

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301      Strojní inženýrství  
Studijní obor:    2303T004      Strojírenská technologie – technologie  
   obrábění

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Využití dynamometrů Kistler při hodnocení tvrdosti laserem kalené  
povrchové vrstvy

Autor:                    **Bc. Eliška SAMIECOVÁ**

Vedoucí práce:      **Doc. Ing. Milan HONNER, Ph.D.**

Akademický rok 2011/2012

## **Zadání DP**

### **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

### **Autorská práva**

Podle Zákona o právu autorském č. 35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## **Poděkování**

Děkuji všem, kteří mne vedli a pomáhali při studiu a při tvorbě diplomové práce.  
Poděkování patří mé rodině a z personálu na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni  
především Ing. Janu Kutlwašerovi, Ing. Josefu Sleničkovi.....

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Samiecová	Jméno Eliška
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2303T004 Strojírenská technologie – technologie obrábění	
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Honner, Ph.D.	Jméno Milan
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST – KTO	
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b> <b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Využití dynamometrů Kistler při hodnocení tvrdosti laserem kalené povrchové vrstvy	

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	62	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	62	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Tato diplomová práce se zabývá zjištěním možnosti závislosti řezných sil při vrtání na tvrdosti vrstev laserem kaleného povrchu nástrojové oceli ČSN 41 9313. První část obsahuje teoretický úvod do problematiky měření tvrdosti a kalení povrchů laserem. Druhá část je věnována provedeným experimentům. Výsledky řezných sil vrtání do laserem zakaleného povrchu jsou hodnoceny a dávány do souvislosti s hodnotami tvrdostí jednotlivých vrstev materiálu. Po jejich zhodnocení následují doporučení pro další experimenty.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	měření tvrdosti, povrchové kalení, laser, nástrojová ocel ČSN 41 9313, vrtání, řezné síly

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Samiecová	Name Eliška	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2303T004 Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Honner, Ph.D.	Name Milan	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	The use of Kistlers dynamometers by the evaluation of the laser-hardened surface layer		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machining Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2012
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

**NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)**

<b>TOTALLY</b>	62	<b>TEXT PART</b>	62	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>This dissertation thesis is focused on to determine the relation possibilities of the drilling cutting forces to the hardness layer of the laser hardened surface of the tool steel ČSN 41 9313. First part contains theoretical introduction to the harness measurement and to the laser surface hardening problematique. Next part is dedicated to the executed experiments. The Results of the drilling cutting forces into the laser hardened surface are evaluated and given to the relation with the hardness values of individual layers of the material. After the evaluation the recommendations for further experiments are following.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>harness measurement, surface hardening, laser, tool steel ČSN 41 9313, drilling, cutting forces</p>

1 Úvod	1
2 Rozbor současného stavu	2
2.1 Měření tvrdosti povrchů	2
2.1.1 Definice tvrdosti	2
2.1.2 Rozdělení zkoušek tvrdosti	2
2.1.3 Zkoušky makrotvrdosti a mikrotvrdosti	3
2.1.4 Statické zkoušky tvrdosti	4
2.1.4.1 Zkoušky vrypové	4
2.1.4.2 Zkoušky vnikací	5
2.1.5 Dynamické zkoušky tvrdosti	11
2.1.5.1 Zkoušky nárazové plastické	11
2.1.5.2 Zkoušky odrazové elastické	12
2.1.6 Používané přenosné tvrdoměry a jejich principy zjištění tvrdosti	12
2.1.7 Tvrdoměry pro měření těžko dostupných ploch	14
2.1.8 Nové způsoby zkoušení tvrdosti	15
2.2 Povrchové tepelné zpracování	16
2.2.1 Tepelné zpracování	16
2.2.2 Obrobitelnost tepelně zpracované součásti	17
2.2.3 Povrchové tepelné zpracování	17
2.2.4 Povrchové kalení laserovým paprskem	18
2.2.4.1 Princip laseru	18
2.2.4.2 Druhy laserů využívaných k povrchovému kalení	18
2.2.4.3 Proces povrchového kalení laserem	21
3 Návrh experimentů a metody měření	23
3.1 Popis experimentálního materiálu	23
3.2 Popis experimentálního zařízení a způsob měření	25
3.2.1 Vysokovýkonový diodový laser HPDD Coherent ISL-4000L	25
3.2.2 Měření řezných sil - Dynamometry Kistler, software LabView	25

3.2.2.1	Vícesložkový dynamometr do 40 kN, typ 9255B	28
3.2.2.2	Rotační 4-složkový dynamometr RCD, typ 9123C	29
3.2.2.3	Software LabVIEW	30
3.2.3	Vertikální obráběcí centrum, typ MCV 750A	31
3.2.3.1	Volba řezného nástroje a řezných podmínek	31
3.3	Pre – experiment	33
3.3.1	Příprava experimentálního vzorku	33
3.3.2	Vrtání a měření složek řezných sil	35
3.3.3	Výsledky	37
3.4	Experiment	37
3.4.1	Příprava experimentálního vzorku	37
3.4.2	Vrtání a měření složek řezných sil	38
3.4.3	Výsledky	39
4	Hodnocení získaných výsledků a následná doporučení	40
4.1	Zhodnocení experimentů	41
4.2	Doporučení	47
5	Závěr	48
	Seznam použité literatury	49
	Přílohy	50



# 1 Úvod

Cílem této práce je využít výsledků dynamometrů Kistler pro hodnocení tvrdosti laserem kalených povrchů. Jde o zjištění možnosti závislosti řezných sil a tvrdosti materiálu v určité hloubce. Tohoto dosáhneme pomocí provedených experimentů, které budou v práci popsány. Výsledky této práce jsou určeny pro Katedru technologie obrábění, Fakulty strojní, ZČU v Plzni. Předpokládáme, že pomocí poměrně jednoduché metody se docílí relativně přesných výsledků o tvrdosti obráběného materiálu za účelem snížení např. přípravných časů technologického postupu, optimalizace řezných podmínek či zjištění obrobitelnosti materiálu. Proti běžnému měření tvrdosti tvrdoměry popřípadě mikrotvrdoměry odpadá v tomto případě zdlouhavá příprava etalonu (rozřezání, úprava povrchu) a v některých případech složitá příprava samotného měřicího zařízení. Provádění experimentu bylo omezeno pouze měřením tvrdosti materiálu v požadované hloubce. Měření v požadovaném místě nemohlo z důvodu špatné dostupnosti proběhnout standardním způsobem. Zároveň však probíhal experiment Bc. Miroslava Schejbala, ze kterého bylo možné převzít hodnoty tvrdosti v požadovaných hloubkách.

Tato práce je nejdříve věnována několika základním teoretickým pojmům, které je vhodné si přiblížit pro následující kapitoly, kde je již zaměřena na konkrétní praktické experimenty. Jedním z těchto pojmů je tvrdost povrchů a možnosti jejího měření. Tvrdost je měřena z důvodu zjištění této vlastnosti u nového materiálu nebo pro ověření požadované specifikace daného materiálu. Známe několik metod zkoušení tvrdosti, které jsou rozdělovány především podle způsobu zatěžování a podle typu deformace zkoušeného povrchu. Po obecném popisu základních metod následuje popis konkrétních možností měření tvrdosti tvrdoměry, které jsou v dnešní době dostupné na trhu a často užívané v praxi. Zmíněn je také rozvoj nových metod zjišťování tvrdosti. Dalším významným pojmem je kalení povrchů laserem. Laser byl objeven roku 1960 v USA Theodorem H. Maimanem a následně oceněn Nobelovou cenou. Laserová technika je stále v dynamickém vývoji a je dnes nedílnou součástí našeho života. Jeho využití je opravdu všestranné. V této práci je popsáno jeho využití pro kalení povrchů ocelí, které má jako ostatní možnosti využití laseru nemalé výhody.

## **2 Rozbor současného stavu**

Jak již bylo uvedeno v úvodu, tato kapitola je věnována základním pojmům, jako je laserové kalení povrchů, měření tvrdosti povrchů a blíže pojmům souvisejícím s prováděnými experimenty.

### **2.1 Měření tvrdosti povrchů**

Tvrdot, jako mechanická vlastnost, je velmi důležitá v technických oborech a to nejen pro kovové materiály. Pro zjištění tvrdosti existuje řada mechanických zkoušek. Vývoj metod zkoušek tvrdosti trvá přes 200 let, ale stále se nedospělo k jednotné koncepci tvrdosti. U měření tedy můžeme získat tolik hodnot tvrdostí, kolik druhů metod zkoušek na daný vzorek použijeme. Převody hodnot různých metod tvrdostí jsou pouze orientační a jsou možné pouze na základě provedení porovnávacích zkoušek. Zásady převodu hodnot tvrdosti a obecné informace o používání převodních tabulek specifikuje norma ČSN EN ISO 18265 (420379) Kovové materiály - Převod hodnot tvrdosti. Tato norma je českou verzí evropské normy EN ISO 18265:2003. K dispozici jsou také online převodníky tvrdosti. Hodnoty tvrdosti uváděné s jednotkou  $N \cdot mm^{-2}$  se mohou zaměnit s hodnotou pevnosti. Proto se také tyto hodnoty uvádí bezrozměrně s udáním způsobu měření či stupnice. Podle naměřených hodnot je možné také odhadnout další vlastnosti materiálu (např. obrobitelnost, pevnost v tahu) a to především při použití empirických koeficientů.

#### **2.1.1 Definice tvrdosti**

Tvrdot kovů je mechanická vlastnost, která vyjadřuje odpor, který klade zkoušený materiál cizímu vnikajícímu tělesu s přesně definovanou geometrií.

#### **2.1.2 Rozdělení zkoušek tvrdosti**

Zkoušky jsou většinou rozdělovány podle způsobu zatěžování a typu deformace povrchu zkoušeného vzorku. Také rozlišujeme zkoušky makro a mikrotvrdosti. Rozdělení

zkoušek a jejich metody budou popsány v následujících kapitolách. V následující tabulce je uvedeno rozdělení těchto zkoušek tvrdosti a přiřazeny konkrétní metody zkoušení.

**Tab.: 2.1.2-1 Rozdělení zkoušek tvrdosti**

<b>zk. makrotvrlosti</b>	<b>statické</b>	<b>vrypové</b>	<b>Martensova metoda</b>
		<b>vnikací</b>	<b>Brinellova metoda</b>
			<b>Ludwikova metoda</b>
			<b>Vickersova metoda</b>
			<b>Rockwellova metoda</b>
	<b>dynamické</b>	<b>nárazové plastické</b>	<b>Metoda volným pádem</b>
			<b>Metoda stlačenou pružinou</b>
			<b>Porovnávací metoda</b>
		<b>odrazové elastické</b>	<b>Metoda pružného odrazu (Shore)</b>
			<b>Kyvadlová metoda (Duroskop)</b>
<b>zk. mikrotvrlosti</b>	<b>statické</b>	<b>vnikací</b>	<b>Vickersova metoda (při zatížení do 4,9 N)</b>
			<b>Grodzinského metoda</b>

### 2.1.3 Zkoušky makrotvrlosti a mikrotvrlosti

Při určování mikrotvrlosti (popř. nanotvrlosti) se jedná o použití malých zatížení (do 2 N). Při zatížení nad tuto hranici do zatížení 30 N (zkouška tvrdosti při nízkém zatížení) nebo nad 30 N (standardní zkouška tvrdosti) se jedná o zkoušky makrotvrlosti. Měření mikrotvrlosti nebo nanotvrlosti nelze určovat běžnými tvrdoměry, protože je zde nutná větší přesnost proměrování vtisku (přesná optika), ale i přesnost při samotném zatěžování (přímé zatěžování závažím, cejchovaná pružinka). Jako indentor je možné použít pouze diamant. Měřené povrchy musí být upraveny (elektrolytické a chemické leštění). Mezi nejpoužívanější měření mikrotvrlosti patří metody na principu Vickerse a Knoopu.

U nás je nejpoužívanější a nejpřesnější Hanemannův mikrotvrdoměr. Vnikající tělísko je Vickersův jehlan a je součástí objektivu. Je na bázi optického mikroskopu. Rozsah použitelného zatížení je  $4,3 \cdot 10^{-3}$  N až 1,96 N. Výsledná hodnota označována HM.

## 2.1.4 Statické zkoušky tvrdosti

Tyto zkoušky se využívají v technické praxi i ve výzkumu nejčastěji. Znakem těchto zkoušek je působení klidné a spojitě síly bez rázů.

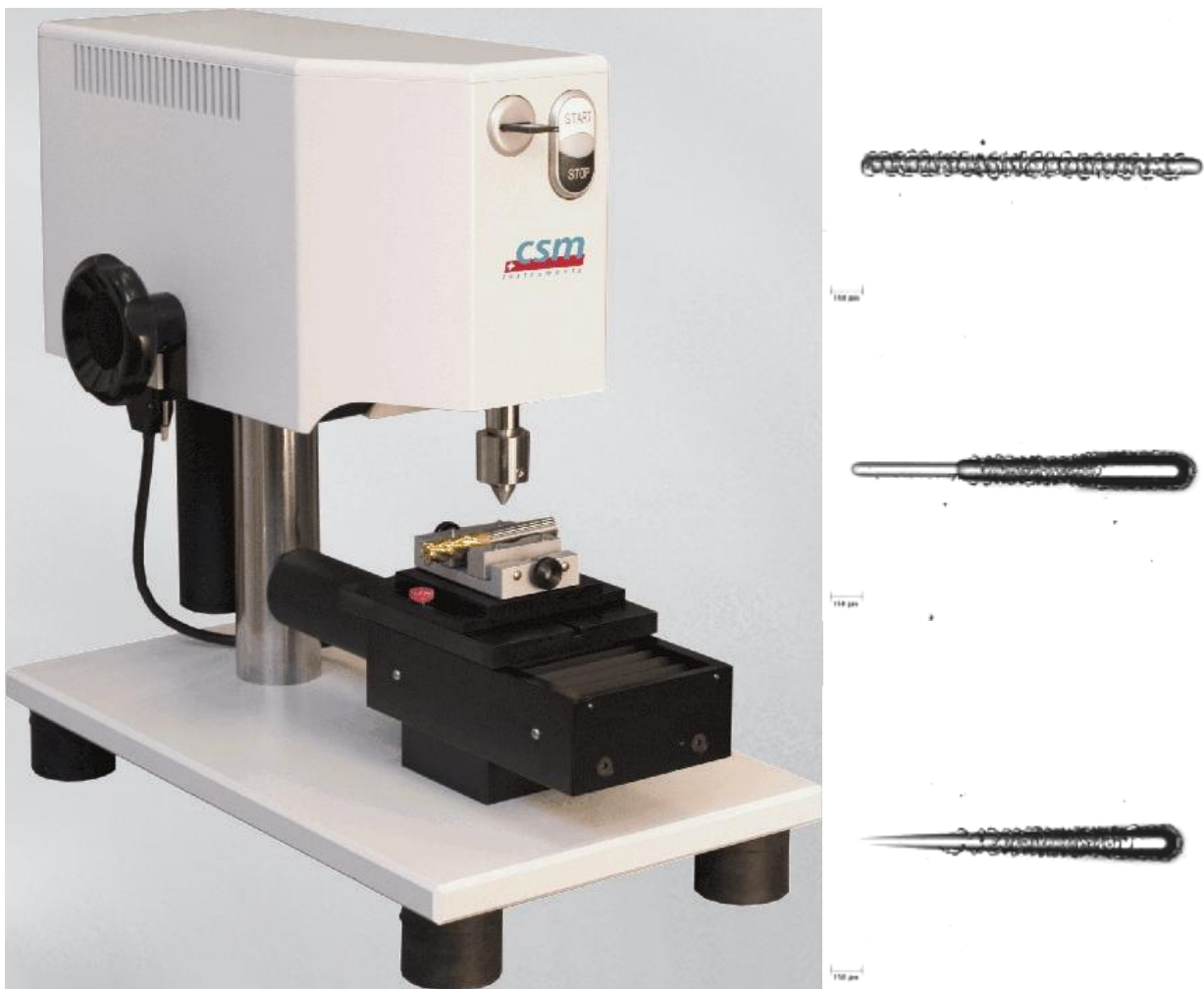
### 2.1.4.1 Zkoušky vrypové

Vrypové zkoušky jsou založeny na myšlence Mohseovy stupnice tvrdosti. Zde jsou seřazeny nerosty. První z nich je nejměkčí a zbylých devět se stupňuje se stupňující se tvrdostí. Podobně byla sestrojena i stupnice pro strojírenské materiály. Protože citlivost této stupnice je ale příliš malá, určuje se tvrdost podle šířky vytvořeného vrypu.

#### Metoda Martense

Na tyto zkoušky se využívá Martensova přístroje. Vrypovým nástrojem je zde broušený diamantový kužel o vrcholovém úhlu  $90^\circ$ , který se zatěžuje silou až 19,8 N. Kužel pojíždí po vyhlazeném zkoušeném povrchu. Hodnota tvrdosti je zde zatížení, které je třeba pro vytvoření vrypu šířky 0,01 mm. Také je možná vytvořit vryp pod stejným zatížením a porovnávat jeho šířku. Metoda Martense je značně nepřesná a do dnešní doby se v technické praxi dochoval pouze tzv. SCRATCH TEST.

V tomto případě se vytvoří vryp, u kterého postupně narůstá zátěžná síla. Zde je indenter opět diamantový kužel, avšak v tomto případě s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  a s poloměrem zaoblení vrcholu 0,2 mm. Tato metoda se používá při analýze adhezivně-kohezivního chování (odezva povrchové vrstvy na pronikající pohybující se indenter) u několika mikronů tenkých vrstev. Zde se určuje kritické zatížení, při kterém došlo k adheznímu odtržení vrstvy.



**Obr.: 2.1.4.1-1 Scratch tester (fa PLATIT AG), ukázky adhezivně-kohezivního chování vrstvy [1]**

#### **2.1.4.2 Zkoušky vnikací**

Stejně jako ostatní zkoušky tvrdosti, mají i vnikací zkoušky dlouhou historii. Pro potřebné požadavky praxe se však vyvinulo jen několik metod. U všech se jedná o vtlačování indentoru do zkoušeného povrchu. Liší se od sebe tvarem a materiálem indentoru, velikostí zatížení a způsobem vyhodnocování.

## Brinellova metoda

V případě Brinellovy metody je vtlačována kulička o průměru  $D$  do vyleštěné plochy zkušebního tělesa silou  $F$  a následně měřen průměr vtisku  $d$ . Síla, kterou je kulička vtlačována je konstantní, kolmá k povrchu a působí po určitou dobu. Kulička z kalené oceli [HBS] je používána pro měkké materiály a ze slinutých karbidů [HBW] pro tvrdší materiály. Metoda je však většinou používána pro měkké nebo středně tvrdé materiály. Zkoušený povrch musí být rovný, hladký a zbaven nečistot. To vše by mohlo ovlivnit výsledky měření.

Kulička bývá o průměru  $d$  0,625 mm, 1,25 mm, 2,5 mm, 5 mm, 10mm. To závisí na tloušťce zkoušeného materiálu. Aby se ve výsledcích neprojevila tvrdost materiálu, musí být tato tloušťka minimálně desetkrát větší než hloubka vtisku. Střed vtisku musí být vzdálen minimálně  $2,5 d$  od okraje vzorku u ocelí a litin. U jiných druhů materiálu se tato hodnota mění. S ohledem na tyto požadavky se také volí velikost zatížení.

Velikost tohoto zatížení je volena podle vztahu  $F = KD^2$ , kde  $K$  je tabulkový koeficient a jeho hodnoty se mění s druhem materiálu. Doba zatížení také závisí na druhu materiálu zkoušeného vzorku. U litin a ocelí se volí doba zatěžování 10 až 15 s. U jiných materiálů může být tato doba až mnohonásobně vyšší.

Pokud měření probíhalo za normálních podmínek ( $\varnothing D = 10$  mm,  $F = 29\,430$  N, doba zatížení 10 až 15 s), pak se výsledek píše pouze ve tvaru číselné hodnoty tvrdosti a písmeny HB. Za jiných podmínek se za písmena HB uvádí podmínky zkoušky a to v pořadí:  $\varnothing D$  (mm),  $F$  (kp), doba zatěžování (s).

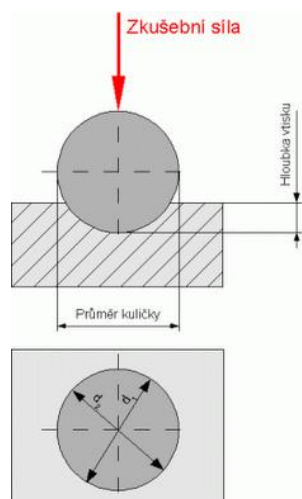
Tvrdost podle Brinella je stanovena podle vztahu:

$$HB = F/S$$

, kde  $S$  je povrch vtisku vtlačeného vrchlíku [ $\text{mm}^2$ ] a je vypočítán dle vztahu:

$$S = \pi Dh = \pi D 0,5 [D - (D^2 - d^2)^{0,5}]$$

, kde  $h$  je hloubka vtisku [mm], a  $d$  je aritmetický průměr dvou naměřených průměrů ( $d_1, d_2$ ) [mm]. Měření  $h$  není tak přesné jako měření průměru vtisku.



**Obr.: 2.1.4.2-1 Princip podle Brinella [2]**

Zkouška je vhodná pouze pro měkké a heterogenní materiály. Příklady hodnot tvrdosti HB některých materiálů (pro volené koeficienty K) jsou uvedeny v následující tabulce.

**Tab.: 2.1.4.2-1 Příklady hodnot tvrdosti pro volené koeficienty K**

K	Tvrdość HB	Tvrdość HB	Měřený materiál
30	96-650	96-65	Oceli
		> 140	Litiny a slitiny niklu, titan
		> 200	Měď a její slitiny
15	50-320	50 - 300	Měď a její slitiny
		> 50	Slitiny lehkých kovů a ložiskové slitiny
10	32 - 200	35 - 200	Měď a její slitiny
		> 140	Litiny, slitiny niklu, titanu, kobaltu...
		> 80	Slitiny lehkých kovů a jejich slitiny
5	16 - 100	< 35	Měď a její slitiny
		30 - 85	Lehké kovy a jejich slitiny, ložiskové kompozice
2,5	8 - 50	< 35	Lehké kovy a jejich slitiny, ložiskové kompozice
1,25	4 – 25	< 20	Olovo, cín, ložiskové kompozice a jiné slitiny
1	3,2 - 20		

V laboratořích jsou používány velké a stabilní Brinellovy tvrdoměry, ale pro jednodušší použití byly zkonstruovány malé přístroje. Často se využívá univerzálních tvrdoměrů, kde lze využít všechny metody zkoušek vnikacích, popř. jejich kombinací. Na následujícím obrázku je příklad univerzálního tvrdoměru SWISSMAX 600 firmy GNEHM. Je určen pro zkoušky tvrdosti dle Vickerse, Brinella, Rockwella, Super-rockwella a také tlaku kuličkou ve všech stupních zatížení.



**Obr.: 2.1.4.2-2 Tvrdoměr SWISSMAX 600 [3]**

### **Ludwikova metoda**

Ludwik použil pro zkoušky kužele z kalené ocele s vrcholovým úhlem 60, 90 a 120°. Vrchol je zaoblen s poloměrem 0,2 mm. Pro Brinellovu zkoušku zákon o úměrnosti přetvárné práce a příslušného deformovaného objemu neplatí. Toto Ludwik vyřešil právě použitím kužele místo kuličky. I když má tato metoda velké výhody a poukázala na nevýhody Brinellovy zkoušky, v praxi se neujala. Je používána pouze ve speciálních případech a na jejích základech vznikla další metoda – Rockwellova.

### **Rockwellova zkouška**

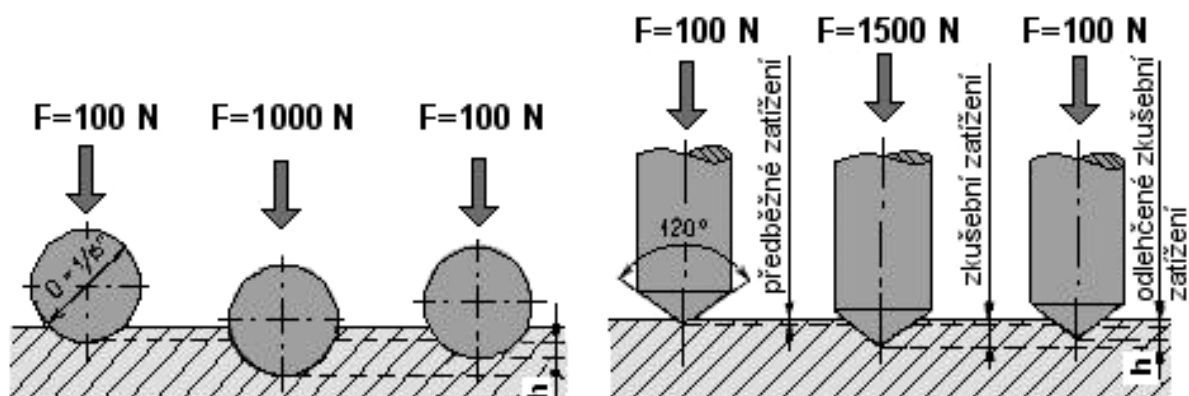
Normy upravující tuto metodu:

- ČSN EN ISO 6508-1 - Kovové materiály. Zkouška tvrdosti podle Rockwella - Část 1: Zkušební metoda (stupnice A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T).
- ČSN EN ISO 6508-2 - Kovové materiály. Zkouška tvrdosti podle Rockwella - Část 2: Ověřování a kalibrace zkušebních zařízení (stupnice A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T).
- ČSN EN ISO 6508-3 - Kovové materiály. Zkouška tvrdosti podle Rockwella - Část 3: Kalibrace referenčních destiček (stupnice A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T).
- ISO 6508-1 - Metallic materials. Rockwell hardness test - Part 1: Test method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T).
- ISO 6508-2 - Metallic materials. Rockwell hardness test - Part 2: Verification and calibration of testing machines (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T).



- ISO 6508-3 - Metallic materials. Rockwell hardness test - Part 3: Calibration of reference blocks (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T).
- ISO 3738-1:1982 - Hardmetals - Rockwell hardness test (scale A) - Part 1: Test method.
- ISO 3738-2:1982 - Hardmetals - Rockwell hardness test (scale A) - Part 2: Preparation and calibration of standard test blocks.
- ASTM E18 - Standard Test Method for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials.
- ASTM E1842 - Standard Test Method for Macro-Rockwell Hardness Testing of Metallic Materials.
- ASTM D785 - Standard Test Method for Rockwell Hardness of Plastic and Electrical Insulating Materials.

Použitý indentor je diamantový kužel s vrcholem  $120^\circ$  nebo ocelová kulička. Hodnota tvrdosti se zjišťuje z rozdílu vtisku indentoru mezi prvním (předběžným = 100 N) a druhým (celkovým) stupněm zatížení. Proto tato metoda nevyžaduje upravení povrchu před měřením, je rychlá a snadná. Vtisky jsou velmi malé, hluboké max. 0,2 mm. Vhodná je pro kontrolu velkých sérií a tam kde není použitelná Brinellova metoda (kalené, zušlechťované nebo jinak tepelně zpracované oceli).



Obr.: 2.1.4.2-3 Princip podle Rockwella [4]

Jsou normalizovány tři Rockwellovy zkoušky [HRA, HRB, HRC]. Vhodnost použití jednotlivých druhů závisí především na předpokládané tvrdosti zkoušeného vzorku.

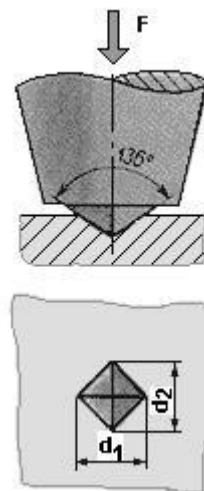
- HRA - diamantový kužel, celkové zatížení 600 N  
- použití: slinuté karbidy a tenké povrchové vrstvy

HRB - ocelová kulička, celkové zatížení 1000 N  
- použití: pro kovy s tvrdostí 25 – 100 HRB

HRC - diamantový kužel, celkové zatížení 1500 N  
- použití: pro rozsah 20 – 67 HRC (povrchově tepelně zpracovaná ocel, tvrdé odlitky a ostatní materiály tvrdší než 100 HRB)

### Vickersova metoda

Název této metody vznikl podle prvního tvrdoměru tohoto typu, který zkonstruovala firma Vickers. Jedná se o vtlačování diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu o vrcholovém úhlu mezi protilehlými stěnami  $136^\circ$ . V tomto případě se měří úhlopříčky vtisku ( $d_1, d_2$ ). Doba zatížení se pohybuje od 10 do 180 s. Zatížení lze volit libovolně, protože při tomto tvaru indentoru zůstává vtisk velice podobný. Bývá 10 až 100 N. Toto zatížení se píše za značku HV. Označení pouze HV je opět v normálních podmínkách, které zde znamenají zatížení 300 N po dobu 10 až 15 s. Tato metoda je velmi přesná, ale náročná na úpravu měřeného povrchu. Zkouška je vhodná pro všechny tvrdosti materiálu. Je minimálně závislá na zatížení. Ve velkých závodech se používá tzv. DIATESTORŮ. Obraz vtisku je zde zvětšeně promítnut, což urychluje čtení délkou úhlopříček.



**Obr.: 2.1.4.2-4 Princip podle Vickerse [4]**

## **Knoopova metoda**

Zde je indentorem opět diamantový jehlan, ale jeho podstavou je velice protáhlý kosočtverec, jehož úhlopříčky jsou v poměru 1:7. Měří se zde pouze delší úhlopříčka, protože v tomto směru je zanedbatelné odpružení. Další její výhodou je, že lze použít na velice úzké vzorky.

### **2.1.5 Dynamické zkoušky tvrdosti**

V případě dynamické zkoušky se nejedná o působení klidné a spojitě síly. Rozlišujeme dva způsoby dynamické zkoušky. V prvním případě je toto působení nahrazeno rázem, v druhém případě se jedná o měření velikosti odrazu indentoru, který je určitou energií spuštěn na zkoušený povrch.

#### **2.1.5.1 Zkoušky nárazové plastické**

##### **Metoda volným pádem**

Kulička je vtlačována silou, kterou způsobí pád beranu z určité výšky. Tvrdost je určena podle podílu celkově spotřebované práce a objemu vtisku.

##### **Metoda stlačenou pružinou**

V tomto případě je kulička vtlačována dynamickým rázem, který způsobí napnutá pružina definované tuhosti. Kulička je tak vtiskována vždy stejnou energií. Takto funguje BAUMANOVO KLADÍVKO.

##### **Metoda porovnávací**

Na tomto principu funguje TVRDOMĚR POLDI. Je založen na principu porovnání známé pevnosti porovnávací tyčinky s pevností materiálu zkoušeného vzorku metodou Brinell. Tvrdoměr se přiloží k materiálu a udeří se na úderník kladívkem. Kulička vytvoří vtisk do zkoušeného materiálu, ale i do materiálu porovnávacího. Průměry těchto vtisků se změří a podle nich se v přiložených tabulkách vyhledá hodnota tvrdosti.

### 2.1.5.2 Zkoušky odrazové elastické

#### Metoda pružného odrazu

Na tomto principu, kdy je tvrdost dána výškou odrazu tělesa, padajícího na zkoušený povrch ze standartizované výšky, je založen SHOREHO SKLEROSKOP. Padajícím tělesem je zde kulovitě broušený diamant. Toto těleso volně padá v kalibrované trubce.

#### Kyvadlová metoda

V tomto případě je tvrdost dána úhlem odrazu kladívka. Kladívko má kulový ocelový vrchlík na čele. Je umístěno na otočném rameni a dopadá z určité výšky na zkoušený povrch. Nevzniká zde tření o vedení jako je to v případě Shoreho metody.

### 2.1.6 Používané přenosné tvrdoměry a jejich principy zjištění tvrdosti

U klasických tvrdoměrů je nutné donést měřený vzorek k měřicímu přístroji. Z požadavku měření některých povrchů přímo na pracovišti nebo v méně dostupných místech se dospělo k metodám, kde je možno použít přenosné přístroje. Přenosné tvrdoměry využívají dynamickou metodu, ultrazvukovou metodu (UCI) nebo optickou metodu (TIV). Některé pracují na základě jejich kombinací.

Kromě již uvedených tvrdoměrů (Kladívko Poldi...), využívají dynamické metody další přenosné tvrdoměry. U dalších tvrdoměrů, které využívají dynamicko-elastické metody je indentorem kulička ze slinutého karbidu nebo diamantu. Vystřelená kulička pružinou na měřený povrch má určitou rychlost před a po dopadu. Tyto rychlosti jsou zjišťovány pomocí magnetické indukce (indukovaného napětí) díky zabudovanému permanentnímu magnetu v kuličce a cívce v sondě přístroje. Tato metoda nevyžaduje tak pečlivou přípravu povrchu jako další dvě následující. Na následujícím obrázku je příklad tvrdoměru fungující na tomto principu.



**Obr.: 2.1.6-1 Přenosný tvrdoměr Krautkramer Dynapocket [6]**

Metoda ultrazvuková UCI (Ultrasonic Contact Impedance-ultrazvuková kontaktní impedance) využívá taktěž velikosti vpichu od indentoru pro určení tvrdosti jako standardní metody. Velikost vpichu však není určena velikostí úhlopříček jako u Vickerse, ale elektronicky měřenou zvukovou frekvencí. Vickersův diamantový hrot je připevněn na konci kovové tyčky. Tato tyčinka je rozkmitána piezoelektrickými měniči. Testovaný materiál způsobuje změnu frekvence kmitů, která je závislá na hloubce vpichu a tím i na tvrdosti. Na následujícím obrázku je příklad tohoto druhu tvrdoměrů.



**Obr.: 2.1.6-2 Přenosný tvrdoměr Krautkramer MIC 10, měřící sondy (vlevo) [6]**

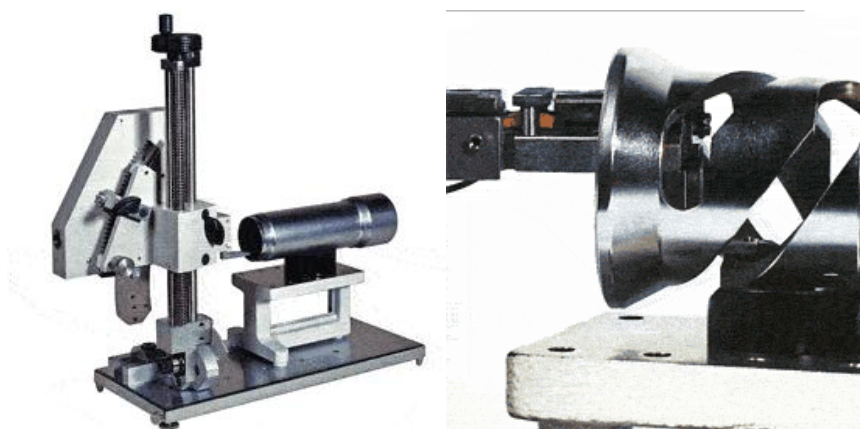
Princip optické metody TIV (Through Indenter Viewing = pohled "skrz" diamant) je v podstatě stejný jako u Vickersovy metody. V tomto případě je však měřící sonda obsahuje i optickou soustavu s kamerou. Vpich je snímán v reálném čase a na displeji zobrazováno okolí vpichu (ukázka - následující obr.).



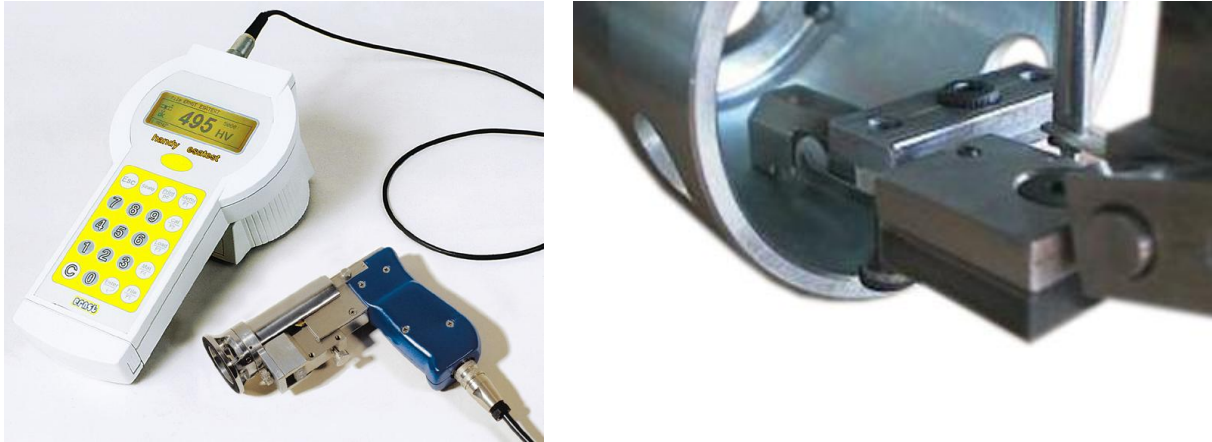
**Obr.: 2.1.6-3 Přenosný tvrdoměr Krautkramer TIV [7]**

### 2.1.7 Tvrdoměry pro měření těžko dostupných ploch

V případě měření tvrdosti ploch, které jsou těžko dostupné, je měření prostorově omezeno a lze využít jen některých tvrdoměrů. Záleží především na velikosti použité měřicí sondy a na možnosti vychýlení sondy od kolmého směru k měřenému materiálu. Avšak i použití těchto speciálních měřících sond je omezeno volným prostorem kolem měřené plochy. Jedním z těchto tvrdoměrů je již uvedený tvrdoměr Krautkramer MIC 10 (Obr.:2.1.6-2). Dalším příkladem je tvrdoměr využívaný na měření vnitřních průměrů (Esatest MTR a jemu podobný avšak v ručním provedení zkonstruovaný Esatest Handy).



**Obr.: 2.1.7-1 Tvrdoměr Esatest MTR , měření tvrdosti plochy vnitřního průměru [7]**



**Obr.: 2.1.7-2 Přenosný tvrdoměr Esatest MTR , měření tvrdosti plochy vnitřního průměru [7]**

### 2.1.8 Nové způsoby zkoušení tvrdosti

Tradiční metody měření tvrdosti jsou značně limitovány. Jedním z příkladů je fakt, že zahrnují nepohyblivé zařízení (kromě přenosných tvrdoměrů – viz výše) které ve finále neumožňuje prozkoumat příliš velkou oblast měřené části. Je-li i sama velikost měřené části pro toto měření problémem, pak nezbývá nic jiného, než vzít vzorek z měřené části, a nebo vyrobit malý vzorek stejným postupem jakým byla zhotovena originální část. Dalším z příkladů mohou být chyby měření spojené s faktory, jakými jsou deformace vnikajícího tělíska, elastické napětí zařízení, které podpírá, či uchycuje měřenou část a elastické napětí měřené části samotné.

Nepřímé metody měření tvrdosti, které zahrnují magnetická pole, mikrovlny, rentgeny a alpha a beta záření se v průmyslu příliš nerozšířili. Důvodem je také, že měřené výrobky musejí splňovat jistá kritéria specifická pro jednotlivé metody (např. chemické složení, rozměry). Pokud se nedaří dodržet tyto specifika, vede to k větší odchylce od skutečné hodnoty. Existující a rozšířenou metodou v průmyslu je metoda již výše zmíněná UCI.

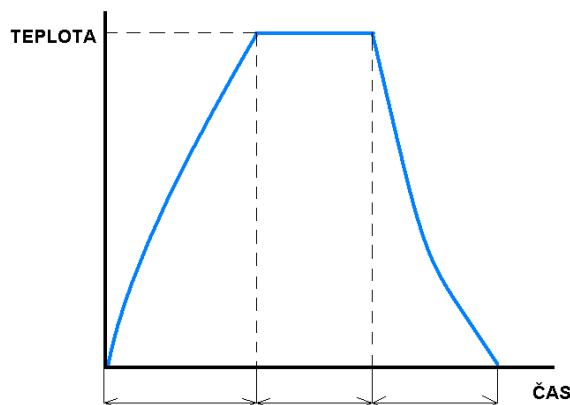
Phototermální měření tvrdosti by mohlo jednou tyto tradiční metody nahradit, protože vzrůstají požadavky na přesné a rychlé měření tvrdosti.

Ve všech phototermálních měřeních, intenzivní modulovaný světelný zdroj budí měřený vzorek na jeho povrchu. Toto buzení se rozšiřuje difuzí vzorkem a okolním prostředím. Opticky neprůsvitné materiály absorbují světlo přímo na jejich povrchu. Dá se říct, že zapříčiňují rozšiřující se tepelnou vlnu. Vlna se šíří vzorkem a vede k teplotnímu rozdílu několika °C na povrchu. Hloubka průniku těchto termálních vln je základem pro phototermální měření a mapuje tyto teplotní odchylky na povrchu skrze skryté změny vlastností materiálu. Vada, či materiálová nehomogenita je pak citlivými detektory registrována a změřena. Laboratorní testy ukázaly, že lze touto metodou dosáhnout spolehlivého měření. Phototermální měření obsahuje rychlé, spolehlivé, bezkontaktní, povrchové měření v rámci makro i mikroskopického měření. Také může být použito v kombinaci s dalšími analýzami zkoušené části a podle laboratorních výsledků se zdá, že je jen otázka času, kdy se stane rozšířenou metodou měření tvrdosti.

## 2.2 Povrchové tepelné zpracování

### 2.2.1 Tepelné zpracování

Kalení, spolu s popouštěním a žiháním patří k tepelnému zpracování (dále jen TZ). U každého TZ probíhají tři fáze. Nejdříve dochází k rovnoměrnému ohřevu materiálu na určitou teplotu (strukturní a tepelná pnutí). Poté následuje druhá fáze. Jedná se o potřebné setrvání na dané teplotě. Ve třetí fázi se materiál ochlazuje zase podle určité potřebné rovnovážnosti struktury.



Obr.: 2.2.1-1 Obecný diagram TZ



TZ se používá pro zlepšení požadovaných mechanických nebo strukturních vlastností součástí s dosažením minimální změny tvaru. Je využíváno pro více namáhané součásti z litin, ocelí i neželezných kovů. Zvyšuje jejich trvanlivost a snižuje objem potřebného materiálu. Přispívá tím k hospodárnějšímu využití materiálu.

### **2.2.2 Obrobitelnost tepelně zpracované součásti**

Protože budeme při experimentech obrábět TZ součást, je potřeba něco uvést k obrobitelnosti těchto materiálů. Obrobitelnost je technologická vlastnost materiálu obrobku, která určuje efektivnost obrábění pomocí řezných nástrojů za daných technologických podmínek. Tato vlastnost závisí na mnoha faktorech. Jeden z důležitých faktorů je právě materiál obrobku (druh tepelného zpracování, druh legujících přísad). Dalšími neméně důležitými faktory jsou použitý řezný nástroj (materiál, geometrie břitu) a řezné podmínky. Obrobitelnost také ovlivňuje strojní vybavení, strategie řezného procesu upnutí obrobků a nástrojů, způsob chlazení atd. Jedná-li se o obrábění TZ materiálů, jde o obrábění vysoce tvrdých materiálů (cca 60 HRC). Díky dnešním novým trendům v této oblasti je možné tyto materiály obrábět třískově. Je však velice důležité dbát na volbu nástroje a uvažovat nad možným vznikem mnoha problémů, které velmi rychle mohou vést ke snížené kvalitě obrábění (opotřebení nástroje, trhliny atd.). Je tedy nutné brát každý případ obrábění velice subjektivně a přiřadit mu optimální podmínky podle konkrétních požadavků a možností, které se zde vyskytují. Při obrábění TZ materiálů je třeba především počítat s vysokou teplotou a velkým mechanickým namáháním. Tímto směrem je pak potřeba směřovat požadavky na nástroj (tvrdost za tepla, chemická stabilita, odolnost vůči abrazivnímu opotřebení).

### **2.2.3 Povrchové tepelné zpracování**

Při povrchovém tepelném zpracování nám jde především o získání požadované tvrdosti povrchu při zachování houževnatosti zbylého objemu součásti. Proto při kalení povrchů je důležitý rychlý ohřev a po určité výdrži na určité teplotě také rychlé ochlazení. Podle zdrojů a způsobů ohřevu rozlišujeme několik druhů kalení: kalení plamenem, indukční kalení, ponorné kalení v lázních, kalení vysokoenergetickými zdroji (laserový paprsek,

plazma, elektronový paprsek, hybridní kalení). Z důvodu velmi dobrého zajištění podmínek rychlého ohřevu a také rychlého ochlazení se stále více rozšiřuje kalení povrchů laserovým paprskem. Experimenty budeme provádět na součásti právě takto tepelně zpracované, proto je další kapitola věnována pouze laserovému povrchovému kalení.

## **2.2.4 Povrchové kalení laserovým paprskem**

### **2.2.4.1 Princip laseru**

Laser se skládá z aktivního prostředí, zdroje záření, odrazného zrcadla, polopropustného zrcadla a samotného laserového paprsku. Při dodání energie látce aktivního prostředí dojde k vybuzení elektronů do vyšší energetické hladiny tzv. metastabilní. Vlivem rovnovážných sil a dodání další energie se elektron vrátí zpět na původní energetickou hladinu a přebytek své energie vyzáří do prostoru. Tato energie je nazývána fotony. Tyto fotony dále ovlivňují ostatní elektrony a spouštějí tzv. stimulovanou emisi fotonů. Mezi zrcadly se odráží paprsek fotonů. To dále podporuje stimulovanou emisi a zesiluje tok fotonů mezi zrcadly. Fotony směřující napříč prostředím jsou naopak utlumovány. Prostředí je nejčastěji vytvarováno do válce. Výsledný paprsek vystupuje z polopropustného zrcadla a je monochromatický (jednobarevný, má jednu přesně definovanou vlnovou délku), koherentní (fotony se pohybují jedním směrem a v průřezu paprsku jsou stejnosměrně nebo pravidelně rozděleny) a má nepatrnou divergenci (rozbíhavost).

### **2.2.4.2 Druhy laserů využívaných k povrchovému kalení**

V praxi je využíváno několik druhů laserů. Rozdělujeme lasery plynové, pevnolátkové, polovodičové, vláknové atd. Každý z nich má své zastoupení a je vhodný k určitým účelům pro své výhody i nevýhody. Nejvíce využívané lasery pro kalení jsou CO<sub>2</sub> lasery (především v zahraničí), protože proces kalení je pro ně již po několik let optimalizován a diodové lasery. Oproti zmíněným laserům má diodový laser odlišné vlastnosti v oblasti nákladů (provozních, pořizovacích) a v oblasti aspektů, které mají vliv na samotný proces povrchového kalení. Diodové lasery mohou dnes dosahovat výkonu několika kilowat. Nižší kvalita paprsku znamená vyšší úsporu. Paprsek nepotřebuje zaostřování,

protože jeho rozložení hustoty výkonu je homogenní. Jejich vlnová délka je velmi dobře absorbována. Jako příklad je následně popsán laser, který byl použit k experimentům. [9]

#### VYSOKOVÝKONOVÝ DIODOVÝ LASER *HPDD COHERENT ISL-4000L*

Povrchové TZ bylo provedeno na laserovém systému HPDD Coherent ISL 4000L a 6-ti osém průmyslovém robotu FANUC M710IC/50 (viz. následující obrázky).



**Obr.: 2.2.4.2-1 Laserový systém HPDD Coherent ISL 4000L (vlevo), 6-ti osý průmyslový robot FANUC M710IC/50 (vpravo) [9]**

Elektrická energie je u výše uvedeného laseru přímo transformována na světelnou energii. Princip je stejný jako u běžně užívaných diod v oblastech komunikačních technologií, počítačových technologií atd. Výkon laseru je však mnohonásobně větší díky seskupení jednotlivých laserových diod do modulů. Toto vycházející záření je následně fokusováno

čočkou. Díky jednoduché konstrukci je účinnost elektro-optické přeměny vysoká (až 50 %). K velice účinnému chlazení se využívá technologie mikro-kanálových chladičů z mědi se speciálním povlakem. Na ně jsou jednotlivé laserové diody přesně připájeny. Toto účinné chlazení dovoluje trvalý provoz laseru a zabraňuje tak jeho tepelnému poškození. Stopa výstupního paprsku je cca 12,5 mm x 1 mm při fokální vzdálenosti 125 mm. Tento systém je vhodný nejen na tepelné zpracování velkých ploch ale i na procesy vyžadující koncentrovaný paprsek (svařování, řezání, pájení). [9]

Robot je ovládán analogovými signály a veškeré další funkce jsou ovládány z iPendantu robota. Nosnost zápěstí robota je 50 kg a přídatná nosnost na 3. ose 15 kg. Standardní pracovní rozsah je 320°, ale je rozšiřitelný na 360°. Maximální horizontální dosah je 2 050 mm. Robot má bezkártačové AC servomotory. Elektrické vedení vede skrz rameno robota. Chod robota vede samostatný kontrolér R – 30IA. Jednoosé polohovadlo s nosností 1 000 kg je vybaveno servomotorem FANUC. Rychlost otáčení polohovadla je 120°/sec. Standardní rozsah pohybu polohovadla je 740°. Dále je robot vybaven dodatečnými softwarovými funkcemi Continuous Turn, které umožňují jedné řízené ose (v tomto případě osa polohovadla) nekonečné otáčení v jednom směru. Funkce Coordinate Motion Package zajišťuje konstantní vzájemnou rychlost mezi dvěma skupinami os (v tomto případě skupina robot - polohovadlo). Tím je snižován čas programování a zaručena přesná vzájemná trajektorie pohybu robota a polohovadla. PC Software FANUC Roboguide slouží pro údržbu a nastavení robota. Tento software umožňuje také simulace kompletního robotizovaného pracoviště. [9]

Samotný paprsek laseru je tvořen transformací elektrické energie na světelnou. Jak již bylo řečeno, vysokého výkonu je dosaženo seskupením diod do modulů. Vlnová délka závisí na typu použitého P-N přechodu samotné diody. U uvedeného laseru se jedná o polovodičové materiály InGaAs/GaAs, které emitují záření o vlnové délce 808 nm. Ta je základním materiálem velmi dobře absorbována. Zásadními parametry laseru, které ovlivňují proces povrchového kalení jsou: výstupní výkon (hustota výkonu ve fokusační vzdálenosti), vlnová délka, procesní rychlost, energetické rozložení. [9]

Základní specifikace laserového zařízení jsou uvedeny v následující tabulce.

**Tab.: 2.2.4.2-1 Specifikace laserového zařízení [9]**

Vlnová délka	805 +/- 10 nm
Maximální zářivý výkon	4 000 W
Pracovní teplota prostředí	4 – 37 °C
Teplota chladicí vody v primárním okruhu	25 °C
Minimální šířka pulzu	1 ms
Pracovní cyklus (%)	1 – 100
Maximální rychlost opakování	350 Hz
Výkonová stabilita (%)	< 1/hod
Pracovní vzdálenost	90 mm
Hmotnost laserové hlavy	< 13,6 kg
Hmotnost chladiče	225 kg
Hmotnost kontrolní jednotky	225 kg

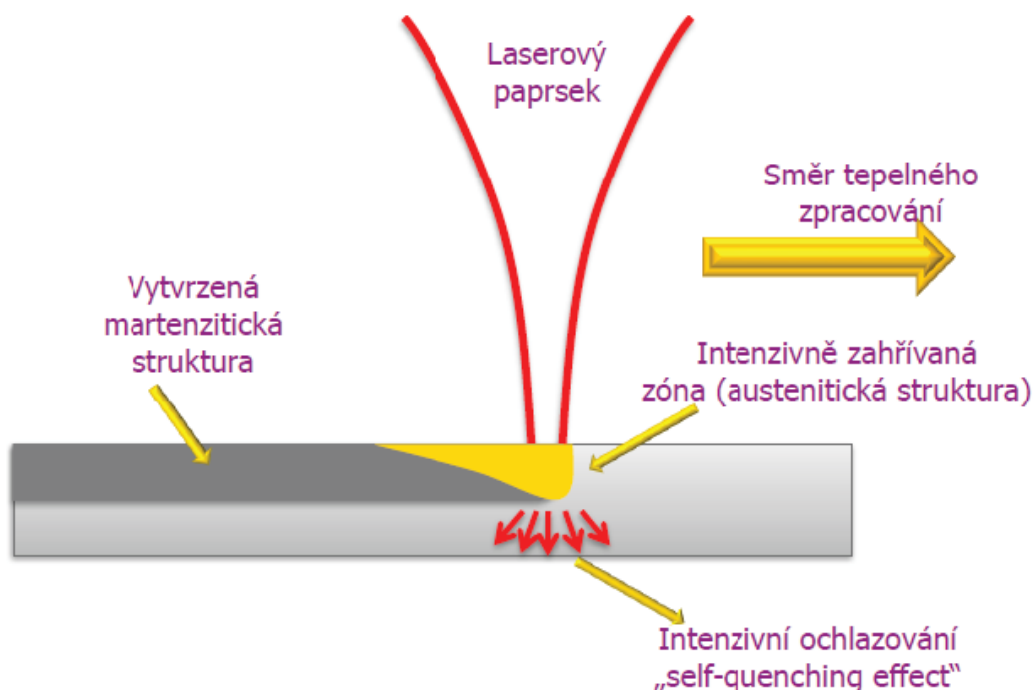
### 2.2.4.3 Proces povrchového kalení laserem

Samotný proces kalení laserovým paprskem je používán u ocelí a slitin s obsahem uhlíku nad 0,2 %. Laserový paprsek zahřívá vnější vrstvu pod bodem tání, který se pohybuje od 900 °C až 1400 °C. Při dosažení této teploty se paprsek začne pohybovat a tak plynule ohřívá požadovanou vrstvu povrchu. Na základě této teploty atomy železa mění svou polohu v krystalické mřížce. Probíhá tzv. austenitizace. Při pohybu paprsku se materiál hned po jeho působení velmi rychle ochlazuje materiálem obrobku (samoochlazovací efekt), tedy bez přítomnosti kapalného chladicího media. Díky tomuto rychlému ochlazení se zabrání vrácení kovové mřížky do původního stavu. Tímto vznikne martenzit, který je velice tvrdý a tím nám zvyšuje odolnost obrobku. Hloubka zakalené vrstvy se podle druhu materiálu a nastavení parametrů laseru pohybuje již od velmi tenkých vrstev. Pro větší hloubku materiálu je zapotřebí větší vrstvy okolního materiálu a to především pro zajištění dostatečně rychlého ochlazení zakalené vrstvy. Abychom tepelně zpracovali 1 mm<sup>3</sup> je zapotřebí mít k dispozici 10 mm<sup>3</sup> základního materiálu. Čím menší je tento rozdíl, tím je tepelné

zpracování obtížnější. Pokud bychom chtěli porovnávat povrchové kalení laserem s ostatními konvenčními způsoby povrchového kalení, je třeba brát v úvahu tyto jeho výhody:

- možnost tepelného zpracování tvarově složitých součástí (možnost komplexního TZ nebo pouze určitých částí součástí),
- kalení probíhá bez kapalného chladicího media (bez následného čištění),
- kalení lze ovlivnit množstvím energie dodané povrchu - výkonem laseru, rychlostí pohybu parsku (řízeno automaticky pomocí softwaru) – vysoká efektivita procesu,
- minimální deformace po kalení (minimum trhlin a napětí) – může být poslední operací při výrobě, ale je zde i možnost následného obrobení,
- technologie vhodná pro automatizaci (hromadná i kusová výroba).

Použitím této technologie TZ lze značně prodloužit životnost součástí a to až o 50 % (zvýšení tvrdosti, odolnosti proti opotřebení, korozivzdornosti). Z tohoto a důvodu a výše uvedených výhod se této technologie TZ vyžívá především u součástí značně namáhaných a tvarově složitých (klikové a vačkové hřídele, boky ozubených kol, stěny válců spalovacích motorů, atd.)



**Obr.: 2.2.1.3-1 Princip laserového kalení [9]**

### 3 Návrh experimentů a metody měření

Výroba forem a nástrojů složitých tvarů je dnes velice důležitý obor. Pro potřebu dlouhé životnosti a dostatečné tvrdosti povrchů je materiál povrchově tepelně zpracován. Poté pro získání přesných rozměrů obráběn. Kombinace povrchového kalení laserem a následného obrábění HSC celý tento proces velice zrychluje a v mnoha případech odpadá nutnost použití procesní kapaliny. Je nutné pečlivě volit nastavení laseru při kalení za účelem získání požadované tvrdosti povrchu, pečlivě volit použité nástroje a správně zvolit řezné podmínky s cílem dosáhnout co největší produktivity. Experimentální materiál ČSN EN 41 9313 je využíván na nástroje a formy a pro získání povrchové tvrdosti povrchově kalen.

Pro zjednodušení experimentů je obrábění prováděno na rovinném povrchu. Vzorek je kvádr o velikosti 170 x 170 x 105 mm. Jak je již uvedeno, experimentálním materiálem je nástrojová legovaná ocel ČSN EN 41 9313. Bližší popis tohoto materiálu je uveden v kapitole 3.1. Povrch experimentálního vzorku byl kalen vysokovýkonným diodovým laserem (kapitola 2.2.1.2). Toto tepelné zpracování proběhlo ve výzkumném centru laserových a automatizačních technologií NTC ZČU v Plzni. Následné obrábění probíhalo v halových laboratořích Katedry technologie obrábění, Fakulty strojní, ZČU v Plzni na vertikálním obráběcím centru MCV 750 A (kapitola 3.2.3). Současně s obráběním probíhalo měření řezných sil pomocí dvou dynamometrů a vyhodnocovacího softwaru LabView (kapitola 3.2.2).

#### 3.1 Popis experimentálního materiálu

Experimentálním materiálem je nástrojová legovaná ocel ČSN EN 41 9313.1 (ISO 4957, DIN 90MnCrV8). Nástrojová ocel ČSN EN 41 9313 se vzhledem ke svým vlastnostem, které budou následně uvedeny, používá na:

- nástroje (především tvarově složitě) pro stříhání za studena menších tloušťek materiálů,
- nástroje pro tváření za studena opět materiálů menší tloušťky,
- formy pro tváření plastických hmot a pryže,
- málo namáhané formy pro tváření práškových, keramických a porcelánových materiálů,
- měřidla, pravítka, vodící lišty, šablony, kalibry

### CHEMICKÉ SLOŽENÍ [hm. %]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	V	Fe
0,8-0,9	1,75-2,1	0,15-0,35	max 0,03	max 0,035	0,2-0,4	Max 0,35	0,1-0,2	zbyt

### FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

- hustota  $\rho = 7830 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$

### ODOLNOST PROTI DEGRADAČNÍM PROCESŮM

- malá odolnost proti korozi
- dobrá odolnost proti křehkému lomu

### TECHNOLOGICKÉ VLASTNOSTI

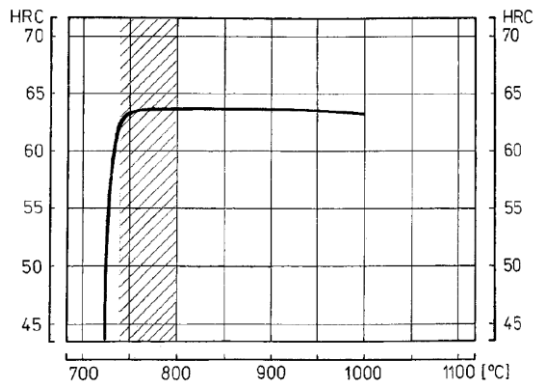
- tepelné zpracování:

žihání na měkko	680–710 °C	ochlazovat v peci – max 225 HB
žihání ke snížení pnutí	600–650 °C	ochlazovat v peci
kalení	740–780 °C	ochlazovat oleji – malé předměty – min 61 HRC
	780–800 °C	ochlazovat oleji – velké předměty – min 61 HRC
popouštění	100–300 °C	ochlazovat na vzduchu
prokalitelnost		při kalení do oleje v celém průřezu do Ø 40 mm
teploty přeměn	AC1 ~ 730–750 °C	
	Ms ~ 180 °C	

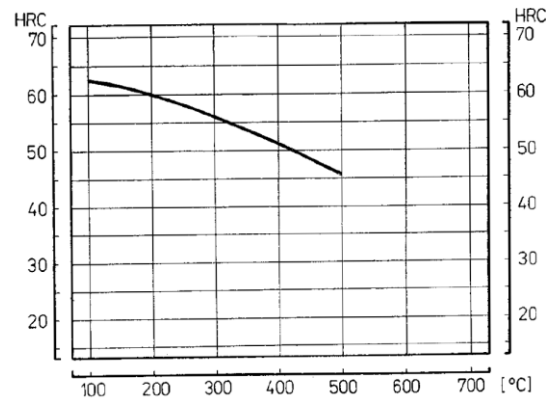
- tvařitelnost dobrá za tepla (teploty tváření 1050 - 850°C)
- svařitelnost obtížná
- obrobiteľnosť výkovku: soustružení a hoblování 11 b  
frézování a vrtání 11 b  
broušení 8 b



KALÍCÍ DIAGRAM



POPOUŠTĚCÍ DIAGRAM



*Obr.:3.1-1 Kalící a popouštěcí diagram oceli ČSN EN 41 9313 [9]*

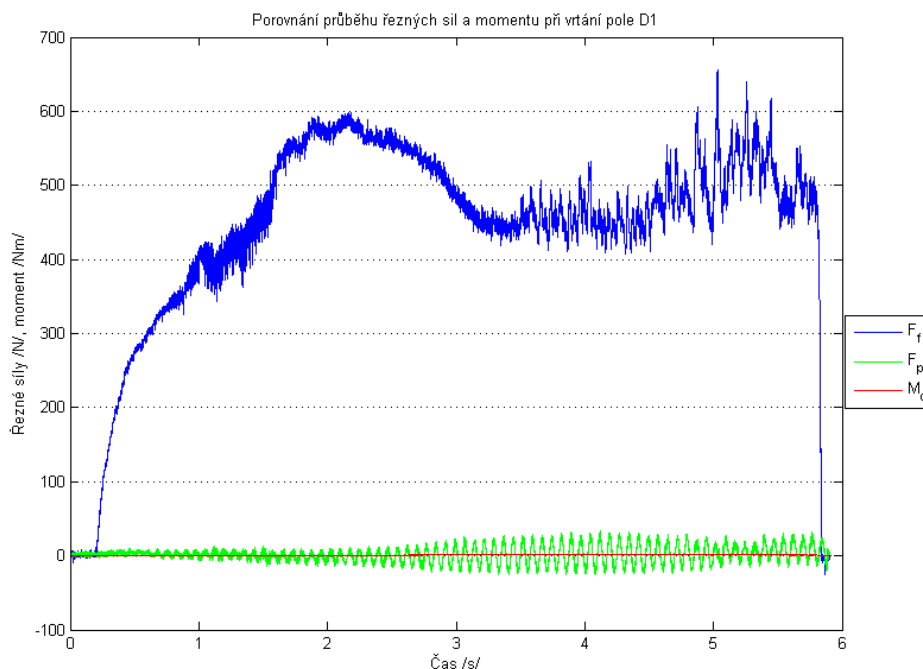
## 3.2 Popis experimentálního zařízení a způsob měření

### 3.2.1 Vysokovýkonný diodový laser HPDD Coherent ISL-4000L

Povrchové TZ na experimentálním materiálu bylo provedeno ve výzkumném centru laserových a automatizačních technologií NTC ZČU v Plzni. Laserový systém HPDD Coherent ISL 4000L, 6-ti osý průmyslový robot FANUC M710IC/50 a další příslušenství jsou blíže popsány v kapitole 2.2.1.2.

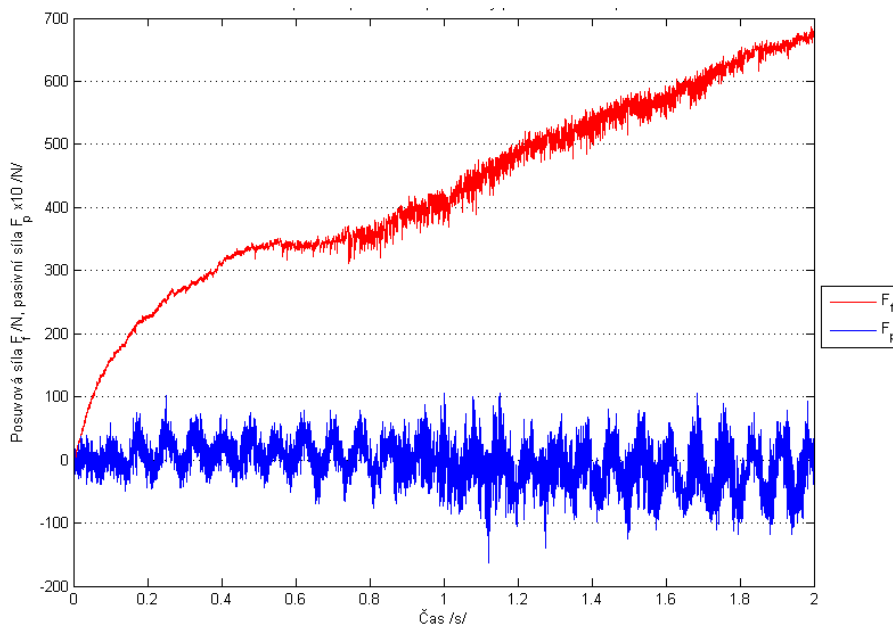
### 3.2.2 Měření řezných sil - Dynamometry Kistler, software LabView

Pomocí následně popsaných dynamometrů a vyhodnocovacího softwaru byly měřeny složky síly  $F_y$  ( $F_p$  – pasivní síla),  $F_z$  ( $F_f$  - posuvová síla) a krouticí moment  $M_c$ . Podle výsledných grafů byla nejvíce vypovídající složkou síly složka  $F_f$ , proto právě ona byla hodnocena. Na následujícím grafu je zobrazen průběh všech složek sil při vrtání jednoho z polí. Modře zobrazená složka síly  $F_f$  dosahuje několikanásobných hodnot než ostatní složky a její průběh vypovídá o určitých změnách.

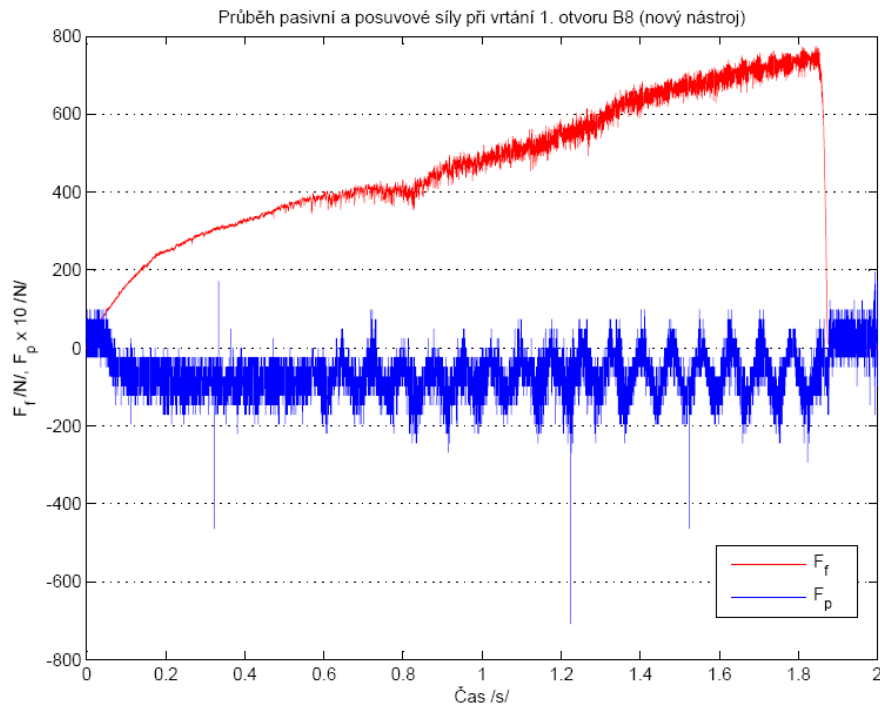


**Graf: 3.2.2-1 Průběh  $F_f$ ,  $F_p$  a  $M_c$  při vrtání pole D1**

Na jedné díře v pre-experimentu bylo zkušeno vrtání do rozhraní polí a zkoumán průběh pasivní síly. Očekávané bylo kmitání kolem nuly z důvodu působení odlišné tvrdosti materiálu na ostří. Toto bylo potvrzeno a rozdíl je zobrazen na následujících dvou grafech.

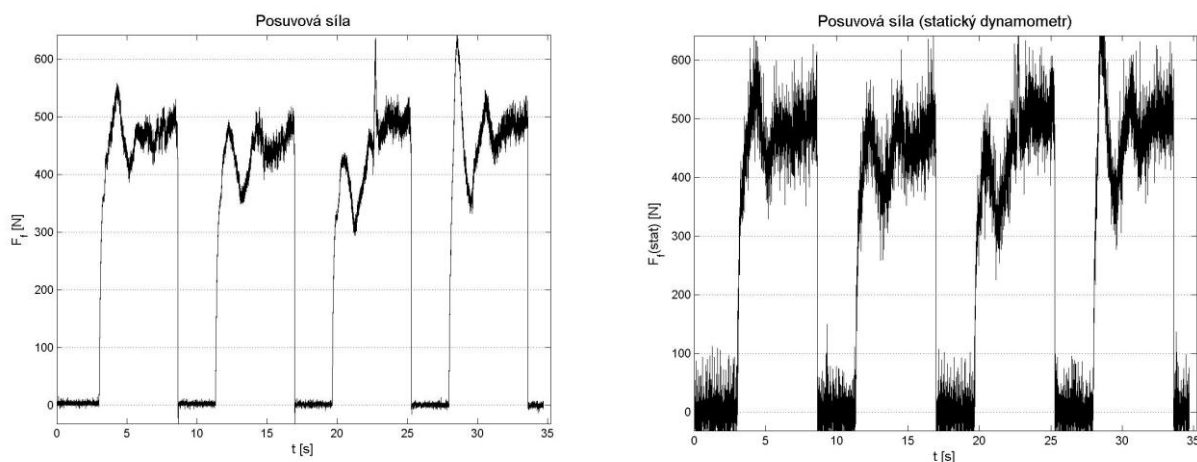


**Graf: 3.2.2-2 Průběh  $F_f$ ,  $F_p$  při vrtání na rozhraní polí**



**Graf: 3.2.2-3 Průběh  $F_f$ ,  $F_p$  při vrtání v jednom poli**

Dynamometrem typu 9255B byla měřena pouze složka síly  $F_f$  a to pro kontrolu rotačního dynamometru. Hodnoty této složky síly byly u obou dynamometrů srovnatelné, čímž byla potvrzena správná funkčnost rotačního dynamometru. Protože křivka grafu u rotačního dynamometru méně kolísá, čímž předpokládáme přesnější výsledky, jsou pro vyhodnocování uvažovány hodnoty tohoto dynamometru. U druhého dynamometru je kolísání křivky způsobeno rušením od zdroje notebooku. Rozdíl je možné pozorovat na následujících grafech, kde je pro názornost zobrazen průběh síly  $F_f$  při vrtání jedné stopy z experimentu a to na prvním grafu z dynamického dynamometru a na druhém ze statického dynamometru.



**Graf: 3.2.2-2 Výsledky průběh  $F_f$  z dynamického (vlevo) a statického (vpravo) dynamometru**

Výstupy zesilovačů dynamometrů byly propojeny pomocí kabelů se svorkovnicí digitalizační karty (NI DAQ 60 62E). Zesilovače bylo nutné nastavit na stejné hodnoty zesílení jako vyhodnocující program. To bylo zvoleno podle předpokládané velikosti síly. Data byla přes měřící katru sbírána do programu LabVIEW a následně vyhodnocována. Jednotlivé hodnoty jsou ukládány do textových souborů a je možné je hodnotit i v jiných programech. Pro naše účely (vytváření grafů) byl používán software Matlab. Prostředí softwaru LabVIEW je zobrazeno na obrázcích v kapitole 3.2.2.3. Začátek i konec samotného měření je jednoduše ovládan zvolením tlačítka start a stop. Před samotným měřením bylo nutné provést zátěžovou zkoušku dynamometru pro zjištění funkce. Dále bylo nutné odpojit napájecí kabel notebooku z důvodu zkreslení hodnot.

### 3.2.2.1 Vícesložkový dynamometr do 40 kN, typ 9255B

Tento typ dynamometru je křemíkový 3 - složkový dynamometr pro měření tří na sebe kolmých složek síly. Má výbornou tuhost. Umožňuje měřit i ty nejmenší změny při působení velkých sil. Dynamometr je nerezavý a chráněn proti průniku vody a chladiva. Jeho využitelnost je široká (měření složek sil, řezných sil při frézování a broušení, měření na pýchovacích strojích, měření podpěrných sil na základech strojů...).



**Obr.: 3.2.2.1-1 Vícesložkový dynamometr do 40 kN, typ 9255B [10]**

### **3.2.2.2 Rotační 4-složkový dynamometr RCD, typ 9123C**

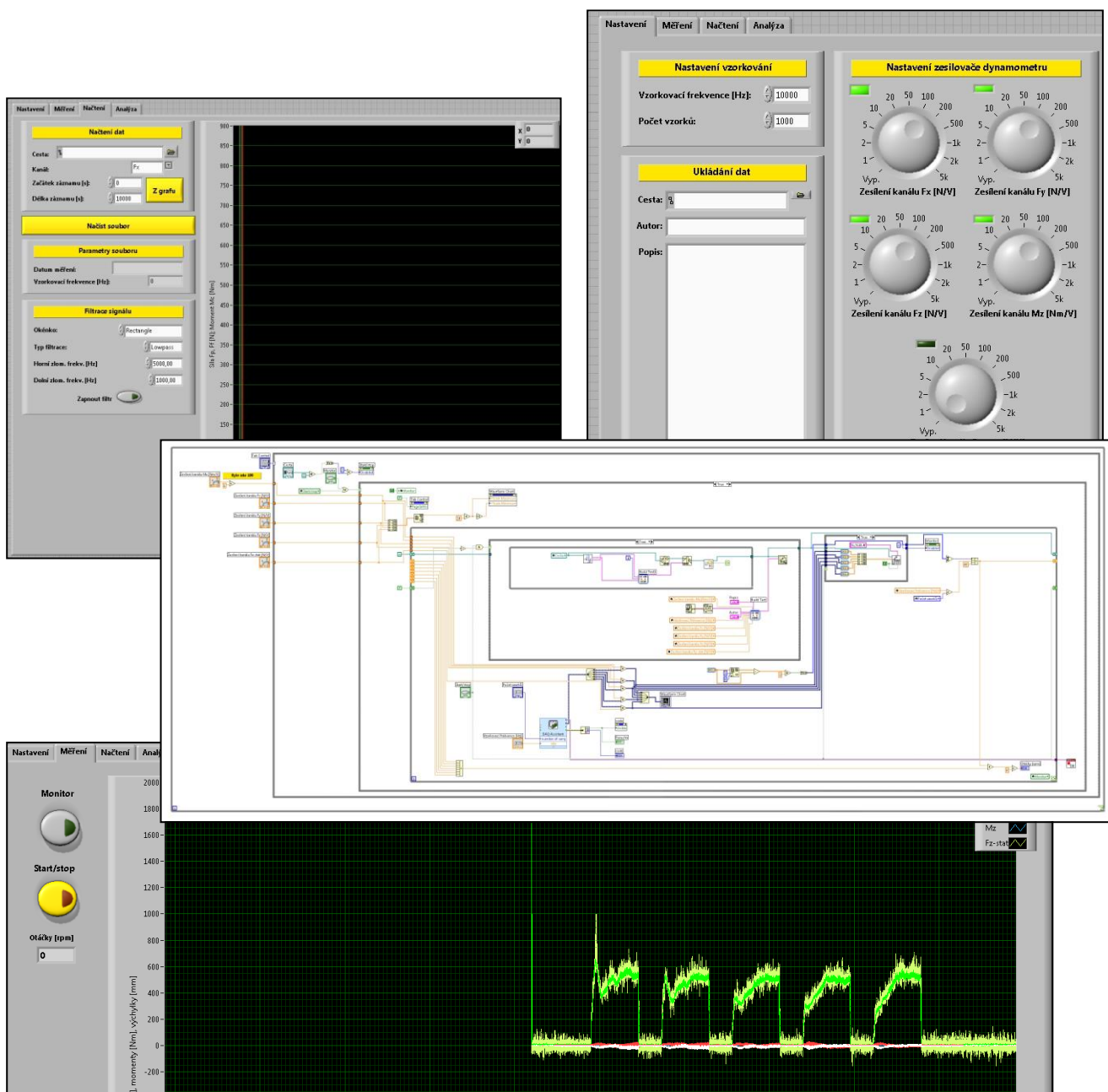
Tento dynamometr je pro měření řezných sil a momentů na vřetenech rotačních nástrojů do 10 000 ot/min. Převod měřených dat je uskutečněn telemetrií, tudíž bez opotřebení. Přepínání rozsahu a volitelně přepínatelný kanál přiblížení dovoluje použít měřitelný rozsah v optimální poloze. Možností identifikovat nulový bod je dosaženo korelace signálu síly s hranou nástroje. Je nerezavý a chráněn proti proniknutí stříkající procesní kapaliny. Tento dynamometr je speciálně vhodný pro vysokorychlostní jemné obrábění.



**Obr.: 3.2.2.2-1 Rotační 4-složkový dynamometr RCD, typ 9123C [10]**

### 3.2.2.3 Software LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) je produkt firmy National Instruments. Toto prostředí je využíváno k řízení a vizualizaci technologických procesů, programování složitých systémů a k programování systémů pro měření a analýzu signálů a to v reálném čase.



**Obr.: 3.2.2.3-1 Ukázka prostředí softwaru LabVIEW (nastavení, měření, načtení, schéma)**

### 3.2.3 Vertikální obráběcí centrum, typ MCV 750A

Obrábění bylo provedeno v halové laboratoři KTO, ZČU v Plzni. Toto obráběcí centrum má tři NC řízené osy, jmenovitý výkon vřetene je 16 KW, rozsah otáček je 20 – 13 000 ot/min, změna otáček je plynulá. Pojezd v ose x,y, a z je 750, 500 a 500 mm. Rozměry upínacího stolu jsou 1000 x 500 mm. Pracovní posuv ve všech osách je 1 – 15 000 mm/min, rychloposuv je 25 000 mm/min. Řídicí systém je Heidenhain TNC 426.



**Obr.: 3.2.3-1 Vertikální obráběcí centrum, typ MCV 750A**

#### 3.2.3.1 Volba řezného nástroje a řezných podmínek

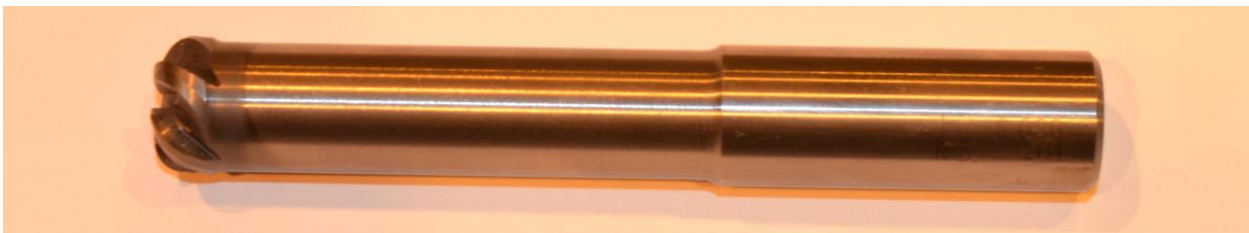
Volba nástrojů proběhla dle vhodnosti nástroje na obrábění velmi tvrdého materiálu, dalšími faktory výběru byla cena a dostupnost nástrojů. Vzhledem k těmto faktorům byla zvolena firma OSG.

### FRÉZA WXS-HS-CRE 12 X R3

Pro frézování horní vrstvy byla použita monolitní fréza WXS-HS-CRE 12 x R3. Řezné podmínky byly stanoveny odhadem podle katalogu výrobce, protože konkrétní hodnoty výrobce uvádí pouze pro frézu s průměrem 12 mm a rádiusem R2.

**Tab.: 3.2.3.1-1 Řezné podmínky pro nástroj WXS-HS-CRE 12 X R3**

Řezné podmínky	
Řezná rychlost $v_f$	30 m/min
Otáčky $n$	800 ot/min
Hloubka řezu $a_p$	0,2 mm
Šířka řezu $a_e$	1,5 mm
Posuv	825 m/min



**Obr.: 3.2.3.2-1 Monolitní fréza WXS-HS-CRE 12 x R3**

### VRTÁK SH – DRL 8560500

Pro vrtání do experimentálního materiálu byl zvolen monolitní šroubovitý vrták ze slinutého karbidu o průměru 5 mm. Typ SH – DRL 8560500 je určen pro obrábění tvrdých materiálů. Podle katalogu byly zvoleny následující řezné podmínky.

**Tab.: 3.2.3.1-2 Řezné podmínky pro nástroj SH – DRL 8560500**

Řezné podmínky	
Posuvová rychlost $v_f$	12,56 m/min = $\frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$
Otáčky $n$	800 ot/min
Hloubka řezu $a_p$	3 mm(pre – experiment), 1 mm(experiment)
Posuv $f$	0,04 mm/ot



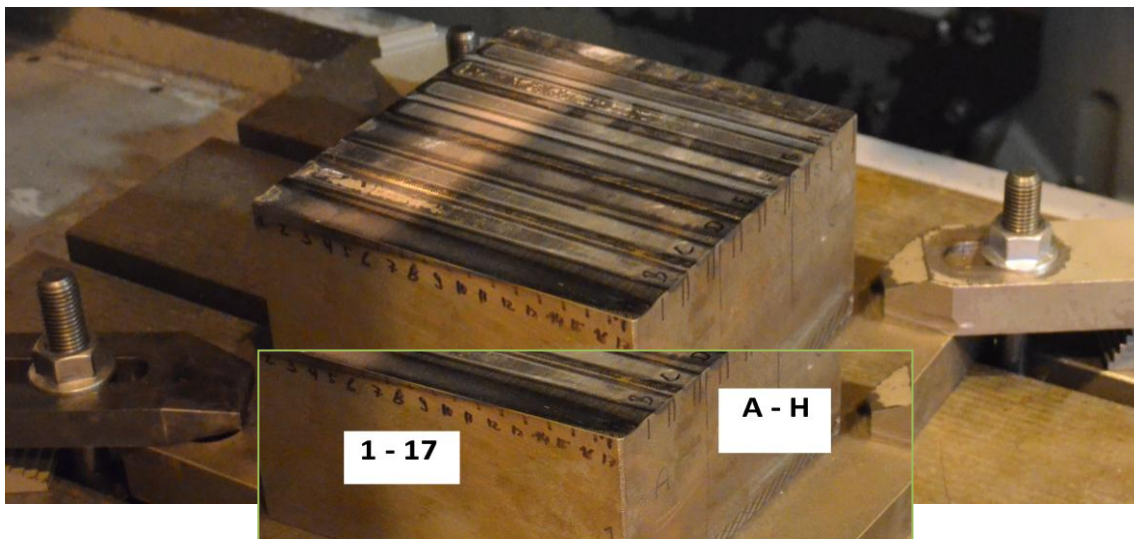


**Obr.: 3.2.3.2-2 Monolitní šroubovitý vrták typu SH – DRL 8560500**

### 3.3 Pre – experiment

#### 3.3.1 Příprava experimentálního vzorku

Při prvním měření bylo zvoleno několik kombinací povrchového kalení vzorku různými rychlostmi a výkony laseru. Tyto parametry byly zvoleny podle zkušeností a požadavků výzkumného centra NTC. Na vzorku je 8 trajektorií rozdělených do 10 mm polí (A, B, C, D, E, F, G, H – viz následující obr.).



**Obr.: 3.3.1-1 Rozdělení polí u experimentálního vzorku**

Jeden z parametrů (výkon, rychlost pohybu paprsku) se v každé trajektorii mění vždy po 10 mm. U stopy A, B a C je po celou dobu konstantní výkon laseru ale mění se rychlost pohybu paprsku. V případě stop D, E, F, G a H je tomu naopak. Mění se výkon laseru, ale pohyb paprsku je konstantní. Konkrétní hodnoty parametrů a další informace k jednotlivým stopám jsou uvedeny v následující tabulce.

**Tab.: 3.3.1-1 Parametry jednotlivých polí obráběného povrchu**

Bar	Výkon [%]	Poč. rych. [cm/min]	Dekrement	Kon. rychl. [cm/min]	Program	Stopa	Max. Tvrdost [HRC]	Výkon [W]	Výkonová hustota [W/mm <sup>2</sup> ]	Specifická energie [J/mm <sup>2</sup> ]
II.	100	24	1 cm/min	6	Rychl_Z2	A	64	1102.6	15.3	22.97-91.89
II.+III.	100	56	2 cm/min	20	Rychl_Z2	B	63	2189.8	28.9	18.56-51.97
II.+III.	100	55	1 cm/min	37	Rychl_Z2	C	60	2189.8	28.9	18.9-28.09
II.	83-100	8	1 %	8	Vyk_Zmen	D	60	865.9-1102.6	15.1-15.3	67.97-68.92
II.+III.	83-100	55	1 %	55	Vyk_Zmen	E	62	1715.7-2189.8	24.9-28.9	16.28-18.90
II.+III.	83-100	45	1 %	45	Vyk_Zmen	F	56	1715.7-2189.8	24.9-28.9	19.89-23.10
I.+II.+III.	83-100	80	1 %	80	Vyk_Zmen	G	61	2570-3272.6	35.11-38.96	15.8-17.53
I.+II.+III.	83-100	100	1 %	100	Vyk_Zmen	H	61	2570-3272.6	35.11-38.96	12.64-12.75

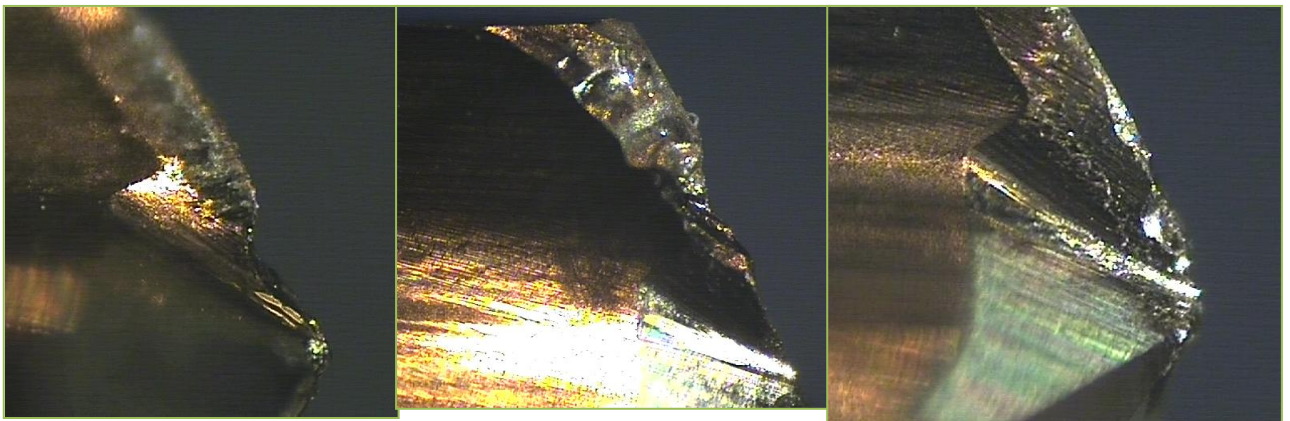
Vzhledem k rozměrovým odlišnostem v jednotlivých částech povrchu z důvodu zvoleného tepelného zpracování bylo nutno povrch upravit. Povrch byl frézován o 0,2 mm po celé ploše (řezný nástroj a řezné podmínky viz kapitola 3.2.3.1). Tím bylo dosaženo stejných rozměrů po celé ploše a vzorek připraven na následné vrtání a měření řezných sil bez ovlivnění povrchových nerovností. Tvrdost povrchu materiálu před zakalením byla okolo 20 HRC. Po procesu TZ a odfrézování 0,2 mm vrstvy jsou tvrdosti jednotlivých polí uvedena v následující tabulce.

**Tab.: 3.3.1-2 Hodnoty tvrdostí jednotlivých polí po TZ a frézování 0,2 mm**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<b>A</b>	60,7	59	55	50,9	45,3	40,2	38	37,6	35	34,8	35,6	36	34	29,3	27,6	28,1	25,6
<b>B</b>	60,2	60	60,5	60,4	60,4	61,4	61,4	62,2	61,6	59,9	60,1	61,1	59,4	60,6	60,4	60	56,4
<b>C</b>	61,3	62	62,1	61,1	61,1	60,5	61	61,4	60,2	58,8	60,1	60,1	58,6	58,2	55,4	55,9	53
<b>D</b>	62,5	61,8	62,7	62,6	59,8	59,5	62,5	59,9	60,2	60,4	58,7	57,8	57,8	56,2	50,8	48,8	48,2
<b>E</b>	60,8	59,1	59,1	58,3	49,8	47,4	45,1	43	38,9	39,6	34,5	33,6	34	32,8	33,1	30,9	28,9
<b>F</b>	59,4	59,5	59,9	60,5	59,1	60,4	60,8	60,8	61	58,4	55,6	54,9	44,7	46	45,3	44,3	41,4
<b>G</b>	59,5	57,6	59,6	58,1	57,9	58,5	59,7	59	58,7	58,6	58	57,4	56,9	55,1	54,6	55,5	51
<b>H</b>	59,2	59,4	58,5	58,9	53,9	50,7	51,1	47,3	48,5	47,8	48,2	41,9	37,8	38,5	36,3	33,2	33

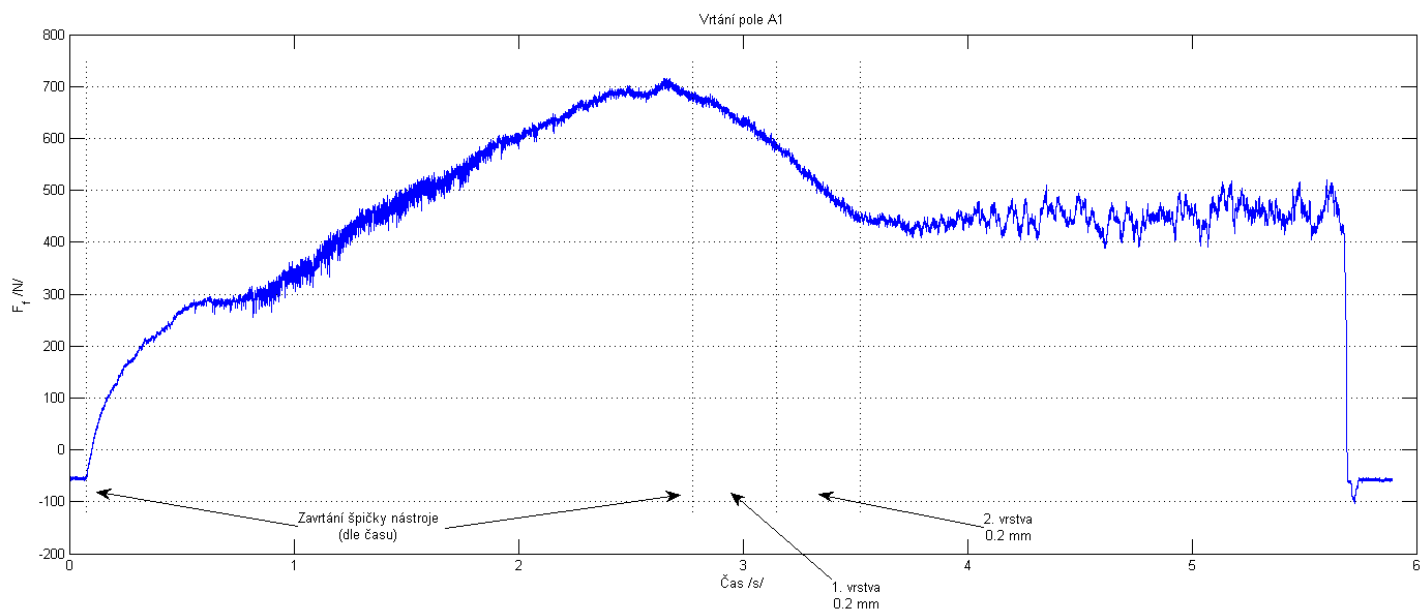
### 3.3.2 Vrtání a měření složek řezných sil

Následovalo vrtání (řezný nástroj a řezné podmínky kapitola 3.2.3.1) 17 děr v každém poli. Vrtáno bylo do hloubky 3 mm pro dosažení hloubky, kde již materiál nebyl zakalen. V takto tepelně neovlivněném materiálu byl předpokládán pokles měřené síly  $F_z$ . Nástroj byl však otupen již během vyvrtání několika prvních děr a to z důvodu provrtání do měkčího materiálu, na který tento druh vrtáku není vhodný. Docházelo tedy k nalepování materiálu na ostří a následnému vylamování. Na následujících obrázcích je vidět pohled přes dílenský mikroskop na opotřebení použitých vrtáků. Byly použity tři stejné vrtáky. První vrták byl použit na řady A, B a C. Druhý na řadu D, E, F a třetí na řadu G a H.

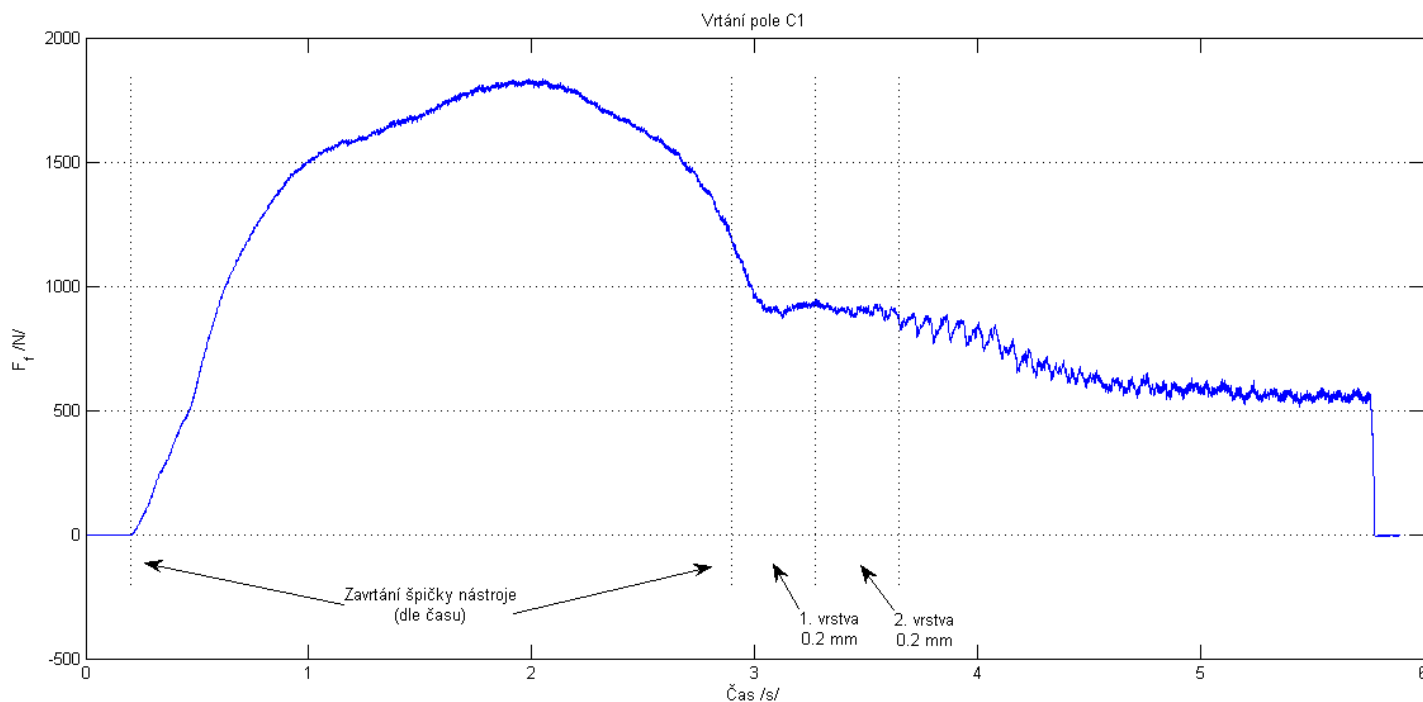


**Obr.: 3.3.2-1 Detail z dílenského mikroskopu na opotřebení použitých vrtáků (1., 2., 3.)**

Z důvodu tohoto rychlého otupení nástroje je i z výsledných grafů patrné, že hodnoty složky síly  $F_f$  jsou příliš ovlivněny. Pro zhodnocení závislosti řezné síly na tvrdosti materiálu by tedy nebylo možné tyto hodnoty použít. Na následujících grafech můžete vidět velikou odlišnost v hodnotách síly  $F_f$  a to při téměř totožných hodnotách tvrdosti jednotlivých vrstev materiálu. Maximální rozdíl v jednotlivých vrstvách je 2 HRC. Maximální hodnoty řezných sil se v případě opotřebovaného vrtáku zvýšily více než dvojnásobně.



**Graf: 3.2.2-1 Průběh  $F_f$  při vrtání pole A1 (nový nástroj)**



**Graf: 3.2.2-2 Průběh  $F_f$  při vrtání pole C1 (opotřebený nástroj)**

Hodnoty tvrdosti jednotlivých vrstev jsou poskytnuty od Bc. Miroslava Schejbala.  
Byly naměřeny přenosným tvrdoměrem WHU-330 a to v jednotlivých vrstvách po 0,2 mm,

které byly postupně frézovány. K dispozici byly poskytnuty hodnoty tvrdosti 11 vrstev. Případné vynechané hodnoty byly vynechány z důvodu, že jejich tvrdost je již příliš nízká a zdaleka neodpovídá daným požadavkům. Tabulky těchto hodnot jsou uvedeny v příloze č. 1.

### 3.3.3 Výsledky

Hodnoty  $F_f$  byly odečteny z naměřených grafů. Záměrem bylo vypočítat čas, kdy je zavrtaná celá špička nástroje a poté čas pro zavrtání 0,2 mm a tyto hodnoty odečítat (viz obr. 3.3.2-1 a 3.3.2-2). Síla  $F_z$  byla však ovlivněna nejen již zmíněným opotřebením nástroje, ale i různými tvrdostmi jednotlivých vrstev materiálu působících na nástroj. Aby bylo možné použít tedy některé hodnoty z prvního měření, použity byly hodnoty pouze z vrtání první díry po výměně nástroje a pouze do požadované hloubky 1 mm. Je možno tedy použít výsledky pouze z vrtání pole A1, D1, G1. V následující tabulce jsou hodnoty tvrdostí a hodnoty složek řezné síly těchto polí v jednotlivých vrstvách.

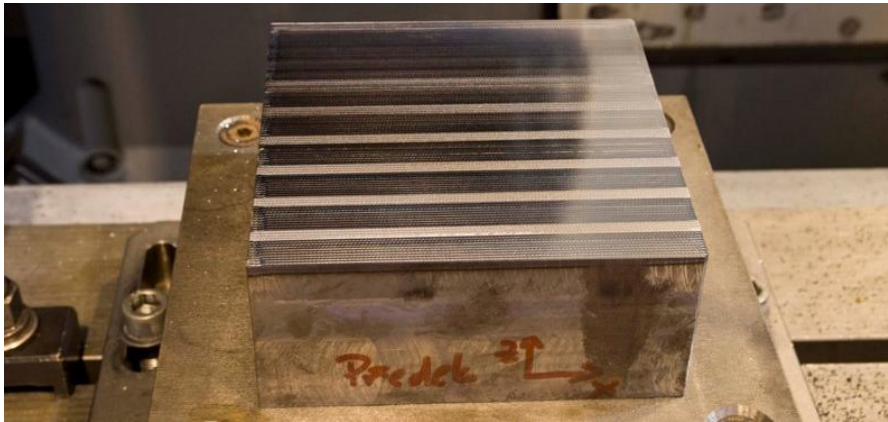
**Tab.: 3.3.3-1 Hodnoty tvrdostí a  $F_f$  polí A1, D1, G1 v jednotlivých 0,2 mm vrstvách**

Měřené pole	Tvrdost v HRC					Hodnota $F_z$ [N]				
	0,2 mm	0,4 mm	0,6 mm	0,8 mm	1 mm	0,2 mm	0,4 mm	0,6 mm	0,8 mm	1 mm
<b>A1</b>	60,7	60	59,9	58,7	58,7	0	295	350	460	560
<b>D1</b>	62,5	59,3	58,4	48,9	47,4	0	290	390	420	550
<b>G1</b>	59,5	57,5	47,3	28,9	-	0	300	400	570	650

## 3.4 Experiment

### 3.4.1 Příprava experimentálního vzorku

Vzorek byl předchozím vzorkem, pouze byla odfrézována část, která byla po předchozím kalení tepelně ovlivněna. V druhé části experimentu bylo již vybráno několik konkrétních kombinací výkonu a rychlosti pohybu laserového paprsku. Byl připraven vzorek, kde bylo osm řad a každá řada byla kalena v podmínkách dle vybraných polí z předcházejícího vzorku (B3, B8, C3(1), C3(2), C7(1), C7(2), C7(3)[1], C7(3)[2], C7(3)[3]). Výběr proběhl opět podle požadavků NTC. Stejným způsobem byl povrch opět předem frézován.

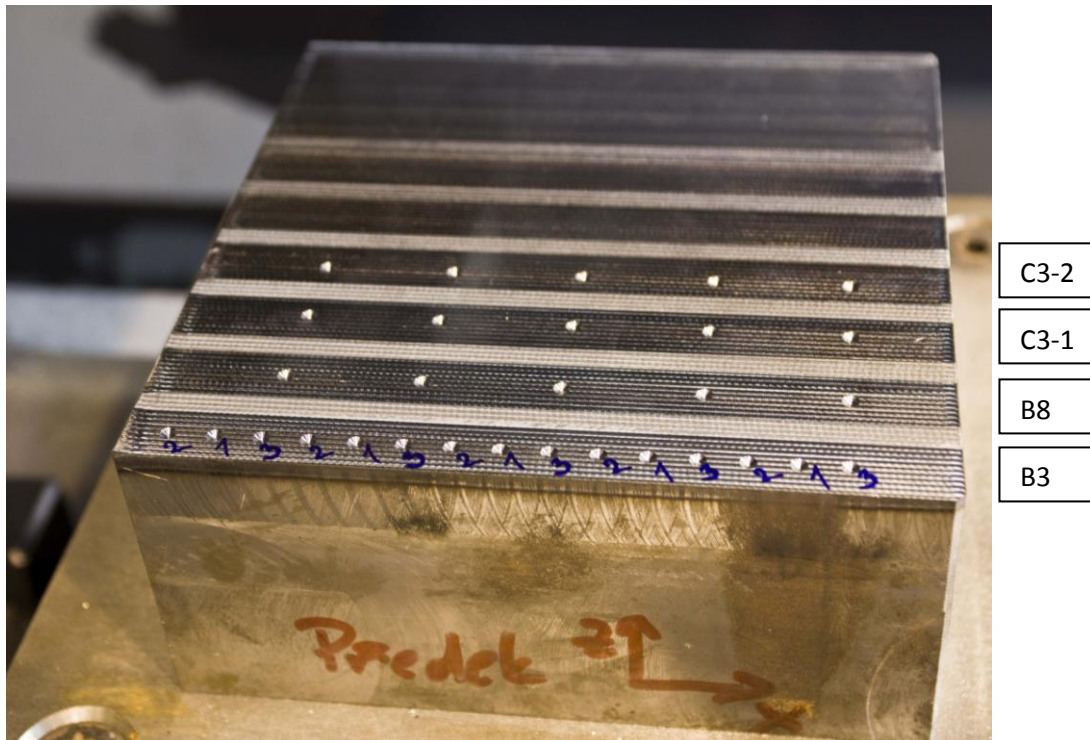


**Obr.: 3.4.1-1 Připravený vzorek pro druhé vrtání a měření**

### **3.4.2 Vrtání a měření složek řezných sil**

Při určení požadavku na tvrdost nad 50 HRC v hloubce 1 mm byly vybrány jen první čtyři stopy (B3, B8, C3-1, C3-2). C1-1 a C1-2 označují dvě stopy, které jsou totožné. Právě tato tvrdost a hloubka je obvyklá u povrchového kalení a není v rozepři v dobrou obrobitelností a případným dokončovacím obráběním. V tomto případě bylo vrtáno pouze do hloubky 1 mm a to z důvodu, aby bylo minimalizováno ovlivnění řezných sil. Bylo tedy vrtáno pouze do potřebné měřitelné vrstvy. Výrazně se tím snížilo ovlivnění řezných sil tvrdostí hlubších vrstev materiálu i celkovým opotřebením nástroje.

Do každé ze stop bylo navrtáno 5 děr. Při vrtání první stopy (B3) vznikla chyba v měření. Kdy program LabVIEW hlásil chybu a hodnoty nebyly zaznamenány. Na další pokus bylo vrtání posunuto o 10 mm. Chyba však tentokrát vznikla při špatném nastavení rozsahu na zesilovači. Při třetím pokusu (posun o 10 mm na druhou stranu) již vše proběhlo v pořádku a byly správně naměřeny všechny potřebné hodnoty. Následovala výměna vrtáku a v pořádku proběhlo vrtání dalších stop (B8, C3-1, C3-2).



**Obr.: 3.4.2-1 Vzorek po provedeném experimentu**

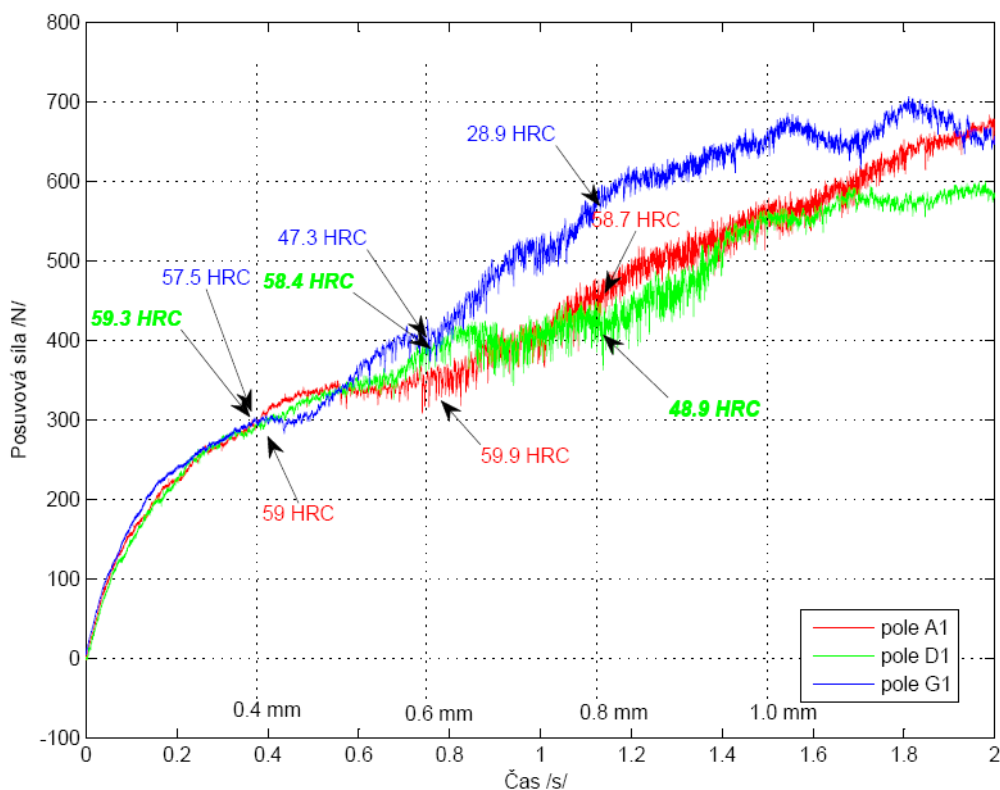
### 3.4.3 Výsledky

Hodnoty tvrdosti převzaté od pana Bc. Miroslava Schejbala jsou uvedeny v tabulkách v příloze č. 2. Hodnoty  $F_f$  byly opět odečteny z naměřených grafů po 0,2 mm. Tyto hodnoty jsou zobrazeny v jednotlivých grafech v následující kapitole.

## 4 Hodnocení získaných výsledků a následná doporučení

### 4.1 Zhodnocení experimentů

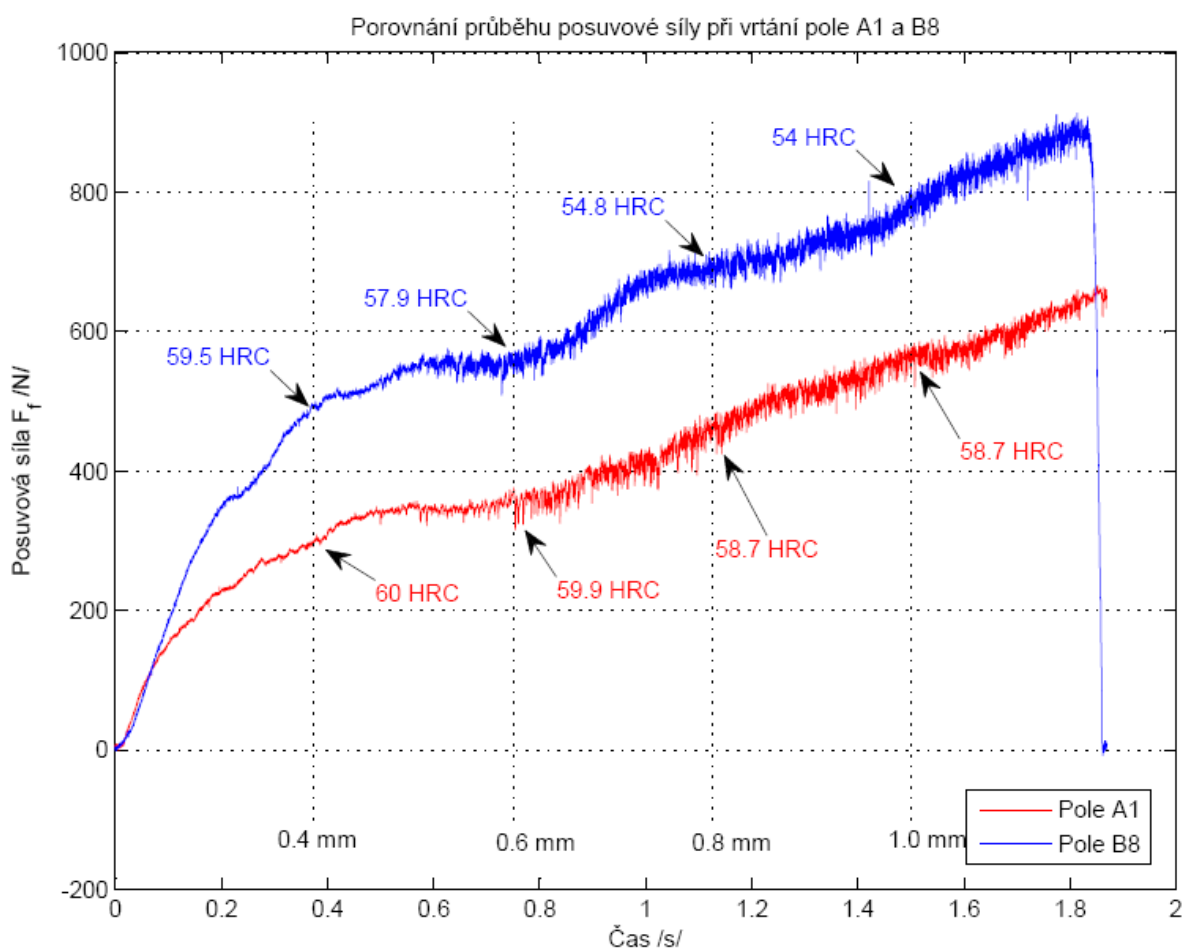
Pro zhodnocení z pre-experimentu lze užít jen tří grafů z prvního měření. Jedná se vždy o první vyvrtanou díru nového nástroje (A1, D1, G1). V následujícím grafu jsou zobrazeny průběhy složek sil  $F_f$  v závislosti na čase a po jednotlivých vrstvách 0,2 mm přiřazeny hodnoty tvrdostí těchto vrstev. Jednotlivé křivky mají vzrůstající průběh a to z důvodu postupného zavrtávání špičky. U pole G1 je viditelný nárůst síly  $F_f$  od vrstvy 0,6 mm. Toto je přiřazováno nižší tvrdosti materiálu, kdy z důvodu nevhodnosti nástroje na obrábění materiálů těchto tvrdostí dochází k nalepování materiálu a tím navýšení posuvové síly. U dalších dvou křivek (D1, G1) není průběh výrazně odlišný. Nelze však z tohoto vyvodit žádná závislost velikosti  $F_f$  na tvrdosti materiálu v konkrétní vrstvě. Nelze říci, že se  $F_f$  s tvrdostí materiálu zvyšuje nebo naopak. Křivky se navzájem kříží a v každé vrstvě je tomu jinak.



Graf: 4.1 -1 Průběh  $F_f$  při vrtání polí A1, D1, G1 (nový nástroj)



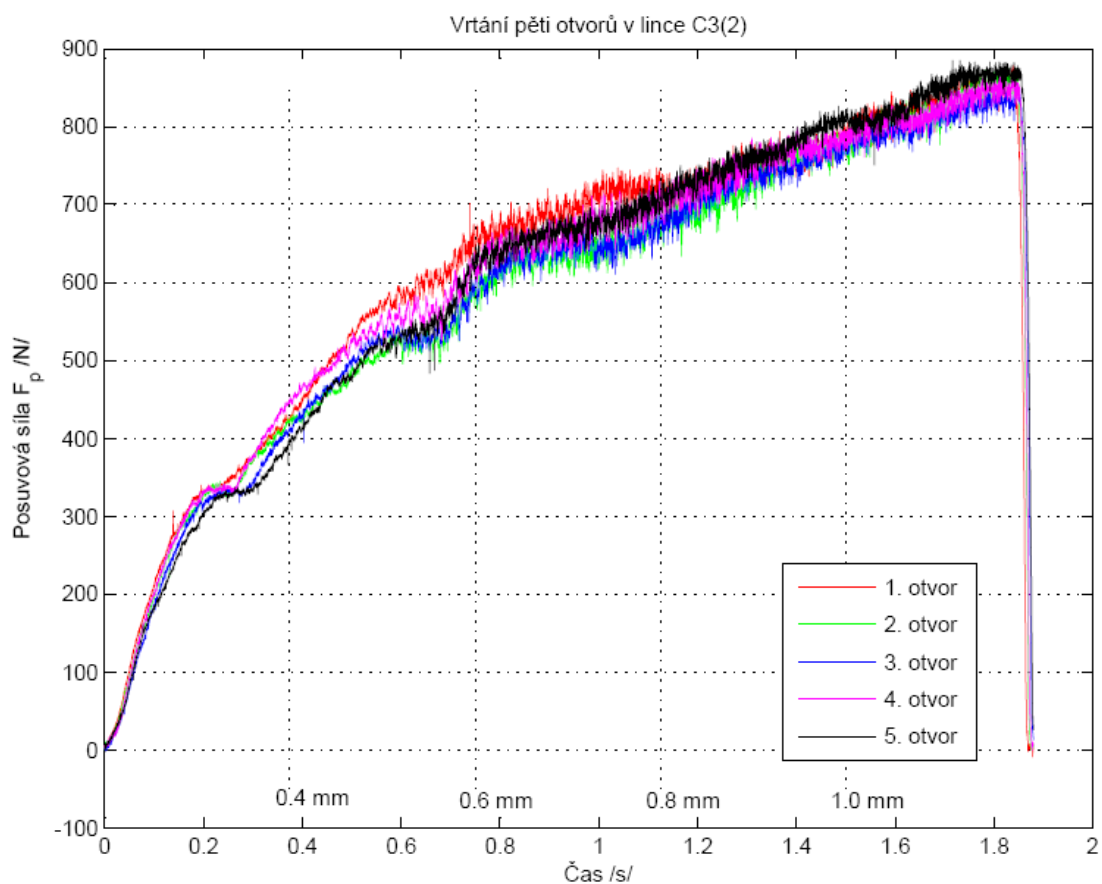
Na níže zobrazeném grafu je pro srovnání obou experimentů zobrazen průběh  $F_f$  při vrtání první díry po výměně nástroje. Z pre-experimentu se jedná o první pole (A1), z experimentu o pole B8 (první díra z linky B8). Vzhledem k maximálnímu rozdílu 4,7 HRC v tvrdostech v jednotlivých vrstvách se očekával minimální rozdíl i v průběhu sil. Vznikl však téměř v celém průběhu rozdíl přibližně 100 N. Aby byla vyloučena chyba v měření, byly tyto průběhy sil srovnány s průběhy ze statického dynamometru. Tyto průběhy byly totožné. Odchylka není tedy ničím zdůvodněna a není možno ji z našich experimentů objasnit.



**Graf: 4.1-2 Průběh  $F_f$  při vrtání polí A1 z pre-experimentu a B8 z následného experimentu (nový nástroj)**

Dále jsou popsány grafy z následného experimentu a jsou zde hledány závislosti  $F_f$  na tvrdosti materiálu v jednotlivých vrstvách.

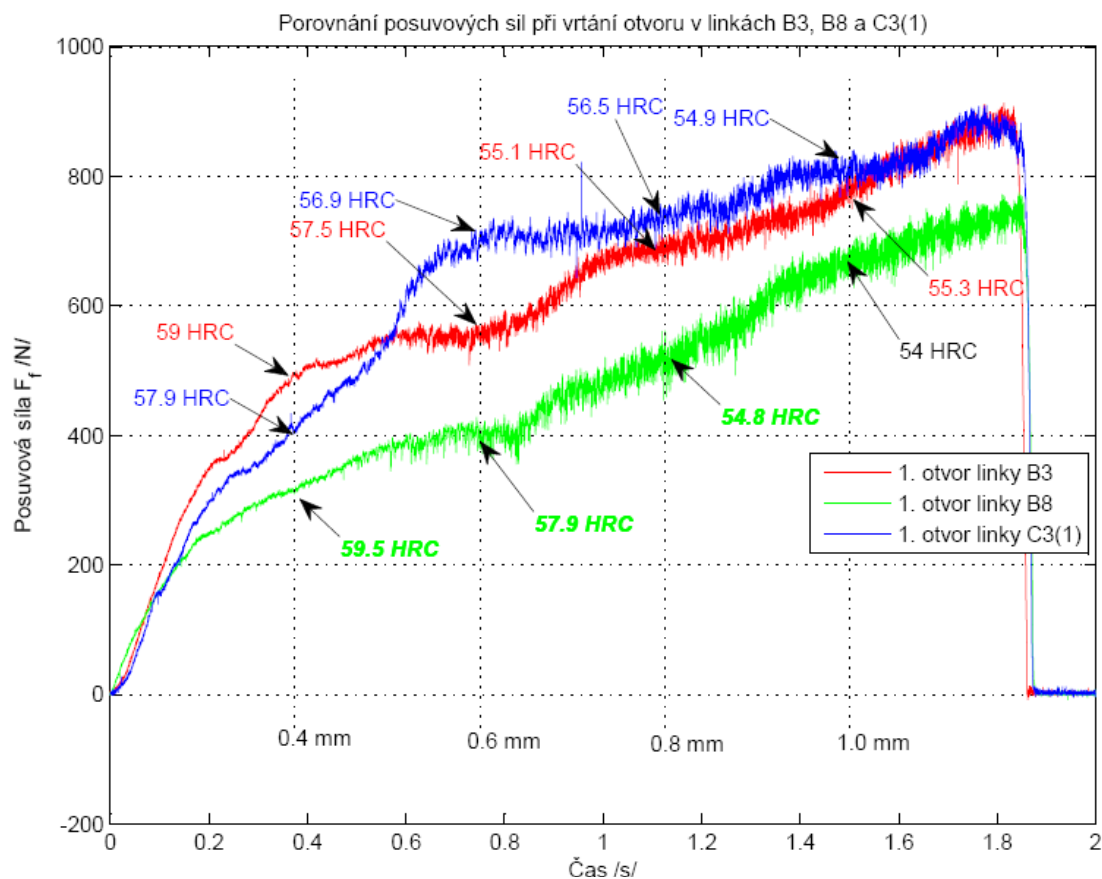
Na následujícím grafu je zobrazen průběh síly  $F_f$  při vrtání celé linky C3(2). Jedná se o 11 – 15 díru po výměně nástroje. Tento průběh je dle předpokladu velice podobný, ale opět se jednotlivé průběhy křížují a není možné odvodit jejich závislost na tvrdostech v jednotlivých vrstvách. Tyto změny lze možná částečně přiřadit opotřebení nástroje (tato závislost bude zobrazena v grafech 4.1 – 4 a 4.2 - 5). Kolísání a křížování průběhů křivek jsou na základě DP Pavly Klufové přiřazovány především nehomogenitě materiálu. Byla zde zkoumána mikrotvrdost povrchově kaleného materiálu ČSN 41 2050 v HV a v jednotlivých zrnech se hodnoty tvrdosti lišily až dvojnásobně.



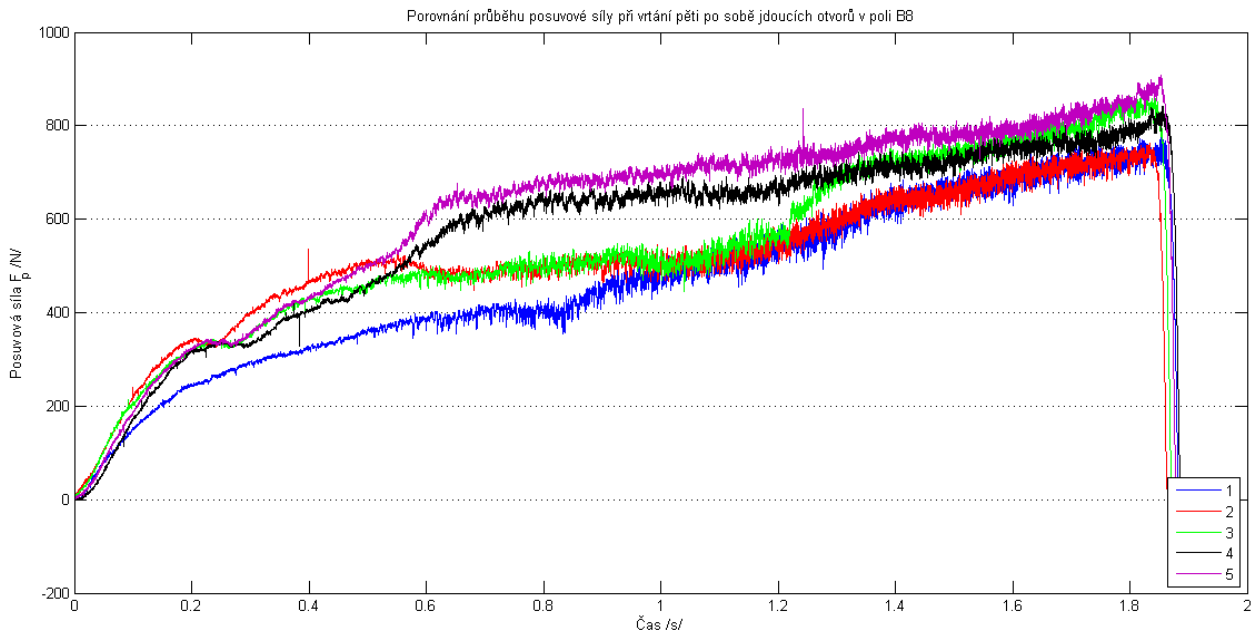
**Graf: 4.1-3 Průběh  $F_f$  při vrtání všech děr linky C3(1)**

Na dalším uvedeném grafu je především ukázán rozdílný průběh sil při vrtání po výměně nástroje (B8) a již po několika odvrtaných dírách polí B3 a C3(1). V případě nového nástroje jsou síly znatelně nižší a samotný průběh méně kolísavý. V grafu 4.1-5 je vidět, jak se tvar křivky změní při vrtání druhé díry (vzroste síla  $F_f$ ) a poté se již výrazně hodnotami  $F_f$  neliší. Průběh se však ztotožňuje až při vrtání 4 díry. Dále už jen minimálně kolísá. Vliv nového nástroje na průběh křivky byl potvrzen v DP Miroslava Zetka.

Na grafu 4.1- 4 je také velice dobře znatelný rozdílný průběh u vrtání v poli B8 a B3 a to při maximálním rozdílu tvrdosti 1,4 HRC.



**Graf: 4.1-4 Průběh  $F_f$  při vrtání linky B8, B3 a C3(1)**

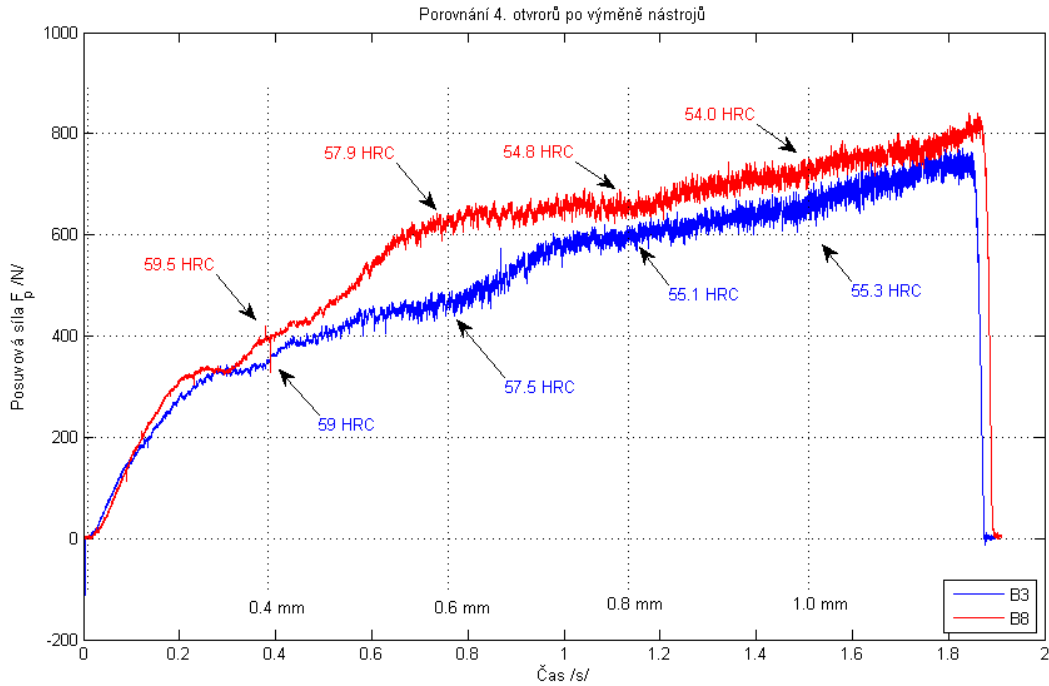


**Graf: 4.1-5 Průběh  $F_f$  při vrtání 5 děr linky B8**

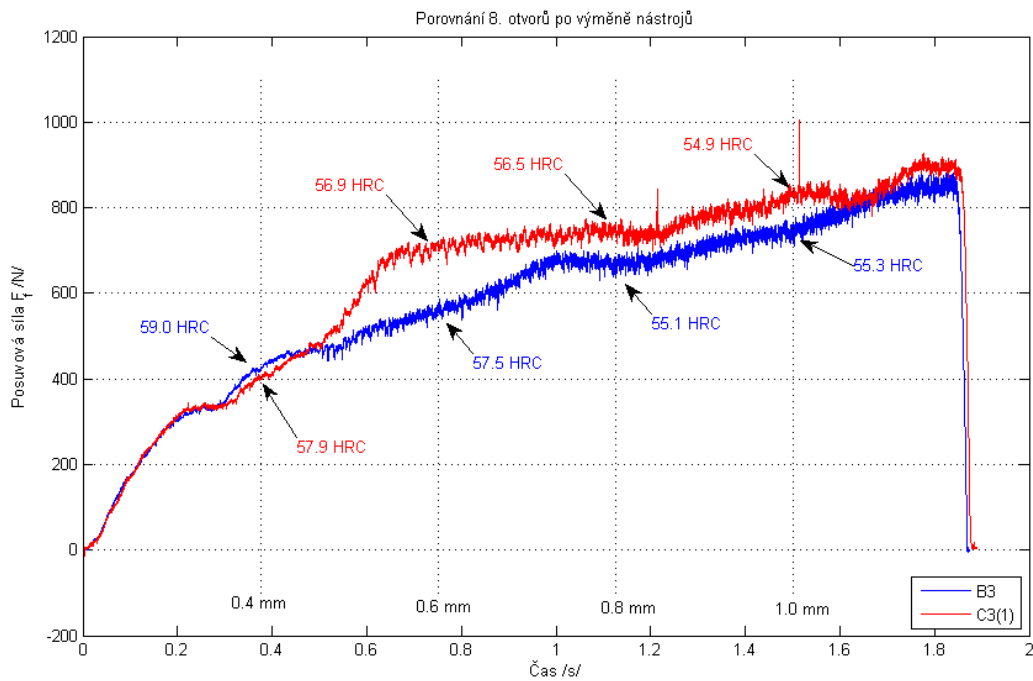
Na dalších grafech jsou pro vyloučení vlivu nezaříznutého nástroje (nového nástroje) popřípadě jeho opotřebení vybrány 4. díry po výměně nástroje a v dalším grafu 8. díry po výměně nástroje.

V grafu 4.1-6 se jedná tedy o 4. díru po výměně nástroje. V hloubce 0,4 mm a 0,6 mm platí, že síla  $F_f$  roste s tvrdostí materiálu. Ve vrstvě 0,8 mm a 1 mm je tomu však naopak.

V grafu 4.1-7 je zobrazen průběh síly při vrtání 8. díry po výměně nástroje. Zde se závislost hodnot tvrdosti na hodnotách  $F_f$  mění v každé 0,2 mm vrstvě.

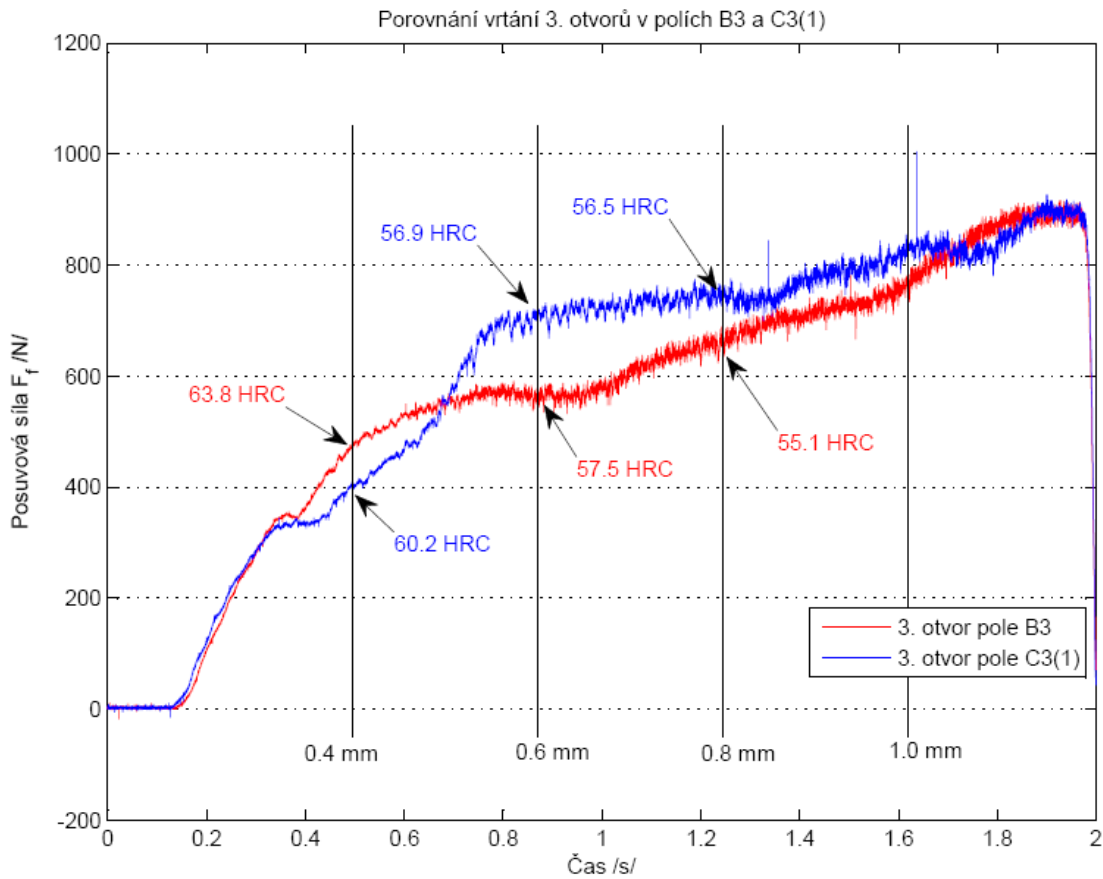


**Graf: 4.1-6 Průběh  $F_f$  při vrtání 4. děr po výměně nástroje linky B8 a B3**



**Graf: 4.1-7 Průběh  $F_f$  při vrtání 8. děr po výměně nástroje linky C3(1) a B3**

Pro další porovnání byly vybrány také díry v lince C3(1) (8 díra po výměně nástroje) a B3 (13 díra po výměně nástroje) . Opět se jedná o malý rozdíl v hodnotách tvrdosti (max 2,6 HCR) a poměrně velký rozdíl  $F_f$  (v některých místech až 80 N). Opět nelze vyvodit žádná závislost.



**Graf: 4.1-7 Průběh  $F_f$  při vrtání linky B3 a C3(1)**

## 4.2 Doporučení

Z předcházejících grafů vyplývá, že při tomto způsobu měření a obrábění není možné získat závislost  $F_f$  na tvrdosti jednotlivých vrstev materiálu. Z jednotlivých grafů vyplývá, že se zde vyskytuje několik faktorů, které výsledky experimentu výrazně zkreslují.

Jeden z faktorů je opotřebení nástroje. Tento faktor je poměrně snadno řešitelný. Z grafů 4.1. – 5 vyplývá, že pro zpracování výsledků je třeba použít až 4 díru po výměně nástroje, kdy je již zaříznutý. Pokud se zaměříme na průběh sil pouze u vrtání, kde byl vyloučen faktor opotřebení nástroje, křivky jsou si podobné, ale jejich průběh se často kříží a při přiřazení tvrdostí nevypovídá o žádné závislosti.

Další významnější faktor je nehomogenita materiálu. Je předpokládáno, že se zkreslující vliv tohoto faktoru projevuje v samotném měření tvrdosti a výsledných hodnotách měřených sil. Vzhledem k přiřazeným tvrdostem k výše uvedeným grafům nelze říci, zda síly s tvrdostí klesají, nebo rostou. Toto by však mohlo být způsobeno způsobem měření tvrdosti. Protože se v každém poli vždy uvažovali tři naměřené hodnoty okolo středu pole a z nich byl brán průměr, není zaručeno, že v konkrétním místě tyto naměřené hodnoty nejsou zkreslené.

Po experimentu bylo navrženo další jeho pokračování, kde bylo navrženo zakalit stejný materiál objemově a to několikrát pro určité tvrdosti, které byly naměřeny v konkrétních vrstvách. Do tohoto materiálu vrtat za stejných podmínek a poté porovnat výsledky naměřených sil. Dle těchto závislostí by pak bylo možné určit přepočítací koeficienty.

Pro další experimenty navrhuji především použití pouze grafů (výsledných hodnot  $F_f$ ), kde bude nástroj vrtat minimálně čtvrtou díru. Doporučuji také pravidelně kontrolovat opotřebení nástroje.

Také navrhuji provést metalografický výbrus po kalení laserem konkrétními vybranými parametry. Zde provést měření mikrotvrdosti a určit přesněji tvrdost v konkrétní vrtané oblasti.

## 5 Závěr

Cílem této práce bylo zjistit možnost určité závislosti řezných sil při vrtání na tvrdosti jednotlivých vrstev materiálu. Pokud by byla nějaká závislost zjištěna a následně vyhodnocena, bylo by možné tímto způsobem určit tvrdost povrchových vrstev materiálu jednodušším způsobem. Proti běžnému měření tvrdosti tvrdoměry popřípadě mikrotvrdoměry by nebyla nutná zdlouhavá příprava etalonu či případná složitá příprava samotného měřicího zařízení.

I přes provedení velkého počtu experimentů a detailních analýz výsledných hodnot nelze v této práci jednoznačně určit, zda tato závislost existuje nebo ne. Byly však odhaleny faktory, které výrazně zkreslují výsledky provedených experimentů. Výsledky této práce jsou doporučení pro návrh dalších experimentů, které povedou k odhalení, zda je možné tímto způsobem obrábění získat určitou závislost řezných sil na tvrdosti jednotlivých vrstev materiálu nebo naopak.

Tyto experimenty byly provedeny za podpory a na přístrojovém vybavení projektu CENTEM reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0088, který je spolufinancován z ERDF v rámci programu MŠMT OP VaVpI.



## Seznam použité literatury

- 1) www.platit.com [online]  
[25.01.2011] <http://platit.com/scratch-tester>
- 2) www.strojirenstvi-ucivo.blogspot.com [online]  
[05.02.2012] <<http://strojirenstvi-ucivo.blogspot.com/2011/03/3312-zkousky-tvrlosti.html>>
- 3) www.tempos.cz [online]  
[05.02.2012] <<http://www.tempos.cz/zkusebni-stroje/tvrdomery/tvrdomery-univerzalni>>
- 4) www.converter.cz [online]  
[05.02.2012] <<http://www.converter.cz/jednotky/tvrlost-rockwell.htm>>
- 5) www.quido.cz [online]  
[05.02.2012] <<http://www.quido.cz/mereni/poldiKladivko.htm>>
- 6) www.testima.eu [online]  
[05.02.2012] <<http://www.testima.eu/snimek154-0-dynapocket.html>>  
<<http://www.testima.eu/65-0-tvrdomery.html>>
- 7) www.tsisystem.cz [online]  
[05.02.2012] <<http://www.tsisystem.cz/produkty/esatest-mtr--379>>  
<<http://www.tsisystem.cz/produkty/esatest-handy--366>>
- 8) www.knife.cz [online]  
[05.02.2012] <[www.knife.czhttp://www.knife.cz/DesktopModules/YetAnotherForumDotNet/resource.ashx?a=100194](http://www.knife.cz/DesktopModules/YetAnotherForumDotNet/resource.ashx?a=100194)>
- 9) Doc. Ing. Honner, M., PhD., Vysokovýkonový diodový kontinuální laser  
[10.03.2012] <<http://laser.zcu.cz/files/pdf/HPDD%20Laser.pdf>>
- 10) www.kistler.com [online]  
[10.03.2012]

## **PŘÍLOHA č. 1**

### **Tabulky naměřených hodnot tvrdostí v jednotlivých vrstvách pro pre-experiment**

### 1. přejezd (0,2 mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
A	60,7	59	55	50,9	45,3	40,2	38	37,6	35	34,8	35,6	36	34	29,3	27,6	28,1	25,6
B	60,2	60	60,5	60,4	60,4	61,4	61,4	62,2	61,6	59,9	60,1	61,1	59,4	60,6	60,4	60	56,4
C	61,3	62	62,1	61,1	61,1	60,5	61	61,4	60,2	58,8	60,1	60,1	58,6	58,2	55,4	55,9	53
D	62,5	61,8	62,7	62,6	59,8	59,5	62,5	59,9	60,2	60,4	58,7	57,8	57,8	56,2	50,8	48,8	48,2
E	60,8	59,1	59,1	58,3	49,8	47,4	45,1	43	38,9	39,6	34,5	33,6	34	32,8	33,1	30,9	28,9
F	59,4	59,5	59,9	60,5	59,1	60,4	60,8	60,8	61	58,4	55,6	54,9	44,7	46	45,3	44,3	41,4
G	59,5	57,6	59,6	58,1	57,9	58,5	59,7	59	58,7	58,6	58	57,4	56,9	55,1	54,6	55,5	51
H	59,2	59,4	58,5	58,9	53,9	50,7	51,1	47,3	48,5	47,8	48,2	41,9	37,8	38,5	36,3	33,2	33

### 2. přejezd (0,4 mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
A	60	59	55	50,9	45,3	35,6	35,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	59,8	59,7	60,3	60,2	59,7	58,8	59,8	59,7	59,5	58,5	60	58,2	54,6	59,6	59,8	59,7	55,6
C	59,8	59,2	58,7	60,3	59,8	58,5	58,5	53,2	59,9	57,6	59,1	59,5	50,9	49,6	45,8	45	42,3
D	59,3	61,6	60,7	61,3	59,3	56,5	53,6	51,1	47,9	46,8	47	45,6	44	38,4	36,5	-	-
E	40,9	39,8	33,2	35,8	34,2	30,1	28,8	26,6	26,3	25,7	-	-	-	-	-	-	-
F	58,5	59	59,6	57,3	58,8	55,9	58,6	58,4	54,5	53,8	52,9	53,1	42,1	42,3	40,1	39,4	34,3
G	57,5	57,5	57,8	57,7	54,6	53,7	54,1	55,2	53	53,7	55	49,6	49,7	43,2	41,8	40,9	30,9
H	43,2	44,3	45,8	38,7	40,1	37,7	34,1	33,7	36,1	27,9	26,3	-	-	-	-	-	-

### 3. přejezd (0,6 mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
A	59,9	58,5	54,5	46,7	36,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	58	59,7	58,9	58,7	56,5	58,3	59,3	59,5	58,9	59,4	57,9	57	55,9	51,8	49,7	45,6	35,9
C	58,9	58,8	55,5	57,6	58,4	59,1	59,5	43,8	43,7	46,8	46,7	48	39,8	36,3	33,9	38,2	32,6
D	58,4	55,5	53,1	49,6	49,1	47,5	44,8	43,9	43,9	41,4	38,4	36,5	39,7	35,8	35,8	32,8	31,1
E	33,2	35,8	34,2	30,1	28,8	23,6	20,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	42,5	42	42,1	41,8	42,2	41,4	41,5	40,1	32,4	31,8	29	27,9	-	-	-	-	-
G	47,3	49,6	43	42,1	41,8	41,4	38,5	36,5	32,2	31	30,8	29,7	26,2	-	-	-	-
H	36,9	37,2	33,9	31,8	28,8	26,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

4. přejezd (0,8 mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
A	58,7	46,4	39,9	34,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	58,5	59	55,5	54,9	55,6	56,9	57,1	59,2	59,2	57,3	52,3	52	43,3	40,3	39,1	36,5	35,9
C	58,5	54,9	57,6	57,6	57,4	58,5	56,3	42	42,5	46,9	46,9	45,9	42,3	38,1	34	36,8	32,3
D	48,9	43,6	41,9	41,6	42,3	40,9	38,6	36,9	33,3	32,2	29,7	-	-	-	-	-	-
E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	25,6	22,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G	28,9	26,9	25,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

5. přejezd (1 mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
A	58,7	43,7	36,4	26,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	55,5	56,8	55,8	55,4	58,9	56,1	55	54,6	53,2	52,3	46,3	38,9	33,6	29,6	27,5	26,2	-
C	54,2	52,9	50,6	49,8	36,4	45,9	44,5	40,3	33,5	29,6	30,1	28,2	-	-	-	-	-
D	47,4	44,4	42,1	38,8	36	32,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

6. přejezd (1,2 mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
A	56,9	41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	58,8	55	53,2	54,3	54,4	54,4	54,6	52,9	53	43,2	-	-	-	-	-	-	-
C	54,2	49,3	44,2	38,8	36,4	33,1	29,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D	48,9	32,7	30,7	23,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## **PŘÍLOHA č. 2**

### **Tabulky naměřených hodnot tvrdostí v jednotlivých vrstvách pro následný experiment**

1. přejezd (0.2 mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
B3	64,1	65,3	65,2	64	63,5	62,4	63,3	62,5	61,3	60,5	60,6	64,5	60,7	64,1	65	63,9	62,2
B8	60,6	60,3	61	60,5	60,3	58,9	60	64,5	62,5	61,5	61,5	62,8	63,5	61	62,6	64	62
C3(1)	61,1	60,5	58,7	58,6	59,6	58,6	62,8	58,9	60	60,2	60	62,3	62,4	58,8	60,9	63	62,4
C3(2)	59,8	60,1	60,4	58,5	58,6	56,9	62,5	59,6	59,2	59,2	60,1	58,7	61,3	58,9	60	58,9	62

2. přejezd (0,4 mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
B3	60	59	61,3	60,7	58,5	58,5	60,3	58,8	56,9	58,4	58,3	57,3	58,9	61,3	61,7	62,4	59,9
B8	59,2	59,7	60,8	60,4	58,1	57,8	58,6	59,5	59,1	58,4	57,9	59,4	59,8	59,5	60,1	61,3	59,9
C3(1)	60,3	60,1	57,8	56,8	57,5	58,4	57,7	57,5	58,5	59,6	58,8	56,7	56,8	59,3	57,9	58,9	57,1
C3(2)	59,2	58,8	58,2	58,2	57,6	55,9	60,1	60,4	55,9	59,1	58,5	57,3	57,1	59	58,6	58,5	60

3. přejezd (0,6 mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
B3	58,8	58	56,5	56,4	57,8	58,9	55,7	57,2	55,9	55,4	55,9	55,3	57,9	58,1	57,6	57,5	58,7
B8	60,5	60,3	57,9	57,5	56,9	56,4	56,9	58,4	57,4	57,4	57,6	58,3	58,6	59	57,3	58,3	60,3
C3(1)	58,9	57,6	56,3	56,8	55,9	57	56,9	56,9	55,8	59,3	58,1	55,9	54,7	57,5	57,7	58,2	55
C3(2)	58,2	58,2	57,9	57,3	57,5	55,5	58,6	57	55	57,7	57,8	55,9	55,8	58,3	58,8	58,3	57,7

4. přejezd (0,8 mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
B3	55,9	55,9	56,5	54,9	52,9	54,3	57,9	55,1	56,5	55,1	56,8	55,9	55,8	53,6	53,6	54,2	53,5
B8	58,7	58,8	53,7	54,4	53,9	53,4	55,3	57,6	54,8	56,3	56,5	58	53,5	54,6	54,3	54,9	54,1
C3(1)	58	56,7	56,7	55,8	55,8	55,9	58,4	57	55,8	55,7	57	55,8	54,9	57,6	56,5	57,8	55,1
C3(2)	58,9	58,6	54,7	56,9	54,9	51,9	55,1	52,9	56,8	56,8	56,5	54,8	55,7	56,9	58,7	58,3	57

5. přejezd (1 mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
B3	52,4	54,6	55,6	56,3	56,4	54,5	55,4	56,9	55,8	55,3	55,6	54,3	55,3	51,7	50,3	52,9	51,9
B8	58	57,6	55,4	53,2	54,8	55,6	54	54,8	57	54	53,4	53,9	55,5	52,4	51,9	53,8	52,1
C3(1)	55,4	55,9	55	53,5	54,9	55,7	55,9	54,9	55,1	55,1	54,9	54,5	52,3	53,8	54,5	55,7	54,6
C3(2)	56,5	55,6	53,5	55	53,8	52,3	52,4	51,9	55	53,9	53,4	53	53,2	55,1	52	52,3	51,1