

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
Technická 2896/2, 616 69 Brno

---

**Prof.Ing.Milan Forejt, CSc.**  
**Doc.Ing.Anton Humár,CSc.**  
**Doc.Ing.Miroslav Píška, CSc.**  
**Dr.Ing.Libor Janíček**

## **EXPERIMENTÁLNÍ METODY**

HE1, HE1-K, (HE2)

### **SYLABUS**

pro magisterský studijní program 23-01-T Strojní inženýrství  
obor strojírenská technologie – obrábění – tváření, svařování - management,  
II.stupeň. 2.ročník magisterského studia



Brno, říjen 2003 (doplněno 2019)

## OBSAH

	<b>strana</b>
Osnova předmětu - výpis kurzu HE1 VUT v Brně - karta předmětu he1	3
1. Měření opotřebení řezného nástroje. <span style="float: right;">Doc.Ing. Anton Humár, CSc.</span>	5
2. Zpracování závislostí trvanlivost - řezná rychlost. <span style="float: right;">Doc.Ing. Anton Humár, CSc.</span>	13
3. Měření teploty řezného nástroje. <span style="float: right;">Doc.Ing. Anton Humár, CSc.</span>	19
4. Analýza řezných vlastností vrtáků z rychlořezné oceli s PVD povlaky. <span style="float: right;">Doc.Ing. Miroslav Píška, CSc.</span>	30
5. Analýza řezných vlastností hrubovacích fréz. <span style="float: right;">Doc.Ing. Miroslav Píška, CSc.</span>	39
5.a Určení krouticího momentu při řezání závitů maticovým závitníkem. <span style="float: right;">Doc.Ing. Miroslav Píška, CSc.</span>	43
6. Technologické zkoušky objemové tvařitelnosti. <span style="float: right;">Dr.Ing.Libor Janíček</span>	50
7. Zkoušky pro zjišťování koeficientu tření s vlivem maziv. <span style="float: right;">Dr.Ing.Libor Janíček</span>	58
8. Zjišťování rázových sil a napětí při Taylorově testu. <span style="float: right;">Prof.Ing.Milan Forejt, CSc.</span>	66
9. Provedení Taylorova testu a jeho vyhodnocení. <span style="float: right;">Prof.Ing.Milan Forejt, CSc.</span>	73
10. Zjišťování dynamických mechanických vlastností materiálů metodou Hopkinsonova testu . <span style="float: right;">Prof.Ing.Milan Forejt, CSc.</span>	79

## Osnova předmětu

viz též karta předmětu HE1

<https://www.vutbr.cz/teacher2/cs/predmet-zobrazeni-tisk/pdf-dokumentace/ID/197907>

Magisterský studijní program 23-01-T Strojní inženýrství  
obor strojírenská technologie –obrábění – tváření - svařování - management,  
II.stupeň. 2.ročník magisterského studia

Název předmětu:	<b>EXPERIMENTÁLNÍ METODY - he2</b> <b>Experimental methods</b>
Garant předmětu:	prof.Ing.Milan Forejt, CSc
Charakter předmětu:	<b>povinný předmět</b>
Rozsah:	<b>2 - 2</b> (dělení C2b), 6 kreditů <b>z, zk</b>

### Anotace předmětu, cíle

Předmět se zabývá základními metodami měření a vyhodnocování průvodních jevů obrábění a tváření. Předmět zahrnuje mechanické zkoušky, kvalitativní a kvantitativní hodnocení opotřebení, měření řezných sil a odporů, tvářecích a vyhazovacích sil, přetvárných odporů, rychlostí deformací, měření teplot a tepla, kmitání a to z hlediska jednotlivých metod obrábění, tváření a pracovních podmínek nástroje, (použití dynamometrů, kalorimetrů, různých snímačů a přístrojů na zpracovávání signálů. Dále se zabývá využitím světelných a elektronových mikroskopických metod vyhodnocování morfologie povrchů nástroje a obrobků.

#### Experimental methods

The subject deals with the basic methods of measuring and evaluating attendant phenomena in machining and metal-forming. They include mechanical testing, qualitative and quantitative evaluation of wear, measuring of cutting forces and resistance, metal-forming and ejecting forces, resistance to plastic strain, strain rates, temperature & heat, and oscillation. The evaluation is dealt with from the viewpoint of the individual methods of machining and metal-forming and the operating conditions of the tool. Also discussed is the application of the methods of light and electron microscopy when assessing the morphology of the surface of tools and workpieces.

Cílem předmětu je seznámit studenty se specializovanými experimentálními metodami, které jsou nutné pro posuzování funkčních vlastností řezných a tvářecích nástrojů, obrobitelnosti a tvařitelnosti materiálů ve výrobní a výzkumné oblasti. Dále zdůraznit význam a použití technických měření a zkoušek pro rozvoj oborů technologie obrábění a tváření.

Absolvent předmětu je schopen podílet se tvůrčím způsobem na provádění a vyhodnocování potřebných experimentů v technologických procesech obrábění a tváření. Získá přehled o potřebných měřicích metodách a měřicích zařízeních s automatizovanými výstupy a hodnocením pomocí výpočetní techniky.

Předmět zabezpečují: prof. Ing. Milan Forejt, CSc., Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D, Ing. Barbora Kudláčová

### Osnova předmětu ( rozsah a obsahové zaměření)

- 1.Opotřebení nástroje**, (kritéria, měřicí metody a zařízení, zpracování naměřených hodnot).
- 2.Teplo a teplota** (měřicí metody, snímače, přístroje, zpracování naměřených hodnot).
- 3.Řezné síly a odpory** (dynamometry, snímání a vyhodnocování veličin, zpracování naměřených hodnot).
- 4.Kmitání** (principy, experimentální zařízení, snímače, přístroje pro zpracování signálů).
- 5.Mikroskopické metody** (analýza morfologie povrchu nástroje a obrobku na elektronovém řádkovacím mikroskopu).
- 6. Hodnocení vlastností materiálů pro řezné nástroje.**
- 7. Komplexní hodnocení vlastností řezných nástrojů.**

- 8. Experimentální technologické zkoušky objemové tvařitelnosti.
- 9. Zkoušky pro zjišťování koeficientu tření a vlivu maziv ve tváření.
- 10. Experimentální zjišťování nerovnoměrností deformace.
- 11. Měření tvářecích a vyhazovacích sil, zjišťování napjatosti.
- 12. Zjišťování přetvárných odporů za vyšších rychlostí deformací.
- 13. Zjišťování dynamických mechanických vlastností materiálů.

Laboratorní cvičení:

1. Měření opotřebení nástroje v průběhu funkce a vyhodnocení hodnot.
2. Zpracování závislostí trvanlivost-řezná rychlost z hodnot opotřebení.
3. Analýza řezných vlastností vrtáků (z RO s PVD povlaky).
4. Analýza řezných vlastností fréz.
5. Měření krouticího momentu při řezání závitu maticovým závitníkem.
6. Analýza energetických a tepelných jevů při broušení.
7. Analýza vlastností řezných kapalin.
8. Komplexní přechovací zkouška a vyhodnocení přetvárných odporů, přetvárné práce a rychlostí deformace.
9. Zjišťování průběhu součinitele tření během tvářecího procesu.
10. Zjišťování rázových sil a napětí při Taylorovu testu.
11. Provedení Taylorova testu na pneumatickém kanónu a jeho vyhodnocení.
12. Zjišťování dynamických mechanických vlastností materiálů metodou Hopkinsonova testu.

Literatura, na níž je předmět vystavěn:

- [1.] FOREJT, Milan, HUMÁR, Anton, PÍŠKA, Miroslav a Libor JANÍČEK. *Experimentální metody*. [online]. Studijní opory pro magisterský studijní program 23-01-TStrojní inženýrství, obor strojírenská technologie - obrábění - tváření, svařování - management, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003 -doplněna 2019. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tváření/opory-save/Experimentální\\_metody\\_he1.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tváření/opory-save/Experimentální_metody_he1.pdf)
- [2] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9. ( dotisk 2008, 2012, 2015, 2018)
- [3] *ASM handbook*. Vol 8. Mechanical Testing. Materials Park, Ohio: ASM International, 1985. 892 p. ISBN 0-87170-708-X.
- [4] MEYERS, Marc A. Dynamic behavior of materials. New York: Wiley, c1994. ISBN 0-471-58262-x.

Doporučená literatura

- [5] MELOUN, M., MILITKÝ, J. Statistické zpracování experimentálních dat. PLUS s.r.o. Praha, 1994. 839 s. ISBN 80-85297-56-6.
- [6] SMITH, G-T. Cutting Tool Technology - Industrial Handbook. Springer-Verlag London Limited. United Kingdom. 2008. 597 pp. ISBN 978-1-84800-204-3.
- [7] STAHL, J.-E. Metal Cutting Theories and Models. GB Seco Tools AB. 02858870 ST20126371. 2012. 580 pp. ISBN 978-91-673-1336-1.8.
- [8] MEYERS, Marc A. Dynamic behavior of materials. New York: John Wiley and Sons., c1994. 668 p. ISBN 0-471-58262-X

# 1. MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO NÁSTROJE

## 1.1. Fyzikální podstata opotřebení

Opotřebení je běžným důsledkem funkce všech strojních součástí, které jsou ve vzájemném kontaktu a relativním pohybu. Při obrábění dochází v důsledku řezného procesu k relativnímu pohybu nástroj-obrobek a nástroj-tříška, i ke kontaktu nástroje s obrobkem (na hlavním a vedlejším hřbetě a špičce nástroje) a odcházející třískou (na čele nástroje), což musí nutně vést k opotřebení nástroje.

Proces opotřebení nástroje je velmi složitý děj, který závisí na mnoha faktorech (fyzikální a zejména mechanické vlastnosti obráběného a nástrojového materiálu, druh obráběcí operace, geometrie nástroje, pracovní podmínky, řezné prostředí, atd.) a v jehož průběhu působí mnoho odlišných fyzikálně-chemických jevů (mechanizmů opotřebení). K základním mechanizmům opotřebení patří zejména:

- **abraze** (brusný ořev vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročástic uvolněných z nástroje),
- **adheze** (vznik a okamžité následné porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky, v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů),
- **difúze** (migrace atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak, a z ní vyplývající vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje),
- **oxidace** (vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí),
- **plastická deformace** (důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase), která se může ve svém nejnepríznivějším důsledku projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení,
- **křehký lom** (důsledek vysokého mechanického zatížení, např. přerušovaný řez, nehomogenity a vměstky v obráběném materiálu, atd.).

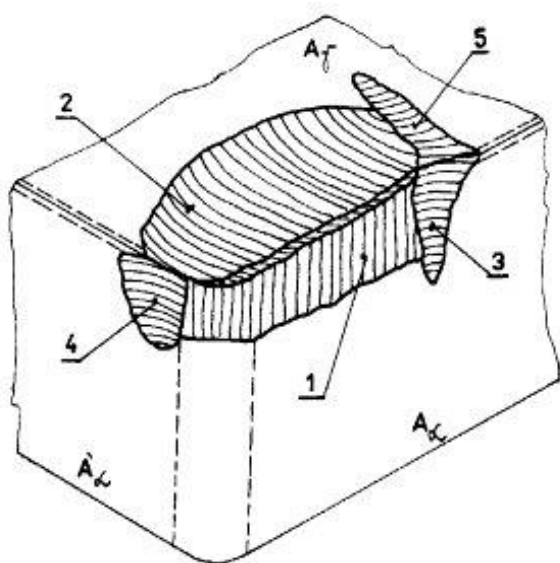
Abraze a adheze jsou též obvykle označovány jako fyzikální mechanismy opotřebení, difúze a oxidace jako chemické, všechny působí v průběhu času plynule, s tím, že časový okamžik začátku jejich působení nemusí být vždy shodný. Plastická deformace a křehký lom jsou naproti tomu mechanismy, které působí náhle, v daném okamžiku a obvykle způsobí okamžité ukončení činnosti nástroje (náhlá změna tvaru břitu nástroje, lavinové opotřebení nebo ulomení špičky). Hřbet nástroje se opotřebovává především v důsledku abraze a oxidace, čelo v důsledku adheze, difúze, abraze a oxidace. Na skutečnost, zda se nástroj bude více opotřebovávat na hřbetě nebo na čele (příp. na špičce), mají výrazný vliv i další faktory, jako je např. geometrie nástroje, druh operace (hrubování, dokončování) a v neposlední řadě i řezné podmínky (řezná rychlost, posuv, šířka záběru ostří, řezné prostředí).

První dva mechanismy opotřebení jsou též obvykle označovány jako fyzikální, druhé dva jako chemické, všechny čtyři působí v průběhu času plynule, s tím, že časový okamžik začátku jejich působení nemusí být vždy shodný. Plastická deformace a křehký lom jsou naproti tomu mechanismy, které působí náhle, v daném okamžiku a obvykle způsobí okamžité ukončení činnosti nástroje (náhlá změna tvaru břitu nástroje, lavinové opotřebení nebo ulomení špičky). Hřbet nástroje se opotřebovává především v důsledku abraze a oxidace, čelo v důsledku adheze, difúze,

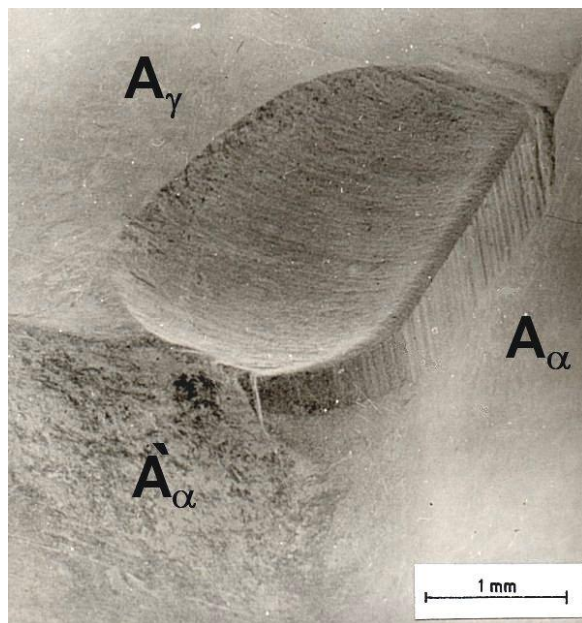
abraze a oxidace. Na skutečnost, zda se nástroj bude více opotřebovávat na hřbetě nebo na čele (příp. na špičce), mají výrazný vliv i další faktory, jako je např. geometrie nástroje, druh operace (hrubování, dokončování) a v neposlední řadě i řezné podmínky (řezná rychlost, posuv, hloubka řezu a chlazení).

## 1.2. Formy opotřebení

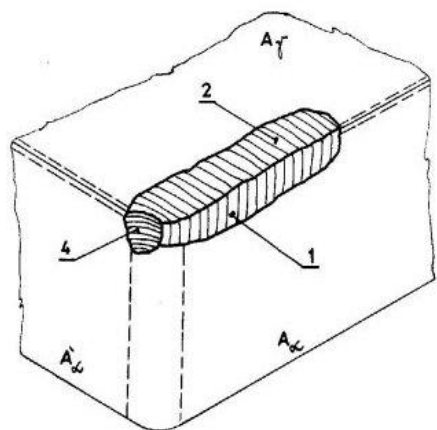
Vzhled břitu nástroje ze slinutého karbidu, se všemi typickými formami opotřebení, je uveden na obrázku číslo 1.1, vzhled břitu nástroje z řezné keramiky na obrázku číslo 1.3. Jednotlivé formy opotřebení jsou na obou obrázcích označeny následovně: 1 - fazetka opotřebení na hřbetě, 2 - výmol na čele, 3 - primární hřbetní rýha, 4 - sekundární (oxidační) hřbetní rýha, 5 - rýha na čele. Na obrázcích 1.2 a 1.4 jsou dokumentovány opotřebované plochy nástroje ze slinutého karbidu resp. řezné keramiky.



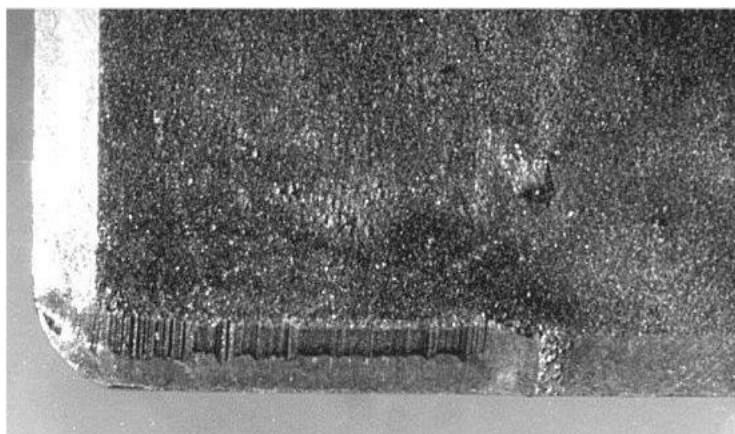
Obr.1.1 Formy opotřebení břitu nástroje z SK



Obr.1.2 Opotřebovaný břit nástroje z SK



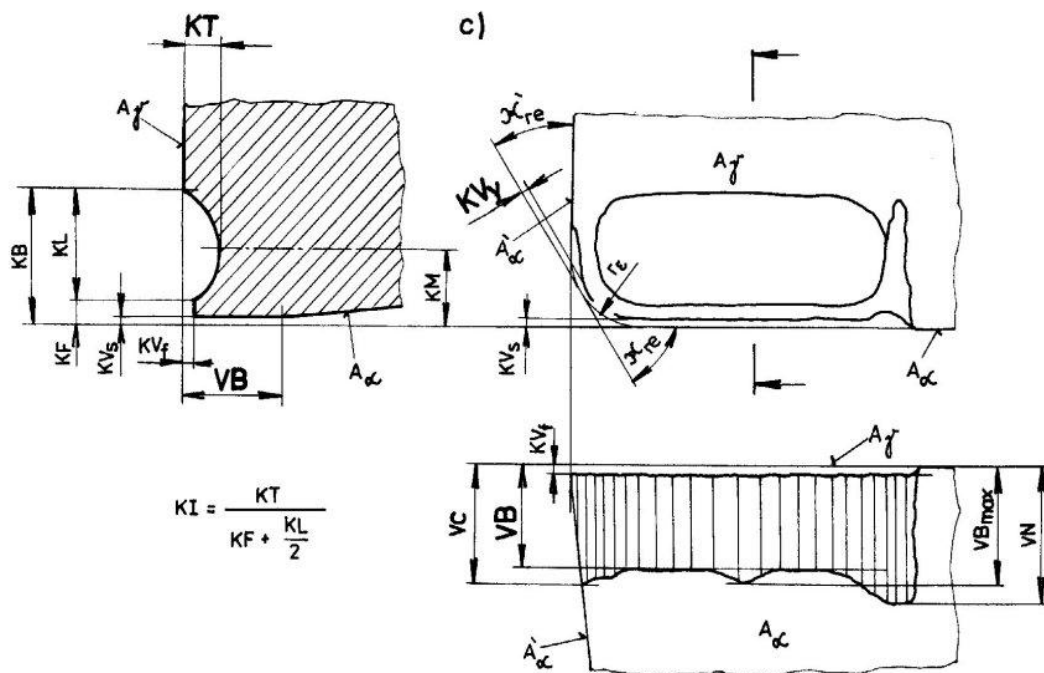
Obr.1.3 Formy opotřebení břitu nástroje z ŘK



Obr.1.4 Břítová destička z ŘK opotřebovaná na čele

### 1.3. Kritéria opotřebení

Kritéria, kterými je opotřebení kvantifikováno, jsou uvedena na obrázku č.1.5 (nejčastěji užívaná kritéria, **VB** - šířka řezky opotřebení na hřbetě, **KT** - hloubka výmolu na čele, **KV<sub>y</sub>** - radiální opotřebení špičky, jsou zvýrazněna většími písmeny). Kritérium **KV<sub>y</sub>** je významné zejména u dokončovacích operací, protože způsobuje změnu rozměru obrobenej plochy. Označování jednotlivých kritérií odpovídá místním zvyklostem, které se poněkud liší od normy ČSN ISO 3685, která označuje kritéria opotřebení na hřbetě **VB<sub>c</sub>** (**VC** na obrázku č.1.5), **VB<sub>B</sub>** (**VB**), **VB<sub>Bmax</sub>** (**VB<sub>max</sub>**) a **VB<sub>N</sub>** (**VN**).



Obr.1.5 Kritéria opotřebení řezného nástroje

### 1.4. Měření opotřebení

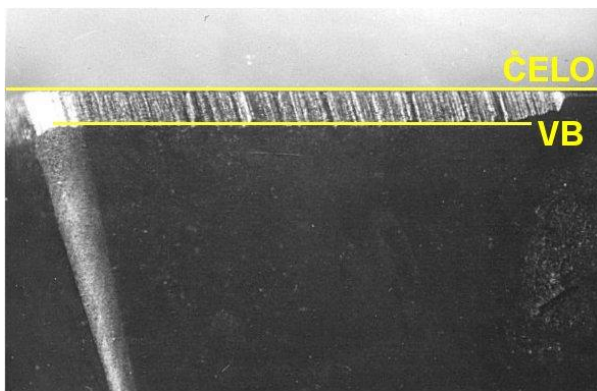
Klasifikace metod pro stanovení opotřebení řezného nástroje:

- **přímé metody:**

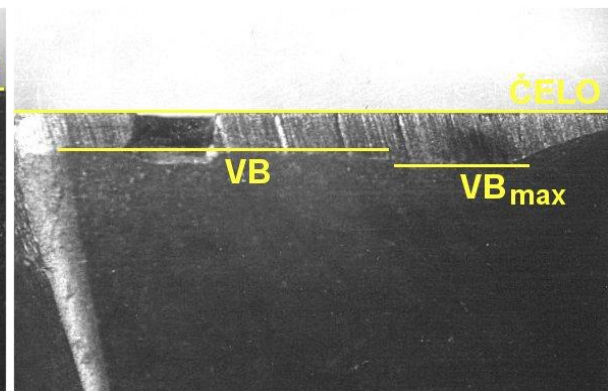
- \* měření vybraného kritéria opotřebení (**VB** - pomocí dílenského mikroskopu, **KT** - pomocí profiloměru, **KV<sub>y</sub>** - délkovým měřidlem); diskontinuální metoda - po přerušení nebo skončení činnosti nástroje,
- \* vážení břitové destičky (diskontinuální metoda),
- \* optické sledování funkční plochy (diskontinuální metoda),
- \* elektrické metody (kontinuální):
  - odporové (vyhodnocování změn odporu v místě kontaktu nástroje s obrobkem; sledování chování tenké vrstvy odporového materiálu, naneseného na hřbet nástroje; odporový snímač, který se opotřebovává zároveň s nástrojem),
  - indukční,
  - sledování vzájemné polohy nástroje a obrobku,



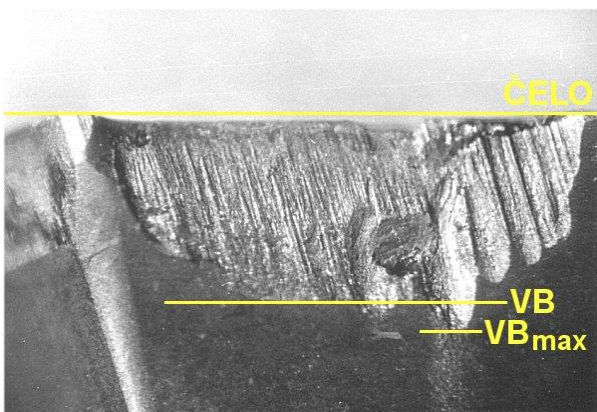
- \* *ultrazvukové metody* (kontinuální),
- \* *pneumatické metody* (kontinuální),
- \* *radioaktivní metody* (kontinuální):
  - ozářený nástroj,
  - mikroizotopový snímač,
- \* *měření rozměrů obrobku* (kontinuální),
- ***nepřímé metody*** (kontinuální):
  - \* *měření a vyhodnocování jednotlivých složek řezné síly*,
  - \* *měření a vyhodnocování elektrického příkonu obráběcího stroje*,
  - \* *měření kmitání* (amplituda kmitů, zrychlení, parametry akustické emise),
  - \* *měření teploty řezání*,
  - \* *měření struktury povrchu obrobené plochy* (parametry Ra, Ry, apod.),
  - \* *sledování druhotných projevů opotřebení* (subjektivní metody):
    - lesklé proužky na obrobené ploše,
    - charakteristický zvuk,
    - změna tvaru a barvy třísky.



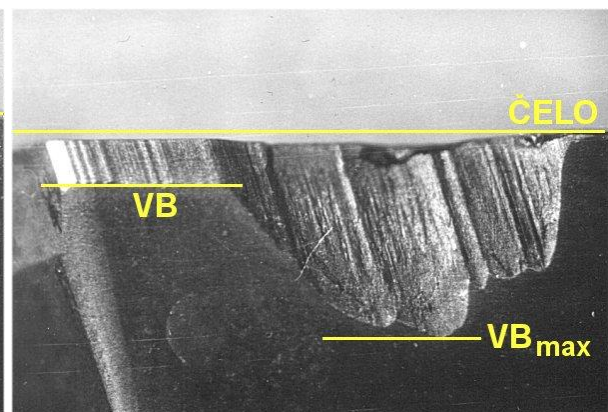
Obr.1.6 Pravidelná nízká hodnota VB



Obr.1.7 Poměrně pravidelná nízká hodnota VB, vylomené ostří

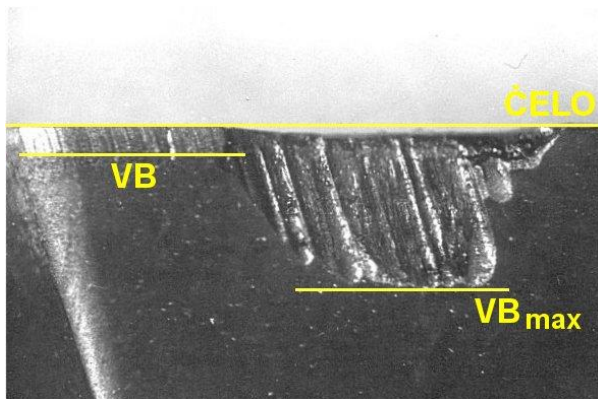


Obr.1.8 Pravidelná vysoká hodnota VB

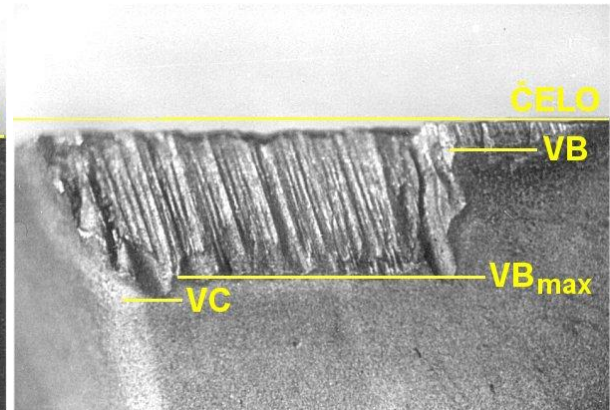


Obr.1.9 Nízká hodnota VB kombinovaná s vysokou hodnotou VB<sub>max</sub>

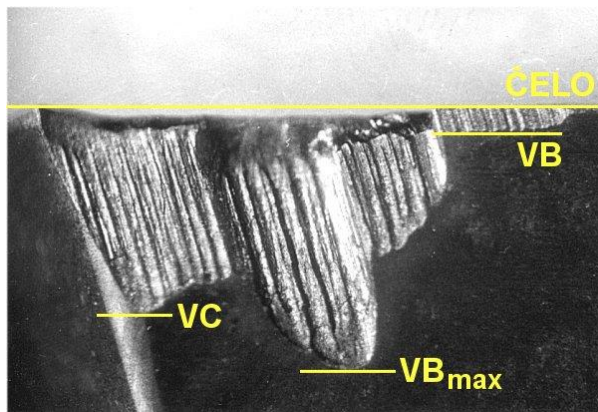




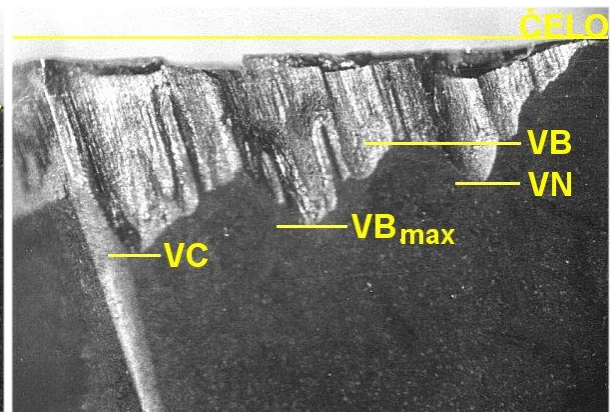
Obr.1.10 Nízká hodnota VB kombinovaná s vysokou hodnotou  $VB_{max}$



Obr.1.11 Převládající hodnota  $VB_{max}$



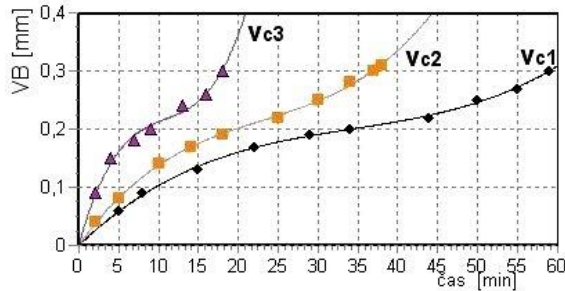
Obr.1.12 Převládající hodnoty VC a  $VB_{max}$



Obr.1.13 Převládající hodnoty VC, VN a  $VB_{max}$

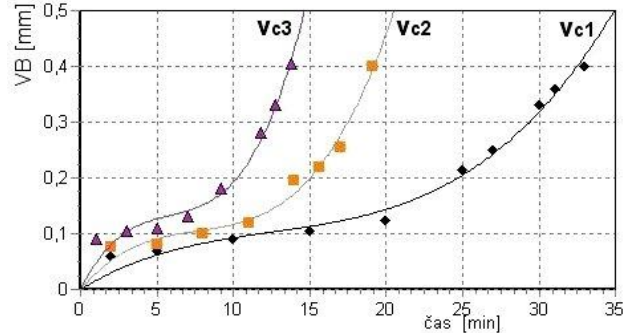
V praxi jsou pro měření opotřebení nástroje nejčastěji používány metody přímého měření základních kritérií opotřebení, zejména **VB** a **KT**. Hodnoty **VB** jsou měřeny pomocí malého dílenského mikroskopu tak, že se nitkový kříž nastaví do základní polohy, na čáru představující čelo nástroje, a poté se přesune do polohy, kde se kryje s měřeným kritériem opotřebení (ukázky jsou uvedeny na obrázcích číslo 1.6 až 1.13). Naměřené hodnoty jsou vynášeny do závislosti  $VB=f(\text{čas})$  - viz obrázky č.1.14 a 1.15.

**Soustružení**  
**Obráběný materiál:** ložisková ocel  
 14 209  
**Nástroj:** CSSNR 2525 L12  
**Břit. destička:** SNGA 120808 TN 03020  
 keramika DISAL 100  
 $a_p = 1,0$  mm,  $f = 0,075$  mm  
 $v_{c1} = 53$ ,  $v_{c2} = 82$ ,  $v_{c3} = 117$  m/min



Obr.1.14 Časový průběh křivek opotřebení při obrábění ložiskové oceli

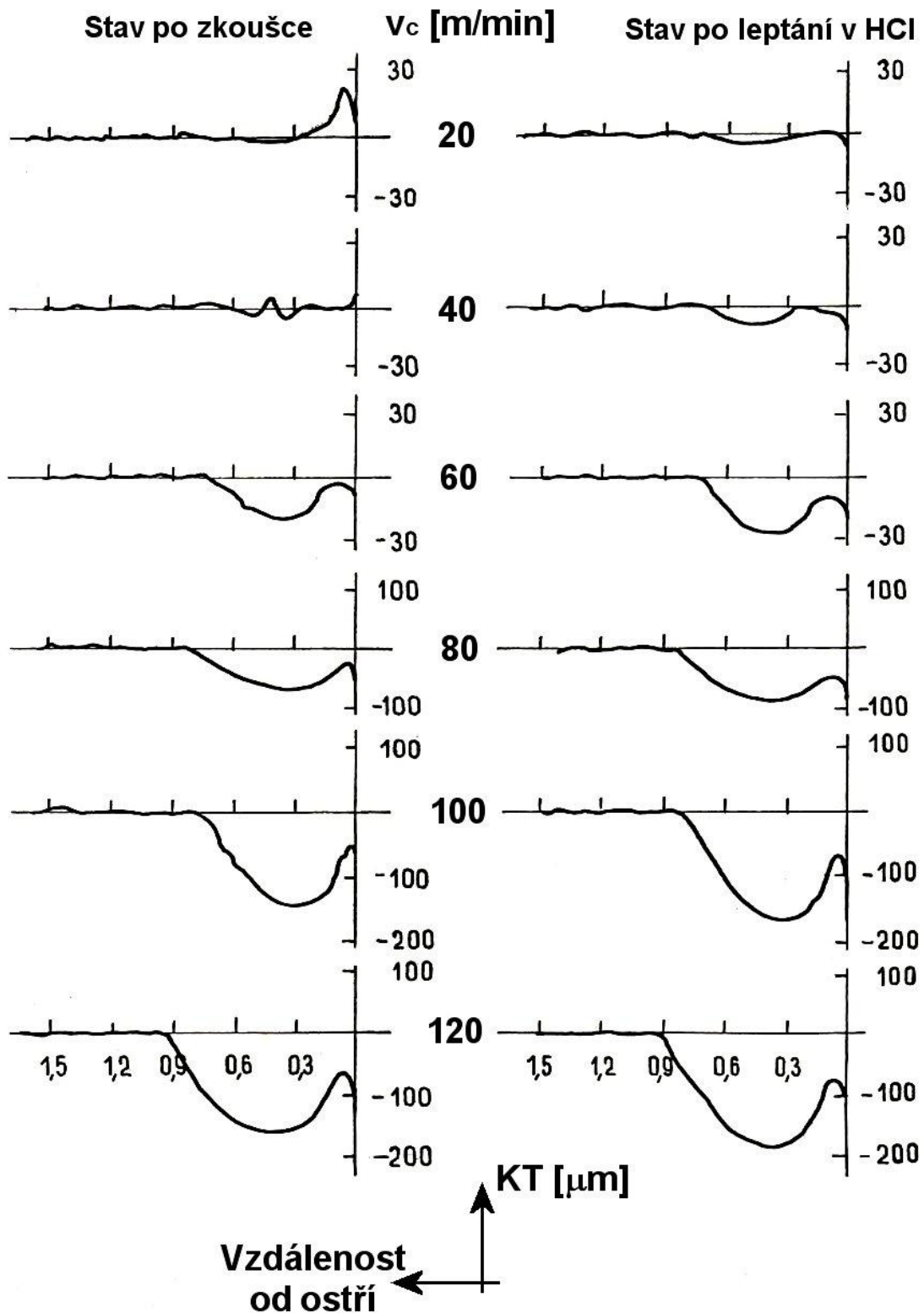
**Soustružení**  
**Obráběný materiál:** ocel 12 050.1  
**Nástroj:** PSBNR 2525 M12  
**Břit. destička:** SNUN 120408  
 Sumitomo AC10  
 $a_p = 2,0$  mm,  $f = 0,22$  mm  
 $v_{c1} = 250$ ,  $v_{c2} = 280$ ,  $v_{c3} = 320$  m/min



Obr.1.15 Časový průběh křivek opotřebení při obrábění oceli 12 050.1

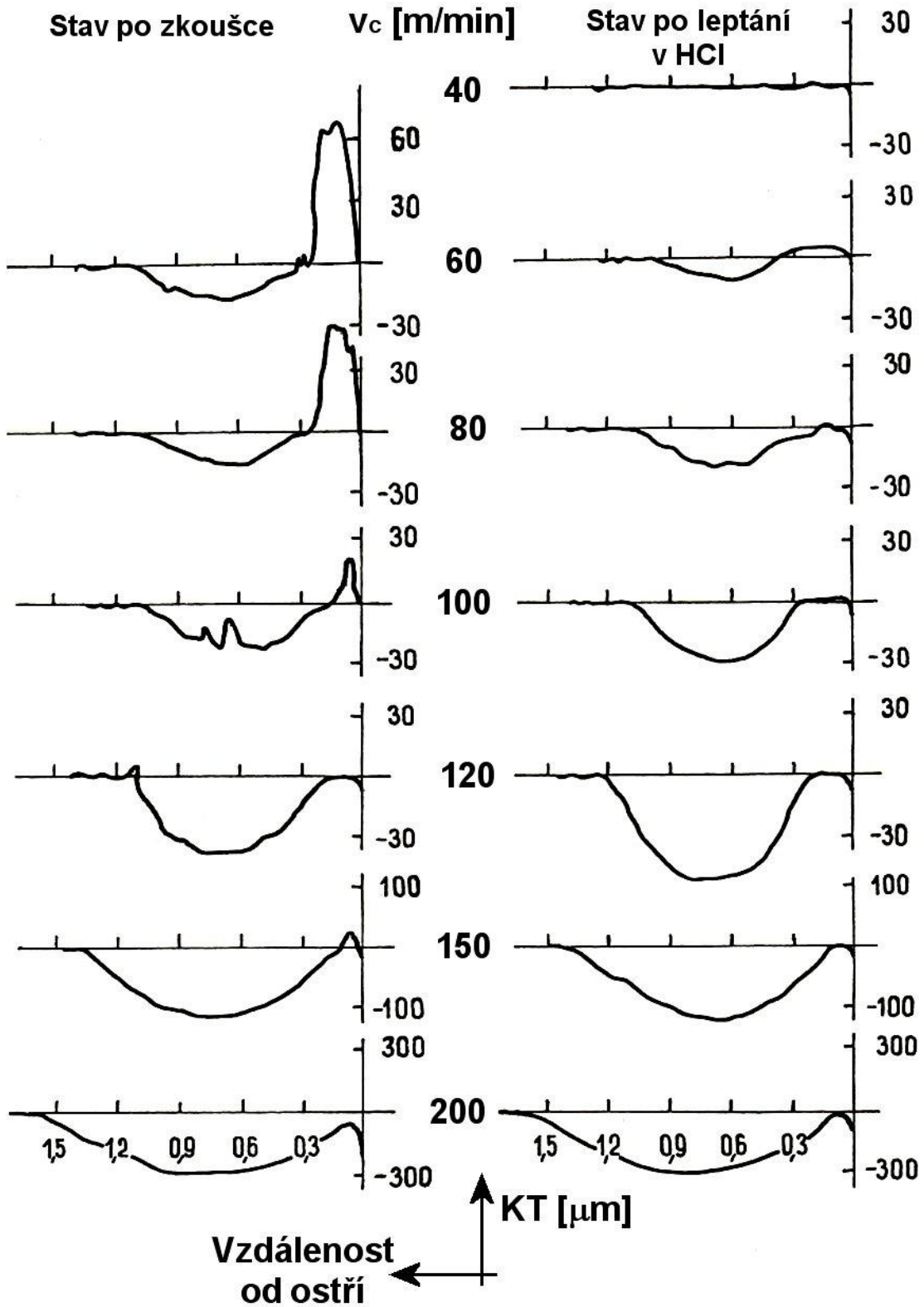
Ukázky záznamů měření hodnot **KT** pomocí profiloměru Hommel-Tester-T (přístroj na měření parametrů struktury povrchu) jsou uvedeny na obrázcích č.1.16 a 1.17. Na obrázku č.1.16 je zaznamenána hloubka výmolu na břitových destičkách ze slinutého karbidu K10 po soustružení vysocepevné oceli (mez pevnosti v tahu  $R_m=1480$  MPa, mez kluzu  $R_{p0,2}=1300$  MPa, vrubová houževnatost  $KCU_3= 23$  J cm<sup>-2</sup>) řeznými rychlostmi  $v_c=20\div 120$  m min<sup>-1</sup> (šířka záběru ostří  $a_p=1,5$  mm, posuv na otáčku  $f=0,156$  mm, doba obrábění  $T=5$  min). Záznamy byly snímány přibližně uprostřed délky výmolu, ve stavu po zkoušce a na stejném místě destičky ve stavu po odleptání nárůstku v kyselině chlorovodíkové.

Na obrázku č.1.17 je zaznamenána hloubka výmolu na břitových destičkách ze slinutého karbidu K10 po soustružení oceli 12 050.1 řeznými rychlostmi  $v_c=40\div 200$  m min<sup>-1</sup> (šířka záběru ostří  $a_p=1,5$  mm, posuv na otáčku  $f=0,156$  mm, doba obrábění  $T=5$  min). Záznamy byly opět snímány přibližně uprostřed délky výmolu, ve stavu po zkoušce a na stejném místě destičky ve stavu po odleptání nárůstku v kyselině chlorovodíkové.



Obr.1.16 Hloubka výmolu na čele destiček po soustružení vysocepevné oceli

Výsledky měření hloubky výmolu na obrázcích č.1.16 a 1.17 jednoznačně potvrzují známou skutečnost, že slinutý karbid K10 není vhodný pro obrábění ocelí. Je z nich též zřejmé, že intenzita opotřebení se zvyšuje s narůstající řeznou rychlostí a je znatelně vyšší při obrábění vysocepevné oceli.



Obr.1.16 Hloubka v ýmolu na čele destiček po soustružení oceli 12 050.1

## 2. ZPRACOVÁNÍ ZÁVISLOSTÍ TRVANLIVOST - ŘEZNÁ RYCHLOST

Z hodnot řezných rychlostí  $v_{ci}$  až  $v_{c5}$  a jim odpovídajících trvanlivostí  $T_1$  až  $T_5$  uvedených v tabulce č.2.1 zpracujte průběhy  $T-v_c$  závislostí. Vyhodnocení proveďte:

- graficky,
- graficko - analyticky,
- pomocí zjednodušené lineární regresní analýzy s využitím metody nejmenších čtverců,
- libovolným způsobem s využitím osobního počítače.

Tab.2.1 Zadané hodnoty

Číslo zadání	Hodnoty $v_{ci}$ [ $m \cdot min^{-1}$ ], hodnoty trvanlivosti $T$ [min]									
	i = 1		i = 2		i = 3		i = 4		i = 5	
	$v_{ci}$	$T_i$	$v_{ci}$	$T_i$	$v_{ci}$	$T_i$	$v_{ci}$	$T_i$	$v_{ci}$	$T_i$
1	145	80	175	30	220	10	255	5,0	305	2
2	150	78	175	28	220	90	260	4,5	300	2
3	155	76	175	26	220	8	255	5,0	310	2
4	160	74	175	24	210	10	260	4,5	305	2
5	140	82	180	30	210	90	270	5,0	300	2
6	145	80	180	28	210	8	255	4,5	310	2
7	150	78	180	26	200	10	260	5,0	295	2
8	155	76	180	24	200	90	260	4,5	295	2
9	160	74	180	30	200	8	250	5,0	295	2,5
10	140	82	180	28	220	10	255	4,5	300	2,5
11	145	80	185	26	220	90	275	5,0	300	2,5
12	150	78	185	24	220	8	260	4,5	300	2,5
13	155	76	185	30	210	10	270	5,0	310	2,5
14	160	74	185	28	210	90	260	4,5	305	2,5
15	140	82	185	26	210	8	255	5,0	295	2,5
16	145	80	190	24	200	10	250	4,5	305	2,5
17	150	78	190	30	200	90	260	5,0	300	3
18	155	76	190	28	200	8	270	4,5	310	3
19	160	74	190	26	220	10	275	5,0	295	3
20	140	82	190	24	220	90	260	4,5	300	3
21	145	80	170	30	220	8	255	5,0	300	3
22	150	78	170	28	210	10	270	4,5	310	3
23	155	76	170	26	210	90	250	5,0	305	3
24	160	74	170	24	210	8	275	4,5	300	3
25	140	82	170	30	200	10	260	5,0	295	3



### Vypracování a)

Základní  $T$ - $v_c$  závislost je vyjádřena vztahem

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad [\text{min}], \quad (2.1)$$

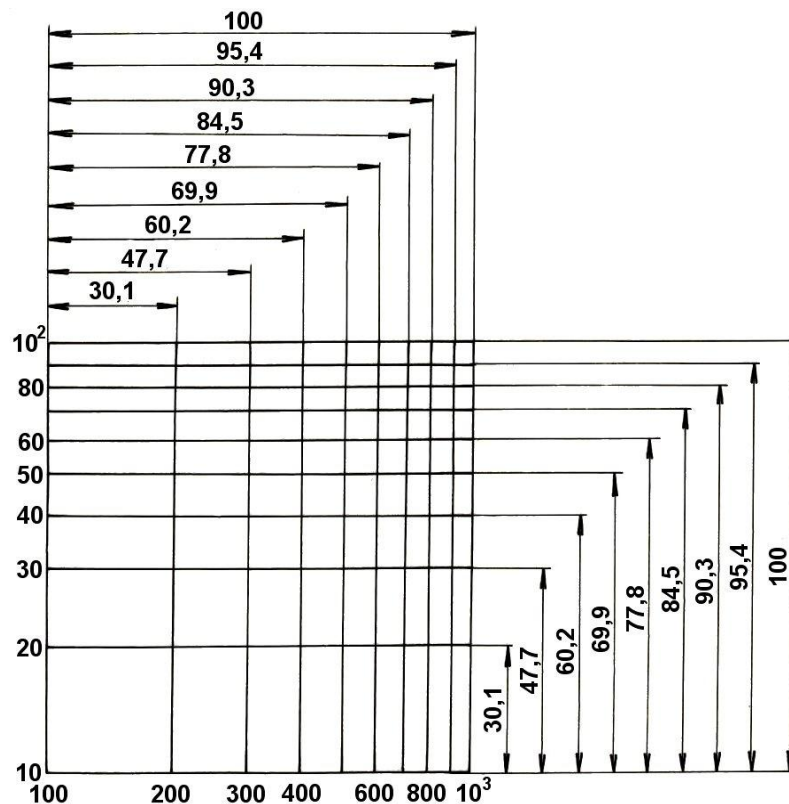
kde:  $C_T$  [-] - konstanta,  $m = \text{tg } \alpha$  [-] - exponent,  
 $v_c$  [ $\text{m min}^{-1}$ ] - řezná rychlost,

nebo vzhledem k velmi vysoké a nepraktické hodnotě konstanty  $C_T$  (řádově  $10^9 \div 10^{13}$ ) častěji ve tvaru

$$v_c = \frac{C_v}{T^{1/m}} \quad [\text{m min}^{-1}], \quad (2.2)$$

kde:  $C_v$  [-] - konstanta (protože  $C_v = C_T^{1/m}$ , je řádová velikost konstanty  $C_v$  pouze  $10^2 \div 10^3$ ).

Pro grafické zpracování  $T$ - $v_c$  závislosti je třeba, na milimetrovém papíru a v logaritmických souřadnicích, vytvořit osy pro trvanlivost (svislá osa, rozsah hodnot  $T=1 \div 100$  minut, tedy dvě dekády) a řeznou rychlost (vodorovná osa,  $v_c=100 \div 1000$   $\text{m min}^{-1}$ , jedna dekáda). Příklad vytvoření stupnic jedné dekády velikosti  $100 \times 100$  mm (rozsah  $T=10 \div 100$  minut,  $v_c=100 \div 1000$   $\text{m min}^{-1}$ ) je uveden na obrázku číslo 2.1.



Obr.2.1

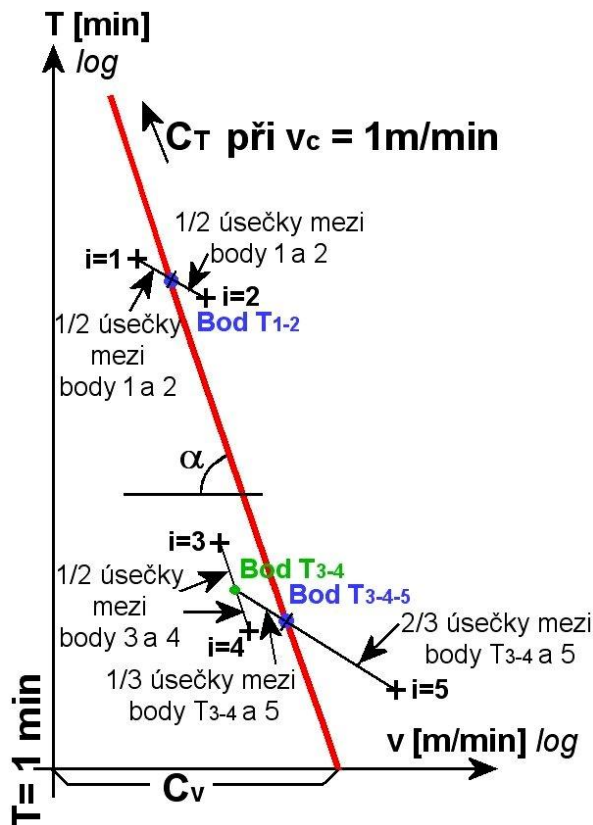
Do připraveného diagramu jsou postupně vynášeny jednotlivé body o souřadnicích  $T_1$ - $v_{c1}$  až  $T_5$ - $v_{c5}$  (na obrázku č.2.2 označeny  $i=1$  až  $i=5$ ). Protože závislost  $T$ - $v_c$  je v logaritmických souřadnicích vyjádřena přímkou, je třeba z pěti vynesných bodů vytvořit dvě těžiště, aby proložení přímky zadanými body bylo zcela jednoznačné a v rámci použité grafické metody co nejpřesnější.



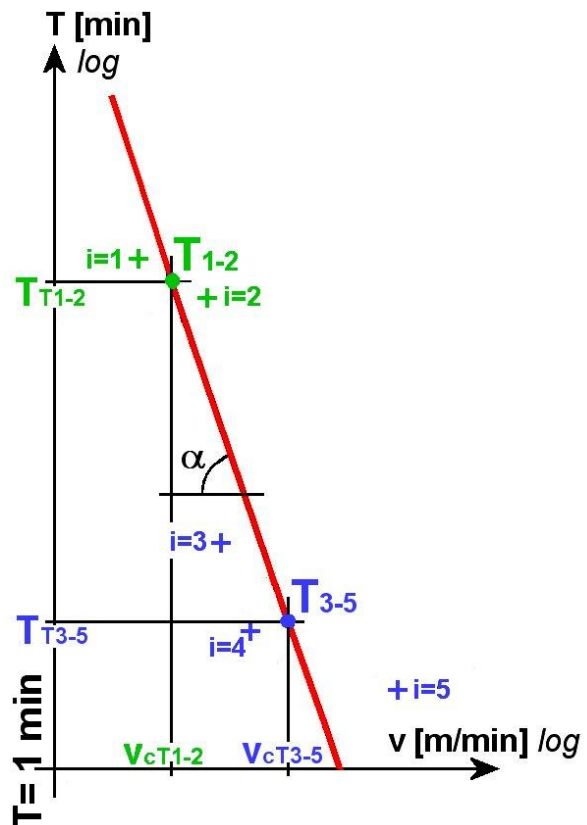
Těžiště jsou v daném případě vytvořena z bodů **1 a 2** (těžiště  $T_{1,2}$ ) a z bodů **3-5** (těžiště  $T_{3,4,5}$ ) následujícím postupem:

- těžiště  $T_{1,2}$  leží uprostřed spojnice bodů **1 a 2**,
- spojením bodů **3 a 4** a rozpůlením vytvořené spojnice se získá bod  $T_{3,4}$ , který se spojí s posledním zadaným bodem **5**; spojnice bodů  $T_{3,4}$  a **5** se rozdělí na třetiny a druhé těžiště pro proložení  $T-v_c$  závislosti ( $T_{3,4,5}$ ) leží na této spojnici ve vzdálenosti  $2/3$  její délky od bodu **5**.

Hodnota exponentu  $m$  se stanoví jako tangenta úhlu  $\alpha$ , hodnota konstanty  $C_v$  se odečítá na ose řezné rychlosti tam, kde vytvořená přímka  $T-v_c$  tuto osu protíná (je to hodnota řezné rychlosti pro trvanlivost  $T=1$  min). Hodnotu konstanty  $C_T$  nelze z grafického zpracování odečítat a proto se vypočítá z již stanovených hodnot  $C_v$  a  $m$ :  $C_T=C_v^m$ .



Obr.2.2



Obr.2.3

### Vypracování b)

U této metody se poloha dvou těžišť ( $T_{1,2}$  a  $T_{3,5}$  - obr.2.3), vytvořených pro jednoznačné grafické proložení  $T-v_c$  závislosti pěti zadanými body stanoví výpočtem

$$\log T_{T1-2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \log T_i, \quad (2.3)$$

$$\log v_{c_{T1-2}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \log v_{ci}, \quad (2.4)$$

$$\log T_{T3-5} = \frac{1}{3} \sum_{i=3}^5 \log T_i, \quad (2.5)$$

$$\log v_{c_{T3-5}} = \frac{1}{3} \sum_{i=3}^5 \log v_{ci}. \quad (2.6)$$

Hodnota exponentu  $m$  se vypočítá podle vztahu

$$m = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\log T_{T1-2} - \log T_{T3-5}}{\log v_{c_{T3-5}} - \log v_{c_{T1-2}}}. \quad (2.7)$$

Zlogaritmováním vztahu (2.1) a následnou úpravou se vytvoří vztah pro výpočet hodnoty konstanty  $C_T$

$$\log T = \log C_T - m \cdot \log v_c \Rightarrow \log C_T = \log T + m \cdot \log v_c, \quad (2.8)$$

$$\log C_T = \log T_{T1-2} + m \cdot \log v_{c_{T1-2}} = \log T_{T3-5} + m \cdot \log v_{c_{T3-5}}, \quad (2.9)$$

$$C_T = \exp(\log C_T). \quad (2.10)$$

Zlogaritmováním vztahu (2.2) a následnou úpravou se vytvoří vztah pro výpočet hodnoty konstanty  $C_v$

$$\log v_c = \log C_v - \frac{1}{m} \cdot \log T \Rightarrow \log C_v = \log v_c + \frac{1}{m} \cdot \log T, \quad (2.11)$$

$$\log C_v = \log v_{c_{T1-2}} + \frac{1}{m} \cdot \log T_{T1-2} = \log v_{c_{T3-5}} + \frac{1}{m} \cdot \log T_{T3-5}, \quad (2.12)$$

$$C_v = \exp(\log C_v). \quad (2.13)$$

### Vypracování c)

Pro soubor náhodných veličin  $v_{ci}$  a  $T_i$ , prezentovaných body  $P_i$  se v logaritmických souřadnicích  $\log v_c$  a  $\log T$  (obr.2.4) určí poloha těžiště (bod  $T$ ) podle vztahů

$$\log v_{cT} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log v_{ci}, \quad (2.14)$$

$$\log T_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log T_i, \quad (2.15)$$

kde:  $n$  [-] - počet dvojic náhodných veličin (počet bodů  $P_i$ ).

V bodě  $T$  se zavede pomocný souřadnicový systém  $\log \xi$  a  $\log \eta$  a určí odpovídající souřadnice bodu  $P_i$ ,  $\log \xi_i$  a  $\log \eta_i$ . Po přenesení bodu  $P_i$  do bodu  $P_{iy}$ , který leží na výsledné přímce  $T$ - $v_c$  závislosti, lze určit souřadnice  $\log \xi_{iy} = \log \xi_i$  a  $\log \eta_{iy}$ , hodnota  $\Delta \log \eta_i$  bude považována za odchylku bodu  $P_i$  od výsledné přímky a určí se podle vztahu

$$\Delta \log \eta_i = \log \eta_i - \log \eta_{iy}. \quad (2.16)$$

Podle obrázku č.2.4 dále pro směrnici výsledné přímky platí

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\log \eta_{iy}}{\log \xi_i} = b \quad (2.17)$$



$$\mathbf{b} = \frac{\sum_{i=1}^n \log \xi_i \cdot \log \eta_i}{\sum_{i=1}^n (\log \xi_i)^2} \quad (2.22)$$

V souladu se vztahem (2.8) lze napsat

$$\log C_T = \log T_T + \mathbf{m} \cdot \log v_{cT} \quad (2.23)$$

kde hodnota exponentu  $\mathbf{m} = -\mathbf{b}$  a podle vztahu (2.10) vypočítat hodnotu konstanty  $C_T$ .

V souladu se vztahem (2.11) lze napsat

$$\log C_v = \log v_{cT} + \frac{1}{\mathbf{m}} \cdot \log T_T \quad (2.24)$$

a podle vztahu (2.13) vypočítat hodnotu konstanty  $C_v$ .

Pro lepší přehled je vhodné při výpočtu souřadnic těžiště  $\mathbf{T}$  a hodnoty směrnice  $\mathbf{b}$  výsledné přímky  $\mathbf{T}-\mathbf{v}_c$  závislosti zapisovat postupně všechny vypočtené hodnoty do přehledových tabulek číslo 2.2 a 2.3:

- souřadnice  $\log v_{cT}$  se vypočítá tak, že hodnota v buňce **1)** tabulky č.2.2 se podělí pěti,
- souřadnice  $\log T_T$  se vypočítá tak, že hodnota v buňce **2)** tabulky č.2.3 se podělí pěti,
- exponent  $\mathbf{m}$  se stanoví jako podíl hodnot v buňce **4)** tabulky č.2.3 a buňce **3)** tabulky č.2.2, násobený hodnotou **-1**.

•

Tab.2.2

i	$v_{ci} [\text{m min}^{-1}]$	$\log v_{ci}$	$\log \xi_i = \log v_{ci} - \log v_{cT}$	$(\log \xi_i)^2$
1				
2				
3				
4				
5				
$\Sigma$	---	1)	0	3)

Tab.2.3

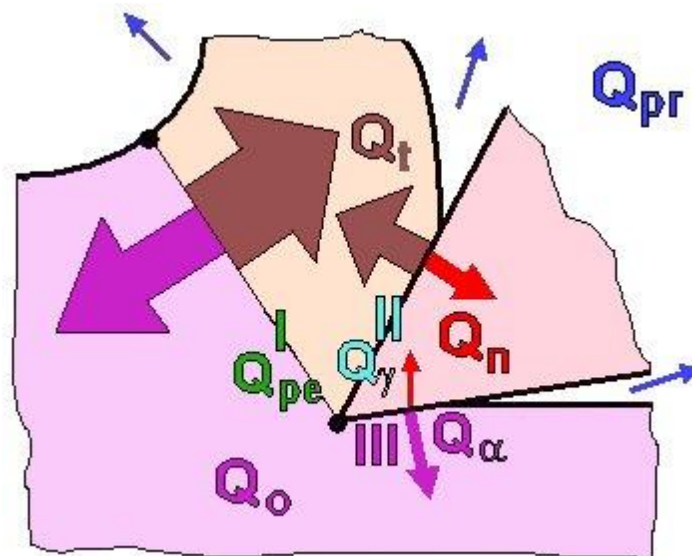
i	$T_i [\text{min}]$	$\log T_i$	$\log \eta_i = \log T_i - \log T_T$	$\log \xi_i \cdot \log \eta_i$
1				
2				
3				
4				
5				
$\Sigma$	---	2)	0	4)

### 3. MĚŘENÍ TEPLoty ŘEZNÉHO NÁSTROJE

#### 3.1. Tepelná bilance řezného procesu

Během obráběcího procesu se téměř veškerá práce řezání transformuje v teplo. Teplo řezného procesu  $Q_e$ , vzniklé při odebrání určitého množství materiálu, je přibližně rovné práci řezného procesu  $E_e$ , takže  $Q_e \cong E_e$ . Vzniklé teplo výrazně ovlivňuje řezný proces, protože:

- negativně působí na řezné vlastnosti nástroje,
- ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- ovlivňuje pěchování a zpevňování obráběného materiálu,
- ovlivňuje podmínky tření na čele i hřbetě nástroje.



Obr.3.1 Vznik a odvod tepla při obrábění

Teplo při obrábění (obr.3.1) vzniká v oblasti primární plastické deformace I ( $Q_{pe}$  - v důsledku plastických a elastických deformací), v oblasti sekundární plastické deformace II ( $Q_\gamma$  - v důsledku tření mezi čelem nástroje a třískou) a v oblasti III ( $Q_\alpha$  - v důsledku tření hlavního hřbetu nástroje o přechodovou plochu na obrobku). Vzniklé teplo je odváděno třískou ( $Q_t$ ), nástrojem ( $Q_n$ ), obrobkem ( $Q_o$ ) a řezným prostředím ( $Q_{pr}$ ) - obr.3.1. Na základě předpokladu, že vzniklé a odvedené teplo musí být v rovnováze, lze vytvořit rovnici tepelné bilance řezného procesu v následujícím tvaru:

$$Q_{pe} + Q_\gamma + Q_\alpha = Q_t + Q_n + Q_o + Q_{pr} \quad [J].$$

Největší množství tepla vzniká v oblasti primární plastické deformace **I**, následuje oblast sekundární plastické deformace **II**. Teplo, vznikající v oblasti hřbetu, by mělo být udržováno na co možná nejnižších hodnotách, proto je třeba volit úhel hřbetu co největší a zamezit výraznému opotřebení hřbetu, které ve svém konečném efektu úhel hřbetu dále zmenšuje. Množství vzniklého tepla závisí na vlastnostech obráběného materiálu, geometrii nástroje a řezných podmínkách.

Podíl jednotlivých složek tepla, odváděného třískou, obrobkem, nástrojem a prostředím, závisí na tepelné vodivosti materiálů obrobku a nástroje, na řezných podmínkách (především řezné rychlosti), řezném prostředí (způsobu chlazení a mazání) a na geometrii břitu řezného nástroje. Největší část tepla vzniklého při obrábění je u řezných procesů, které využívají nástroj s definovatelnou geometrií, odváděna ze zóny řezání třískou. Celkové množství tepla, vzniklého při obrábění, lze měřit pomocí kalorimetrů.

Z hlediska efektivnosti procesu řezání jsou podíly tepelné energie odvedené jednotlivými účastníky řezného procesu důležité z následujících důvodů:

- teplo odvedené nástrojem: velké množství tepla odvedené nástrojem znamená vysokou teplotu nástroje - teplota výrazně zvyšuje intenzitu opotřebení a proto dochází ke snížení trvanlivosti a životnosti nástroje,
- teplo odvedené obrobkem: pokud do obrobku přechází velké množství vzniklého tepla, má to negativní vliv na kvalitu obrobeného povrchu a to zejména s ohledem na tahová vnitřní pnutí, která podstatně snižují spolehlivost součástí při jejich funkci,
- teplo odvedené řezným prostředím: velké množství tepla odvedené okolním prostředím znamená, že do nástroje a obrobku přejde menší díl vzniklého tepla, čímž se zmenší jeho negativní vlivy na nástroj a obrobek,
- teplo odvedené třískou: (podobně jako u tepla odvedeného řezným prostředím).

### 3.2. Měření teploty řezného nástroje

Teplota nástroje je ovlivněna zejména podílem tepla, které přechází do nástroje v oblastech I, II a III. Je závislá především na velikosti kontaktní plochy mezi třískou a nástrojem, velikosti řezných sil a třecích procesech mezi třískou a čelem nástroje a materiálem obrobku a hřbetem nástroje.

Jednotkou teploty je Kelvin, vedlejší jednotkou teploty podle soustavy SI je stupeň Celsia. Vzájemný přepočítání teplot z Celsiovy na Kelvinovu stupnici:

$$T [^{\circ}\text{K}] = T [^{\circ}\text{C}] + 273,15 ,$$

diference teploty sou stejně velké v obou stupnicích:

$$1 \text{ } ^{\circ}\text{K} = 1 \text{ } ^{\circ}\text{C} .$$

Pod pojem etalony teploty lze zahrnout přístroje a podmínky měření k zabezpečení požadované přesnosti provozních přístrojů v závodech a laboratořích. Etalony 1.stupně jsou rozděleny do tří intervalů teplot:

- 13,81 ÷ 903,90 °K - platinový odporový teploměr,
- 903,91 ÷ 1337,58 °K - termočlánek Pt10Rh-Pt,
- nad 1337,58 °K - jasový pyrometr.

Metody měření teploty je možné obecně klasifikovat následujícím způsobem (metody využitelné pro měření teploty nástroje jsou výrazně tučným písmem):

- přestup tepla dotykem:



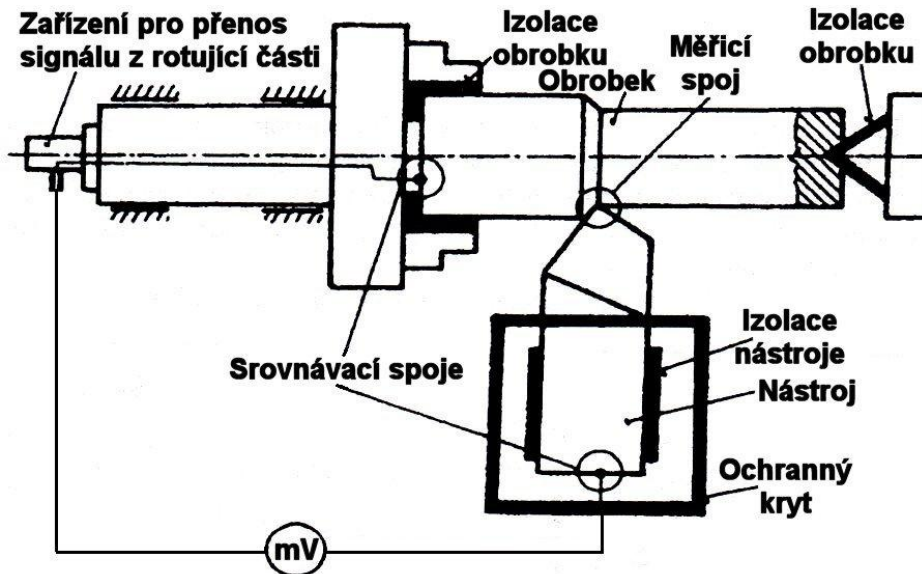
- \* mechanické způsoby:
  - » roztažnost:
    - lineární,
    - objemová,
  - » tlak:
    - kapaliny,
    - páry,
    - plynu,
- \* elektrické způsoby:
  - » ☺ **změna termoelektrického napětí,**
  - » změna odporu,
  - » změna napětí,
- \* jiné způsoby:
  - » ☺ **teplotní barvy,**
  - » teplotní tělíska
- ☺ **přestup tepla zářením:**
  - » úhrnné záření,
  - » pásmové záření,
  - » spektrální záření,
  - » barvové záření,
  - » snímání teplotních obrazů:
    - s rozkladem obrazu (termovizní systémy),
    - bez rozkladu obrazu:
      - obrazové měniče,
      - infrafotografie.

### 3.2.1. Termočláanky

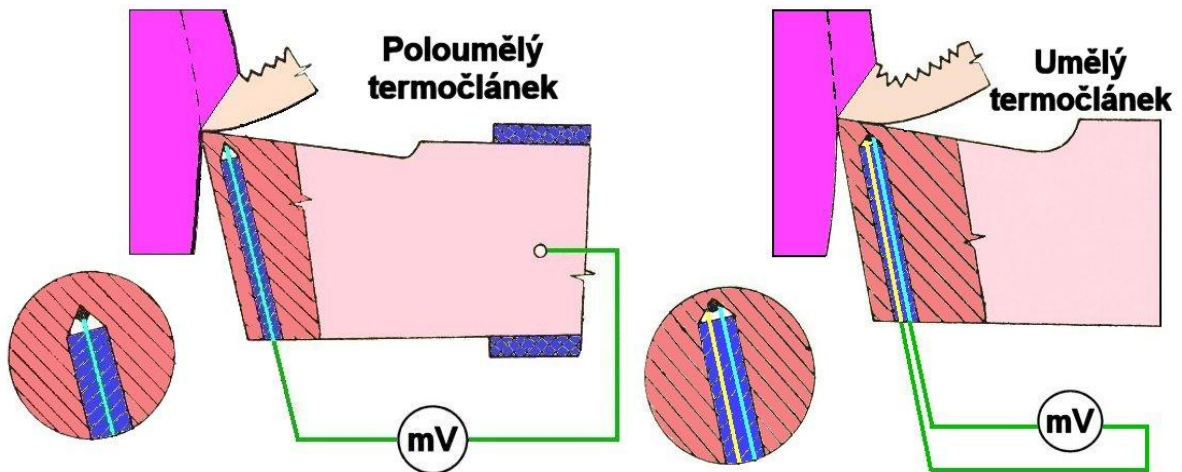
Pro měření teploty řezného nástroje jsou nejčastěji používány termočláanky. Termočláanek je založen na principu elektrického obvodu tvořeného dvěma dráty z různých materiálů, které jsou na obou svých koncích vodivě spojeny. Termoelektrický proud vznikne v tom případě, pokud se teplota  $\Theta_m$  jednoho spoje se bude lišit od teploty  $\Theta_p$  druhého spoje. Rozpojením obvodu na straně srovnávacího spoje vznikne termoelektrické napětí  $E$ , které lze měřit voltmetrem. Tomuto jevu (vzniku termoelektrického napětí) se říká termoelektrický (Seebeckův) jev.

Termočláanky pro měření teploty řezného nástroje mají různou konstrukci:

- termočláanek přirozený (obr.3.2),
- termočláanek poloumělý (obr.3.3),
- termočláanek umělý (obr.3.4).



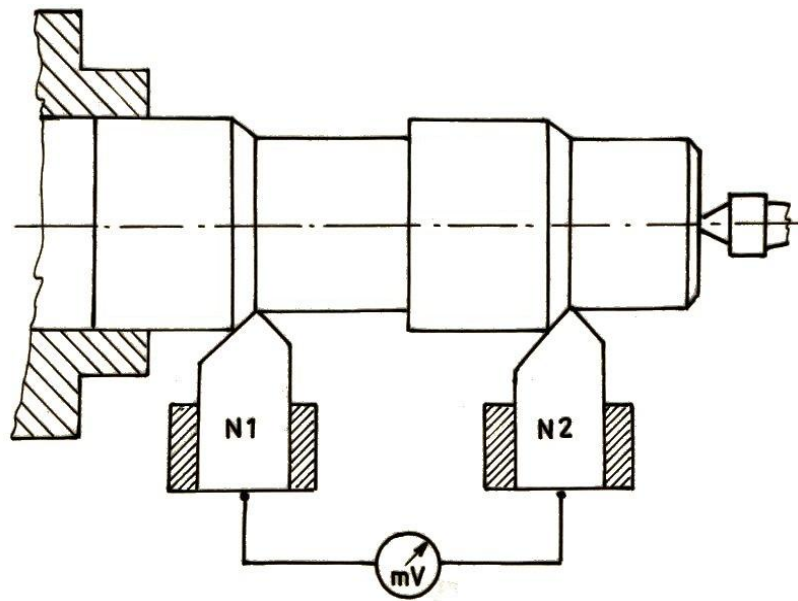
Obr.3.2 Přirozený termočlánek



Obr.3.3 Poloumělý termočlánek

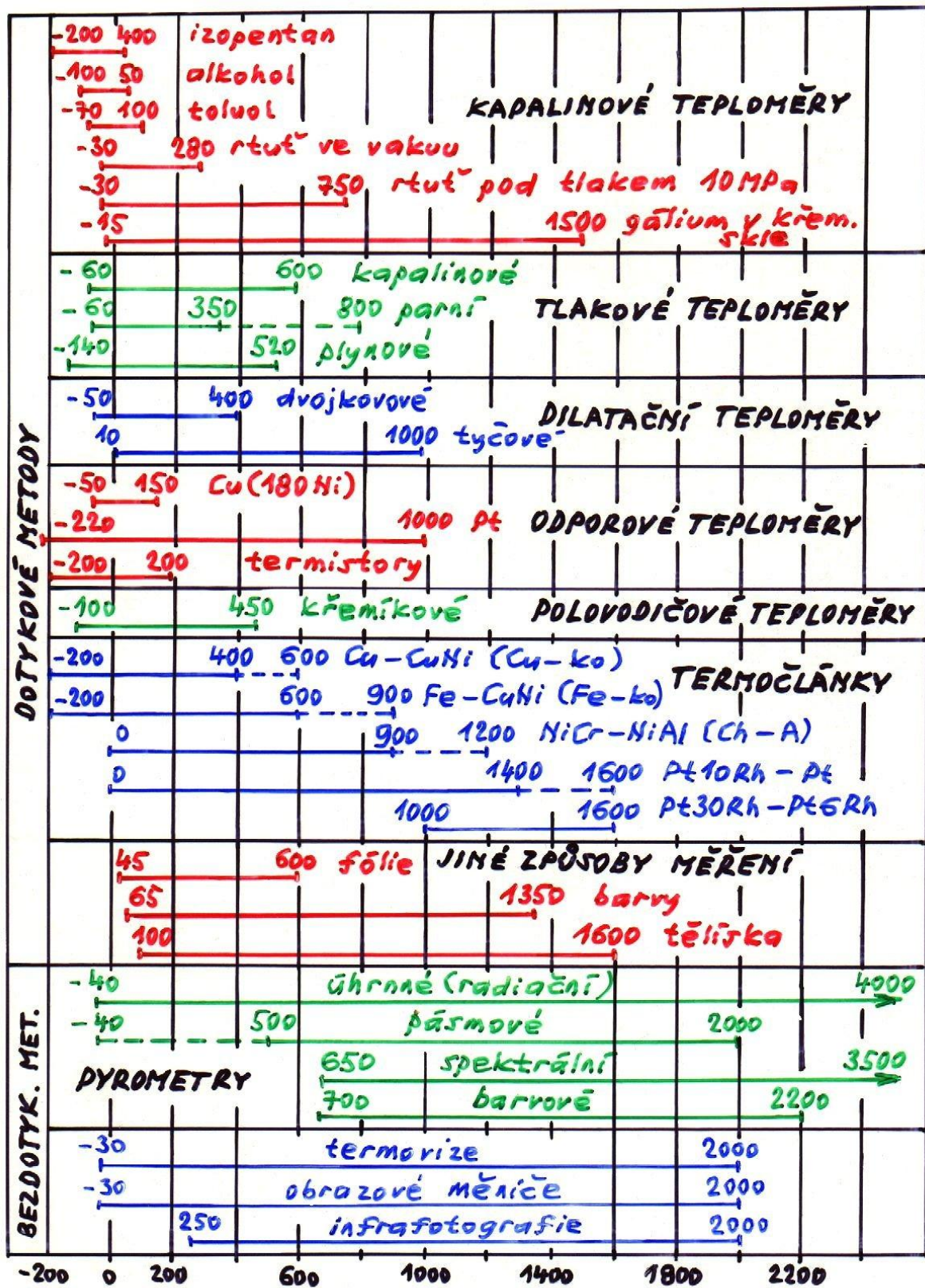
Obr.3.4 Umělý termočlánek

Přirozeným termočlánekem se měří střední teplota všech stykových míst mezi nástrojem a obrobkem. Protože tento termočlánek umožňuje registrovat okamžité změny teploty řezání, používá se nejen při experimentální práci, ale slouží i jako jeden z možných snímačů obráběcího procesu u obráběcích strojů s adaptivním řízením. Měřicí spoj přirozeného termočláneku je na stykových plochách mezi nástrojem a obrobkem. Nástroj a obrobek jsou vzájemně elektricky izolovány. Nevýhodou tohoto termočláneku je, že pro každou kombinaci materiálu nástroje a materiálu obrobku musí být stanovena cejchovní křivka. Přirozený termočlánek může být konstruován i jako termoduo, kdy jsou pro jeho vytvoření využity dva nástroje z různých materiálů (např. kombinace slinutého karbidu a cermetu - obr.3.5).



*Obr.3.5 Termoduo*

Rozsahy teplot, které lze měřit jednotlivými typy umělých termočlánků jsou spolu s měřicími rozsahy ostatních prostředků pro měření teploty uvedeny na obrázku č.3.6.

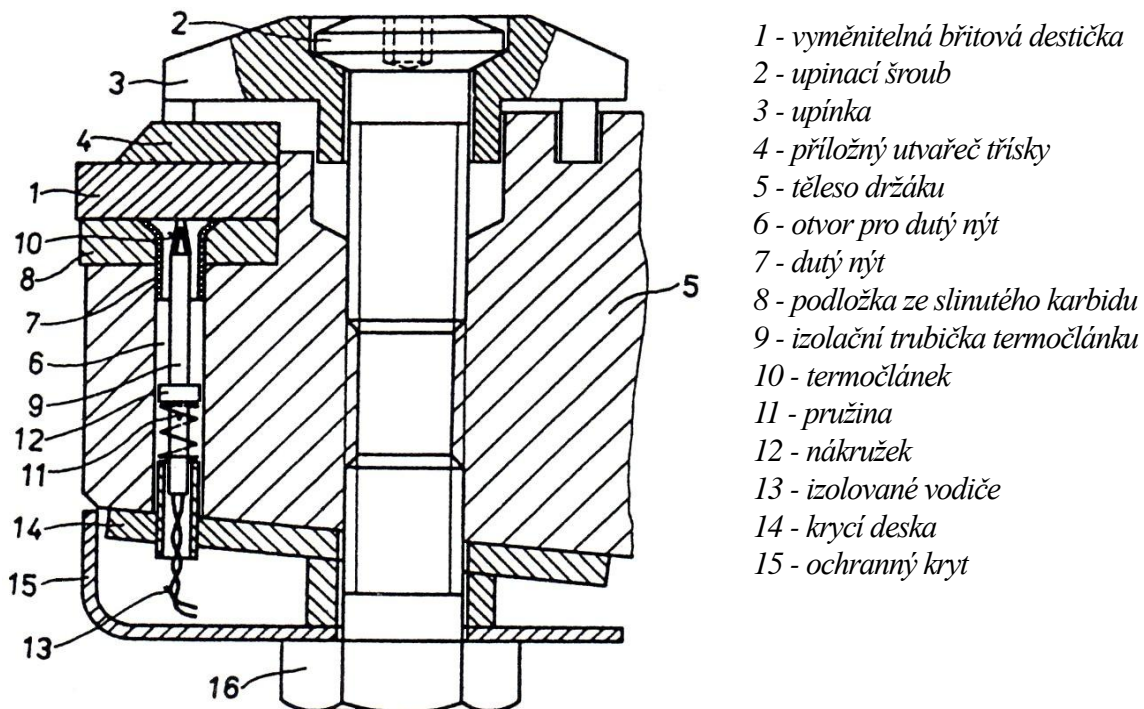


Obr.3.6 Měřicí rozsahy prostředků pro měření teploty



### 3.2.2. Měření teploty vyměnitelné břitové destičky soustružnického nůž

Pro měření teploty vyměnitelné břitové destičky byl použit upravený soustružnický nůž CSRNR 2525 K12 (obr.3.7). Úprava spočívá ve využití technologického otvoru (6) pro dutý nýt (7) v držáku (5) vyměnitelných břitových destiček pro umístění umělého termočlánu (10), který se dotýká destičky (1) uprostřed její dosedací plochy. Termočlánek je umístěn v izolační trubičce (9) a přes nákrůžek (12) je pružinou (11) přitlačován k destičce. Otvor (6), kterým prochází izolační trubička s termočlánekem je uzavřen deskou (14), která je spolu s ochranným krytem (15) připevněna k tělesu držáku šroubem (16). Tento šroub je zašroubován do závitu, vytvořeného v držáku pro upinací šroub (2) břitové destičky. Signál termočlánu je vyveden pomocí izolovaných vodičů (13) k vyhodnocovacímu milivoltmetru nebo liniovému zapisovači.



- Obr.3.7 Zařízení pro měření teploty vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu

Termočlánek je tvořen dvojicí Fe-Ko, železo - konstantan (slitina mědi CuNi45Mn, ČSN 42 3065), pro převod naměřených hodnot v milivoltech na hodnoty teploty ve stupních Celsia se používá převodní tabulka číslo 3.1.

Pro zkoušky byly použity vyměnitelné břitové destičky z následujících druhů nepovlakovaných i povlakovaných slinutých karbidů:

- H1 (K10 podle ISO) ,
- H10 - jemnozrnný slinutý karbid (K10 podle ISO),
- H10CN - slinutý karbid H10 s povlakem TiCN,
- S20 (P20 podle ISO),
- S30 (P30 podle ISO),
- S30CN - slinutý karbid S30 s povlakem TiCN,
- U1 (M10 podle ISO).

Obráběný materiál: ocel 12 050.1 a vysocepevná ocel (mez pevnosti v tahu  $R_m=1480$  MPa, mez kluzu  $R_{p0,2}=1300$  MPa, vrubová houževnatost  $KCU_3= 23$  J  $cm^{-2}$ ). Řezné podmínky: šířka záběru ostří  $a_p=1,5$  mm, posuv na otáčku  $f=0,156$  mm.

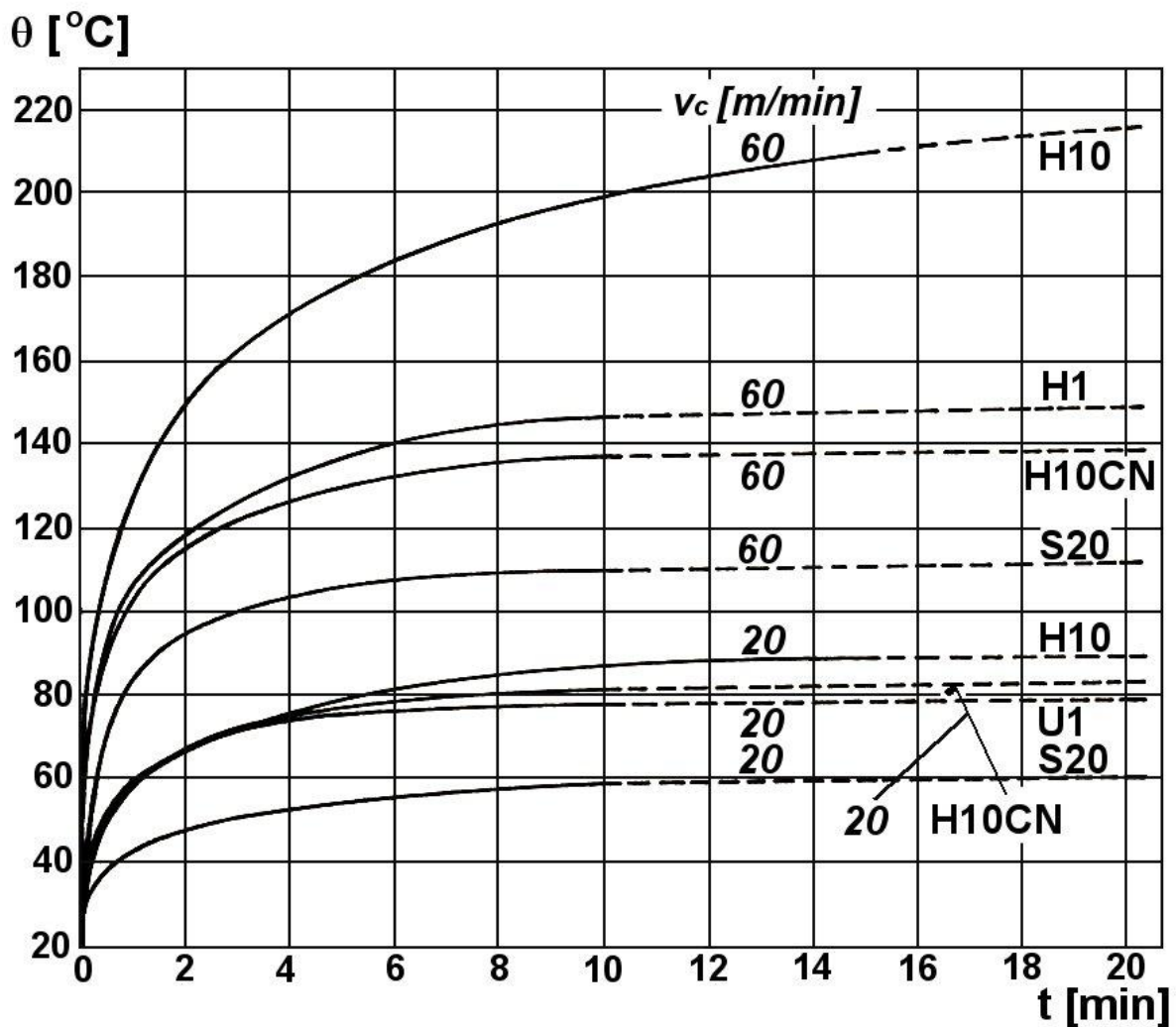
Tab.3.1 Převod milivoltů na stupně Celsia pro termočlánek Fe-Ko

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	mV										
0	0,00	0,05	0,10	0,16	0,21	0,26	0,31	0,36	0,42	0,47	0,52
10	0,52	0,57	0,63	0,68	0,73	0,78	0,84	0,89	0,94	1,00	1,05
20	1,05	1,10	1,16	1,21	1,26	1,31	1,37	1,42	1,47	1,53	1,58
30	1,58	1,63	1,69	1,74	1,79	1,84	1,90	1,95	2,00	2,06	2,11
40	2,11	2,16	2,22	2,27	2,33	2,38	2,43	2,49	2,54	2,64	2,65
50	2,65	2,70	2,76	2,81	2,87	2,92	2,97	3,03	3,08	3,14	3,19
60	3,19	3,24	3,30	3,35	3,41	3,46	3,51	3,57	3,62	3,68	3,73
70	3,73	3,78	3,84	3,89	3,95	4,00	4,05	4,11	4,16	4,22	4,27
80	4,27	4,32	4,38	4,43	4,49	4,54	4,60	4,65	4,71	4,77	4,82
90	4,82	4,87	4,93	4,98	5,04	5,09	5,15	5,20	5,26	5,32	5,37
100	5,37	5,42	5,48	5,53	5,59	5,64	5,70	5,75	5,81	5,87	5,92
110	5,92	5,97	6,03	6,08	6,14	6,19	6,25	6,30	6,36	6,42	6,47
120	6,47	6,53	6,58	6,64	6,69	6,75	6,81	6,86	6,92	6,97	7,03
130	7,03	7,09	7,14	7,20	7,25	7,31	7,37	7,42	7,48	7,53	7,59
140	7,59	7,65	7,70	7,76	7,81	7,87	7,93	7,98	8,04	8,09	8,15
150	8,15	8,21	8,26	8,32	8,37	8,43	8,49	8,54	8,60	8,65	8,71
160	8,71	8,77	8,82	8,88	8,93	8,99	9,05	9,10	9,16	9,21	9,27
170	9,27	9,33	9,38	9,44	9,49	9,55	9,61	9,66	9,72	9,77	9,83
180	9,83	9,89	9,94	10,00	10,05	10,11	10,17	10,22	10,28	10,33	10,39
190	10,39	10,45	10,50	10,56	10,61	10,67	10,73	10,78	10,84	10,89	10,95
200	10,95	11,01	11,06	11,12	11,17	11,23	11,29	11,34	11,40	11,45	11,51
210	11,51	11,57	11,62	11,68	11,73	11,79	11,85	11,90	11,96	12,01	12,07
220	12,07	12,13	12,18	12,24	12,29	12,35	12,41	12,46	12,52	12,57	12,63
230	12,63	12,69	12,74	12,80	12,85	12,91	12,97	13,02	13,08	13,13	13,19
240	13,19	13,25	13,30	13,36	13,41	13,47	13,53	13,58	13,64	13,69	13,75
250	13,75	13,81	13,86	13,92	13,97	14,03	14,09	14,14	14,20	14,26	14,31
260	14,31	14,37	14,42	14,48	14,54	14,59	14,65	14,71	14,76	14,82	14,88
270	14,88	14,94	14,99	15,05	15,10	15,16	15,22	15,27	15,33	15,38	15,44
280	15,44	15,50	15,55	15,61	15,66	15,72	15,78	15,83	15,89	15,94	16,00
290	16,00	16,06	16,11	16,17	16,22	16,28	16,34	16,39	16,45	16,50	16,56
300	16,56	16,62	16,67	16,73	16,78	16,84	16,90	16,95	17,01	17,06	17,12
310	17,12	17,18	17,23	17,28	17,34	17,40	17,46	17,51	17,57	17,62	17,68
320	17,68	17,74	17,79	17,85	17,90	17,96	18,02	18,07	18,13	18,19	18,24
330	18,24	18,30	18,36	18,41	18,46	18,52	18,58	18,63	18,69	18,74	18,80
340	18,80	18,86	18,91	18,97	19,02	19,08	19,14	19,19	19,25	19,30	19,36
350	19,36	19,42	19,47	19,53	19,58	19,64	19,70	19,75	19,81	19,86	19,92
360	19,92	19,98	20,03	20,09	20,14	20,20	20,26	20,31	20,37	20,42	20,48
370	20,48	20,54	20,59	20,65	20,70	20,76	20,82	20,87	20,93	20,98	21,04
380	21,04	21,10	21,15	21,21	21,26	21,32	21,38	21,43	21,49	21,54	21,60
390	21,60	21,65	21,71	21,77	21,82	21,88	21,94	21,99	22,05	22,10	22,16
400	22,16	22,22	22,27	22,33	22,38	22,44	22,50	22,55	22,61	22,66	22,72

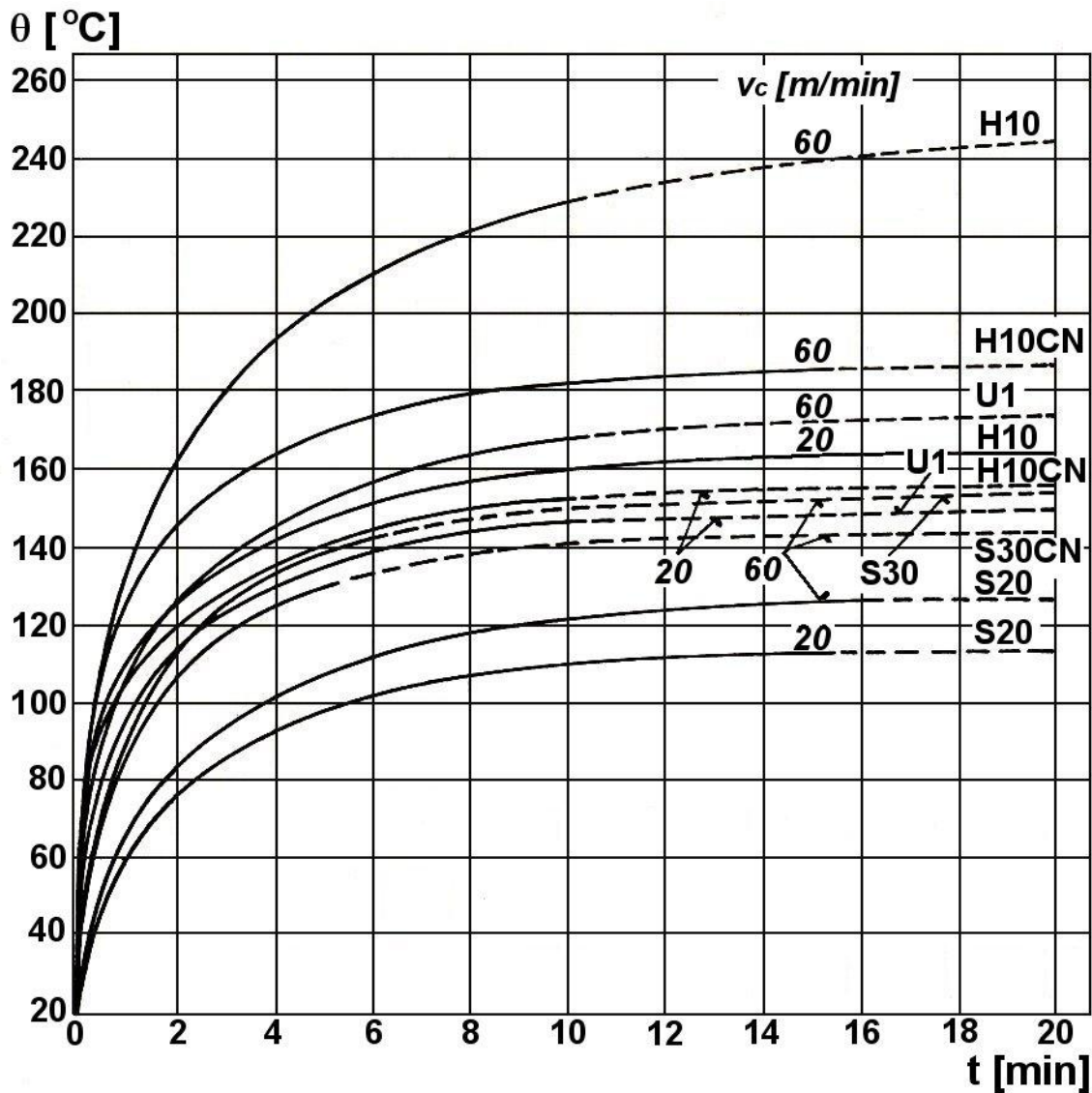


Záznamy časového průběhu teplot při obrábění oceli 12 050.1 řeznými rychlostmi  $v_c = 20 \text{ m min}^{-1}$  a  $v_c = 60 \text{ m min}^{-1}$  jsou uvedeny na obrázku č.3.8, záznamy časového průběhu teplot při obrábění vysocepevné oceli stejnými řeznými rychlostmi na obrázku č.3.9. Plná čára znamená u každého grafu naměřenou část, čárkovanou čarou je časový průběh doplněn na základě výpočtu až do doby  $t=20$  minut.

Všechny získané záznamy mají parabolický průběh, s výrazným nárůstem teploty v počáteční fázi obrábění. Zhruba po 10 minutách se měřené teploty ustálily a dále narůstaly jen minimálně, z čehož lze usuzovat na vyrovnání tepelné bilance mezi zdrojem a odvodem tepla. Zvýšení řezné rychlosti se projeví nárůstem teplot, vícekarbidové (U1, S20, S30) a povlakované slinuté karbidy vykazují nižší teploty ve srovnání s jednodobým SK (K10) a jsou též méně citlivé na nárůst řezné rychlosti. Vyšší teploty byly u srovnatelných slinutých karbidů a srovnatelné řezné rychlosti naměřeny při obrábění vysocepevné oceli. Povlaky působí příznivě na snížení teploty břitových destiček,



Obr.3.8 Průběhy teplot při obrábění oceli 12 050.1



Obr.3.9 Průběhy teplot při obrábění vysocepevné oceli

### 3.2.3. Pyrometry

Klasifikace pyrometrů:

- **radiální** (měří úhrnné záření, tj. celkovou energii vyzařovanou v určitém směru, v celém spektru vlnových délek),
- **fotoelektrické** (měří pásmové záření, tj. záření v úzkém pásmu vlnových délek, vymezeném použitou optikou, filtry a spektrální citlivostí snímačů),
- **spektrální** (jasové - využívají úzkou oblast viditelného pásma záření),
- **barvové** (nazývané též distribuční - využívají oblast viditelného záření a teplotu měří prostřednictvím tzv. barevné teploty). Barevná teplota zářiče je teplota černého zářiče, při níž má jeho záření v určitém oboru spektra stejné poměrné spektrální rozložení, jako daný zářič.

Pro měření teploty řezného nástroje jsou pyrometry využitelné pouze v omezené míře, protože se musí přesně zaměřit a při pohybu nástroje se s ním navíc musí synchronně pohybovat. Snímaná oblast na nástroji je příliš velká a proto jsou naměřené hodnoty teploty nástroje ovlivněny dalšími faktory, jako je teploty třísky či obrobku.



Obr.3.10 Pyrometry Raynger firmy AMR

## 4. ANALÝZA ŘEZNÝCH VLASTNOSTÍ VRTÁKŮ Z RYCHLOŘEZNÉ OCELI S PVD POVLAKY

### Zadání:

Proveďte analýzu zatížení šroubových vrtáků povlakovaných PVD povlaky nové generace, určených pro vrtání uhlíkatých ocelí tř. 12 s chladicí emulzí CIMSTAR 560 - 5% a za sucha, při různých hodnotách posuvové rychlosti. Jako srovnávací kritérium použijte bodové odhady středních hodnot axiálních sil a krouticích momentů, potřebných pro neprůchozí vrtání děr hloubky 3.D ( $\underline{D}$  - průměr vrtáku).

Je dáno:

- šroubovité vrtáky  $\phi$  6 mm, DIN 338-N, výrobce ZPS-FN, Zlín, a.s., pobočný závod Kyjov
- dtto, s PVD povlaky TiN, TiCN, TiAlN a MOVIC® firmy LISS Platit, a.s., Rožnov pod Radhoštěm
- polosyntetická chladicí emulze CIMSTAR 560-5% objemové koncentrace pro středně namáhavé operace obrábění
- měřicí aparatura KISTLER se čtyřsložkovým snímačem KISTLER 9272, plně řízená PC
- uhlíkatá ocel 12 050.1 ve stavu obrobeném na čisto (bez kůry)
- stolní vrtačka VS 20, běžné upínací nářadí
- doporučené řezné podmínky:  $v_c = 34$  m/min (tzn. cca 1600 ot/min), posuvy  $f = 0,08, 0,12, 0,20$  a  $0,32$  mm/ot.

Obsah elaborátu:

- schématické znázornění experimentu
- vlastní měření obou sledovaných veličin
- import dat do programu Statgraphics, vykreslení jednoho celého časového průběhu měření pro obě sledované veličiny
- statistické zpracování naměřených souborů, určení bodových odhadů středních hodnot daných veličiny
- tabulka dosažených výsledků
- sloupcové a regresní diagramy naměřených veličin pro dílčí měření a dané podmínky
- závěrečné vyhodnocení a doporučení.

Popis souborů:

Posuv [mm/ot]	VRTÁNÍ ZA SUCHA					VRTÁNÍ S EMULZÍ				
	HSS	TiN	TiCN	TiAlN	Movic®	HSS	TiN	TiCN	TiAlN	Movic®
0,08	hs1	ns1	cs1	as1	ms1	he1	ne1	ce1	ae1	me1
0,12	hs2	ns2	cs2	as2	ms2	he2	ne2	ce2	ae2	me2
0,20	hs3	ns3	cs3	as3	ms3	he3	ne3	ce3	ae3	me3
0,32	hs4	ns4	cs4	as4	ms4	he4	ne4	ce4	ae4	me4

Soubory s extenzí .re1 jsou axiální síly; soubory s extenzí .re2 jsou krouticí momenty.

<http://kst:tsk@kst2.fme.vutbr.cz>  
 DISK: H účastník: **METODY** heslo: **EXP**

## 1. Úvod do problematiky

Technologické zkoušky řezivosti povlaků, prováděné na FSI VUT v Brně, Ústavu strojírenské technologie, odboru obrábění, vyhodnocují převážně tyto veličiny:

- měření charakteristických forem opotřebení (ISO 3685) - VB, VN, VC, KT, atd.
- měření zatížení nástroje - axiální síly a krouticího momentu.

Analýzy měření průběhů opotřebení jsou dnes již víceméně rutinní záležitostí, nicméně mají svá úskalí, spočívající především v těchto skutečnostech:

- u vícebřitých nástrojů nemusí reálné opotřebení probíhat na všech břitech stejnoměrně;
- vlastní rozvoj opotřebení má různou intenzitu na čelních a hřbetních plochách hlavních, vedlejších, resp. příčných ostří, což komplikuje měření;
- při použití běžných dílenských světelných mikroskopů lze obtížně odlišovat skutečné míry ploch opotřebovaných od ploch reflektujících světlo v důsledky jejich záběhu a zanešení částicemi obráběného materiálu;
- měření komplikuje nárůstek a ulpělé částice třísek - odstranění nárůstku za účelem měření může vést k nechtěné delaminaci povlaku i poškození ostří;
- obrábění je nutno zastavovat za účelem měření, což prodlužuje dobu experimentů.

S uvážením variantnosti geneze povlaků, potřeby opakování zkoušek a zachování konzistence dat dnes získávají na důležitosti metody, které výše uvedené nedostatky pokud možno eliminují. Jednou z možností je měření zatížení nástrojů a analýza procesu obrábění pomocí matematicko-fyzikálních modelů, poskytujících celou řadu užitečných parametrů:

- celkové silové a momentové namáhání nástroje -  $F_f$  [N] a  $M_c$  [Nm],
- podíl zatížení přenášený jádrem vrtáku -  $F_j$  [N] a  $M_j$  [Nm],
- příkon na vrtání tvořený krouticím momentem  $P_{M_c}$  a posuvovou složkou  $P_{F_f}$  [W]
- mikroanalýzu sil v kořenu třísky ve směru odvodu třísky (v ortogonální rovině) - tzn. sílu působící na jeden břit  $F_1$ , její horizontální a vertikální složku  $F_{h_1}$ ,  $F_{v_1}$  [N],
- výpočet měrné řezné síly  $k_c$  a predikci mezní pevnosti obráběného materiálu  $R_m$  [MPa],
- výpočet měrné energie obrábění  $e_c$  [J/mm<sup>3</sup>],
- součinitel tření na čele nástroje  $\mu$  [-] v místě odvodu třísky.

Podstatným rysem této metody je zahrnutí reálné geometrie testovaných nástrojů, což umožňuje srovnávat i odlišné konstrukce nástrojů - zvláště v měrných ukazatelích. Získaná data nabízejí řadu možností a srovnání, jak absolutních, tak relativních, neboť změníme-li kterýkoliv vstupní parametr, lze pozorovat tento vliv na celou řadu výstupních veličin. Z hlediska metodiky a principu zkoušky je tato zkouška nezastupitelná, neboť se jedná o reálné testování nástroje způsobem, jakým bude zatížen v praxi, se zahrnutím mechanismů, které nelze jiným způsobem nasimulovat a tudíž odpadají veškeré pochybnosti o korelaci zkoušky nebo její relevantnosti, jak je tomu u jiných zkoušek (např. „scratch“ testu – tzn. zkoušky vrypem).

Z pohledu časové náročnosti se dělí technologické zkoušky povlaků na:

- krátkodobé - zkoušky jsou prováděné převážně s nástroji ostrými,
- dlouhodobé - zkoušky se provádí v celém rozsahu trvanlivosti nástroje a průběhu rozvoje opotřebení až do destrukce nástroje nebo dosažení stanovené míry opotřebení nástroje, případně nastoupení určitého jevu, zamezujícího dalšímu obrábění.

Obvyklým cílem **krátkodobých zkoušek** je převážně hledání závislostí, které nejsou výrazně ovlivněny rozvojem *opotřebení* a tudíž je lze do jisté míry *zanedbat*. Velikost tohoto zanedbání (přípustné chyby měření) lze snadno posoudit pomocí stability měřeného signálu - pokud má měřená veličina stoupající nebo klesající trend, je to známkou nestability děje a pak je nutno analyzovat jeho příčiny, které nelze pominout. Pokud má zatížení ustálený charakter, pak je rozvoj opotřebení víceméně stagnující a měření lze považovat z hlediska další kvantifikace za vyhovující. Při vlastní metodice zkoušky se zachovává gradace řezných podmínek od nejméně náročných řezů k nejvíce náročným úběrům. Tímto způsobem lze určit například závislosti zatížení nástroje na řezných podmínkách, potřebné pro dimenzování pohonů strojů.

Cílem **dlouhodobých zkoušek** je popsání vybraných ukazatelů v závislosti *na čase obrábění*, resp. na počtu odvrtných děr nebo celkové dosažené hloubce vrtání. Jednou ze základních podmínek úspěšnosti je nastavení počátečních řezných podmínek takových, aby nedošlo k překrytí sledovaného děje jiným dějem - např. měření průběhu rozvoje opotřebení s jevem zahlcování vrtáku odváděnými třískami nebo vrtání díry slepé a průchozí, což vede k odlišnému zatížení nástroje, zvláště u konvenčních strojů. Obecně známé empirické pravidlo pro hloubku vrtané díry u šroubovitých vrtáků rovnající se trojnásobku průměru vrtáku je plně vyhovující, i když je nový nástroj schopen zpočátku vrtat i větší hloubky bez výplachu. Nezastupitelnou výhodou dlouhodobých zkoušek je jejich přímá návaznost na ekonomické analýzy, neboť je zjištěna celková trvanlivost nástroje v závislosti na řezných podmínkách. Tato pomáhá vytvořit komplexní obraz o úspěšnosti nástrojů, povlaků, jejich rentabilitě a dalších parametrech sledované technologie.

## 2. Vlastní testování povlaků HSS vrtáků pomocí řezných zkoušek

### 2.1. Popis nástrojů

K testování byly použity šroubovitě vrtáky z produkce ZPS - FN, a.s., ZLÍN, o  $\phi 6,00$  mm, DIN 338 R-N, nepovlakované a povlakované PVD vrstvami TiN, TiCN, TiAlN (multivrstvy) a TiN/Movic®. Poslední povlak byl na rozdíl od předchozích povlaků povlakem měkkým na bázi MoS<sub>2</sub>, který obecně ovlivňuje třecí podmínky na kontaktních plochách a tato vrstva byla aplikována na podkladové tvrdé vrstvě TiN. Všechny povlaky byly provedeny společností LISS, a.s., Rožnov pod Radhoštěm, PVD technologií Platit. Vrtáky byly upínány do tříčelistového sklíčidla ČSN 24 1320 s minimálním vysazením. Takto upnuté vrtáky byly dále upínány do dutiny vřetene MORSE 3 stolní vrtačky VS 20, s výkonem 1,5 kW.

### 2.2. Obrobky

Obrobky měly ve stavu obrobeném bez kúry tvar plochých tyčí o přířezech 45x100-300 mm, které byly řezány z kusů o délce 600 mm. Jeden přířez byl upnut na měřicí dynamometr, druhý na křížový stůl. U dlouhodobých testů probíhalo vrtání střídavě - po obrobení zvolené dávky děr v obrobku na křížovém stole, orientovaných příčně k podélné ose obrobku, byla provedena kontrolní díra v kusu upevněném na dynamometru. Pro krátkodobé testy byl použita ušlechtilá ocel uhlíkatá 12 050.1.

### 2.3. Řezné podmínky

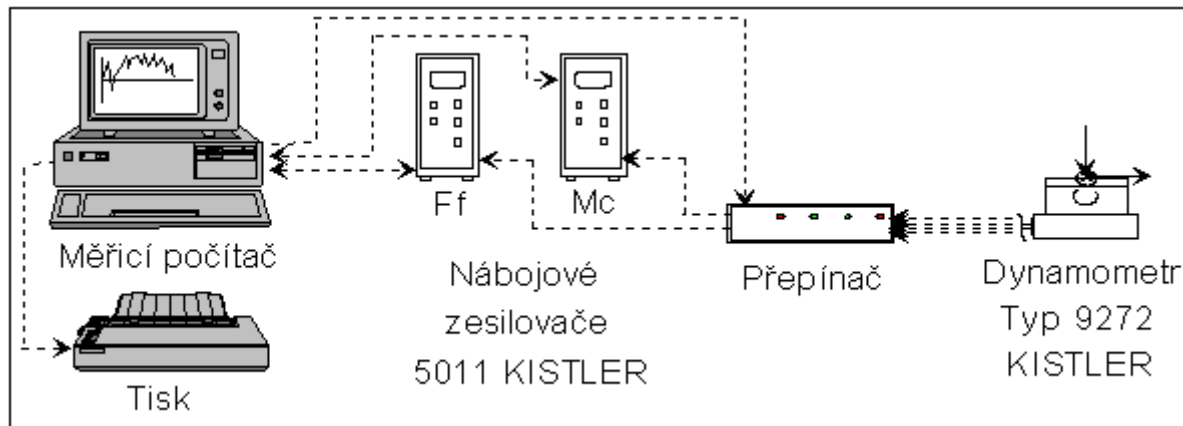
Pro krátkodobé zkoušky (na oceli 12 050.1) byla zvolena řezná rychlost  $v_c=34$  [m/min] a série posuvových rychlostí v rozsahu 144-576 [mm/min]. Rozvoj opotřebení byl vzhledem k nízkému počtu zkoušek zanedbán.

### 2.4. Chlazení

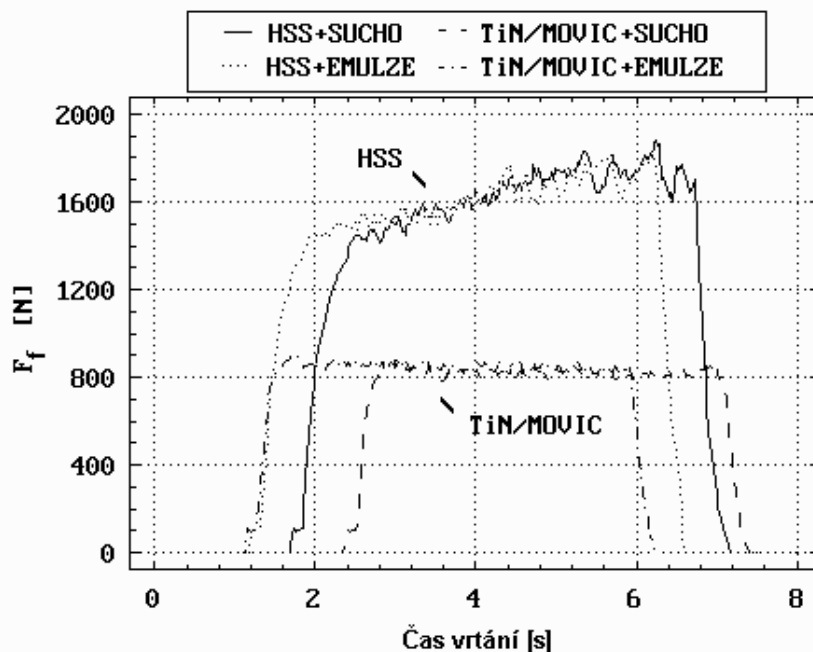
Zkoušky byly provedeny vrtáním za sucha i s chladicí polosyntetickou emulzí CIMSTAR 560 - 5% (CIMCOOL Industrial Products, Holandsko). Kvalita vody v obou testech: pH: 7,1; NO<sub>3</sub> : 50; NO<sub>2</sub> : 0-2; tvrdost podle DIN:15-19. Skutečná koncentrace emulze byla kontrolována měřením pomocí ručního refraktometru.

## 2.5. Schématické znázornění experimentu, měřicí technika

K měření byl použit čtyřsložkový piezoelektrický dynamometr KISTLER 9272, plně řízený počítačem – obr. 1, dílenský mikroskop Carl-Zeiss Jena se zvětšením 5-100 x a upravená optická lupa s noniem se stupnicí po 0,01 mm.



Obr. 1 Schématické znázornění snímání měřených veličin.

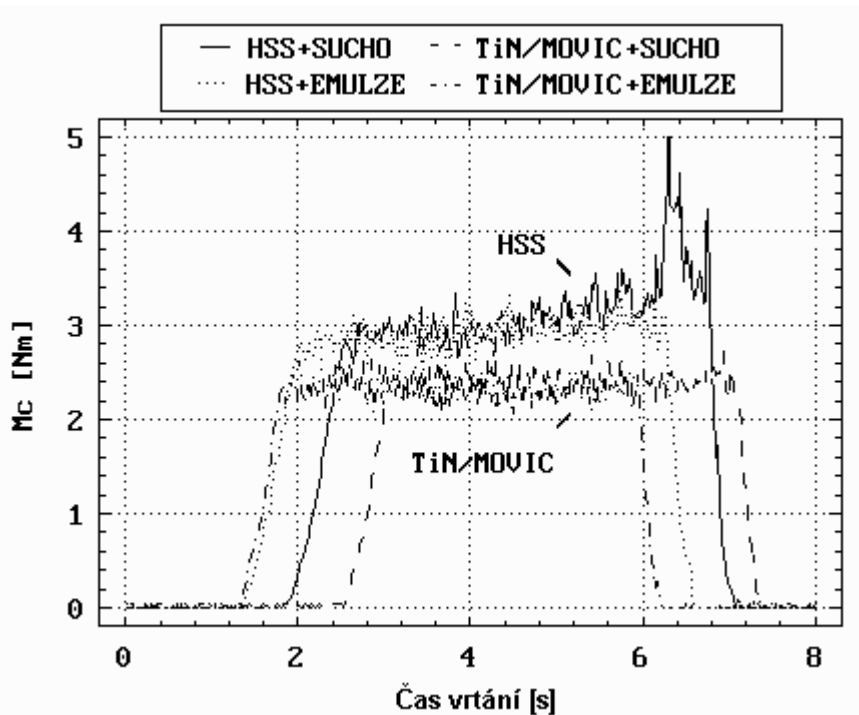


Obr. 2 Časový průběh axiální (posuvové) síly pro vrták bez povlaku a s povlakem TiN/Movic.

## 3. Dosažené výsledky

Typické průběhy obou měřených veličin jsou znázorněny na obr. 2 a 3, ze kterých je patrný jak účinek povlakování, tak chlazení na tyto sledované parametry. Z těchto průběhů je vidět zejména výrazné snížení axiální síly potřebné pro vrták povlakovaný TiN+Movic®, které dosáhlo prakticky poloviční hodnoty síly ve srovnání se zatížením vrtáku bez povlaku. Zatížení nepovlakovaného vrtáku při obrábění za sucha rostlo s hloubkou vrtané díry a ke konci vrtání se zhoršením odvodu třísek blížilo stavu adhezního zadření, což bylo patrné zejména nárůstem krouticího momentu při dovrtávání díry. Chladičí emulze dokázala tomuto koncovému zadírání účinně zabránit, ale nedokázala redukovat nárůst zatížení v takovém rozsahu jako povlakovaný nástroj. Tyto dva průběhy při daných testech vytvářely vždy extrémní hodnoty a ostatní průběhy pro povlaky TiN, TiCN a TiAlN ležely sevřeny mezi těmito křivkami.





Obr. 3 Časový průběh krouticího momentu pro vrták bez povlaku a s povlakem TiN/Movic.

Po provedení všech testů byly z daných průběhů zatížení odseparovány časové fáze relativně stabilizovaného vrtání, charakterizovatelné parametry normálního rozdělení, přičemž střední hodnoty těchto veličin jsou uvedeny v **tab. 1** a **2** (u rychlořezné oceli a stavu vrtání za sucha byl vždy patrný časový nárůst těchto veličin, zvláště u vyšších posuvů).

**Tab. 1** Střední hodnoty axiálních sil v [N] pro vrtání oceli 12 050.1 pro různé PVD povlaky a různé hodnoty posuvů (řezná rychlost  $v_c=34$  m/min).

posuv [mm/ot]	VRTÁNÍ ZA SUCHA					VRTÁNÍ S EMULZÍ CIMSTAR 560 - 5%				
	HSS	TiN	TiCN	TiAlN	TiN/ Movic®	HSS	TiN	TiCN	TiAlN	TiN/ Movic®
0,08		579					563			
0,12		742					724			
0,20		1068					1048			
0,32		1556					1533			

**Tab. 2** Střední hodnoty krouticích momentů v [Nm] pro vrtání oceli 12 050.1 pro různé PVD povlaky a různé hodnoty posuvů.

posuv [mm/ot ]	VRTÁNÍ ZA SUCHA					VRTÁNÍ S EMULZÍ CIMSTAR 560 - 5%				
	HSS	TiN	TiCN	TiAlN	TiN/ Movic®	HSS	TiN	TiCN	TiAlN	TiN/ Movic®
0,08		1,26					1,16			
0,12		1,71					1,59			
0,20		2,62					2,44			
0,32		3,97					3,72			

**Tab. 3** Hodnoty konstant pro regresní výpočetní vztahy pro výpočet axiálních sil a krouticích momentů pro vrtání oceli 12 050.1 pro různé PVD povlaky a stavy chlazení - šroubovitý vrták  $\phi$  6 mm,  $v_c = 34$  m/min.

hodnoty konstant	VRTÁNÍ ZA SUCHA					VRTÁNÍ S EMULZÍ CIMSTAR 560 - 5%				
	HSS	TiN	TiCN	TiAlN	TiN/Movic®	HSS	TiN	TiCN	TiAlN	TiN/Movic®
$k_1$		4068					4045			
$q_1$		254					239			
$k_2$		11,28					10,66			
$q_2$		0,36					0,33			

**Tab. 4** Účinek chlazení emulzí CIMSTAR 560 - 5% na relativní pokles středních hodnot axiálních sil a krouticích momentů potřebných k vrtání oceli 12 050.1 - pro různé PVD povlaky a posuvy - ve srovnání s vrtáním za sucha.

posuv [mm/ot]	REDUKCE PŘÍTLAČNÉ SÍLY NA VRTÁK [%]					REDUKCE NAMÁHÁNÍ VRTÁKU NA KRUT [%]				
	HSS	TiN	TiCN	TiAlN	TiN/Movic®	HSS	TiN	TiCN	TiAlN	TiN/Movic®
0,08		-2,42					-8,13			
0,12		-1,91					-6,74			
0,20		-1,33					-6,29			
0,32		-0,98					-5,56			

**Tab. 5** Účinek různých druhů PVD povlaků na relativní pokles středních hodnot axiálních sil potřebných pro vrtání oceli 12 050.1 HSS vrtákem pro různé posuvy a podmínky chlazení.

posuv [mm/ot]	REDUKCE PŘÍTLAČNÉ SÍLY NA VRTÁK [%]							
	VRTÁNÍ ZA SUCHA				VRTÁNÍ S EMULZÍ CIMSTAR 560 - 5%			
	TiN	TiCN	TiAlN	TiN/Movic®	TiN	TiCN	TiAlN	TiN/Movic®
0,08	-12,27				-14,83			
0,12	-23,98				-23,06			
0,20	-33,58				-30,13			
0,32	-39,12				-34,49			

**Tab. 6** Účinek různých druhů PVD povlaků na relativní pokles středních hodnot krouticích momentů potřebných pro vrtání oceli 12 050.1 HSS vrtákem pro různé posuvy a podmínky vrtání.

posuv [mm/ot]	REDUKCE NAMÁHÁNÍ VRTÁKU NA KRUT [%]							
	VRTÁNÍ ZA SUCHA				VRTÁNÍ S EMULZÍ CIMSTAR 560 - 5%			
	TiN	TiCN	TiAlN	TiN/Movic®	TiN	TiCN	TiAlN	TiN/Movic®
0,08	-5,48				-2,05			
0,12	-5,87				-12,80			
0,20	-17,20				-16,06			
0,32	-24,26				-17,09			

Z těchto středních hodnot byly sestaveny regresní závislosti sledovaných veličin v závislosti na druhu povlaku, velikosti posuvů a chlazení v obecných tvarech

$$F_f = k_1 \cdot f + q_1 \quad (1)$$

a

$$M_c = k_2 \cdot f + q_2, \quad (2)$$

přičemž dílčí regresní koeficienty jsou uvedeny v **tab. 3**. Grafické znázornění těchto závislostí je znázorněno na **obr. 4 až 7**.

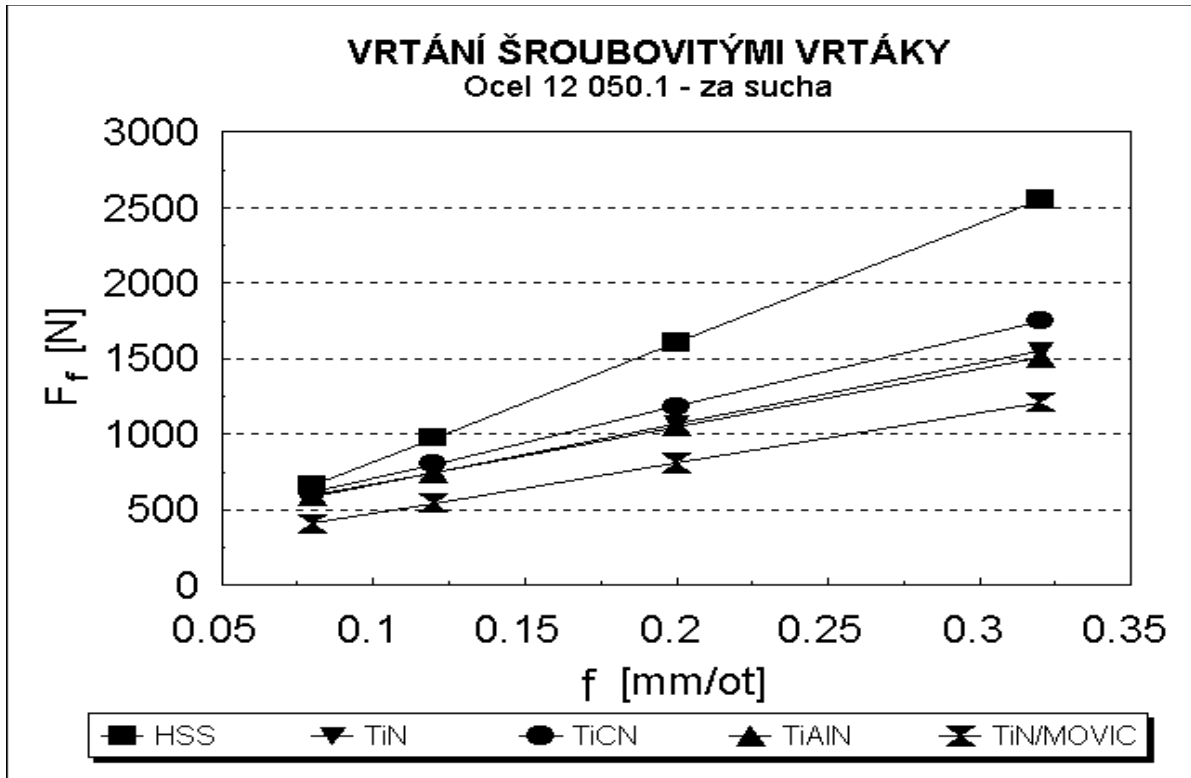
Kvantitativní rozbor účinku povlaků a chlazení je proveden v **tab. 4-6**, ze kterého vyplynuly tyto dílčí závěry:

- vrtání za sucha bylo vždy provázeno zhoršeným odvodem třísky, nárůstem axiální síly i krouticího momentu v závislosti na hloubce vrtané díry ;
- chladicí emulze byla schopna zabránit intenzivnímu ulpívání třísky na čele, zvláště při dovrtávání díry;
- nejvyšší přínos chladicí emulze vůči obrábění za sucha byl naměřen pro vrtání s nepovlakovaným vrtákem;
- byly pozorovány lineární regresní závislosti zatížení vrtáku v závislosti na velikosti posuvu;
- všechny testované povlaky prokázaly příznivý vliv na vrtání a vyšší účinek na snížení zátěže šroubovitého vrtáku než chladicí emulze;
- u povlaku TiN/Movic® způsobilo chlazení směrem k nižším posuvům (v rozsahu posuvů 0,20-0,08) zvýšení zatížení vrtáku (patrně v důsledku nižší teploty na troucích se površích);
- absolutně nejvyššího přínosu bylo dosaženo u kombinace povlaků TiN/Movic®, který se v tomto testu jevil jako ideální kombinace pro tyto podmínky vrtání;
- odolnost a fyzikální účinky měkkého povlaku Movic® postupně klesaly s počtem odvrtných děr a přibližně po 50 odvrtných děrách převzal ochranné účinky podkladový povlak TiN, i když na mnoha površích byly i nadále reziduální plochy pokryty MoS<sub>2</sub>, zklidňující průběh vrtání a odvod třísky.

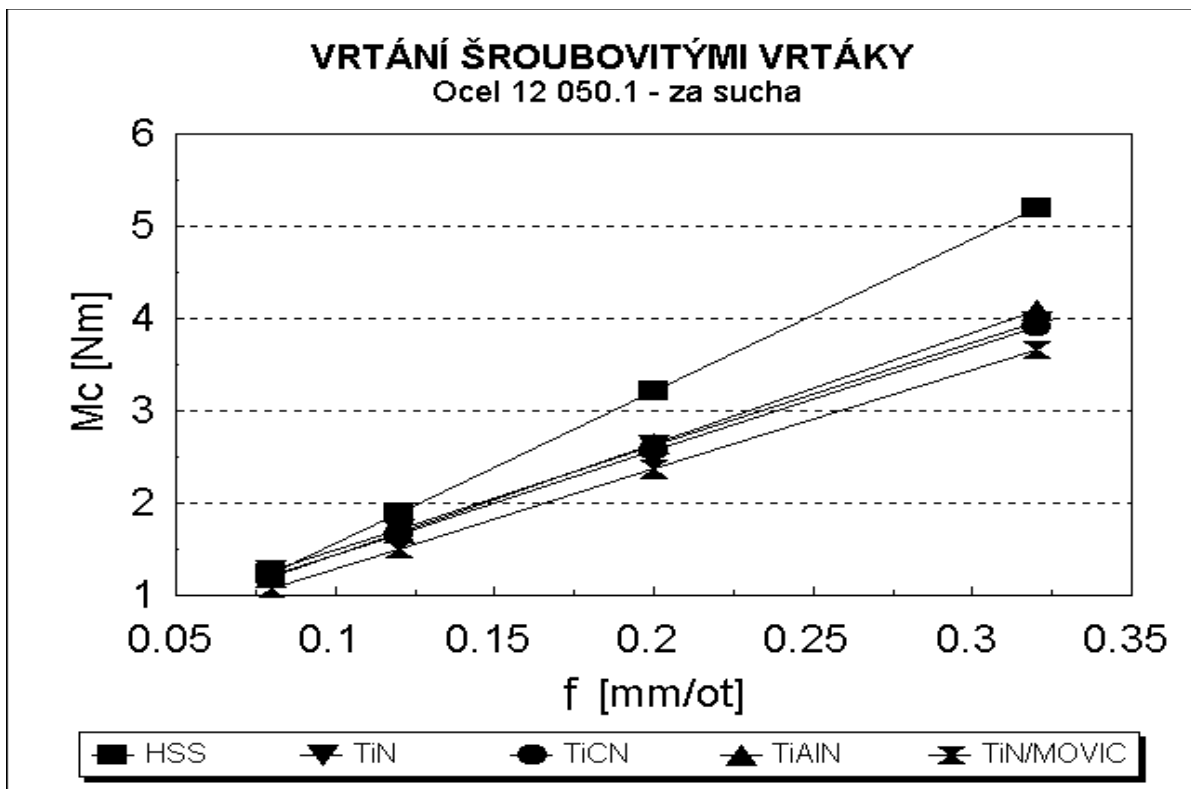
#### 4. Závěr

Vyrobít dokonalý tvrdý povlak na rychlořezné oceli je pravděpodobně náročnější než u slinutých karbidů, neboť jsou více citlivé na použité výrobní technologie a další způsoby předúprav a pouprav funkčních povrchů břitů. Použití povlakovaných nástrojů v celkovém rozboru vyhodnocení nepředstavuje zvyšování nákladů, ale naopak v konečném výsledku jejich významnou úsporu. I přes moderní trend eliminace chladicích kapalin a podpoře obrábění za sucha tyto zkoušky, jakož i další zkušenosti u obdobných testů povlakovaných HSS ocelí prokázaly jejich plnou funkčnost a užitečnost.

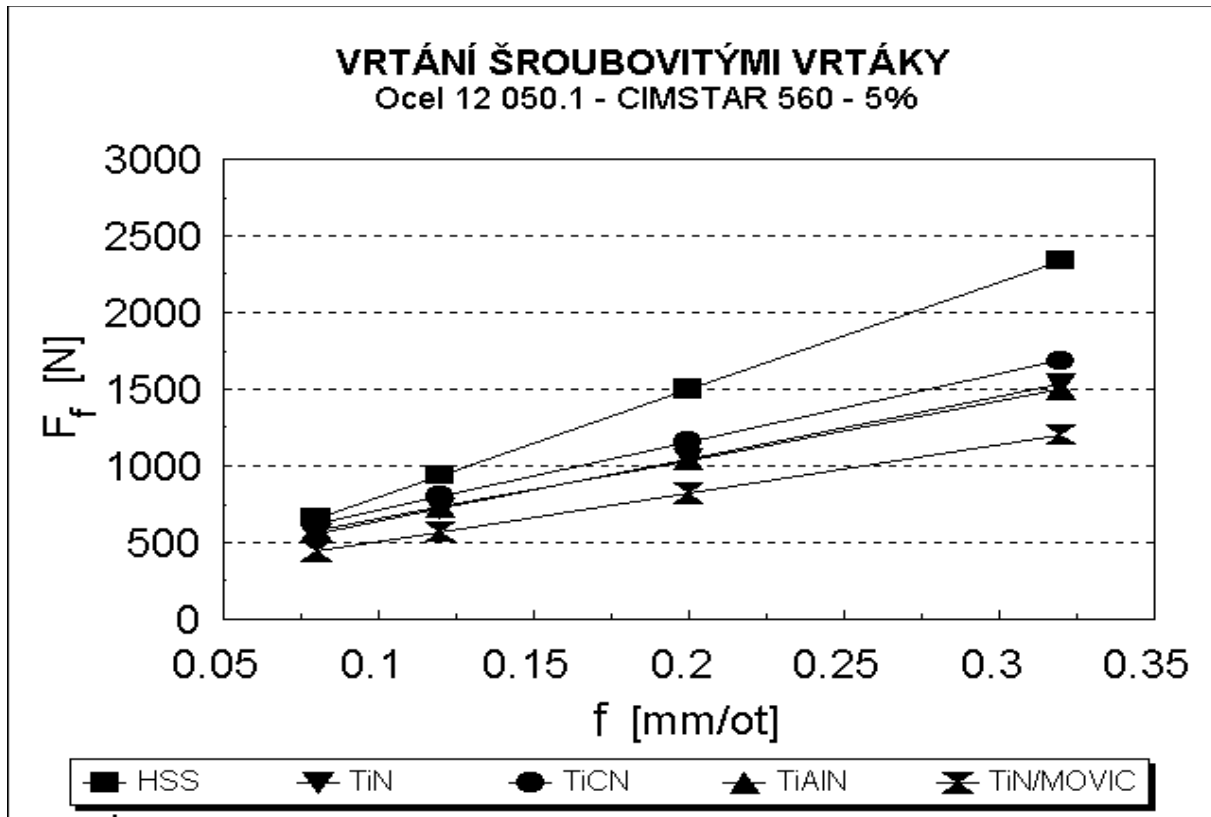
*(další závěry doplní posluchači dle dílčího zadání a upřesnění vyučujícího)*



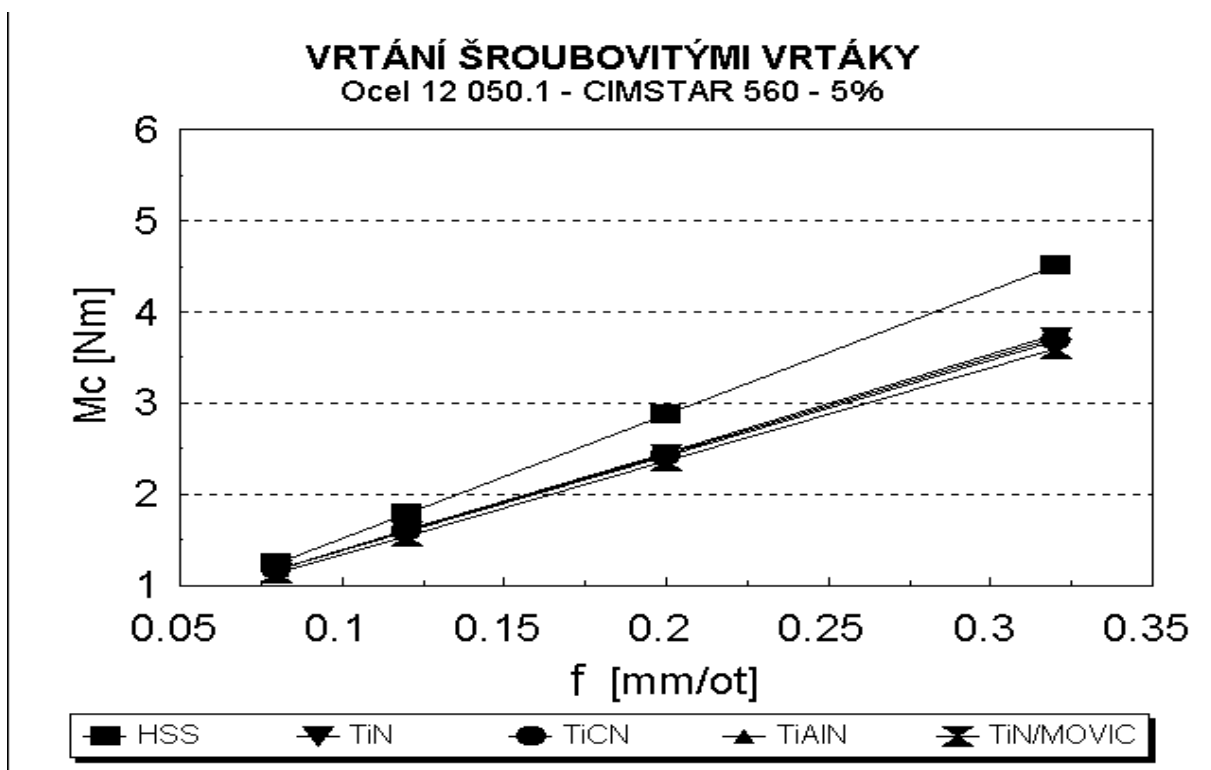
Obr. 4 Časový průběh axiální síly pro různé PVD povlaky vrtáků a různé posuvy – za sucha.



Obr. 5 Časový průběh krouticího momentu pro různé PVD povlaky vrtáků a různé posuvy – za sucha.



Obr. 6 Časový průběh axiální síly pro různé PVD povlaky vrtáků a různé posuvy - s chlazením.



Obr. 7 Časový průběh kroutícího momentu pro různé PVD povlaky vrtáků a různé posuvy - s chlazením.

## 5. ANALÝZA ŘEZNÝCH VLASTNOSTÍ HRUBOVACÍCH FRÉZ

### Zadání:

Pro čelní frézování oceli se v současné době používají frézy čtyřzubé válcové hrubovací se 2 břity ke středu - DIN 844, typ NR (ISO 1641),  $\phi 14$  mm, které se vyznačují tvarovým profilem ostří. Tyto nástroje se vyrábí v provedení celokarbidovém (ISO K 20-40) nebo z rychlořezných ocelí (HSS Co8), vybrušované z plna.

Pro zvolený obráběný materiál (uhlíkatá ocel 12 050.1) a dané řezné podmínky obrábění určete rozdíly v celkovém silovém namáhání fréz při nesousledném frézování pro břit s ostřím spojitým a ostřím hrubovacím. Jako srovnávací frézu zvolte frézu pro drážky per DIN 327 (ISO 1641, ČSN 22 2192.1),  $\phi 16$  mm, která podobnou geometrií čela ( $\lambda_{cs} = 30^\circ$ ) a je ze stejného materiálu. Výrobce obou druhů nástrojů je ZPS-FN, a.s., Zlín. Při řešení uvažujte takové pootočení frézy, při kterém dosahuje fréza největší průřez třísky  $A_d$  (největší silové namáhání). Dále vyhodnoťte účinek PVD povlaků, aplikovaných na těchto frézách - TiN, TiN+, TiCN a TiAlN.

Měřené veličiny: síly  $F_x, F_y$  [N]

Hodnocená veličina: Celková síla působící na břit  $F$  [N].

Řezné podmínky:

$v_c = 30$  m/min,  $f_z = 0,05$  mm,  $a_p = 16,9$  mm,  $a_e = 2,0$  mm, chlazení: CIMSTAR 650 - 5%.

Tabulka 1 Popis naměřených souborů.

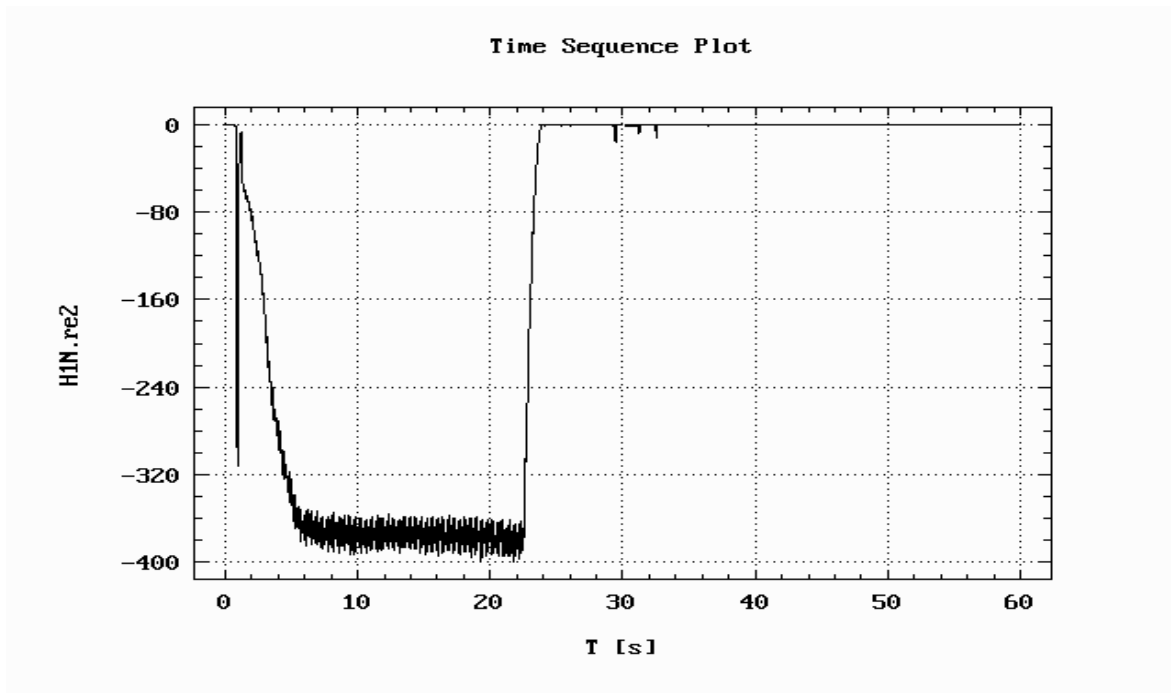
Druh frézy	Měřené soubory	$F_x$ [N] $\mu \pm \sigma$	$F_y$ [N] $\mu \pm \sigma$	$F$ [N] $\mu \pm \sigma$	Poznámka
DIN 844 (drážkovací)	d0n.re1 d0n.re2				
DIN 844 (drážkovací)	d1n.re1 d1n.re2				
DIN 844 (drážkovací)	d2n.re1 d2n.re2				
DIN 844 (drážkovací, povlak TiCN)	dticn.re1 dticn.re2				
DIN 327 (hrubovací)	h1n.re1 h1n.re2	+43,2 $\pm 0,9$	-392,0 $\pm 3,5$	-395,0 $\pm 10,1$	Kontrolní hodnoty
DIN 327 (hrubovací)	h3n.re1 h3n.re2				
DIN 327 (hrubovací)	h4n.re1 h4n.re2				
DIN 327 (hrubovací, povlak TiN)	tin1.re1 tin1.re2				
DIN 327 (hrubovací, povlak TiN+)	tin2.re1 tin2.re2				
DIN 327 (hrubovací, povlak TiAlN)	tialn.re1 tialn.re2				

$\mu, \sigma$  ... bodové odhady střední hodnoty a směrodatné odchylky působících sil  
 \*.re1 ...  $F_x$  [N] (dle orientace dynamometru KISTLER)  
 \*.re2 ...  $F_y$  [N] (dle orientace dynamometru KISTLER)

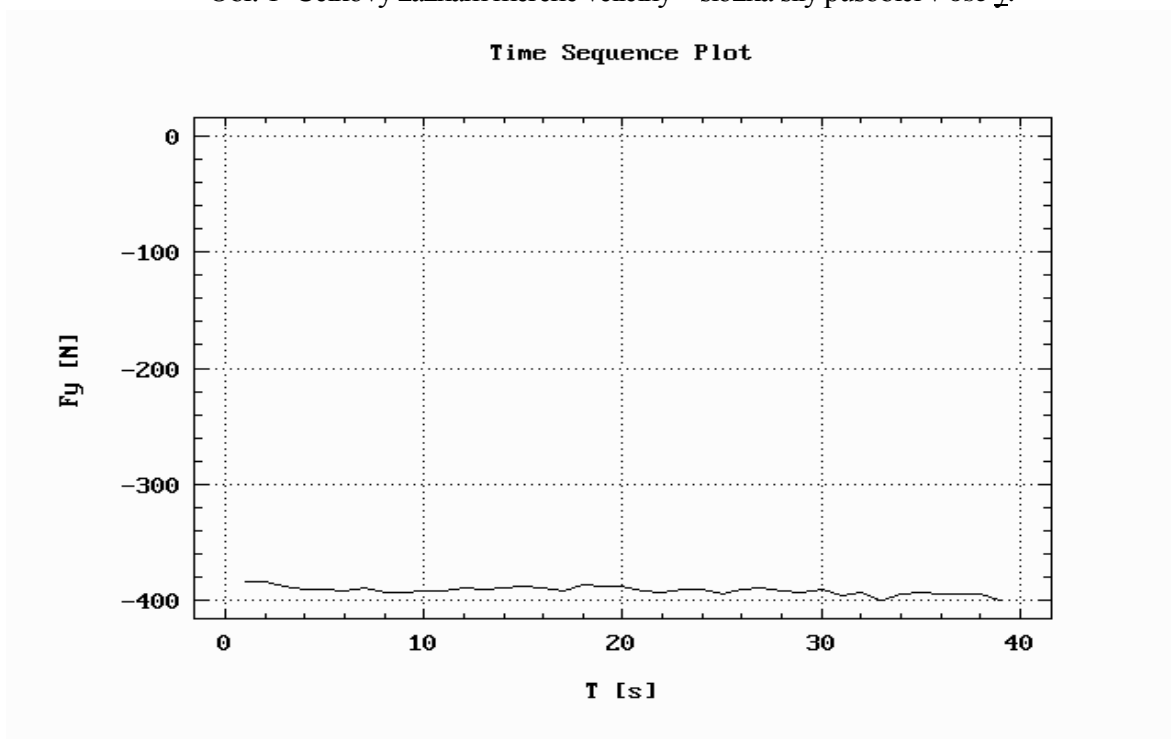


### Část řešení:

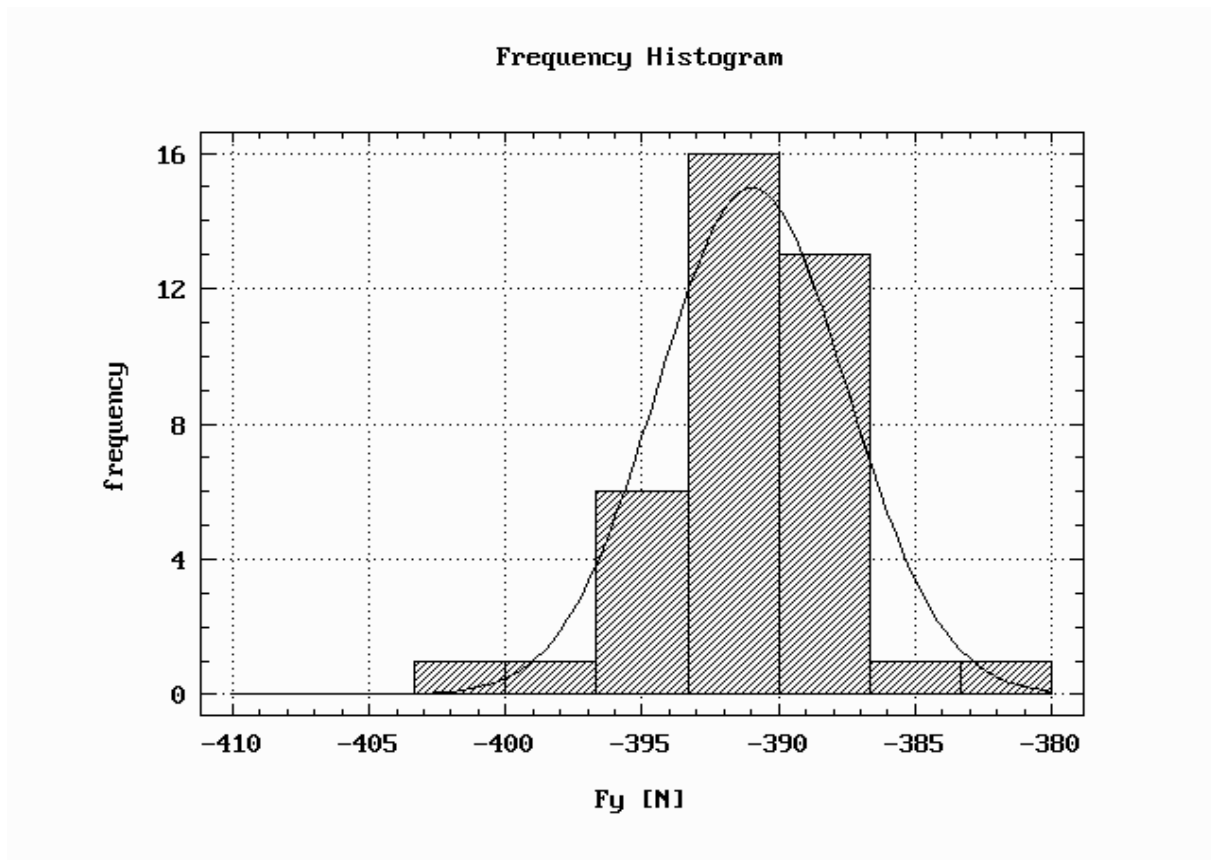
Řešení je ukázáno na příkladu souborů *hIn.re2*. **Obr. 1** znázorňuje celkový měřený záznam měřené složky síly, ze kterého jsou filtrována data odpovídající maximálním průřezům třísek – **obr. 2**. Tato data jsou popsána pomocí bodových odhadů střední hodnoty normálního rozdělení a směrodatné odchylky – **obr. 3,4**. Podobným způsobem lze vyhodnotit soubor *hIn.re1*. Celkové hodnoty řezných sil jsou určeny jejich vektorovým součtem s velikostmi graficky znázorněnými na **obr. 5**, uvedeným pro kontrolu výsledků.



Obr. 1 Celkový záznam měřené veličiny – složka síly působící v ose y.



Obr. 2 Filtrovaná data silové složky, odpovídající maximálním průřezům třísky.

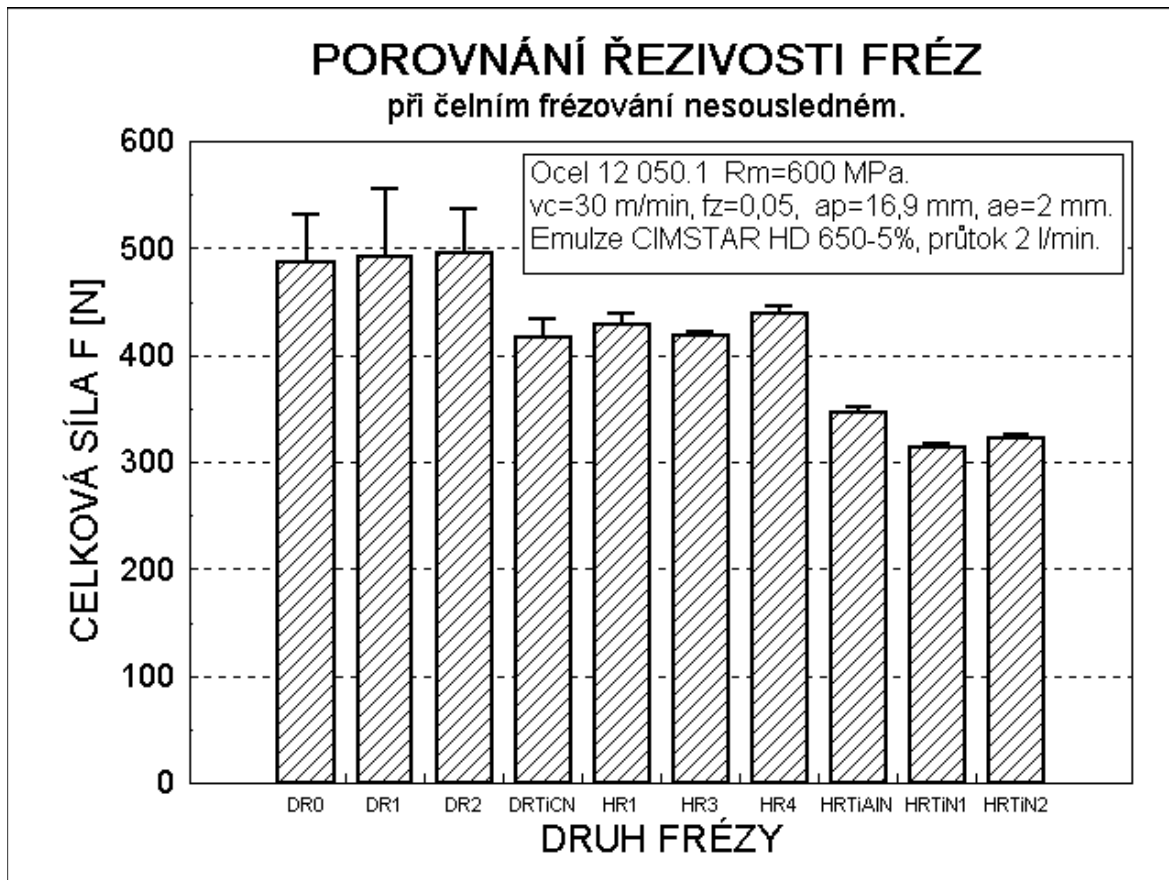


Obr. 3 Histogram dat filtrované silové složky, odpovídající maximálním průřezům třísky.

Variable:	Fy.var1
Sample size	39
Average	-390.962
Median	-391.1
Mode	-391.6
Geometric mean	-32768
Variance	11.9751
Standard deviation	3.4605
Standard error	0.554123
Minimum	-400.4
Maximum	-383.3
Range	17.1
Lower quartile	-393.1
Upper quartile	-388.2
Interquartile range	4.9
Skewness	-0.397389
Standardized skewness	-1.01315
Kurtosis	1.25907
Standardized kurtosis	1.60501
Coeff. of variation	-0.885125

1Help 2Edit 3Savscr 4Prtschr 5 6Go 7Vars 8Cmd 9Device 10Quit  
 SLIDE 1 9/ 5/ 3 21:54 STATGRAPHICS Vers.5.1 Display SLIDES

Obr. 4 Statistické zpracování dat filtrované silové složky, odpovídající maximálním průřezům třísky.



Obr. 5 Celkové vyhodnocení všech testovaných nástrojů podle silového namáhání.

### Závěr

Snížení řezných sil napomáhá jak povlakování tvrdými povlaky na bázi TiN, TiCN a TiAlN, tak i tvarování a dělení břitu. Nejnižší namáhání břitu frézy bylo pozorováno (za konstantního průřezu třísky a stejných řezných podmínek) u nástroje s hrubovacím ostřím, povlakovaným TiN, které představovalo snížení řezných sil přibližně o 35 % vůči frézám nepovlakovaným se spojitým ostřím.

## 5a. URČENÍ KROUTICÍHO MOMENTU PŘI ŘEZÁNÍ ZÁVITŮ MATICOVÝM ZÁVITNÍKEM

### Zadání:

Určete teoretický a skutečný průběh krouticího momentu při řezání závitu M6 Sh6 maticovým závitníkem M6 ISO 3 (výrobce Narex Ždánice, a.s.) – viz **obr. 1** - při použití různých řezných past. Pro dané podmínky obrábění určete velikost měrné řezné síly a její poměr k pevnosti materiálu.

Materiál o;brobku: ocel ČSN 411500.0, polotovár: tyč plochá 12x22 mm, ČSN 42 5522-63 (válcovaná za tepla), obrobená bez kúry na průřez 9x20 mm,  $R_m = 409-608$  MPa.

Průměr předvrtané díry:  $\phi 5$  mm (dle ČSN 01 4012).

Délka řezného kužele závitníku měřená paralelně s osou nástroje:  $l_k = 5$  mm.

Vrcholový úhel metrického závitu:  $60^\circ$ , stoupání  $s = 1,00$  mm.

Obráběcí stroj: vrtačka stolní VS 20.

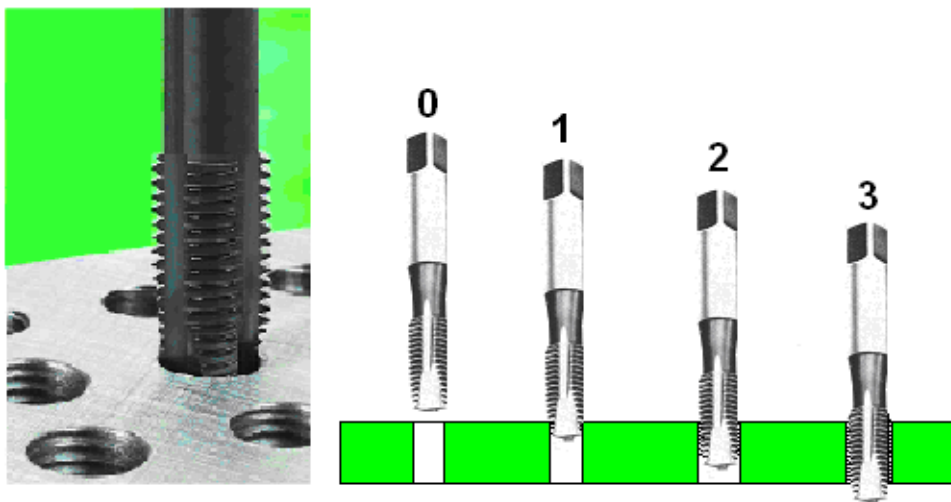
Řezné podmínky: otáčky  $280 \text{ min}^{-1}$ , posuv  $1,00 \text{ mm.ot}^{-1}$ .

Řezné pasty: CIMTAP® a CIMTAP CLF, výrobce Cimcool Europe, B.V., Holandsko, koncentrace 100%.

Způsob mazání: máčení závitníku před řezáním závitu.

Měřicí aparatura: piezoelektrický dynamometr Kistler 9272, řízený PC.

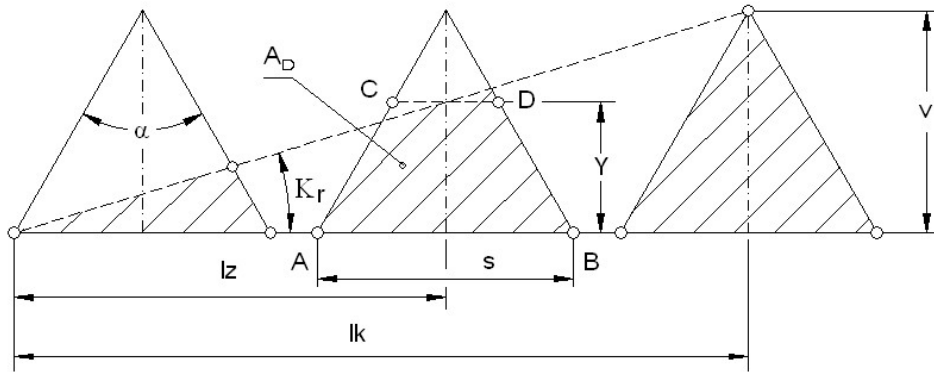
K řešení použijte SW Statgraphics (v.5 a vyšší) nebo podobný statistický program.



Obr. 1 Časový průběh řezání závitu maticovým závitníkem.

### Řešení:

Z geometrického rozboru úlohy podle **obr. 2** je obecný průběh řezného momentu závislý na měrné řezné síle a velikosti plochy třísky ve tvaru lichoběžníku o obsahu:



Obr. 2 Schéma průběhu průřezu třísky při řezání maticovým závitníkem.

$$A_D = y \cdot (AB + CD) / 2,$$

příčměž

$$y = lz \cdot \operatorname{tg} K_r$$

$$AB = s$$

a z podobnosti trojúhelníků vyplývá

$$CD = AB \cdot (v - y) / v = (s \cdot v - s \cdot y) / v,$$

příčměž

$$v = s / (2 \cdot \operatorname{tg} 30^\circ)$$

a

$$\operatorname{tg} K_r = v / lk.$$

Dosazením a úpravou je pak teoretický průběh plochy třísky dán vztahem

$$\begin{aligned} A_D &= lz \cdot \operatorname{tg} K_r \cdot (s + (s \cdot v - s \cdot y) / v) / 2 = \\ &= lz \cdot \operatorname{tg} K_r \cdot (2 \cdot s \cdot v - s \cdot lz \cdot \operatorname{tg} K_r) / 2 \cdot v = \\ &= (lz \cdot \operatorname{tg} K_r \cdot 2 \cdot s \cdot v - s \cdot lz^2 \cdot \operatorname{tg}^2 K_r) / 2 \cdot v = \\ &= ((s \cdot v) / 2) \cdot (2 \cdot lz \cdot \operatorname{tg} K_r / v - lz^2 \cdot \operatorname{tg}^2 K_r / v^2) = \\ &= A_{D_{\max}} \cdot (2 \cdot lz \cdot \operatorname{tg} K_r / v - lz^2 \cdot \operatorname{tg}^2 K_r / v^2), \end{aligned}$$

kde

$$A_{D_{\max}} = s \cdot v / 2$$

Při konstantní hodnotě měrné řezné síly závisí časový průběh řezného momentu na průřezu třísky, který lze rozdělit do třech intervalů podle hloubky zařezání řezného kužele závitníku:

1)  $l \in \langle 0, lk \rangle$

$$A_{D1} = A_{D_{\max}} \cdot (2 \cdot lz \cdot \operatorname{tg} K_r / v - lz^2 \cdot \operatorname{tg}^2 K_r / v^2)$$

2)  $l \in \langle lk, L \rangle$ ;  $L$  znamená hloubku závitníku, od které dojde k vyjždění závitníku z řezu

$$A_{D2} = A_{Dmax} = s \cdot v / 2$$

3)  $l \in \langle L, L+lk \rangle$

$$A_{D3} = A_{Dmax} \cdot [1 - (2 \cdot lz \cdot \text{tg } K_r / v - lz^2 \cdot \text{tg}^2 K_r / v^2)]$$

Výpočet dílčích hodnot průřezu třísky je uveden v **tab. 1** a graficky znázorněn na **obr. 3**. Z hlediska výroby závitů je důležitý časový interval  $\underline{2}$ , ve kterém je v podstatě řezný kužel maticového závitníku plně zařezán do materiálu a nástroje zatížen v podstatě plným výkonem – **obr. 4**. U nástroje ostrého je tato hodnota po dobu řezání téměř konstantní a mění se převážně v důsledku opotřebení závitníku v důsledku třecích (pasivních) sil. Tento interval hodnot je nutno odseparovat od náběhové a výběhové fáze řezání, což lze provést procedurou *Data Management* v programu *Statgraphics*. Další testování je zaměřeno na určení druhu rozdělení, kterému hodnoty v tomto rozdělení podléhají. V obou případech (u řezné pasty CIMTAP® i CIMTAP CLF se jedná o normální rozdělení, kterého hustota rozdělení je funkcí střední hodnoty a rozptylu – **obr. 5,6**. Krabicové diagramy graficky znázorňující horní a dolní kvartily, polohy mediánů, minimálních a maximálních hodnot jsou na **obr. 7**.

Po provedení těchto testů je možno testovat hypotézu o rozdílu středních hodnot rozdělení řezných momentů pro jednotlivé sledované produkty, případně i hypotézu o shodě teoretických rozptylů – **obr. 8**. Tento statistický test v našem případě zamítl se spolehlivostí 95% hypotézu  $H_0$ , což vede k závěru, že mezi testovanými produkty byl shledán statisticky významný rozdíl v dosažených středních hodnotách krouticích momentů, svědčící ve prospěch hypotézy  $H_1$ , předpokládající tento rozdíl.

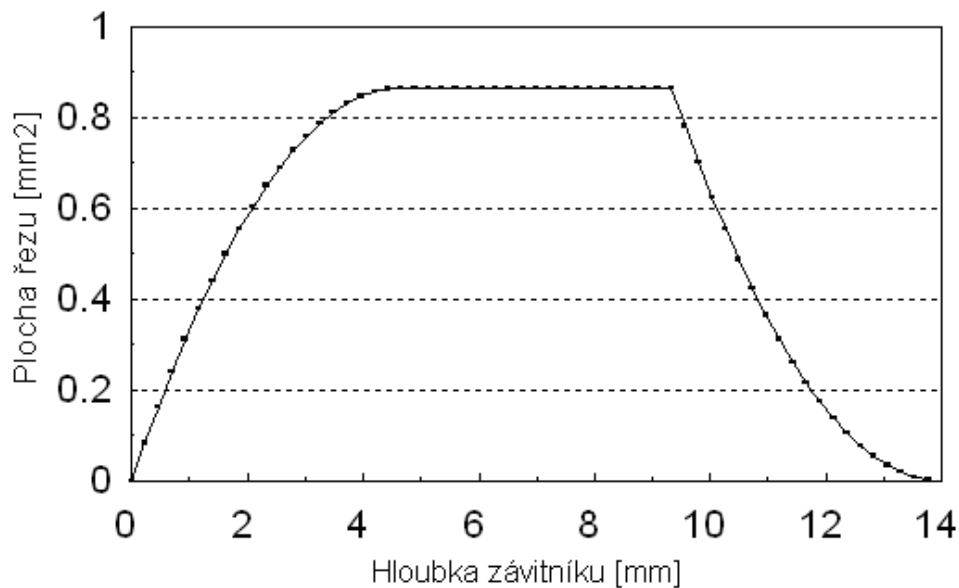
### Závěr:

Zamítnutí hypotézy  $H_0$  vede k závěru, že mezi testovanými řeznými pastami byl shledán statisticky významný rozdíl v jejich řezivostních účincích, vyjádřených pomocí střední hodnoty řezného momentu, potřebného k tvorbě třísek při inserci maticového závitníku. Tento rozdíl může mít přímý vliv na celkovou trvanlivost nástroje, neboť způsobuje vyšší namáhání nástroje a rychlejší rozvoj opotřebení. Pro přesnou kvantifikaci tohoto účinku je však nutno provést další zkoušky - tzv. *dlouhodobé zkoušky řezivosti nástrojů*.

Tab. 1 Průřezy třísek v jednotlivých časových fázích řezání závitu (v mm<sup>2</sup>).

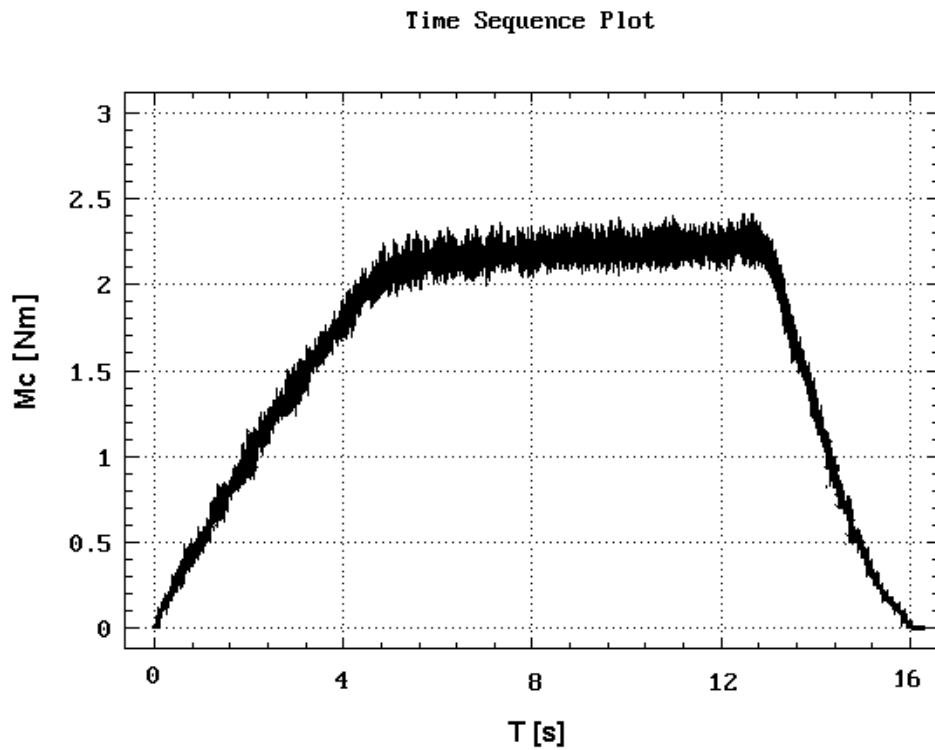
Časový interval 1	Časový interval 2	Časový interval 3
0	.866	.866
8.443499E-02	.866	.781565
.16454	.866	.70146
.240315	.866	.625685
.31176	.866	.55424
.378875	.866	.487125
.44166	.866	.42434
.500115	.866	.365885
.55424	.866	.31176
.604035	.866	.261965
.6495	.866	.2165
.690635	.866	.175365
.72744	.866	.13856
.759915	.866	.106085
.78806	.866	7.794002E-02
.811875	.866	5.412501E-02
.83136	.866	3.464001E-02
.846515		1.948501E-02
.85734		8.660006E-03
.863835		2.165003E-03
.866		0

### ČASOVÝ PRŮBĚH PRŮŘEZU TŘÍSKY při řezání maticovým závitníkem M6 SH6

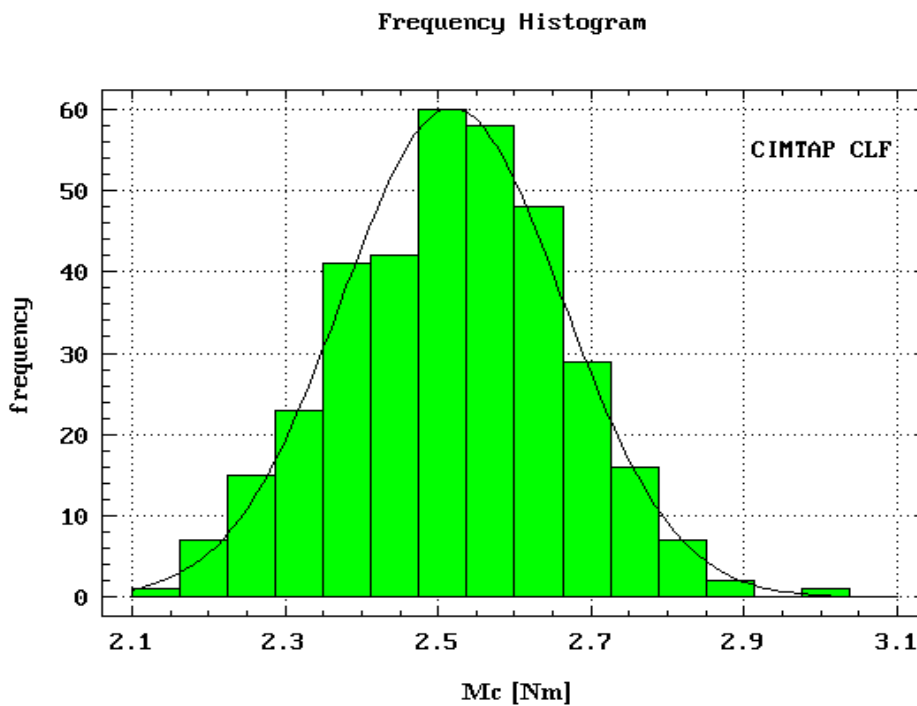


Obr. 3 Teoretický průběh plochy řezu v závislosti na hloubce závitníku.

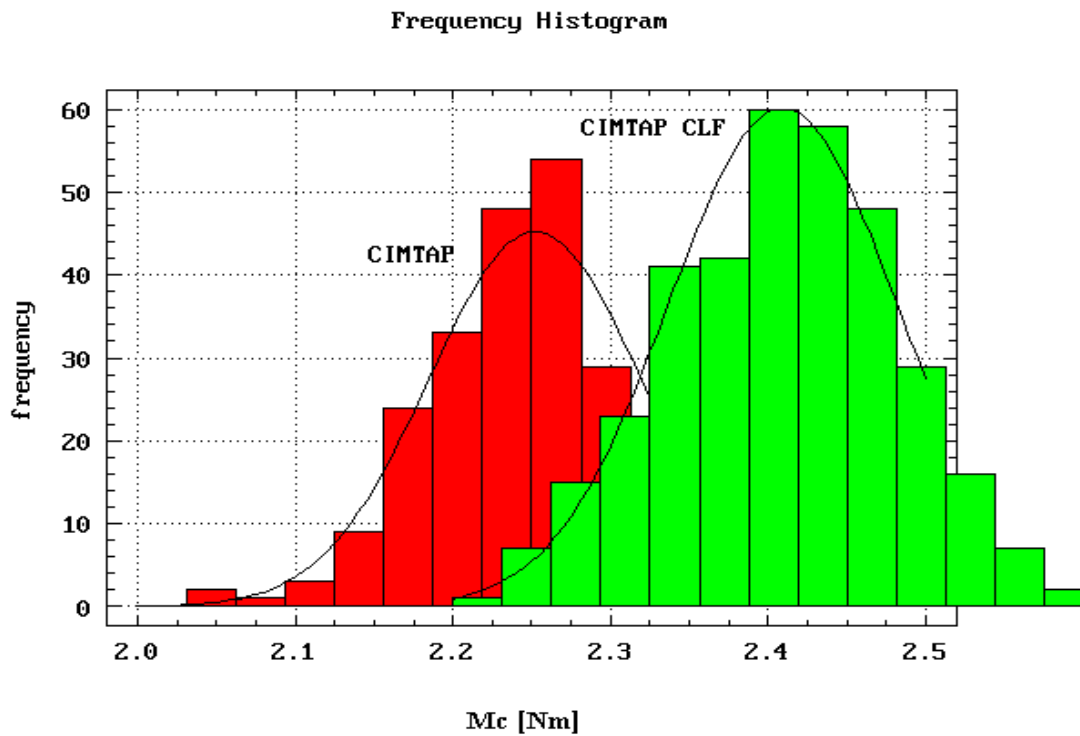




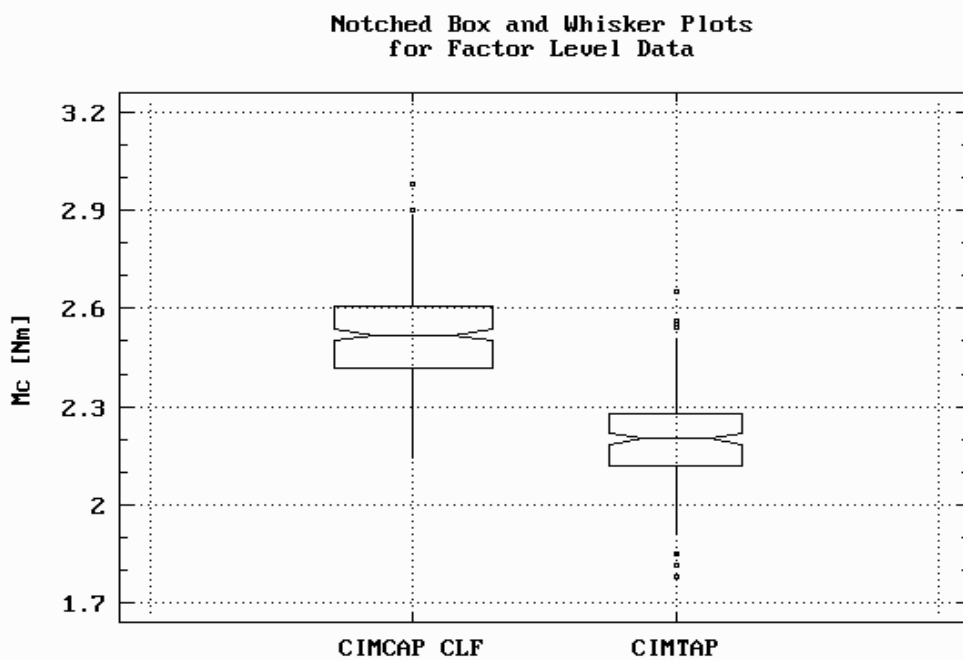
Obr. 4 Reálný průběh krouticího momentu v závislosti na hloubce řezaného závitu maticovým závitníkem.



Obr. 5 Histogram hodnot krouticího momentu z ustálené doby řezání pro řeznou pastu CINTAP CLF



Obr. 6 Histogramy hodnot kroutcích momentů z ustálené doby řezání pro řezné pasty CINTAP® a CINTAP CLF.



Obr. 7 Krabicové diagramy kroutcích momentů z ustálené doby řezání pro řezné pasty CINTAP® a CINTAP CLF.

Two-Sample Analysis Results				
Sample Statistics:		CIM1.var1	CIM2.var1	Pooled
Number of Obs.		350	350	700
Average		2.51832	2.20426	2.389
Variance		0.0210669	0.0182358	0.019902
Std. Deviation		0.145145	0.13504	0.141074
Median		2.519	2.202	2.396
Difference between Means = 0.314059				
Conf. Interval For Diff. in Means:				
(Equal Vars.)	Sample 1 - Sample 2	0.290974	0.337143	593 D.F.
(Unequal Vars.)	Sample 1 - Sample 2	0.291262	0.336855	547.8 D.F.
Ratio of Variances = 1.15525				
Conf. Interval for Ratio of Variances:				
	Sample 1 ÷ Sample 2	0		Percent
Hypothesis Test for H0: Diff = 0				
	vs Alt: NE	Computed t statistic = 26.7252		
	at Alpha = 0.05	Sig. Level = 0		
		so reject H0.		
1Help	2Edit	3Savscr	4Prtscr	5
6Go	7Vars	8Cmd	9Device	10Quit
SLIDE 2	8/ 6/ 3	07:37	STATGRAPHICS	Vers.5.1
			Display	SLIDES

Obr.8 Výsledky dvouvýběrové analýzy středních hodnot řezných momentů pro oba sledované produkty CIMTAP® a CIMTAP CLF, potvrzující statisticky významný rozdíl.

## 6. TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY OBJEMOVÉ TVAŘITELNOSTI

Cílem těchto zkoušek je zjišťování důležitých charakteristik materiálu z hlediska jeho chování ve tvářecím procesu. Jsou to například charakteristiky: Přirozený přetvárný odpor, technologický přetvárný odpor, pēchovatelnost, kovatelnost a další.

Nejčastěji používané zkoušky objemové tvařitelnosti materiálů jsou:

- Tlaková (pēchovací) zkouška s válcovými vzorky s rovnými čely,
- Tlaková zkouška na vzorcích s upravenou geometrií kontaktních ploch vzorek- nástroj,
- Krutová zkouška ,
- Tahová zkouška,
- Zkouška pēchovatelnosti a tvařitelnosti materiálu přijatá organizací CIRP-F a její modifikace z hlediska geometrie podélných vrubů na volném povrchu válcových vzorků a třecích podmínek v procesu pēchování.

První čtyři zkoušky jsou používány za různých teplot ohřevu od pokojové teploty přes teplotu poloohřevu materiálu až po tváření za tepla- kování.

### 1. Zjišťování křivek přetvárného odporu materiálů

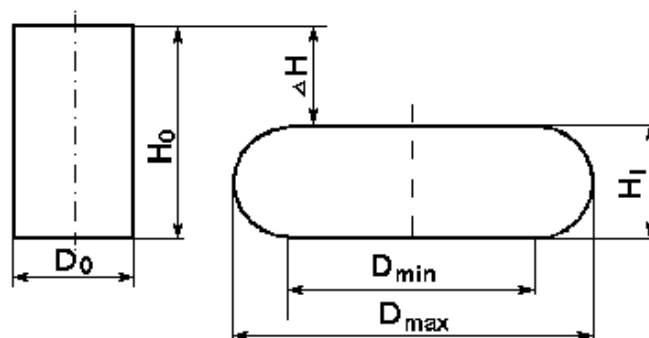
#### 1.1. Pēchovací zkouška se vzorky s rovnými čely a vzorky podle Rastēgajeva

K tomuto účelu se dají použít první čtyři typy zkoušek . Existuje pět dominantních faktorů, podle kterých se dá vybrat nejvýhodnější zkouška , kterou jsou přetvárný odpor materiálu a skutečná deformace co nejpřesněji zjišťovány.

Na základě srovnání jednotlivých teplot, rozsahu práce a hospodárnosti vychází jako neoptimálnější pēchovací zkouška. V současnosti se pro ni používají následující typy vzorků:

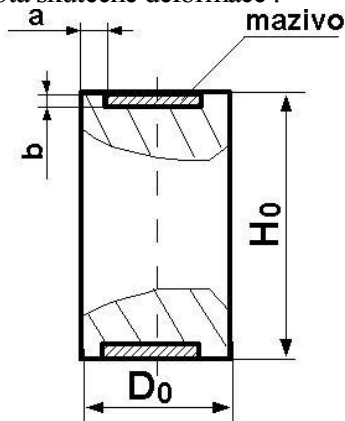
- válcové vzorky s rovnými čely,
- válcové vzorky s čelním vybráním podle Rastēgajeva,
- válcové vzorky s čelním vybráním podle Siebela a Pompa.

Objevují se i originální tvary vzorků, které se ovšem mohou měnit s testovaným materiálem, což už vyžaduje podstatně vyšší náklady na provedení zkoušek.



Obr. 1 Výchozí a spēchovaný vzorek s rovnými čely pro pēchovací zkoušky.

U válcových vzorků s rovnými čely se doporučuje štíhlostní poměr  $H_0/D_0 \in \langle 1.5, 1.6 \rangle$ . Obdobné doporučení platí u zkoušek podle Rastěgajeva. Čelní vybrání vzorků podle Rastěgajeva je vyplněno kyselinou palmitovou. Vzorky tak udržují během zkoušky válcový tvar. Po jeho narušení lze vzorky přesoustružit. V tom případě se ovšem bere jako výchozí poslední hodnota skutečné deformace.

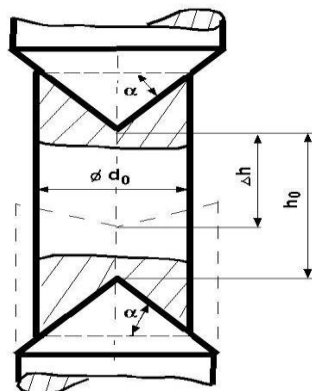


Obr. 2 Tvar vzorku pro pēchovací zkoušky dle Rastěgajeva

Při porovnání obou jmenovaných zkoušek bylo zjištěno, že křivka přetvárného odporu  $\sigma = f(\varphi)$  dle Rastěgajeva leží přibližně 12% pod křivkou se vzorky s rovnými čely.

### 1.2. Pēchovací zkouška vzorků s kuželovým čelním zahlobením podle Siebela a Pompa

V současnosti se používají vzorky s průměrem  $\varnothing 20$  mm a výšce  $H_0 = 40$  mm s kuželovým vybráním čelních ploch  $\alpha = 3^\circ$ , který odpovídá součiniteli tření  $\mu \approx 0.0524$ . Dále se používá jako u ostatních typů vzorků účinné mazání, které ještě snižuje tuto hodnotu tření. Zkušební vzorky jsou postupně spēchovány nejprve o 45 %  $H_0$ . Předpēchovaná tělesa se potom přesoustruží na  $\varnothing 14$  mm a  $H_0 = a$  a znovu se pēchují na 50% až 60%  $H_0$ . Pro nejtvrnější materiály se používá třetí pēchování, přičemž jsou zde dva náležitě obrobené vzorky postaveny na sebe a tvoří tak nový zkušební vzorek.



Obr. 3 Vzorek s kuželovým vybráním na čelech s nástrojem.

Okamžitý průřez vzorku se spočítá ze vztahu

$$S = S_0 \frac{H_0 + \frac{2}{3} \operatorname{tg} \alpha \cdot D_0}{H_0 - \Delta H + \frac{2}{3} \operatorname{tg} \alpha \cdot D_0 \sqrt{\frac{H_0}{H_0 - \Delta H}}},$$

kde  $S_0$  je výchozí průřez vzorku. Předpokládá se, že volná povrch vzorku je válcový. Tento jev je potřebné během zkoušky sledovat.

## 2. Zkoušky pěchovatelnosti vzorků bez vrubu a s podélným vrubem

### podle CIRP- F

Skupina F- Forming této mezinárodní organizace vypracovala tuto metodu zkoušek a ověřovala ji na 25 pracovištích v Evropě, Japonsku a USA. Na základě statistického vyhodnocení a analýzy potvrdila reprodukovatelnost výsledků. Podklady pro stanovení podmínek zkoušek potom tvořily výzkumy významných světových odborníků v oboru tvařitelnosti kovů, kde byl specifikován vliv štíhlostního poměru

vzorků  $\frac{H_0}{D_0}$ , třecí podmínky v kontaktních plochách, tvar a rozměry vrubů.

Při těchto zkouškách se používají dva typy válcových vzorků a to s hladkým volným povrchem pláště a v předepsaným podélným vrubem tvaru „V“ na plášti. Aby bylo vyloučeno vybočení vzorku volí se poměr

$\frac{H_0}{D_0} \approx 1.5$  ( $H_0 = 21$  mm,  $D_0 = 14$  mm). Vzorky s vrubem jsou sice obtížněji vyrobitelné, ale vykazují trhliny při

malých deformacích, oproti hladkým vzorkům. Na základě výzkumů na výzkumných pracovištích postačuje provést dokončení vzorků jemným soustružením ( $R_a \approx 1.6$ ).

Nástroj se skládá ze dvou rovnoběžných kovadel, u nichž jsou ve středu středící kužely a od nich postupují soustředné drážky. Tak je zaručeno co největší tření v kontaktních plochách vzorek- nástroj. Kovadla jsou vyrobena z příslušné nástrojové oceli zušlechťené na tvrdost HRC 62 až 64. Zkouška předpokládá rychlost nástroje  $v_s \in (0.1, 1.0)$ .

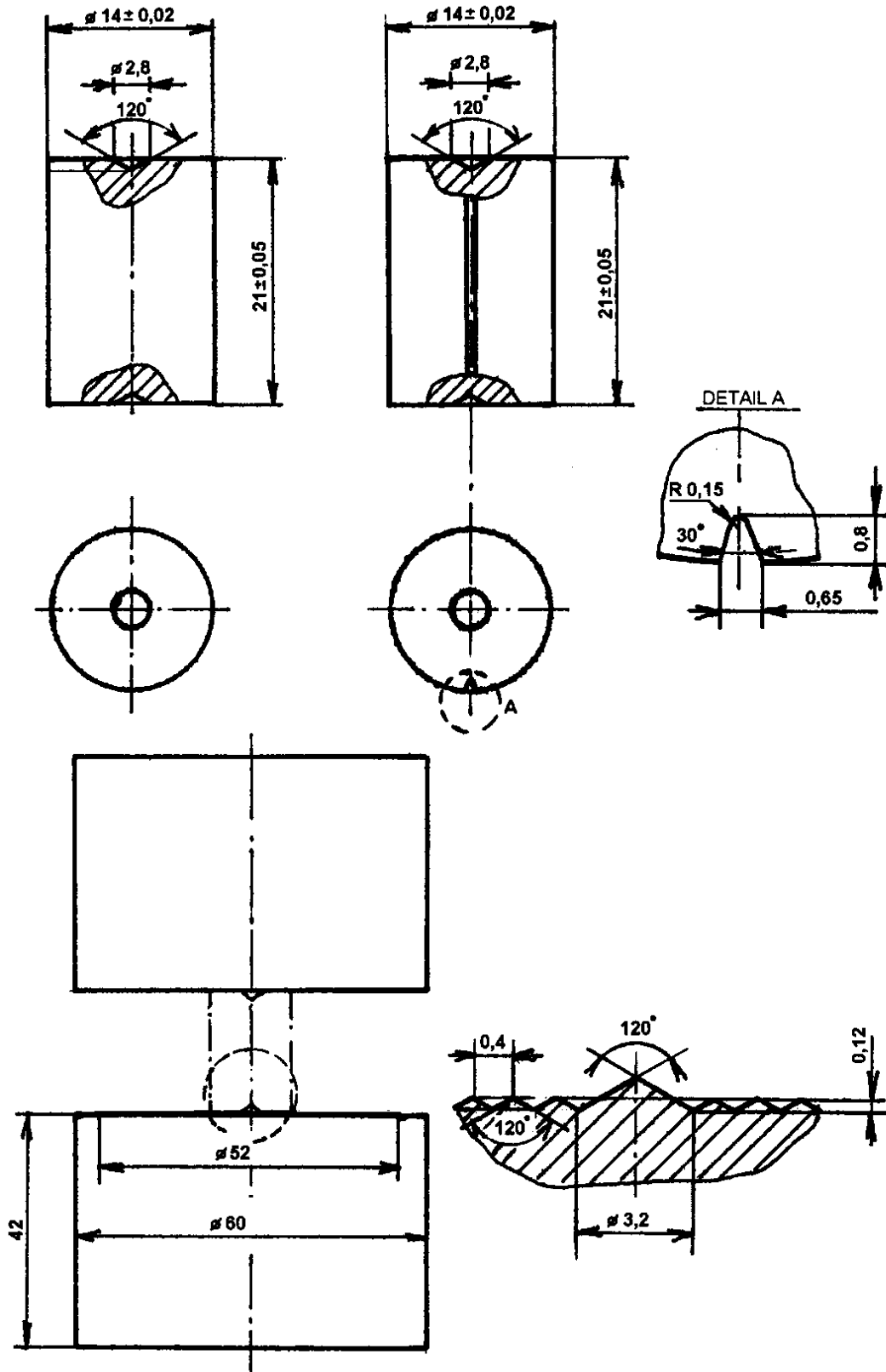
Zkouška se provádí v několika stupních. Hladký vzorek se v prvním stupni spěchuje o 50%  $H_0$ , vzorek s vrubem se spěchuje o 30%  $H_0$ . Poté, pokud vzorek nepraskne lze konstatovat, že je tvařitelný za studena a pěchuje se v každém dalším kroku o 1.5% až 2.5%  $H_0$ . Což představuje spěchování o 0.32 až 0.52 mm. V pěchování se pokračuje tak dlouho dokud se ve vrubu nebo na volném povrchu neobjeví trhliny. Potom se změří „kritická výška vzorku“. Jako měřítko tvařitelnosti (pěchovatelnosti) za studena je „kritické poměrné přetvoření výšky vzorku“

$$\varepsilon_h = \frac{H_0 - H_c}{H_c}, \quad \varepsilon_{hc} = \frac{H_0 - H_c}{H_c} 100 [\%].$$

Pro objektivizaci měření se provede ještě další pěchovací krok. Jestliže v předešlém kroku byly pochybnosti o vzniku trhlín, a tyto se v tomto kroku zvětší bere se předchozí přetvoření jako směrodatné. Doporučen je tříčlenný zkušební tým, který provádí i sledování vzniku trhlín. Autoři uvádí, že hodnota „kritické poměrné

přetvoření výšky vzorku“  $\varepsilon_h = \frac{H_0 - H_c}{H_c}$  lze zařadit do databáze mechanických charakteristik materiálu a

využít ji při identifikaci materiálu spolu s uvedenými charakteristikami.



Obr. 4 Vzorky pro zkoušku CIRP-F, globální a lokální geometrie nástroje



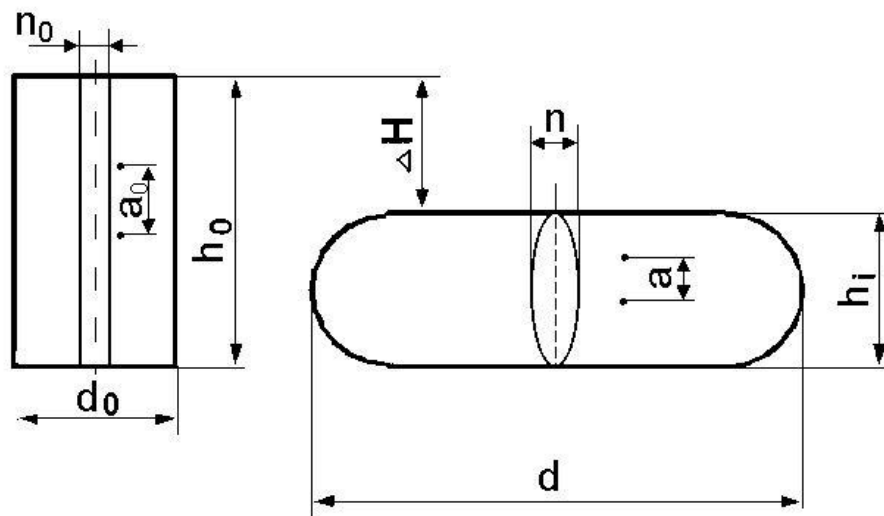
Pěchovací nástroj se skládá ze dvou rovnoběžných kovadel, jejichž čela jsou opatřena středícími kužely soustřednými drážkami, které mají zajistit přesně definované a reprodukovatelné třecí podmínky (statické tření), proto jsou vždy před každým pěchovacím krokem kovadla odmaštěna.

### 2.1. Modifikace zkoušek pěchovatelnosti polotovarů s podélnými vrubů

*Nejdůležitějšími faktory, které mají zásadní vliv na pěchovatelnost válcových polotovarů jsou:*

- *tření v kontaktních plochách polotovar- nástroj*
- štíhlostní poměr vzorků
- tvar a geometrie podélných vrubů na povrchu vzorku
- předchozí tepelné a mechanické zpracování materiálu polotovarů.

Pro většinu polotovarů v objemovém tváření lze zkonstruovat mezní diagramy porušení (FLD) jako závislost hlavních deformací, kde

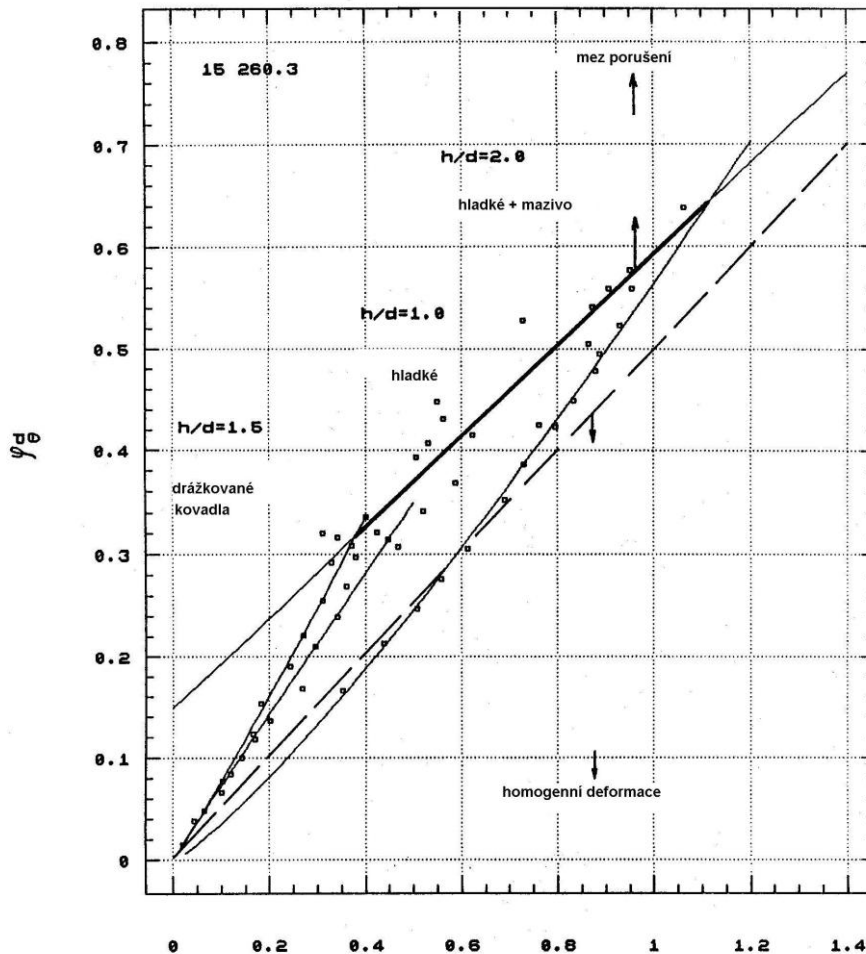


Obr. 5 Vzorky s vrubem s rozměry pro výpočet globálních a lokálních deformací.

$\varphi_{\theta}^d = \ln \frac{d}{d_0}$  je globální obvodová deformace vzorku,

$\varphi_{\theta}^n = \ln \frac{n}{n_0}$  je lokální obvodová deformace vzorku,

$\varphi_z^a = -\ln \frac{a}{a_0}$  je lokální axiální deformace vzorku.



Obr. 6 Diagram mezního porušení FLD s trajektoriemi globálních deformací a mezi porušení.

Většinou lze lomové hodnoty deformací aproximovat přímkou, která potom definuje mez porušení materiálu za různých technologických a zkušebních podmínek.

## Cvičení č. 6: Stanovení přirozeného přetvárného odporu, měrné přetvárné práce a deformační rychlosti pomocí pýchovací zkoušky

### Zadání:

- 1) Popište metodiku pýchovací zkoušky a měřicí řetězec analogové a digitální pýchovací zkoušky.
- 2) Pomocí statistického vyhodnocení naměřených veličin z pýchovací zkoušky zadaného materiálu proveďte aproximaci závislosti přirozeného přetvárného odporu  $\sigma_p$ , měrné přetvárné práce  $a$  na skutečné deformaci  $\varphi$  vhodným empirickým modelem.

Potřebné výpočtové vztahy:

$$\varphi_i = \ln \frac{H_0}{H_i} \dots\dots\dots \text{okamžitá skutečná deformace [-]},$$

$$\dot{\varphi}_i = \frac{\Delta H}{\Delta t} \dots\dots\dots \text{okamžitá hodnota rychlosti deformace [s}^{-1}\text{]},$$

$$V = \frac{\pi \cdot D_s^2 \cdot H_i}{4} \Rightarrow D_s \dots\dots\dots \text{objem vzorku [mm}^3\text{]},$$

$$D_s \dots\dots\dots \text{střední průměr vzorku [mm]},$$

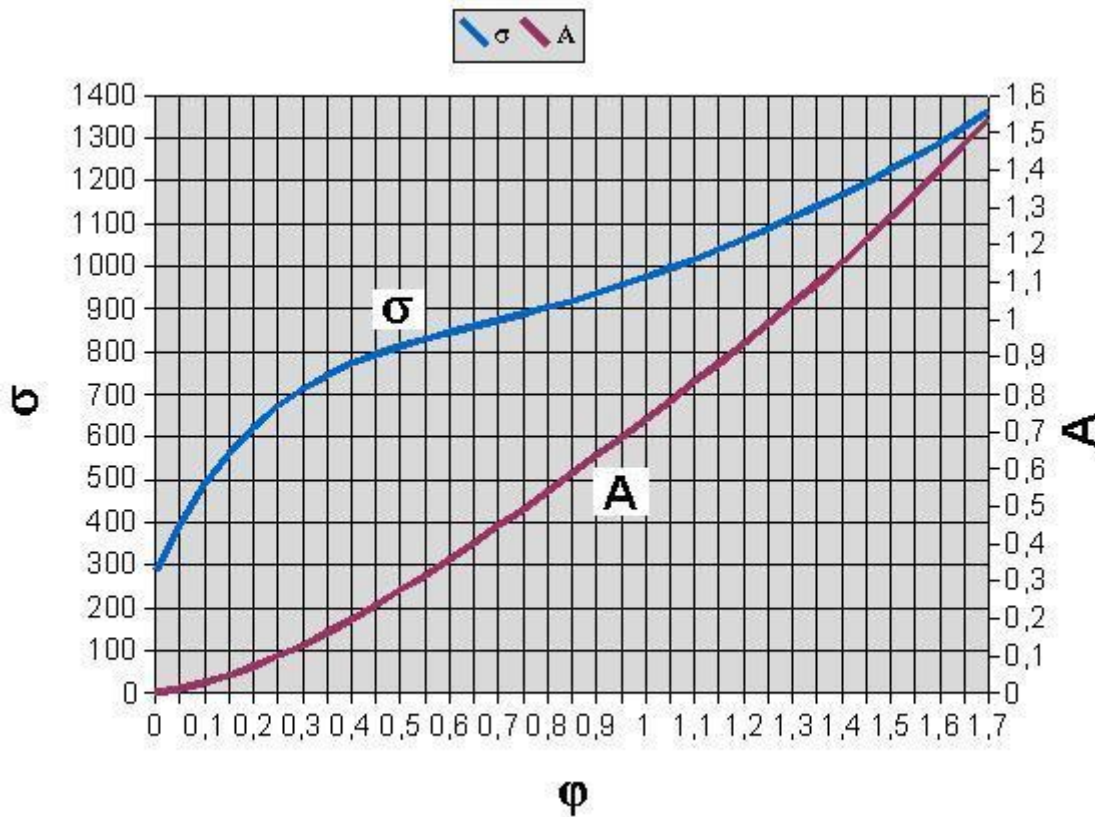
$$\sigma_{p_i} = \frac{4 \cdot F_i}{\pi \cdot D_{s_i}^2} \dots\dots\dots \text{okamžitá hodnota přirozeného přetvárného odporu [MPa]},$$

$$A_i = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^n (\varphi_n - \varphi_{n-1}) \cdot \left( \frac{\sigma_n + \sigma_{n-1}}{2} \right) \dots\dots\dots \text{okamžitá hodnota měrné přetvárné práce [J \cdot mm}^{-3}\text{]}.$$

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot z pěchování zkoušky oceli 17 248.4 při 300°C

$\Delta H$ [mm]	F [N]	Dmin [mm]	Dmax [mm]	t [s]	$\varphi$	$\sigma$ [MPa]	A [J/mm <sup>3</sup> ]
0,0000	53,4700	16,0300	16,0300	0,0000	0,0000	264,9437	0,0000
1,8200	100,4800	16,4500	16,7100	1,4000	0,0756	472,7791	0,0279
2,3400	107,9900	16,6200	16,9000	1,6000	0,0983	497,7737	0,0389
3,5800	131,3100	17,0000	17,4000	2,2000	0,1546	576,5094	0,0302
4,6100	146,7300	17,3500	17,8400	3,4000	0,2038	620,6267	0,0683
5,6200	164,5300	17,8200	18,2600	4,2000	0,2546	659,6904	0,1008
6,5700	182,3200	17,9700	18,8400	14,2000	0,3049	718,8672	0,1355
9,7400	235,6900	19,4900	20,6800	37,5000	0,4936	790,0016	0,2779
12,2000	296,5800	20,9700	22,5500	58,6000	0,6694	858,7277	0,4228
13,6000	353,5100	21,8900	23,9100	70,8000	0,7853	939,3353	0,5270
15,9000	414,0000	23,3000	25,5200	82,4000	1,0106	970,9547	0,7422
16,3100	484,3800	24,8600	27,0300	94,6000	1,0567	997,9170	0,7876
16,7900	534,9800	25,7900	27,5900	98,6000	1,1135	1024,1070	0,8450
17,5600	592,7100	26,8100	28,9000	104,2000	1,2120	1049,9270	0,9472
18,1100	664,2700	27,6700	29,9300	109,8000	1,2888	1104,6808	1,0299
18,5300	723,9700	28,4200	30,7800	113,3000	1,3517	1141,2556	1,1005
18,7400	774,5800	28,8600	31,2100	115,6000	1,3847	1184,0884	1,1389
19,2000	821,8200	30,0300	32,1600	117,8000	1,4610	1160,3167	1,2283
19,6100	960,2000	30,8000	33,2800	123,6000	1,5343	1288,7562	1,3181
20,1800	1088,6900	32,3900	34,8400	130,8000	1,6461	1321,2738	1,4640
20,3800	1229,0500	34,1100	34,9000	132,5000	1,6885	1344,9824	1,5205

V tabulce jsou uvedeny jednak změřené hodnoty pěchovací síly a deformace a poté změřené střední hodnoty průměrů pěchovaných vzorků. Měření bylo provedeno analogově na hydraulickém lisu CZR 600 prostřednictvím tenzometrického snímače tlakové síly a indukčního snímače dráhy přes dva měřicí kanály měřicího zesilovače KWS a záznam byl proveden na souřadnicovém x-y zapisovači. Dále tabulka obsahuje vypočtené hodnoty průřezů vzorků po spěchování a hodnoty přetvárného odporu, skutečné deformace a měrné přetvárné práce. Závislosti na Obr. 7 byly získány aproximací diskrétních hodnot metodou nejmenších čtverců. Pro aproximaci jsou velmi vhodné polynomy 3. A 5. Stupně.



Obr. 7 Závislost přetvárného odporu a měrné přetvárné práce na skutečné deformaci.

### **Studijní literatura:**

- [1] LANGE, K.: Lehrbuch der Umformtechnik. Berlin-Heidelberg - New York. Band 1,2. 1984.
- [2] JENNER, A. - DODD, B.: Cold Upsetting and Free Surface Ductility. J.Mech. Working Tech. 5 (1981), Amsterdam
- [3] KUHN, H.A.. Formability Topics - Metallic Materials, ASTM STP 647 (1978)
- [4] KUDO, H. - SATO, K. - AOI, K.. On cold forgeability test. CIRP Ann., 16 (1968) str. 309-318
- [5] KUDO, H. - AOI, K.: Effect of Compression Test Condition upon Fracturing of Medium Carbon Steel - Study on Cold Forgeability Test: part II., J.Japan Soc. Tech. Plast., č.8, s. 17, 1967
- [6] TOZAWA, Y.: Abstract from Report on Collective Calibration Test of Cold Upsetability of S45C, Matls. Subgroup Jap. Cold Forging Committee, 1. 1975
- [7] OLLSON, K. - KARLSSON, S. - MELANDER, A.. The Influence of Notches, Testing Geometry, Friction Conditions and Microstructure on the Cold Forgeability of Low Carbon Steels. Scand. J. Metallurgy 15 (1986) Denmark str. 238-256
- [8] DANNENMMAN, E. - BLEICH, M.: Verfahren zur Prüfung der Kaltstanchbarkeit. Draht 29 (1978), str. 703-706
- [9] BENEŠ, M a kol. Poradenská příručka č. 33- Křivky přetvárných odporů oceli, díl. 1, TVÚHP, Praha 1982
- [10] Drastík, F. – Elfmak, J. Plastometry a tvařitelnost kovů. SNTL, Praha 1977
- [11] BANABIC, H: at all. Formability of Metallic Materials. Springer- Verlag, Berlin 2000

## 7. ZKOUŠKY PRO ZJIŠŤOVÁNÍ KOEFICIENTU TŘENÍ S VLIVEM MAZIV

### 1. Tření a mazání ve tváření, vliv tření na tvářecí proces

Nejzřetelnějším vlivem tření na tvářecí proces (ale i v dalších technologiích a uložení strojních součástí) je to, že s jeho zvyšováním se zvětšuje i množství vynaložené energie nutné k přetvoření materiálu (uložení strojních součástí vznikají větší ztráty ve výkonu soustavy vlivem vyššího tření. V odborných publikacích se objevují odhady, že ztráty způsobené třením (zvýšení energetické náročnosti a opotřebení čini u hospodářsky vyspělých zemí kolem 2% jejich hrubého národního produktu (pro ČR je to přibližně 12 miliard Kč) za rok.

Úspory energie zajištěné volbou vhodných maziv, technologií dokončování funkčních ploch nástrojů a tvářených součástí a jejich materiálu včetně jeho zpracování činí až 11% celkových nákladů na energii nutnou pro zpracování vylisků a provoz strojních součástí.

Vnější tření je tedy charakteristickou veličinou při popisu procesu mezi tvářeným materiálem a nástrojem a má dvojí úlohu:

- pasivního činitele, který brzdí plastickou deformaci, zvyšuje spotřebu energie nutné pro přetvoření materiálu, způsobuje opotřebení tvářecích nástrojů, jejich porušení a nerovnoměrnost přetvoření nebo porušení tvářených součástí,
- aktivního činitele, který se realizuje v technologii válcování, která přímo vyžaduje aby mezi pracovními válci a válcovaným polotovarem byla zajištěna jistá hodnota tření, aby realizace technologie byla úspěšná.

Problémy snížení tření, opotřebení součástí na základě tření a aplikaci maziv se zabývá *tribologie*, která v sobě kombinuje řadu vědních oborů jako je kinematika, hydrodynamika, termomechanika, materiálové inženýrství a chemii maziv.

Při tváření materiálu převládá tzv. *mezní tření*. Mezní tření je kombinací suchého a kapalného tření.

Základním předpokladem vzniku tření je vzájemný pohyb nejméně dvou elementů tribologického systému- třecí dvojice. Tento vzájemný pohyb je způsoben účinkem vnějších sil a je provázen vznikem třecích sil.

Znalost hodnoty tření ve tvářecích procesech má velký význam pro praktické technologické a numerické výpočty. Hodnota součinitele tření je ve většině případů neznámá, ale na její správné volbě závisí přesnost výpočtu. Při špatné volbě součinitele tření se často naddimenzovávají tvářecí stroje a nástroje, nebo naopak a konečném důsledku dochází ve výrobě k velkým finančním ztrátám.

Proto jsou nesmírně důležité zkoušky pro zjišťování koeficientu tření a zkoušky maziv. Tyto testy jsou určeny pro objemové a plošné tváření a jsou odlišné od zkoušek tření a maziv u ložisek a dalších konstrukčních součástí.

#### 1.1 Veličiny ovlivňující tření

*Tyto veličiny členíme do tří skupin:*

- veličiny podmíněné tvářecím postupem- velikost a rozdělení normálních napětí, relativních rychlostí zvětšení povrchu, průběh teplot.

- b) veličiny podmíněné materiálem- chemické složení a velikost zrna tvářeného materiálu, povrch a tvrdost třecích ploch. Pokud dochází k možnosti tzv. svaření za studena je potřebné změnit materiál výtvarku nebo nástroje.
- c) veličiny podmíněné druhem maziva- viskozita, pevnost ve smyku, tlaková a tepelná stálost maziva, schopnost příznivé fyzikální a chemické reaktivity uvnitř tribologického systému.

## 1.2 Mazání a úpravy povrchu

*Mazání* je cílevědomé používání maziv v souvislosti a vytvořením nosných mazacích vrstev pro libovolný tvářecí postup.

*Úprava povrchu* je opracování polotovarů nebo již hotových dílů. Zahrnuje v sobě například čištění polotovarů před nanesením maziva, nebo po tvářením, když jsou zbytky maziva na povrchu nežádoucí.

### 1.2.1 Účel mazání

Mazivo má při tvářením materiálu dva hlavní úkoly:

- a) zabránit kovovému styku mezi nástrojem a polotovarem a tím zabránit jejich svaření za studena. Současně se tak chrání nástroj a tvářený polotovar před otěrem a opotřebením, zajišťuje se rovnoměrná kvalita výrobků a bezporuchová výroba
- b) snížení třecích ztrát a tím pádem i snížení přetvárných sil a energií potřebných pro danou tvářecí operaci.

Pro výběr maziva jsou rozhodující kritéria, která závisí na druhu tvářecího postupu nebo na použití výtvarku po tvářením. Tato kritéria jsou následující:

- spojení mazacího a chladícího účinku,
- ovlivnění toku materiálu při tvářením,
- obtížnost tvářením,
- jednoduchost nanášení a odstraňování maziva,
- ochranný účinek maziva proti korozi,
- požadavky na velikost pracoviště, bezpečnost a hygienu práce,
- vhodnost maziva v souvislosti s dalším zpracováním polotovaru (např. svařováním),
- hospodárnost.

Je nepochybné, že zvláště při tvářením za studena jako je např. protlačování dochází k velkému namáhání nástroje měrnými tlaky. Zde se využívá amorfních vrstev na vstupních polotovarech, které vznikají *fosfátováním* a *oxalátováním* polotovarů. Ty potom snadno absorbují příslušné mazivo a udrží ho v průběhu tvářením. Dále je zde vhodné použití maziv s *EP aditivu* (jde o vysokotlaké přísady). Jsou to látky na bázi volných mastných kyselin modifikovaných Cl, P, As a S. Tyto přísady vytváří při vysokých tlacích nebo teplotách (kolem 200°C) po rozpadu Cl iontů tenké vrstvy chloridového filmu s nízkou hodnotou součinitele tření a vysokou odolností. As a P sloučeniny zvyšují odolnost proti tlaku mazací vrstvy. Vrstvy spočívají v chemické reakci mezi mastnými kyselinami a oxidovými vrstvami a nazývají se *kovová mýdla*. Ty také vykazují poměrně nízké hodnoty součinitele tření. Pro zvlášť energeticky náročné procesy se používají speciální úpravy povrchu nástrojů, polotovarů a vrstev maziv. Patří sem například hydrodynamické protlačování, nanášení Al a Cu vrstev na tvářením polotovar.

## 1.3 Maziva a jejich rozdělení

Rozdělení maziv:

- a) *Oleje* : mohou být minerální nebo syntetické, v současnosti se dává přednost syntetickým olejům, k zlepšení jejich dělicí schopnosti se do nich přidávají různé přísady (kovová mýdla, aditiva na bázi S a P a případně Cl. Přes příznivé mazací vlastnosti Cl je potřebné dbát na to, že jeho likvidace je z ekologického hlediska velice obtížná a drahá a že může spolu s oleji vytvářet zdraví velmi nebezpečné produkty (např. PCB). Lze zde přidat i pevná maziva jako je grafit nebo MoS<sub>2</sub>.

- b) *Maziva na bázi mýdel*: vznikají reakcí s kovovými oxidy na povrchu kovů a zajišťují odolnost proti vysokým tlakům. Nejvíce je používán stearat sodný, který se nanáší ponorem polotovaru po fosfátování do horkého mýdlového roztoku.
- c) *Pevná maziva*- nejdůležitějšími zástupci této skupiny jsou pevná maziva s vrstvenou mřížkovou strukturou. K této skupině patří *grafit*. Používá se nejvíce v dispersi a vodou nebo olejem. Dalším mazivem je syrník molibdeničitý  $MoS_2$ . Ten se používá do tvářecích teplot  $400^\circ C$ ,  $WS_2$  je vhodný do teplot  $500^\circ C$  a grafit je užíván až do teploty  $800^\circ C$ . Plastické hmoty (polymery) jako je polyetylen a teflon, se používají ve speciálních jako ochranné a mazací folie při hlubokém tažení plechů. Sklo jako prášek nebo natavená vrstva se používají při tváření za poloohřevu a za tepla. Mezi pevná maziva patří i dříve uvedené těžké a lehké kovy.
- d) *Vodní emulze*- používají se při menších nárocích na mazání a větších nárocích na chlazení při rychlých tvářecích procesech při malých deformacích.

#### 1.4 Matematický popis tření

*Tření* je kluzný odpor mezi dvěma tangenciálně se pohybujícími se plochami. Ten se dá určit z velikosti smykových napětí v mezeře  $\tau_R$ . V teorii plasticity jsou uznávány dva fyzikální modely objasňující smyková napětí  $\tau_R$ .

##### 1.4.1 Coulombův zákon

Zde platí že  $F_R = \mu \cdot F_n$ , kde  $F_a$  je síla kolmá k povrchu,  $F_R$  je třecí síla a  $\mu$  je střední hodnota součinitele tření. Jeho velikost závisí vedle materiálu třecí dvojice na geometrii třecí plochy a na řadě chemických veličin v mezeře. Jde zejména o tlak, kluznou rychlost a teplotu. Místní smykové napětí  $\tau_R$  se dá určit pomocí hodnoty  $\mu$  a kontaktního normálního napětí  $\sigma_n$  jako  $\tau_R = \mu \cdot \sigma_n$ . Hodnot menších než  $\sigma_p$  (přirozený přetvárný odpor) lze docílit například při tažení nádob mezi přírubou a přidržovačem. Platí zde lineární závislost mezi  $\sigma_n$  a  $\tau_R$ , kde  $\mu$  může nabývat různých konstantních ale omezených hodnot.

V případě, že  $\tau_R$  dosáhne hodnoty meze kluzu ve smyku  $\sigma_k$  měkčího materiálu ze třecí dvojice tak  $\mu_{\max} = \frac{\sigma_k}{\sigma_n}$ .

Z toho vyplývá, že každému normálnímu napětí odpovídá maximální hodnota  $\mu$ , která závisí na  $\sigma_n$  a  $\sigma_k$ . Podle

podmínky plasticity HMH (von Mises)  $\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_k$  je  $\mu_{\max} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 0.577$ . Podle podmínky plasticity  $\tau_{\max}$

(Trescovy) je  $\tau_{\max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3)$ ,  $(\sigma_1 - \sigma_3) = \sigma_k$ ,  $\tau_{krit} = \frac{1}{2} \sigma_k$  a  $\mu_{\max} = 0.5$ .

Všeobecně se dá říct, že u všech tvářecích postupů, které se uskuteční pomocí  $\sigma_n > \sigma_p$  je leží hodnota  $\mu_{\max} \in (0.5, 0.577)$ . Pro případ když  $\tau_R = \tau_{R \max} = \sigma_k$  a  $\mu = \mu_{\max}$  nastává odstřížení měkčí plochy třecí dvojice rovnoběžně s dotykovou plochou (tzv. pick-up).

##### 1.4.2 Druhý fyzikální model

Ten vysvětluje průběh smykových napětí  $\tau_R$  a vychází z obecné závislosti  $\tau_R = m \cdot \sigma_k$ , kde hodnota  $m$  je třecí faktor (ekvivalent) a nabývá hodnot  $0 \leq m \leq 1$ . Pro  $m = 0$  jde o případ bez tření a pro  $m = 1$  jde o případ adhezního přilnutí.



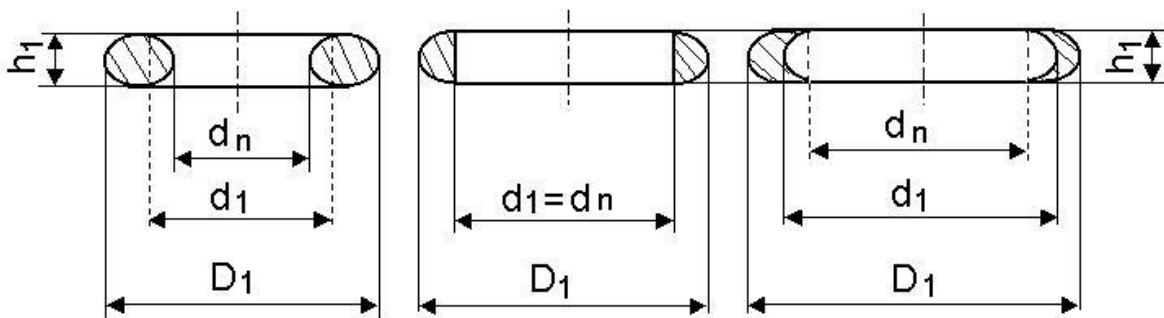
## 2. Zkoušky pro zjišťování součinitele tření a zkoušky maziv

### 2.1 Zkouška pěchování prstence podle Male a Cockrofta

Pro objemové tváření je doposud nejrozšířenější zkouška pěchování prstence. Tato zkouška je výhodná zejména proto, že při ní není nutné měřit tvářecí sílu a přetvárnou rychlost. Touto zkouškou můžeme testovat za studena třecí poměry při tváření za tepla a poloohřevu., přičemž se nevyžaduje znalost vlivu teploty a rychlosti přetvoření na přetvárný odpor materiálu. Poskytuje třecí data pro celý obor tření od 0 do stavu adheze  $\mu_{\max} \in (0.5, 0.577)$ . Prstenec, jehož rozměry  $D_0 : d_0 : h_0$  je doporučeno volit v poměru 6 : 3 : 2 se pěchuje postupně až na poměrnou deformaci výšky 50% i více. Deformace probíhá v podstatě dle podmínek vnějšího tření a mohou tak nastat v podstatě tři stavy:

- Dvousměrný tok kovu ve směru volných povrchů vnějšího a povrchu otvoru. V tomto případě se zmenšuje sledovaný  $\varnothing d_1$  oproti neutrálnímu  $\varnothing d_n$ . Jde o velké tření.
- Jednosměrný tok kovu pouze ve směru vnějšího volného povrchu, kde se zvětšuje  $\varnothing D_1$  a  $\varnothing d_1 = \varnothing d_n$ . Jde o střední tření.
- Jednosměrný tok kovu, kde se  $\varnothing d_1$  zvětšuje na  $\varnothing d_n$  a blíží se směrem k  $\varnothing D_1$ . Jde o nízké tření.

Zejména vnitřní průměr otvoru velmi citlivě reaguje na podmínky tření. Z kalibračních diagramů stanovených na bázi rychlostních polí lze potom snadno určit i průběh součinitele tření včetně kritických deformací, kdy dochází k utržení maziva apod.



Obr. 1 Možnosti deformace prstencových vzorků, charakterizující různé stupně tření.

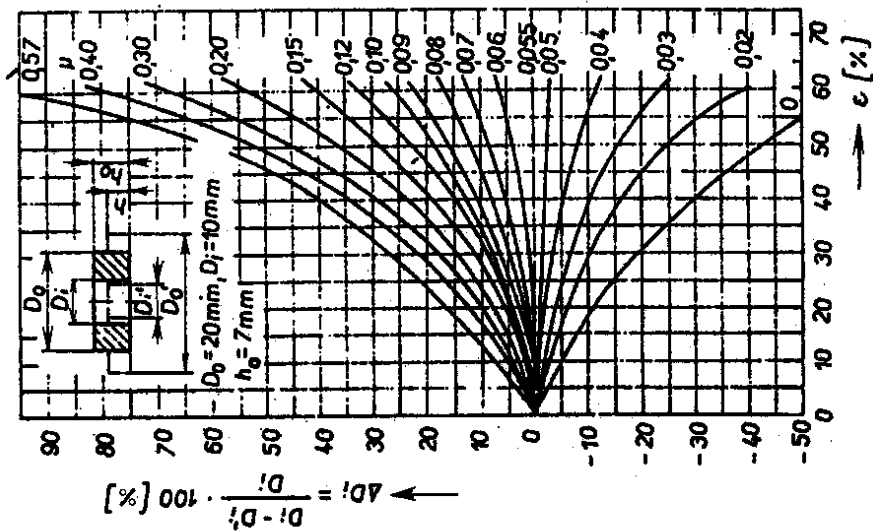
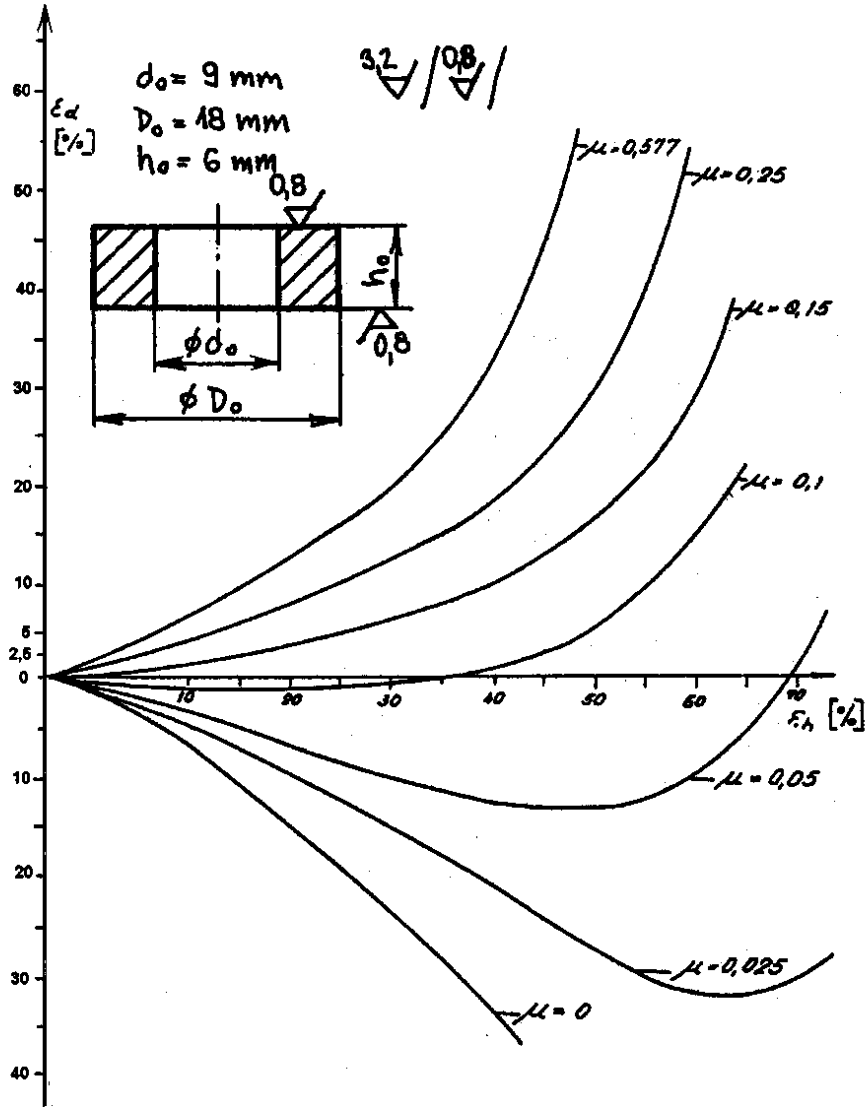
Z literatury je známo mnoho typů vzorků, ovšem požadovaný poměr hlavních rozměrů musí být dodržen.

Jsou známy i různé postupy měření rozměrů pěchovaných vzorků pro stanovení součinitele tření v kalibračních diagramech, od optických měření malých průměrů soudečků (vznikají vlivem tření v kontaktních plochách) a velkých průměrů, kdy jsou spočítány střední průměry vzorků z těchto hodnot až po nejjednodušší měření velkých průměrů soudečků a výšky posuvným měřítkem. Vyhodnocení zkoušky je poměrně jednoduché. Po několika spěchování vzorků v několika stupních deformace (min. v 5ti), se spočítají poměrné deformace výšky a vnitřního průměru vzorku:

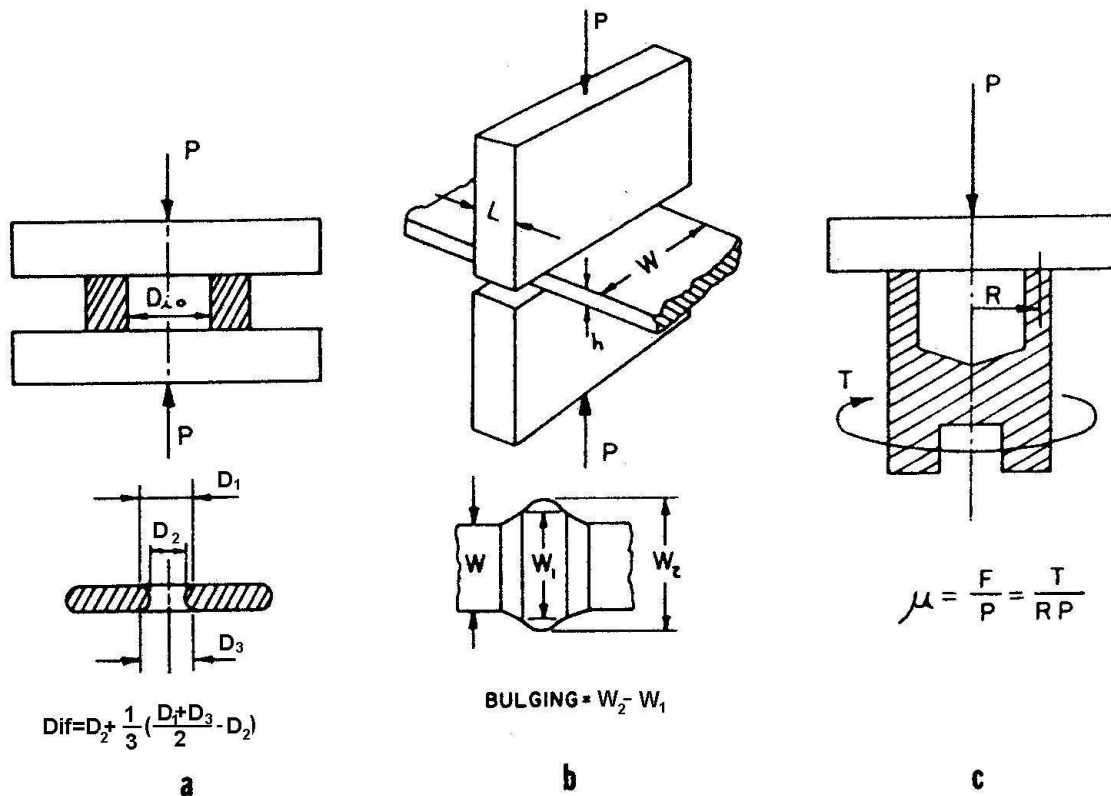
$$\varepsilon_h = \frac{h_0 - h_i}{h_0} \cdot 100[\%]$$

$$\varepsilon_d = \frac{d_0 - d_i}{d_0} \cdot 100[\%]$$

Body závislosti  $\varepsilon_d = f(\varepsilon_h)$  se vynesou do příslušného kalibračního diagramu, kde ji lze aproximovat příslušným analytickým modelem.



Obr. 2 Vzorok pro pēchování prstence s ukázkami kalibračních diagramů.



Obr. 3 Schémata zkoušek pro zjištění součinitele a stupně tření ve tváření:

- a) zkouška pēchování prstence,
- b) pēchovací zkouška plošného tlaku – Ford test,
- c) zkouška kombinovaným namáháním krut – tlak.

## 2.2. Pēchovací zkouška plošného tlaku- Ford –test

Pásový materiál je zde vytlačován pomocí dvou protilehlých tlačných hranolů. Aplikovat lze různá maziva v kontaktní ploše, podobně jako u předešlé zkoušky. Protože je materiál vytlačován kolem ostrých hran hranolů ukáže se v průběhu zkoušky možnost sklonu mazaného vzorku k „pick- up“. Podmínky zkoušky jsou podobné těm podmínkám, které mohou existovat kolem zaoblení kovacích nástrojů. Ty často představují nejkritičtější plochu z hlediska mazání nástroje.

Dříve se tato zkouška používala pro stanovení přetvárného odporu materiálu ve Fordových závodech, včetně měření tvářecí síly a posuvu, v současnosti je zkouška používána k testování tření ve tvářecích procesech bez nutnosti měření uvedených veličin, přičemž vlivem trojosého stavu napjatosti se pēchovaný pás rozširuje do stran- vybouluje se (bulging). Výsledný vypuklý tvar je různý pro nízký a vysoký stupeň tření. Stupeň tření mazacího filmu za účasti různých povrchových úprav kovadel charakterizuje vyboulení  $\Delta W = (W_2 - W_1) / 2$ , kde je  $W_2$  maximální rozměr vyboulení a  $W_1$  je minimální rozměr vyboulení u kořene vyboulení. Čím je větší tření v kontaktní ploše, tím větší je vyboulení a naopak čím je tření nižší je vyboulení menší.

Jde o kvalitativní metodu testování tření, která je vhodná buď na testování různých maziv za konstantního stlačení a jakosti povrchu kovadel a nebo testování různých povrchů kovadel (leštěné, broušené, pískované apod.) za působení určitého maziva při konstantním stlačení. Uplatňuje se zejména v kombinaci s dalšími zkouškami. Doporučené parametry zkoušky jsou  $W/L > 6$  a  $2 < L/h < 4$  (viz obr 3).

### **2.3. Zkouška kombinovaným namáháním krut- tlak ( Twist- compression test)**

Zde je stacionární hranol přitlačován na rotující prstencový vzorek. Plastická deformace je zde spolu s přitlačnou silou limitována zborcením vzorku, ovšem relativní prokluz bývá relativně silný. Při zkoušce můžeme simulovat různé možnosti v tloušťce naneseného maziva, průběžný nebo přerušovaný kontakt polotovaru s nástrojem za různých otáček zkušební vzorku. Koeficient tření může být spočítán přímo z hodnoty změřené normální síly a krouticího momentu

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{T}{R \cdot P},$$

kde T je krouticí moment, F je třecí síla, P je změřená normální síla a R je rameno krouticího momentu. Tato zkouška se používá v případech kde se očekává „pick-up“.

Uvedené zkoušky nejsou normalizovány, ovšem z renomovaných odborných publikací se řadí k nejpoužívanějším zkouškám stupně a koeficientu tření ve tváření.

## **Cvičení č. 7 Zkouška pýchování prstence pro stanovení průběhu součinitele tření během tvářecího procesu**

### **Zadání:**

Stručně popište výhody pýchovací zkoušky prstence a uveďte metodiku provedení a vyhodnocení zkoušky. Na souborech pěti vzorků nemazaných a deseti mazaných vzorků s poměrem výchozích rozměrů  $D_0 : d_0 : h_0 = 6 : 3 : 2$  proveďte zkoušky, proměření hlavních rozměrů po deformaci a výpočet poměrných přetvoření průměru otvoru a výšky prstence.

Vyneste závislosti  $\varepsilon_d = f(\varepsilon_h)$  v měřítku souřadnic dle přiložených kalibračních diagramů a porovnejte s jejich použitím hodnoty součinitele tření a zhodnoťte výsledky.

### **Poznámky:**

Vzorky 1 až 5 – nemazané, vzorky 6 až 10 – mazivo: Stearát zinečnatý, vzorky A až E – mazivo MoS<sub>2</sub> + strojní olej (Molyko).

Nemazané vzorky je nutné před zkouškou odmastit spolu s kovadly.

Zkoušky se provádí na hydraulickém lisu CZR 600 v nástroji pro pýchovací zkoušky. Kovadla jsou broušená.

Pomůcky: diagramy součinitelů tření, posuvné měřítko, uvedená maziva, tampony z buničité vaty, toluen, sací papír, pinzeta.

Výpočet poměrných přetvoření

$$\varepsilon_h = \frac{h_0 - h_i}{h_0} \cdot 100[\%]$$

$$\varepsilon_d = \frac{d_0 - d_i}{d_0} \cdot 100[\%]$$

Výchozí rozměry:

$$1 \div 5 : \bar{d}_0 = 9,865[\text{mm}]$$

$$\bar{h}_0 = 7,05[\text{mm}]$$

$$A \div E : \bar{d}_0 = 9,89[\text{mm}]$$

$$\bar{h}_0 = 7,05[\text{mm}]$$

$$6 \div 10 : \bar{d}_0 = 9,00[\text{mm}]$$

$$\bar{h}_0 = 6,10[\text{mm}]$$

Pro vyhodnocení zkoušek se použijí kalibrační diagramy z obrázku 2, podle výchozí geometrie vzorku. Vzorky je doporučeno přechovat na hodnoty  $\varepsilon_h$  10, 20, 40, 55 a 70%.

### **Studijní literatura**

- [1] ŠANOVEC, J.- ČERMÁK , J. – MÁDLE, L.: Mezní problémy a výpočetní technika ve tváření. Skriptum ČVUT, Praha 1989
- [2] Journal of Lubrication Technology, April 1975, ASME, USA str. 289- 295
- [3] ROWE, G. W. : Principles of Industrial Metalworking Processes, Edward Arnold Ltd., London 1977

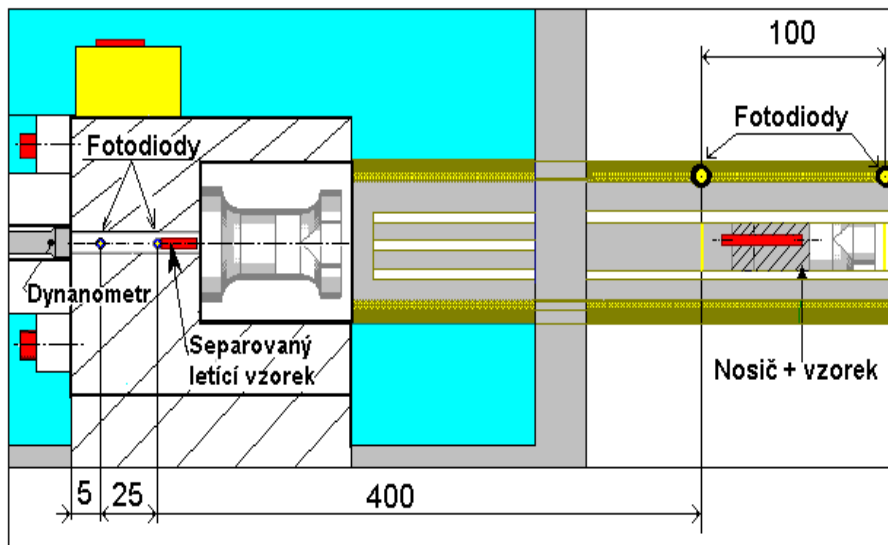
## 8. ZJIŠŤOVÁNÍ RÁZOVÝCH SIL A NAPĚTÍ PŘI TAYLOROVĚ TESTU

### 8.1 Úvod

Cestou Taylorova testu a jeho simulacemi v prostředí LS DYNA 3D byly získány parametry matematicky popsaných křivek dynamických přetvárných odporů ocelí dle Johnsona-Cooka. Jejich využití ve výpočtových modelech pro objemové tváření bylo prokázáno v rámci programů počítačové podpory v technologiích objemového tváření. Experimentální zjišťování rázových sil a napětí při TAT poskytuje možnosti srovnání s výstupy silových parametrů po provedených simulacích.

Výrazný rozvoj mikroelektroniky se odrazil při návrhu nového typu zařízení pro měření rychlosti dopadu vzorku při TAT. Zařízení je miniaturní a je schopno měřit časy průletu vzorku mezi dvěma fotodiodami těsně před dopadem s přesností až 0,1  $\mu\text{s}$  při minimální velikosti rozptylu světelného paprsku. Na rozdíl od svého předchůdce neměří čas průletu vzorku i s nosičem při ústí kanónu, ale měří čas samostatně letícího zkušební vzorku po oddělení od nosiče jak je patrné z obr.1.

Snímače jsou umístěny před dopadlištěm. Optické kabely vedou k dutině dopadové komory, ve které je vzorek již oddělen od nosiče. Kabely jsou od sebe vzdáleny 25mm, přičemž druhý je vzdálen 5 mm od dopadliště (tyče nebo tuhé desky). Kabely, respektive přijímače (foto-diody), jsou osvětleny světelným paprskem z LED diod velké svítivosti. Úhel světelných paprsků je kolmý k optickým kabelům



Obr.1 Schéma zařízení pro TAT v místě dopadu vzorku

Rozptyl paprsků je minimalizován, proto nedochází ke zkreslení zapnutí a vypnutí čítače. U stávajícího měřícího zařízení je měřená vzdálenost mezi první a druhou fotodiodou 100 mm. U nově vyvinutého typu je vzdálenost mezi optickými kabely 25 mm. Rychlost průletu ústím kanónu u stávajícího měřícího zařízení je dána výrazem:

$$v_{vz} = \frac{s_1}{t_1} \quad [\text{m/s}], \text{ kde } \quad t_1 \text{ je měřená doba průletu } [\mu\text{s}] \text{ a}$$

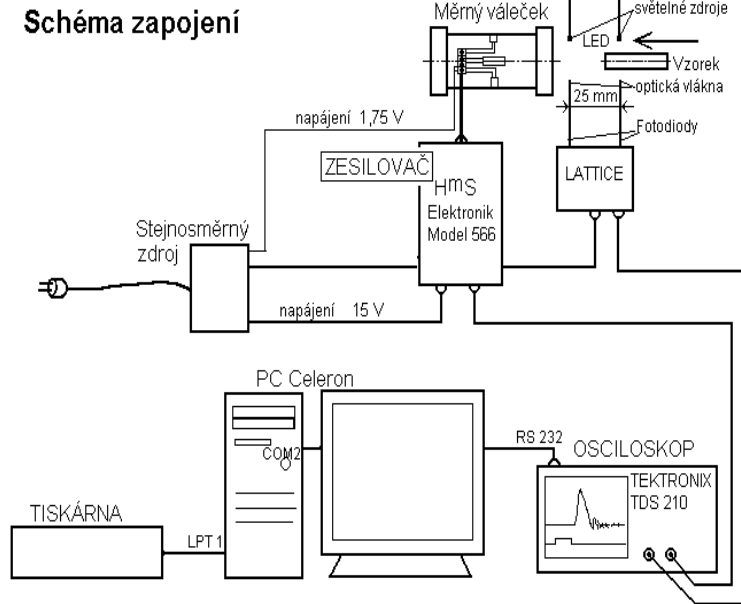
$$s_1 \text{ je měřená vzdálenost } [\mu\text{m}]$$

## 8.2 Záznam průběhu rázové síly při TAT

Rázová síla je důležitým výstupním parametrem TAT. Velikost a průběh síly nám může poskytnout konkrétní představu o průběhu deformace vzorku. Zároveň může být srovnávacím parametrem mezi experimentem a simulací vysokorychlostního děje. K měření rázové síly byl navržen tenzometrický dynamometr.

Navržený dynamometr (měrný válec o  $\phi$  12 mm opatřen 4 tenzometry HBM 3/120 LY 11,  $120\Omega$ ,  $k=1,99$ ,  $U_n=3V$ ; zapojeny do plného mostu) z vysoce pevné mangan-křemíkové oceli byl cejchován do 100 kN na hydraulickém lisu a byla získána závislost zatížení na elastické deformaci dynamometru.

K cejchování tenzometrického dynamometru byl použit automatický 32 kanálový analyzátor řízený procesorem.



Obr.2 Schéma zapojení pro měření rázových sil pomocí měrného válečku-dynamometru

Vzhledem k tomu, že při vyšších rychlostech dopadu vzorku se odražený signál od konce dynamometru se začal směřovat s měřicím signálem zatěžovacím, bylo třeba navrhnout dynamometr s delším převislým koncem za umístěním tenzometru.

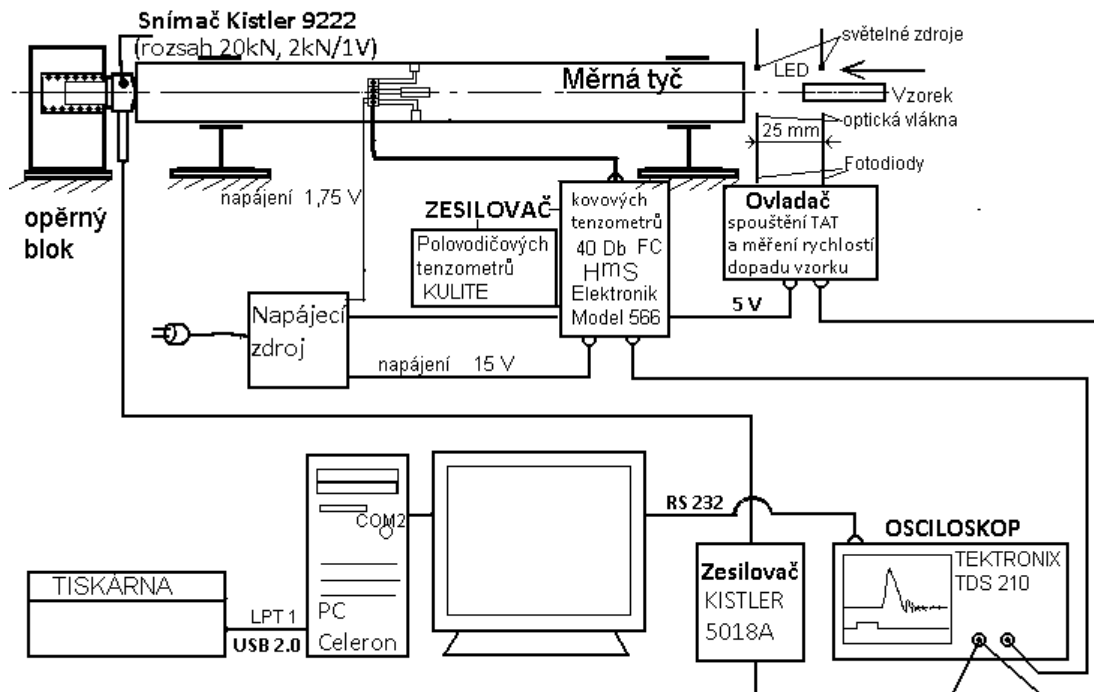
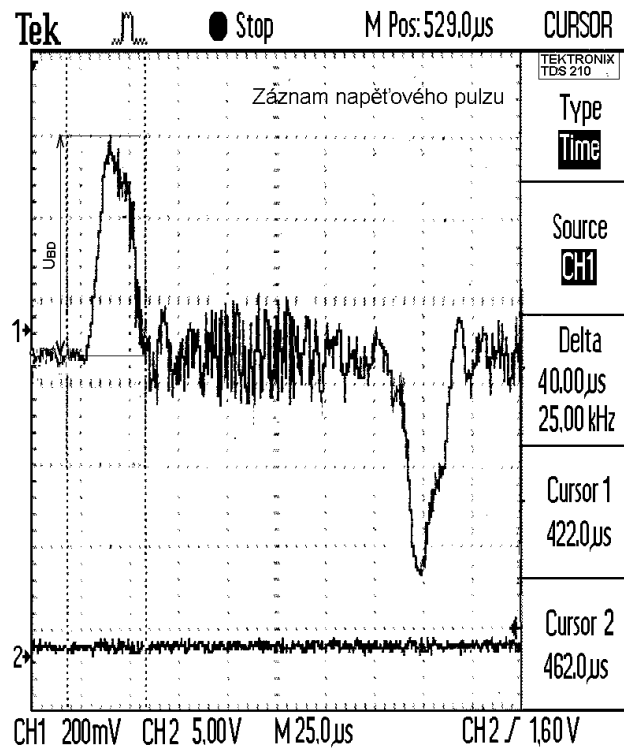


Schéma zapojení s měřicí tyčí (tenzometry, Kistler)

Obr.2a Schéma zapojení pro měření rázových sil dynamometrem ve tvaru měrné tyče

### 8.3 Záznam napět'ových vln při dopadu vzorku u TAT

Zkušební vzorek je akcelerován s nosičem pomocí stlačeného vzduchu. Po adjustaci vzorku z nosiče letí vzorek samostatně k místu dopadu. Místo tuhé desky (klasický TAT) je dopadovou plochou tyč z vysocepevné mangan-křemíkové oceli o rozměrech  $\phi 20 \times 600$  mm, na které jsou přilepeny buď odporové nebo polovodičové tenzometry. Pomocí zesilovače a záznamového zařízení-paměťového osciloskopu TEKTRONIX TDS 210 jsou zaznamenány napět'ové pulsy vyvolané zkušebním vzorkem. Zobrazený záznam na obr.3 lze buď okamžitě vytisknout přes rozhraní LPT1, nebo je lze přenést na pevný disk počítače přes RS 232 a zpracovat programem SCOPE a potom vytisknout.



Obr. 3 Typický průběh napět'ového pulsu na tyči získaný kovovými tenzometry HBM LY11 1,5/120, ( $K=2,0$ ). (Ocel TRISTAL, dopadová rychlost vzorku  $v_0 = 85,2$  m/s, měřené napětí na mostu ve větvi BD je  $U_{BD} = 520$  mV)

#### Praktická měření rázových sil

Schéma sestavy měření je na obr.2a. Dynamometr-měrná tyč je umístěna kolmo k dopadové ploše zařízení TAT. Pomocí zesilovače a paměťového osciloskopu TEKTRONIX TDS 210 byl zaznamenán rázový puls, který vyvolal náraz zkušebního vzorku na čelo tyče. Je patrný prudký vzrůst měřícího napětí  $U_{BD}$  s následnou oscilací způsobenou disperzemi a odraženými napět'ovými pulsy. Takto zobrazený průběh měřícího napětí (rázové síly) na čase je možné přímo vytisknout na tiskárně připojené přes LPT1 na osciloskop, nebo pomocí RS232 přenést naměřená data do počítače, kde buď v běžně dostupném tabulkovém procesoru (např. Excel) nebo ve speciálním programu SCOPE je možné dále zpracovat.

#### Vstupní data pro výpočet, příklad pro vzorek T6 z oceli TRISTAL:

Dopadová rychlost vzorku 85,2 m/s

napájecí napětí tenzometrů na dynamometru  $U_n$ : 1,76 V



naměřené napětí viz obr. 3, je  $U_{BD} = 0,52 \text{ V}$

K faktor tenzometru: 2,0 Zesílení snímaného signálu  $z = 1000 \times$

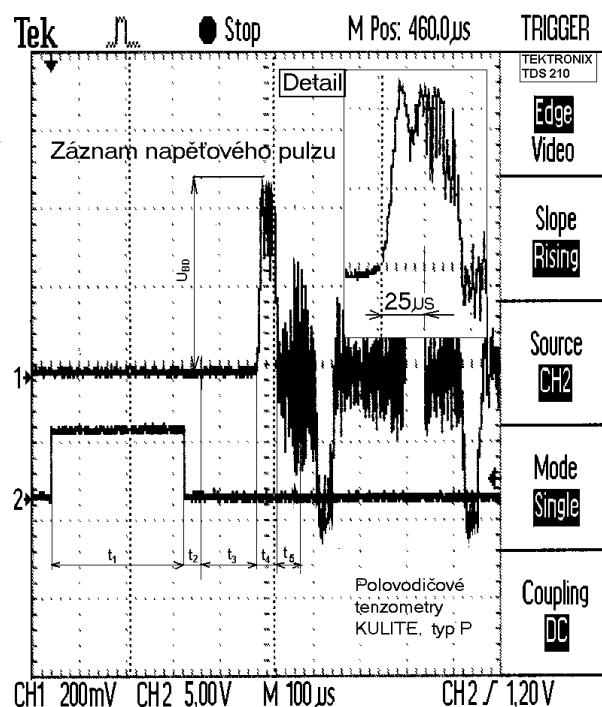
$$\varepsilon_{mer} = \frac{U_{BD}}{U_n} \frac{2}{K} \frac{1}{z \cdot (1 + \mu)} = \frac{0,52}{1,76} \frac{2}{2,0} \frac{1}{1000 (1 + 0,3)} = \underline{\underline{0,0002273}}$$

$$\sigma_1 = E \cdot \frac{1}{2} \varepsilon_{mer} = 210000 \cdot 0,00011365 = \underline{\underline{23,864 \text{ MPa}}}$$

Výsledná rázová síla.  $F = \sigma \cdot S = 23,864 \cdot 314,15 = 7496,76 \text{ N} = \underline{\underline{7,5 \text{ kN}}}$

Rovněž bylo zkoumáno trvání napětového pulsu, jeho velikost a průběh vyvolaný dopadem zkušební vzorku na tuhou překážku. Díky této úpravě dopadové plochy může experiment poskytnout důležitá data (dobu napětového pulsu, max. velikost a průběh nap. pulsu, příp. sílu vyvolanou v tyči po dopadu zkušební vzorku), která jsou zajímavá a důležitá při porovnání simulace a experimentu vysokorychlostního děje.

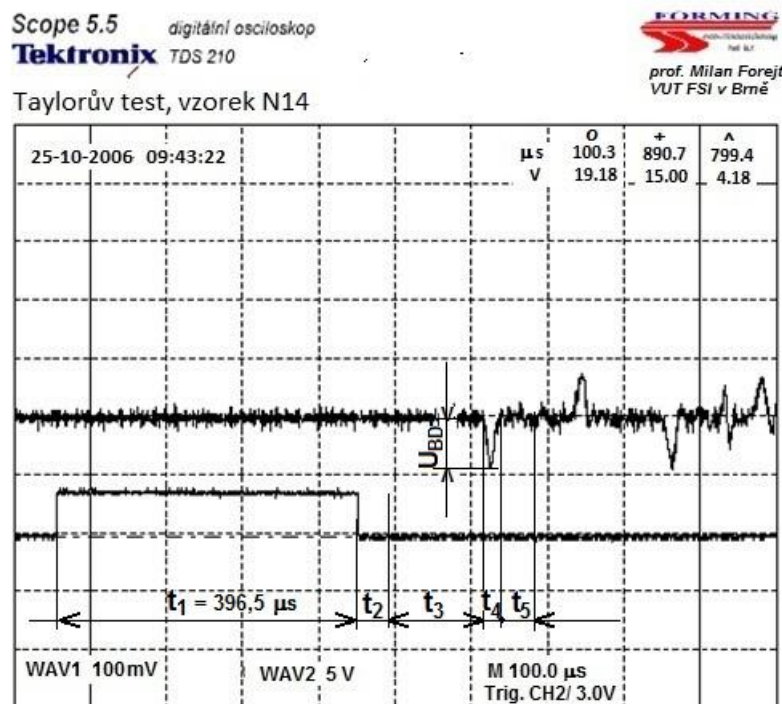
Při experimentech byly použity dva typy tenzometrů, které byly nalepeny uprostřed tyče v délce 400 mm od okraje tyče. Při použití odporových tenzometrů firmy HBM typu LY 11 0,6/120 byly nalepené tenzometry zapojeny do plného mostu. 2 aktivní tenzometry byly přilepeny na tyči podélně a dva kompenzační byly nalepeny napříč osy tyče. Při použití 4 polovodičových tenzometrů firmy KULITE byly tenzometry nalepeny do plného mostu rovněž přímo na tyči (dva v podélném a dva v příčném směru). Důvodem použití dvou odlišných typů tenzometrů bylo prokázání shody průběhu a doby napětového pulsu při náhlém rázovém zatížení tyče. U obou dvou typů tenzometrů byla zjištěna prokazatelná shoda jednak ve velikosti a průběhu napětových pulsů, tak i v době jejich trvání. Typické průběhy napětových pulsů na tyči s polovodičovými tenzometry jsou zobrazeny na obr.5. Napětový pulz byl indikován polovodičovými tenzometry se zesílením 10 x.



Obr. 5 Průběh napětového pulsu získaný polovodičovými tenzometry ( $K=120$ )

Z obr. 5 jsou patrné dva základní záznamy. Pod číslem 2 (druhý kanál paměťového osciloskopu) je průběh doby průletu zkušební vzorku z oceli TRISTAL měřícím zařízením dopadovou rychlostí vzorku  $v_0 = 87,4$  m/s, doba  $t_1$ . Až vzorek proletí kolem první fotodiody teprve dojde ke zpuštění celého zařízení měřícího napětového pulsu. Tím se eliminuje vliv vedlejších rušivých el. signálů, které by mohly ovlivnit průběh měření napětového pulsu. Křivka 1 (první kanál paměťového osciloskopu) na obr. 5 znázorňuje samotný průběh napětového pulsu na tyči.  $U_{BD} = 450$  mV je maximální velikost měřícího napětí při napájení  $U_n = 2,41$  V. Doba  $t_1$  je doba průletu zkušební vzorku mezi 2 fotodiodami vzdálené 25 mm od sebe,  $t_2$  je doba, kterou vzorek letí k čelu tyče (neboť poslední fotodioda je vzdálená 5 mm od čela dopadové plochy).  $t_3$  představuje dobu po kterou se napětový puls šíří rychlostí zvuku k měřicímu zařízení (tenzometrům),  $t_4$  je délka napětového pulsu a doba  $t_5$  je čas za který urazí napětová vlna k volnému čelu konce tyče, kde se odrazí a šíří se s opačnou amplitudou zpět k tenzometrům.

Vzhledem k malé výtěžnosti signálů z tenzometrických snímačů (zvláště pak kovových) jsou záznamy doprovázeny značnými šумы a disperzemi, ze kterých jsou měřené veličiny obtížně filtrovatelné, viz např. záznam na obr.6 a obr.7.



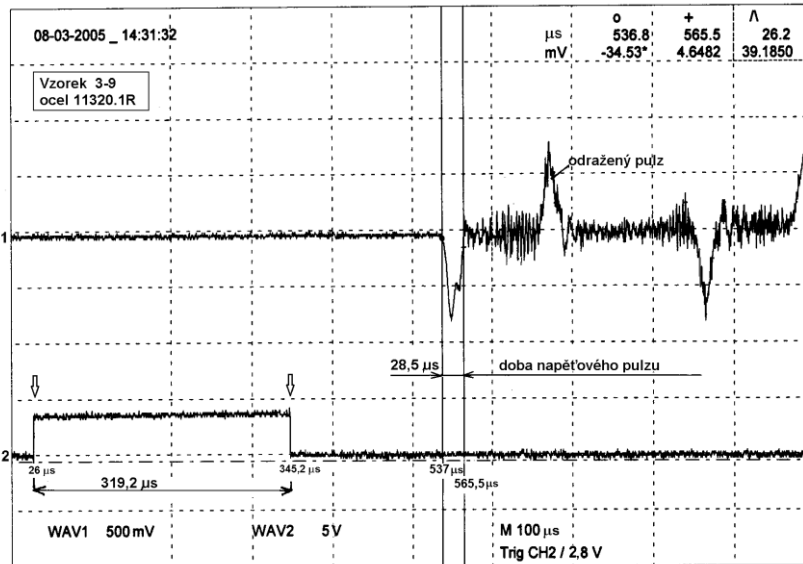
Měrná tyč osazena kovovými tenzometry  
 Nosič 3,749 ošetřen antistatickým sprejem  
 $t_1 = 1647$   $\mu$ s,  $v_1 = 60,72$  m/s  
 $t_2 = 396,5$   $\mu$ s,  $v_2 = 63,05$  m/s  
 zesílení 100 x (40dB, AC)

Obr.6

**Scope 5.5** digitální osciloskop  
**Tektronix** TDS 210 - EM-3-9-08-03-05b

prof. Milan Forejt  
 VUT FSI

Záznam napěťového pulzu na opěrné tyči s polovodičovými tenzometry KULITE  
 dne 8.3.2005



Vzorek 3-9, ocel 11320.1R  $\phi$  Do= 4,99 mm, Lo= 24, 98 mm  
 Napájení celého mostu s polovodičovými tenzometry KULITE Un= 2,53V  
 zesílení 10 x  
 Plnění 30s  
 Časy průletu: - ústím kanónu t1 = 1425 mikrosekund (v = 70,17 m/s)  
 - před dopadem t2 = 350,3 mikrosekund (v = 71,37 m/s)

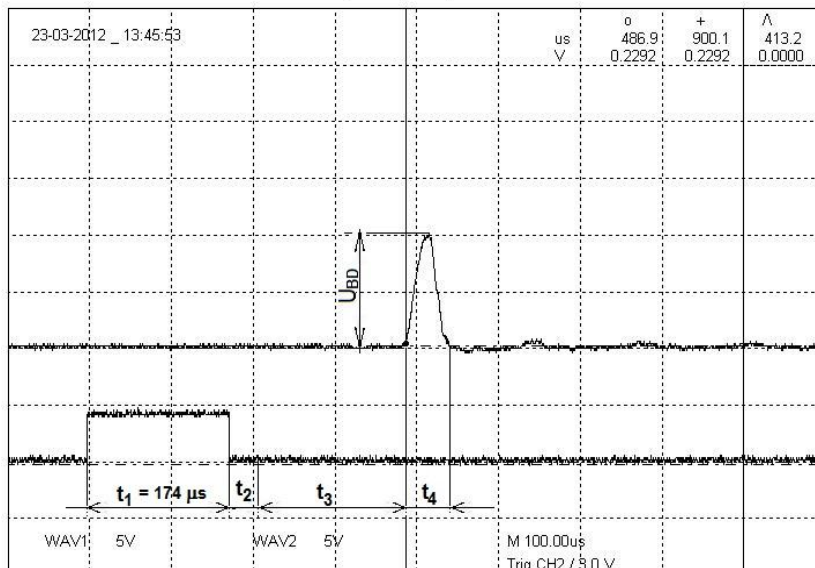
Obr.7

Pro další experimentální testy TAT byl použit a ověřen jako nejvýhodnější piezoelektrický snímač typu KISTLER 9222, který, jak je zřejmé z obr.8, poskytuje jednoznačné, čitelné záznamy bez značných šumů a disperzí.

**Scope 5.5** digitální osciloskop  
**Tektronix** TDS 210 - PR32-15-3-2012 a

**FORMING**  
 Institute of Forming Technology FSI-UST  
 Prof. Milan Forejt  
 VUT Brno FSI-UST

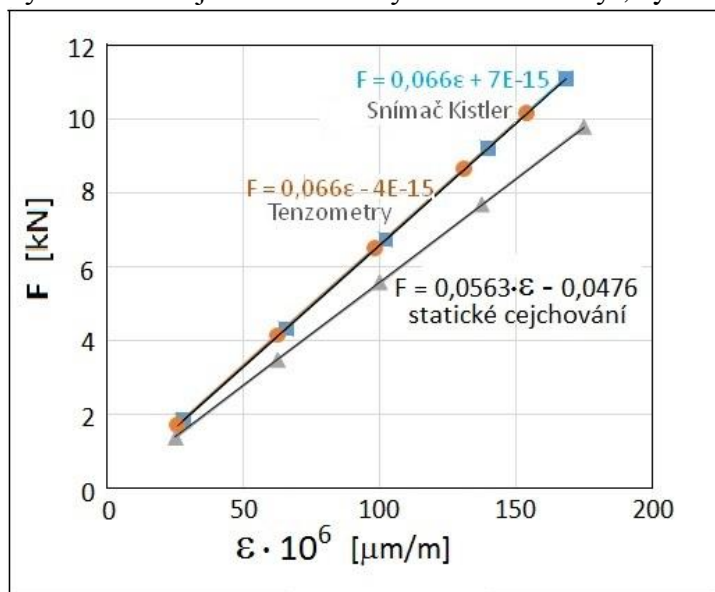
Taylorův test-TAT-ověření piezoelektrického snímače KISTLER 9222  
 Laboratoř rychlých deformací B1-411, dne 15. 3. 2012  
 Vzorek PŘ 32 , austenitická ocel 17 242 (18 - 8 příčně)



do = 5,03 mm, d1 = 5,69 mm  
 bo = 24,90 mm, b1 = 22,30 mm  
 tp = 50 s, tv = 682 us, v = 146,63 m/s, s nosičem - ústová rychlost  
 tv = 174 us, v = 143,60 m/s, rázová rychlost  
 Fpiezo = 20 kN  
 nastavení - 2,0 kN/V, rozsah 10 V, range 20 kN

Obr.8

K ověření shody výsledků z tenzometrických snímačů i snímače Kistler byly provedeny srovnávací zkoušky dynamického cejchování měrné tyče TAT. Měřicí tyč, vyrobená z vysoce pevné mangan-křemíkové oceli byla



cejchována staticky do 100 kN na hydraulickém lisu a byla získána závislost zatížení na elastické deformaci dynamometru, viz obr.9. K cejchování tenzometrického dynamometru (měrné tyče) byl použit automatický 32 kanálový analyzátor řízený procesorem. K dynamickému cejchování měrné tyče byl, vedle kovových tenzometrů zapojených do Wheastonova mostu, použit i snímač KISTLER 9222, [4].

Obr.9 Cejchovní diagram měřicí tyče TAT

## 8.4 Závěry

Typické průběhy napět'ových pulsů na tyči viz obr. 4 a obr.5 dokládají že, u obou dvou typů tenzometrů byla zjištěna prokazatelná shoda jednak ve velikosti a průběhu napět'ových pulsů, tak i v době jejich trvání. Zkoušky byly provedeny na ocelích TRISTAL a 12 050. Pro porovnání hodnot napět'ových pulsů byly u oceli TRISTAL zaznamenány napět'ové pulsy při dopadových rychlostech vzorků: 203 m/s, 193,78 m/s, 183 m/s, 163,7 m/s, 120,3 m/s, 92,3 m/s, 46,4 m/s, 33,8 m/s a 26,64 m/s. Při měření na tyči s odporovými, tak i polovodičovými tenzometry byly dosaženy srovnatelné výsledky. Při vysokých rychlostech jsou amplitudy a velikosti tlumení vysoké, zatímco při nízkých rychlostech jsou nízké. Výsledky dynamického cejchování měřicí tyče TAT prokázaly dobrou shodu pro tenzometrické snímače i snímač Kistler 9222 [4].

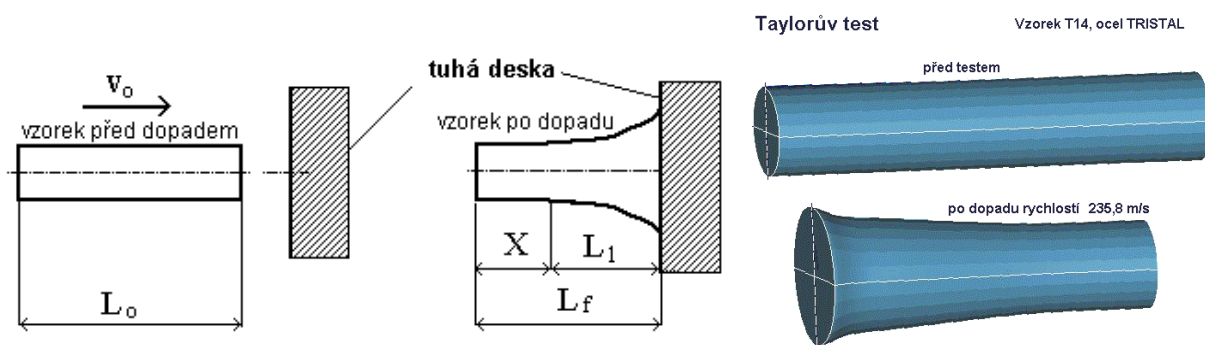
## Studijní literatura

- [1] FOREJT, M., BUCAR, J. JOPEK, M., KREJČÍ, J. Parametric numerical studies of the Taylor test. In TANGER s.r.o. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Metalurgical & Materials Conference, Symposium B, METAL 2002 Hradec nad Moravici*. 1<sup>st</sup>ed. Ostrava, TANGER, TU-VŠB and CSNMT, Ostrava, May 14 - 16 2002. vol 1. p 80/1-80/7. CD ROM, ISBN 80-85988-73-9.
- [2] FOREJT, M., KREJČÍ, J., JOPEK, M., BUCAR, J., PERNICA, Z. Dynamic models of formed materials. *Acta Mechanica Slovaca*. 2002, vol. 6. no. 2, p. 21-26. ISSN 1335-2393
- [3] FOREJT, M., JOPEK, M., PERNICA, Z., KRÁSNY, D. Zjišťování rázových sil a napětí při Taylorově testu. (Measurement of deformation forces and stresses during the Taylor Anvil Test). *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference TECHNOLOGY 2003*. Slovak University of Technology in Bratislava. 1<sup>st</sup> ed. September 9-10. 2003. Vol.1. p 118-1 - 118-4. CD ROM. ISBN 80-227-1935-8
- [4] ŠLAIS Miroslav, Milan FOREJT a Ivo DOHNAL. Verification of measurements of dynamic loading during the Taylor anvil test. *MM Science Journal*, 2016, No 5, p. 1343-1345. ISSN 1805-0476

## 9. PROVEDENÍ TAYLOROVA TESTU A JEHO VYHODNOCENÍ

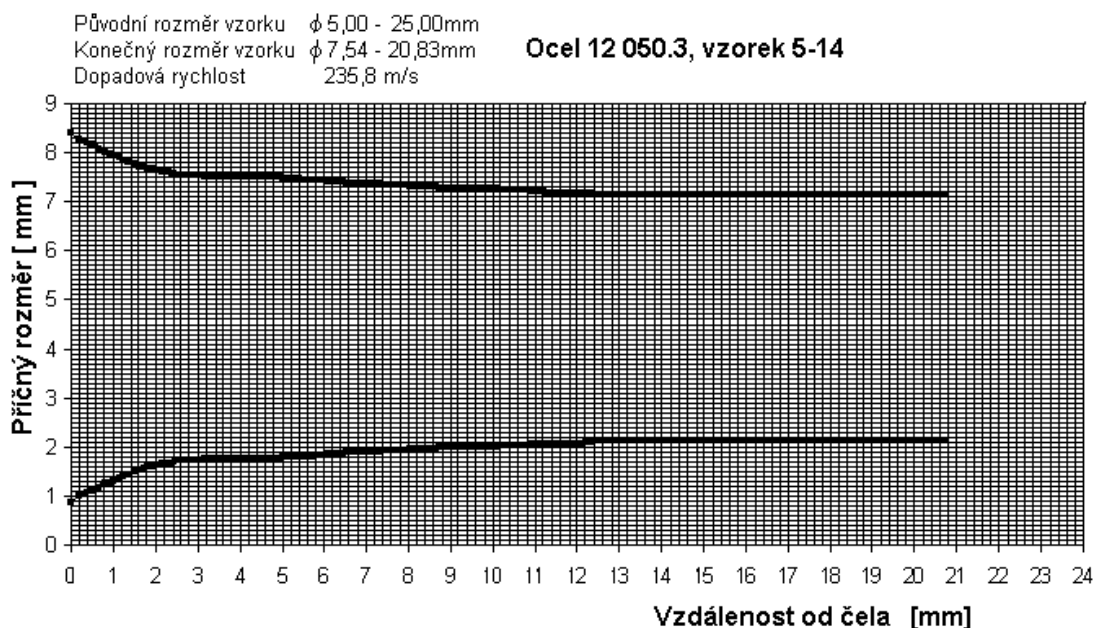
### 9.1 Taylorův kompresní test a jeho simulace

Kompresní rázové zkoušky jsou provedeny Taylorovým testem-TAT na pneumatickém kanónu v laboratoři ÚST FSI VUT v Brně pro válcové vzorky  $\phi 5 \times 25$  mm s broušenými čely z tvařitelných ocelí. Rozsah dopadových rychlostí je 40 až 250  $\text{m s}^{-1}$ .



Do metodiky modelování byly jako nezbytné zahrnuty: ověřování mechanických vlastností a tvařitelnosti ocelí, obrazová analýza tvaru vzorku po TAT s využitím programu LUCIA, metalografické hodnocení struktur, a měření pole mikrotvrdostí HV na osových řezech vzorků na počítačem řízeném tvrdoměru LECO.

### Vyhodnocení tvaru obrazovou analýzou



## Stanovení dynamických mezí kluzu a ostatních parametrů rázového kompresního děje- TAT

### Matematický model:

1) Vzorec pro dynamickou mez kluzu:

a) podle Taylora:

$$\sigma_y = \rho \times v_0^2 \frac{10^{-6}(L_0 - x)}{2(L_0 - L_1) \ln \frac{L_0}{x}}$$

b) podle Wilkinse a Guinina:

$$\frac{Lf}{L_0} = \exp\left(\frac{-\rho_0 \times v_0^2}{2\sigma_y}\right) \Rightarrow \sigma_y = \frac{\rho_0 \times v_0^2 \times 10^{-6}}{2 \ln \frac{L_0}{Lf}}$$

2) Určení tvářecí síly a zrychlení (resp. zpomalení)

$$F_{\max} = +m \times a_{\max} = m \times 2a = m \times 2 \frac{dv}{dt} \times \frac{dx}{dx} = m \times 2 \times v \frac{dv}{dx}$$

$$F_{\max} \int_0^{\Delta l} dx = 2m \int_{v_p}^0 v dv$$

$$\frac{1}{2} F_{\max} \times \Delta l = -m \times \frac{v_0^2}{2} \Rightarrow \text{maximální rázová síla z rovnoměrně zpomaleného pohybu}$$

$$A_p = E_{kin}$$

$$F_{\max} = -m \frac{v_0^2}{\Delta l} \quad (\text{N})$$

$$a_{\max} = -\frac{v_0^2}{\Delta l} \quad (\text{ms}^{-2})$$

$$a_{stř} = -\frac{v_0^2}{2\Delta l} \quad (\text{ms}^{-2})$$

## 9.2 Konstitutivní rovnice Johnson-Cooka

K matematickému popisu závislosti deformačního odporu (deformační napětí, flow stress) na efektivní plastické deformaci (true plastic strain), rychlosti deformace (high strain rate) a na teplotě je použit osvědčený konstitutivní vztah dle Johnson-Cooka pro BCC materiály, který zahrnuje základní fyzikální parametry. Tento konstitutivní vztah je mj. vhodný pro dynamické kompresní testy s vlivem setrvačných sil a mechanických resonancí (medium rate, dynamic low) a dobře predikuje deformační chování ocelí, zvláště při objemovém tváření na tvářecích automatech.

$$\sigma = \left( \sigma_0 + B \cdot \varphi^n \right) \left( 1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0} \right) \left[ 1 - \left( T^* \right)^m \right]$$

kde  $\sigma_0$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$ ,  $m$ , představuje 5 experimentálně a simulací stanovených vstupních parametrů a homologická teplota je definována podílem

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}$$

kde:

$T$  je teplota materiálu, [ K ]

$T_0$  je referenční teplota (teplota okolí) při statické mezi kluzu  $\sigma = \sigma_0$ , [ K ]

$T_m$  je teplota tavení, [ K ]

$\sigma_0$  je mez kluzu stanovená z kvázistatických kompresních testů, [MPa]

$n$  je exponent zpevnění,

$\phi_0$  je referenční rychlost deformace,  $1 \text{ s}^{-1}$

$\phi$  je efektivní logaritmická rychlost deformace (rychlost deformace),  $[\text{s}^{-1}]$ ,

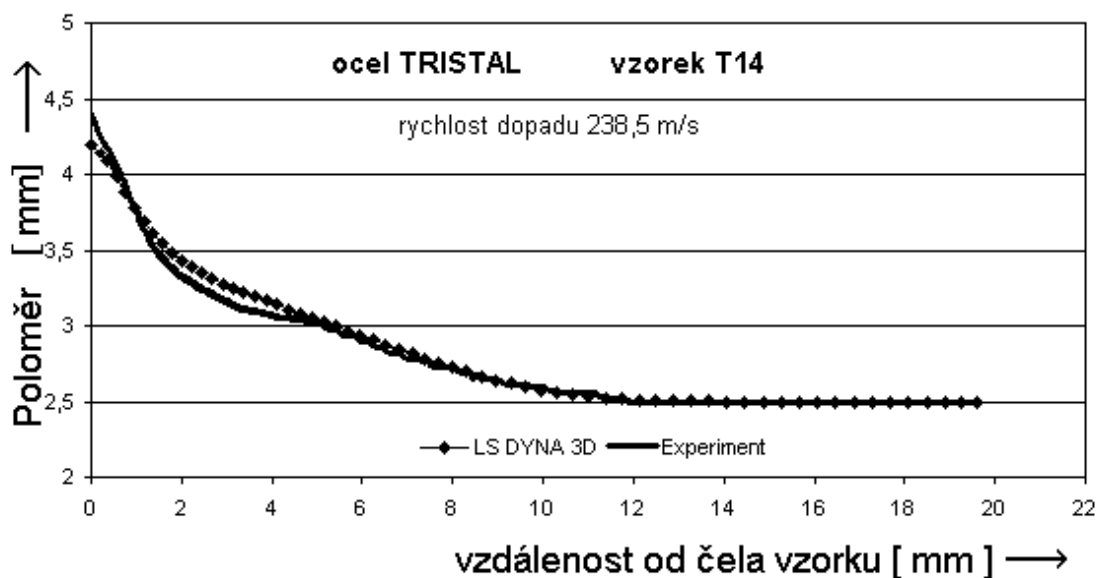
$m$  je teplotní koeficient odpevnění

$C$  parametr, který určuje citlivost na rychlost deformace

$B$  pevnostní parametr

### 9.3 Optimalizace parametrů konstitutivních rovnic simulací TAT.

Parametry Johnson-Cook konstitutivní rovnice uvedené v tabulce Tab.1 jsou výsledkem počítačové simulace kompresního testu programem MKP LS DYNA 3D. Vstupními hodnotami jsou: geometrie vzorku po kompresním testu TAT za různých rychlostí dopadu vzorku, statické meze kluzu  $\sigma_0$  z pěchovacích zkoušek, ostatní fyzikální parametry předmětného materiálu, model dle konstitutivní rovnice Johnson-Cooka. Optimalizace parametrů Johnson-Cook konstitutivní rovnice byla prováděna cestou dosažení nejlepší shody tvaru vzorku [6], [8], [9]. Rozdíly průměrů vzorku z experimentu a ze simulace se pohybují od asi 5% až do 10%, což vyjadřuje poměrně dobrou shodu. Pro sledované rychlosti deformace do  $1000 \text{ s}^{-1}$  jde především o nejlepší shodu tvaru ve střední oblasti vzorků, jak ukazuje následující příklad.





Tab.1

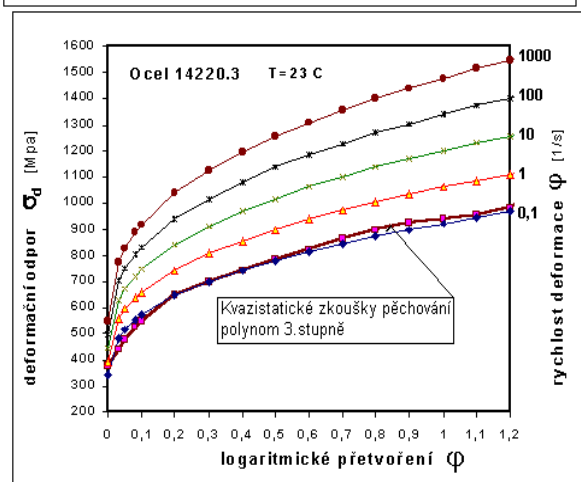
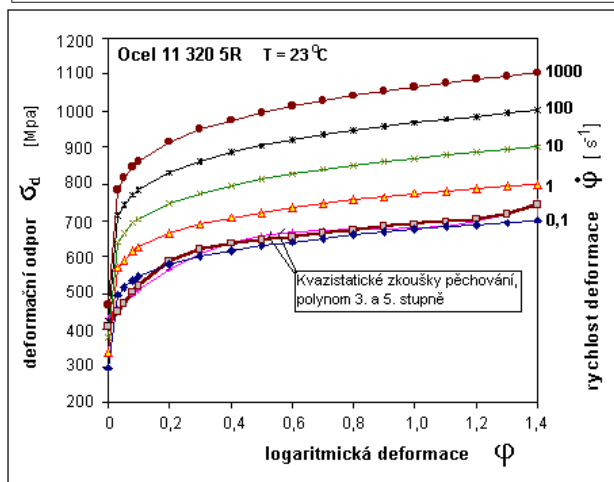
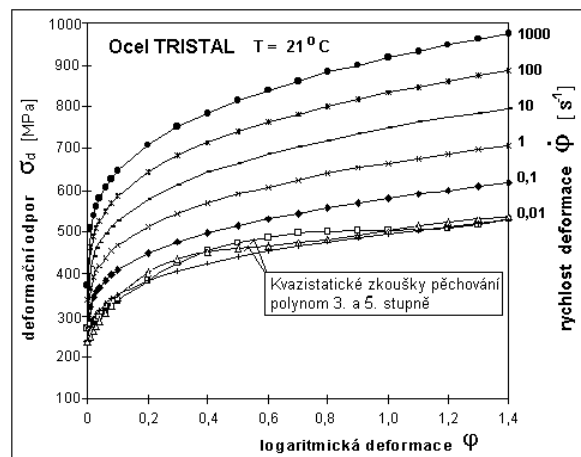
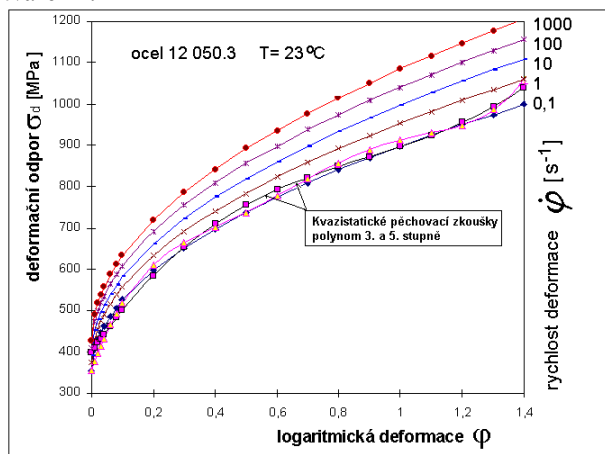
Parametry konstitutivní Johnson-Cook rovnice pro Taylorův kompresní test						
	Ocel 12 050.3	Ocel TRISTAL	Ocel 11 320 5R	Ocel 14 220.3	Titanová slit. Ti-6Al-4V [8]	Ocel 17 240 [9]
$\sigma_0$	375	273	450	400	802	302
<b>B</b>	580	401	350	680	995	1100
<b>C</b>	0,02	0.055	0,055	0,057	0,01	0,07
<b>n</b>	0,5	0.3	0,18	0,4	0,50	0,488
<b>m</b>	1,04	0.72	0.70	0,70	0,60	0,95

## 9.4 Křivky deformačních odporů pro vybrané oceli,

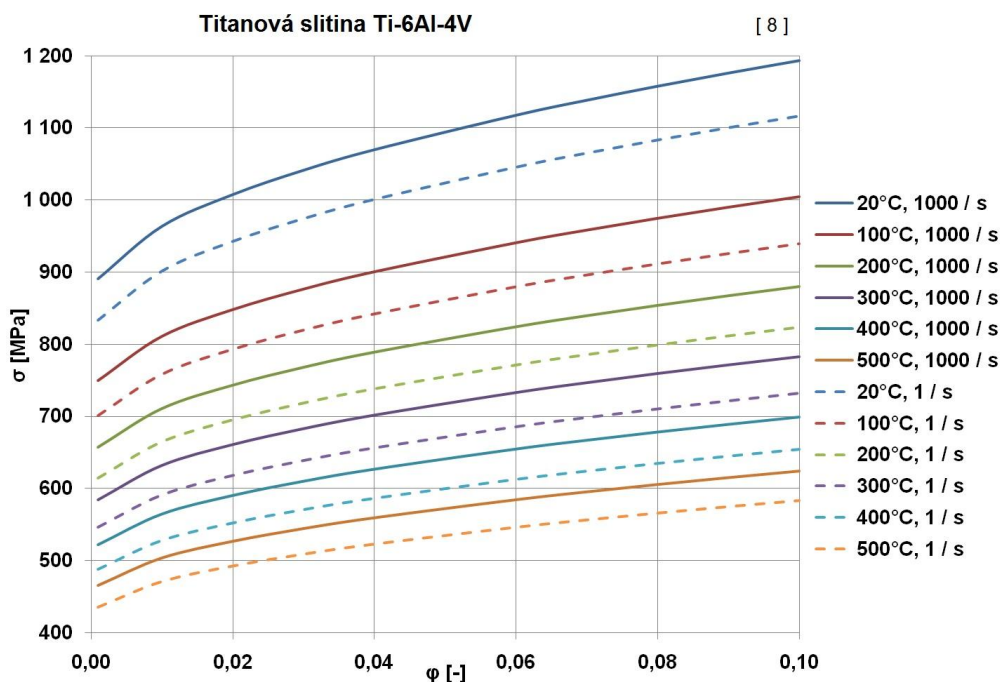
kteří jsou součástí materiálových modelů na webových stránkách

<http://www.fme.vutbr.cz/ustav.html?ustav=13310>

Tyto stránky jsou výstupem výzkumných aktivit za podpory výzkumného záměru ROZVOJ PROGRESÍVNÍCH VYSOCE PŘESNÝCH STROJÍRENSKÝCH TECHNOLOGIÍ, MSMT 262100003 , podúkolů "Tvorba databáze materiálových modelů k predikci chování materiálů v tvářecím procesu" - části A v roce 2004. Současně navazují na dříve výsledky grantu GAČR 101/99/0373 "Modelování mechanického chování oceli při reálných podmínkách tváření".







## 9.5 Experimentální zařízení

Laboratoř vysokých rychlostí deformace - LVRD, B1/411, byla zřízena na FSI VUT v Brně při ÚST, odboru technologie tváření a plastů v r.1994. Experimentální pneumatická zařízení umožňují provádět Taylorův test a Hopkinsonův test. Jde o ojedinělá, v Evropě unikátní zařízení. Současně jsou využívány: mechanická laboratoř na ÚMI-NoM, - laboratoř elektronové a světelné mikroskopie ÚMI-OSFA, - spolupráce s ÚFM AV ČR v Brně při měření a strukturním hodnocení.

Pneumatické zařízení pro Taylorův test bylo doplněno digitálním paměťovým osciloskopem TEKTRONIX 210D, řídicím a vyhodnocovacím počítačem a měřicím zesilovačem ke snímání napěťových pulsů pomocí polovodičových tenzometrů. Dále byl vyvinut tenzometrický dynamometr k měření dopadových sil a nový typ časového snímače s fotodiodami a plastickými optickými vlákny. Zařízení na bázi moderní mikroelektroniky umožňuje snímat čas průletu na bázi 25 mm bezprostředně před dopadem vzorku. Současně připojení na osciloskop TEKTRONIX umožňuje automatické spouštění záznamu napěťového pulzu, K vyhodnocování signálů zaznamenaných osciloskopem TEKTRONIX je používán profesionální software SCOPE 5.5.

## Studijní literatura

- [1] FOREJT,M., JOPEK,M., BUCAR,J. Plastické deformace při vysokých rychlostech deformace. Plastic deformation at high strain rates. In *TECHNOLÓGIA '99 Bratislava*. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference presented by the STU Bratislava, September 8.-9. 1999. Volume 1. Printed by STU Bratislava 1999. pp 286-289. ISBN 80-227-1255-8.
- [2] FOREJT,M., JOPEK,M., BUCAR,J. Constitutive Equations for the Behaviour of BCC Steels at High Strain Rates. In *METAL 2000 Ostrava*. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Metalurgical Conference, Symposium B presented by the TANGER s.r.o.and CSNMT, Ostrava, May 16 - 18 2000. Published by TANGER Ostrava. pp 214/1-214/6. CD ROM, ISBN 80-85988-48-8.

- [3] FOREJT,M., JOPEK,M., BUCCHAR,J. Plastic deformation at real compression rates. In *METAL FORMING 2000*. Proceedings of the 8<sup>th</sup>International Conference presented by the Hgf TU Krakow, Poland, 3-7 September 2000. Ed. Pietrzyk at al. Published by Balkema, Rotterdam, 2000. pp 729-732. ISBN 90 5809-157-0.
- [4] FOREJT,M., JOPEK,M. BUCCHAR,J. Behaviour of BCC steels at high strain rates. (Chování tvářené oceli při vysokých rychlostech deformace). In *FORM 2000*. Proceedings of the 5<sup>th</sup>International conference presented by the TU Institut of Technology of Brno, September 19-20, 2000. Edited by Forejt Milan. Published by Brno University of Technology, Printed by PC-DIR,Co.Ltd, Brno 2000, pp. 101-106. ISBN 80-214-1661-0.
- [5] JOPEK,M. Měření rychlosti dopadu vzorku u Taylorova testu. Speed measurement by Taylor test. In *FORM 2000*. Proceedings of the 5<sup>th</sup>International conference presented by the TU Institut of Technology of Brno, September 19-20, 2000. Edited by Forejt Milan. Published by Brno University of Technology, Printed by PC-DIR,Co.Ltd, Brno 2000, pp. 95-100. ISBN 80-214-1661-0.
- [6] FOREJT,M., BUCCHAR,J., JOPEK,M. High strain rates compression loading of BCC steels. In *CO-MAT-TECH 2000*. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International research conference, presented by the MTF STU Trnava, Slovakia, October 19-20, 2000. Volume 1. Edited by Milan Turňa. Published by STU Bratislava, 2000, pp. 45-50. ISBN 80-227-1413-5.
- [7] FOREJT,M., KREJČÍ,J., JOPEK,M., BUCCHAR,J, PERNICA,Z.: Dynamic models of formed materials. *Acta Mechanica Slovaca*. 2002, Ročník 6. Číslo 2, pp. 21-26. ISSN 1335-2393
- [8] ŠLAIS, M. Studium vlivu rychlostních a teplotních parametrů na tvařitelnost Ti slitin. Brno, 2012. 102 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Milan Forejt, CSc.
- [9] DOHNAL, Ivo. Ověření možnosti využití tahové deformace při Hopkinsonově testu. Brno, 2014. 75 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Milan Forejt, CSc.

## 10. ZJIŠŤOVÁNÍ DYNAMICKÝCH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ METODOU HOPKINSONOVA TESTU

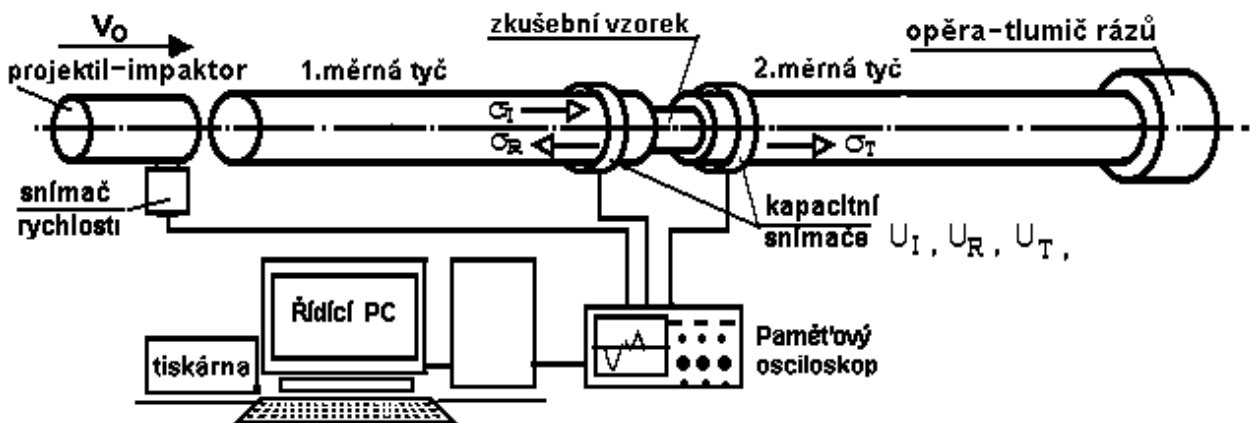
### 10.1 Úvod

Metoda **Hopkinsonovy měrné dělené tyče** -HMDT (Hopkinson Split Pressure Bar-HSPB) slouží pro zjišťování dynamických mechanických vlastností materiálů. Praktický význam Hopkinsonova testu spočívá v získávání údajů o tvářených materiálech za vyšších rychlostí deformace, které jsou potřebné do výpočtových modelů a pro simulační programy tvářecích dějů.

Pro střední rychlosti zatěžování se nejprve využívala experimentální zařízení ve tvaru různě upravených kladiv, padostrojů a jiných typů běžných zkušebních strojů [Mielnik, Gillis, Lindholm aj.]. U těchto metod byla obtížná interpretace poskytnutých výsledků, což postupně vedlo k vývoji metod, vycházejících ze sledování šíření vln tyčemi kruhového průřezu. Pro vysoké rychlosti deformace je to např. metoda Hopkinsonovy měrné dělené tyče -HMDT

Základní uspořádání této metody prvně realizoval Kolsky, resp. Davis, později byly zpracovány i další varianty této zkoušky. Pro tahové namáhání je v současnosti používána Lindholmova úprava.

U vysokých rychlostí zatěžování, při kterých je metoda Hopkinsonovy měrné dělené tyče využívána, mají důležitý vliv setrvačné síly, šíření napěťové vlny, mechanické rezonance, (*u kvazistatických a středních rychlostí nefigurují a proto se deformace neuvažují*).



Schematické uspořádání Hopkinsonova testu.

### 10.2. Laboratoř vysokých rychlostí deformace

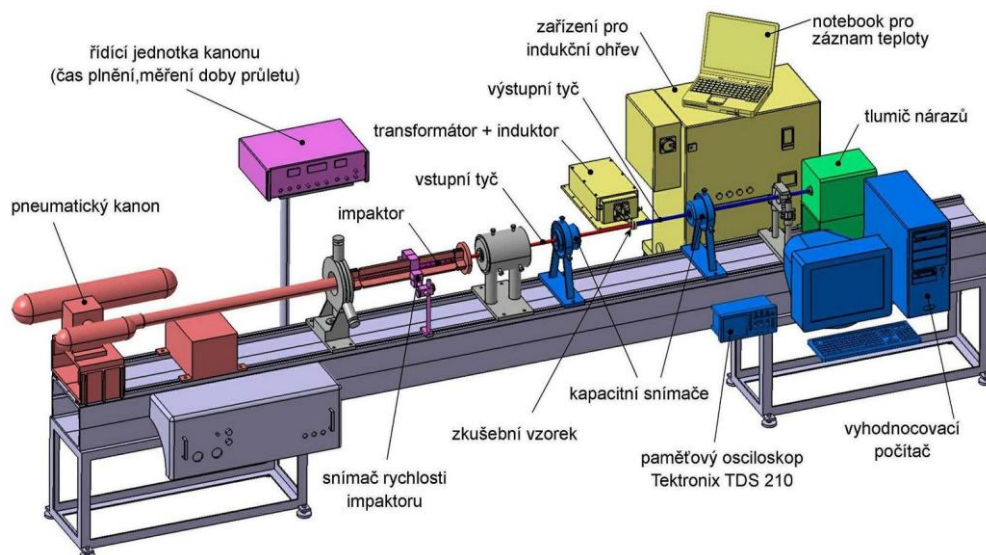
Zařízení HMDT bylo dříve využíváno a provozováno na Akademii věd ČR, Ústavu fyziky materiálu v Brně. Laboratoř vysokých rychlostí deformace - LVRD byla zřízena na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně při Ústavu strojírenské technologie, odboru technologie tváření v roce 1994 za podpory ÚFM AV České republiky. Experimentální pneumatische zařízení –kanón umožňuje provádět Hopkinsonův test-HT (Hopkinson pressure bar test- HPBT). Laboratoř VRD je na základě smlouvy využívána i Lesnickou dřevařskou fakultou -LDF Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity-MZLU v Brně. Jde o ojedinělé, v Evropě unikátní zařízení.

Laboratoř je vybavena měřicím a vyhodnocovacím zařízením ( tenzometrické, kapacitní snímače, bezkontaktní snímače teploty, digitální paměťové osciloskopy Tektronix 210 a HP54624A s řídicími počítači PCi III. generace s vyhodnocovacím software. Laboratoř je především využívána při řešení grantových projektů a výzkumných záměrů, dále ve výuce i při řešení současných problémů průmyslové a vojenské praxe. V rámci laboratoře byla úspěšně vyřešena a obhájena již 3 témata doktorandského studia.



### 10.3. Hopkinsonův test měrnou dělenou tyčí-HMDT

Měřicí a elektronické součásti byly speciálně vyvinuty, vyrobeny a uzpůsobeny na konkrétní požadavky zařízení. Hlavní části zařízení jsou měrné tyče mezi nimiž je vložen, (uchycen) zkušební vzorek. Tyče jsou vyrobeny z vysokopevné oceli 13 240. Průměr obou tyčí je 15 mm, délka 800 mm. Razník-projektíl je vyroben ze shodného materiálu jako měrné tyče a je akcelerován pomocí expandujícího vzduchu ze zásobníku. Aby došlo k plné přeměně kinetické energie razníku v potenciální energii, je čelo razníku zakulacené a dochází tedy k osovému bodovému nárazu na měrnou tyč.

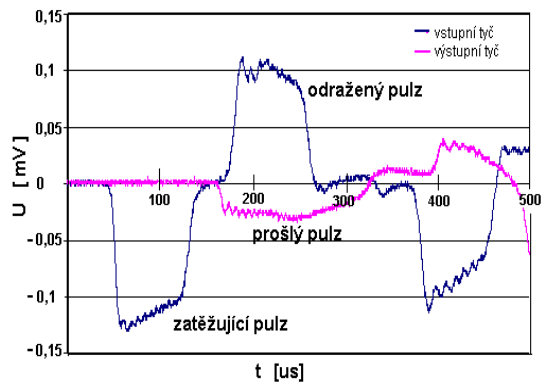


Tlak expandujícího vzduchu lze regulovat dobou komprese vzduchu v zásobníku- vzdušníku. Rychlost nárazu razníku na měrnou tyč je vypočtena z rovnoměrného pohybu průletu mezi dvěma fotodiodami vzdálenými 20 mm od sebe. Zařízení se skládá ze dvou elastických tlakových tyčí mezi nimiž je vložen zkušební vzorek. Typické je, že nárazová tyč - impaktor je urychlována k dopadové tyči, na které po nárazu vyvolá elastickou

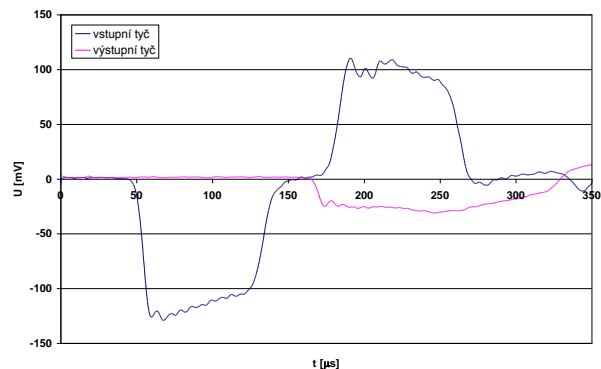
tlakovou vlnu ( tlakový napěťový pulz), která se generuje uvnitř dopadové - zatěžující tyče, šíří se tyčí rychlostí zvuku až na rozhraní tyč-vzorek a časově závisí na deformaci. Tato deformace se měří pomocí snímačů (kapacitních nebo tenzometrických), které jsou umístěny na tyčích. Na rozhraní dopadové tyče a zkušebního vzorku je část tlakové vlny odrazena, část pohlcena do zkušebního vzorku a část tlakové vlny prochází (je přenesena) do opěrné (výstupní tyče). Odražená vlna se šíří zpět dopadovou tyčí jako tahová a způsobí deformaci, která je opět zaznamenána snímačem. U tlakové vlny, která je pohlcena do zkušebního vzorku se změní tlaková deformace.

Změny napěťových pulsů (výchylek) jsou měřeny pomocí kapacitních radiálních snímačů - kondenzátorů. Kondenzátory mají tyto vstupní hodnoty: kapacita kondenzátoru v klidovém stavu 4,228 pF, napětí na kondenzátoru 70 V, parazitní kapacita 21,86 pF. Změny osového napětí z radiálních kondenzátorů jsou zaznamenány na samostatné kanály paměťového osciloskopu (v našem případě na osciloskop fy. TEKTRONIX). Na první kanál osciloskopu jsou zaznamenány data z prvního radiálního kondenzátoru, konkrétně zatěžovaného a odraženého napěťového pulsu, na druhý kanál je zaznamenán prošlý napěťový pulz měřený na druhém radiálním kondenzátoru. Takto zaznamenané napěťové pulsy lze pomocí linky RS 232 přenést do počítače HP Brio, posléze vyhodnotit ve speciálním programu SCOPE.

### Typické záznamy pulsů vyhodnocené pomocí programu Scope 5.5



bez matematické filtrace



s matematickou filtrací

Z průběhu a velikostí napěťových pulsů můžeme stanovit dynamické mechanické vlastnosti materiálu. Vyhodnocují se:

- deformace,
- rychlosti deformace a
- napětí ve vzorku.

## 10.4. Postup vyhodnocení měření

Vzorek testovaného materiálu má formu válečku o průměru  $d_0$  a délce  $l_0$  a je umístěn mezi dvě ocelové tyče kruhového průřezu. V důsledku interakce napěťového pulsu, který je iniciován na konci první tyče, s materiálem vzorku, dochází k přestupu napěťového pulsu  $\sigma_T(t)$  a k částečnému odrazu tohoto pulsu jako  $\sigma_R(t)$ . Úspěšná realizace dané metody je podmíněna správnou volbou materiálu tyčí, které musí být v průběhu šíření napěťového pulsu v elastickém stavu. Doba napěťového pulsu  $\lambda_1$  musí vyhovovat podmínce

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{c_{el}}{2\pi}$$

kde  $c_{el}$ ..je rychlost šíření elastické vlny [m/s]  
 $d$ ...je průměr tyče [mm]

Při průchodu **napět'ového pulsu**  $\sigma_I(t)$  je u tvárných materiálů vzorek charakterizován konečnou poměrnou plastickou deformací  $\varepsilon_p$ :

$$\varepsilon_p = \frac{(l_o - l)}{l_o}$$

kde  $l_o$  je původní délka vzorku

$l$  je délka po deformaci

Důležitá je identifikace těch parametrů funkcí  $\sigma_T$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_b$  které mají přímý vztah k velikosti  $\varepsilon_p$ . Na základě akustických předpokladů o rychlosti vlny v poměru k rozměrům tyče ( $\lambda > d_o/2$ ) lze vlnu považovat za jednorozměrnou a měření povrchové deformace tyče lze brát jako správný ukazatel osové deformace měrné tyče. To umožňuje zjištění průběhů axiální deformace  $\varepsilon_T$ ,  $\varepsilon_R$ ,  $\varepsilon_I$  použitím tenzometrů, resp. průběhu osového napětí  $\sigma_T(t)$ ,  $\sigma_R(t)$ ,  $\sigma_I(t)$  použitím radiálních kondenzátorů. Řešení šíření vlny napětí je obecným předpokladem vyhodnocení experimentu.

*Základní podmínky platnosti HMDT:*

- a) vzorek i tyče jsou ve stavu jednoosé napjatosti
- b) napětí  $\sigma$  a deformace  $\varepsilon$  jsou homogenní podél osy vzorku.

Pro analýzu a vyhodnocování výsledků HMDT jsou nutné znalosti detekovaných průběhů osových napětí  $\sigma_T(t)$ ,  $\sigma_R(t)$ ,  $\sigma_I(t)$  a délky zkušební vzorku. Základní vztahy, vycházející z těchto předpokladů, mají podobu:

$$\dot{\varepsilon} = (1 / z_b l_o) [(\sigma_I(t) - \sigma_T(t) - \sigma_R(t))],$$

$$\sigma(t) = \sigma_T(t) = \sigma_R(t) + \sigma_I(t) = 0,5[\sigma_I(t) + \sigma_R(t) + \sigma_T(t)]$$

kde  $\dot{\varepsilon}$  je rychlost deformace ve vzorku, [ $s^{-1}$ ]

$\sigma(t)$  je osové napětí ve vzorku

$z_b$  je měrná akustická impedance vzorku vypočte se:  $z_b = \rho c_o$

Deformace ve vzorku  $\varepsilon$  se vypočte integrací rychlosti deformace na čase.

$$\varepsilon = \int_0^t \dot{\varepsilon}(t) dt$$

### Poznámky k experimentu

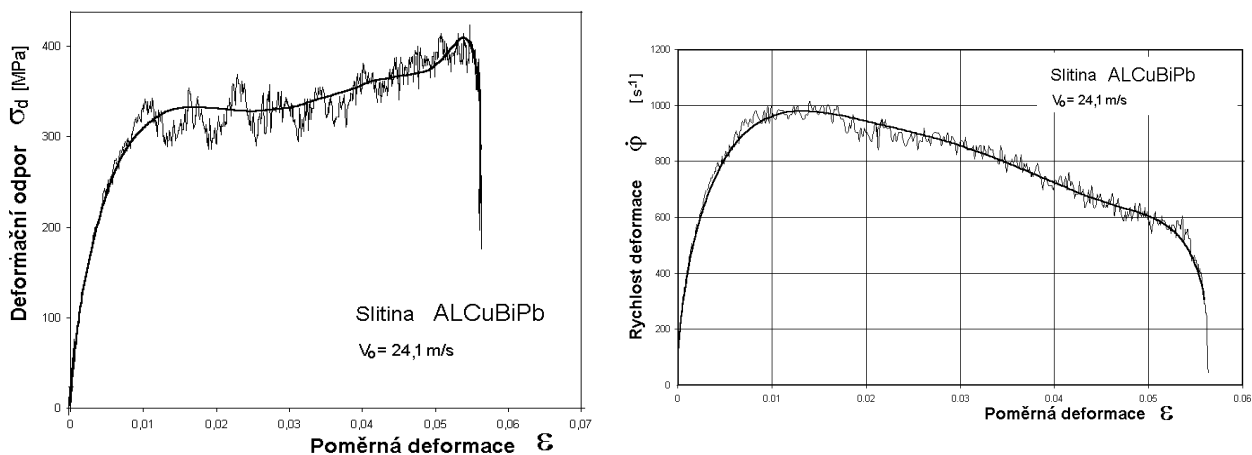
V prvním kroku přípravy měření je nutné navrhnout geometrii zkušebních vzorků. Vzorky nemohou být většího průměru než měrné tyče z důvodu přenosu osového rázového napětí na vzorek. U takového experimentu by došlo ke kombinované, těžko definované deformaci a nesplnily by se základní podmínky platnosti zkoušky tj. vzorek i tyče jsou ve stavu jednoosé napjatosti. Napětí  $\sigma$  a deformace  $\varphi$  jsou homogenní podél osy vzorku což je důležité pro vyhodnocení experimentu.

Naopak vzorek nemůže mít malý průměr neboť by bylo obtížné zajistit centrování vzorku mezi měrnými tyčemi. Mohlo by tak dojít k asymetrické deformaci vzorku, což by opět nesplňovalo podmínky platnosti zkoušky. Délka vzorku byla zvolena 5,2 mm. Délka byla zvolena s ohledem na možnosti zařízení. Délka nemůže být příliš velkých rozměrů z několika důvodů. Prvním je možnost nerovnoměrné deformace vzorku při rázovém zatížení. Druhým důvodem je možnost nevýrazného záznamu nebo v krajním případě pohlcení přechodového napětí druhé měrné tyče deformací vzorku. **Ideální se tedy jeví poměr L/D = 0,5.** K získání dostatečné deformace vzorku vyvolané rázem a k získání potřebné rychlosti deformace se jeví optimální rozměry L = 5 mm a D = 10 mm.



Druhým podstatným faktorem měření je tření na rozhraní čel tyče a vzorku. Při rychlosti deformace v rozmezí 1000 až 5000 s<sup>-1</sup> se log. deformace ve vzorku pohybuje v rozmezí 0,005-0,04. Prakticky to znamená, že vzorek se zkrátí v rozmezí 0,1 až 0,4 mm. Takovéto zkrácení se fakticky neprojeví na zjevně změně průměru vzorku. Proto se lze domnívat, že vzhledem k rychlosti děje a deformacím je **součinitel tření mezi rozhraním čel tyče a vzorku roven hydrodynamickým hodnotám**. I z předchozích výzkumů případně výzkumných prací renomovaných laboratoří vysokých rychlostí deformace bylo taktéž zjištěno, že součinitel tření je možné považovat za velmi nízký, zdánlivě téměř nulový.

Pro potvrzení nebo vyvrácení by bylo nutné provést zkoušky na zařízeních, u kterých je možné zkoušet vzorky až o několik řádů větších rozměrů při dosažení vyšších deformací jako např. v laboratoři European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen v Ispře v Itálii. Přenos a hlavně porovnání výsledků z těchto případných testů by bylo komplikované přenést a následně porovnat z dosavadními výsledky měření, neboť zkoušený materiál by musel být totožný svým chemickým složením, tepelným zpracováním, atd.).



První obrázek zobrazuje výslednou závislosti napětí ve vzorku na log. deformaci získanou po přepočtu rázového, odraženého a přechodového napětíového pulsu. Z tohoto obrázku jsou patrné značné disperze, které jsou častým doprovodným jevem při dynamických záznamech. Další obrázek zaznamenává průběh rychlosti deformace během přetvoření vzorku při rázu na čelo tyče-kovadlinu.

**Hlavní výhodou Hopkinsonova testu je tedy přímé vyhodnocení potřebných závislostí: napětí – deformace a rychlosti deformace – deformace.**

## Studijní literatura

- [1] PERNICA,Z., JOPEK,M., FOREJT,M. Zkoušení materiálu pomocí Hopkinsonova testu. In *JUNIORMAT'01*. Sborník mezinárodní konference vydán ČSNMT a ÚMI FSI VUT Brno, 19-20. září 2001. Vydání 1. Tiskárna Cicero Ostrava, s.127-128. ISBN 80 214-1885-0.
- [2] KRÁSNY,D., PERNICA,Z.,: Determination of dynamic mechanical properties of material by using Hopkinson test. In JUNIOR-EUROMAT 2002 in Lausanne. *Proceedings of the Junior-Euromat Conference*. 1<sup>st</sup> ed. Lausanne, Federation of European Materials Societies. September 2-5, 2002. Volume 1. p 2
- [3] KRÁSNY,D., PERNICA,Z., . Vliv rozměru vzorku na průběh odezvových funkcí u metody Hopkinsonovy měrné dělené tyče. (The influence of the specimen dimension over the process of the response functions by using the Hopkinson pressure bar test). *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference TECHNOLOGY 2003*. Slovak University of Technology in Bratislava. 1<sup>st</sup> ed. September 9-10. 2003. Vol.1. p 127-1 -127-4. ISBN 80-227-1935-8