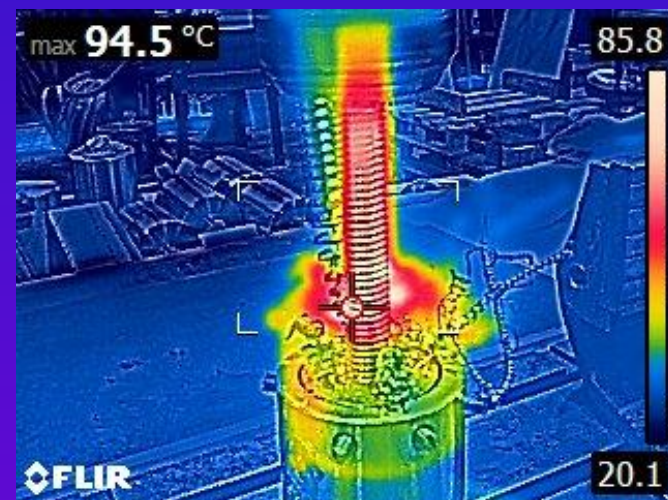


# Kvantifikace tribologických vlastností procesních kapalin v extrémních technologických podmínkách zatěžování

Blok M – Maziva a provozní kapaliny  
Odborný garant: Ing. Petr Dobeš, CSc.



*Prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.*

# Extrémní technologické podmínky zatěžování

vysoká teplota

kryogenní teplota

vysoké kontaktní tlaky

podtlak, vakuum

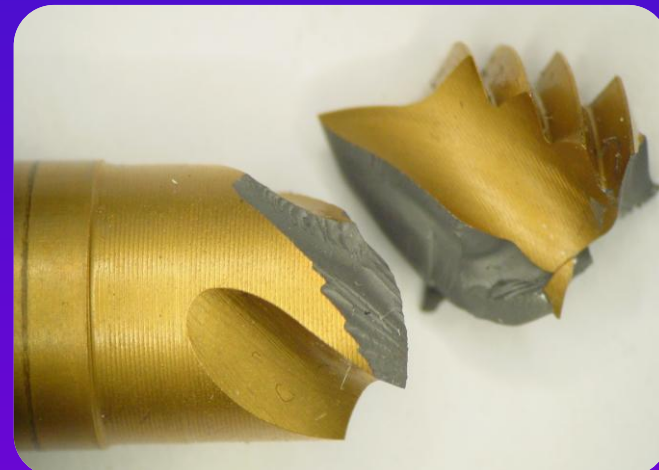
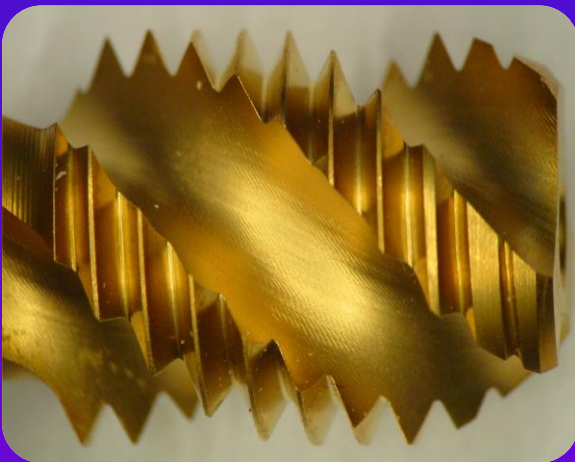
vysoké rychlosti tření

chemicky agresivní  
prostředí

*+ jejich kombinace*

# Důsledky těchto podmínek zatěžování

- snížení výkonu zařízení
- energetické a finanční ztráty
- neefektivní provoz
- hlučnost
- nepřesnost mechanismů
- selhání funkčnosti zařízení, lom nástrojů, havárie



# Účinná tuhá maziva

měkké kovy (200-600°C)

(Cu, Pb, Ag, Ni, In)

oxidy kovů (600-900°C)

(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO, TiO<sub>2</sub>, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

polymery <0°C

(PI, PTFE, PEEK) (až -269°C)

alkalické fluoridy (500-800°C)

(CaF<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub>, CeF<sub>2</sub>, TeF<sub>2</sub>)

intermetalika (600-1000°C)

(Ni<sub>3</sub>Al, Ni<sub>3</sub>Si, NiAl, TiAl)

na bázi uhlíku (300-500°C)

(dle sp-vazeb; grafen/oxidy grafenu); řada struktur

nitridy, karbidy, boridy (600-900°C)

(TiN, h-WC, h-BN, ZrN)

dichalkogenidy (300-500°C)  
přechodných kovů (TMD)

MX<sub>2</sub>: M – Mo, W, Ga; X-S, Se, Te

– obvykle střídání silných vazeb kovalentních a slabých van der Waalsových

# Formy vazeb maziv

**volné částice**  
(přísady do směsí)

**Suspenze, aditivované  
emulze (EP aditiva)**

**vázané ve formě  
past a mýdel**

**vázané ve formě laků**

**kompozice**  
(intermetalika)

**vázané galvanickým  
pokovením**

**vázané ve formě povlaků**  
(PVD, laserové plátování)

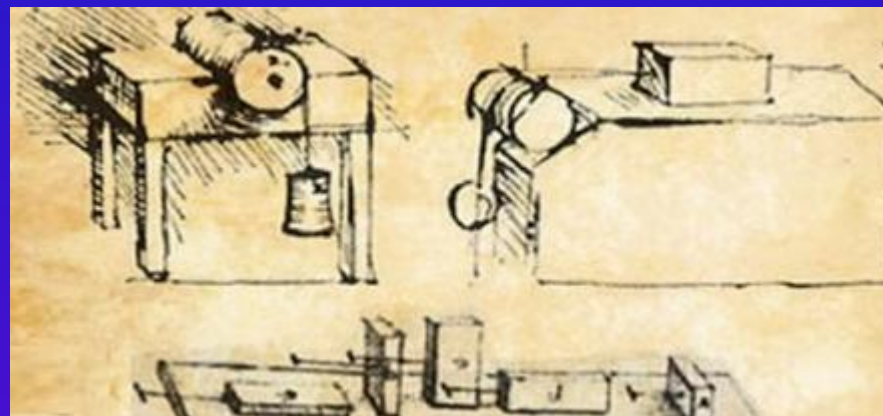
# Zkoušky maziv

Řada standardizovaných metod (kolík/kulička/disk vs disk/disky), první testy prováděl již Leonardo Da Vinci, pak Pieter van Musschenbroek a řada dalších vědců.

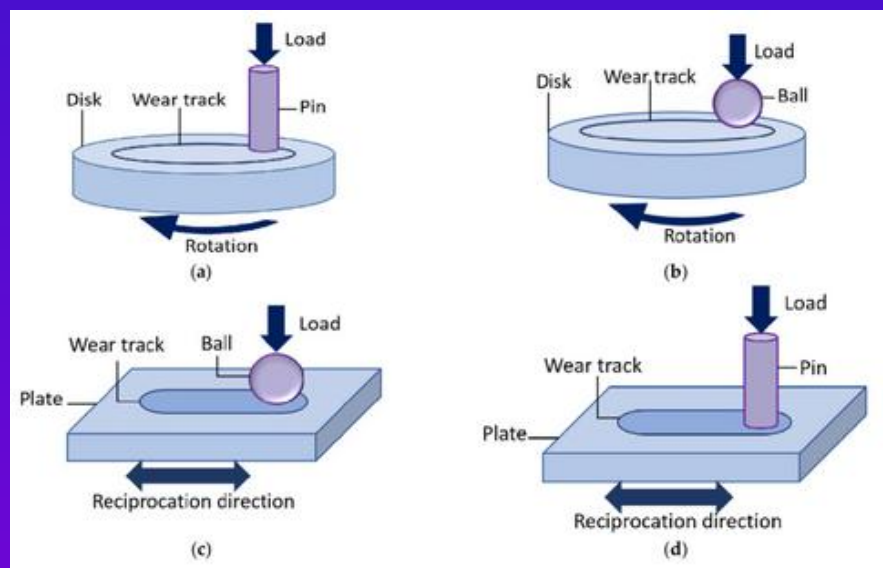
laboratorní

provozní

speciální, smluvní



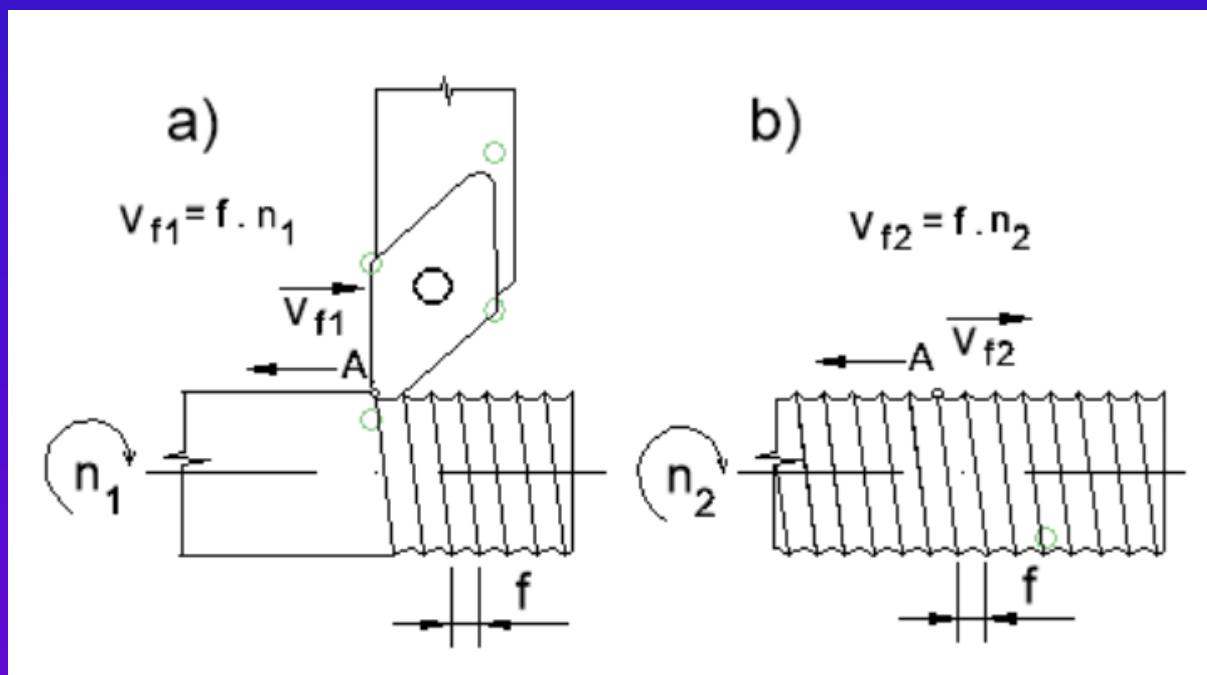
Zdroj: The Converstaion



Zdroj: The ResearchGate

# Určité problémy laboratorních zkoušek

- nevystihují zcela provozní podmínky zatěžování maziv
- někdy problematická interpretace výsledků a predikce chování maziv v reálné praxi
- vliv přípravy vzorků na dosažené výsledky

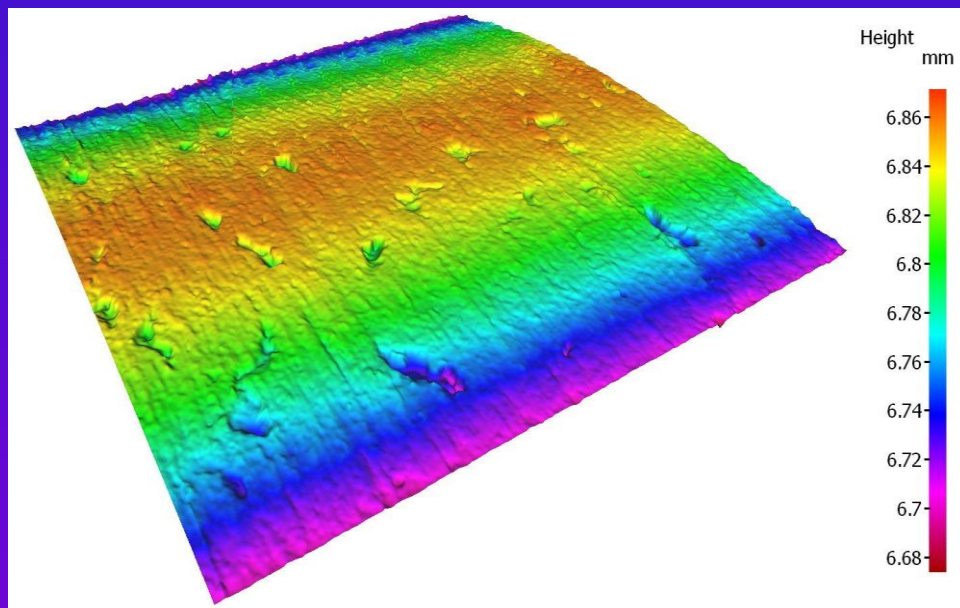
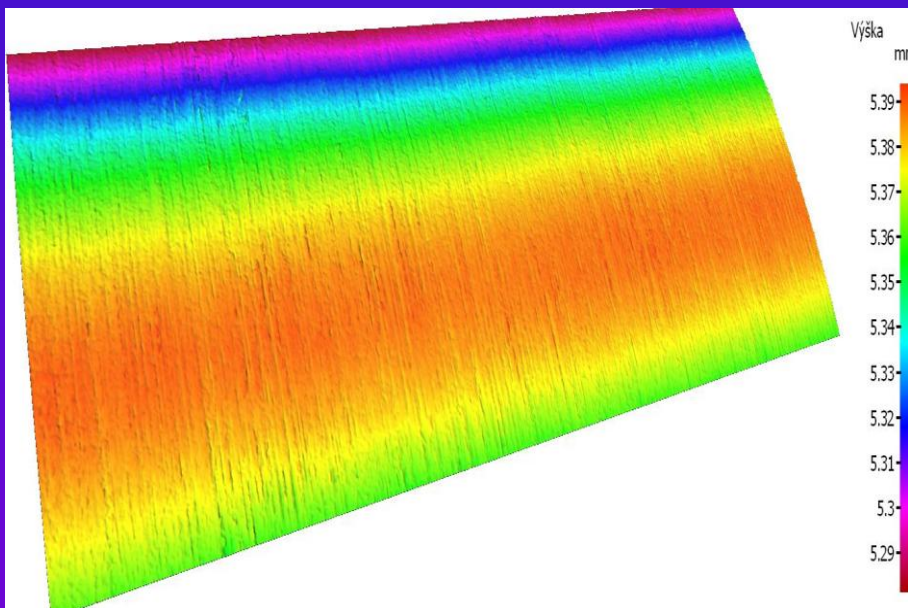


a) při výrobě

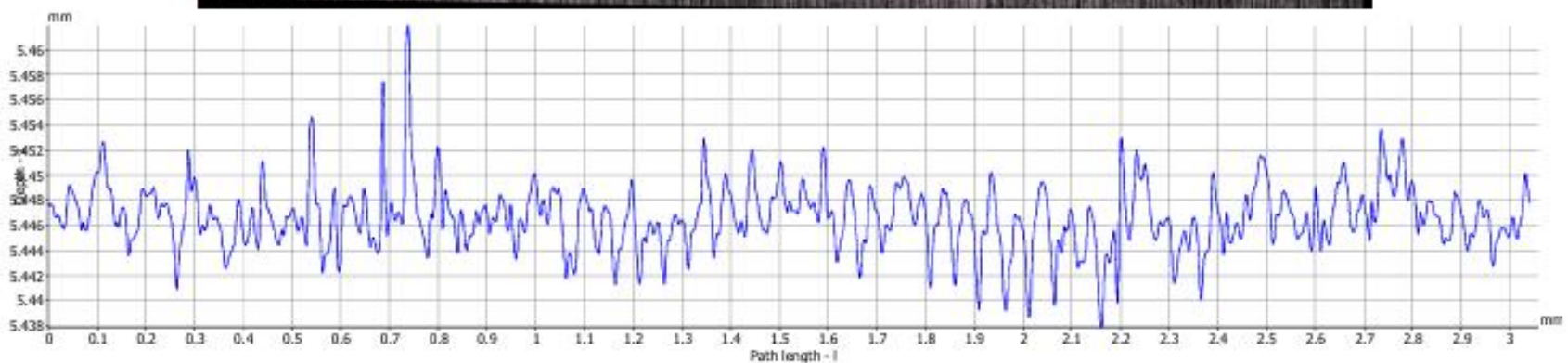
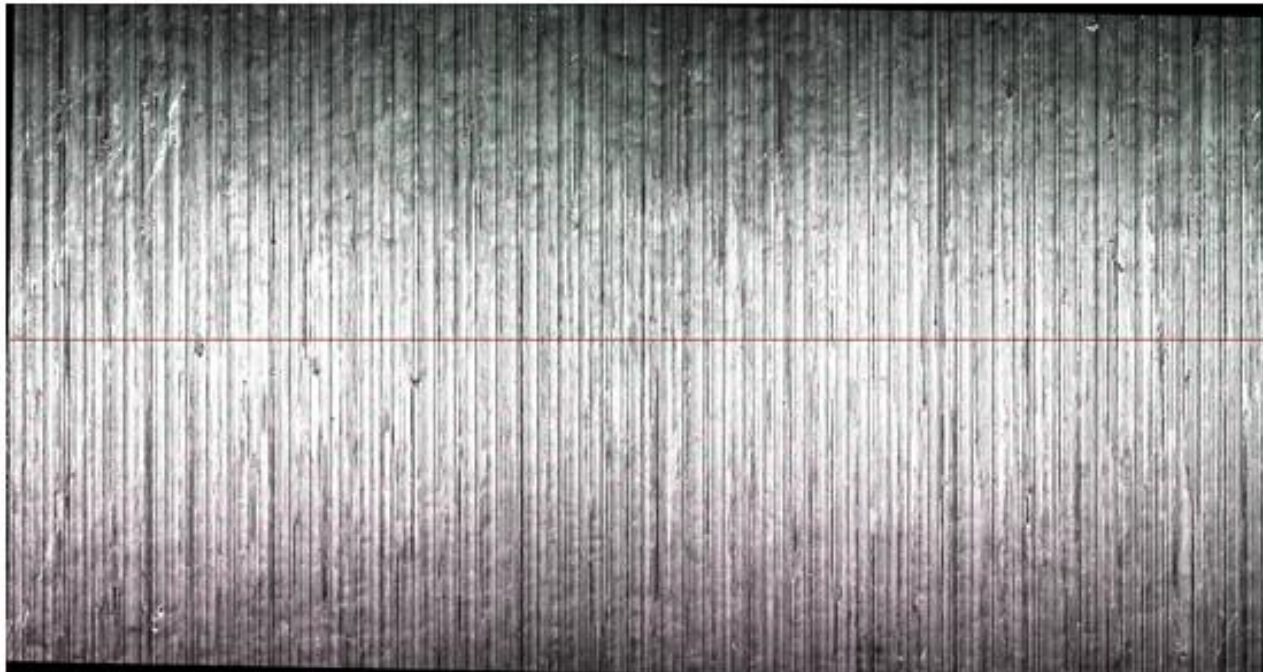
b) při vlastní funkci součásti

# Základní úloha – definice reálného povrchu součástí

- poměrně složitý problém, navíc časově proměnný
- vyšší efekty různých vlivů se projevují při extrémních podmínkách zatěžování
- dnes – vědní disciplína, charakterizující povrchy v 3D parametrech



# Měření primárního profilu



Pa: 1.873 $\mu$ m  
Pq: 2.553 $\mu$ m  
Pz: 14.407 $\mu$ m

# Analýza amplitudových charakteristik povrchu (zjednodušeně)

**Změřený reálný, primární profil:**



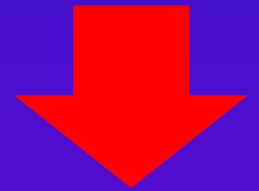
**- po aplikaci tvarového filtru – základní profil:**



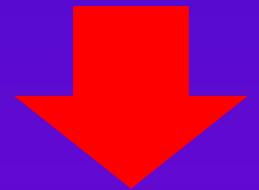
**- po aplikaci filtru vlnitosti:**



**- po aplikaci filtru drsnosti:**



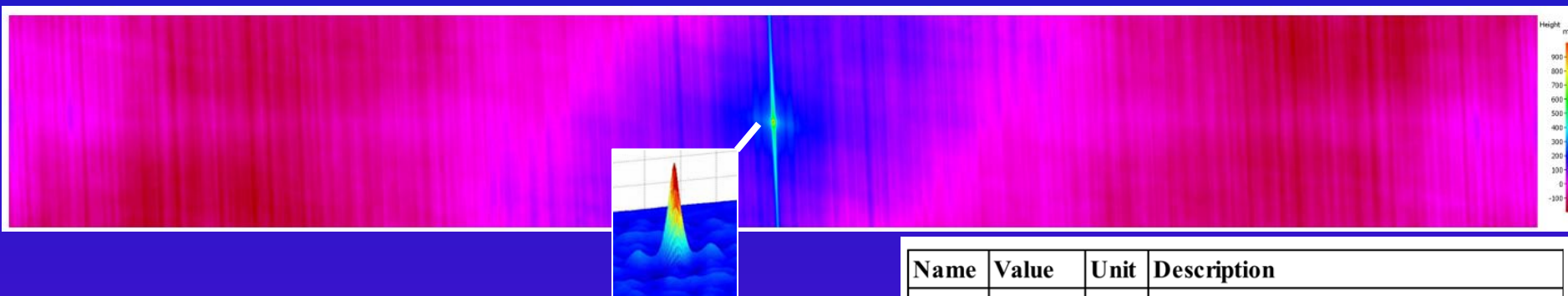
**$W_a, W_q, W_z$ , atd.**



**$R_a, R_q, R_z$ , atd.**

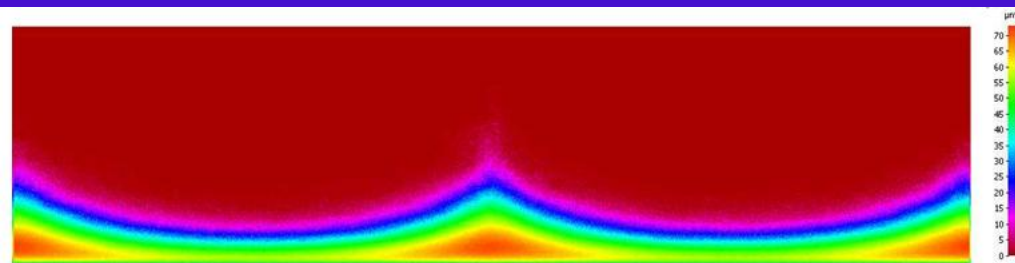
# Pokročilejší 2D/3D analýzy povrchu

Textura povrchu – autokorelační funkce



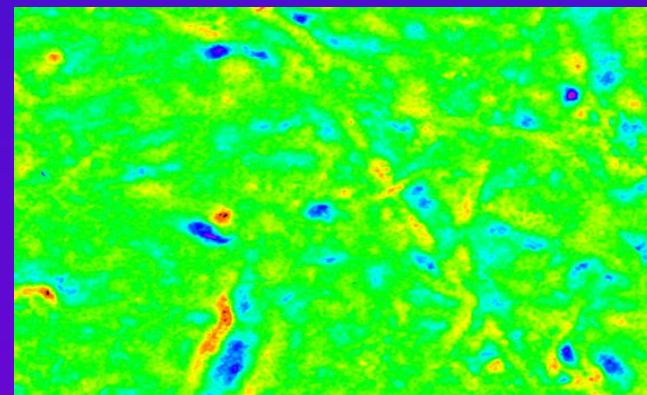
| Name  | Value   | Unit | Description                                              |
|-------|---------|------|----------------------------------------------------------|
| Sal   | 66.988  | μm   | Auto correlation length.                                 |
| Str   | 0.165   |      | Texture aspect ratio ( $0 \leq \text{Str} \leq 1$ ).     |
| Std   | -87.600 | °    | Texture direction (°).                                   |
| Stdi  | 0.358   |      | Texture direction index ( $0 \leq \text{Stdi} \leq 1$ ). |
| angle | n.a.    | °    | Manually measured angle                                  |

Plošná analýza gradientů v povrchu



| Name                     | Value    | [u] | Description                                  |
|--------------------------|----------|-----|----------------------------------------------|
| Slope of Maximum         | 7.9956   | °   | Slope of most frequent gradient              |
| Angle X/Y of Maximum     | 355.6265 | °   | Angle in X/Y plane of most frequent gradient |
| Percentage of Maximum    | 0.0069   | %   | Percentage of most frequent gradient         |
| Discretization Slope     | 0.3604   | °   | Slope range of one measure point             |
| Discretization Angle X/Y | 0.3614   | °   | Angle range of one measure point             |

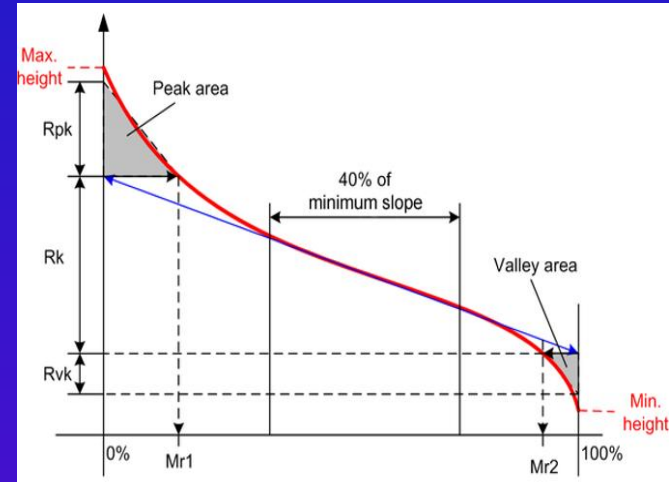
EM - distribuce fází v povrchu



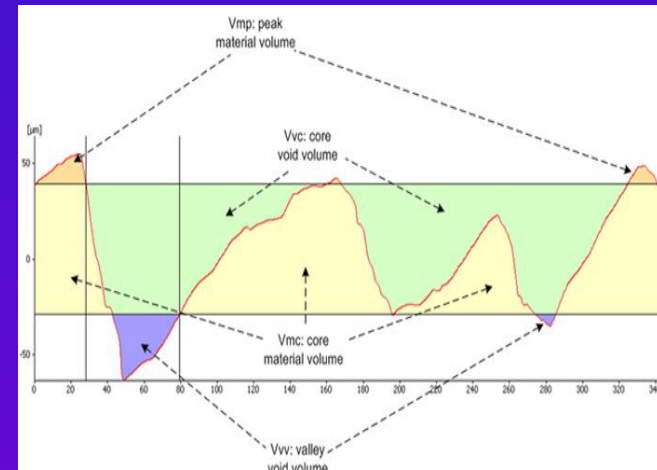
# Analýza nosného podílu:

## Abbot – Firestoneova křivka

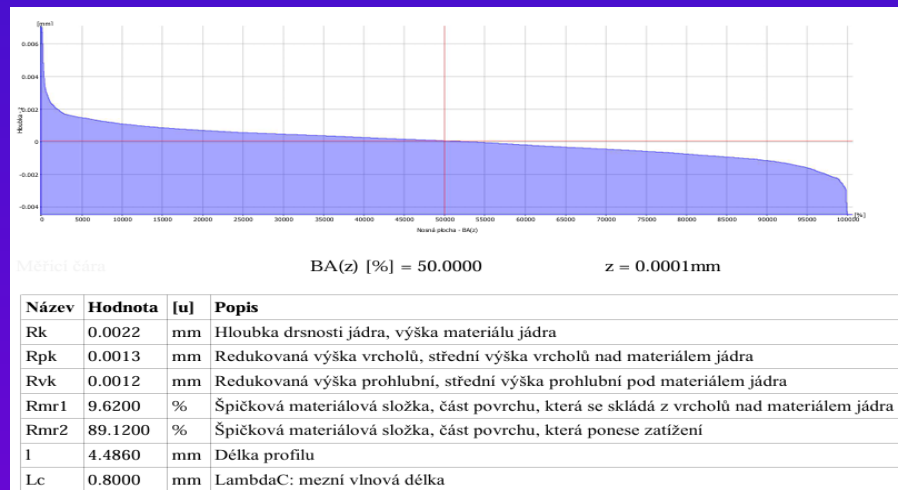
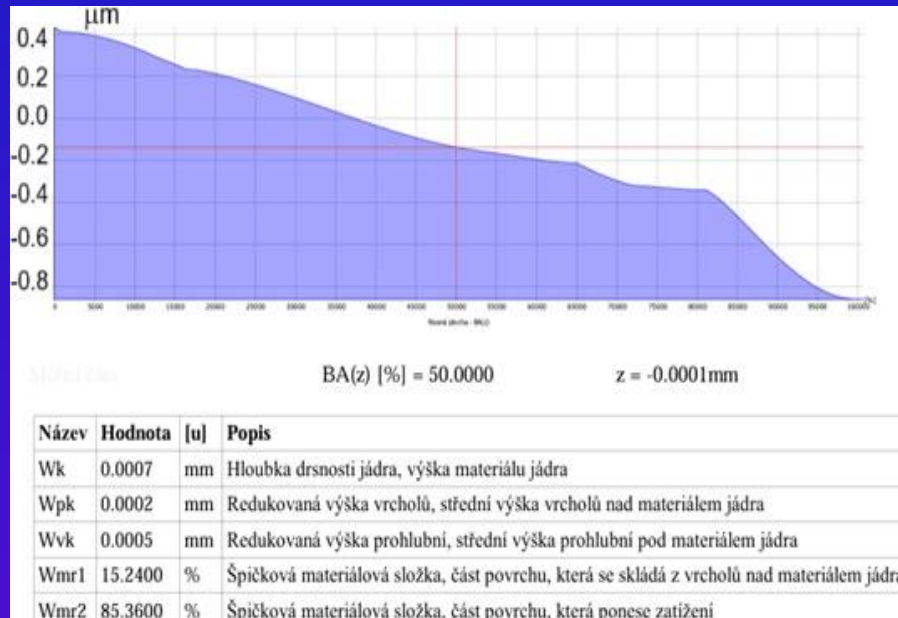
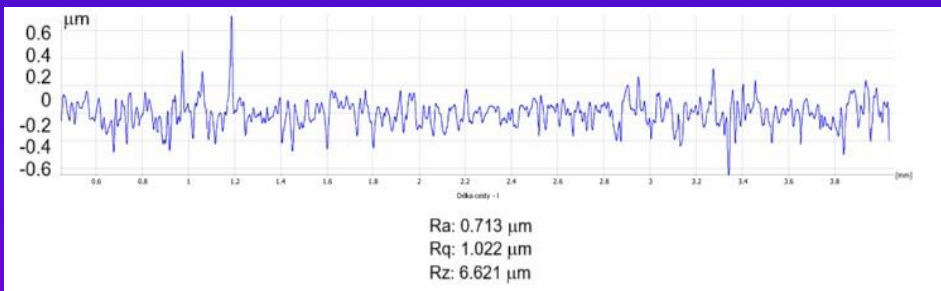
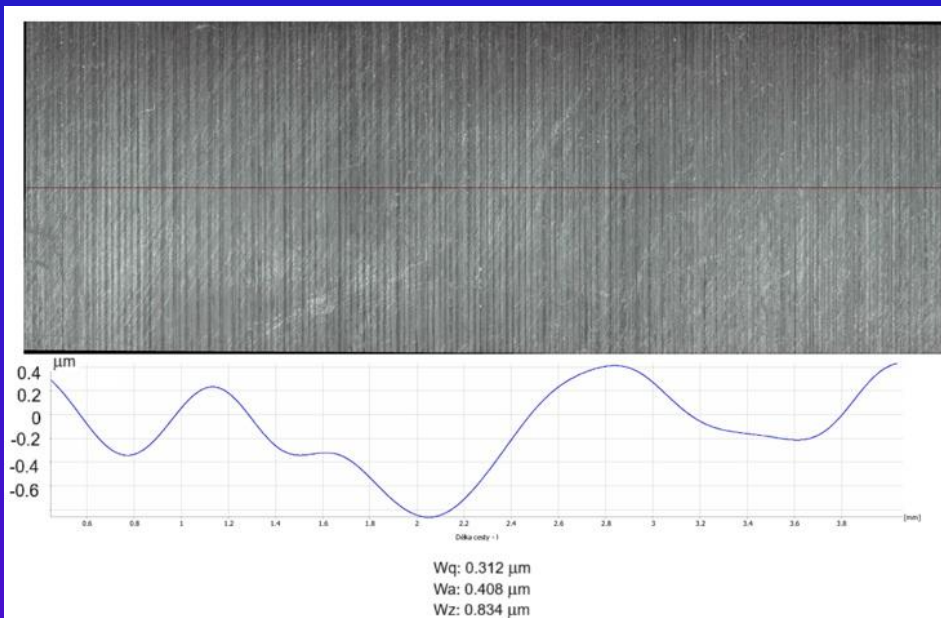
2D



3D



# Nosný podíl – z vlnitosti a drsnosti

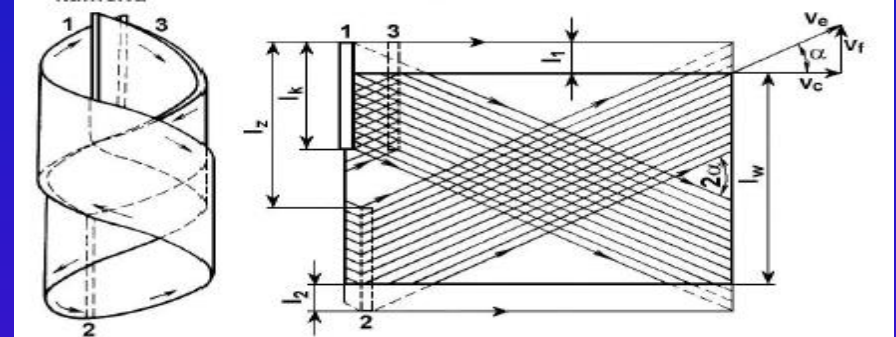
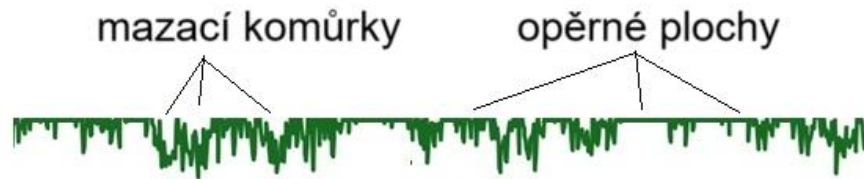


# Konvenční řešení zlepšení mazání a únosnosti

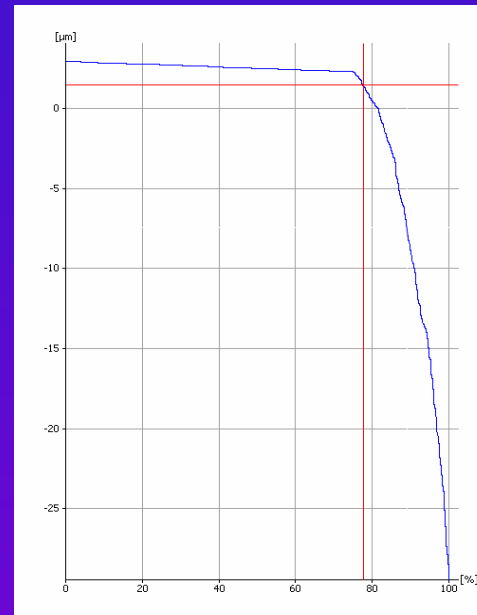
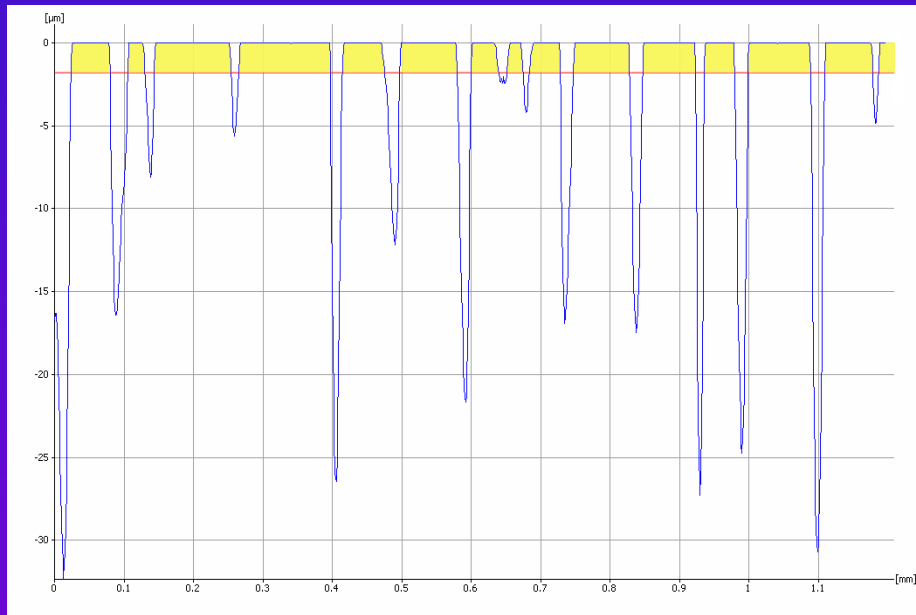
Výchozí povrch



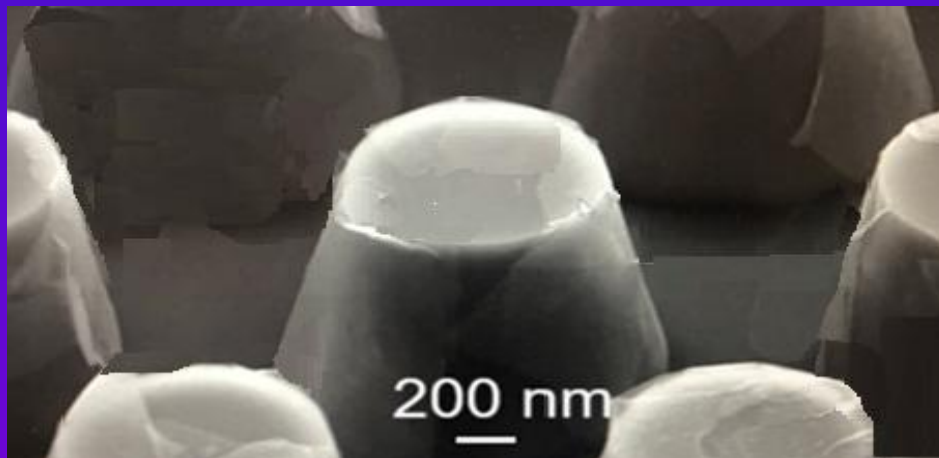
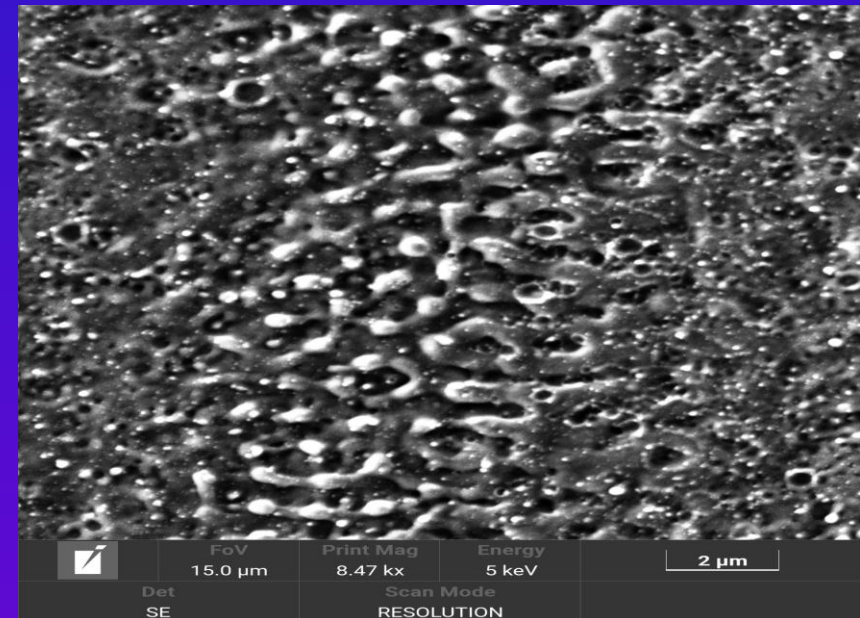
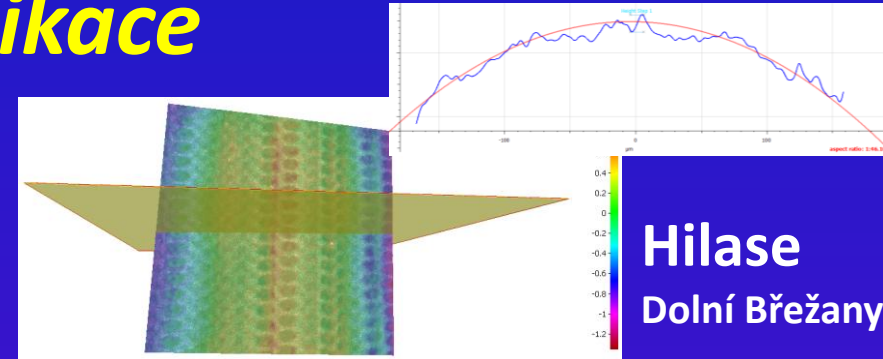
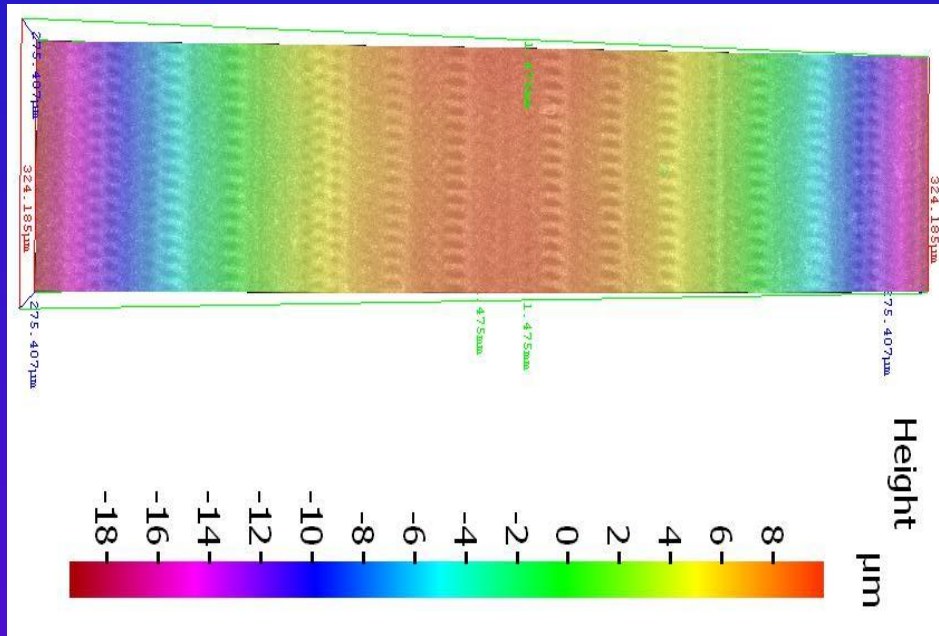
Honování, superfiniš



Retenční objem  
[mm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>]



# Nekonvenční řešení zlepšení mazání a únosnosti – *laserové aplikace*



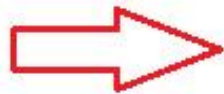
Povrchy hydrofóbní/hydrofilní a antibakteriální

# Záběh povrchů – účinek kontaktních tlaků může mít řadu důsledků

Výchozí povrch



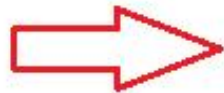
a) materiál křehký



fragmenty fází



b) materiál tvárný



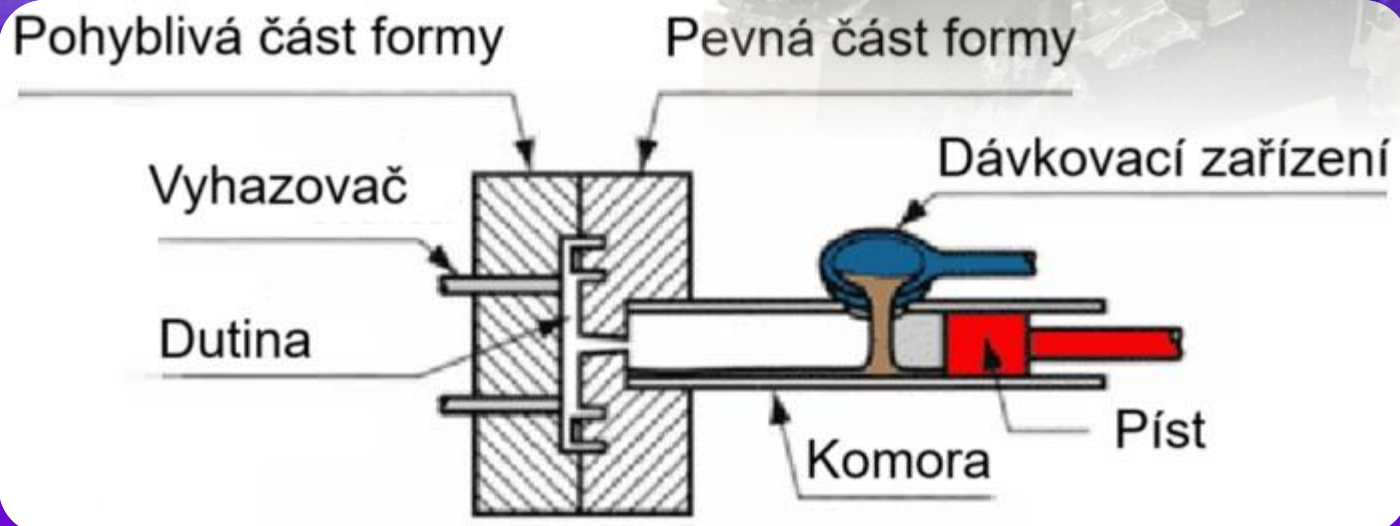
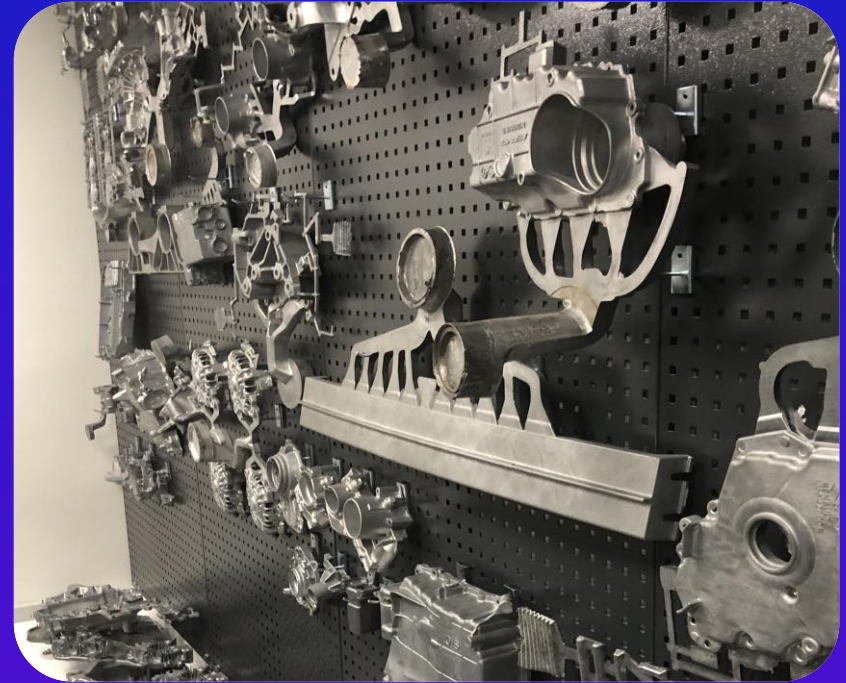
zplastizovaný  
povrch



- nebezpečný otěr  
(např. u povlakovaných  
implantátů)

- hrozící zadření  
(nevhodné, opotřebené  
nebo zanešené brusivo)

# Experimentální úloha: uvolňování jader při tlakovém lití zinku



# Nástrojářské formy – mohou se zadřít, jsou drahé

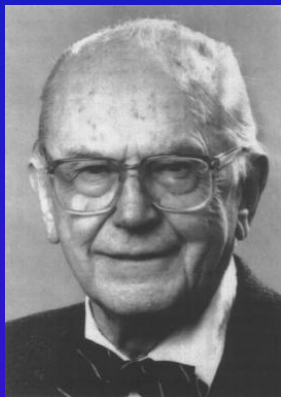


# Myšlenka: vytvoření procesní kapaliny/maziva v nedostupných místech z tuhé fáze (např. z PVD povlaku) pro uvolnění jádra formy pro tlakové lití lehkých slitin (Al, Zn)

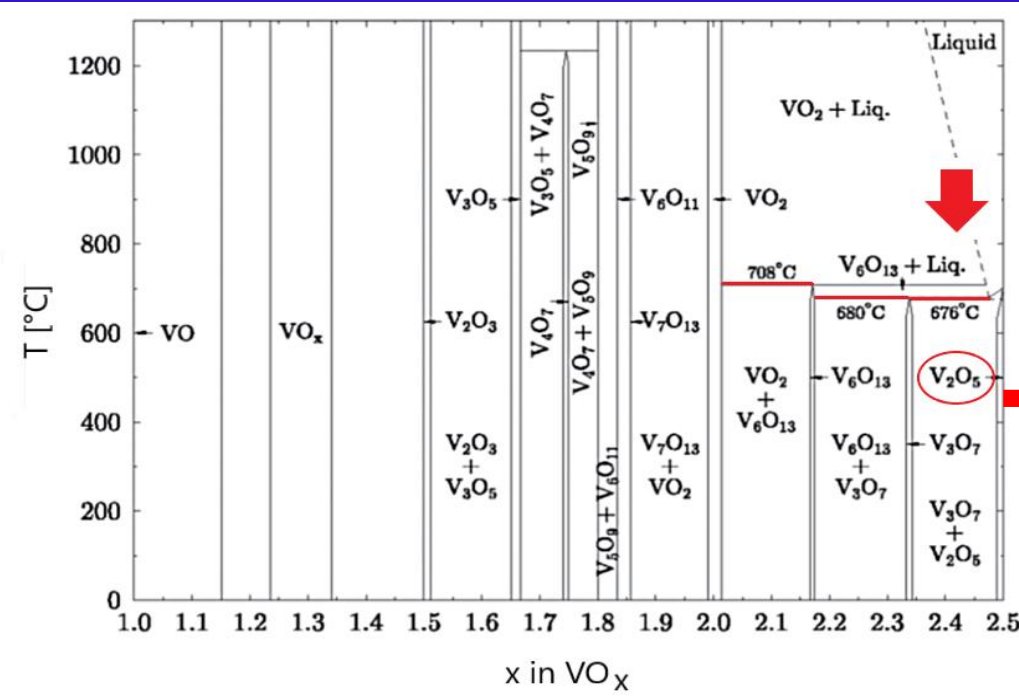
| Oxidy                          | Pracovní oblast<br>[°C] | Teplota tání<br>[°C] | Součinitel tření<br>[-] |
|--------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|
| Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub> | 0-327                   | 296                  | 0,20                    |
| MgO                            | 500-700                 | 2900                 | 0,35-0,50               |
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 500-727                 | 450                  | 0,15-0,30               |
| WO <sub>3</sub>                | 500-800                 | 1470                 | 0,25-0,30               |
| MoO <sub>3</sub>               | 597-800                 | 795                  | 0,20-0,27               |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 600-100                 | 672                  | 0,30-0,32               |
| TiO <sub>2</sub>               | 800-1000                | 1850                 | 0,35-0,55               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 800-1000                | 2040                 | 0,30-0,50               |
| ZrO <sub>2</sub>               | 1000                    | 2800                 | 0,50                    |

# Magnéliho fáze:

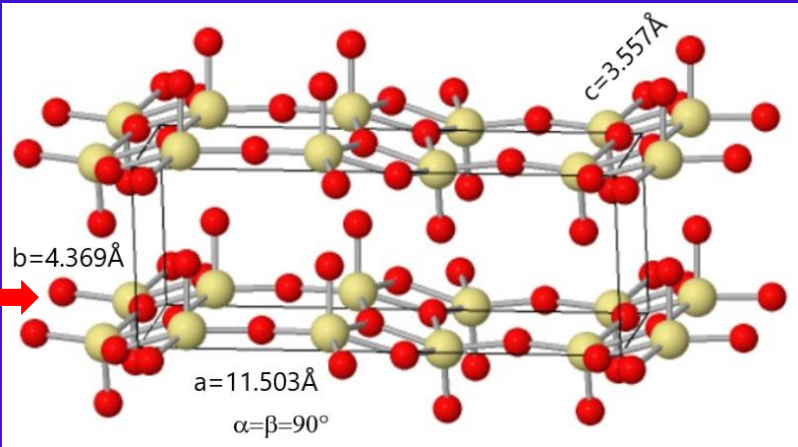
- oxidy přechodných kovů, nestechiometrické, např. oxid wolframu, oxid molybdenu, oxid titanu a oxid vanadu
- mohou fungovat jako účinná maziva za zvýšených teplot v tekutém stavu.



Arne Magnéli  
(1914-1996)



Orthorhombická mřížka

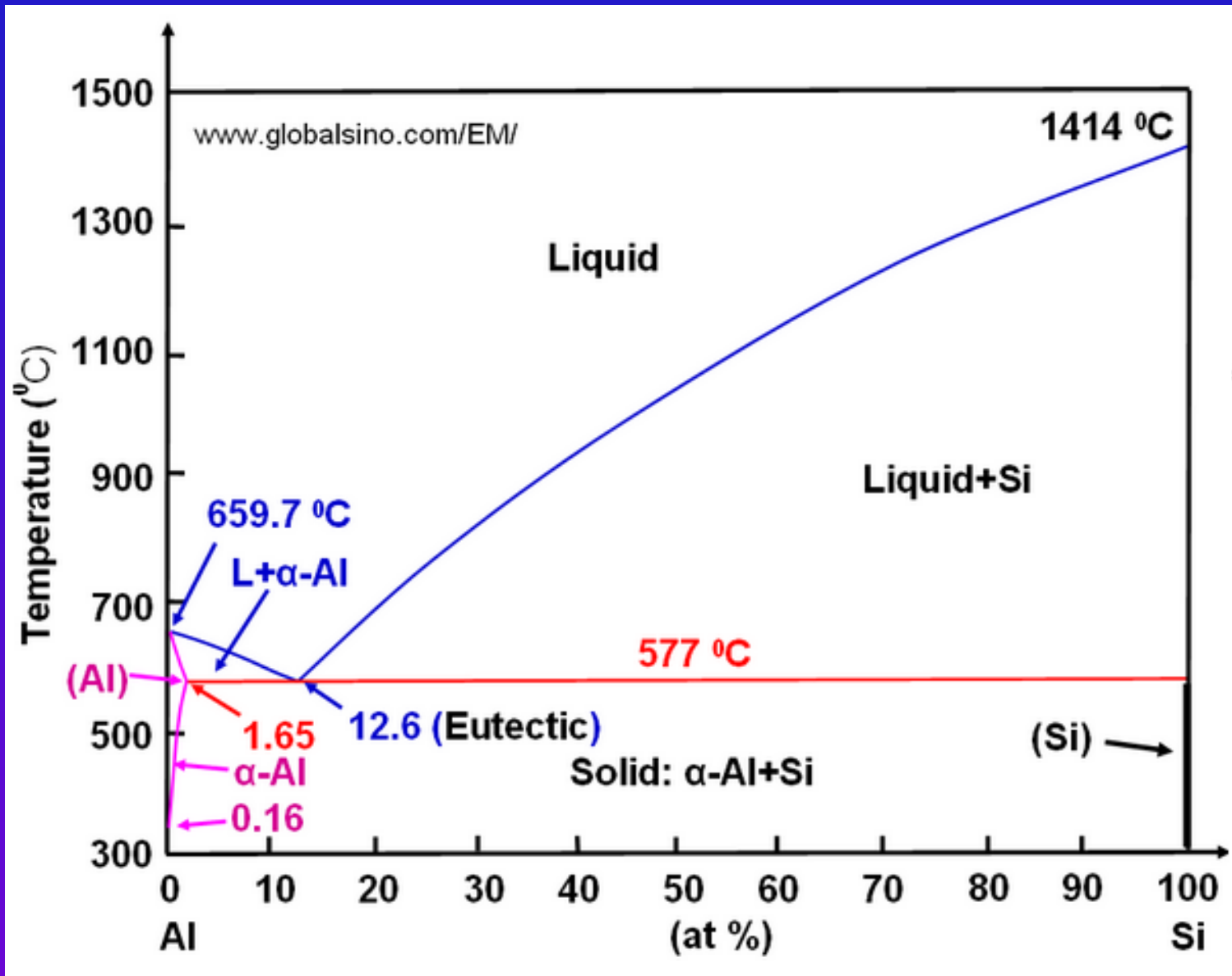


Magnéli fáze  $V_2O_5$

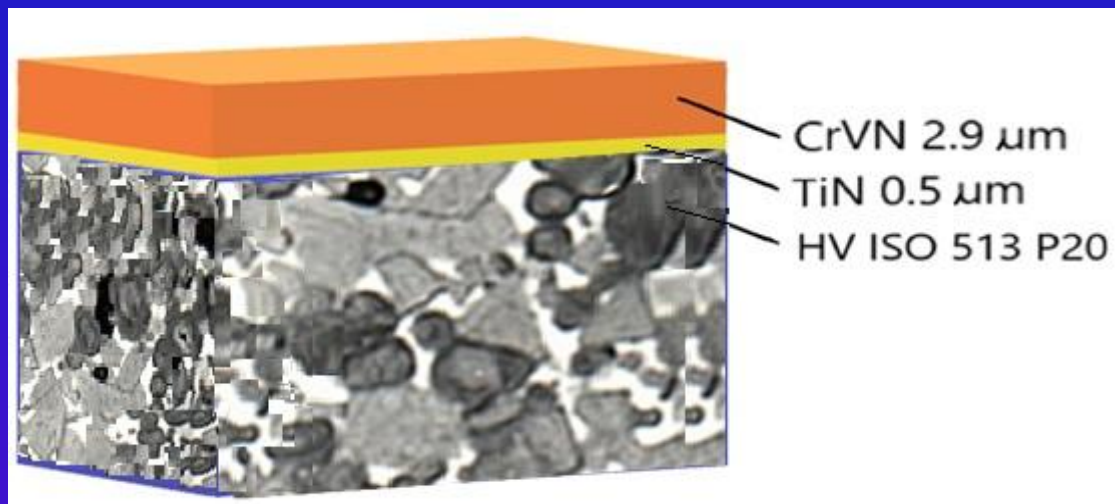
Magnéliho fáze  $V_nO_{2n-1}$

Zdroj: <https://next-gen.materialsproject.org/>

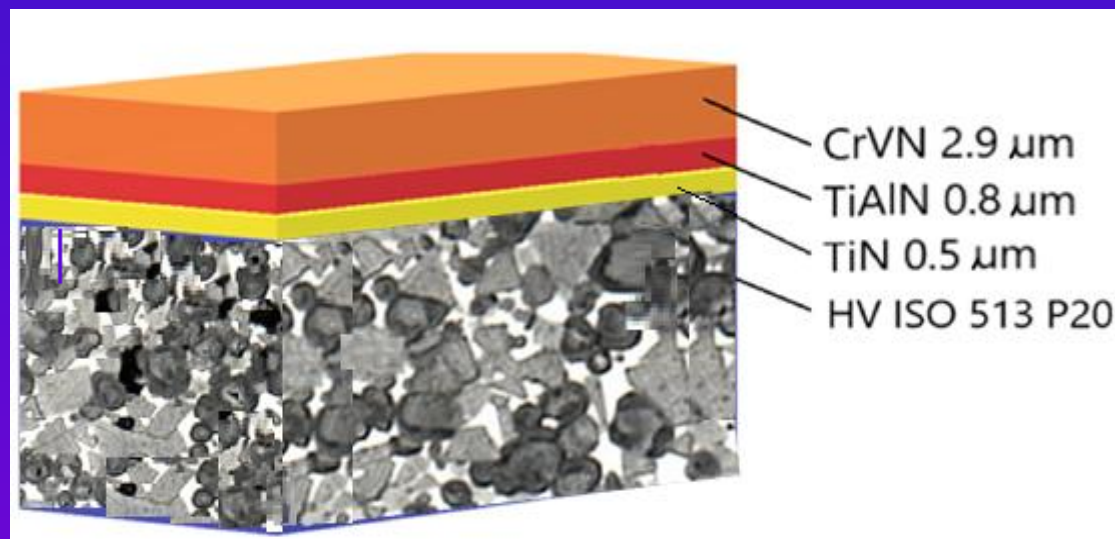
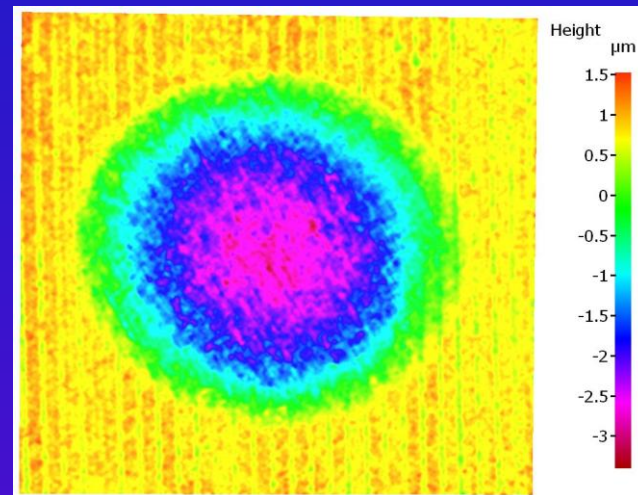
## Předpokládané materiálové aplikace (silumin):



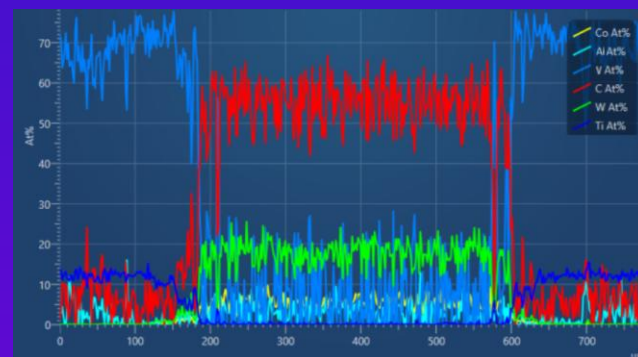
# Experimentální program – zkoušeny 2 druhy povlaků



1. Duplexní povlaky (s proměnným obsahem V)



2. Triplexní povlaky



Kontrola pomocí výbrusů a AEM

**Tab. 1: Přehled povlaků (každý testován 6x)**

| POVLAK                  | V<br>[at. %] | Tloušťka<br>[nm] |
|-------------------------|--------------|------------------|
| CrV <sub>35</sub> N+TiN | 35           | 2400-2500        |
| CrV <sub>49</sub> N+TiN | 49           | 2300-2400        |
| CrV <sub>68</sub> N+TiN | 68           | 2800-2850        |
| TiAlN+TiN               | -            | 2500-2600        |
| CrVN+TiAlN+TiN          | 68           | 2900-3200        |

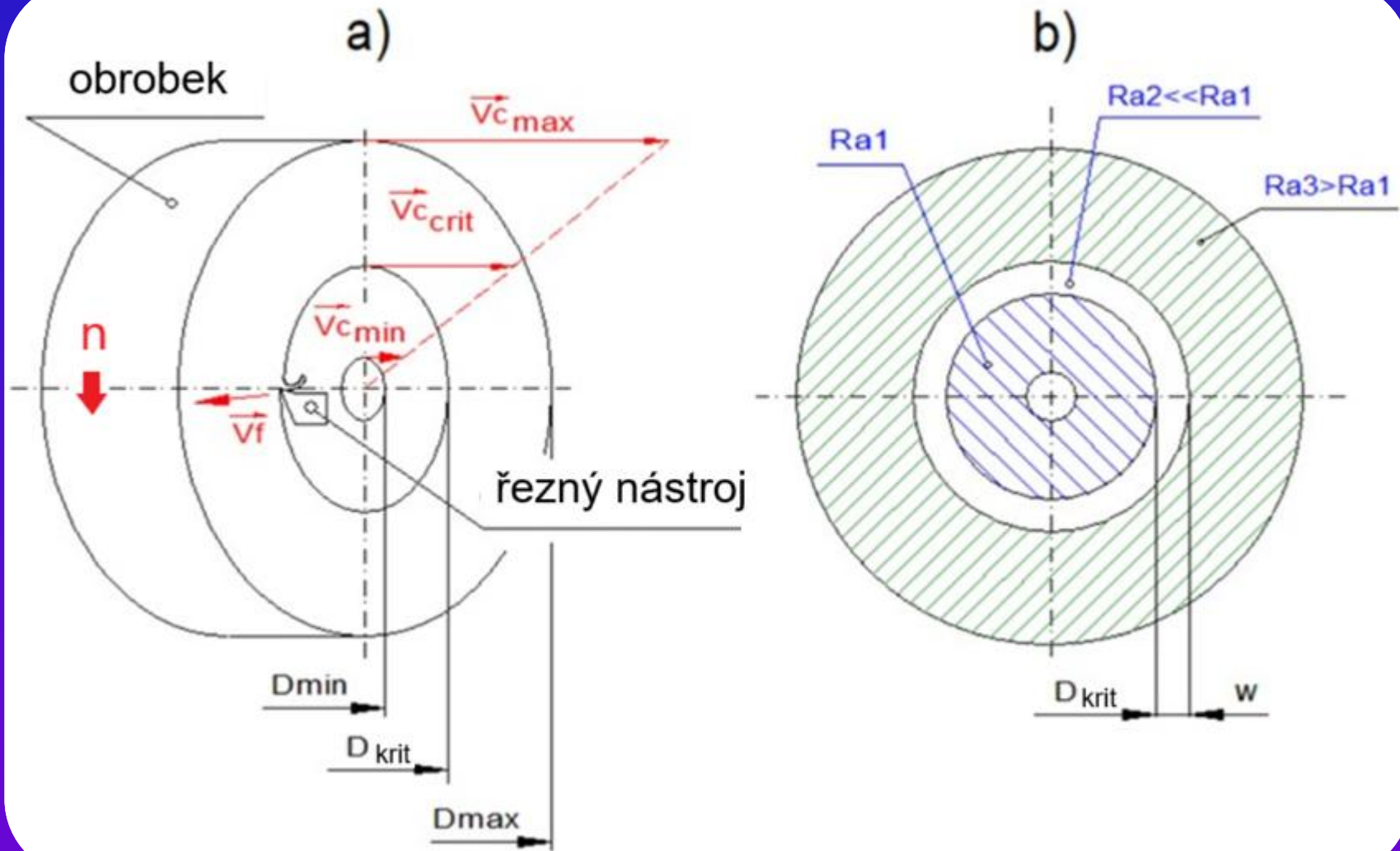


Source: <https://www.platit.com>

*Obloukové povlakovací PVD zařízení Platit π311*

## Smluvní zkouška:

- vysoké teploty generovány čelním soustružením oceli za sucha



# Experimentální podmínky

Čelní soustružení

Soustruh SU50A (11 kW)

Ocel 12 050.1

VBDCMT 09T304E-UR

Ultra jemný substrát ISO P20  
(Dormet Pramet, Sump perk)

Držák S20R SCLCR 09

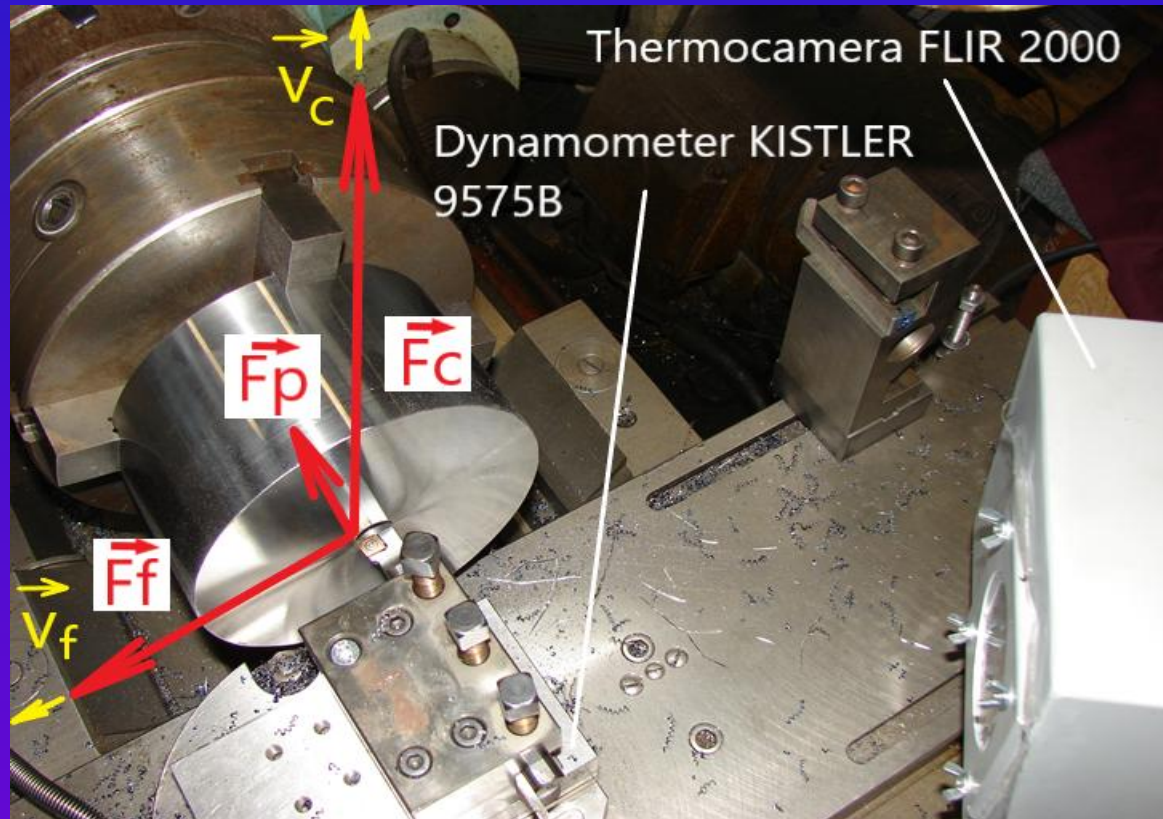
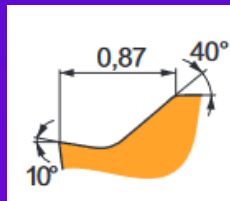
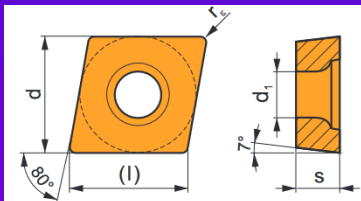
$D/d = 180/21$  mm,  $L$  150mm

$a_p = 0.8$  mm,  $f = 0.15$  mm,

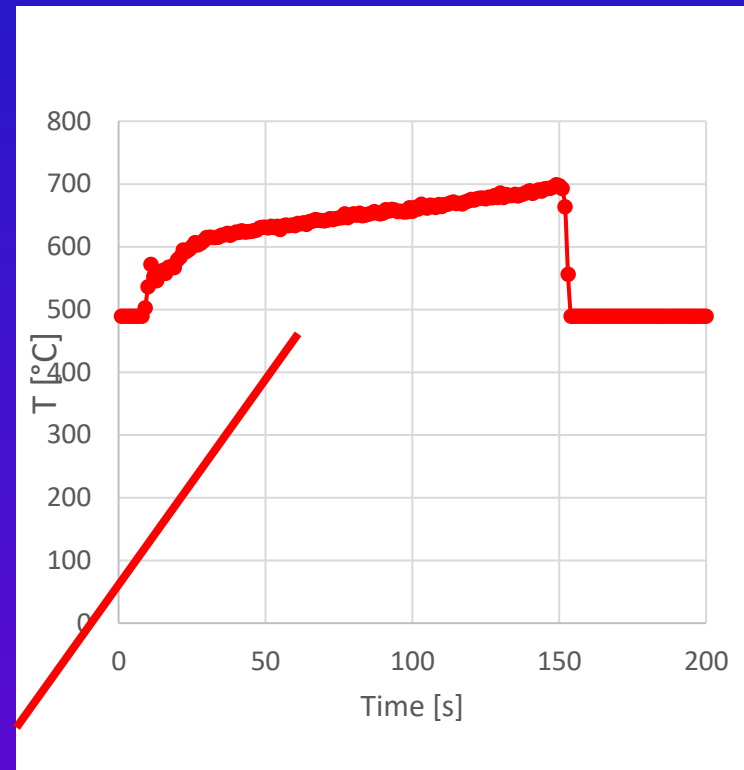
$n_1 = 700$  [1/min]  $V_{c1} = 50-396$   
[m/min],

$n_2 = 1400$  [1/min],  $V_{c2} = 132-792$   
[m/min]

Za sucha

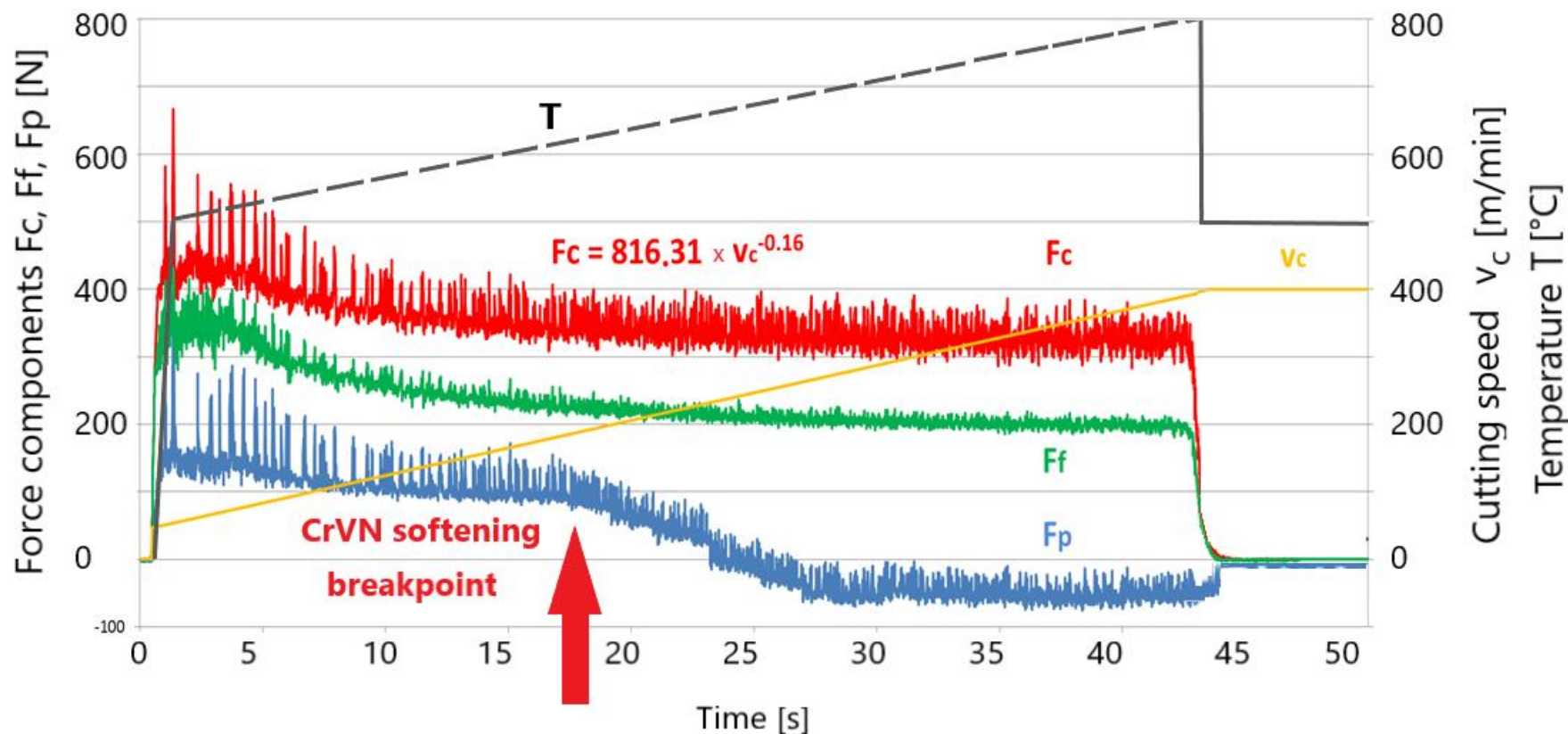


# Časová regrese řezné rychlosti a teploty



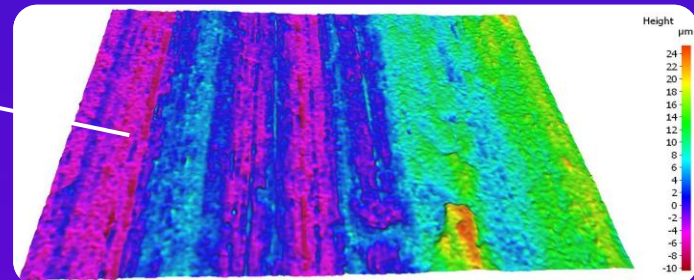
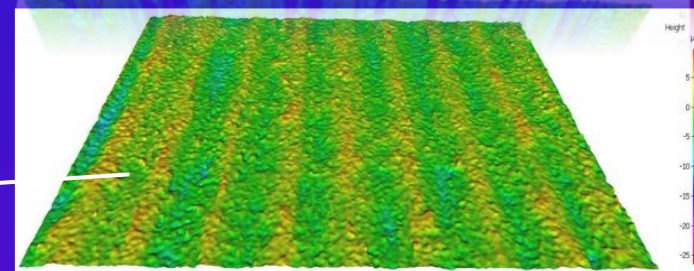
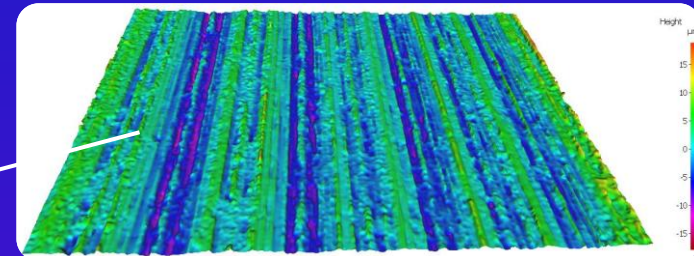
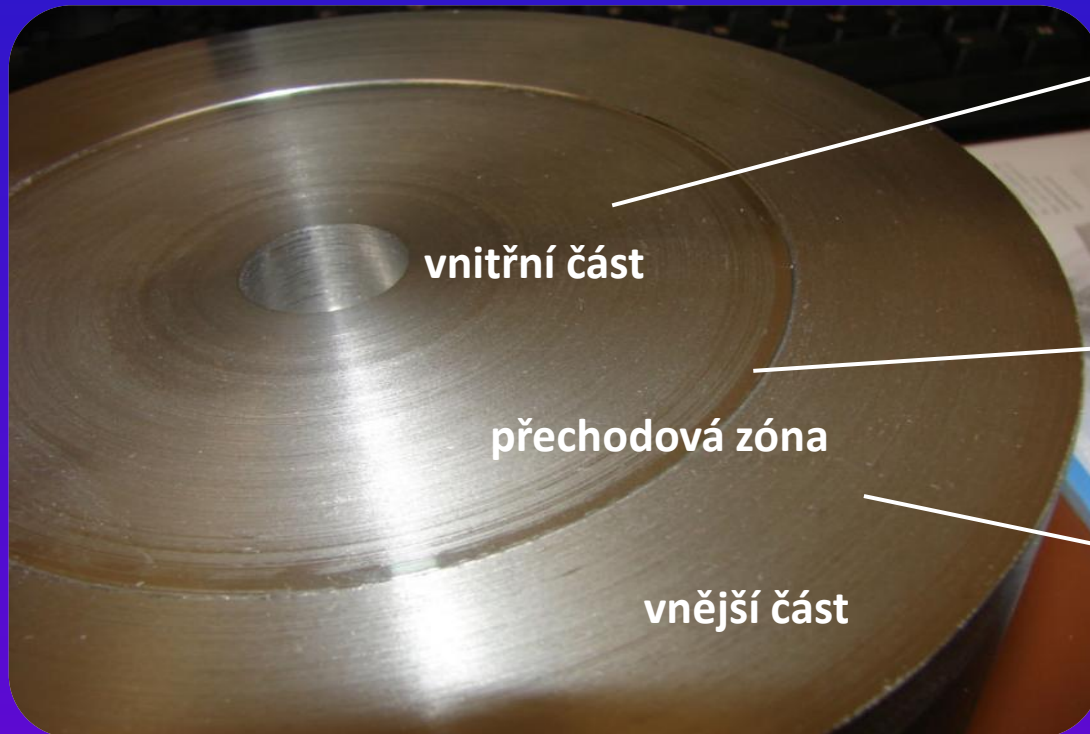
Nárůst řezné rychlosti a řezné teploty bez testovaných povlaků byl výrazně lineární. Teplota obrobku před testováním: 22-25°C

# Časová řada měřených sil vyvolaných řezným procesem mazáním



# Analýza kvality obrobeného povrchu

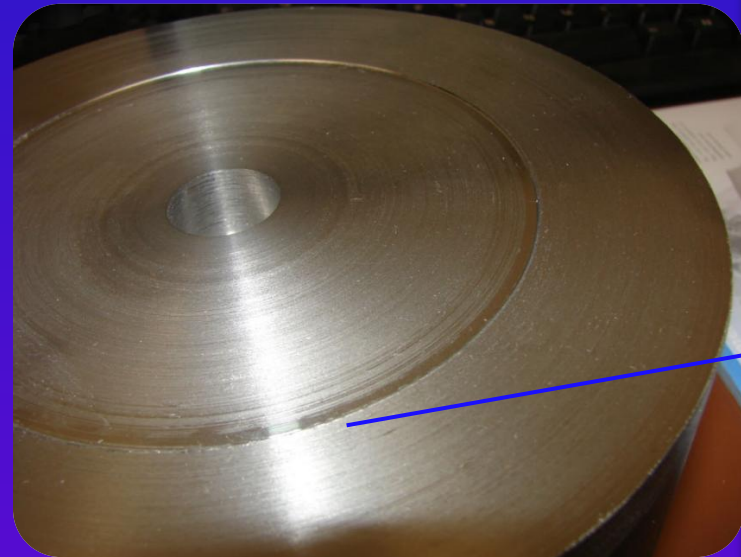
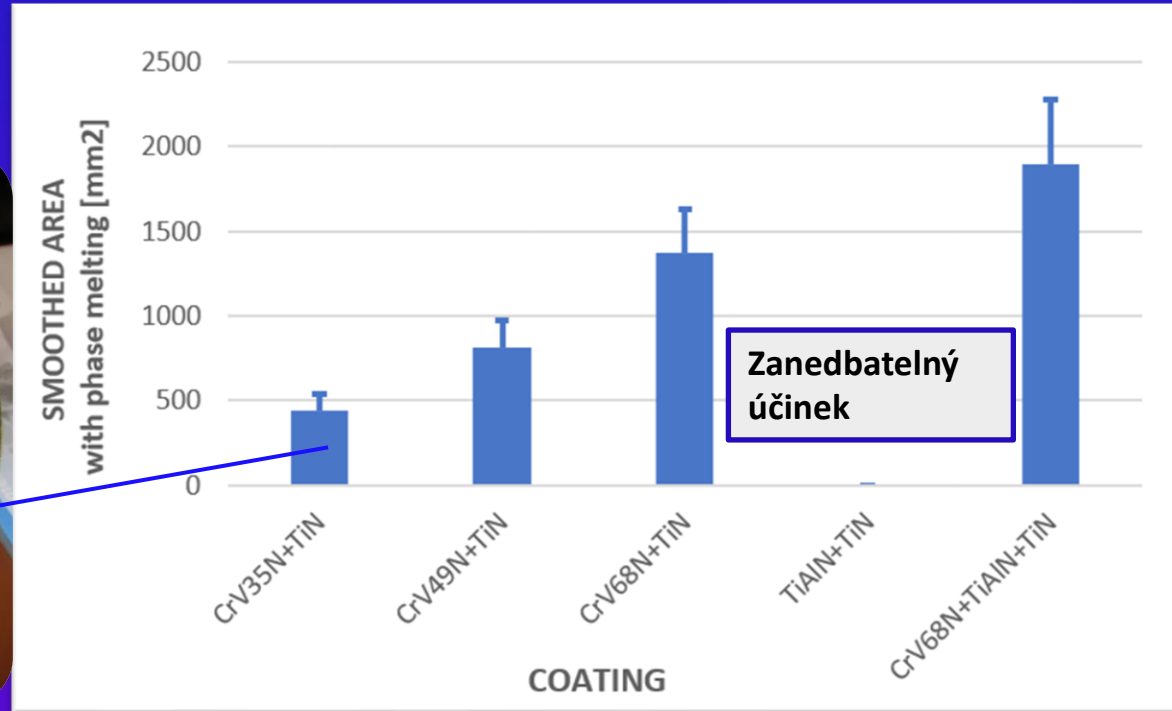
Alicona IF G5



## Průměrné hodnoty drsností povrchu

[illegible]

# Velikost lesklé plochy [mm<sup>2</sup>] pro různé PVD povlaky



## Spotřeba energie v řezném procesu

Celková práce pro operaci čelního soustružení při konstantní rychlosti otáčení - součet práce vykonané řeznou silou, posuvovou silou a elastickými deformacemi systému:

$$W = W_c + W_f + W_{el} = \int_0^t F_c(t) \cdot v_c(t) \cdot dt + \int_0^t F_f(t) \cdot v_f(t) \cdot dt + W_{el}$$

Výpočty pomocí numerických integrací ukazují, že poměr je přibližně:

$$W = W_c + W_f = 3.146 + 0.027 = 3.15 \text{ MJ})$$

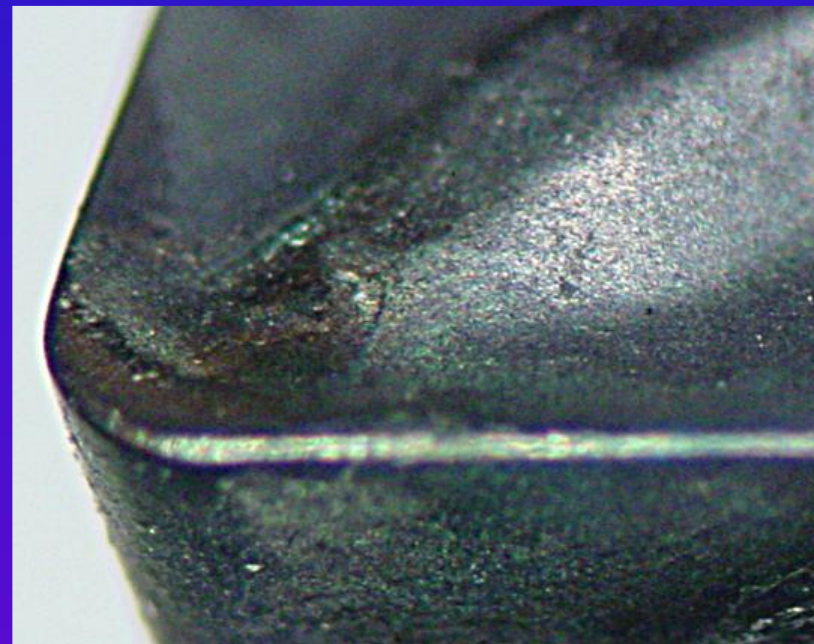
$$W = W_c + W_f + W_e = 99.970\% + 0.029\% + 0.001\%$$

Energetický účinek pasivní síly kvůli lepšímu tření v tvorbě třísky není významný, ale je rozhodující při uvolňování jader z formy.

# Analýza opotřebení nástrojů

Duplexní povlak

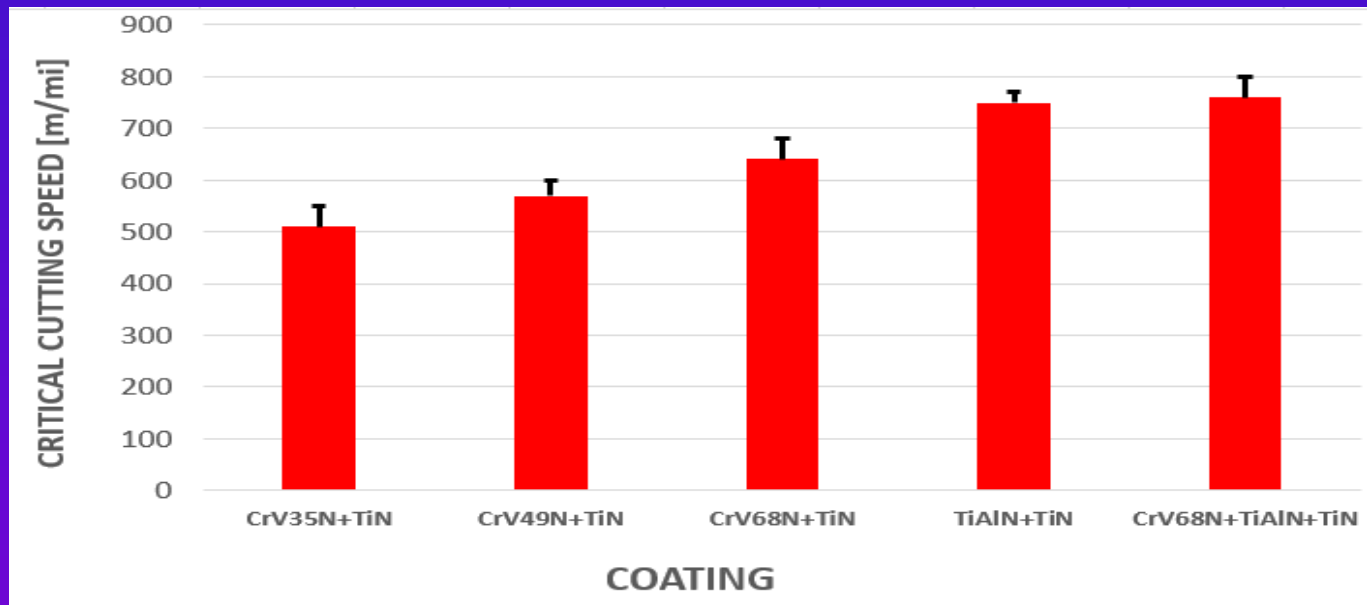
Triplexní povlak



ztuhlé kapky Magnéliho fází  $V_nO_{2n-1}$

Tab. 2 Průměrné výsledky kritické řezné rychlosti pro různé povlaky:

| POVLAK              | V<br>[at. %] | Tloušťka<br>[nm] | $v_{c \text{ krit}}$<br>[m/min] |
|---------------------|--------------|------------------|---------------------------------|
| 1. CrV35N+TiN       | 35           | 2400-2500        | 510-550                         |
| 2. CrV49N+TiN       | 49           | 2300-2400        | 570-600                         |
| 3. CrV68N+TiN       | 68           | 2800-2850        | 640-680                         |
| 4. TiAlN+TiN        | -            | 2500-2600        | 750-760                         |
| 5. CrV68N+TiAlN+TiN | 68           | 2900-3200        | 740-800                         |



# Závěry

- Bylo prokázáno, že při vysoké řezné rychlosti (teplotách) se povlak tavit, což zlepšilo mazání, protože měření pasivních sil přesně dokumentova
- Čím vyšší byl atomový obsah vanadu v CrAlVN, tím lepší byl mazací účinek při vysokých rychlostech/teplotách
- Pokles pasivních sil byl doprovázen zlepšením povrchové tribologie, nikoli však výrazným poklesem výkonu (úspora energie je zanedbatelná), zásadní je ochrana tlakové formy.
- Nejvyšší atomový obsah vanadu vedl k nejlepšímu řeznému výkonu s maximem 68 %
- Výsledky potvrdily vynikající výsledky pro triplexní povlak TiN + (Ti,Al)N + (Cr,V)N a stabilitu až  $v_c = 800$  m/min
- Tento povlak vykazoval nejvyšší odolnost vůči řezné rychlosti a nejlepší výkon na obrobené ploše, avšak pouze pro materiály s nízkými teplotami tavení (Zn, Al) pod 700°C
- Experimentální metoda se ukázala jako přijatelná a opakovatelná, odrážející náročné podmínky v praxi
- V současné době probíhá dlouhodobý test triplexového povlaku a jeho odolnosti přenosných dílů jádra forem pro použití při tlakovém lití slitiny Al-Si12 s uspokojivými předběžnými výsledky již několik měsíců (povlaky fungují i jako dobrý benchmark opotřebení nástroje)

# Reference

- [1] Magnéli A. Structures of the  $\text{ReO}_3$ -type with recurrent dislocations of atoms: 'Homologous series' of molybdenum and tungsten oxides. *Acta Crystallography*, 1953;6:495–500.
- [2] Gardos M. Magnéli phases of anion-deficient rutile as lubricious oxides. Part I. Tribological behavior of single-crystal and polycrystalline rutile ( $\text{TiO}_{2n-1}$ ). *Tribol Lett* 2000;8:65–78.
- [3] Gardos M. Magnéli phases of anion-deficient rutile as lubricious oxides. Part II. Tribological behavior of Cu-doped polycrystalline rutile ( $\text{TiO}_{2n-1}$ ). *Tribol Lett* 2000;8:79–96.
- [4] Ashby MF, Abulawi J, Kong HS. Temperature maps for frictional heating in dry sliding. *Tribol Trans* 1991;34:577–87
- [5] Suoxia Hou, Gao Hui, Xioaming Jia. Research of New Composite Solid Lubricating Coating. *Advanced Material Research*. ISSN: 1662-8985. 2013. Vol. 652-654. pp1719-1722.
- [6] K.D. Shang, S.X. Zheng, S.M. Ren, J.B. Pu, D.Q. He, S. Liu, Improving the tribological and corrosive properties of  $\text{MoS}_2$ -based coatings by dual-doping and multilayer construction, *Appl. Surf. Sci.* 437 (2018) 233–244.
- [7] J. Fortes Da Cruz, T. Da Silva Botelho, I. Lemaire-Caron, A.M. Durand, D. Messenger, Role of  $\text{WS}_2$  ,  $\text{WS}_2$  + CrC and bonded coatings on damage and friction of Inconel 718 flat rough surfaces at high temperature, *Tribol. Int.* 100 (2016) 430–440.
- [8] Erdemir A. Solid lubricants and self-lubricating films. In: Bhushan B, editor. *Modern tribology handbook*. Boca Raton: CRC Press; 2000. p. 787–818.
- [9] A. Erdemir, A crystal chemical approach to the formulation of self-lubricating nanocomposite coatings, *Surf. Coating. Technol.* 200 (5–6) (2005) 1792–1796.
- [10] Zhang Y-S, Hu L-T, Chen J-M, Liu W-M. Lubrication behavior of Y-TZP/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ / Mo nanocomposites at high temperature. *Wear* 2010;268:1091–4.

- [11] Fateh N, Fontalvo G, Gassner G, Mitterer C. The beneficial effect of high temperature oxidation on the tribological behaviour of V and VN coatings. *Tribol Lett* 2007;28:1–7.
- [12] L.Q. Kong, Q.L. Bi, S.Y. Zhu, Z.H. Qiao, J. Yang, W.M. Liu, Effect of CuO on self-lubricating properties of ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)-Mo composites at high temperatures, *J. Eur. Ceram. Soc.* 34 (5) (2014) 1289–1296.
- [13] S.M. Aouadi, H. Gao, A. Martini, T.W. Scharf, C. Muratore, Lubricious oxide coatings for extreme temperature applications: a review, *Surf. Coating. Technol.* 257 (2014) 266–277.
- [14] E.K. Hao, X.Q. Zhao, Y.L. An, W. Deng, H.D. Zhou, J.M. Chen, The effect of pre-oxidation on microstructure, mechanical properties and high-temperature tribological behaviors of HVOF-sprayed NiCoCrAlYTa coating, *Appl. Surf. Sci.* 489 (2019) 187–197.
- [15] Broniszewski K, Wozniak J, Czechowski K, Jaworska L, Olszyna A. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Mo cutting tools for machining hardened stainless steel. *Wear* 2013;303:87–91.
- [16] A. Erdemir, A crystal-chemical approach to lubrication by solid oxides, *Tribol. Lett.* 8 (2000) 97–102.
- [17] X.H. Lin, Y. Zeng, C.X. Ding, P.Y. Zhang, Effects of temperature on tribological properties of nanostructured and conventional Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3wt.% TiO<sub>2</sub> coatings, *Wear* 256 (11–12) (2004) 1018–1025.
- [18] Gulbiński W, Suszko T, Sienicki W, Warcholiński B. Tribological properties of silver- and copper-doped transition metal oxide coatings. *Wear* 2003;254:129–35.
- [19] Stone D, Liu J, Singh DP, Muratore C, Voevodin AA, Mishra S, et al. Layered atomic structures of double oxides for low shear strength at high temperatures. *Scr Mater* 2010;62:735–8.
- [20] Woydt M, Skopp A, Dörfel I, Witke K. Wear engineering oxides/anti-wear oxides. *Wear* 1998;218:84–95.



***Děkuji za pozvání a za pozornost!***