

REFRIGERAÇÃO COM TEMPERATURA ABAIXO DE 273K PROMOVE AUMENTO DA PRODUTIVIDADE NO TORNEAMENTO DO AÇO AISI 420

Rodrigo Cardoso Costa

IFC-Av. Frei João, 550, Luzerna – SC

rodrigo.costa@ifsc.edu.br

Fernando Prando Dacas

IFC-Av. Frei João, 550, Luzerna – SC

fernando.dacas@ifsc.edu.br

Elandir Antônio Desidério

IFC-Av. Frei João, 550, Luzerna – SC

elandir.desiderio@ifsc.edu.br

Fernando Michelon Marques

IFSC- Av. Nereu Ramos, Seminário, Chapecó - SC

fernando.marques@ifsc.edu.br

Hafez Moghaddam

IFC-Av. Frei João, 550, Luzerna – SC

hafez.moghaddam@gmail.com

Paulo Roberto Hoffmann

IFSC- Av. Nereu Ramos, Seminário, Chapecó - SC

paulo.hoffmann@ifsc.edu.br

Mateus Andre Hilgert

IFSC- Av. Nereu Ramos, Seminário, Chapecó - SC

mateus.ah@aluno.ifsc.edu.br

Resumo. O setor industrial do oeste catarinense se destaca na produção de alimentos e celulose. Os equipamentos para esses segmentos exigem peças constituídas de aços inoxidáveis austeníticos e martensíticos. O aço inoxidável martensítico, principalmente os endurecidos por tempera, aumentam o desgaste da aresta de corte em razão do aumento da temperatura. Esse estudo apresenta relevância, pois a manutenção da baixa temperatura do inserto durante operações de usinagem contribui para maior produtividade. Existe na literatura pouca experimentação do ar comprimido com temperatura abaixo de 273K (0 °C) como meio refrigerante, isso motivou o desenvolvimento de um trocador de calor e sistema de refrigeração. O propósito é comparar o desgaste da aresta de corte e rugosidade da superfície usinada entre usinagem com e sem refrigeração, a fim de identificar a influência da baixa temperatura do meio refrigerante na usinagem do aço AISI 420 temperado. Teste de usinagem a seco e com refrigeração foram executados em amostras cilíndricas, com mesmos parâmetros de corte. A usinagem em meio refrigerado ocorreu com temperatura próxima de 213K (-60 °C). A medição de desgaste do flanco seguiu norma NBR ISO 3685. A rugosidade da superfície usinada foi medida no final de cada ciclo de usinagem. Um termopar foi inserido dentro do inserto para medição da temperatura relacionada a operação de usinagem. A temperatura máxima do inserto na usinagem em meio refrigerante foi 413K (140 °C). O inserto com 7 minutos de usinagem refrigerada apresentou desgaste de flanco em 0,18 mm. O sistema de refrigeração reduziu 39% a temperatura interna do inserto, reduziu 16% o desgaste de flanco e aumentou 49% o tempo de usinagem. O meio refrigerante com temperatura próximo de 213K (-60 °C) não alterou a dureza do material aço inoxidável AISI 420.

Palavras chave: Usinagem; AISI 420; Refrigeração; Redução; Desgaste de flanco.

1. INTRODUÇÃO

Uma grande parcela da energia empregada no processo de usinagem dos metais é convertida em calor, o qual fica concentrado próximo a aresta de corte do inserto (Machado, *et al.*, 2009). O aumento da temperatura na interface inserto/peça de trabalho pode alterar características físicas dos materiais metálicos envolvidos. Normalmente, para uma certa classe de material metálico de maior resistência mecânica, os parâmetros de usinagem adotados para aumento da produtividade promovem aumento da temperatura na região do corte e isso tem relação direta com a aceleração do desgaste da aresta de corte. (Ferraresi, 1969).

Materiais metálicos com baixo índice de usinabilidade, como aços inoxidáveis martensíticos AISI 440C e AISI 420 temperado ou temperado/revenido apresentam elevada resistência mecânica. A liga metálica com microestrutura mais endurecida altera o sistema tribológico do corte e isso reduz a vida útil da aresta de corte. Para garantir a extração de calor

do inserto durante o processo de usinagem a indústria utiliza diferentes métodos de refrigeração, tais como: jato direcionado de líquido emulsivo; fluxo de ar comprimido e refrigeração gasosa com temperatura criogênica (GAJRANI, *et al.*, 2019). O líquido emulsivo possui propriedade de refrigeração e lubrificação em razão da mistura água/óleo, no entanto o descarte final desse tipo de fluido de corte, quando não executado de forma correta, pode agredir o meio ambiente. As manufaturas de materiais especiais como as ligas de titânio (Ti6Al4V), aços inoxidáveis austeníticos AISI 316L e F138 também evitam usinagens com líquido emulsivo devido a possível contaminação da superfície usinada. (Yildiz e Nalbant, 2008). A indústria tem interesse no fluxo de nitrogênio líquido como fluido refrigerante, em razão da característica inerte desse material, para combater os problemas gerados pela refrigeração com líquido emulsivo (Vicentin e Sanchez, 2009).

No estudo de Hong e Ding (2001) foi evidenciado a eficácia do nitrogênio líquido como fluido refrigerante de corte. Esse estudo indica que o jato de nitrogênio líquido deve ser direcionado na região do corte por cima e por baixo do inserto, para maior eficiência na extração de calor do inserto. Já o estudo de Sun, Brandt e Dargusch (2010) afirma que o fluxo de ar comprimido com temperatura abaixo de 273K (0 °C), na faixa de 223K (-50 °C), oferece a mesma eficácia do fluxo de nitrogênio líquido como fluido refrigerante na temperatura de 138K (-135 °C).

A motivação desse estudo é o domínio tecnológico do método de refrigeração abaixo de 273 K (0 °C). São justificativas desse estudo a contribuição científica, pois a literatura nacional raramente aborda assuntos sobre refrigeração de corte abaixo de 273K (0 °C), além do possível aumento da produtividade do inserto em operações de desbaste em materiais de baixo índice de usinabilidade. Sendo assim, o presente estudo tem o objetivo de avaliar a influência da refrigeração criogênica no desgaste da aresta de corte na usinagem aço inoxidável martensítico AISI 420 com microestrutura temperada e revenida, em operação de desbaste externo.

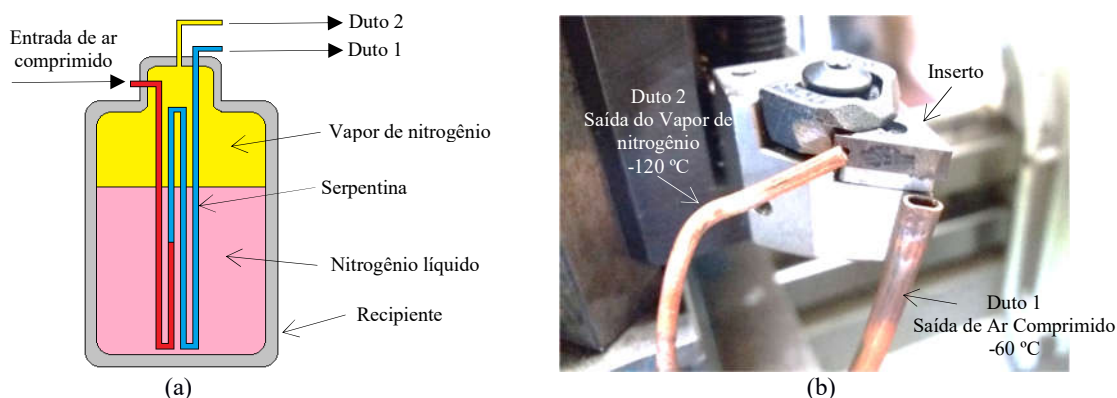
2. MATERIAIS E METODOS

Esse estudo consiste em comparar o desgaste da aresta de corte e rugosidade da superfície usinada entre usinagem com e sem refrigeração (a seco). A refrigeração utilizada foi com ar comprimido, cuja temperatura do fluxo estava abaixo de 273K (0 °C). O material de trabalho desse estudo foi o aço inoxidável martensítico AISI 420, com microestrutura temperada e revenida e dureza aproximada de 35 HRC.

Os testes de torneamento ocorreram em amostras cilíndricas com as seguintes dimensões nominais iniciais: diâmetro externo 40 mm e comprimento 150 mm. Os desbastes externos ocorreram entre placa e contra ponto. As amostras foram usinadas até o diâmetro final de 16 mm com comprimento de 145 mm. A cada ciclo de 3 passes de usinagem foi capturado uma imagem da aresta de corte e medido a rugosidade e dureza da superfície usinada. Os parâmetros de corte foram alterados a cada novo diâmetro, a fim de obter sempre 2 minutos a cada ciclo de usinagem. Os testes foram executados em torno CNC ROMI Centur 30D. Os parâmetros de corte iniciais foram: velocidade de corte (V_c) de 100m/min; avanço (f_n) de 0,20 mm/ver; profundidade (a_p) 0,75 mm. Esses parâmetros foram escolhidos para caracterizar uma operação de desbaste externo com alta produtividade. O inserto utilizado foi do tipo substrato em metal duro com camada de revestimento Ti-N-Al de especificação TNMG160404 MS e Classe VP15TF do fabricante Kyocera.

Para refrigerar o fluxo de ar comprimido foi desenvolvido um trocador de calor. Esse trocador consiste em um recipiente específico para nitrogênio líquido e uma serpentina de cobre. Em operação parte da serpentina fica imersa no nitrogênio líquido a temperatura aproximada de 83K (-190 °C), conforme visualizado na Fig 1-a. O ar comprimido sem umidade passa por dentro da serpentina com pressão de 2 bar, cujo fluxo rapidamente perde calor e sai resfriado do sistema (Duto 1). O fluxo de ar comprimido refrigerado é direcionado para o flanco do inserto pela parte de baixo do mesmo, conforme observado na Fig 1-b. Durante a troca térmica, dentro do recipiente, ocorreu a evaporação do nitrogênio líquido. O vapor de nitrogênio é direcionado para a região do corte pela parte de trás do mesmo, via Duto 2. Dessa forma garante-se a depressurização do recipiente e aumento da eficiência de refrigeração.

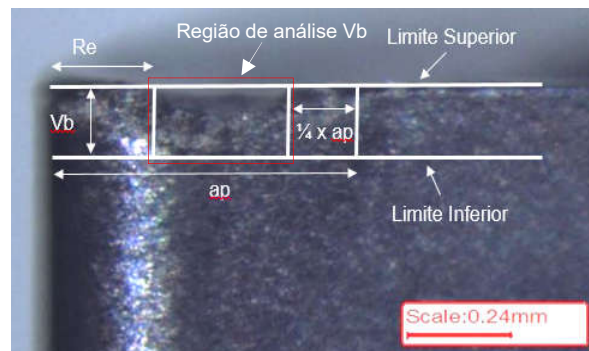
Figura 1 – Sistema de refrigeração (a) esquema do trocador de calor e (b) Dutos de saída do sistema de refrigeração.



Para medição da temperatura do inserto durante os testes de usinagem foi utilizado um inserto especial. Pastilhas de metal duro de especificação TNMG160404 MS foram furadas para possibilitar a introdução de termopar dentro do inserto. O furo cilíndrico não passante de diâmetro nominal 1,55 mm foi fabricado em direção a um dos gumes (ponta). O canal cilíndrico passa no maciço do material da pastilha a uma distância aproximada de 1,00 mm do flanco (fundo) e 1,56 mm da superfície externa de saída do cavaco. Nesse estudo foram utilizadas 2 pastilhas com canal para sonda termopar, no qual uma pastilha foi utilizada para usinagem a seco e outra para usinagem com refrigeração. Também foi utilizado um sensor de temperatura termopar tipo de K de diâmetro externo nominal de 1,5 mm e um sistema de aquisição de dados modelo FieldLogger 512k do fabricante NOVUS. Antes de cada teste de usinagem um termopar foi inserido dentro da pastilha, de maneira que, durante os testes, a ponta do termopar manteve contato com o fundo do canal da pastilha. Os testes de usinagem com refrigeração tiveram início após a confirmação da temperatura de 213K (-60 °C) do fluxo de ar comprimido.

Para acompanhar a evolução do desgaste da aresta de corte foi utilizado um estereoscópio digital modelo 4083.B5 do fabricante OPTIKA. As imagens foram processadas no software OPTIKAVIEW7 com o aumento de 50X. A Fig. 2 mostra a medição do desgaste adotada (cota Vb). A localização de medição da cota Vb está situada entre o raio da ponta da ferramenta (Re) e a parte final do desgaste, conforme indicação da norma NBR ISO 3685.

Figura 2 – Metodologia para medição da cota Vb.



Na medição da rugosidade nas superfícies usinadas foi utilizado um rugosímetro portátil modelo TR-220® do fabricante TIME. O equipamento foi configurado com os seguintes parâmetros: comprimento de análise de 4 mm; cut off de 0,8; filtro GLAUSS; range de $\pm 40 \mu\text{m}$; e parâmetro de rugosidade média Ra. Foram efetuadas 3 medições em regiões distintas e defasadas 120 graus uma da outra. As medições foram efetuadas após cada ciclo de usinagem.

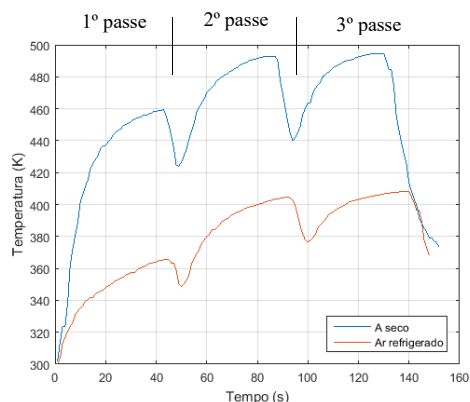
A cada ciclo de usinagem também foi realizada a medição de dureza para certificação da dureza constante do material. O equipamento utilizado foi um Durômetro Universal DRBV 187,5 AN, com uma pré-carga de 10 kg e carga de 150 kg. O tempo de ação da carga foi de 10 segundos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse estudo foi evidenciado que o trocador de calor desenvolvido promoveu a redução da temperatura do fluxo de ar comprimido ao patamar próximo a 213K (-60 °C). Já o vapor de nitrogênio saiu do recipiente com temperatura próximo a 153 K (-120 °C).

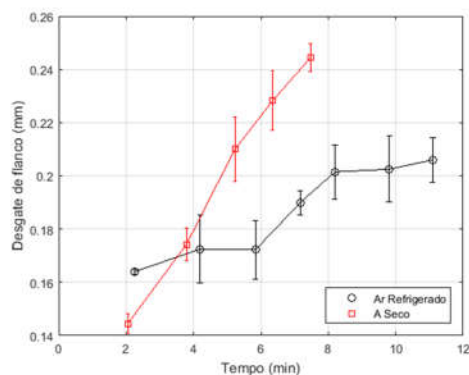
No gráfico da Fig. 3 pode ser observado o comportamento térmico do inserto entre os testes de usinagem a seco e com refrigeração. Fica evidente que a usinagem a seco gerou mais calor durante a operação de desbaste externo, em comparação com a usinagem refrigerada. O comportamento térmico do inserto apresenta similaridade entre a usinagem a seco e com refrigeração, em relação ao ciclo térmico. Foi evidenciado elevação da temperatura do inserto a qual chega ao seu ápice no final da programação de desbaste automático. Entre os passes são observadas quedas na temperatura e isso está correlacionado com o retorno do inserto a face da peça de trabalho. No entanto, o passe de usinagem subsequente inicia com patamar mais elevado de temperatura do inserto, em relação ao passe anterior. A elevação da temperatura do inserto apresenta correlação com o atrito, esforço de corte e com a forma como é efetuada a troca térmica. Na usinagem a seco a troca térmica do inserto ocorre por radiação e convecção, já na usinagem com refrigeração a baixa temperatura do fluxo de ar comprimido tornou mais eficiente a extração de calor do inserto. A refrigeração com ar comprimido proporcionou redução de 39% na temperatura interna do inserto a qual não atingiu patamar de 413K (140 °C), em relação a usinagem a seco.

Figura 3 – Ciclo térmico do inserto.



O desgaste de flanco originado no teste de usinagem a seco apresenta curva mais acentuada em relação a usinagem com refrigeração, conforme Fig. 4. No teste de usinagem a seco o flanco do inserto suportou 5 ciclos de desgaste e isso corresponde aproximadamente a 7 minutos de usinagem. Já no teste de usinagem com refrigeração, com os mesmos parâmetros do teste a seco, o flanco do inserto suportou 7 ciclos de desgaste e isso corresponde aproximadamente a 11 minutos de usinagem. O sistema de refrigeração aplicado aumentou em 49% o tempo de usinagem do inserto.

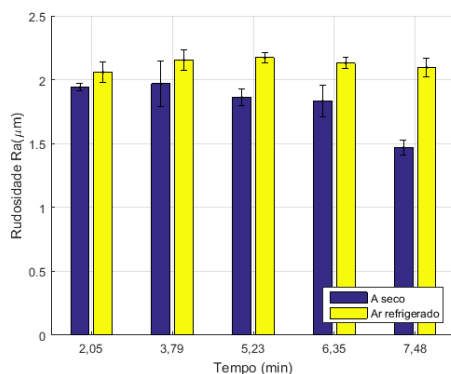
Figura 4 - Desgaste de flanco (Vb) do inserto.



Ainda analisando o gráfico da Fig. 4 fica evidente que entre os tempos de usinagem 4 e 6 minutos ocorreu uma estatização do desgaste de flanco para a usinagem com refrigeração. Isso pode ter relação com uma possível estabilização do esforço de corte. O mesmo fenômeno pode ter ocorrido entre os tempos 8 e 10 minutos. A refrigeração de corte aplicada nas condições de usinagem desse estudo promoveu aumento de 17,5% da vida útil do inserto. Foi considerado nessa estimativa o fato que os parâmetros de corte para usinagem do aço inoxidável AISI 420 de dureza média 35 HRc estão muito acima do que indicado pelo fabricante do inserto.

Como pôde ser observado na Fig. 5, a superfície usinada a seco apresenta comportamento da rugosidade divergente da literatura, conforme (Ferraresi, 1969), pois na usinagem a seco foi evidenciado redução da rugosidade conforme evolução do desgaste da aresta de corte. Também foi evidenciado que a usinagem a seco formou superfície usinada com menor rugosidade, frente a usinagem refrigerada. Nesse caso, durante a usinagem a seco, pode ter ocorrido a formação do gume posticho a partir do primeiro minuto de operação de desgaste. Esse entendimento foi fundamentado na observação do tipo de cavaco, o qual apresentou-se mais longo, em algumas vezes na forma de helicóide, em relação ao tipo de cavaco gerado na usinagem com refrigeração.

Figura 5 – Rugosidade da superfície usinada.



Ainda analisando a Fig. 5 pode-se notar que a rugosidade superficial obtida na usinagem com refrigeração apresentou evolução conforme aumento do desgaste de flanco, porém a evolução da rugosidade ocorreu com pouca variação até o tempo de usinagem aproximado de 5 minutos. Atribui-se a baixa temperatura do ar comprimido como fator determinante para fragilização do cavaco, pois a superfície da peça de trabalho também foi atacada pela baixa temperatura do ar comprimido e vapor do nitrogênio. Estima-se que a baixa temperatura promoveu menor alongamento do material antes da ruptura e isso contribuiu para elevação rugosidade na superfície. No entanto a baixa temperatura do ar comprimido não alterou a propriedade de dureza do material aço inoxidável martensítico AISI 420 de microestrutura temperada e revenida.

4- CONCLUSÃO

- O sistema de refrigeração aplicado nesse estudo proporcionou 39% de redução na temperatura interna do inserto, aumento de 49% do tempo de usinagem e reduziu em 16% o desgaste do flanco do inserto em relação a usinagem a seco;
- A temperatura de 213K (-60 °C) do fluxo de ar comprimido não altera a dureza do material aço inoxidável AISI 420 de microestrutura temperada e revenida.
- O sistema de refrigeração desenvolvido para atender a demanda desse estudo se mostrou eficiente, pois além de resfriar rapidamente o fluxo de ar comprimido apresentou baixo consumo de nitrogênio líquido, sendo estimado em 3,5 litros por hora.

4. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM ISO 6508-1: Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)**. Rio de Janeiro, p. 27. 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3685: Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento**. Rio de Janeiro, p. 61. 2017.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª ed. ed. São Paulo: ABM, 2005.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Carlos: Editora Edgard Blucher LTDA., 1969.
- GAJRANI, K. et al. Hard machining performance of indigenously developed green cutting fluid using flood cooling and minimum quantity cutting fluid. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 108-123, Janeiro 2019.
- HONG, S. Y.; DING, Y. Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, n. 10, p. 1417-1437, Agosto 2001.
- MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1ª edição. ed. São Paulo: Blucher, 2009.
- MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION. **MITSUBISHI MATERIALS**. São Paulo: [s.n.], 2016.
- SUN, S.; BRANDT, M.; DARGUSCH, M. S. Machining Ti-6Al-4V alloy with cryogenic compressed air cooling. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 50, p. 933-942, agosto 2010. ISSN 0890-6955.
- VICENTIN, G. C.; SANCHEZ, E. D. Á. **PORTA-FERRAMENTA PARA USINAGEM COM REFRIGERAÇÃO INTERNA. III Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**, 2009.
- YILDIZ, Y.; NALBANT, M. A review of cryogenic cooling in machining processes. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, n. 9, p. 947-964, Julio 2008.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

COOLING WITH TEMPERATURE BELOW 273K PROMOTES INCREASED PRODUCTIVITY IN AISI 420 STEEL TURNING

Rodrigo Cardoso Costa

IFC-Av. Frei João, 550, Luzerna – SC

rodrigo.costa@ifc.edu.br

Fernando Prando Dacas

IFC-Av. Frei João, 550, Luzerna – SC

fernando.dacas@ifc.edu.br

Elandir Antônio Desidério

IFC-Av. Frei João, 550, Luzerna – SC

elandir.desiderio@ifc.edu.br

Fernando Michelin Marques

IFSC- Av. Nereu Ramos, Seminário, Chapecó - SC

fernando.marques@ifsc.edu.br

Hafez Moghaddam

IFC-Av. Frei João, 550, Luzerna – SC

hafez.moghaddam@gmail.com

Paulo Roberto Hoffmann

IFSC- Av. Nereu Ramos, Seminário, Chapecó - SC

paulo.hoffmann@ifsc.edu.br

Mateus Andre Hilgert

IFSC- Av. Nereu Ramos, Seminário, Chapecó - SC

mateus.ah@aluno.ifsc.edu.br

Abstract. The industrial sector of the west of Santa Catarina stands out in the production of food and pulp. The equipment for these segments requires parts made of austenitic and martensitic stainless steels. The martensitic stainless steel, especially the hardened ones by tempera, increase the wear of the cut edge due to the heighten of the temperature. This study has relevance, as the maintenance of the low temperature of the insert during machining operations contributes to higher productivity. There is little literature in the literature on compressed air temperature below 273K (0 °C) as a refrigerant, which has led to the development of a heat exchanger and cooling system. The objective is to compare the cutting edge wear and machined surface roughness between machining with and without refrigeration in order to identify the influence of the low temperature of the refrigerant environment on machining tempered AISI 420 steel. Dry and cooling machining tests were performed on cylindrical samples, with the same cutting parameters. Cold machining occurred at a temperature close to 213K (-60 °C). The flank wear measurement followed ISO 3685 standard. The roughness of the machined surface was measured at the end of each machining cycle. A thermocouple was inserted into the insert for temperature measurement related to the machining operation. The maximum temperature of the insert in the coolant machining was 413K (140 °C). The carbide inserts with 7 minutes of refrigerated machining showed flange deformation at 0.18 mm. The cooling system reduced the internal temperature of the carbide insert by 39%, reduced flank wear by 16% and increased machining time by 49%. Cooling environment with a temperature of about 213K (-60 °C) did not change the hardness of the AISI 420 stainless steel material.

Keywords: Machining; AISI 420; Cooling; Reduction; Flank wear.