

## Właściwości chłodzące ciekłego azotu i dwutlenku węgla podczas frezowania

Ciekły azot (*liquid nitrogen LN<sub>2</sub>*) i ciekły dwutlenek węgla (LCO<sub>2</sub>) to najczęściej stosowane w obróbce skrawaniem chłodziwa kriogeniczne. Niestety nie do końca wyjaśniono różnice w sposobie ich dostarczania do strefy skrawania i we właściwościach chłodzących. Przedstawione badania mają na celu pogłębienie rozumienia tych różnic.

Szybkość konwekcyjnego odprowadzania ciepła  $Q_s$  jest proporcjonalna do masowego natężenia przepływu medium chłodzącego  $\dot{m}$ , ciepła właściwego medium  $c_p$  oraz różnicy między temperaturą medium przed wejściem do strefy skrawania  $T_{m1}$  i po wyjściu z tej strefy  $T_{m2}$ :

$$Q_s = \dot{m} c_p (T_{m1} - T_{m2}) \quad (1)$$

Gdy LN<sub>2</sub> dostarczany do strefy skrawania w temperaturze  $-195,8^\circ\text{C}$ , uderza w przedmiot, odparowuje, stąd do ciepła odbieranego konwekcyjnie dodaje się ciepło parowania  $Q_1$ :

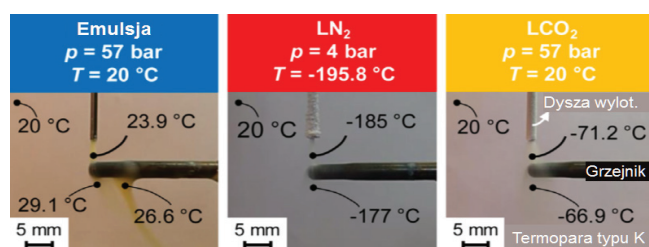
$$Q_1 = \dot{m} h_e \quad (2)$$

gdzie:  $h_e$  jest ciepłem parowania.

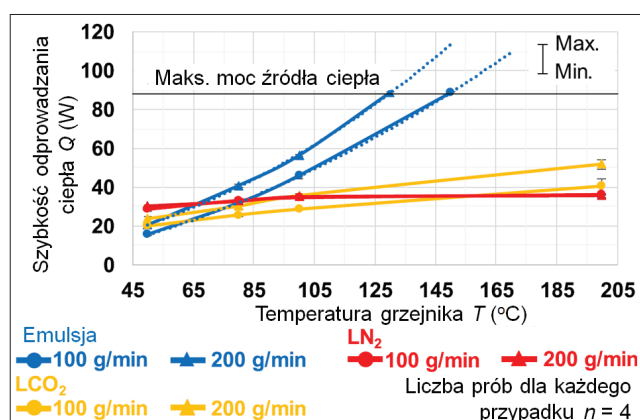
LCO<sub>2</sub> jest dostarczany do strefy parowania w temperaturze otoczenia i pod wysokim ciśnieniu 5,7 MPa. Jego rozprężanie się po wyjściu z dyszy powoduje odbieranie ciepła z otoczenia i spadek temperatury do  $-78,5^\circ\text{C}$ , dlatego jego zdolności chłodzące można określać podobnie jak w przypadku LN<sub>2</sub>.

Wyniki eksperymentów, w których podawano emulsję, LN<sub>2</sub> oraz LCO<sub>2</sub> prostopadle do grzejnika, prowadzonych przy różnych temperaturach grzejnika i dwóch natężeniach przepływu – zestawiono na rys. 1 i 2.

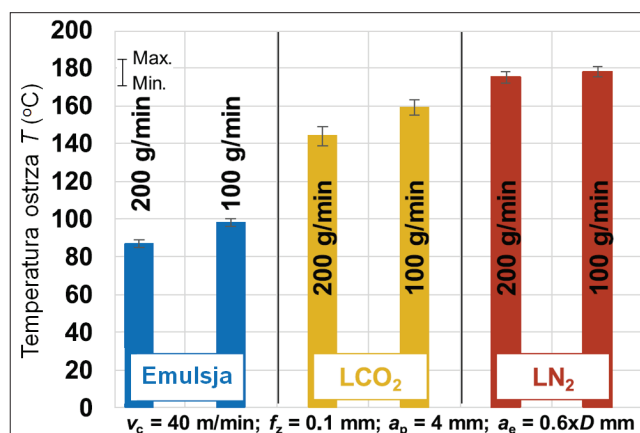
Widać, że zdolności chłodzące emulsji rosną dynamicznie wraz z różnicą temperatur, jako że zależą prawie wyłącznie od tej różnicy (równanie 1). Inaczej jest z chłodziwami kriogenicznymi, które chłodzą głównie przez ciepło parowania (zależność 2), więc ilość odbieranego ciepła w niewielkim stopniu zależy od różnicy temperatur. Ponadto powierzchnia oddziaływania emulsji pozostającej w stanie ciekłym jest znacznie większa niż LN<sub>2</sub> i LCO<sub>2</sub>, co widać na rys. 1. Z tego wynika, że emulsja ma lepsze właściwości chłodzące.



Rys. 1. Porównanie temperatury różnych mediów przed strefą chłodzoną i za nią, przy stałym natężeniu przepływu  $\dot{m} = 200$  g/min



Rys. 2. Szybkość odprowadzania ciepła w funkcji temperatury grzejnika



Rys. 3. Temperatura ostrza przy frezowaniu Ti-6Al-4V ( $\beta$ ) dla różnych chłodziw podawanych z natężeniem przepływu 100 i 200 g/min

Wyniki te potwierdzono eksperymentami prowadzonymi dla dwóch natężeń przepływu porównywalnych mediów chłodzących przy frezowaniu Ti-6Al-4V ( $\beta$ ) frezem o średnicy  $\varnothing 10$  mm z termoparą umieszczoną na powierzchni przyłożenia, blisko krawędzi skrawającej (rys. 3). Pomiary temperatury ostrza połączone z oceną trwałości ostrza wskazały, że istnieje optymalna temperatura, którą można osiągnąć przez zastosowanie odpowiedniego natężenia przepływu chłodziwa.

Opracował: prof. dr hab. inż. Krzysztof Jemielniak

### LITERATURA

Pušavec F. et al. "Cooling capability of liquid nitrogen and carbon dioxide in cryogenic milling". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 68 (2019): 73–76, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.03.016>.