



REVISÃO: A INFLUÊNCIA DAS INCLUSÕES DE SULFETO DE MANGANÊS NA USINABILIDADE

Adriana Ana Pereira

GRUCON – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.
adrianap@emc.ufsc.br

Lourival Boehs

GRUCON – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.
boehs@emc.ufsc.br

Resumo: *Este artigo descreve, detalhadamente, a Figura 1 com o fim de proporcionar o melhor entendimento sobre a influência das inclusões de MnS no processo de usinagem do ferro fundido cinzento, em razão dos seus benefícios econômicos.*

Palavras-chave: *sulfeto de manganês, ferro fundido cinzento, usinabilidade.*

1. INTRODUÇÃO

Usinabilidade é uma expressão usada para se referir à resposta de um material em termos da vida da ferramenta, da força de corte, da qualidade da superfície usinada, da taxa de material removido ou da forma do cavaco. Usinabilidade também é um termo usado para se referir a custo operacional e produtividade, isto é, quanto maior a produtividade e menor o custo para se produzir uma peça, de acordo com o especificado, melhor é a usinabilidade do material.

Melhorar a usinabilidade do material é de grande interesse, em razão do seu significativo impacto sobre a competitividade industrial. A melhoria por sua vez terá caráter de fabricação ou econômico. A melhoria na fabricação é verificada pela maior possibilidade de se produzir a peça de acordo com o especificado, pela facilidade de remoção do cavaco, pelo melhor desempenho no mecanismo de formação do cavaco. A melhoria econômica é constatada pelo menor desgaste da ferramenta, pela menor força de corte (pelo menor consumo de energia) durante o processo, do que resulta menor tempo passivo e menor custo da ferramenta por peça usinada.

Um método extensamente utilizado para melhorar a usinabilidade de um material, sem alterar as propriedades mecânicas e a microestrutura, é através da adição de determinadas inclusões no material, denominadas inclusões de engenharia, que favorecem a redução dos esforços de corte, do desgaste da ferramenta e facilitam a ruptura do cavaco.

A primeira referência sobre os benefícios das inclusões de engenharia na usinabilidade deve-se a Opitz (1963), que descobriu a formação de uma built-up layer sobre a face da ferramenta de metal-duro durante a usinagem de um aço desoxidado com cálcio. Desde então, a prática do uso das inclusões de engenharia vem sendo largamente aplicada e estudada.

Entre as inclusões favoráveis à usinabilidade encontra-se o sulfeto de manganês. Em condições favoráveis, estas inclusões formam sobre as superfícies da ferramenta de corte uma película protetora também conhecida como built-up layer (BUL), responsável pela redução do desgaste da ferramenta e pela redução na força de corte (Brion et al. 1992; Fang; Zhang, 1996; Joseph; Tipnis, 1975; Mills et al. 1996; Poulachon et al. 2002).

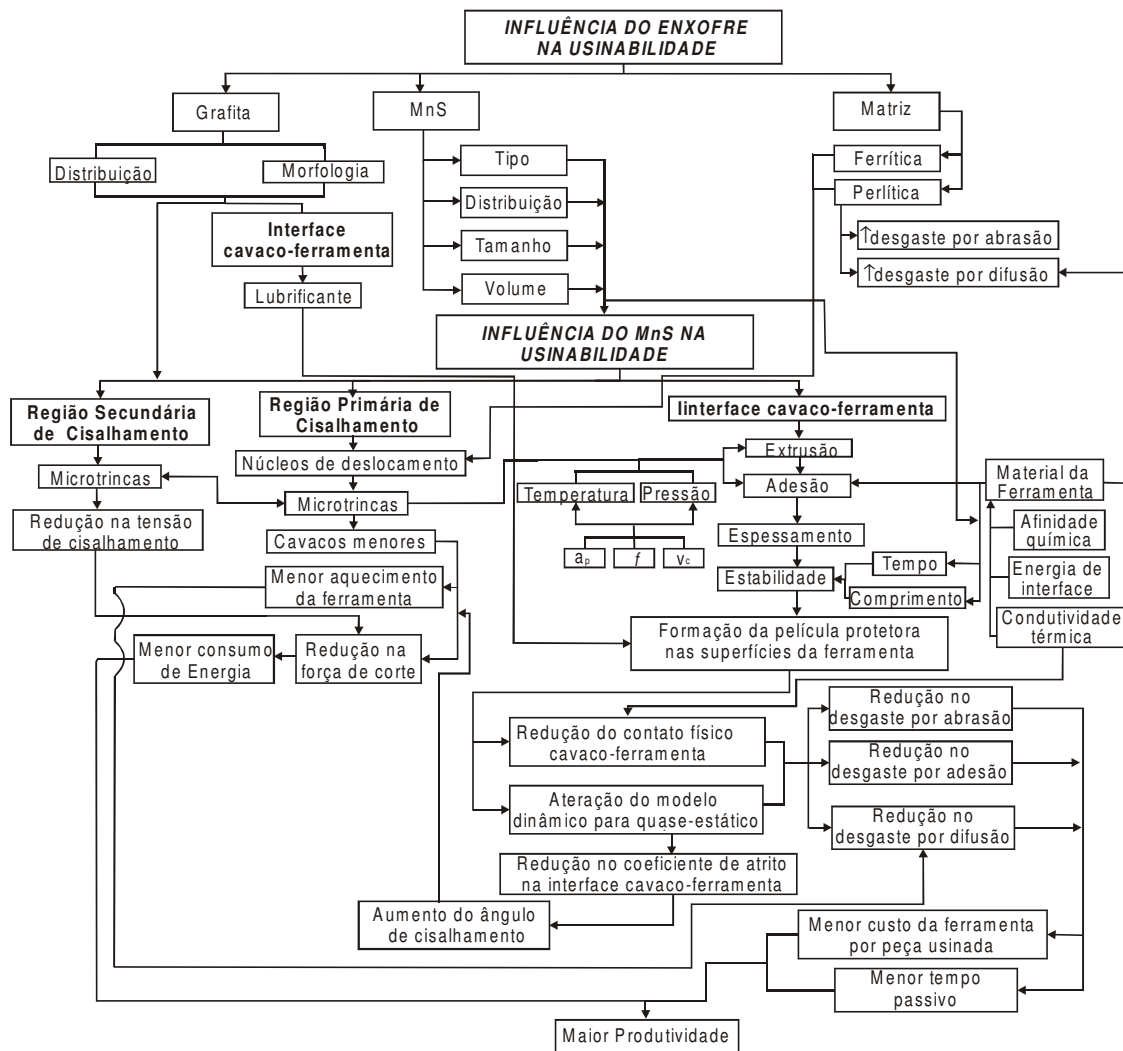


Figura 1: Fluxograma da influência do enxofre na usinabilidade do ferro fundido cinzento (Ana Pereira et al. 2005).

Diferentemente dos aços, onde as inclusões de MnS são obtidas propositalmente para melhorar a usinabilidade do material, no ferro fundido cinzento estas inclusões aparecem como resultado do processo de fabricação em fornos cubilô. Para que o enxofre presente no coque e na sucata não combine com o ferro formando inclusões de sulfeto de ferro com baixo ponto de fusão, manganês é adicionado para formar inclusões mais estáveis, os sulfetos de manganês, Figura 2.

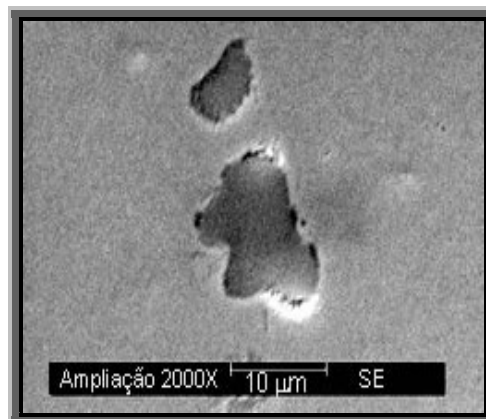


Figura 2: Inclusão de MnS no ferro fundido cinzento FC 25 com 0,18% S (Ana Pereira, 2005).

A obtenção das inclusões de sulfeto de manganês gera resultados animadores em termos de custo e produtividade, motivando o constante estudo e interesse em relação à influência das inclusões na usinabilidade. Na usinagem do ferro fundido cinzento, a presença das inclusões de MnS nesse material pode reduzir o coeficiente de atrito na interface cavaco-ferramenta em até cinco vezes, e conseqüentemente, aumentar a vida da ferramenta de corte (Sahm et al. 2002).

Para entender melhor a influência das inclusões de MnS na usinabilidade é apresentado, a seguir, uma descrição detalhada do fluxograma apresentado na Figura 1.

2. INFLUÊNCIA DAS INCLUSÕES DE MnS NA USINABILIDADE

A inclusão de MnS tem uma estrutura hexagonal, baixa dureza e boa plasticidade (Liu; Childs, 1996). As inclusões de MnS melhoram a usinabilidade atuando em três regiões:

- 1- Interface cavaco-ferramenta;
- 2- Região primária de cisalhamento;
- 3- Região secundária de cisalhamento.

2.1 Interface cavaco-ferramenta

A inclusão de MnS promove a formação de uma película protetora, quimicamente estável (Poulachon et al. 2002), nas superfícies da ferramenta conhecida como *built-up layer* (BUL), tipicamente observada no torneamento (Fang; Zhang, 1996; Qi; Mills, 1996; Sahm et al. 2002), protegendo a ferramenta dos desgastes por adesão, difusão e abrasão (Fang; Zhang, 1996) em razão da alteração do modelo dinâmico para quase-estático na interface cavaco-ferramenta (Poulachon et al. 2002). A BUL também favorece a redução do coeficiente de atrito na interface cavaco-ferramenta (Ramalingam et al. 1975; Sahm et al. 2002) contribuindo para redução da força de corte através do aumento no ângulo de cisalhamento (Araki; Yamamoto, 1975). Os estágios e condições necessárias para formação da BUL, assim como os seus benefícios, estão descritos detalhadamente no item 2.1.1.

2.1.1 Formação da BUL na interface cavaco-ferramenta

A formação da BUL na interface cavaco-ferramenta, Figura 3, promove a redução do desgaste na ferramenta de corte na usinagem dos aços tratados com cálcio (Cappelli et al. 1975; Harju et al. 1999; Larsson; Rupp, 2000; Nordgren; Melander, 1990; Rupp et al. 1998), dos aços inoxidáveis com inclusões de $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}$ (Fang; Zhang, 1996; Qi; Mills, 1996; Mills et al. 1996), dos aços inoxidáveis com inclusões de MnS (Beiss, 1996; Holzki, 1996), dos aços com MnS (Brion et al. 1992, Poulachon et al. 2002), do ferro fundido maleável preto ferrítico com MnS (Boehs, 1979) e do ferro fundido cinzento com MnS (Erickson; Hardy, 1976; Gastel et al. 2000; Sahm et al. 2002).

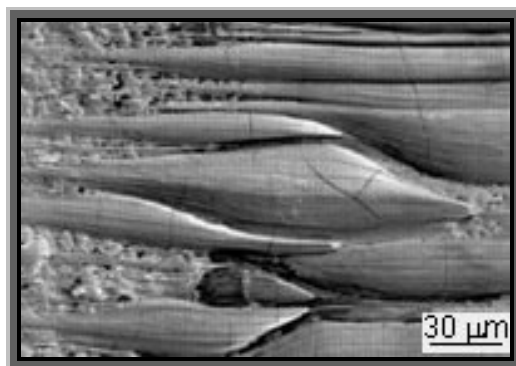


Figura 3: BUL formada sobre a face da ferramenta na usinagem do aço tratado com cálcio (Larsson; Rupp, 2000).

O processo de formação da BUL, durante a usinagem dos materiais contendo inclusões de engenharia, pode ser descrito em quatro estágios (Fang; Zhang, 1996; Qi; Mills, 1996; Mills et al. 1996; Tieu et al. 1998):

1° Extrusão das inclusões:

Processo de extrusão das inclusões: Durante o processo de usinagem as inclusões passam sobre o gume, a face e o flanco da ferramenta promovendo a formação da BUL, se as condições na interface cavaco-ferramenta forem adequadas.

A inclusão, na linha de corte, ao se aproximar da ferramenta, é gradualmente deformada até encontrar o gume da ferramenta, quando é dividida em duas partes. Uma parte flui sobre a face, formando a BUL, e a outra parte entra em contato com o flanco (Fang; Zhang, 1996).

As inclusões presentes no material, ao passarem sobre a superfície da ferramenta, só formarão a BUL quando as condições de pressão e temperatura desenvolvidas durante o processo de usinagem forem adequadas.

Condição para Extrusão das inclusões: A extrusão de uma inclusão é principalmente afetada pela sua viscosidade, que é uma função da temperatura (Luo, 2001) desenvolvida na interface cavaco-ferramenta (Araki; Yamamoto, 1975; Larsson; Ruppi, 2000; Luo, 2001; Mills; Akhtar, 1975; Mills et al. 1997; Ramalingam et al. 1975).

Quando a velocidade de corte é muito baixa a temperatura na interface cavaco-ferramenta não favorece a deformação da inclusão de MnS nem a sua presença nas superfícies da ferramenta. Entretanto, quando o material é usinado nas velocidades de corte usuais, a temperatura e as tensões desenvolvidas na interface cavaco-ferramenta são suficientemente altas para favorecer a deformação plástica das inclusões possibilitando a sua extrusão e adesão nas superfícies da ferramenta de corte (Mills et al. 1997; Poulachon et al. 2002).

Assim, o processo de extrusão ocorre quando a temperatura e a tensão na interface cavaco-ferramenta tornam as inclusões plásticas (Trent, 1991). Para as inclusões $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}$ a temperatura ideal encontra-se no intervalo de 700 a 900°C (Qi; Mills, 1996), mais precisamente a 850°C (Mills et al. 1996). A melhor temperatura de corte para formação da BUL de sulfeto de manganês está no intervalo de 700 a 850°C (Nordgren; Melander, 1989). Neste intervalo de temperatura as inclusões são macias o suficiente para serem deformadas e cobrirem as superfícies da ferramenta protegendo-as dos desgastes, porém, resistentes o suficiente para permanecer na interface cavaco-ferramenta onde existe uma elevada tensão cisalhante e uma alta pressão de compressão (Mills et al. 1997, Poulachon et al. 2002).

A presença de uma BUL na face da ferramenta favorece a diminuição da temperatura desenvolvida nesta superfície através da redução do coeficiente de atrito na interface cavaco-ferramenta, promovendo uma redução na quantidade de calor gerada pelo atrito. Indiretamente, a BUL reduz a quantidade de calor gerada na região primária de cisalhamento, visto que a redução do coeficiente de atrito na interface cavaco-ferramenta conduz ao aumento do ângulo de cisalhamento ϕ , resultando na diminuição do grau de deformação e conseqüentemente na redução do calor gerado na região primária de cisalhamento (Araki; Yamamoto, 1975). Portanto, se mantida uma condição ideal de temperatura na interface cavaco-ferramenta haverá a formação da BUL, que no caso do ferro fundido cinzento promove a redução do desgaste da ferramenta, especialmente o desgaste de cratera, com o aumento da velocidade de corte.

Não só a temperatura ideal para a extrusão da inclusão garante a formação da BUL, o material da ferramenta também assume importante papel neste processo. Este é o assunto tratado no tópico: adesão das inclusões.

2° Adesão das inclusões: Outro ponto importante em relação à formação da BUL refere-se à adesão da inclusão na superfície da ferramenta em condições de temperatura e pressão elevada, condições estas que ocorrem freqüentemente na interface cavaco-ferramenta, desenvolvendo nas superfícies da ferramenta um estado quimicamente ativo (Qi; Mills, 2000).

A adesão das inclusões nas superfícies da ferramenta depende primariamente da energia de interface (Araki; Yamamoto, 1975) e da afinidade química (Tieu et al. 1998) entre os elementos das inclusões e os elementos na superfície da ferramenta em alta temperatura, mantendo a BUL, Figura 4, suficientemente aderida nas superfícies da ferramenta para atuar eficientemente na redução dos desgastes desenvolvidos na ferramenta (Brion et al. 1992, Harju et al. 1999).



Figura 4: BUL aderida no desgaste de cratera (Qi et al.1989 apud Qi; Mills, 2003)

Assim como a interação química entre o material da superfície da ferramenta e o material da inclusão, uma boa capacidade de molhamento da inclusão sobre a ferramenta (Helisto, 1990) é um importante fator para a formação da BUL. Em 1975, considerava-se que o segundo pré-requisito para a formação da BUL, depois da temperatura adequada na interface cavaco-ferramenta, seria a presença dos carbonetos de titânio na superfície da ferramenta (Araki; Yamamoto, 1975; Joseph; Tipnis, 1975; Mills et al. 1996) devido ao bom molhamento e aderência das inclusões neste material (Helisto, 1990), reduzindo o desgaste por difusão encontrado nas ferramentas de metal-duro.

O estudo do processo do desgaste por difusão da ferramenta de WC-TiC-Co mostra que o cobalto e os grãos de carboneto de tungstênio dissolvem, por difusão do estado sólido, mais rápido que os grãos de carboneto de titânio. Esta diferente solubilidade promove a exposição dos grãos de carboneto de titânio, facilitando a sua ruptura e remoção pelo cavaco. Quando o aço contém inclusões, como as de $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, a BUL pode ser formada na interface cavaco-ferramenta, visto que a inclusão $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ tem grande afinidade química com o carboneto de titânio e pouca solubilidade com a ferramenta de WC-TiC-Co, formando uma BUL fortemente aderida na superfície da ferramenta e resistente o suficiente para ser removida pelo cavaco (Naerheim, 1977 apud Qi; Mills, 1996).

A resistência da BUL, aderida na superfície da ferramenta depende, primariamente, da energia de interface (Araki; Yamamoto, 1975) e da afinidade química (Tieu et al. 1998) entre os elementos das inclusões e os elementos da superfície da ferramenta em alta temperatura. Assim, dependendo do material nas superfícies da ferramenta, ocorrerá apenas depósito pontual das inclusões de MnS na ferramenta sem a formação da BUL. A Figura 5 apresenta o depósito pontual de inclusões de MnS no final do desgaste de cratera na ferramenta de metal-duro sem cobertura utilizada no ensaio de torneamento.

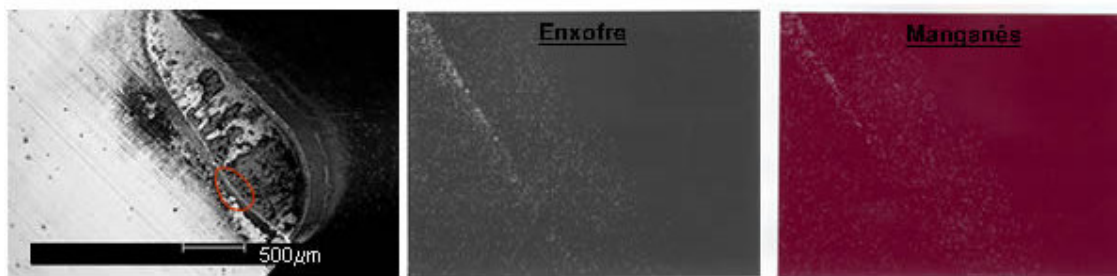


Figura 5: Depósito pontual de sulfeto de manganês no final do desgaste de cratera (0,12% S, $v_c = 150$ m/min, $a_p = 2$ mm, $f_z = 0,257$ mm) (Ana Pereira, 2005)

A Figura 6 relaciona a área percentual de sulfeto de manganês aderido na região de contato cavaco-ferramenta com o material na superfície, indicando as ferramentas mais adequadas para a formação da BUL na usinagem com inclusões de sulfeto de manganês. De acordo com a teoria de Araki (1975) e Joseph (1975), a ferramenta contendo inclusões de carboneto de titânio favorece a formação da BUL. No entanto, outros materiais presentes nas superfícies da ferramenta conduzem a melhores resultados, como a ferramenta com cobertura de óxido de zircônio onde a BUL obtida tem aproximadamente 1 μm de espessura.

Os elementos de transição zircônio, titânio, háfnio e lantânio, quando presentes na superfície da ferramenta na forma de óxido ou carboneto, desenvolvem reações químicas com as inclusões na peça, formadoras de BUL, conduzindo a uma adesão seletiva do material da peça nas superfícies da ferramenta (Katayama; Imai, 1990 apud Brion et al. 1992).

Ferramenta	Área de MnS, Fe e material da ferramenta na interface cavaco-ferramenta [%]			
	20	40	60	80
ZrO ₂	MnS			
TiN				
ZrN				
Al ₂ O ₃				
TiC	Ferramenta			
HfO ₂				
WC + Co				
Fe ₃ C	Ferro			

Figura 6: A área percentual de MnS, Fe e material da ferramenta na interface cavaco-ferramenta (Katayama, 1995 apud Qi; Mills, 2003)

Para que a ferramenta desenvolva um estado quimicamente ativo é importante que o campo de temperatura na interface cavaco-ferramenta seja adequado e estável. Em relação à estabilidade do campo de temperatura desenvolvido na interface cavaco-ferramenta, a condutividade térmica da ferramenta assume importante papel na manutenção da BUL. O coeficiente de condutividade térmica para a ferramenta WC-TiC-Co é 33,5 W/m²K, menos da metade da ferramenta WC-Co (75,4 W/m²K). Logo, é mais fácil obter um campo estável de temperatura na ferramenta WC-TiC-Co, sendo mais adequada à formação da BUL (Xiao, 1990 apud Mills et al. 1997; Xiao, 1990 apud Poulachon et al. 2002).

A condutividade térmica da ferramenta também é uma função da temperatura, Figura 7, e como apresentado anteriormente, a melhor temperatura de corte para formação de uma BUL de sulfeto de manganês está no intervalo de 700 - 850°C (Nordgren; Melander, 1989).

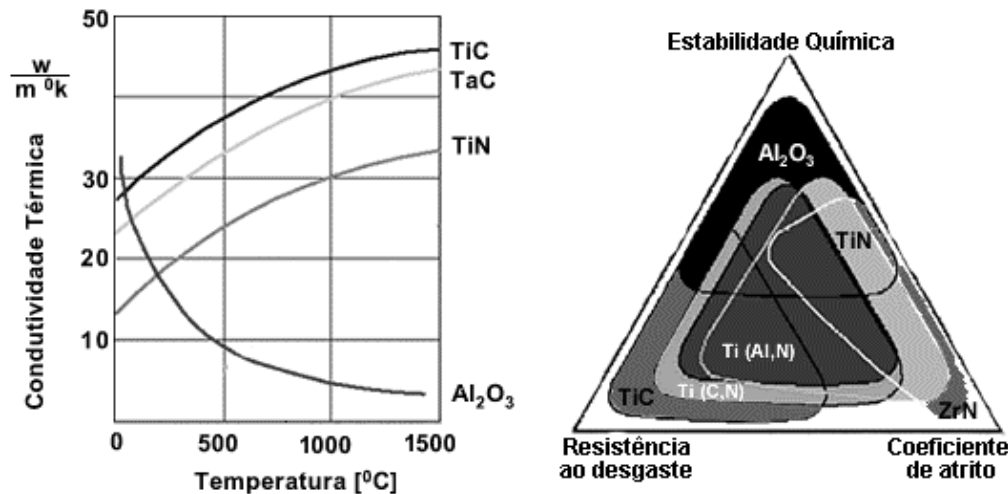


Figura 7 - (a) Condutividade térmica em função da temperatura.
(b) Principais propriedades dos vários tipos de cobertura (Wertheim, 2002)

A baixa condutividade térmica da cobertura também favorece a redução do desgaste da ferramenta de corte, promovendo amplos gradientes térmicos através da espessura do cavaco, conduzindo ao menor contato do cavaco com a ferramenta de corte (Balaji et al. 1999).

3° Espessamento da BUL: Se as condições necessárias para a extrusão e adesão das inclusões forem satisfeitas haverá então a formação de uma BUL na superfície da ferramenta com uma determinada espessura, conforme apresentado na Figura 8.

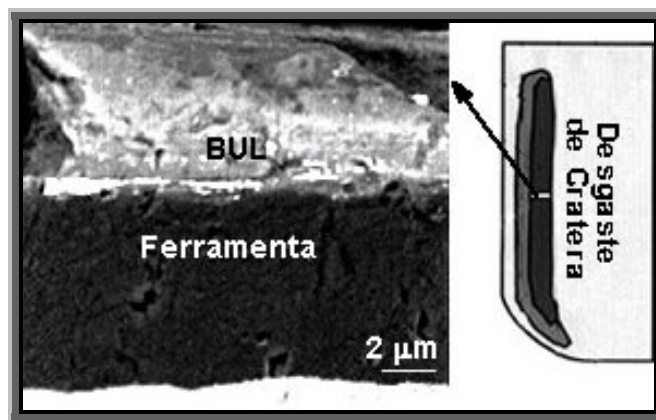


Figura 8: Espessura da BUL (Adaptado de Larsson; Ruppi, 2000)

A Figura 8 é a seção transversal da BUL formada sobre a superfície da ferramenta com cobertura de nitreto de titânio, apresentada na Figura 3, desenvolvida na usinagem do aço tratado com cálcio.

A espessura de uma BUL estável pode ser controlada através do uso de uma temperatura de corte adequada, a qual está associada aos parâmetros de corte, em particular, a velocidade de corte (Poulachonet al. 2002). Na usinagem do aço inoxidável com inclusões de $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, a espessura da BUL é de 2 a 40 μm (Qi; Mills, 1996). Na usinagem do ferro fundido cinzento com ferramenta de CBN ($a_p = 0,15 \text{ mm}$, $f = 0,3 \text{ mm}$, $v_c = 600 \text{ m/min}$) a espessura da BUL de sulfeto de manganês é de aproximadamente 1 μm (Sahm et al. 2002).

Os resultados obtidos com a formação da BUL, tais como redução na força de corte e no desgaste da ferramenta, tem conduzido ao desenvolvimento de coberturas artificiais com elementos das inclusões formadoras de BUL ao invés de cobertura de TiC (Norihiko, 1976). No entanto, a BUL tem a vantagem de ser mais estável após um certo tempo de corte (Poulachon et al. 2002).

Com a formação de uma BUL estável na superfície da ferramenta tem-se uma alteração do modelo dinâmico para um modelo quase-estático na interface cavaco-ferramenta, havendo uma redução da temperatura ao longo da espessura da BUL, permitindo o endurecimento e tornando-a mais resistente ao cisalhamento, reduzindo assim a remoção da BUL pelo cavaco (Tieu et al. 1998). Entretanto, a temperatura entre o cavaco e a BUL deve ser mantida em uma temperatura adequada para que a inclusão presente no cavaco e na linha de corte ou próximo à interface cavaco-BUL esteja no estado viscoso, favorecendo a extrusão, adesão (Fang; Zhang, 1996), e a recristalização das inclusões de MnS nas superfícies da ferramenta (Larsson; Ruppi, 2000).

4° Formação de uma camada estável: A formação de uma BUL estável pode ser entendida através do seguinte exemplo hipotético. Imagine uma caixa d'água com duas aberturas na parte superior usadas para encher e esvaziar o recipiente. Após um tempo "t" a caixa d'água estará completamente cheia. A partir deste momento a quantidade de água acrescentada no recipiente será igual à quantidade de água que estará saindo pela abertura localizada na parte superior da caixa d'água. Nesta situação o sistema terá alcançado a estabilidade.

Na usinagem, quando a taxa de material das inclusões aderida nas superfícies da ferramenta de corte for igual à taxa de material removida pelo cavaco, tem-se a formação de uma BUL estável (Fang; Zhang, 1996; Tieu et al. 1998). Assim como na caixa d'água, o tempo é variável para a formação de uma BUL estável. O tempo necessário para a formação da BU estável para a ferramenta de metal-duro e aço-rápido é de 5 e 1 minuto, respectivamente.

A variável para a formação de uma BUL estável também pode ser expressa na unidade de comprimento de corte. Assim, para a ferramenta de aço-rápido a condição necessária para a formação da BUL estável pode ser de 1 minuto ou um comprimento de corte de 100 metros.

Se as quatro condições apresentadas (extrusão, adesão, espessamento e estabilidade) forem satisfeitas, então haverá a formação de uma BUL estável na interface cavaco-ferramenta, propiciando (Fang; Zhang, 1996; Qi; Mills, 1996):

- redução do desgaste por abrasão;
- redução do desgaste por adesão;
- redução do desgaste por difusão;
- alteração do modelo de difusão de dinâmico, entre a ferramenta e o cavaco, para quase-estático, entre a ferramenta e a BUL.

Redução do desgaste por abrasão: Partículas e microestruturas abrasivas, tais como o carbonitreto de titânio e a steadita quando pressionadas sobre uma outra superfície de menor dureza, geram um fluxo plástico no material na região de contato. Nas ferramentas de corte as inclusões abrasivas na peça geram uma tensão localizada que excede a pressão de contato, resultando na deformação plástica da superfície. Quando um movimento relativo é imposto às superfícies, ocorre uma micro-usinagem na superfície da ferramenta com remoção de material pelas partículas abrasivas.

A presença da BUL na interface cavaco-ferramenta diminui o desgaste por abrasão através da redução do contato físico das inclusões abrasivas com as superfícies da ferramenta (Fang; Zhang, 1996), no entanto, continua havendo remoção do material da ferramenta pelas inclusões abrasivas (Larsson; Ruppi, 2000) observada através dos “riscos” na superfície da ferramenta embaixo da BUL.

A formação da BUL contribui, também, para a manutenção da dureza da ferramenta de corte que diminui com o aumento da temperatura, reduzindo assim o desgaste por abrasão.

Redução do desgaste por adesão: Enquanto o mecanismo de desgaste por abrasão pode ser explicado principalmente em termos de força e tensão, no mecanismo de desgaste por adesão, a interação entre os materiais das superfícies tem um importante papel.

Quando as superfícies são mantidas juntas, atua à distância nanométrica a força fraca de superfície de van der Waals. Esta força resulta da flutuação de cargas ao redor do átomo ou molécula nas superfícies, criando um instantâneo dipolo podendo polarizar um átomo ou molécula vizinha e atrair-lo (Briscoe; Adams, 1987). Reduzindo a distância entre as superfícies a dimensão atômica, forças fortes de curto alcance e de diferentes tipos, dependendo da natureza dos materiais em contato, entram em ação. No entanto, sobre as superfícies, é possível encontrar resíduos. Neste caso, somente as forças de superfície de longo alcance, tipo a de van der Waals, contribui para a adesão, isto porque a espessura das camadas de resíduos de ambas as superfícies é em geral maior do que o alcance das forças fortes de curto alcance. Quando uma força tangencial é aplicada, pode haver uma dispersão do filme de resíduos e conseqüentemente forças de curto alcance entraram em ação (Czichos, 1978), havendo então a adesão entre as superfícies.

A presença da BUL na interface do par tribológico cavaco-ferramenta, torna a interface à região de menor resistência para o cisalhamento, não havendo portanto remoção do material da ferramenta por adesão. No entanto, freqüentemente, as inclusões não formam uma BUL com espessura ao longo de toda a superfície da ferramenta.

Redução do desgaste por difusão: Na ausência da BUL, o material na região secundária de cisalhamento, quando em contato com a face da ferramenta, adquire a velocidade desta superfície, isto é, 0 m/min (Qi; Mills, 2003). Em relação ao material usinado na presença da BUL, esta redução na velocidade aumenta o tempo de contato entre o material do cavaco e o material da ferramenta, favorecendo o desgaste por difusão (Vleugels; Van Der Biest, 1999).

No ferro fundido cinzento, o tempo de contato cavaco-ferramenta é pequeno em razão da fragilidade do cavaco. Outra característica que contribui para a redução do desgaste por difusão no ferro fundido cinzento é a menor reatividade química deste material em razão dos elementos de liga: silício e carbono, que diminui a reatividade do material da peça com o material da ferramenta, por exemplo, o sialon (Blackman, 1990 apud Vleugels; Van Der Biest, 1999).

Os processos de desgaste apresentados (adesão, difusão e abrasão) podem ser modificados pela ação de um lubrificante, cujo principal propósito é interpor entre as superfícies um filme que seja capaz de reduzir a quantidade de interação direta entre sólido-sólido. No caso dos lubrificantes sólidos estes podem estar na interface cavaco-ferramenta de duas formas: como lubrificante sólido ou como aditivo metalúrgico.

O lubrificante sólido é aplicado nas superfícies da ferramenta, antes da operação de usinagem. Os aditivos metalúrgicos são obtidos durante a produção do material através da adição de elementos que formam inclusões com ação de lubrificante interno (Ferraesi, 1982). Além da ação lubrificante, as inclusões contribuem para a redução da força de corte, durante o processo de usinagem, através da condução de microtrincas na região primária e secundária de cisalhamento, que é apresentada em detalhe nos próximos tópicos.

2.2 Região secundária de cisalhamento

O cavaco movendo-se sobre a face da ferramenta de corte conduz ao estabelecimento de uma região muito estreita e de intenso cisalhamento adjacente à superfície da ferramenta conhecida como região secundária de cisalhamento ou zona de fluxo (Qi; Mills, 1996).

As inclusões de MnS na zona de fluxo são intensamente deformadas, podendo ter sua espessura reduzida para tamanhos menores que $0,1 \mu\text{m}$ (Dines, 1975 apud Trent, 2001).

Para que a inclusão de MnS possa atuar favoravelmente na zona de fluxo a sua característica plástica deve ser adequada, isto é, não muito fluida. Assim, a temperatura deve ser apropriada, favorecendo o papel na inclusão de MnS não só na região secundária mas também na região primária de cisalhamento (Araki; Yamamoto, 1975).

2.2 Região primária de cisalhamento

A interação entre as inclusões de MnS e a matriz na região primária de cisalhamento gera, pela presença de um campo de tensão heterogêneo, uma intensa concentração de tensão em torno das inclusões, induzindo a incoesão através da interface matriz-inclusão e originando microtrincas na região primária de cisalhamento. Estas microtrincas promovem a redução na força de corte e menor consumo de energia (Araki; Yamamoto, 1975; Fang; Zhang, 1996; Mills et al. 1997).

A iniciação de microtrincas na região primária de cisalhamento, como resultado da diferente deformabilidade entre as inclusões de MnS e a matriz, favorece a fragmentação do cavaco (Fang; Zhang, 1996; Joseph; Tipnis, 1975; Brion, 1995 apud Poulachon et al. 2002; Ramalingam et al. 1975; RAVI et al. 1987) e conseqüentemente a redução do comprimento de contato cavaco-ferramenta (Kiessling, 1968 apud Joseph; Tipnis, 1975) contribuindo para a diminuição da temperatura na ferramenta.

O grau de deformação da inclusão de MnS durante o processo de usinagem, na região primária e secundária de cisalhamento, pode ser observado na Figura 9.

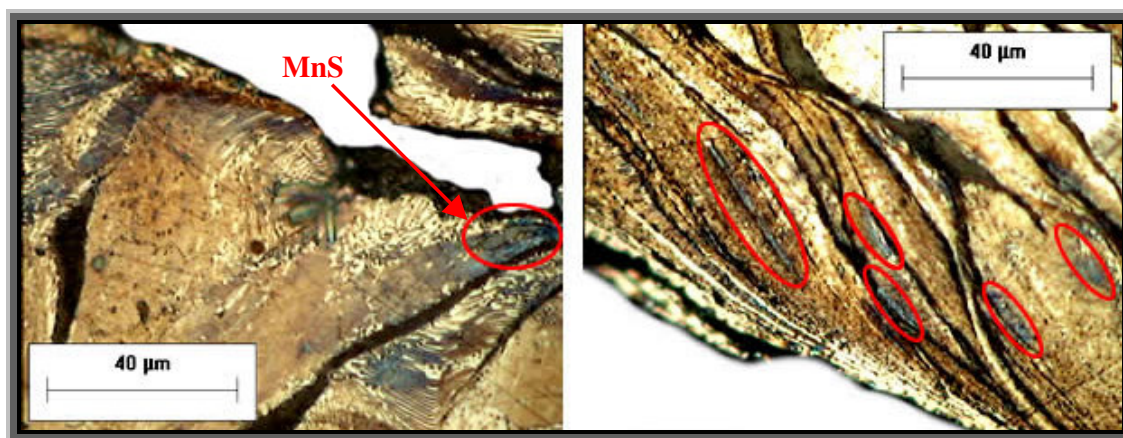


Figura 9: Inclusão de MnS deformada na região primária (a) e secundária (b) de cisalhamento. Cavaco de ferro fundido cinzento.

As condições desenvolvidas na região secundária de cisalhamento favorecem, como apresentado na figura 9, uma intensa deformação das inclusões, principalmente devido ao estado de tensão desenvolvida nesta região.

5. CONCLUSÕES

Ao final desta revisão, que descreveu detalhadamente o fluxograma apresentado na Figura 1, é possível entender o quão importante é estudar a influência do teor de enxofre na usinabilidade e o quão difícil é analisar esta influência, visto que inúmeras são as alterações promovidas por este elemento e que são refletidas na usinabilidade do ferro fundido cinzento.

6. REFERÊNCIAS

- Ana Pereira, A. et al. 2005, "The Influence of Sulfur on Machinability of Gray Cast Iron FC25". In: INTERNATIONAL SEMINAR ON MANUFACTURING SYSTEMS, 38th, Florianópolis. Anais eletrônicos... Brazil-Florianópolis: CIRP, 2005. CD-ROM.
- Ana Pereira, A. 2005, "Influência do Teor de Enxofre na Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento FC25". Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- Araki, T. e Yamamoto, S., 1975, Proceedings of the International Symposium on Influence of Metallurgy on Machinability. American Society for Metals. p.159-173.
- Dawson, S. et al., 1999, "The Effect of Metallurgical Variables on The Machinability of Compacted Graphite Iron". In: COMPACTED GRAPHITE IRON DESIGN AND MACHINING WORKSHOP. Bad Nauheim, Germany.
- Fang, X. D. e Zhang, D., 1996, Wear, n. 197, p.169-178.
- Kassack, J. e Reuter, U., 2002, "Audi CGI Production Planning". In: COMPACTED GRAPHITE IRON, 2002, Darmstadt. Machining Workshop.
- Poulachon, G. et al., 2002, Wear, n. 253, p. 339–356.
- Qi, H. S., e Mills, B., 1996, "On the Formation Mechanism of Adherent Layers on a Cutting Tool". Wear, n. 198, p. 192-196.
- Sahm, A. et al., 2002, In: COMPACTED GRAPHITE IRON, 2002, Darmstadt. Machining Workshop.
- Tong, C.P. et al., 1989 "Eutectic Solidification of High Chromium Cast Irons". Proceedings of the Fourth International Symposium on the Physical Metallurgy of Cast Iron. Tokyo, Japan: Materials Research Society. p.403-410.
- Opitz, H., 1963, "Tool Wear and Tool Life". Proc. Int. Production Engineering Research Conf, Pittsburg. ASME, New York, pp.107-113.
- Brion, J. M. et al. 1992, "Mechanisms of Built-up Layer Formation on Turning Tools: Influence of Tool and Workpiece". Wear, n. 154, p. 225-239.
- Briscoe, B. J. e Adams, M. J., 1987, "Tribology in Particulate Technology". Philadelphia: Adam Hilger, p.91-372.
- Boehs, L. 1979, "Influência do Sulfeto de Manganês na Usinabilidade do Ferro Fundido Maleável Preto Ferrítico. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1979.
- Joseph, R. A. e Tipnis, V.A., 1975, "The Influence of Non-Metallic Inclusions on the Machinability of Free-Machining Steels". Proceedings of the International Symposium on Influence of Metallurgy on Machinability. American Society for Metals, p.55-72.
- Mills, B. e Hao, C. S., 1997, "Formation of an Adherent Layer on a Cutting Tool Studied by Micro-Machining and Finite Element Analysis". Wear, n. 208, p. 61-66.
- Ramalingam, S. et al. 1975, "The Role of Sulfide Type and of Refractory Inclusions in the Machinability of Free Cutting Steels". Proceedings of the International Symposium on Influence of Metallurgy on Machinability. American Society for Metals, 1975. p.111-129.
- Cappelli, P. G. et al. 1975, "Evaluation of Different Deoxidized Steels". Proceedings of the International Symposium on Influence of Metallurgy on Machinability. ASM, p.174-188.

- Harju, E. et al. Formation of a Wear Resistant Non-Metallic Protective Layer on PVD-Coated Cutting and Forming Tools. Surface and Coatings Technology, n. 112,p. 98-102, 1999.
- Larsson, A. e Rupp, S., 2000, “Structure and Composition of Built-up Layers on Coated Tools During Turning of Ca-treated Steel”. Materials Science and Engineering, p. 160-169.
- Nordgren, A. e Melander, A., 1989, “Deformation Behaviour of Different Types of Inclusions During Chip Formation in Turning of Quenched and Tempered Steels”. Mater, Sci. Technol, n. 5, p. 940-951.
- Beiss, P. e Kutsch, U., 1996, “Machinability of Sintered Stainless Steel 439LHC”. Power Metallurgy, v. 39, n. 1, p. 66-70.
- Holzki, M., 1996, “Optimisation of Cutting Parameters when Drilling Sintered Stainless Steel 439LHC”. Power Metallurgy, v. 39, n. 4, p. 256-257.

REVIEW: THE INFLUENCE OF INCLUSIONS OF MANGANESE SULFIDE ON MACHINABILITY

Adriana Ana Pereira

GRUCON – Dept. of Mechanical Engineering. Federal University at Santa Catarina.
adrianap@emc.ufsc.br

Lourival Boehs

GRUCON – Dept. of Mechanical Engineering. Federal University at Santa Catarina.
boehs@emc.ufsc.br

Abstract: *This article describe the Figure 1 intending to get a better understanding about the influence of MnS on machining process of gray cast iron, because its economic benefits.*

Keywords: *manganese sulfide, gray cast iron, machinability.*