

Técnica

Estudo analisa parâmetros e principais problemas da microconformação

A microconformação é o processo usado para a manufatura de peças metálicas pequenas, em particular para produções em larga escala, requeridas por indústrias de microtecnologia. Este artigo apresenta uma revisão das recentes tecnologias desenvolvidas para a conformação de metais em escala micrométrica. São descritos problemas decorrentes da miniaturização de peças maciças e feitas a partir de chapas metálicas, tais como o aumento do coeficiente de atrito e outros aspectos tribológicos. Os efeitos provocados pelo tamanho reduzido não atingem apenas as peças miniaturizadas, mas também os equipamentos usados durante os processos microprodutivos.

A. Milanez e L. Schaeffer

A microconformação é o trabalho de deformação realizado sobre uma peça que tenha pelo menos duas dimensões menores que 1 mm⁽¹⁾. Estas peças miniaturizadas movimentaram, entre os anos de 1997 e 2004, valores da ordem de US\$15 a US\$ 35 bilhões⁽²⁾, atendendo à demanda não apenas da indústria eletrônica, mas também de fabricantes de equipamentos médicos e sensores, entre outros produtos^(3, 4, 5).

A técnica de impressão litográfica para a manufatura de micropartes está muito avançada, mas este mé-

todo tem aplicação difícil em produtos que requeiram trabalhos em três dimensões^(6, 7). Como os processos de impressão encontram restrições em certos produtos, outras técnicas de fabricação são usadas, como a microusinagem de peças. Contudo, este método esbarra em dificuldades para a obtenção de equipamentos com rotações no eixo-árvore entre 100.000 e 160.000 rpm^(8, 9), além de problemas com a vibração da ferramenta, que podem destruir a geometria e a qualidade superficial da micropeça⁽¹⁰⁾.

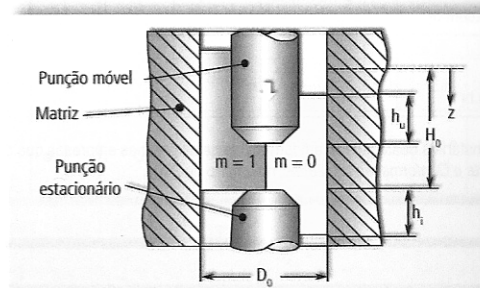


Fig. 1 - Extrusão por duplo copo⁽¹⁸⁾

Com o aumento da demanda por produtos miniaturizados, ocorre também um aumento da pesquisa aplicada sobre os seus processos produtivos. A pesquisa sobre processos macros não pode ser aplicada inteiramente aos microprocessos, pelos efeitos decorrentes do tamanho das peças⁽¹¹⁾.

Influência do tamanho da peça

Na manufatura de micropeças metálicas ocorre o aumento da

Alexandre Milanez é engenheiro mecânico e Mestre pela Escola Técnica da Sociedade de Assistência aos Trabalhadores do Carvão (SATC), em Criciúma (SC). Lírio Schaeffer é engenheiro e Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em Porto Alegre (RS). Este artigo foi apresentado como palestra técnica durante o Congresso Corte e Conformação 2007, realizado entre os dias 23 e 25 de outubro, em São Paulo (SP). Reprodução autorizada pelos autores.

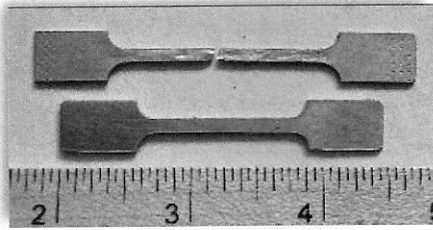


Fig. 2 – Dimensão dos corpos-de-prova utilizados em ensaio de tração⁽²⁰⁾

influência do tamanho da peça no processo produtivo, sendo que os parâmetros produtivos de um processo em escala macro simplesmente não podem ser aplicados em escala micrométrica. Os efeitos do tamanho da peça podem ser divididos em efeitos físicos e estruturais⁽¹²⁾.

Efeito físico

Força atuante em pequenas superfícies. Existem algumas forças atuantes no processo como:

- Forças de Van der Waals;
- Tensões superficiais;
- Gravidade.

Estas forças são muito pequenas e podem ser desconsideradas em processos convencionais de produção de macropeças, mas

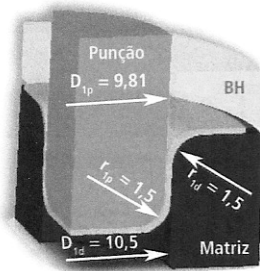


Fig. 3 – Ensaio de embutimento em perfil⁽²¹⁾

em micropeças devem ser levadas em consideração. Dependendo do tamanho da peça, existem maiores ou menores influências destes parâmetros, sendo que, em alguns casos, é preciso fazer uma boa caracterização dos fenômenos atuantes na conformação⁽¹³⁾.

Efeito estrutural

Efeito do tamanho do grão:

As dimensões dos grãos afetam a deformabilidade da peça. Estas dimensões independem dos parâmetros usados em seu processo de fabricação⁽¹⁴⁾, e estes não podem ser executados com os

mesmos direcionamentos, pois são diferentes em uma mesma peça. Em uma peça macro, a quantidade de grãos é muito grande, o que reduz o efeito destas diferenças no processo. Em micropeças, o número pequeno de grãos presentes, bem como sua orientação e posição, influenciam consideravelmente as características do material⁽¹⁵⁾ como, por exemplo, a dureza. Trabalhos realizados indicam que a dureza na região central de peças com grãos maiores é mais elevada do que a dureza de micropeças com menor tamanho de grão, contrariando o efeito do caminho de deformação (Hall – Patch)⁽¹⁶⁾ para processos macros.

Efeito da microestrutura na superfície:

Assim como o tamanho de grão, a superfície da peça é resultado do histórico dos processos de fabricação por que esta passou – por exemplo, a rugosidade superficial de determinada peça pode ser resultado

Técnica

de seu processo de usinagem. Durante os processos de estampagem e extrusão, entre outros⁽¹⁷⁾, a rugosidade superficial das peças influencia o atrito entre esta e a ferramenta. O tamanho de grão também aumenta o atrito entre a peça e a ferramenta durante os processos de extrusão, no caso de serem usados materiais com grãos de dimensões pequenas⁽¹⁾.

A figura 1 (pág. 84) mostra o processo de extrusão por duplo copo para caracterização do atrito. O processo de caracterização do atrito por DCE (*double-cup-extrusion*, ou extrusão por duplo copo), na figura 1, pode ser

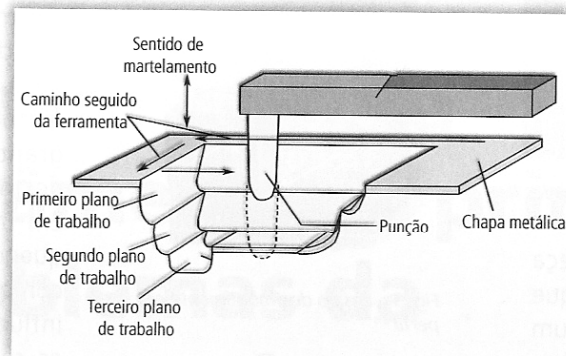


Fig. 4 – Processo de conformação incremental⁽²³⁾

percebido pelo valor da diferença entre alturas, sendo que, quanto mais próximos os valores de h_u e h_r , menor é o atrito entre a peça e a ferramenta. Este teste pode ser aplicado com o uso de lubrificantes para determinar qual é o lubrificante que mais reduz o coeficiente de atrito⁽¹⁹⁾.

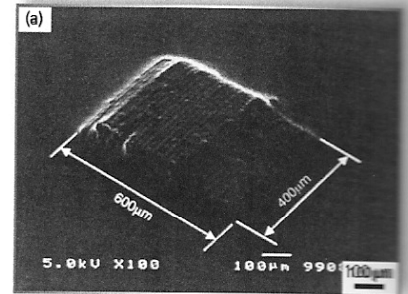


Fig. 5 – Formato da peça conformada incrementalmente, vista em um microscópio⁽²³⁾

Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos materiais usados em microconformação podem ser determinadas com ensaios de tração e dobramento. A figura 2 (pág. 85) mostra o corpo-de-prova utilizado no ensaio de tração. As

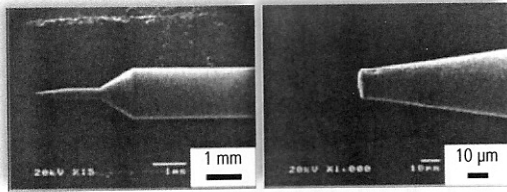


Fig. 6 – Perfil da ferramenta⁽²³⁾

dimensões dos corpos-de-prova usados são reduzidas para evitar que o efeito do seu tamanho influencie o resultado do ensaio.

Microconformação em chapas

Microembutimento

O ensaio de microembutimento é realizado para verificar com quais profundidades uma chapa metálica pode ser conformada em formato de copo, através de um punção. A figura 3 (pág. 85) mostra o processo de embutimento em perfil. As medidas em milímetros apresentadas na figura, mostram as pequenas dimensões do ensaio. Os ensaios para microembutimento variam conforme a espessura do punção,

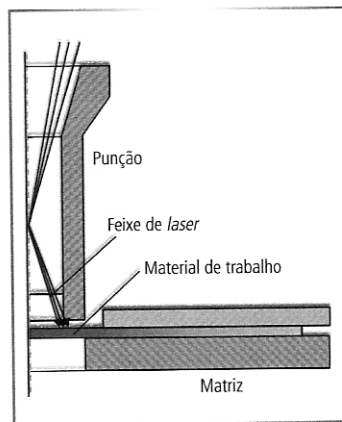


Fig. 7 – Ensaio de embutimento com a utilização de feixes de laser⁽²⁴⁾

chegando, em alguns trabalhos, a até 0,5 mm de diâmetro⁽²²⁾.

Existem parâmetros que afetam consideravelmente o processo de embutimento, mas o mais importante deles é o atrito entre a flange e o raio de arredondamento da matriz. É possível realizar o ensaio de embutimento para determinar o atrito em micropeças, e este ensaio vale também para peças maiores. O coeficiente de atrito da flange, assim como o do raio de arredondamento, podem ser calculados

pela força exercida pelo punção e pelo impacto deste na chapa.

Microconformação incremental

O processo de microconformação incremental é realizado pelo martelamento do material com um punção controlado por CNC, que molda a peça conforme a sua programação. A figura 4 (pág. 86) mostra o processo de conformação microincremental, na qual o trabalho é feito por camadas, até ser alcançado o formato final do produto. A figura 5 (pág. 86) mostra o perfil do material trabalhado pelo processo apresentado na figura 4.

Para a obtenção da peça mostrada na figura 5, o diâmetro do punção usado foi da ordem de 10 μm, visando à fabricação de um corpo de carro com 600 μm. A figura 6 mostra o perfil do punção e destaca a dificuldade do processo incremental, em que o diâmetro do punção tem de ser muito menor que o objeto

Técnica

produzido, no caso, o carro da figura 5.

Microconformação com o auxílio de um feixe de laser

Além da conformação mecânica, é possível trabalhar micropartes com a aplicação de um feixe de raio laser. O feixe de laser incidente sobre uma superfície faz com que esta aumente de temperatura pela ação da radiação térmica. Esta radiação permite uma redução da força necessária para conformar uma peça, aumentando a sua possibilidade de deformação. A figura 7 (pág. 87) mostra como o feixe de laser incide sobre a superfície de uma chapa.

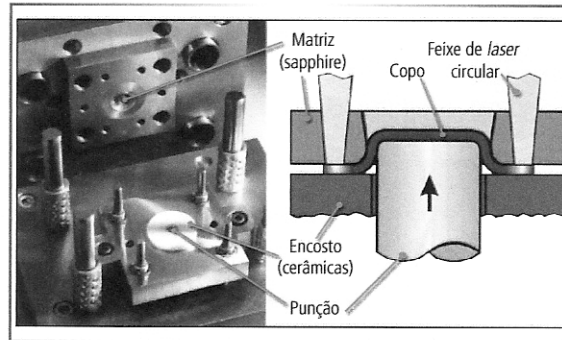
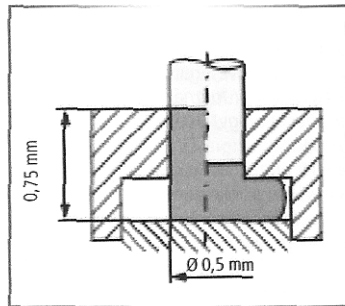


Fig. 8 – Ensaio de embutimento com a utilização de feixes de laser no anel⁽²⁵⁾

Na figura 7, o laser atua na parte interna do punção, permitindo que a dobra da peça ocorra com maior facilidade. Além de diminuir a força necessária para conformar o material, a aplicação do feixe de laser aumenta também a profundidade de embutimento de uma chapa, em comparação com o processo

a frio⁽²⁵⁾, diminuindo o desgaste ocasionado por processos seriados sobre o punção e a matriz de embutimento⁽²⁶⁾. A figura 8 mostra um sistema de aquecimento no anel de encosto por meio de um feixe de laser.

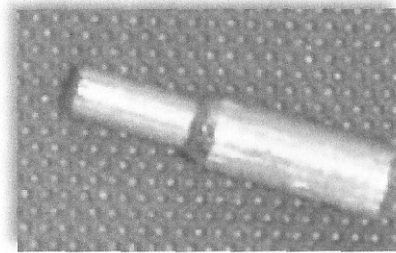
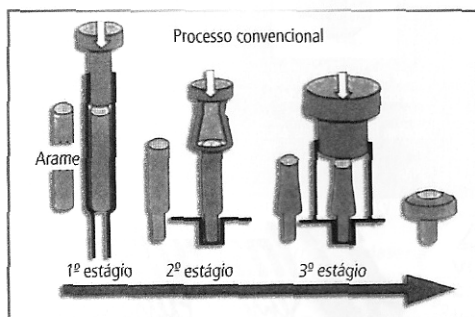
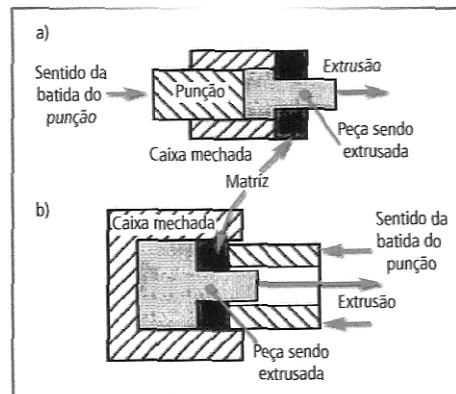
A parte direita da figura 8 mostra, esquematicamente, o processo de embutimento com o auxílio do laser, e a parte esquerda mostra a matriz usada no processo. O laser pode também ser usado para soldar peças e sintetizá-las, de modo que o feixe controlado por um sistema de coordenadas CNC possa realizar o trabalho desejado de solda ou sinterização também em micropartes⁽²⁷⁾.

Fig. 9 – Esquema da extrusão lateral⁽²⁹⁾

Microconformação de peça maciça

Microextrusão: A microextrusão é um método para a obtenção de peças longas com proporção de comprimento e forma complexa na seção transversal⁽²⁸⁾. Ele pode ser executado de várias formas, como a extrusão direta, indireta e lateral, dependendo do produto desejado. A figura 9 mostra um processo de extrusão lateral.

Na figura 8, o formato do punção (representado em escala de cinza claro) conforma a peça (em cinza escuro) para a abertura na matriz. O

Fig. 11 – Pino fabricado por microextrusão⁽³¹⁾Fig. 12 – Processo de forjamento em três estágios⁽³²⁾Fig. 10 – Esquema da extrusão direta (a) e indireta (b)⁽³⁰⁾

formato do punção força o material da peça a se deslocar para o lado direito da matriz. A figura 10 mostra o processo de extrusão direta e indireta. As setas mostram o sentido de deslocamento do punção e o sentido de extrusão do material, sendo que, para o processo de extrusão direta, o sentido do punção é o mesmo da extrusão e, no indireto, o sentido é o oposto.

No processo de microextrusão, o atrito é um dos fatores que mais influenciam o resultado, sendo que a força necessária para vencer o atrito é maior no processo de microextrusão do que no processo macro⁽³¹⁾. A figura 11 mostra um pino fabricado pelo processo de microextrusão, que tem diâmetro de 1 mm em sua extremidade menor.

Microforjamento: O processo de microforjamento possui características peculiares, também encontradas no processo de microextrusão, como o atrito entre peça e ferramenta e a influência do tamanho de grão no processo. A figura 12 mostra o processo de forjamento por multiestágios.

O arame que foi extrudado no primeiro estágio do processo da figura 12 ficou com 2 mm de diâmetro na ponta no final do estágio. Como a microconformação foi definida como

Técnica

deformação em peças menores que 1 mm, este processo apresentado não representa exatamente uma microconformação. Entretanto, como o tamanho da peça é pequeno, ele indica alguns dos problemas encontrados na microconformação⁽³³⁾.

Conclusão

A microconformação de peças maciças é um processo apropriado para sistemas que possuam uma produção elevada, sendo a extrusão um excelente processo para obtenção de peças micrométricas com perfil especial e comprimento considerável. No processo de microconformação, as dimensões exercem uma grande influência sobre o resultado do trabalho, de modo que o volume da peça, o tamanho de grão do ma-

terial e a sua rugosidade influenciem o atrito entre a peça e a ferramenta. As propriedades mecânicas do material também são difíceis de serem obtidas, devido ao tamanho reduzido do corpo-de-prova.

O processo de embutimento pode ser usado para caracterizar o atrito, tanto para processos macrométricos como para microconformação. Já o processo a laser pode ser utilizado para auxiliar o embutimento, elevando a profundidade alcançada no ensaio.

Referências

- 1) KRISHNAN, N.; CAO, J.; DOHDA, K. Microforming: Study of friction conditions and the impact of low friction / high – strength die coatings on the extrusion of micropins. In: *International Mechanical Engineering Conference and Exposition*. Orlando. ASME. 2005.
- 2) VOLLERTEN, F. et al. State of art in microforming and investigations into micro deep drawing. *Journal of Material Processing Technology*, Elsevier, v. 151, p. 70-79, 2004.
- 3) WATANABE, N. et al. Fabrication of micro parts using only electrochemical process. In: *14th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. Interlaken. 2001.
- 4) QU, W.; WENZEL, C.; DRESCHER, K. Fabrication of low-cost capacitive accelerometers by 3D microforming. In: *Conference on Optoelectronic and Micro Electronic Materials and Devices Proceedings*. IEEE. Canberra. 1997.
- 5) SANCHEZ – SALMERON, A. J. et al. Recent development in micro - handling systems for micro - manufacturing. *Journal of Material Processing Technology*, Elsevier, v. 167, p. 499-507, 2005.
- 6) JEONG, H. W.; HATA, S. Microforming of three - dimensional microstructures from thin – film metallic glass. *Journal of Microelectromechanical System*: IEEE, v. 12, p. 42-52, 2003.
- 7) LIANG, Y. et al. Study on micromachine tools in fabrication of microparts. In: *1st International Conference on Nano/micro Engineered and Molecular Systems*. China. IEEE. 2006.

- 8) SCHMIDT, J.; TRITSCHLER, H. Micro cutting of steel. *Microsystem Technologies*: Springer Verlag, v. 10, p. 167-174, 2004.
- 9) LUO, X. et al: Design of ultraprecision machine tools with applications to manufacture of miniature and micro components. *Journal of Material Processing Technology*, Elsevier, v. 167, p. 515-528, 2005.
- 10) MIAO, J. C. et al. Review of dynamic issues in micro end milling. *Journal Advance Manufacture Technology*, Springer Verlag, v. 31, p. 897-904, 2007.
- 11) FLEISCHER, J. et al. Quality assurance in micro production. *Microsystem Technologies*, Springer Verlag, v. 12, p. 707-712, 2006.
- 12) VOLLERTSEN, F.; NIEHOFF, H. S.; HU, Z. State of the art in microforming. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Elsevier, v. 46, p. 1172-1179, 2006.
- 13) QIN, Y. Micro-forming and miniature manufacturing system – development needs and perspectives. *Journal of Material Processing Technology*, Elsevier, v. 177, p. 8-18, 2006.
- 14) ENGEL, U.; ECKSTEIN, R. Microforming – from basic research to its realization. *Journal of Material Processing Technology*, Elsevier, v. 125 / 126, p. 35-44, 2002.
- 15) GEISSDÖRFER, S.; ENGEL, U.; GEIGER, M. FE – simulation of microforming processes applying a mesoscopic model. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Elsevier, v. 46, p. 1222-1226, 2006.
- 16) KRISHNAN, N. et al. Investigation of deformation characteristics of micropins fabricated using microextrusion. *International Mechanical Engineering Conference and Exposition*. Orlando. ASME, 2005.
- 17) JEON, J.; BRAMLEY, A. N.: A friction model for microforming. *International Journal Advance Manufacture Technology*. Springer Verlag, 2006. Publicação on-line <http://www.springerlink.com>.
- 18) ENGEL, U. *Tribology in microforming*. Wear: Elsevier, 2006. v. 260, p. 265-273.
- 19) WANG, C. J. et al. Size effects of cavity dimension on the microforming ability during coining process. *Journal of Material Processing Technology*. Elsevier. v. 187-188, p. 256-259, 2007.
- 20) GAU, J. T.; PRINCIPE, C.; WANG, J. An experimental study on size effects on flow stress and formability of aluminum and brass for microforming. *Journal of Material Processing Technology*. Elsevier. v. 184, p. 42-46, 2007.
- 21) MANABE, K.; SHIMIZU, T.; KOYAMA, H. Evolution of milli – scale cylindrical cup in two – stage deep drawing process. *Journal of Material Processing Technology*. Elsevier. v. 187-188, p. 245-249, 2007.
- 22) SAOTOME, Y.; YASUDA, K.; KAGA, H. Microdeep drawability of very sheet steels. *Journal of Material Processing Technology*. Elsevier. v. 113, p. 641-647, 2001.
- 23) SAOTOME, Y.; OKAMOTO, T. An in – situ incremental microforming system for three – dimensional shell structures of foil materials. *Journal of Material Processing Technology*. Elsevier. v. 113, p. 636-640, 2001.
- 24) PENG, X.; QIN, Y.; BALENDRA, R. Analysis of laser – heating methods for micro – parts stamping applications. *Journal of Material Processing Technology*. Elsevier. v. 150, p. 84-91, 2004.
- 25) GILLNER, A. et al. Laser applications in microtechnology. *Journal of Material Processing Technology*. Elsevier. v. 167, p. 494-498, 2005.
- 26) PENG, X.; QIN, Y.; BALENDRA, R. A numerical investigation to strategies of localized heating for micro – part stamping. *International Journal of Mechanical Sciences*. Elsevier. v. 49, p. 379-391, 2007.
- 27) CHEN, J.; YANG, J.; ZUO, T. Micro fabrication with selective laser micro sintering. China: *1st International Conference on nano / Micro Engineered and Molecular system*: IEEE, 2006.
- 28) SAOTOME, Y.; IWAZAKI, H. Superplastic extrusion of microgear shat of 10 µm in module. *Microsystem Technologies*. Springer Verlag, v. 6, p. 126-129, 2000.
- 29) EICHENHUELLER, B.; EGERER, E.; ENGEL, U. Microforming at elevated temperature - forming and material behavior. *International Journal advanced Manufacture Technology*. Springer Verlag, 2006. Publicação on-line www.springerlink.com.
- 30) SAOTOME, Y.; INOUE, A. New amorphous alloys as micromaterials and the processing technologies. *Miyazaki: The Thirteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. IEEE, 2000.
- 31) CAO, J. et al: Microforming: Experimental investigation of extrusion process for micropins and its numerical simulation using RKEM. *Journal of Manufacturig Science and Engineering*. ASME, v. 126, p. 642-652, 2004.
- 32) YOSHIDA, K.; KUBOKI, I.; NORASETHASOPON, S. Surface quality improvement of multistage forged microparts for wristwatches. *Journal of Material Processing Technology*. Elsevier, v. 143-144, p. 362-366, 2003.
- 33) ROSOCHOWSKI, A. et al: Micro-extrusion of ultra-fine grained aluminium. *International Journal advanced Manufacture Technology*. Springer Verlag, 2007. Publicação on-line www.springerlink.com.

