

Tendência

Os efeitos da miniaturização no processo de estampagem

Com o surgimento de novas tecnologias e a tendência crescente de miniaturização dos produtos, novos desenvolvimentos nesse sentido têm sido feitos em peças como dispositivos eletrônicos, sensores, componentes biomédicos e automobilísticos. Porém, a tendência à miniaturização de peças e produtos tem gerado desconforto para a indústria, já que esse tipo de componente precisa receber tratamento diferenciado. Além disso, as teorias já conhecidas para os processos de conformação não se aplicam nesses casos. Este trabalho apresenta, com o auxílio de referências e artigos científicos, os principais conceitos relacionados aos processos de microconformação e microestampagem de chapas, visando a um melhor entendimento sobre esse processo e sobre os principais efeitos da miniaturização de peças.

U. Boff. e L. Schaeffer

A microestampagem, assim como a microconformação, é usada para a fabricação de peças metálicas muito pequenas, em especial para produção em massa. Este trabalho procura fazer uma revisão sobre o processo e os principais problemas que ocorrem durante a miniaturização na fabricação de peças. O estudo envolve diferentes aspectos, como comportamento do material durante a miniaturização, processo, máqui-

nas e ferramental. No entanto, para que esses resultados possam ser usados em aplicações industriais ainda é necessário um estudo detalhado dos fenômenos e dos processos básicos de conformação. Atualmente, pesquisas apontam para o desenvolvimento tecnológico na área de fabricação de microcomponentes; no entanto, o processo de



Fig. 1 – Microcomponente⁽¹⁾

fabricação está baseado em resultados empíricos, sendo um dos desafios deste trabalho estudar os efeitos que envolvem essa nova técnica produtiva. A figura 1 faz uma comparação entre um microcomponente e uma formiga.

Uilian Boff (uilian.boff@ufrgs.br) é mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em Porto Alegre (RS). Lírio Schaeffer (schaeffer@ufrgs.br) é professor e coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), ligado à UFRGS. Reprodução autorizada pelos autores.

Tendência

Existem diversos métodos que podem ser empregados para a fabricação de micropeças e microcomponentes, mas o processo de conformação mecânica apresenta algumas vantagens em relação a esses métodos, como alta produtividade, economia de material e controle das suas propriedades mecânicas, além de normalmente utilizar técnicas produtivas viáveis.

Microestampagem

A concepção de produtos em escala micrométrica tem suas limitações e seu potencial relacionados com as tecnologias de produção que serão empregadas. Se, por um lado, a miniaturização constitui uma limitação para a aplicabilidade da maioria das tecnologias de fabricação convencional, como corte e estampagem, por outro lado ela abre a possibilidade de se empregarem outras tecnologias. O número e a diversidade de tecnologias

usadas para produzir peças e componentes micrométricos é enorme.

A microestampagem é uma técnica de grande potencial, que permite a fabricação de peças com formas complexas, porém as dimensões reduzidas das partes tornam o processo de fabricação mais difícil. A figura 2 mostra a comparação entre peças estampadas em escala macro e micrométrica.

Quando comparado com outras tecnologias de fabricação, o processo tem como vantagens específicas a economia de recursos econômicos e ecológicos.

Poucas aplicações deste tipo foram conhecidas até hoje; no entanto, recentes progressos, ideias inovadoras e novos desenvolvimentos representam uma base para explorar o potencial inerente às microformas em um futuro promissor⁽³⁾.

Efeitos da miniaturização no processo de microconformação

Problemas no mundo da microconformação

Assim como qualquer outro meio de fabricação de peças, os processos de microfabricação tam-



Fig. 2 – Comparação entre macro e microcopos estampados⁽¹⁰⁾

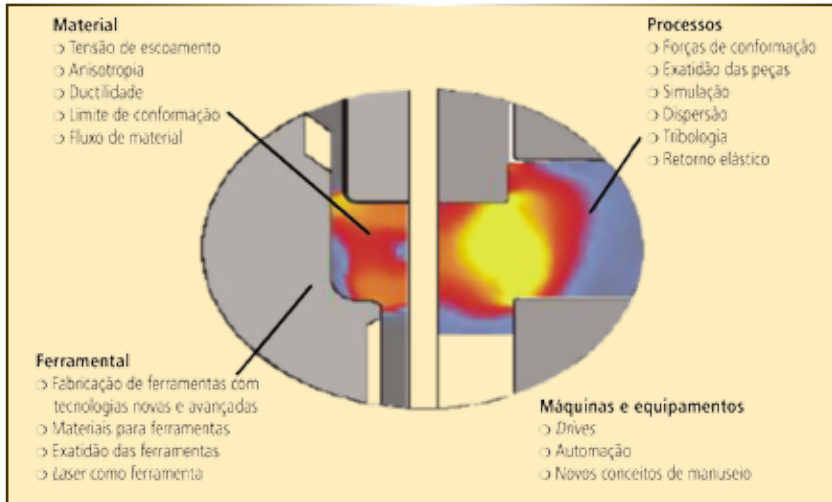


Fig. 3 – Problemas da microconformação⁽³⁾

bém apresentam problemas. Por exemplo, a folga entre a matriz e o punção é um fator insignificante durante o processamento de uma peça convencional, mas pode tornar-se um problema quando a folga necessária para uma micropeça deve ser de

poucos μm . Além disso, são necessárias tecnologias de medição adequadas para assegurar a qualidade dos produtos e o controle do processo⁽³⁾.

O principal problema está na fabricação de ferramentas de alta precisão e na disponibilidade de

máquinas-ferramenta adequadas para a produção de micropeças, especialmente para a confecção de formas complexas com tolerâncias estreitas. No entanto, novas abordagens envolvendo métodos alternativos de fabricação existem para superar essas dificuldades⁽³⁾.

O estudo da microconformação envolve diferentes áreas de conhecimento. É necessário estudar as características do material, do processo, das ferramentas, assim como do conjunto máquina/ferramenta. No entanto, para empregar esses resultados em aplicações industriais é necessária uma pesquisa detalhada dos fenômenos e dos processos básicos de conformação mecânica. A figura 3 ilustra os problemas

Tendência

que podem ocorrer no mundo da microconformação.

Comportamento do material

O comportamento do material é influenciado quando o dimensionamento de uma peça obtida por miniaturização passa de um tamanho convencional para a escala micrométrica. No caso da redução do tamanho da peça de trabalho para dimensões micrométricas, nem todos os parâmetros se alteram de acordo com a regra da similaridade, como a rugosidade da superfície e o tamanho de grão⁽⁵⁾.

O efeito escala descreve a mudança de comportamento de um material em um processo de conformação em que a escala é diminuída. Para estudo do efeito escala é necessária a realização de vários experimentos, bem como a utilização das leis da teoria de similaridade, a fim de obter processos geometricamente similares, porém, com tamanhos diferentes. Na conformação de metais, os parâmetros mais importantes que descrevem o comportamento do material são a tensão de escoamento e a curva de escoamento; por meio deles é possível controlar as forças de conformação, a carga no ferramental e o comportamento local do escoamento.

O efeito da miniaturização na tensão de escoamento está relacionado com o aumento da quantidade de grãos superficiais nas peças diminuídas, enquanto o tamanho do grão continua o mesmo⁽¹⁾. Durante o processo de



Fig. 4 – Relação da superfície de grãos para o volume de grãos⁽¹⁰⁾

conformação, os grãos dispostos externamente estão sujeitos a pequenas forças quando comparados aos grãos internos. Como consequência, a tensão de escoamento integral deve diminuir com a redução da dimensão da peça⁽⁷⁾.

Kals e Vollertsen^(6,2) investigaram a conformação de chapas de metal com espessura de até 0,1 mm em termos de dobra e flexão a *laser*, e salientaram que em operações de flexão para chapas grossas, o gradiente de temperatura leva à ruptura, considerando que as chapas finas são dobradas pelo mecanismo a *laser*. O dobramento por flexão para chapas de CuNi18Zn20 e CuZn15 mostrou uma redução significativa do tamanho relacionada à máxima força de dobramento, quando a espessura da chapa foi reduzida a menos de 0,5 mm (tamanho de grão de 25 μm). A proporção da superfície de grãos para o volume de grãos (figura 4) é responsável por esse efeito⁽¹⁰⁾.

Heterogeneidade microestrutural durante a deformação

A microestrutura é influenciada por diversos fatores que ocorrem durante a deformação, resultando em uma maior heterogeneidade. Esse comportamento é importante para o estudo do



Fig. 5 – Eventos locais que influenciam a microestrutura dinâmica durante a deformação⁽¹⁾

efeito escala durante a miniaturização nos processos de micro-usinagem ou microconformação, sendo que as heterogeneidades contribuem para impedir a previsão do comportamento do encruamento do material e das mudanças de orientação durante a deformação⁽¹⁾.

De acordo com Batalha⁽¹⁾, durante a deformação de monocristais uma parte do grão sofre rotação em um sentido e a outra parte no sentido oposto, gerando, na interface, uma região de acomodação dessas rotações, chamada de “banda de transição”. As regiões que sofrem a rotação são chamadas “bandas de deformação”, nas quais os grãos deformados subdividem-se em regiões com orientação cristalina constante, significativamente diferente da orientação presente em qualquer outra região naquele grão. A figura 5 analisa um único grão de um material policristalino deformado plasticamente, no qual é possível encontrar várias bandas de deformação.

Visioplaticidade

Visioplaticidade é um método que possibilita a obtenção de informações sobre o escoamento de um metal e das tensões envolvidas na sua operação de conformação. A visioplaticida-

Tendência

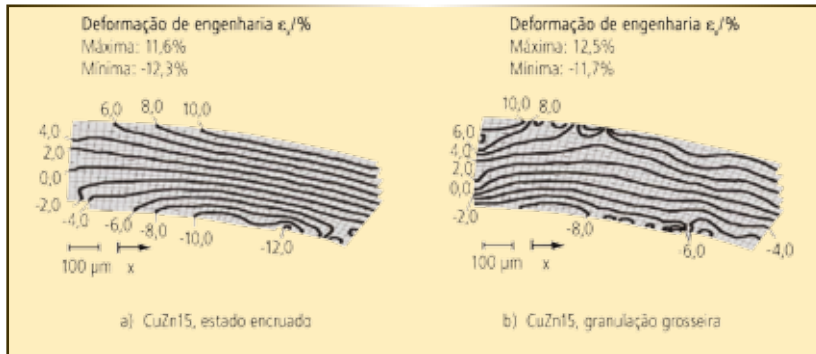


Fig. 6 – Influência da granulação sobre a deformação do material: a ilustração mostra uma distribuição mais uniforme da deformação no material encruado (a); já o material de granulação grossa (b) apresenta distribuição não homogênea das deformações⁽³⁾.

de e a medição óptica de força são aplicadas para avaliar dados do material, a fim de validar os modelos em simulações com emprego do método dos elementos finitos (FEM, *finite element method*) e estudar o comportamento da deformação em materiais homogêneos e não homogêneos. Quanto ao processo de microconformação, dobramento ou corte, o comportamento ainda está em fase de investigação. Sabe-se, contudo, que há uma dependência da geometria da aresta cortante na orientação dos grãos na área deformada. A figura 6 mostra a influência da granulação e do estado do material sobre a sua deformação. Quando o material é recozido, seus grãos aumentam e apresentam uma distribuição grosseira, porém quando o material é encruado, suas linhas ficam mais homogêneas⁽³⁾.

Isso significa que a orientação dos grãos – que causa resistências diferentes contra a deformação – tem efeito na distribuição da força apenas quando existem poucos grãos na área deformada. Para materiais policristalinos a força é homogênea e, no

caso de poucos grãos na área deformada, apenas os grãos com orientação favorável são deformados. Se o número de grãos for ainda menor, cada grão será deformado de acordo com o formato da ferramenta, sem considerar a orientação favorável⁽³⁾.

Atrito

Assim como todos os outros fatores já citados, o atrito também é afetado pela miniaturização da operação. Quando há uma redução do tamanho da peça para a escala micrométrica, nem todos os parâmetros podem ser alterados de acordo com a regra de semelhança, como, por exemplo, o tamanho de grão. Isso faz com que os chamados efeitos de tamanho gerem a ocorrência de

resultados inesperados sobre a força-limite⁽⁹⁾.

Durante o processo de fabricação pode ocorrer escoamento e deformação de materiais com o impedimento do movimento livre entre as superfícies, ou seja, atrito. O primeiro estudo sobre o atrito foi feito usando o teste de recalque de anel, no qual verificou-se um aumento do atrito com a redução do tamanho do corpo de prova. A mudança de condições no atrito com a redução do tamanho do elemento pode ser determinada comparativamente, ou seja, há aumento do atrito com a diminuição do elemento⁽⁵⁾.

De acordo com a teoria de Storoschew⁽⁸⁾, citada por Hu e Vollertsen⁽⁴⁾, o coeficiente de atrito em estampagem profunda pode ser calculado pela força de estampagem máxima medida para cada dimensão do processo, conforme ilustrado na figura 7.

Anisotropia

A anisotropia é descrita como a variação das propriedades mecânicas em função da direção em que as mesmas estão sendo medidas. Nos metais, a causa mais importante da anisotropia plástica é a orientação dos grãos, que possui uma ligação direta com o processo de fabricação do material, especialmente no caso de chapas laminadas. A laminação reordena os grãos em um determinado sentido, gerando uma orientação preferencial que irá modificar a capacidade de deformação do material em diferentes sentidos em relação à direção de laminação. Isso faz com que a anisotropia tenha uma

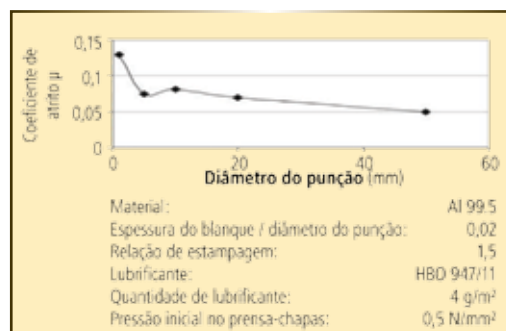


Fig. 7 – Coeficiente de atrito efetivo para estampagem profunda⁽⁴⁾

Tendência

importância fundamental para os processos de conformação, sendo responsável pela variação de espessura e pela formação de orelhas no caso da estampagem profunda. Valores altos de anisotropia são utilizados quando se deseja aumentar a capacidade de deformação na largura com pequenas reduções na espessura⁽¹⁾.

Em folhas, a anisotropia média normal diminui com a miniaturização, tornando as suas características piores, já que a espessura diminui ainda mais – um fenômeno indesejável nos processos de estampagem profunda. Além desse, outro efeito que pode ser descrito é a diminuição do alongamento com a miniaturização e o estreitamento⁽³⁾.

Simulação por elementos finitos na microconformação

O método dos elementos finitos (FEM) é um poderoso artifício capaz de prever e solucionar problemas referentes aos processos de conformação. Com emprego do FEM, condições muito próximas à realidade da peça podem ser simuladas e aplicadas, mesmo em geometrias complexas, considerando todos os parâmetros do processo, como a variação das propriedades mecânicas do material durante a conformação e o atrito. Porém, a simulação de formas micrométricas representa um desafio, já que as dimensões pesquisadas são muito pequenas e os grãos apresentam tamanho próximo às dimensões das peças.

Conclusão

Os processos de microestampagem e microconformação permitem a fabricação de peças de metal muito pequenas, na faixa dos milímetros ou ainda menos, no entanto este assunto ainda não é muito difundido no Brasil. Este trabalho procurou mostrar o quanto ainda pode ser desenvolvido nessa área, que é tida como promissora em outros países. O melhor entendimento dos resultados obtidos em processos de microestampagem e microconformação é fundamental para o sucesso da aplicação desse

tipo de processo na indústria nacional, principalmente quanto aos efeitos ocorridos nas peças durante a sua miniaturização, que demandam um estudo mais aprofundado e detalhado. A simulação numérica é uma grande aliada do desenvolvimento de estudos nesse campo; porém, mesmo sendo uma ferramenta em potencial, é necessário ter um bom conhecimento a respeito do efeito de escala nos processos de miniaturização de peças, e da inclusão destes efeitos nas simulações.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento e ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), ligado à Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Referências

- 1) BATALHA, G. F.; CERVEIRA, R. L. L. P.; SILVA, F. R. D. A. Simulação de processos de micro fabricação: influência do efeito da escala. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*. Joinville, 2005. COBEF. Rio de Janeiro: ABCM, 2005.
- 2) GEIGER, M.; VOLLERTSEN, F.; KALS, R. *Fundamentals on the Manufacturing of Sheet Metal Micro Parts*. Ann. CIRP 1, p. 277-282, 1996.
- 3) GEIGER, M.; KLEINER, M.; ECKSTEIN, R.; TIESLER, N.; ENGEL, U. MICROFORMING. Ann. CIRP, v. 50/2/2001, p. 445 –462.
- 4) HU, Z.; VOLLERTSEN, F. *Modelling of friction with respect to size effects*. Bremer Institut fuer Angewandte Strahltechnik – Klagenfurter Str. 2, D-28359 Bremen, Germany, 2008.
- 5) HU, Z.; SCHULZE NIEHOFF, H.; VOLLERTSEN, F. Determination of the friction coefficient in deep drawing, process scaling. In: *Vollerstsen F, Hollmann F (eds). Proceeding of the 1st colloquium of DFG priority program process scaling*. BIAS-verlag, ISBN 3-933762-14-6, Bremen, p. 27-34, 2003.
- 6) KALS, R. *Fundamentals on the Miniaturization of Sheet Metal Working Processes*, Meisenberg Verlag, Bamberg, 1998.
- 7) MESSNER, A. *Kaltmassivumformung Metallischer Kleinstteile –Werkstoffverhalten, Wirkflaechen -reibung*, Prozessauslegung, Eds. Geiger, M., Feldmann, K., ISBN 3-87525-100-8, 1998.
- 8) STOROSCHEW, M.W.; POPOW, E.A, *Grundlagen der Umformtechnik*, VEB Verlag Technik Berlin, 1968.
- 9) VOLLERTSEN, F.; HU, Z. *Tribological size effects in sheet metal forming measured by a strip drawing test*. Annu CIRP 55(1), p. 291-294, 2006.
- 10) VOLLERTSEN, F.; HU, Z.; SCHULZE NIEHOFF, H.; THEILER, C. State of the art in micro forming and investigations in micro deep drawing. In: *Journal of Material Processing Technology*, v. 151, p. 70–79, 2004.

