



MEDIÇÃO IN-SITU POR ULTRASOM DA ÁREA REAL DE CONTATO EM PROCESSO DE CONFORMAÇÃO DE METAIS

Gilmar Ferreira Batalha

Departamento de Engenharia Mecânica - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - 05508.900 - São Paulo - SP - Brasil

E-mail: gfbatalh@usp.br Fone: 00 55 (0)11 818-5342 Fax: 00 55 (0)11 814-2424

Thomas Neudecker, Ulf Engel e Manfred Geiger

Chair of Manufacturing Technology - LFT, Institut for Manufacturing Science

Friederich-Alexander Universitaet Erlangen-Nuernberg

Egerlandstrasse, 11 D-91058 - Erlangen - Alemanha <http://www.lft.uni-erlangen.de>

Resumo. Modelagens mais atuais dos processos de conformação necessitam da identificação dos fatores influentes e da determinação da área real de contato na interface peça - ferramenta, a qual desempenha um papel chave. Apresenta-se um método que permite a medição simultânea da área real de contato (por uma técnica de ultra som) e do coeficiente de atrito em função da tensão normal e do deslocamento deslizado relativo. Estes parâmetros foram investigados em função da tensão normal de contato e do deslizamento relativo por meio de um ensaio de torção-compressão combinadas, para chapas de aço sob lubrificação. Conclui-se que o comportamento do coeficiente de atrito sob as condições de lubrificação e de tensões normais elevadas estudadas está relacionado não só com a área real de contato mas também com mecanismos de lubrificação micro-plasto-hidrodinâmica.

Palavras-chave: área real de contato, atrito, ultrassom, ensaio não destrutivo, conformação

1. INTRODUÇÃO

A área real de contato desempenha um papel significativo no comportamento tribológico do sistema peça ferramenta na conformação dos metais. Como ela é a única região capaz de transferir tensões de cisalhamento entre peça e a ferramenta, fenômenos como o desgaste e o coeficiente de atrito tendem a ser fortemente controlado por esta variável. Dependendo das tensões locais, do comprimento do deslizamento relativo e das condições de ampliação da superfície na interface de contato durante um processo de conformação de metais, a área real de contato pode assumir valores entre 0 e 100 % da área de contato nominal. Neste sentido ela costuma refletir simultaneamente tanto o estado local das condições de contato quanto uma história do processo de conformação plástica. Por tudo isto,

o conceito da área real de contato vêm sendo usado nos últimos sessenta anos para o desenvolvimento de diversos modelos de descrição da área real de contato entre peça e ferramenta em processos de conformação plástica, assumindo deformações plásticas e/ou elásticas da rugosidade das superfícies em contato [Bowden,1939 e 1959; Johnson,1992; Tsukizoe,1968; Bay,1976; Bay,1990; Nelleman,1976 e Wilson,1988]. Mais recentemente a determinação experimental da área real de contato vêm começando a receber mais atenção. A significância desta linha de pesquisa torna-se especialmente evidente quando pretende-se simular processos de conformação visando uma melhoria do fluxo de material, qualidade superficial da peça e desgaste da ferramenta, uma vez que um dos principais problemas na descrição da interação mecânica entre superfícies sólidas em contato permanece sendo a determinação da área de contato [Sobis,1992].

Este trabalho estuda a determinação experimental simultânea da área real de contato e do coeficiente de atrito na interface peça-ferramenta em processos de conformação plástica em função da pressão normal de contato e do comprimento do movimento relativo deslizado na interface peça-ferramenta, usando como exemplo: chapas de aço sob lubrificação.

2. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA ÁREA REAL DE CONTATO

Os métodos experimentais para a avaliação experimental da área real de contato usados até o momento podem ser divididos em duas categorias: métodos *integrados ao processo* (in-process) e métodos *fora do processo* (off-process). A principal desvantagem dos métodos fora do processo é fato de que devido à relaxação elástica, os efeitos elásticos não podem ser registrados. Alguns exemplos típicos de medições fora do processo são: a profilometria de realocação [Uppal,1973 e Thomas,1970] e interferometria Nomarski [Uppal,1972]. Destacam-se como métodos de medição *integrados ao processo*: métodos óticos [Azushima,1990] e os métodos de condução elétrica [Holm,1938] e térmica [Boeschoten,1967]. Uma revisão destes métodos encontra-se em [Woo,1980]. Para contatos sob carga os métodos de medição por ultra-som podem ser considerados dentre os métodos integrados ao processo como um dos mais indicados. Neste caso, a medição da transmissão ou reflexão de ondas longitudinais de ultrassom, desde ou através da interface de contato, permite uma estimativa da fração de área real de contato. Nos métodos de medição baseados na transmissão [Kendall,1971; Handzel-Powierza,1990; Krolikowski,1986,1989,1991 e 1992; Polijaniuk,1993; Scepeck,1989 e 1990; Timashev,1988 e Long,1997; Dwyer-Joyce,1997], uma onda ultra-sônica é gerada em um dos corpos contactantes e a intensidade da onda transmitida através da interface é medida. A intensidade transmitida é uma medida da rigidez mecânica da interface, a qual por sua vez é determinada pela dimensão linear do contato e não por sua área. Conseqüentemente, a determinação da área de contato depende do número e do tamanho da área de cada uma das regiões de contato. O método de reflexão [Engel,1994; Geiger,1992,1993,1994 e 1996; Saiki,1989,1992,1993 e 1994; Stancu-Nieder Korn,1994] baseia-se na reflexão das ondas de ultra-som na interface entre peça e ferramenta para a determinação da área real de contato, sendo aplicáveis a materiais com impendências acústicas iguais ou diferentes e ar ou lubrificante como meio de separação nas regiões que não estão em contato. A intensidade relativa da reflexão, em função da intensidade refletida antes do contato, pode ser usada para investigar condições de contato transiente em interfaces lubrificadas e sob condições de atrito. O método aqui descrito difere de outros métodos, ao permitir uma medição in-situ simultânea da área real de contato e do coeficiente de atrito, e uma variação independente dos parâmetros do processo.

MÉTODO DE MEDIÇÃO DA ÁREA REAL DE CONTATO POR ULTRASOM

O princípio da medição in-situ da área real de contato baseia-se na reflexão de ondas de ultra som na interface entre meios com diferentes impedâncias acústicas, como mostrado na Figura 1. Neste caso, ondas de ultra som propagam-se perpendicularmente ao plano de contato, sendo uma parte refletida e outra transmitida na interface. A pressão sonora efetiva da onda refletida é uma medida da área de contato coberta pelo feixe de ultra som na seção transversal do feixe no plano de contato, mediante uma calibração adequada.

A pressão sonora efetiva dependerá das propriedades acústicas do meio em contato (círculo na Fig. 1). As áreas de contato entre a superfície da ferramenta e os topos das rugosidades produzem apenas uma pequena reflexão em função das impedâncias acústicas típicas dos materiais da interface peça - ferramenta nos processos de conformação plástica serem em geral da mesma ordem de magnitude. Diferindo as impedâncias acústicas dos materiais sólidos nitidamente do ar e de líquidos, as áreas da interface peça - ferramenta preenchidas com ar ou lubrificante causarão uma reflexão completa, quando interfaceada com o ar, ou pelo menos uma forte reflexão do ultra-som(interface com lubrificante retido).

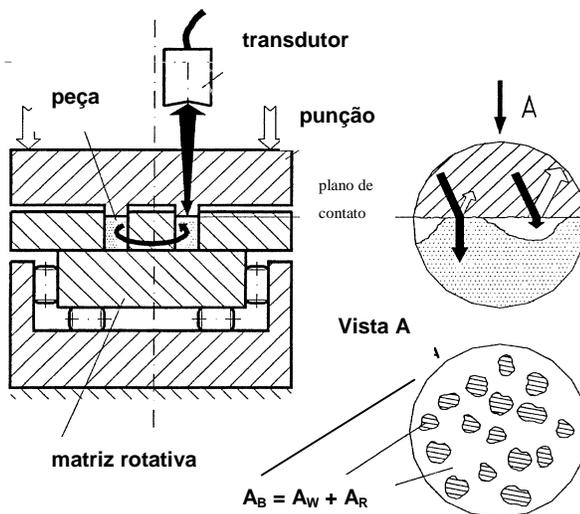


Figura 1. Método de medição da área real de contato.

A_W = área real de contato A_R = área de reflexão do ultra-som A_B = seção transversal do feixe

A pressão sonora da onda refletida na área interfacial é portanto uma medida do nível de contato, quando feita uma calibração adequada da relação entre a área real de contato e a seção transversal do feixe de ultra som. O valor da pressão sonora estabiliza-se entre dois limites determinados pelas propriedades dos materiais na interface. O valor máximo (H_0), chamado de eco de referência, dado pela reflexão em superfície livre da ferramenta (interfaceada com ar), que corresponde a 0 % da área real de contato. O limite inferior, o eco mínimo (H_{\min}) é alcançado em uma condição de contato ideal, quando a área real de contato é de 100 %. Quando considera-se a retenção de lubrificante nos espaços entre os topos das rugosidades na interface peça - ferramenta, o eco de referência deve ser tomado como um eco H_0' de menor intensidade. Este valor é obtido pela reflexão em uma superfície livre de uma ferramenta (interfaceada com um lubrificante). A relação entre estes ecos pode ser expressa na forma de dois coeficientes de reflexão, determinados experimentalmente, como mostrado em trabalhos anteriores [Geiger,1992 e 1993].

$$R_o = H_o' / H_o \quad (1)$$

$$R_1 = H_{\min} / H_o \quad (2)$$

4. CARACTERIZAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO CAMPO DE ULTRA SOM

Uma caracterização prévia de como o feixe de ultra-som distribui-se espacialmente é importante para a calibração do arranjo experimental, bem como para a interpretação dos resultados. Experimentos anteriores estudaram três opções de transdutores de ultra-som focalizados com frequências de 5, 10 e 15 MHz, trabalhando segundo a técnica de imersão, em água [Geiger,1992 e 1993]. Na focalização do feixe de ultra som na distância focal, verificou-se uma constrição do feixe em medições feitas abaixo do diâmetro do refletor sonoro. Dois efeitos estão atuando, de um lado, uma focalização natural no comprimento do campo próximo, que surge dos efeitos de difração na fonte acústica, e por outro lado, uma constrição do feixe sonoro devida a efeitos geométricos, causada pela refração em lentes curvas, que contribui para o encurtamento da distância focal. A relação entre a distância do campo próximo e a distância focal representa o fator de focalização, ou o fator de indução da região do campo próximo, K, que está entre $0 < K \leq 1$. O objetivo da focalização é de um lado aumentar a pressão sonora efetiva e de outro lado proporcionar uma melhor resolução lateral. Maiores detalhes sobre o arranjo experimental usado para registrar a estrutura do campo sonoro pode ser encontrada em [Geiger,1992 e 1993]. A partir da caracterização do feixe de ultra som, é possível determinar a posição e a dispersão do campo focal, dado pelo ponto de máxima pressão sonora efetiva no eixo acústico, quando comparada com um valor de referência sob foco [Schlengermann,1977 e 1986; Krautkrämer,1986 e Niederkorn,1993].

Uma calibração idealizada pode ser obtida a partir da teoria de dispersão e reflexão de ondas planas de ultra som. Considerando o sinal de tensão, representando o eco do feixe de ultra som é proporcional à pressão sonora efetiva da onda refletida. Assume-se uma proporcionalidade com a área do refletor, e que esta esteja toda coberta pelo feixe de ultra som. Quando a onda é refletida completamente em uma área maior que a do feixe de ultra som, o eco medido atingirá um valor máximo H_o . Para os ensaios realizados, o eco refletido a partir da superfície livre do punção, i.e.: sem contato com lubrificante e/ou a peça, serviu como este eco referência H_o . Ele o é eco de maior magnitude que pode ser encontrado para uma dada amplificação e conjunto equipamento/transdutor, bem como combinação peça, ferramenta e lubrificante. Já para um refletor menor que o feixe de ultra som, o feixe de ultra som ao contactar esta superfície menor produzirá um eco de menor magnitude H_r . A relação entre estes dois ecos corresponde à relação entre as áreas do refletor e a da feixe de ultra som, no plano do refletor:

$$H_r / H_o = A_r / A_b \quad (6)$$

No caso da Figura 1, a área do refletor (A_r) corresponde às áreas da superfície da ferramenta coberta pelo feixe de ultra som e não em contato com os picos das asperezas da peça. Isto significa que a área de contato real A_w representa a diferença entre as áreas do feixe de ultra som A_b e a área do refletor A_r :

$$A_w = A_b + A_r \quad (7)$$

a área real de contato medida na seção varrida pelo feixe de ultra som é dada por:

$$\alpha = A_w / A_b = 1 - (H_r / H_o) = (H_r - H_o) / H_o \quad (8)$$

duas condições são necessárias para a validade desta expressão. Primeira, a onda de ultra som deve ser plana, i.e.: todo o plano de contato deve estar sob uma mesma fase e o plano desta fase é a frente da onda que se move paralelamente durante sua propagação. Esta condição é alcançada de modo aproximado no ponto focal de onda de ultra-som sob focalização [Schlengermann,1977 e 1986 e Krautkrämer,1986]. Segunda, a pressão sonora no plano de fase deve ser constante. Como a pressão sonora efetiva tem uma distribuição em forma de sino, com um máximo no eixo acústico do transdutor, esta Segunda condição não é alcançada completamente. Isto significa que a altura do eco dependerá da largura do feixe de ultra som na área refletora e sua posição relativa ao campo acústico do transdutor de ultra som. O eco de magnitude máxima é obtido quando o refletor está ainda no eixo acústico. Como não é possível a medição de um refletor único para as áreas de contato reais, a área refletora consistirá de algumas centenas pequenos refletores finamente distribuídos. Pode postular-se neste caso que cada ponto de pressão sonora efetivo da distribuição corresponderá à mesma área de contato real. Neste sentido, a posição dos refletores não influencia a magnitude dos ecos. As relações descritas entre a área real de contato e razão entre os ecos H_r/H_o estão mostradas na Fig. 2.

Para contatos peça ferramenta de mesmo material (curva 1 na Fig. 2) a onda de ultra som atravessa a área de contato sem reflexão. O equipamento de ultra-som, neste caso devido a sua capacidade de amplificação limitada (distância sinal ruído) não pode medir valores da área real de contato maiores que α_1 , i.e.: uma resolução de 100 % não pode ser obtida. Para $\alpha = \alpha_1$ uma magnitude de eco $H_{r\alpha_1}$ pode ser separada do sinal de ruído do sistema de medição. Para $\alpha = 1$ não existe um valor que possa ser definido de modo óbvio para a magnitude do eco H_r . O equipamento de ultra-som usado tinha uma capacidade de amplificação de 120 dB, a capacidade efetivamente necessária para as medições depende essencialmente do material examinado e da frequência da onda de ultra-som.

Para materiais diferentes da ferramenta e da peça, i.e.: diferentes impedâncias acústicas (curva 2 da Fig. 2), a onda de ultra som é parcialmente refletida na área real de contato, o que significa para diferenças suficientemente grandes das impedâncias acústicas, a capacidade de amplificação do equipamento é suficiente para o valor H_{r1} (H_r para $\alpha = 1$) do nível de ruído. O valor H_{r1} / H_o é definido como o coeficiente de reflexão R_1 [Stancu-Niederborn,1993]. E os valores obtidos estão indicados para alguns materiais na Tabela 1.

Quando um lubrificante líquido está presente na interface peça ferramenta, acontece uma redução do eco de referência de H_o para H_o' (Curva 3 da Fig. 3). Enquanto na interface entre a superfície da ferramenta e o ar a onda de ultra som é refletida completamente; através da interface entre a ferramenta e o lubrificante, ela propagará através do lubrificante, provocando uma redução da pressão sonora efetiva da onda refletida, de H_o até o valor $H_o' = R_o \cdot H_o$. Pelo que, a relação de calibração toma a forma:

$$\alpha = (R_o \cdot H_o - H_r) / [H_o \cdot (R_o - R_1)] \quad (10)$$

Tabela 1. Coeficientes de reflexão, R_1

Material da peça (aço ferramenta $Z = 45,37 \cdot 10^6$ MRayls)	Metodo de tempo	Ensaio de Compressão	Impedância Acústica, $Z, 10^6$ MRayls
Aço DIN St 1403	0,0180	0,0260	47,04

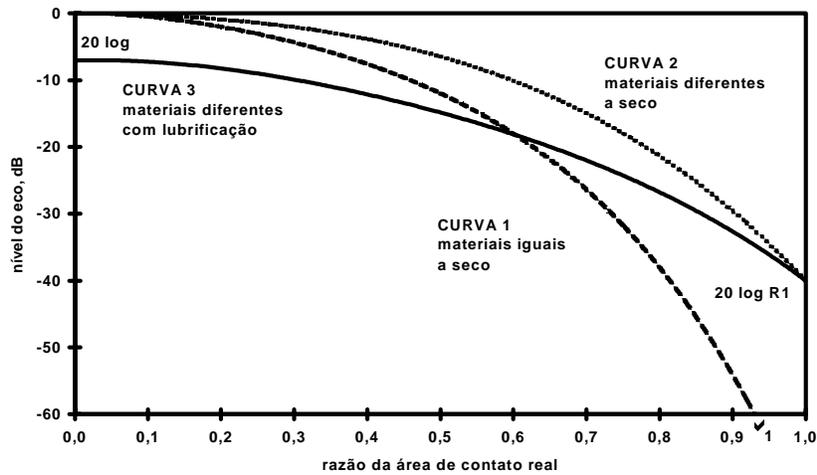


Figura 2 - Relações de calibração entre a área real de contato e a razão entre os ecos H_r/H_0 .

a frequência do ultra-som não aparece na Eq. (10), influenciando apenas o valor de α_1 . Para a medição da área real de contato tornou-se necessário a determinação experimental dos coeficientes de reflexão R_1 e R_0 , uma vez que os valores da literatura não distinguiram suficientemente o material estudado neste trabalho (Tabela 1). As dispersões das medidas feitas sob uma frequência constante foi considerada devida a flutuação de parâmetros externos, tais como: temperatura de ensaio e orientação angular do transdutor.

A avaliação do coeficiente de reflexão R_0 para um lubrificante líquido retido entre a peça e a ferramenta depende da pressão a que está submetido e é feita através de um ensaio de compressão com um corpo de prova tipo Rastegaev, que fornece uma configuração com um bolsão de lubrificante adequado. Dois fatores causam incerteza nos valores medidos de R_0 . Primeiro, na interface ferramenta - lubrificante surgem perdas por reflexão, que comparadas com as de uma interface ferramenta - ar, reduzem a capacidade do sistema de medição da área de contato real. Segundo, a pressão efetiva do lubrificante nos bolsões de lubrificação não são conhecidas em processo real de lubrificação. Um limite da pressão de óleo pode apenas ser especificado quando se conhece as tensões nominais, já que a pressão no lubrificante retido nos bolsões fechados não pode ser maior que a pressão normal em suas arestas [Azushima,1993]. Ao contrário da situação a seco, onde $R_0 = 1$, isto a onda de ultra som é refletida por completo, sob lubrificação, a interface torna-se permeável numa percentagem que depende da pressão sob o lubrificante. Para os lubrificante usados mais usados na conformação dos metais, o coeficiente de reflexão fica dentro de uma faixa de $R_0 = 0,86$, para uma pressão normal de 1273 N/mm^2 , e $R_0 = 0,94$ sob ausência de pressão. Levando-se em conta que a pressão não está distribuída igualmente na interface mas que deve ficar entre zero e a tensão nominal em um bolsão de lubrificante. Neste trabalho adotou-se um valor médio $R_0 = 0,90$, o erro diminui ao aumentar a área de contato.

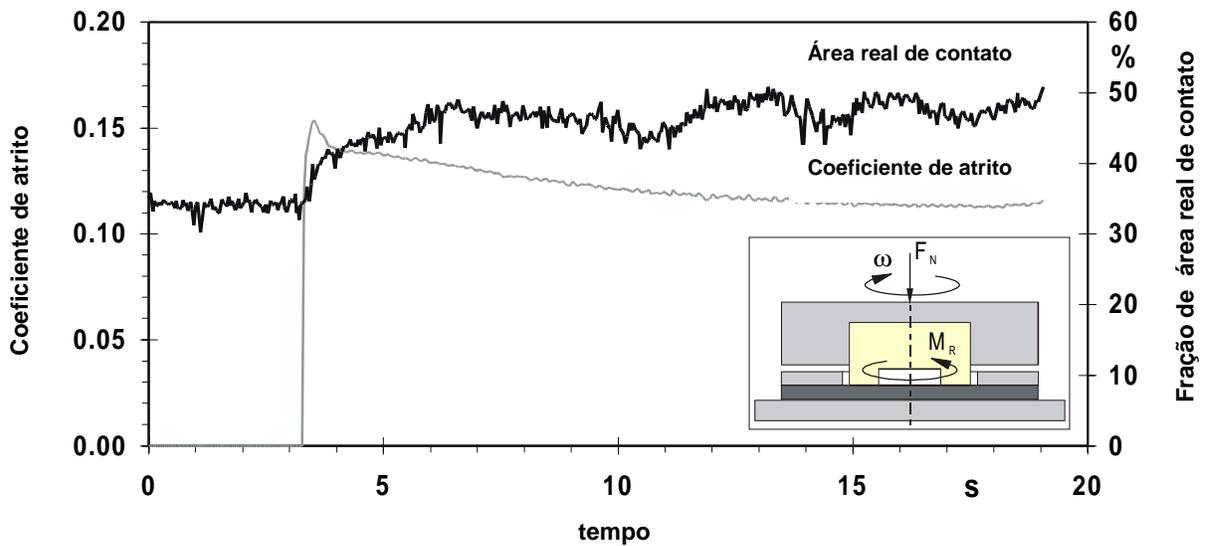
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Mediante um dispositivo de ensaio combinado de torção compressão descrito em [Batalha,1998] investigou-se a área real de contato e o coeficiente de atrito em função da pressão normal e o deslocamento deslizado. Os experimentos foram realizados com uma chapa de aço laminada por cilindros jateados por granalha (SBT) e utilizou-se um lubrificante prelube Anticorit 4107 S. A topografia superficial resultante caracteriza-se por uma rugosidade anisotrópica, caracterizada por vales intercomunicantes e estatisticamente irregular. As amostras foram ensaiadas a 40, 80, 120 e 160 N/mm² respectivamente. As medições da área real de contato foram feitas por meio de um transdutor de 15 MHz e uma velocidade de rotação do punção de 2,36 mm/s.

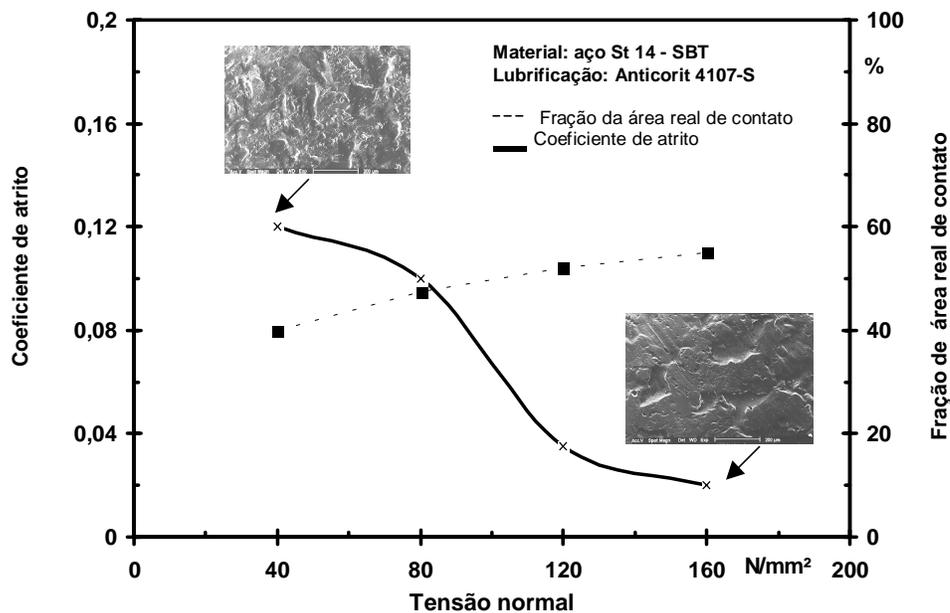
A dependência da área real de contato e do coeficiente de atrito em função do tempo, i.e.: deslocamento (Fig. 3-a) mostram um comportamento típico com um valor mais elevado no início da rotação do punção passando a seguir para um estágio de atrito menor e mais estável, cujo valor médio foi tomado como medida. Os resultados obtidos mostraram que a área real de contato aumenta inicialmente, de modo mais nítido devido ao achatamento das asperezas, o que só não ocorre completamente em função da formação de bolsões de lubrificantes fechados (hidrostáticos) e abertos (hidrodinâmicos), com o início do deslizamento relativo entre peça ferramenta, os efeitos hidrodinâmicos fazem com que o lubrificante flua entre as asperezas, o que junto com o efeito hidrostático de algumas áreas fechadas contendo lubrificante, tende reduzir a evolução da área de contato e manter um coeficiente de atrito constante. Considerando a influência da tensão normal sobre o coeficiente de atrito e área real de contato (Fig. 3-b) para as condições estudadas, verifica-se que entre 40 e 80 N/mm² ocorre um aumento da área de contato e uma correspondente redução do coeficiente de atrito, contudo na faixa de 80 a 120 N/mm² identifica-se uma transição típica de um regime de lubrificação mista onde a reduzida evolução da área real de contato bem como sua influência sobre o coeficiente de atrito indicam um regime de lubrificação dominado por mecanismos micro - plasto - hidrodinâmicos.

6. CONCLUSÕES

- O método de ensaio de ultra som combinado com o ensaio de torção - compressão proporcionou medições in-situ precisas da área real de contato para corpos de prova de chapas de aço, bem como uma análise simultânea da dependência entre a área real de contato e o coeficiente de atrito em função da tensão normal e do deslocamento.
- A técnica experimental utilizada pode ser usada como um poderoso método de monitoração in-situ de processos de conformação plástica industriais e/ou estudo de regimes de lubrificação e novas leis de atrito.
- A correta caracterização dos parâmetros do campo ultrasônico, propriedades ultrasônicas do material da ferramenta, da peça e do lubrificante bem como uma adequada aquisição do sinal de ultra-som são fundamentais para a precisão do método.
- Em pressões normais elevadas sob lubrificação, obteve-se uma transição típica de um regime de lubrificação mista, com uma redução do coeficiente atrito, justificável por mecanismos micro - plasto - hidrodinâmicos.
- Entre 80 a 120 N/mm², tipifica-se um regime de lubrificação misto, onde a reduzida evolução e influência da área real de contato sobre o coeficiente de atrito, mostra que ela não foi neste caso o único fator de influência sobre o atrito.



(a)



(b)

Figura 3 - Comportamento do coeficiente de atrito e da área real de contato para uma chapa laminada por cilindro texturizado SBT, DIN St 1403, lubrificante RP4107 S

(a) ensaio vs. tempo para uma tensão normal de 80 N/mm^2 .

(b) comportamento vs. tensão normal.

Agradecimentos

Agradece-se a CAPES pela bolsa de pós - doutorado na Universidade de Erlangen-Nuremberg.

REFERÊNCIAS

- AZUSHIMA; A., TSUBOUCHI, M., KUDO, H., Direct observation of lubricant behaviors under the micro-PHL at the interface between workpiece and die, *Proc. 3rd. ICTP*, v. 1, p. 551-6, 1990.
- AZUSHIMA, A., LIU, D. G., Direct measurement of hydrostatic pressure generated within lubricant entrapped into pocket in the edge surface of cylinder, *Advanced Tec. of Plasticity*, 78-83, 1993.
- BAY, N. , WANHEIM, T., Real area of contact and friction stress at high pressure sliding contact, *Wear*, 38, p. 201-9, 1976.
- BAY, N., WANHEIM, T., Real area of contact between a rough tool and a smooth workpiece at high normal pressure, *Wear*, 38, , p. 225-34. 1976.
- BAY, N., WANHEIM, T., Contact Phenomena under bulk plastic deformation conditions, *Advanced Technology of Plasticity*, 4, p. 1677-91, 1990.
- BATALHA, G. F., NEUDECKER, T., ENGEL, U. Surface Qualification and its Relationship to the tribological behavior of different Surface Textures of Aluminum Sheet, *Proc. 5th. Int. Conf. on Advances in Surface Eng.* , 1998, São Paulo, Brasil.
- BOESCHOTEN, F., VAN DER HELD, E. F., The thermal conductance of contacts between aluminum and other metals, *Physica*, 23, p. 37, 1967.
- BOWDEN, F. P., TABOR, D., The Area of contact between stationary and between moving surfaces, *Proc. Royal Soc. London*, series A, v. 169, p. 391-413, 1939.
- BOWDEN, F., Junction growth in the metallic friction, *Royal S. London A*, 251,387, 1959.
- DWYER-JOYCE, R. S., DRINKWATER, B. W., The use of ultrasound to study rough surface contact, *New Directions in Tribology - 1st. World Tribology Congress*, Ed. Ian M. Hutchings, 8-12 sept. 1997, Mechanical Eng. Publications Ltd., London, 1997.
- GEIGER, M., ENGEL, U., VOLLERTSEN, F., In situ ultrasonic measurement of the real contact area on bulk metal forming, *Annals of the CIRP*, 41, p. 255-8, 1992.
- GEIGER, M., ENGEL, U., VOLLERTSEN, F., In-situ-ultraschallmessung der wahren Kontaktfläche bei Massivumformverfahren, *Umformtechnik*, 27, p. 19-25, 1993.
- GEIGER, M., ENGEL, U., PFESTORF, M. Ultrasonic Inspection of Stress State of Prestressed Extrusion Dies, *Production Engineering*, v. 1/2, p. 213-6, 1994.
- GEIGER, M., ENGEL, U., NIEDERKORN, S., PFESTORF, M., Meßtechnische Erfassung der Wirkflächenvorgänge in Umformtechnik, *Tribologie-Schmierungstechnik*, 43,3, 113-9, 1996.
- GEIGER, M., ENGEL, U., PFESTORF, M., NIEDERKORN, S. Experimental investigation of the contact phenomena in cold forging, *Prod. Eng.*,III/2, p. 5-10, 1996.
- HANDZEL-POWIERZA, Z., KLIMCZAK, T., POLIJANIUK, A., On the experimental verification of the Greenwood Williamson Model for the contact of rough surface, *Wear*, 154, 115-24, 1992.
- HOLM, R., Der Reibungskraft in der wahren Kontaktfläche, *V. Siemens Werk*, 17, 38, 1938.
- KENDALL, K., TABOR, D., An ultrasonic study of the area of contact between stationary and sliding surfaces, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 323, p. 321-40, 1971.
- KRAUTKRÄMER, J., KRAUTKRÄMER, H., *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1986.
- KRÓLIKOWSKI, J., SZCEPEK, J., WITCZAK, Z. High pressure in ultrasonic study of contact of solids, *Physica B*, 139-140, p. 803-5, 1986.
- KRÓLIKOWSKI, J., SZCEPEK, J., WITCZAK, Z. Ultrasonic investigation of contact between solids under high hydrostatic pressure, *Ultrasonics*, 27, (1), p. 45-9, 1989.
- KRÓLIKOWSKI, J., SZCEPEK, J., Prediction of contact parameters using ultrasonic method, *Wear*, 148, p. 181-95, 1991.
- KRÓLIKOWSKI, J., SZCEPEK, J. Phase shift of the reflection coefficient of ultrasonic waves in study of the contact interface, *Wear*, 157, p. 51-64, 1992.
- LONG, M., RACK, H. J., Ultrasonic in situ continuous wear measurements of orthopaedic titanium alloys, *Wear*, 205, p. 130-6, 1997.
- NELLEMANN; T., BAY, N., WANHEIM, T., Real area of contact and friction stress - the role of trapped lubricant, *Wear*, 38, p. 225-34. 1976.
- POLIJANIUK, A., KACZMAREK, J., Novel stage for ultrasonic measurement of real contact area between rough and flat parts under quasi-static load, *J. Test. and Eval.*, 21, 3, p. 174-7, 1993.

- SAIKI, H. et al., An experimental study of transient friction during forging processes, *J. of J.S.M.E*, 55-516, p. 2184, 1989.
- SAIKI, H. et al., Ultrasonic examination of contact conditions of frictional interface in forging processes, *Proc. JSME Conf.*, 152, p. 918-2, 1991.
- SAIKI, H. et al., Estimation for contact conditions of frictional interface by means of ultrasonic wave in forging processes, *Proc. JSTP Conf.*, 143, p. 483, 1992.
- SAIKI, H. et al., Ultrasonic examination for contact conditions of frictional interface in forging processes, *Proc. ATMMF*, p. 369, 1992.
- SAIKI, H. et al., Estimation of contact conditions in lubricated frictional interface of forging process by ultrasonic examination, *Proc. of the 4th ICTP*, p. 1126-31, 1993.
- SAIKI, H. et al., Estimation of functional shearing stress under lubricated contact conditions in ring upsetting (application of ultrasonic examination), *JSME*, C,60,577, 171-6, 1994.
- SAYLES, R. S., THOMAS, T. R., Thermal conductance of a rough elastic contact, *Applied Energy*, (2), p. 249-267, 1976
- SCHICK, A., KINDER, H., BAUMANN, J., Charakterisierung von Berührflächen zwischen Festkörpern durch Ultraschall-Analyse, in: *Tagungs der DACH*, DGZFP-Berlin, 792-9, 1987.
- SCHLENGERMANN, U., Kriterien zur Auswahl fokussierender Ultraschallprüfköpfe, *Materialprüfung*, 19, n. 10, 1977.
- SCHLENGERMANN, U., Möglichkeiten zur Fokussierung von Ultraschallfeldern - ein Überblick, *Materialprüfung*, 28, p. 137-41, 1986.
- SOBIS, T., ENGEL, U., GEIGER, M., A theoretical study on wear simulation in metal forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, 34, p. 233-39, 1992.
- STANCU-NIEDERKORN, S., ENGEL, U., GEIGER, M., A new method for investigating the relation between real contact area and friction in bulk metal forming, *Wire*, 43, p. 381-6, 1993.
- STANCU-NIEDERKORN, S., ENGEL, U., GEIGER, M., Ultrasonic investigation of friction mechanism in metal forming, *J. Mat. Proc. Technology*, 45, p. 613-8, 1994
- SZCEPEK, J., WITCZAK, Z., KRÓLIKOWSKI, J., Ultrasonic investigations of contact interface of solid by means of bulk shear waves, *Proc. Third Int. Conf. on Joining Ceramic, Glass and Metal*, April 1989, Bad Neuheim, DGM, p. 341-6, 1989.
- TIMASHEV; S. A., EGOROV, A. V., POLUJAN, L. V., Diagnostic of contact area between machine parts by acoustic field scattering, *Vibration Eng.*, 2, p. 19-25, 1988.
- THOMAS, T. R., PROBERT, S. D., Establishment of contact from surface profiles, *British J. Appl. Physics*, 3, p. 277-89, 1970.
- TSUKIZOE, T., et al., On the mechanics of contact between metal surfaces, Part. 2 - The real contact area and number of the contact points, *Trans. ASME*, ser. F, 90, 1968.
- UPPAL, A. H., PROBERT, S. D., THOMAS, T. R., The real area of contact between a rough and a flat surface, *Wear*, 22, p. 163-82, 1972.
- UPPAL, A. H., PROBERT, S. D. The plastic contact between a rough and a flat surface, *Wear*, 23, p. 173-84, 1973.
- WILSON, W., SHEW, S., Real area of contact and boundary friction in metal forming, *International Journal of Mechanical Science*, 30, 7, p. 475-89, 1988.
- WOO, K. L. THOMAS, T. R., Contact of rough surfaces: a review of experimental work, *Wear*, 58, p. 331-40, 1980.

ULTRASONIC IN-SITU MEASUREMENT OF REAL CONTACT AREA IN METAL FORMING PROCESSES

In order to give a more accurate theoretical description of forming processes, it is important to identify influences and to investigate a suitable physical model. In such a model the real contact area at the interface between tool and workpiece plays a key role. The method developed allows for the simultaneous measurement of the real contact area (by an ultrasonic technique), the shear stress and the friction coefficient in dependence on the normal stress and the relative sliding length. The real contact area and the friction coefficient were investigated for steel sheets specimens under lubrication by an combined twist and compression test.

Keywords: real contact area, friction, ultrasound, non destructive testing, forming