

2019
São Carlos - SP



10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação
05 a 07 de agosto de 2019, São Carlos, SP, Brasil

INVESTIGAÇÃO DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE MICROFRESAMENTO DA LIGA Ti-6Al-4V

Aline Gonçalves dos Santos

Gilmar Guimarães

Márcio Bacci da Silva

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 2121 - Campus Santa Mônica, Uberlândia - MG, CEP 38408-100

alinegsantos_23@hotmail.com; gguima@mecanica.ufu.br; mbacci@mecanica.ufu.br

Resumo. A investigação das temperaturas próximas à zona de corte é de grande importância para entendimento e melhorias do processo de microusinagem, entretanto, é uma análise bastante complexa, sendo assim, ainda pouco explorada. Dos trabalhos já desenvolvidos nessa área, a maioria aborda a análise por meio de simulação, o que motivou a realização desse estudo, que tem por objetivo a investigação da temperatura de forma experimental no processo de microfresamento de topo da liga Ti-6Al-4V. Para realização dos ensaios, foi utilizada uma ferramenta de metal duro, revestida com AlCrN e diâmetro nominal de 400 μm . Para medição da temperatura, termopares foram fixados na superfície da peça a ser usinada. Imagens dos canais usinados foram utilizadas para analisar a posição dos termopares em relação à trajetória da ferramenta. Os desgastes das ferramentas foram medidos por meio da redução do diâmetro. Os resultados mostraram que a temperatura tende a ser maior no lado concordante do canal, que também apresenta maiores rebarbas. Também, foi observado que há uma tendência de aumento da temperatura com o desgaste da ferramenta, tendo em vista que a maior diferença de temperatura medida no primeiro ensaio foi de 10,3°C, enquanto no vigésimo ensaio realizado, foi de 36,8°C.

Palavras chave: Microfresamento. Temperatura de usinagem. Desgaste. Ti-6Al-4V

1. INTRODUÇÃO

O estudo da temperatura durante a usinagem pode auxiliar na compreensão de diversos fatores envolvidos no processo, dos quais se destacam os mecanismos de desgaste de ferramenta. Durante o processo de usinagem, as temperaturas da ferramenta elevam, ocasionando um desgaste excessivo, diminuindo a vida da ferramenta e, consequentemente, aumentando os custos de produção. No processo de microusinagem, esse fator se mostra mais significativo, tendo em vista a pequena dimensão da aresta de corte da microferramenta, pois um pequeno desgaste pode ocasionar perda da aresta de corte.

Ressalta-se, entretanto, que a análise das temperaturas nas regiões próximas à aresta de corte da microferramenta é difícil, tendo em vista as pequenas dimensões envolvidas. Dessa forma, a literatura que aborda esse tema é limitada, sendo que a maioria dos trabalhos desenvolvem análises apenas por simulação, ficando o campo de análise experimental de temperatura na microusinagem escasso.

Uma das primeiras pesquisas que envolvem temperatura no microfresamento foi desenvolvida por Özel e Dhanorker (2008), na qual foram realizadas simulações utilizando o modelo de elementos finitos 2D para uma ferramenta de metal duro com 635 μm de diâmetro e raio de aresta de 3 μm . Os materiais dos corpos de prova considerados foram o alumínio Al2024 – T6 e aço AISI 4340. A máxima temperatura na zona de corte durante a microusinagem do alumínio Al2024 – T6 foi de aproximadamente 60°C, ao passo que, durante a microusinagem do aço AISI 4340, foi de aproximadamente 150°C, para as mesmas condições de corte. Ao comparar essas temperaturas previstas com as temperaturas obtidas na usinagem convencional, nota-se que elas são bem menores, isso se deve à pequena espessura de corte empregada no processo de microusinagem (ÖZEL; DHANORKER, 2008).

Quanto às pesquisas que abordam a medição de temperatura na microusinagem por meio de ensaios experimentais, uma das primeiras foi desenvolvida por Samuel et al. (2011), em que foi avaliado o uso de grafeno como aditivo para melhorar o desempenho da lubrificação e refrigeração dos fluidos de corte semissintéticos. O processo realizado foi o microtorneamento, utilizando uma ferramenta de nitreto cúbico de boro, com raio de aresta de 2 μm , sendo o material usinado o aço AISI 1018. Os resultados do estudo mostraram que a incorporação das partículas de grafeno no fluido reduziu significativamente o pico de temperatura da ferramenta durante o corte, sendo essa redução mais evidente com o aumento da fração de grafeno (SAMUEL et al., 2011).

Já Mamedov e Lazoglu (2016) mediram a temperatura numa operação de microfresamento de uma liga de Ti6Al4V, utilizando dois termopares tipo K com 130 μm de diâmetro e 0,15 segundos de tempo de resposta. Esses termopares

foram colocados na peça próximo à trajetória da ferramenta. As temperaturas medidas variaram de 31,6°C a 79,5°C para condições de usinagem diferentes.

Quanto à relação entre temperatura e desgaste de microferramenta, Wang, Zou e Huang (2019), ao estudarem o microfresamento da liga de Ti6Al4V, usando microfresas de metal duro com revestimento de Ti (C7N3), constataram que com o aumento do comprimento usinado, há uma elevação da temperatura na ponta da ferramenta, inicialmente, seguida de uma redução devido à mudança da partição da energia e ao desgaste acumulado da ferramenta.

Considerando que existem poucos artigos abordando a análise da temperatura na microusinagem e ainda considerando a importância do tema tendo em vista as consequências no desgaste de ferramenta, o presente trabalho tem como principal objetivo investigar as temperaturas no processo de microfresamento de topo da liga Ti-6Al-4V.

2. METODOLOGIA

Para realização dos ensaios, foi utilizada uma liga de titânio (Ti-6Al-4V) cuja microestrutura é mostrada na Fig. 1a, na qual nota-se a presença das fases α (cor cinza claro) e β (cor cinza escuro). Foi feita análise da composição química do material estudado por meio de EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva), constatando a presença de, aproximadamente, 90% de titânio, 6,7% de alumínio e 3,3% de vanádio. A ferramenta utilizada, mostrada nas Figs. 1b e c, foi uma microfresa de topo de metal duro de duas arestas, com diâmetro de 390,4 μm , revestida com AlCrN e raio de aresta de, aproximadamente, 1 μm . Para medição de desgaste e verificação da integridade da ferramenta, imagens da superfície secundária de folga foram obtidas por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV). Após cada ensaio, imagens dessa mesma superfície foram feitas para medição do desgaste por meio da análise da redução no diâmetro da ferramenta. Para tanto, utilizou-se o programa Image J.

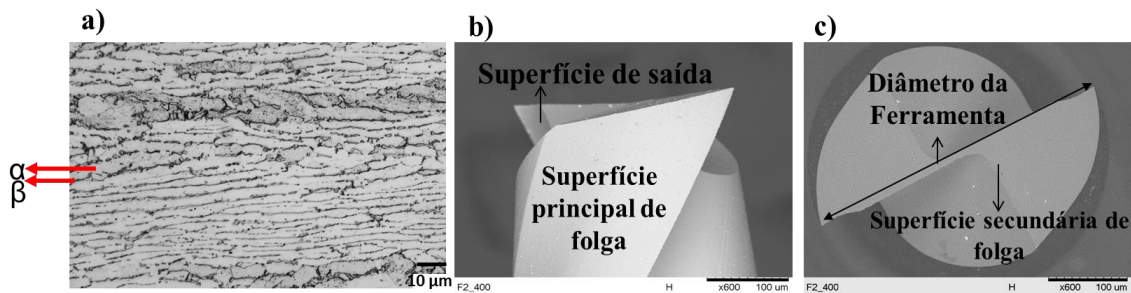


Figura 1. Características do material estudado, sendo (a) sua microestrutura e (b) sua composição; (c) e (d) Imagens da microfresa utilizada

Os parâmetros de corte utilizados foram: profundidade de corte de 20 μm ; avanço por dente de 2 $\mu\text{m}/\text{dente}$; rotação de 20000 rpm. O comprimento de usinagem foi de 28 mm, referente à largura da peça, sendo realizados 20 ensaios, totalizando 560 mm usinados. A máquina-ferramenta utilizada foi uma microfresadora CNC de quatro eixos, do fabricante Minitech Machinery Corporation. Ela possui rotação máxima do eixo árvore de 60.000 rpm e resolução de posicionamento de 0,1 μm .

Para análise da temperatura, foram utilizados três termopares tipo T (código TT-T-36-100, com diâmetro de 0,13 mm da fabricante Omega) soldados na superfície da peça, ao longo da trajetória do canal (maiores detalhes sobre a metodologia da soldagem dos termopares, ver Cunha (2016)). Ressalta-se que se tentou soldá-los de forma mais alinhada possível para que a ferramenta passasse pelos três ou próximo a eles. Antes de soldá-los, eles foram fixos à morsa para que não soltassem no momento de transferência para a fresadora e durante o referenciamento, que foi baseado na posição dos três termopares, conforme pode ser observado na Fig. 2a. A taxa de aquisição dos dados empregada foi de 2 Hz até o comprimento de usinagem de 308 mm e de 3,33 Hz após esse comprimento usinado. Isto se deveu a alteração na configuração do equipamento neste período. Para medição da temperatura, foi utilizado o sistema de aquisição Agilent 34901A. Após realização dos ensaios, imagens dos canais foram feitas no microscópio óptico e no microscópio eletrônico de varredura para verificar a posição dos termopares (Fig. 2c,d). Essas imagens auxiliaram na verificação do posicionamento do termopar em relação à trajetória ferramenta. Para análise dos resultados, foi considerada a diferença entre a temperatura máxima medida e a temperatura inicial.

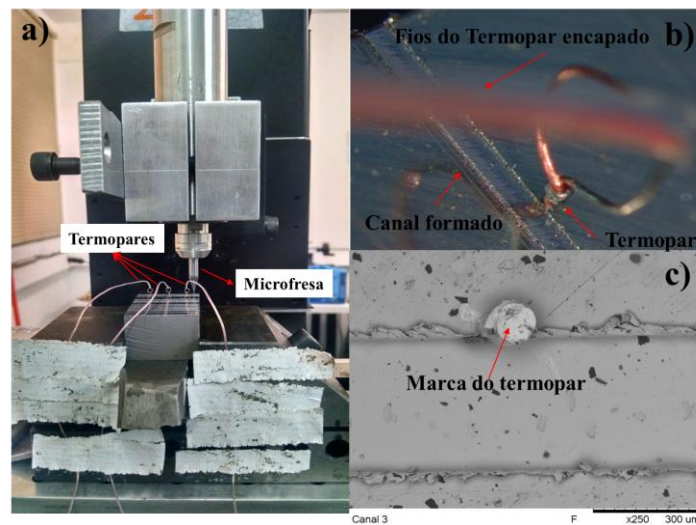


Figura 2. (a) Referenciamento da ferramenta baseado no posicionamento dos termopares; (b) termopar soldado próximo à trajetória da ferramenta; (c) marca do termopar soldado na peça

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Temperatura durante a microusinagem da liga Ti-6Al-4V

Em cada ensaio, a temperatura foi medida em três pontos diferentes da superfície da peça. Tendo em vista a dificuldade de medir temperatura neste processo e as fontes de erros presentes, como por exemplo, o tamanho da junta do termopar e o tempo de resposta deste, os dados não seguem uma tendência em todos os testes realizados. Sendo assim, a análise foi feita de forma genérica, observando todos os ensaios e buscando encontrar uma tendência nos dados obtidos.

Foi observado que, até o comprimento usinado de 364 mm, de forma geral, a temperatura aumenta durante a trajetória da ferramenta e atinge um valor máximo no lado concordante. Um exemplo desse fato pode ser observado na Fig. 3a, em que a maior diferença de temperatura observada no primeiro ensaio (10,283°C) foi obtida pelo termopar que estava no lado concordante, ao passo que a menor diferença de temperatura (4,646°C) foi obtida pelo termopar que estava mais afastado do lado concordante. Outro exemplo do aumento da temperatura à medida que se aproxima do lado concordante pode ser observado na Fig. 3b, em que se nota que a maior temperatura medida foi obtida pelo termopar que estava mais próximo do lado concordante (T3), já a menor temperatura foi obtida pelo termopar que mais estava próximo do lado discordante (T1).

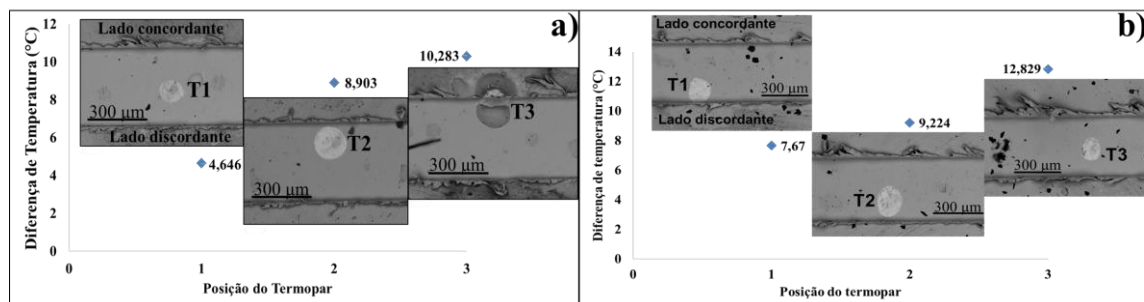


Figura 3. Diferenças de temperaturas medidas durante (a) o primeiro ensaio (28 mm usinados) e (b) no oitavo ensaio (224 mm)

Resultados semelhantes foram obtidos por Toh (2005) em que, ao realizar uma comparação da temperatura na superfície do cavaco gerada entre a orientação concordante e discordante, observou que as temperaturas obtidas para o fresamento discordante foram menores em todas as condições analisadas, sendo essa diferença de 3 a 8%. Segundo Hadia et al (2013), no lado discordante do fresamento, a espessura de corte inicia de zero e vai aumentando até chegar ao valor da espessura mínima de corte e a ferramenta entrar na peça. Assim, o atrito gerado no início do corte origina uma camada endurecida na peça, gerando menor temperatura ao redor da aresta de corte e superfície do cavaco em comparação com o fresamento no lado concordante.

Entretanto, o comportamento dos dados para temperatura na presente pesquisa é diferente dos obtidos por Mamedov e Lazoglu (2016), que constataram que a maior temperatura na microusinagem da liga Ti-6Al-4V foi no centro do canal, ou seja, quando a espessura de corte é máxima e o ângulo da posição da aresta da ferramenta é de 90°. Dessa forma, outros ensaios serão realizados para melhor investigação da temperatura nessas condições analisadas.

Cabe destacar que, ao analisar as imagens do canal, observou-se também que as rebarbas formadas apresentaram maior valor no lado concordante. Resultados semelhantes foram obtidos por Lee e Dornfeld (2002) na microusinagem de cobre e alumínio. No estudo, os autores constataram que as rebarbas formadas no lado concordante foram maiores. Os pesquisadores atribuíram essa ocorrência à quantidade de material que é empurrada na frente da aresta da ferramenta na direção da força de corte como resultado da rotação. As direções da força de corte efetiva e da tensão no material são distantes do lado discordante e em direção ao lado concordante. Esse fator, também pode contribuir para a obtenção da maior temperatura no lado concordante do canal.

3.2. Evolução do desgaste apresentado pela microfresa na microusinagem da liga Ti-6Al-4V

Após cada ensaio, a ferramenta foi verificada no MEV para posterior medição de desgaste. Na Fig. 4, pode-se observar a evolução do desgaste verificada por meio da redução do diâmetro da ferramenta. Nota-se que, após o primeiro ensaio, 28 mm de comprimento usinado, houve um desgaste elevado. Após esse comprimento usinado, a evolução do desgaste acontece a uma taxa uniforme. Após a usinagem de 560 mm, acredita-se que a taxa de desgaste aumentará gradualmente, devido aos resultados obtidos para a temperatura, que serão expostos na seção 3.3. Esses resultados apresentados para o desgaste de ferramenta se assemelham ao que é apresentado na usinagem convencional, em que o gráfico da evolução do desgaste de flanco pode ser dividido em três regiões, conforme exposto por Boothroyd e Knight (1989).

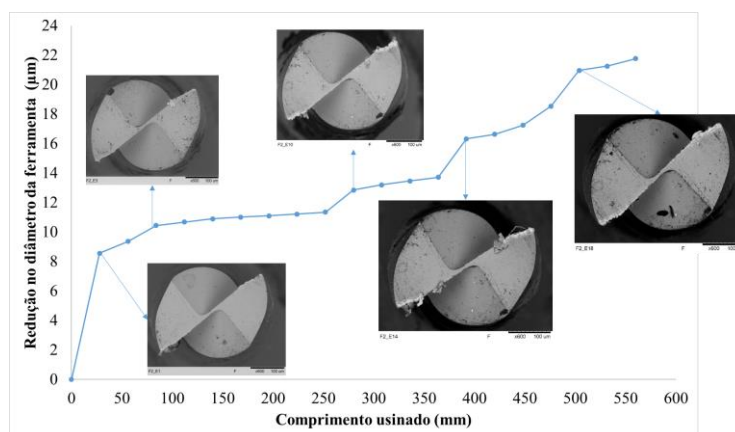


Figura 4. Evolução do desgaste da microfresa na microusinagem da liga Ti-6Al-4V

Ressalta-se que resultados semelhantes aos encontrados nesse estudo foram obtidos por Aslantas et al (2016), em que, ao analisarem a evolução do desgaste por meio da redução no diâmetro de quatro ferramentas diferentes na microusinagem da liga Ti6Al4V, constataram que após o primeiro ensaio, houve uma significativa redução do diâmetro da ferramenta, sendo que o desgaste apresentado pela ferramenta revestida de AlCrN teve uma redução de 2% do diâmetro. No presente trabalho, a redução do diâmetro após o primeiro ensaio foi de, aproximadamente, 2,2%.

3.3. Influência do desgaste da microfresa na temperatura durante microusinagem da liga Ti-6Al-4V

Foi observado nos ensaios que a maior temperatura medida foi no último teste realizado (ensaio 20), em que se constatou que as diferenças de temperaturas detectadas por dois termopares foram de 35,256°C e 36,843°C. Acredita-se que o terceiro termopar soltou antes da ferramenta passar por ele. Ressalta-se que, no primeiro ensaio, a maior diferença de temperatura foi de, aproximadamente, 10,3°C. No décimo ensaio, a maior diferença de temperatura foi de, aproximadamente, 19°C. Já no último ensaio (vigésimo canal formado), a maior diferença de temperatura foi de, aproximadamente, 36,8°C. Assim, nota-se uma tendência de a temperatura aumentar com o desgaste da ferramenta. Além disso, ao analisar a curva para o desgaste de ferramenta, sugere-se que a partir do ensaio 20, o gráfico entrará na terceira região característica do desgaste de flanco em que o desgaste tornará mais acelerado até a quebra da ferramenta. Segundo Boothroyd e Knight (1989), essa região é onde o desgaste se torna sensível ao aumento da temperatura causada pelo elevado desgaste de flanco. Para a confirmação, será necessária a realização de mais ensaios com a mesma ferramenta.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho trouxe uma contribuição para melhor compreensão sobre as temperaturas próximas à aresta de corte da ferramenta. Foi observado que a temperatura tende a aumentar do lado discordante para o lado concordante, sendo este lado, o que apresenta maiores rebarbas. Também, constatou que a temperatura apresenta a tendência de aumentar com o desgaste de ferramenta, que apresenta um comportamento semelhante ao apresentado na usinagem convencional.

5. REFERÊNCIAS

- Aslantas, K.; Hopa, H.E.; Percin, M.; Uçun, I.; Çicek, A. Cutting performance of nano-crystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti6Al4V alloy. *Precision Engineering*. v. 45, p. 55 – 66, 2016.
- Boothroyd, G., Knight, W.A., 1989, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 2 ed. Edition, Marcel Dekker, Nova Iorque.
- Cunha, D. F. Influência da utilização do fluido de corte com adição de grafeno na temperatura de usinagem e formação de rebarba no processo de micro fresamento. 2016. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Hadia, M. A.; Ghania, J.A.; Che Harona, C.H.; Kasim, M. S. Comparison between up-milling and down-milling operations on tool wear in milling Inconel 718. *Procedia Engineering*. v. 68, p. 647 – 653, 2011.
- Lee, K., Dornfeld, D. A. An experimental study on burr formation in micro milling aluminum and copper, *Transactions of NAMRI/SME*, v. 30, p. 1–8, 2002.
- Mamedov, A.; Lazoglu, I. Thermal analysis of micro milling titanium alloy Ti–6Al–4V. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 229, p. 659–667, 2016.
- Özel, T.; Dhanorker, A. Meso/micro scale milling for micro-manufacturing. *Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems*. v. 1, p. 23 – 42, 2008.
- Samuel, J.; Rafiee, J.; Dhiman, Z.; Yu, Z. Z.; Koratkar, N. Graphene Colloidal Suspensions as High Performance Semi-Synthetic Metal-Working Fluids. *The Journal of Physical Chemistry C*, v. 115, p. 3410–3415, 2011.
- Toh, C. K. Comparison of chip surface temperature between up and down milling orientations in high speed rough milling of hardened steel. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 167, p.110–118, 2005.
- Wang, Y.; Zou, B.; Huang, C. Tool wear mechanisms and micro-channels quality in micro-machining of Ti-6Al-4V alloy using the Ti(C7N3)-based cermet micro-mills. *Tribology International*. v. 134, p. 60–76, 2019.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Temperature Investigation when Micromilling Ti6Al4V alloy

Aline Gonçalves dos Santos

Gilmar Guimarães

Márcio Bacci da Silva

Federal University of Uberlandia, Av. João Naves de Ávila 2121 - Campus Santa Mônica, Uberlândia - MG, CEP 38408-100
alinegsantos_23@hotmail.com; gguima@mecanica.ufu.br; mbacci@mecanica.ufu.br

Abstract. *The investigation of the temperatures close to the cutting zone is of great importance for understanding and improvement of the micromachining process. However, it is a very complex analysis, and thus, still little explored. Most of the work already carried out in this area deals with the analysis by means of simulation, which motivated this work, whose objective is to investigate the temperature experimentally when micromilling Ti-6Al-4V alloy. To perform the tests, a carbide tool, AlCrN coated, 400 µm was used. Thermocouples were attached to the surface of the workpiece to measure temperature. Images of the machined slots were used to analyze the position of the thermocouples in relation to the trajectory of the tool. Tool wear was measured by the tool diameter reduction. The results showed that the temperature tends to be higher in the upmilling side of the slot, which also presents larger burrs. Also, it has been observed that there is a tendency of temperature increase with tool wear, since the greatest temperature difference measured in the first test was 10.3° C, while in the 20th test performed it was 36.8° C.*

Keywords: *Micromilling. Machining temperature. Tool wear. Ti-6Al-4V*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.