	NF

Legendas: 1 = menor , 4 = maior
 Q = qualquer, L = limitado
 F = freqüente, NF = não freqüente

Conforme foi visto anteriormente, a classificação dos metais de adição é baseada na composição química dos mesmos. A composição química associada à microestrutura do depósito e que conferirá o conjunto de propriedades mecânicas desejadas para o revestimento resistir ao desgaste.

Esse conjunto de propriedades é bastante afetado pela diluição do processo de soldagem, definida como porcentagem do metal base fundido que participa no metal de solda. Assim, quanto menor a diluição, menor a variação na composição química do metal de solda e estar-se-á mais próximo das propriedades de catálogo do depósito.



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

Regras práticas para a soldagem de manutenção

- 1) determinar a causa dos danos: desgaste, fadiga, defeito construcional, corrosão...
- 2) limpeza e controle da peça: marcar a extensão das trincas, verificar outros lugares perigosos, aplicar testes magnéticos ou de penetração.
- 3) Classificar o metal base: análise química, testes mecânicos.
- 4) Tirar as medidas (pensar sempre na usinagem posterior, fazer marcas, croquis, desenhos e cálculos).
- 5) Determinar o processo de soldagem, materiais, pré aquecimento, tratamento térmico, escolha do soldador, instruções para o soldador.
- 6) Calcular custo e tempo.
- 7) Controlar constantemente a execução do serviço: dependerá da importância e da dificuldade do serviço e da capacidade do operador.
- 8) Controlar a peça soldada.
- 9) Usinar, ajustar, medir, testes finais.
- 10) Relatório e arquivo.

Processos de soldagem que podem ser usados para revestimentos resistentes à abrasão:

a) Arco elétrico: Eletrodos revestidos.

Este processo permite aplicações de camadas protetoras por meio de eletrodos metálicos revestidos externamente ou tubulares, com ou sem revestimento externo e com núcleos de elementos ligados granulados.

É um processo muito usado, principalmente em virtude do fato de não precisar de equipamentos especiais.

Não é usado para revestimentos de partes que exigem grandes volumes de depósitos, não só em virtude ao alto custo, mas também a grande dificuldade de aquecer grandes massas. Usa - se hoje, eletrodos do tipo sintético, onde os elementos de liga são adicionados através de revestimento. Em geral são eletrodos grossos e necessitam de boa habilidade de manuseio, principalmente, quanto à regulagem de amperagem, pois, se não for compatível com o diâmetro do eletrodo, deixa partículas de elementos sem fundir na escória. Para casos de grandes volumes de peças a serem revestidas, é mais econômico automatizar o sistema com “arco submerso”.

b) Arco Submerso: Processo Automático ou Semi - Automático.

Neste processo é possível revestir peças de grandes dimensões, cilíndricas ou não, sujeitas à qualquer tipo de desgastes. A grande vantagem é o alto rendimento que ele oferece, depositando alto volume de metal por unidade de tempo, pois, utiliza arames de grandes diâmetros e auxiliado pelo fluxo ativo ou neutro que pode ou não adicionar elementos, enriquecendo o depósito.

Hoje, a indústria brasileira, principalmente as que se dedicam exclusivamente a fabricação de consumíveis para arco submerso, tem condições de produzir combinações fluxo/arames para proteger contra todo e qualquer tipo de desgastes.

É possível adicionar fluxos ligados com arames não ligados, fluxos neutros com arames ligados e fluxos ativos com arames ligados, para revestir partes com altas solicitações ou desgastes por fricção, impacto ou outros.

Um exemplo disto é a larga aplicação deste processo em partes rodantes de tratores, ou mesmo em partes planas que exigem alto índice de depósito.

Para os casos de arames ligados a fluxos ativos, hoje, já se está desenvolvendo trabalhos em siderúrgicas, com aplicações em rolos de lingotamento contínuo, rolos de laminação, rodas de trem, etc., cujos resultados tem se mostrado satisfatórios, conseguindo atingir tempo de vida útil, compatível com as necessidades.



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

Através do processo arco submerso se consegue depositar ligas com durezas variando desde 20 até 60 Rc, inclusive ligas nobres com alta resistência a corrosão e calor.

c) Arame Tubular – Manual ou Através Arco Submerso

Processo semi-automático, ou automático, como querem alguns, que emprega equipamentos alimentador de arames contínuos tubulares com fluxo interno.

Trata-se de um processo com algumas aplicações características, utilizando diâmetros variados de arames e com produção nacional.

Também usado em partes onde se exige alto índice de depósito, com vantagem de se poder depositar ligas de durezas variadas.

Para aplicação no equipamento de arco submerso, é necessário suar fluxo adicional.

d) Processo Oxiacetilênico:

É um dos processos mais antigos de solda, que, ainda hoje encontra vasto campo de aplicações, principalmente no campo de revestimentos com ligas à base de cobre e autofluxantes.

Pode ser aplicado em metal base, tipo aço carbono, baixa liga, ferro fundido, cobre e alumínio. Não se recomenda para aços austeníticos tipo manganês e nem inoxidável.

É um processo que requer um maior tempo na operação em virtude a dissipação térmica da chama, com isto se torna muito vagaroso.

Assim mesmo, o sistema oxiacetilênico se presta muito em casos de revestimentos em cantos, partes de pequenas espessuras, ou mesmo em locais onde se exige uma fina camada sem destruir a região adjacente, além da facilidade de reconstruir cantos ou arestas.

Como não há fusão no metal, neste processo não ocorre diluição e com isto as características da liga adicionada são mantidas.

Para adição de ligas por este processo, geralmente a mecânica é ou por Brasagem ou Solda Braseada, portanto, a temperatura de soldagem vai depender do ponto de fusão da vareta de solda.

e) TIG

Pouco usado, somente em enchimentos de ligas de alto ponto de fusão em locais que se necessita camadas finas, sem destruir a área próxima à solda.

Um exemplo deste processo é o enchimento de peças que sofrem abrasão e calor, por ligas à base de Co – W – Cr – C.

Ligas a base de cobre, alumínio, também são revestidas por TIG.

Processos de soldagens que podem ser usados para revestimentos resistentes à fricção (adesão)

Os processo de soldagem, por se tratar das mesmas ligas usadas em abrasão, também são os mesmos já mencionados.

Faz-se uma inclusão do MIG (metal inert gas) que é utilizado para revestimentos com ligas de bronzes (alumínio, fósforo e manganês).

Estas ligas são também encontradas na forma de eletrodos revestidos.

Metal de adição para revestimento duro

Não existe ainda uma classificação de metal de adição que envolva a maioria das ligas utilizadas para revestimento duro. As classificações existentes são baseadas na composição química do metal de adição depositado sem nenhuma diluição, como nas normas ASMEA5.13 – 80 e SFAA5.21 – 80.



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

Spencer desenvolveu uma classificação, também baseada na composição química, onde os tipos de ligas ferrosas são divididas em 5 classes, a saber:

Classe 1 – aços baixa liga com 2 a 12% de elementos de liga

Classe 2 – aços alta liga, incluindo os aços rápidos e aços ao manganês

Classe 3 – ligas a base de ferro com 25 a 50% de elementos de liga

Classe 4 – ligas a base de cobalto, níquel e níquel cromo

Classe 5 – ligas com dispersões de carbeto de tungstênio entre 38 a 60% em matriz de liga dúctil.

Outra classificação muito aceita atualmente e empregada para os arames tubulares para revestimento anti – desgaste também utiliza a composição química e divide os tipos de ligas ferrosas em:

- Ligas a base de CrNi – são arames tubulares utilizados principalmente para aplicações de reconstrução e uniões dissimilares.
- Ligas a base de Fe com NiMo – arames tubulares utilizados basicamente para uniões de aços baixa e média liga.
- Ligas do tipo aço ferramenta – são empregados como proteção anti – desgaste de aços ferramentas que trabalham à frio e a quente. As durezas dos depósitos variam entre 40 e 60 Rc, podendo estes serem tratados termicamente.
- Ligas do tipo FeCrC – empregados em serviços onde se necessita resistência a alta abrasão, choque e pressão. Os depósitos atingem durezas de até 63 Rc em um único passe de solda.
- Ligas do tipo CCrCo – arames tubulares para proteção anti – desgaste contra corrosão, oxidação a quente, altas temperaturas e ciclagem térmica. Suas durezas encontram-se entre 35 a 48 Rc.

Seleção do Metal de Adição

Normalmente, antes de proceder a escolha de um metal de adição para uma determinada aplicação, deve-se adotar procedimentos a serem seguidos para evitar seleções de metais de adição que não atendam ao tipo de aplicação necessário. Estes procedimentos estão contidos no seguinte roteiro:

- 1) Identificar o material base antes de proceder o reparo ou recuperação, quando possível.
- 2) Identificar o sistema tribológico que age sobre a peça e verificar se existem ou não fatores que aceleram o desgaste.
- 3) Observar as condições superficiais e verificar a existência de trincas, áreas desgastadas e revestimento anterior. Verificar se a peça necessita reconstituição anterior ao revestimento duro.
- 4) Escolher a liga mais adequada, não esquecendo a compatibilidade metalúrgica entre o metal base e o metal de adição. Em certos casos, é interessante utilizar outra liga para preparar a superfície da peça que irá receber o revestimento.
- 5) Selecionar o processo de soldagem mais adequado para a aplicação do revestimento.
- 6) Estabelecer um procedimento de soldagem que garanta as características desejadas do metal de adição escolhido.
- 7) Realizar ensaios experimentais, principalmente em aplicações críticas.
- 8) No caso de existirem várias opções de metais de adição ou processos para determinada aplicação, o critério de seleção passa a ser regido pelo fator econômico. Deve-se pesar bem materiais ou processos mais caros, porém, que aumentam a vida útil do componente versus materiais ou procedimentos mais baratos, porém, que apresentam vida útil menor do componente.

Materiais de Adição para Proteger Contra Abrasão

- Ligas à base de carboneto de tungstênio



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

- Ligas à base de carboneto de cromo e nióbio
- Ligas à base de carboneto de Ferro (Média e alta dureza)
- Ligas à base de níquel – Boro – Silício
- Ligas à base de níquel- boro – Silício e tungstênio

Nas ligas de ferro fundido, ou em ligas com altas percentagens de carbonetos de grande dureza, acima de 68Rc, as matrizes só possuem cerca de 54Rc. Por este motivo é que os ensaios de dureza, neste caso, não dão resultados exatos, pois sendo o cone de diamante de maiores dimensões que as partículas de carboneto, atinge uma área mista, dando uma dureza somente pouco maior que a da matriz dúctil.

Na prática, o desgaste consome primeiro a parte mais dúctil até atingir os carbonetos que oferecem, então, a alta resistência desejada nestas condições, desde que não haja uma coincidência de altas temperaturas ou ataques corrosivos, uma resistência máxima a abrasão poderá ser obtida, com revestimentos duros e tenazes. Um caso típico é o representado pelo britamento de pedras, onde as mandíbulas do britador são de aço manganês austenítico, pois se bem que a dureza superficial seja de ordem de 48Rc, a matriz tenaz absorve os choques recebidos.

Já no caso de revestimentos para resistirem à abrasão de materiais não metálicos, como areia úmida, a dureza deve ser a mais uniforme possível, não se justificando o emprego de endurecimento superficial, uma vez que não haverá uma ação de endurecimento em serviço. Deverá, assim, ser preferidas as ligas que contenham carbonetos incluídos ou núcleos também de maior dureza. De todas as ligas para resistir à abrasão, o carboneto de tungstênio é indiscutivelmente o de maior dureza.

É preciso distinguir, desde logo, que na soldagem, este carboneto, não participa em forma sinterizada e sim em forma de cristais embebidos em núcleo tenaz.

Possuindo, a liga resultante, um ponto de fusão muito alto, os cristais de carbonetos não se fundem, quando soldados, mas poderão se desintegrar em contato com aço em fusão.

Os cristais de carbonetos são britados e peneirados, de acordo com as necessidades do revestimento protetor desejado, sendo em uma capa externa de metais não ferrosos (cobre, por exemplo) ou ainda em matriz de níquel – boro – silício.

Os depósitos resultantes são ásperos e empregados em desgastes pesados de abrasão, como nos casos de dentes de escavadoras, brocas de perfuração de poços de petróleo, etc.

Ultimamente, ligas contendo carbonetos de tungstênio, além de outros, depositam cordões lisos e que aceitam polimento em serviço.

As ligas de carbonetos de cromo e nióbio, se apresentam mais duras do que o carboneto de ferro, portanto, mais resistentes. Conforme os outros elementos ligados, os carbonetos de cromo se dividem em dois grupos: Ferroso e Não Ferroso.

- **Ferroso:** Além do Fe, compõe-se ainda de Co, Nb, Cr e W. Possui uma dureza tão alta que não permite usinagem e é, por isso, indicado para combater abrasão, mesmo em altas temperaturas.
- **Não Ferroso:** Contém Co, Cr, W, C, (1 a 2%); tem menor resistência a abrasão que o tipo ferroso; é usinável e possui resistência a “DUREZA VERMELHA”. Tem boa resistência à certas formas de corrosão e facilidade de manter arestas cortantes.

As ligas em geral de carbonetos duros, tem durezas de 54Rc, polimento, e demais características que permitem aplicá-los não só para resistir a abrasão, mas também à fricção (adesão). Ligas de carbonetos de ferro, perdem a dureza quando expostas à temperaturas, portanto, são indicadas para abrasão sem calor, a menos que use aço rápido.

Ligas à base de Ni, B, Si, com adições de cromo e até tungstênio, são largamente utilizadas para revestir abrasão, fricção(adesão). Apresentam depósitos, com durezas variando desde 20 à 70 Rc, e são aplicados em formas de pó (metalização), em varetas por oxiacetilênico.



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

Os depósitos são de baixo coeficiente de fricção (adesão).

Materiais Resistentes à Cavitação

Dos dados publicados por diversos pesquisadores, pode-se concluir que até o presente momento não existe opinião unânime quanto à seleção de um material com destacada resistência à cavitação.

Embora materiais como ligas de cobalto (Stellites) ou aços ferramenta (tipo aço rápido) apresentem as resistências mais elevadas, as dificuldades de sua adequação aos processos de fabricação dos equipamentos, bem como o seu elevado custo, impedem que sejam considerados como técnica e economicamente viáveis.

As tentativas de relacionar resistência à cavitação e outras propriedades dos materiais não foram coroadas de pleno êxito limitando-se a certos grupos de materiais semelhantes entre si. É difícil assim, prever ou determinar a resistência à cavitação de um material baseando-se em propriedades físicas conhecidas. Tem sido sugerido relações entre resistência à cavitação e resistência à tração, dureza, energia de deformação, resiliência e resistência à fadiga. Estas relações, porém, se verificam apenas para certo tipo de material, equipamento, ambiente ou forma de cavitação, sendo de fato impossível uma generalização, o que parece indicar que a cavitação deve ser considerada como uma propriedade independente demais.

O próprio desenvolvimento do dano cavitacional mostra que mecanismos diferentes devem atuar nas quatro fases da erosão por cavitação: incubação, aceleração, atenuação e estacionamento, identificadas nas curvas da taxa de erosão em função do tempo de ensaio. Foram relacionadas propriedades como dureza, compressibilidade não choque, resistência à tração, energia de deformação, resiliência e combinações destas propriedades para as fases de variação quase linear (aceleração e estacionamento), mas não igualmente válidas para as outras fases. Com estas relações seria possível prever com certa facilidade a resistência à cavitação dos materiais estruturais e desenvolver novas ligas de resistência superior. Mas nem todas as ligas metálicas obedecem às mesmas correlações.

Investigações mais recentes partem diretamente das observações colhidas nos testes acelerados de cavitação, reconhecendo tratar-se de um fenômeno que se desenvolve em escala de microscópica da ordem da estrutura granular dos metais ensaiados. Atualmente, ganha mais evidência a teoria do impacto de microjatos como causadores da cavitação, e são estudados os efeitos dos microimpactos sobre os componentes das estruturas metálicas. Estes estudos concluíram que vários mecanismos governam, de fato, as diversas fases do dano cavitacional e que nenhuma propriedade pode ser responsabilizada sozinha pela resistência à cavitação de um material.

Durante a primeira fase ou período de incubação nenhuma perda de material ocorre. Mas investigações com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura

(MEV) mostraram que desde o início da ação do colapso de bolhas sobre a superfície sólida, o material é plasticamente deformado em microvolumes, inicialmente bem espaçados mas gradualmente se interligando, dando à superfície um aspecto ondulado, de deformação em longa escala. As pequenas deformações (originárias de impactos isolados de microjatos) são alisadas pelos jatos subsequentes e mesmo pequenas rupturas são fechadas. Somente o efeito dos últimos colapsos (microjatos) pode ser identificado como depressões e microfissuras.

Com o aumento do tempo de exposição ao impacto do jato, as ondulações evoluem para dar lugar a crateras profundas com diâmetros em torno de 150µm, enquanto as pequenas depressões – 10µm em diâmetro – se multiplicam simultaneamente. Nesta fase, a fase de aceleração ou também chamada de acumulação, inicia-se a gradual, mas rapidamente aumentando, perda de material. Nem as crateras, nem as depressões parecem ter qualquer ligação com contornos de grão, linhas de deslizamento ou outra característica estrutural. Após algum tempo de deformação se processa quase exclusivamente por formação de crateras.

A máxima erosão ocorre com o desprendimento de partículas das bordas das crateras onde o crescimento de decoalescências indica uma forma característica de fratura dúctil.



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

Na última fase, de taxa de erosão estacionária, gases e líquidos apresados pelas crateras atenuam até certo ponto a ação dos microjatos. Estes removem material de maneira constante, mas de taxa inferior à máxima verificada, aparecendo áreas fraturadas por fadiga, além das fraturas do material endurecido superficialmente por deformação.

Na tentativa de aumentar a fase de incubação e diminuir as taxas de erosão, a formação das ondulações superficiais e das crateras deveriam ser suprimidas. Para conseguir isto, a energia de impacto deveria ser absorvida por um volume o maior possível, diminuindo assim o acúmulo de deformação plástica próxima à superfície. Esta condição origina um longo percurso médio das discordâncias para dentro do metal e um mínimo de fontes de discordâncias próximas à superfície. Assim, uma estrutura de fase única com um mínimo de sistemas de deslizamentos operacionais poderia prover o mecanismo necessária à distribuição da deformação. Uma alternativa seria a formação de superfícies endurecidas pela deformação. Desta forma a energia da cavitação poderia ser absorvida pela deformação desta camada superficial, mais resistente.

Os métodos tradicionais de aumentar certas propriedades macroscópicas dos materiais não aumentariam necessariamente a sua resistência à cavitação. Esta é principalmente influenciada pela microestrutura e suas propriedades próximas à superfície.

O estudo da natureza do fenômeno cavitacional independe dos materiais. Os mecanismos de interação entre o fenômeno e uma superfície sólida são mais facilmente entendidos ao se fixar certas condições dos materiais destas superfícies. Mas se as conclusões a que se chega implicam na avaliação individual dos materiais empregados. Dificilmente pode-se concluir do comportamento de um material laminado, recozido, normalizado quanto à resistência à cavitação de um metal fundido “in loco” sob condições peculiares, como é o caso da solda, e, via de regra, sem possibilidade de tratamentos térmicos.

Por este motivo sentiu-se a necessidade de verificar até que ponto é possível estabelecer paralelos à pesquisa já realizada e onde os resultados obtidos não são conclusivos quanto à seleção de materiais destinados a revestimentos, aplicados por solda e resistentes à cavitação.

Materiais de adição para proteger contra fricção (adesão)

- a) Ligas à base de carboneto de tungstênio
- b) Ligas à base de carboneto de nióbio e cromo
- c) Ligas à base de carbonetos mistos (cromo, N, Fe, aço rápido)
- d) Ligas à base de carboneto de ferro
- e) Ligas à base de Ni, B, Si, ou W
- f) Ligas de bronze (fosforoso, alumínio (várias durezas), manganês), ligas de baixo coeficiente de fricção.
- g) Ligas de alpacas especiais.

As ligas de cobre, são hoje, largamente aplicadas em revestimentos sobre partes metálicas, principalmente ligas ferrosas (aços e ferros fundidos) para resistirem à fricção.

Os bronzes são de baixo coeficientes de fricção e boa resistência à corrosão. Vem sendo muito usados para revestimentos em borboletas de registros ou mesmo equipamentos onde se necessita resistência ao desgaste por fricção.

Os bronzes – alumínio, dependendo do teor de alumínio, varia de dureza e de aplicação.

Materiais de adição para proteger contra corrosão

- a) Ligas de aço inoxidáveis
- b) Ligas a base de níquel
- c) Ligas Nobres



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

a) Ligas de aços inoxidáveis

Os revestimentos representados pelos aços inoxidáveis, são caracterizados por serem a base de cromo ou cromo – níqueis, que em certos tipos recebem a adição de molibdênio, proporcionando elevada resistência a ação de corrosivo do tipo ácido sulfúrico.

Cada tipo de inoxidável, caracteriza uma faixa de uso, além da variação na composição química que aumenta ou diminui sua resistência à corrosão.

Os aços inoxidáveis podem ser classificados em:

1) Aço Inoxidável Martensítico

Contendo somente cromo como elemento de liga, é magnético e endurecível por tratamento térmico. O carbono é mais alto do que nos outros tipos.

Os principais são:

SAE 410 – com 12% Cr para aplicações em geral.

SAE 416 – com 12% Cr e 0,15 % S para usinagem fácil

SAE 420 – com 12 à 14% Cr para instrumentos cirúrgicos

2) Aço Inoxidável Ferrítico

Também com cromo, como elemento determinante. É magnético e não aceita têmpera. O carbono é baixo.

Os principais tipos são:

SAE 430 – com 17% Cr – para aplicações gerais

SAE 405 – com 11,5% Cr à 14,5% Cr para aplicações gerais

SAE 446 – com 23 à 27% Cr – para boa resistência ao calor

3) Aço Inoxidável Austenítico

Contendo Cr e Ni, ou Cr, Ni, Mo, é resistente à corrosão, não é magnético, não é temperável e endurece a frio.

Os principais tipos:

SAE 301 com 18 – 8 Cr Ni – alto endurecimento para molas

SAE 302 com 18 – 10 Cr Ni – uso em antenas, molas, etc.

SAE 304 com 20 – 12 Cr Ni – uso geral; resiste à corrosão ambiental

SAE 305 com 18 – 12 Cr Ni – baixo endurecimento, usado para repuxo

SAE 310 com 25 – 20 Cr Ni – resiste ao calor e a formação de carepas

SAE 316 com 18 – 14 – 25 Cr Ni Mo – resiste à corrosão para H₂SO₄, H₃PO₄, NaCl

SAE 321 com 18 – 12 - + Ti Cr Ni Ti – resiste à corrosão intergranular - estabilizado

SAE 347 com 18 – 12 – Nb Cr Ni Nb – resiste à corrosão intergranular – estabilizado

b) Ligas à base de Níquel

As ligas de níquel, além da alta resistência à temperatura, são resistentes à corrosão por ácidos e alcalinos em meio altamente corrosivo.

As principais ligas de níquel são:

- Inconel – 80% Ni – 14% Cr – 6% Fe

Resiste ação do íon cloro e boas propriedades para criogênia. Resiste corrosão por Pitting.



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

- Incoloy – 38 – 46 Ni, 19 à 24% Cr, resto Fe
Resiste à corrosão intergranular, ação de gases sulfurosos, ácido fosfórico e sulfúrico.
- Hastaloy – Ni, Cr, Mo
Dependendo da solicitação, há um tipo específico de liga. O Hastaloy – C resiste à corrosão para HCl, H₂SO₄, H₃PO₄ e choque térmico.
- Monel – 67 Ni, 32 Cu

Boa resistência a água do mar, cavitação, e atmosfera oxidantes

As ligas à base de cobalto são compostas basicamente de Co, Cr, W, C, com elevada resistência aos desgastes combinados: abrasão, corrosão e calor.
As mais conhecidas são:
 - 30 Cr, 12 W, 2,2 C restante Co
 - 29 Cr, 4 W, 1,1 C restante Co
 - 30 Cr, 8 W, 1,5 C restante Co

c) Ligas Nobres

Dentre as ligas nobres, incluímos as ligas de titânio e tantaló, que são usadas esporadicamente, principalmente em indústrias químicas que manuseiam HCl, por serem os melhores materiais a resistirem a este corrosivo.

Materiais de adição para proteger contra impacto

- a) Ligas à base de manganês – austeníticas
 - b) Ligas à base de carboneto de ferro (dureza média)
 - c) Ligas à base de Ni – B – Si – (dúctil)
 - d) Ligas austeno - ferríticas
- a) o aço manganês austenítico, é conhecido na construção mecânica por ser um material com características específicas, como:
- 1) Estrutura austenítica
 - 2) Encrua pelo trabalho
 - 3) Dureza após obtenção 250 HB
 - 4) Dureza após trabalho 450 HB
 - 5) Elevada tenacidade
 - 6) Resiste ao impacto
 - 7) Resiste à abrasão
 - 8) Não é temperável
 - 9) Não é magnético (recozido)
 - 10) Conhecido como reversível
 - 11) Temperatura crítica 260°C.

USO: mandíbula britador, cone de sino, martelos, ponta de agulha, caçambas, dente de escavadeira



Divisão Metalurgia / Soldagem / Ensino e Pesquisa

Como se pode ver as características deste aço são específicas para impacto, além de resistir abrasão. Este aço só pode ser soldado ou revestido a frio, pois, é sensível ao calor.

- b) As ligas a base de carboneto de ferro de média dureza, são aplicadas para impacto, porém, é necessário se mensurar tal solicitação e determinar a dureza compatível. Nestes casos, é possível escolher depósitos menos duros que caracterizará uma estrutura do tipo sorbítica ou troostítica com ou sem a necessidade de tratamento térmico.
Exemplos: navalha de corte de chapas, punções e matrizes de forjaria.
- c) As ligas de Ni, B, Si, são também escolhidas de acordo com sua ductilidade, para resistir ao impacto. Embora não seja a melhor solução neste caso, são eletrodos revestidos – arco elétrico. As ligas Ni, B, Si, são aplicadas em varetas ou em formas de pó (metalização) e com bons resultados em camadas finas, quando deixa em geral um acabamento final quase compatível com o uso de certos outros tipos de peças. Como já mencionado, estas ligas são aplicadas pelo processo oxiacetilênico.
- d) as ligas austeno – ferríticas tem características parecidas com as ligas austeníticas (aço manganês), embora apresentem uma ductilidade maior, também encruam pelo trabalho a frio.
A dureza final nunca ultrapassa 300 HB.
Esta liga tem larga aplicação como camada de almofada em revestimentos extras duros em peças cujo aço é de difícil soldabilidade, além de se caracterizar por baixo coeficiente de fricção quando endurecida por encruamento.
Estas ligas são muito aplicadas em forjarias e ferramentarias.