



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## OBRÁBĚNÍ SOUČÁSTÍ V KALENÉM STAVU

MACHINING OF HARDENED PARTS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Sofia Heiserová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2021

# Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Studentka: **Sofia Heiserová**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Aleš Polzer, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Obrábění součástí v kaleném stavu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stále častěji se lze setkat s firmami, které potřebují dokončovacím způsobem obrábět zakalené strojní součásti. Tato práce sumarizuje hlavní vývojové trendy, výhody a nevýhody třískového obrábění (soustružení, frézování, okružní frézování, broušení) zakalených součástek.

### Cíle bakalářské práce:

- teoretický rozbor obrábění zakalených součástek
- návrh experimentálního měření pro laboratorní záznam silového zatížení
- zpracování nezbytné technické dokumentace k řešené problematice

### Seznam doporučené literatury:

GUPTA, Kapil, ed. Advanced manufacturing technologies: Modern Machining, Advanced Joining, Sustainable Manufacturing. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-56-98-4.

DAVIM, J. Paulo, ed. Surface integrity in machining. London: Springer, 2010, 215 s. ISBN 978--84882-873-5.

DAVIM, J. Paulo, ed. Modern machining technology: a practical guide. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-099-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Využitie obrábania kalených materiálov vo výrobe vedie k použitiu procesu tvrdého obrábania, ktoré kladie vyššie nároky na obrábací stroj aj nástroj ako klasické obrábacie procesy. Kalené materiály so sebou prinášajú problém objemových a geometrických zmien po zakalení, ale aj po ich obrobení. Je potrebné teda myslieť na objemové kompenzácie už pred kalením polotovaru. Je navrhnutý experiment s cieľom optimalizácie pozdĺžneho sústruženia ocelí 42CrMo4 a 50CrMo4. Tvrdé sústruženie má značné výhody ako napríklad flexibilitu nástrojov a možnosť nevyužitia procesnej kvapaliny, čo má pozitívny ekologický dopad. Jeho nevýhody sú však vysoké opotrebenie nástrojov a ich vysoká cena.

### Kľúčové slová

kalený materiál, tvrdé obrábanie, objemové zmeny, zvyškové pnutia, okružné frézovanie

## ABSTRACT

The usage of quenched materials in industrial production leads to the application of hard machining. Higher requirements for machines and cutting tools are needed during hard machining than during conventional machining. Quenched materials carry problem of volume and geometric changes after quenching and after machining as well. It is necessary to think about volumetric compensation in advance, before quenching of the workpiece. An experiment is suggested for optimisation of longitudinal turning of steels 42CrMo4 and 50CrMo4. Hard turning has notable benefits such as flexibility of cutting tools and elimination of coolants, which provides ecological benefits. However, the disadvantages are higher tool wear and high prices of tools.

### Key words

quenched material, hard machining, volume changes, residual stresses, thread whirling

## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

HEISEROVÁ, Sofia. *Obrábění součástí v kaleném stavu*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131593>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Aleš Polzer.

**PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému **Obrábění součástí v kaleném stavu** vypracovala samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

---

Dátum

---

Sofia Heiserová

## **POĎAKOVANIE**

Touto cestou by som sa chcela poďakovať vedúcemu mojej bakalárskej práce pánovi Ing. Alešovi Polzerovi, Ph.D. za cenné rady, odbornú pomoc a užitočné pripomienky pri jej písaní. Taktiež by som sa chcela poďakovať svojim rodičom za ich neustálu podporu pri tvorbe tejto práce.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	3
PREHLÁSENIE.....	4
POĎAKOVANIE .....	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	7
1 OBRÁBANIE ZAKALENÝCH SÚČASTÍ.....	8
1.1 Tvrdé obrábanie .....	8
1.2 Kalenie ocele.....	9
1.2.1 Kaliace prostredie .....	9
1.2.2 Povrchové kalenie.....	10
1.2.3 Prekaliteľnosť ocele.....	11
1.2.4 Popúšťanie .....	12
1.3 Problematika zvyškového vnútorného pnutia .....	12
1.4 Guličkové skrutky .....	15
1.5 Okružovacie frézovanie .....	16
2 NÁVRH EXPERIMENTU .....	19
2.1 Použité prístroje a pomôcky.....	19
2.2 Použité stroje a nástroje .....	20
2.3 Priebeh experimentu.....	21
3 EKONOMICKÉ HĽADISKO OBRÁBANIA KALENÝCH MATERIÁLOV .....	25
3.1 Stroje.....	25
3.2 Nástroje.....	26
ZÁVER .....	28
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....	29
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	32
ZOZNAM PRÍLOH.....	33

## ÚVOD

S kontinuálnym technologickým pokrokom ľudstva sa zvyšujú kritériá na presnosť, opotrebenie, pevnosť a výdrž súčastí s relatívne zložitým tvarom. Dosiahnutie týchto kritérií zahŕňa využitie nových materiálov, nových výrobných stratégií či optimalizáciu výrobného postupu. Jednou z možností pre zvýšenie kvality materiálov je využitie obrábania súčastí v kalenom stave.

Keďže zakalením ocele rastie jej tvrdosť, jedná sa teda o takzvané tvrdé obrábanie súčastí, u ktorého je potrebné klásť vyššie nároky na použité stroje aj nástroje. Okrem toho, používanie zakalenej ocele so sebou nesie určité problémy ako napríklad objemové zmeny po kalení a s tým spojené deformácie materiálu.

Je potrebné počítať s objemovými kompenzáciami už pred zakalením polotovaru a s kratšou životnosťou rezných nástrojov. Na druhej strane je tvrdé obrábanie v niektorých prípadoch ekologicky výhodnou operáciou a vďaka využitiu moderných strojov sa dá ľahko automatizovať čím narastá flexibilita a klesajú výrobné časy [1].

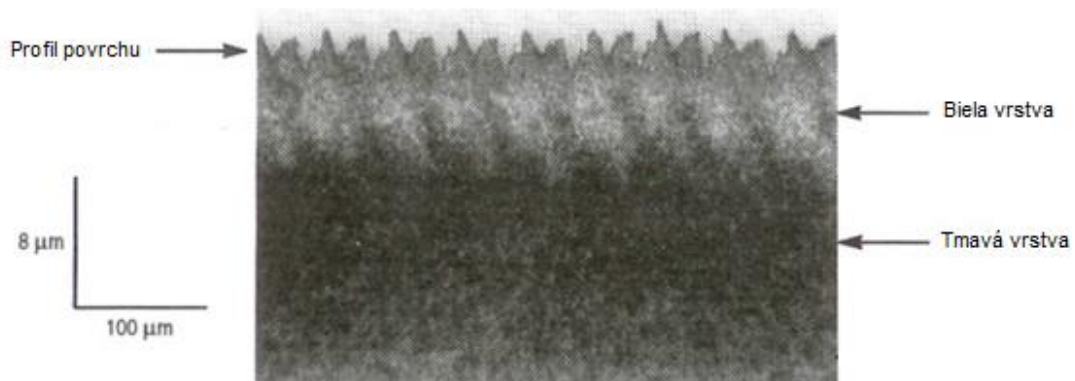
## 1 OBRÁBANIE ZAKALENÝCH SÚČASTÍ

Zvyšujúci sa dopyt po presných, spoľahlivých súčiastiach aj za vyššieho opotrebenia predstavuje výzvu pre strojárnské firmy. Využívajú sa teda materiály vyššej tvrdosti, medzi ktoré patria aj kalené ocele. Použitie zakalených polotovarov znamená, že sa jedná o obrábanie v tvrdom stave, teda o technologický proces, ktorým sa vytvára požadovaný tvar obrobku odobraním materiálu s vysokou tvrdosťou. Všeobecne sa za tvrdé obrábanie považuje obrábanie materiálov s tvrdosťou od 45 HRC do 68 HRC [2].

### 1.1 Tvrdé obrábanie

Pri obrábaní tvrdých materiálov sa kladú vysoké nároky na stroj aj použité nástroje. Nedostatočná tuhosť sústavy môže spôsobiť elastickú deformáciu (odtláčenie nástroja, aj obrobku) v mieste kontaktu nástroja a obrobku, z čoho sa odvíja špeciálna konštrukcia strojov s odolnosťou voči vibráciám a teplotnou stálosťou. Účinkom pôsobiacich síl sa deformujú rôzne miesta technologickej sústavy, čo spôsobuje zmenu polohy reznej hrany nástroja. Úroveň tuhosti sústavy určuje úroveň presnosti tvrdého obrábania, čím väčšia je tuhosť, tým menšia je deformácia sústavy [3; 2].

V prípade tvrdého obrábania sa počas extrémne krátkeho času, približne 0,1 ms, dosiahne austenitická teplota materiálu polotovaru v mieste kontaktu, kde nastávajú štrukturálne zmeny. Vytvára sa metalurgicky neleptateľná štruktúra, ktorá sa nazýva „biela vrstva“ obsahujúca viac ako 60 % austenitu, nasledovaná tmavou martenzitickou vrstvou. Po čase sa môže biela vrstva rozštiepiť, viesť k poruchám a znížiť tak kvalitu obrobku. Tieto mikroštrukturálne zmeny boli pozorované počas tvrdého obrábania, napríklad na povrchu ocele AISI 52100 tvrdosti 60 HRC zobrazenom na obr. 1 [4].



Obr. 1 Optický mikrosnímok mikroštrukturálnych zmien na povrchu ocele AISI 52100 po tvrdom obrábání [4].

Hrúbka bielej vrstvy vyformovanej počas tvrdého obrábania sa zvyšuje s opotrebením nástroja. Najčastejšie sa tvoria na ložiskových oceliach a tvoria najväčší problém na súčiastiach ako sú valivé ložiská, na ktoré je kladený vysoký dotykový tlak. Aj napriek tomu, že rezná doštička môže podľa údajov od výrobcu obrobiť napríklad 400 súčastí, jej otupenie môže byť dostatočné na tvorbu bielej vrstvy už po obrobení 300 súčastí. A teda kvalita povrchu obrábaných súčastí klesá s opotrebením nástroja aj v rámci jeho životnosti [2].

Okrem štrukturálnych zmien spôsobených vysokými teplotami v mieste kontaktu obrábaného a nástrojového materiálu dochádza aj tvarovým zmenám nástroja. Teplota rezného klina dosahuje vysokých teplôt aj napriek tomu, že do nástroja je odvedené počas obrábania pomerne malé množstvo tepla. Tento proces spôsobuje teplotnú deformáciu nástroja a ten sa predlžuje. Jeho predĺženie sa dá približne vypočítať zo vzťahu [3]:

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot (\theta - \theta_0) \quad (1)$$

Rezné materiály teda musia zniesť vysoké teploty a mechanickú záťaž. Používajú sa materiály ako spekané karbidy, rezná keramika a extra tvrdé materiály ako polykryštalický kubický nitrid bóru (PCBN). V prípade kalených materiálov triedy H sa najčastejšie používajú spekané karbidy [2].

## 1.2 Kalenie ocele

Väčšina dnešných uhlíkových, nízkolegovaných a vysokolegovaných súčastí sú tepelne spracované pred ich použitím v praxi. Súčasti sú tepelne spracované na zlepšenie niektorých vlastností ako napríklad ich tvrdosť, pevnosť, odolnosť voči korózii a na zjednotenie ich štruktúry. Presné tepelné spracovanie závisí na konkrétnej zliatine a na požiadavkách kladených pri používaní súčasti. Užitočnosť ocele závisí z veľkej časti na relatívnej jednoduchosti s akou sa dajú meniť jej vlastnosti riadeným zvyšovaním a znižovaním jej teploty. Zmeny vlastností prebiehajú najmä kvôli variácii zložiek mikroštruktúry pri rôznych rýchlostiach chladenia [5].

Obece je kalenie operácia zahriatia ocele na vysoké, tzv. kaliace teploty s nasledujúcim prudkým riadeným chladením na získanie špecifických mikroštruktúr a požadovaných kombinácií vlastností. S vyšším obsahom uhlíka narastá aj tvrdosť, na ktorú môžu byť ocele zakalené. Ocele s obsahom uhlíka pod 0,25 % sú nekaliteľné [6]. Kalením sa spracovávajú ako nástrojové tak aj konštrukčné ocele.

Kalenie je spojené so vznikom nerovnovážnej štruktúry martenzitu a bainitu a zvýšením pevnosti v ťahu. S tým je spojené zväčšenie objemu súčasti, ktoré spôsobuje problémy najmä pri kalení veľkých súčastí, kde veľké vnútorné pnutie môže spôsobiť deformácie, trhliny, až prasknutia. Pri zvyšovaní tvrdosti materiálu klesá húževnatosť a zvyšuje sa krehkosť [7].

### 1.2.1 Kaliace prostredie

Čím má oceľ menej uhlíku, tým rýchlejšie musí byť chladená. S narastajúcim obsahom uhlíka rýchlosť chladenia klesá a najpomalšia je u vysokolegovaných ocelí, keďže legury sú zlým vodičom tepla. Pri kalení je potrebné oceľ ochladzovať kritickou rýchlosťou, ktorú zabezpečujú kaliace prostredia:

- voda – najstaršie, lacné a nenáročné kaliace prostredie. Dosahuje sa najvyšších rýchlostí ochladzovania, no voda svojím ohrevom vytvára okolo ocele parnú kapsu, čo môže viesť ku nerovnomernému prenosu tepla, vysokým zvyškovým pnutiam a deformáciám,
- olej – pomalšie kaliace prostredie, ale vedie k rovnomernejšiemu ochladzovaniu vďaka čomu vzniká menšie vnútorné pnutie,
- roztavené soľné kúpele – používajú sa napríklad zmes dusitanu sodného  $\text{NaNO}_2$  a dusičnanu draselného  $\text{KNO}_3$ ,
- vzduch – najpomalšie kaliace prostredie,

- polymérne roztoky – najuniverzálnejšie a najstabilnejšie kaliace prostredie [8; 9].

### 1.2.2 Povrchové kalenie

Cieľom povrchového kalenia je zvýšenie tvrdosti v povrchovej vrstve materiálu pri zachovaní jadra v pôvodnom stave, s pôvodnými vlastnosťami.

Pri povrchovom kalení by sa malo brať do úvahy to, že kaliaci proces môže spôsobiť vysoké vnútorné pnutia počas tepelného spracovania kvôli teplotným napätiam vytvárajúcim sa počas chladnutia. Počas určitého časového intervalu sú sprevádzané aj pnutím spôsobeným fázovými premenami. Vysoké vnútorné zvyškové pnutia sú spájané so zmenou objemu a/alebo s pretvorením súčastí [4].

Používajú sa ocele ako napríklad 42CrMoS4, 42CrMo4 a 50CrMo4.

Chemické zloženie ocelí 42CrMoS4 a 42CrMo4 podľa ČSN EN 10083-1 je uvedené v tabuľke 1.1.

Tabuľka 1.1 Chemické zloženie ocele 42CrMoS4 [10].

	C	Mn	Si max.	P max.	S	Cr	Mo
Obsah [hm. %] v 42CrMoS4	0,38–0,45	0,6–0,9	0,4	0,035	0,02–0,04	0,9–1,2	0,15–0,3
Obsah [hm. %] v 42CrMo4					max. 0,035		

V oboch prípadoch 42CrMoS4 aj 42CrMo4 sa jedná o nízkoaliovanú, ušľachtilú oceľ s priaznivou húževnatosťou aj pri veľkej pevnosti, použiteľná až do 500 °C. Používa sa pri výrobe namáhaných dielov veľkej pevnosti i húževnatosti, napr. súčasti motorových vozidiel. Hlavné namáhané hriadele, časti riadenia, a pod.

Kalenie týchto ocelí prebieha pri teplote 820–860 °C, chladenie olejom alebo vodou.

Jediný rozdiel v chemickom zložení týchto dvoch ocelí je v obsahu síry. Síra sa všeobecne považuje za nežiadúcu. V oceliach s jej obsahom viac ako 0,05% spôsobuje krehkosť, trhliny a znižuje zvarateľnosť. Pri obsahu 0,01 až 0,03 % má však legujúce schopnosti a zlepšuje obrobitelnosť materiálu [11]. Pri oceli 42CrMo4 s nižším maximálnym obsahom síry 0,035 % namiesto 0,04 % ako je tomu u 42CrMoS4 je teda pravdepodobnosť tvorenia trhlín menšia. Na druhej strane, oceľ 42CrMoS4 môže mať lepšiu obrobitelnosť.

Keďže je chemické zloženie týchto dvoch ocelí príbuzné, ich mechanické vlastnosti sú popísané v spoločnej tabuľke 1.2.

Tabuľka 1.2 Mechanické vlastnosti 42CrMoS4 a 42CrMo4 v zušľachtenom stave [10].

Priemer tyče [mm]	Hrúbka steny [mm]	Re min. [MPa]	Rm [MPa]	A <sub>min</sub> [%]	Z <sub>min</sub> [%]
do 16	do 8	900	1 100-1 300	10	40
16-40	8-20	750	1 000-1 200	11	45
40-100	20-60	650	900-1 100	12	50
100-160	60-100	550	800-900	13	50
160-250	100-160	500	750-900	14	55

Chemické zloženie ocele 50CrMo4 podľa EN 10083-3 je uvedené v tabuľke 1.3.

Tabuľka 1.3 Chemické zloženie ocele 50CrMo4 [12].

	C	Mn	Si max.	P max.	S max.	Cr	Mo
Obsah [hm. %]	0,46-0,54	0,5-0,8	0,4	0,025	0,035	0,9-1,2	0,15-0,3

Táto oceľ je príbuzná 42CrMoS4 s vysokou medzou sklzu. Je určená pre súčasti vozidiel a strojov vyžadujúce vysokú pevnosť a ktoré sú namáhané na ohyb, na krut, odieraním a vysokým zaťažením napr. kľuková hriadeľ, ozubené kolá, a podobne [13].

Kalenie prebieha pri teplote 830-860 °C, chladenie olejom a pri teplote 820-850 °C, chladenie vo vode [12]. Mechanické vlastnosti ocele sú uvedené v tabuľke 1.4.

Tabuľka 1.4 Mechanické vlastnosti ocele 50CrMo4 [14].

Priemer tyče [mm]	Hrúbka steny [mm]	Re min. [MPa]	Rm [MPa]	A <sub>min</sub> [%]	Z <sub>min</sub> [%]
do 16	do 8	900	1 100-1 300	9	40
16-40	8-20	780	1 000-1 200	10	45
40-100	20-60	700	900-1 100	12	50
100-160	60-100	650	850-1 000	13	50
160-250	100-160	550	800-950	13	50

Z chrómovej ocele sa často vyrábajú guľčkové skrutky, ktoré vyžadujú vysokú pevnosť. Matice a hriadeľová časť sú zakalené na tvrdosť 58-60 HRC. Jadro a nekalené časti hriadeľa majú minimálnu pevnosť Rm = 650 MPa [15].

### 1.2.3 Prekaliteľnosť ocele

Prekaliteľnosť je schopnosť ocele získať tvrdosť formovaním martenzitu do určitej vzdialenosti od povrchu [6]. Rýchlosť ochladzovania smerom od povrchu klesá a v prípade, že klesne pod kritickú rýchlosť ochladzovania nebude materiál v jadre zakalený. Na prekaliteľnosť a iné vlastnosti ocele majú významný vplyv legury.

Mangán zvyšuje prekaliteľnosť. Zvyšuje dobu potrebnú k fázovej transformácii a tým zjednodušuje kalenie v olejovom kúpeli.

Kremík zvyšuje prekaliteľnosť ale menej ako chróm a mangán. Spôsobuje zvýšenie teplôt rozpadu martenzitu a zvyškového austenitu pri popúšťaní a znižuje kritickú rýchlosť ochladzovania.

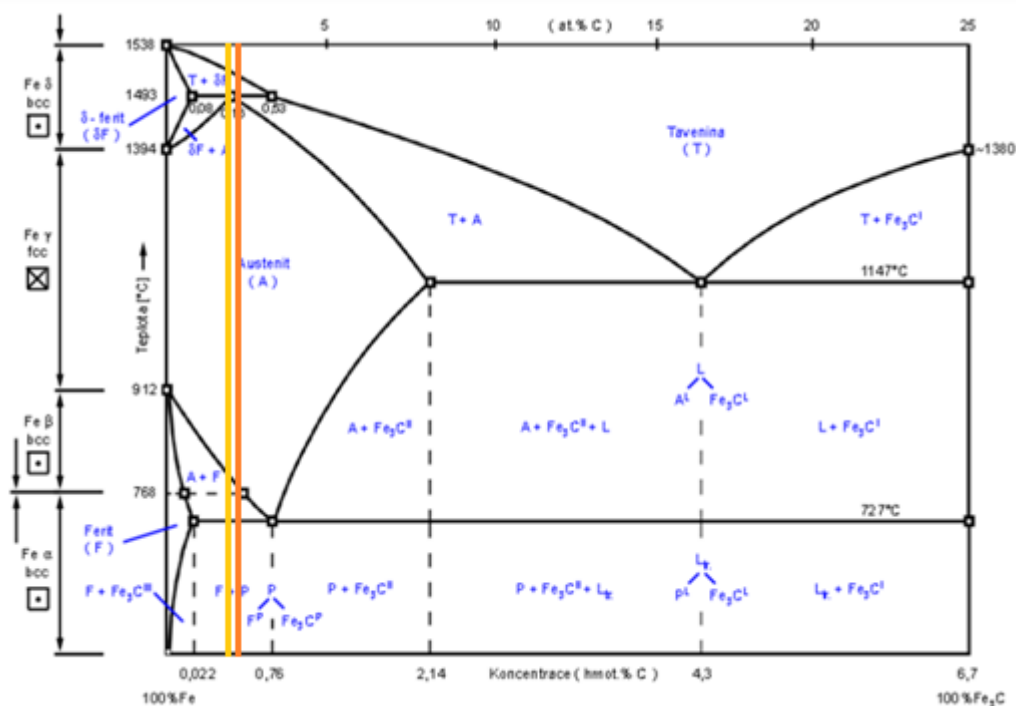
Nikel taktiež zvyšuje prekaliteľnosť znížením kritickej rýchlosti rozpadu austenitu, ale výrazne menej ako chróm, či mangán.

Pri použití chrómu je potrebné počítať s nutnosťou rozpustenia karbidov chrómu pri austenitizácii. Prekaliteľnosť totiž zvyšuje iba chróm rozpustený v austenite, nerozpustené karbidy sú krystalizačné zárodky, ktoré prekaliteľnosť znižujú. Je teda potrebné správne zvoliť kalicu teplotu, pretože karbidy chrómu sa rozpúšťajú až za vyšších teplôt.

Molybdén zvyšuje prekaliteľnosť znížením kritickej rýchlosti rozpadu austenitu.

Bór spomaľuje začiatok austenitickej transformácie a tým zvyšuje prekaliteľnosť.

Na obr. 2 je znázornený binárny rovnovážny diagram metastabilnej sústavy Fe-Fe<sub>3</sub>C s príslušným štruktúrnym popisom pre teplotu 20 °C, kde žltá čiara označuje približný obsah uhlíku pre materiály 42CrMo4 a 42CrMoS4 a oranžová 50CrMo4 [16].



Obr. 2 Binárny rovnovážny diagram metastabilnej sústavy Fe-Fe<sub>3</sub>C [16].

### 1.2.4 Popúšťanie

Popúšťanie je tepelné spracovanie kalenej alebo normalizovanej ocele na dosiahnutie požadovaných mechanických vlastností a zníženie vnútorných pnutí. Oceľ je zahriatá a udržiavaná na teplote, kedy sa nemôže vytvoriť austenit. Spravidla, je doba popúšťania minimálne okolo 1 hodiny [6].

Popúšťanie ocele 50CrMo4 prebieha na teplotách 525–625 °C po dobu 1 hodiny [12] a ocelí 42CrMo4 a 42CrMoS4 na teplotách 540–680 °C [10].

### 1.3 Problematika zvyškového vnútorného pnutia

Zvyškové vnútorné pnutia sú triaxiálne, statické napätia, ktoré sú bez pôsobenia vonkajších síl alebo momentov v rovnovážnom stave. Objavujú sa vždy, keď je oblasť polotovaru deformovaná plasticky vnútornými, alebo vonkajšími silami.

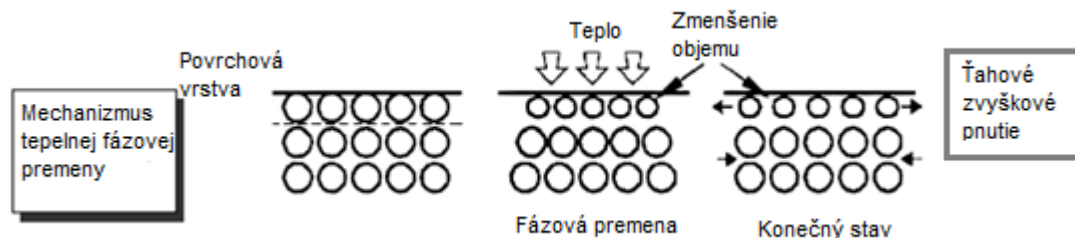
Zvyškové pnutie v povrchovej vrstve môže byť spôsobené nasledujúcimi javmi:

- fázovou premenou,
- plastickou deformáciou spôsobenou tepelným pôsobením,
- plastickou deformáciou spôsobenou mechanickým pôsobením.

Celkové zvyšné pnutie závisí na rovnováhe medzi týmito tromi faktormi.

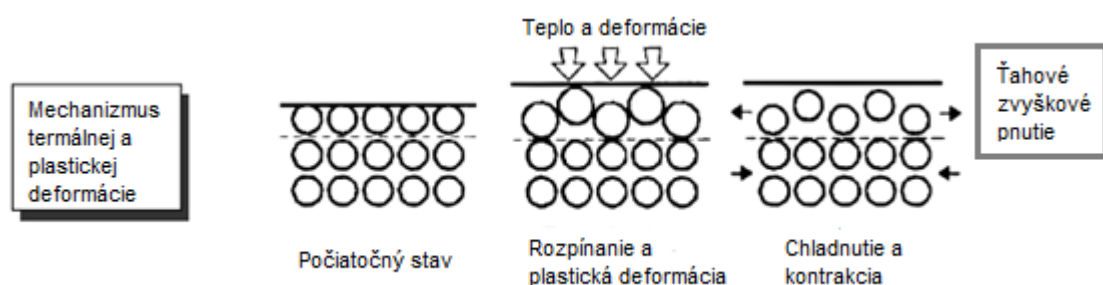
Tieto mechanizmy spôsobujúce zvyškové vnútorné pnutie sa dajú zjednodušene znázorniť na nasledujúcich modeloch:

1. Tepelná fázová premena nazývaná tepelný alebo teplý model (obr. 3), kde je zvyškové pnutie spôsobené zmenou objemu. Ak fázová premena spôsobí zníženie objemu, povrchová vrstva je napínaná a je vytvorené ťahové zvyškové pnutie. Na druhej strane, zvýšenie objemu má za následok tlakové zvyškové pnutie.



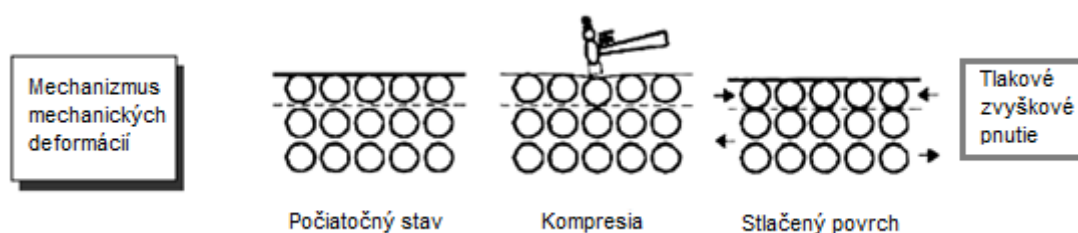
Obr. 3 Model mechanizmu vzniku zvyškového pnutia pri tepelnej fázovej premeně [4].

2. Termálna/plastická deformácia nazývaná zmiešaný model (obr. 4), pri ktorej teplo zapríčiňuje rozpínanie povrchovej vrstvy a toto rozpínanie je uvoľnené plastickou deformáciou (tzv. *plastic flow*), ktorý sa vzťahuje len na povrchovú vrstvu. Počas ochladzovania sa povrchová vrstva zmršťuje, čoho následok je ťahové zvyškové pnutie.



Obr. 4 Model mechanizmu vzniku zvyškového pnutia pri termálnej a plastickej deformácii [4].

3. Model prevažne mechanickými plastickými deformáciami, nazývaný mechanický alebo studený model (obr. 5). Zvyškové pnutie je tlakové pretože povrchová vrstva je stlačovaná mechanickou činnosťou. Tento model platí pre leštenie, pri ktorom je vytváraná značná časť tangenciálneho tlakového pnutia maximálnej hodnoty v určitej hĺbke pod povrchom.



Obr. 5 Model mechanizmu vzniku zvyškového pnutia mechanickou deformáciou [4].

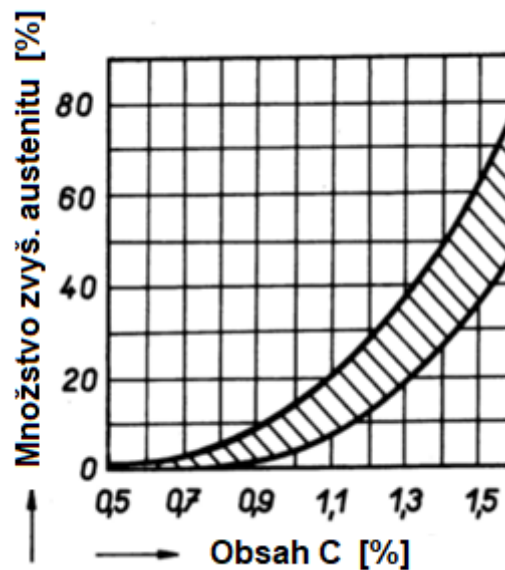
Toto sú takzvané zvyškové pnutia prvého druhu, sú približne homogénne na väčších plochách, ako napríklad niekoľko zrn materiálu a sú v rovnováhe s ohľadom na celý tvar súčasti. Akýkoľvek zásah do silovej a momentovej rovnováhy objemových prvkov obsahujúcich tieto zvyškové pnutia, zmení ich makroskopické rozmery [6].

Fázová premena austenitu na martenzit pri kalení je sprevádzaná zvýšením objemu súčasti. To privádza zvyškové vnútorné pnutia mimo rovnováhu. Môžu vzniknúť trhliny, praskliny či tvarová zmena pri väčších súčastiach. Treba teda počítať s rozmerovou kompenzáciou

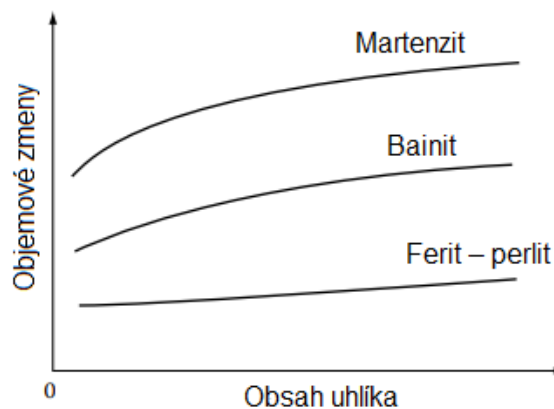
Počas obrábania na materiál pôsobí veľký tlak a vysoké teploty, ktoré môžu mať za následok zvyškové pnutia prvého druhu a s nimi spojené objemové zmeny. Okrem zmien spôsobených mechanickým a teplotným pôsobením je tu možnosť pôsobenia fázovej zmeny zvyškového austenitu počas obrábania.

Zvyškový austenit je austenit, ktorý sa počas ochladzovania po kalení nepremení na martenzit. Zvyškový austenit môže pozitívne ovplyvniť niektoré vlastnosti zakalenej ocele ako napríklad tvárnosť a húževnatosť, no všeobecne je jeho výskyt nežiadúci kvôli znižovaniu tvrdosti. Taktiež môže dôjsť k preмене na feriticko – karbidickú zmes bainitického typu. Touto fázovou premenou môže dôjsť nielen k zmene vlastností, ale aj k zmene tvaru a rozmerov zakalenej súčasti [17].

Objemové a tvarové zmeny sa teda vyskytujú po zakalení a môžu sa vyskytovať aj po obrábaní zakaleneho polotovaru. V oboch prípadoch sú objemové a tvarové zmeny spôsobené fázovou premenou austenitu. Veľkosť týchto zmien je ovplyvnená obsahom uhlíka v oceli. Podiel zvyškového austenitu stúpa s obsahom uhlíka ako je vidno na obr. 6, ale jeho podiel navyšujú aj legury ako napríklad molybdén, nikel, chróm a mangán [6]. Ako je schematicky znázornené na obr. 7, objemové zmeny závisia rovnako na fázovej preмене, ako aj na obsahu uhlíka v oceli. Je teda potrebné počítať s tvarovými a objemovými kompenzáciami nielen pri zakalení, ale aj pri obrábaní polotovaru.



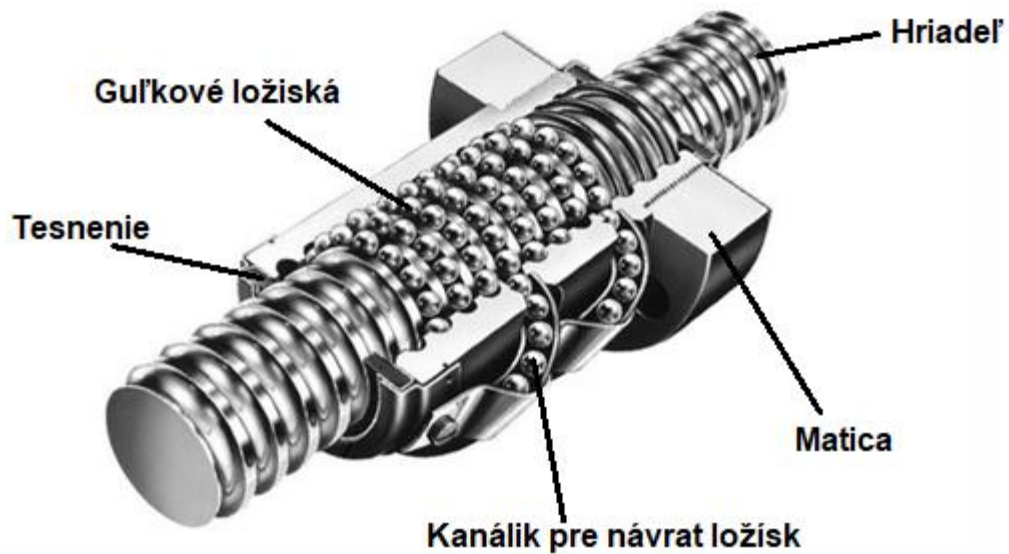
Obr. 6 Podiel zvyškového austenitu ako funkcia obsahu uhlíka [17].



Obr. 7 Objemové zmeny uhlíkových ocelí ako funkcia obsahu uhlíka [6].

#### 1.4 Guličkové skrutky

V aplikáciách, ktoré vyžadujú vysokú presnosť je často nutné previesť rotačný pohyb na priamočiary. Jedným zo spôsobov ako to doceliť je využitie guličkovej skrutky. Gul'kové ložiská vnútri skrutky sa valia v drážke podobným spôsobom ako v štandardných gul'kových ložiskách a teda eliminujú trenie, ktoré sa vytvára v bežných závitoch. Nižší je aj potrebný točivý moment, čo šetrí energiu hnacieho motoru. Ložiská sú kontinuálne roztáčané, čím rozdeľujú záťaž. Využitím ložísk a znížením trenia majú guličkové skrutky vysokú úroveň účinnosti a pozičnej presnosti aj pri vysokých točivých momentoch a silovom zaťažení [18]. Mechanizmus guličkovej skrutky je najčastejšie využívaný v konštrukcii obrábacích strojov ako hnací element ich posuvných sústav [19]. Znázornenie guličkovej skrutky spolu s ložiskami je na obr. 8.



Obr. 8 Znárodnenie guľčkovej skrutky s ložiskami v skrutkovej drážke podľa [18].

Sú kladené vysoké nároky na technológiu výroby, keďže je veľmi dôležité dodržať presnú geometriu profilu drážky guľčkovej skrutky. Nepresnosti jej tvaru spôsobené výrobným procesom, alebo opotrebením majú značný vplyv na jej chod a presnosť. Aby bolo minimalizované opotrebenie spoluzaberajúcich povrchov, sú tieto povrchy kalené na optimálnu tvrdosť.

Sú dve možnosti výroby. Vyrobiť závit v mäkkom stave, zakaliť a brúsiť na hotovo, alebo ho priamo obrábať z už zakaleného materiálu. Keďže sa po zakalení materiálu zväčšuje jeho objem a s ním aj možnosť deformácií, je prvá možnosť nevýhodná kvôli požadovanej presnosti tvaru a geometrie guľčkovej skrutky [19].

Ako efektívnejšia a relatívne presnejšia cesta sa javí priame obrábanie materiálu v zakalenom stave. Jedná sa o tvrdé obrábanie a teda sú kladené vysoké nároky na životnosť rezného nástroja a tuhosť celej sústavy ako je uvedené v podkapitole 1.1 Tvrdé obrábanie. Komplikácie vytvárajú aj fázové premeny a s nimi spojené objemové zmeny ako je uvedené v podkapitole 1.3 Problematika zvyškového pnutia.

Takéto guľčkové skrutky vyrába napríklad aj spoločnosť KSK Precise Motion, a.s. sídliaca v meste Kuřim.

### 1.5 Okružovacie frézovanie

Obečné frézovanie je metóda obrábania, pri ktorej je materiál odoberaný rotujúcim nástrojom s viacerými zubmi. Hlavný rezný pohyb vykonáva nástroj, zatiaľ čo posuv vykonáva obrobok. Za všeobecné výhody frézovania sa považujú:

- tvorba krátkych triesok,
- možnosť obrábania malých aj veľkorozmerových súčiastok,
- možnosť výroby nerotačných symetrických súčiastok,
- nie je potrebné využitie reznej kvapaliny [1].

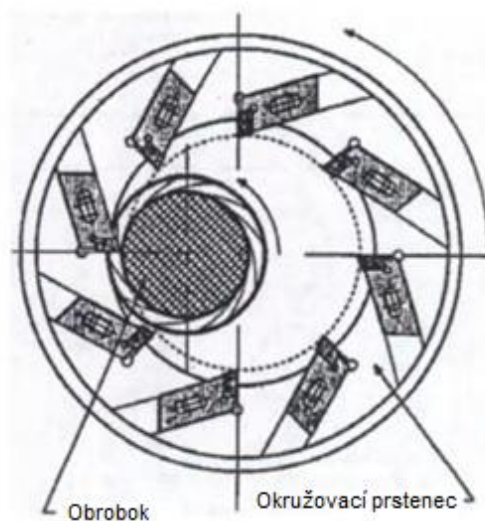
Mnohé súčiastky, ako napríklad vyššie spomenuté guľčkové skrutky, vyžadujú vyrezávanie vnútorných, či vonkajších závitov, ktoré môžu byť zhotovené rôznymi obrábacími operáciami. Medzi najrozšírenejšie spôsoby výroby patrí vyrezávanie vnútorných závitov závitníkmi v dopredu vyvrtanej diere, rezanie vonkajších závitov závitovými čeľuťami, ale aj vonkajšie a vnútorné okružovacie frézovanie.

Okružovací pohyb odstraňuje materiál podobným spôsobom ako pri frézovaní závitov. Tento proces využíva špeciálnu frézovaciu hlavicu, v ktorej sú umiestnené frézovacie nástroje ako je znázornené na obr. 9. Okružovacia hlava je pripevnená na nástrojové vreteno, ktoré buď rotuje vysokou rýchlosťou výstredníkovým pohybom okolo pomaly rotujúcej súčasti, alebo vytvára planétový pohyb okolo nepohyblivého obrobku.



Obr. 9 Zariadenie na vonkajšie okružovacie frézovanie firmy Sandvik Coromant [20].

Rezné doštičky sú samostatne upevnené na vnútornej alebo vonkajšej strane po obvode vonkajšieho alebo vnútorného závitorezného prstenca. Rezanie nastane keď je prstenec hlavice s reznými doštičkami mimo stredu, rešpektujúc obrábaný dielec tak, aby rezné hrany doštičiek prechádzali pätnou kružnicou závitú ako je zobrazené na obr. 10 [21]. Každá rezná hrana odstráni malý kúsok materiálu pri jej obmedzenom kontakte s polotovarom a tým sa obvykle vytvárajú malé triesky, ktoré sa dajú jednoducho odstrániť z oblasti rezu [22].



Obr. 10 Zostava vonkajšieho okružovacieho prstenca s ôsmimi reznými doštičkami [21].

Tento proces je rýchlejší ako frézovanie závitov, môže zanechať vyššiu kvalitu povrchu, menšie triesky a zminimalizovať chybu v stúpaní závitov (tzv. lead error). Okružovacie frézovanie je úspešne používané namiesto sústruženia alebo brúsenia pri obrábaní tvrdých materiálov. Najčastejšie sa využíva na výrobu šrúbov a šnekov. Tento spôsob je taktiež preferovaný na rezanie dlhých závitov, alebo závitov s vysokým uhlom stúpania skrutkovice [21].

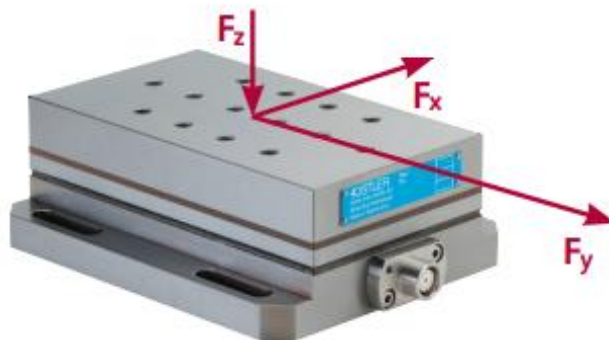
Vymeniteľné rezné doštičky vyrába napríklad firma Sandvik Coromant pre závitorezné okružovacie frézy CoroMill® 325, ktorých základný materiál je kubický niktريد bóru (KBN) s PVD-AlTiN povlakom [20], ktorý sa vyznačuje vysokou tvrdosťou v kombinácii s vysokou odolnosťou voči oxidácii, čo prispieva k celkovému zvýšeniu odolnosti voči opotrebeniu [23]. Vymeniteľné rezné doštičky dodávajú napríklad aj firmy GenSwiss, Carmex, Dieterle, Sumitomo a Rimke. Ich cena sa môže pohybovať okolo hodnoty 200 € za kus.

## 2 NÁVRH EXPERIMENTU

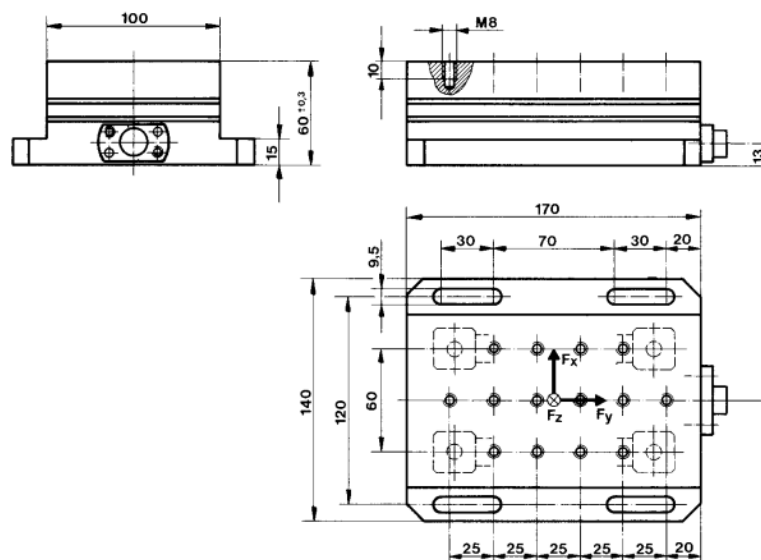
Návrh experimentálnej časti bakalárskej práce bude spočívať v zaznamenávaní a porovnávaní rezných síl pôsobiacich na sústružený, zakalený tyčový polotovár (Príloha 1) s priemerom 63 mm, z materiálu 42CrMo4, zakaleného do hĺbky 10 % priemeru polotovaru s cieľom nájsť optimálne podmienky obrábania.

### 2.1 Použité prístroje a pomôcky

Na zaznamenanie síl pri obrábaní materiálu s vysokou tvrdosťou sa použije nepohyblivý dynamometer typu 9257B od firmy Kistler, ktorého zobrazenie je na obr. 11 a jeho rozmery na obr. 12. Zaznamenáva tri ortogonálne silové zložky ako je vidno na obr. 11. Taktiež má dobrú tuhosť takže dokáže zaznamenať aj malé zmeny v meraných silách. Technické údaje sú uvedené v tabuľke 2.1 a zapojenie je na obr. 13.



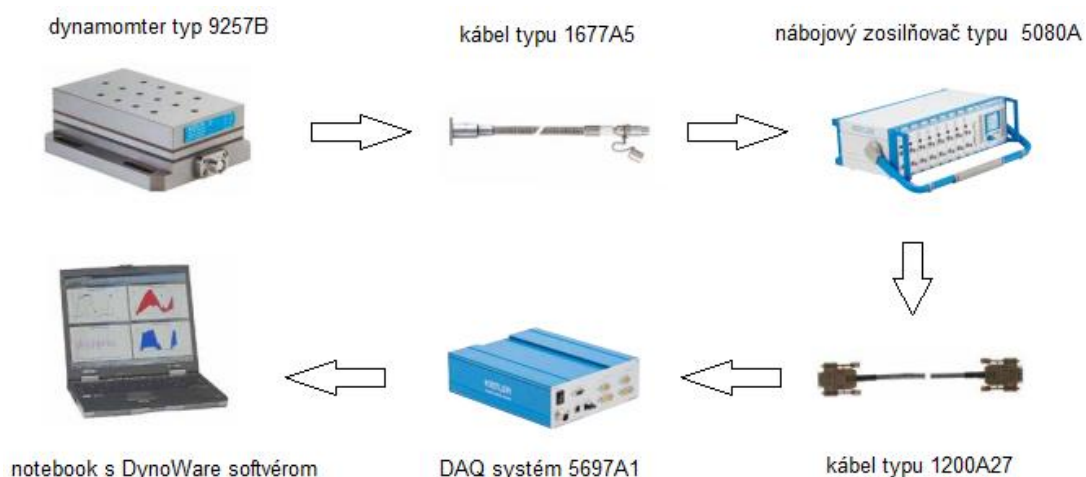
Obr 11. Dynamometer typu 9257B od firmy Kistler [24].



Obr. 12 Rozmery dynamometru typu 9257B od firmy Kistler [25].

Tabuľka 2.1 Technické údaje dynamometru 9257B [24].

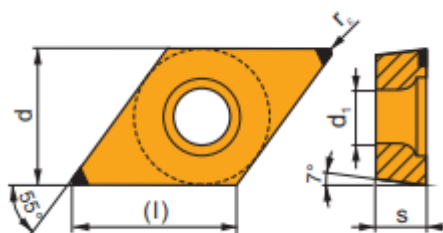
Technologický údaj		Hodnota	Jednotka
Rozsah merania	$F_x, F_y$	$\pm 5$	kN
	$F_z$	-5-10	kN
Kalibrovaný rozsah merania	$F_x, F_y$	0-5	kN
	$F_z$	0-10	kN
Citlivosť	$F_x, F_y$	$\approx -7,5$	pC/N
	$F_z$	$\approx -3,7$	pC/N
Frekvencia	$f_n(x), f_n(y)$	$\approx 2,3$	kHz
	$f_n(z)$	$\approx 3,5$	kHz
Smer predpínania		vertikálny	
Teplotný rozsah procesu		0-70	°C
Hmotnosť		7,3	kg



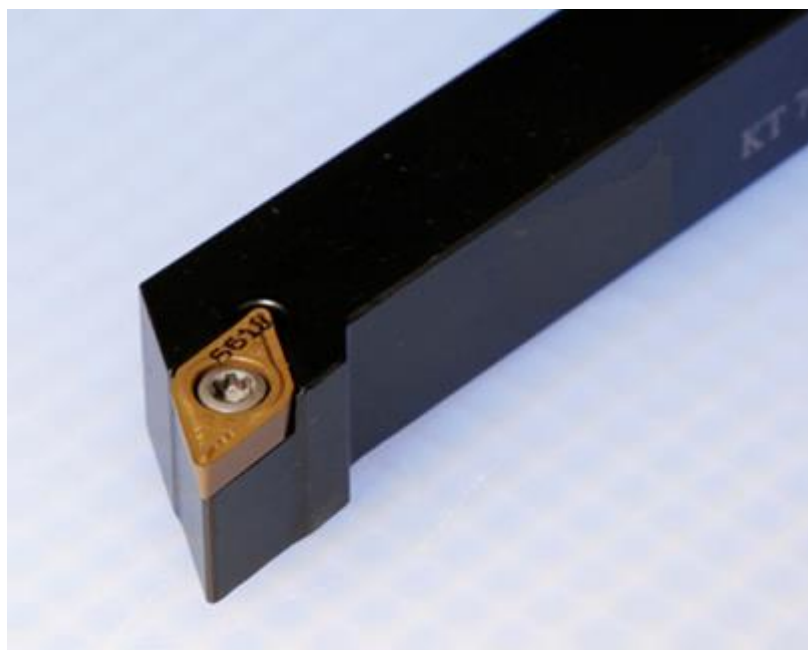
Obr. 13 Spôsob zapojenia sústavy pre zber dát z dynamometru podľa [25].

## 2.2 Použité stroje a nástroje

Na sústruženie bude použitá vymeniteľná rezná doštička (VRD) DCGW 11T304S01020B:TB310 od spoločnosti Dormer Pramet® zobrazená na obr. 14 spolu s jej geometriou, kde sú parametre  $d = 9,525$  mm,  $d_1 = 4,5$  mm,  $l = 11,6$  mm,  $s = 3,97$  mm a  $r_\varepsilon = 0,4$  mm. Jej materiál je kubický nitrid bóru TB310. Bude upevnená v noži ISO SDJCR 2525 M 11, uvedenom na obr. 15, taktiež od spoločnosti Dormer Pramet®.



Obr. 14 Rezná doštička DCGW 11T304S01020B od spoločnosti Dormer Pramet® [26].



Obr.15 Nůž ISO SDJCR 2525 M 11 od spoločnosti Dormer Pramet® podľa [27].

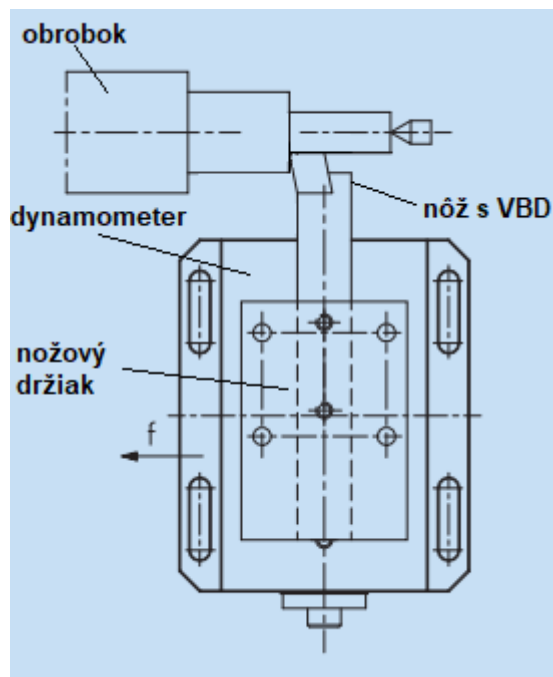
Bude použitý hrotový sústruh SV18R/1000 (obr. 16), ktorého otáčky vretena sa pohybujú v rozmedzí od 14 do 2800  $\text{min}^{-1}$  a výkon hlavného motora je 6 kW [28]. Jeho bližšie špecifikácie sú v Prílohe 2.



Obr. 16 Hrotový sústruh SV18R/1000 [29].

### 2.3 Priebeh experimentu

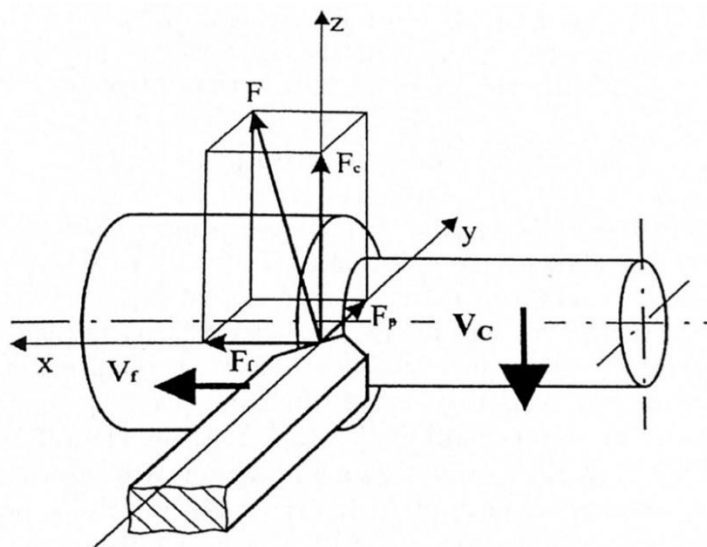
Dynamometer bude zachytený pomocou skrutiek namiesto nožového suportu na sústruhu. Nožový držiak je uchytený v prípravku, pevne ustavenom na dynamometri. Schéma je na obr. 16.



Obr. 16 Schéma ustavenia dynamometru podľa [30].

Hodnoty nameraných zložiek reznej sily indikujú ako sa utvára trieska, trvanlivosť nástroja, kvalitu povrchu, nerovnováhu sústavy, prerušené rezy, pôsobenie vonkajších síl atď. Experiment prebehne za účelom získania poznatkov o správaní a obrobitelnosti dvoch druhov materiálu a následnej optimalizácie rezných podmienok pre navýšenie životnosti rezných nástrojov.

Počas pozdĺžneho sústruženia budú priamo merané zložky reznej sily  $F$  a to tangenciálna zložka reznej sily  $F_c$ , posuvová zložka sily  $F_f$ , a pasívna zložka sily  $F_p$ , ktorých pôsobenie počas pozdĺžneho sústruženia je znázornené na obr. 17. Prebiehať bude 9 meraní na troch tyčiach ktorých špecifikácie sú uvedené v tabuľkách 2.3, 2.4 a 2.5 všetky bez využitia procesnej kvapaliny a technologické postupy spolu s jednotkovými strojnými časmi sú v Prílohe 3.



Obr. 17 Silový rozklad pri pozdĺžnom obrábaní [1].

Pri tvrdom sústružení je najväčšou zložkou reznej sily jej pasívna zložka  $F_p$ . To je spôsobené vysokým brusným účinkom kalených materiálov na chrbtovej ploche nástroja. Nárast  $F_p$  je potom v porovnaní s  $F_c$  oveľa vyšší v súvislosti s opotrebením nástroja [31]. Hraničné rezné parametre VRD DCGW 11T304S01020B:TB310 sú v tabuľke 2.2.

Tabuľka 2.2 Hraničné rezné podmienky DCGW 11T304S01020B:TB310 [26].

Rezné parametre	min	max
Šírka záberu hlavného ostria $a_p$ [mm]	0,1	3,0
Posuv na otáčku $f$ [mm]	0,02	0,2
Rezná rýchlosť $v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	144	252

Tabuľka 2.3 Rezné podmienky meraní na prvej tyči z materiálu 42CrMo4.

	1. meranie	2. meranie	3. meranie
Obrábaný materiál	42CrMo4		
Povrchovo kalené na	59±1 HRC		
Hĺbka rezu $a_p$ [mm]	0,5		
Posuv na otáčku $f$ [mm]	0,06		
Rezná rýchlosť $v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	144	198	252

Tabuľka 2.4 Rezné podmienky meraní na druhej tyči z materiálu 42CrMo4.

	4. meranie	5. meranie	6. meranie
Obrábaný materiál	42CrMo4		
Povrchovo kalené na	59±1 HRC		
Hĺbka rezu $a_p$ [mm]	0,5		
Posuv na otáčku $f$ [mm]	0,02	0,1	0,2
Rezná rýchlosť $v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	198		

Tabuľka 2.5 Rezné podmienky meraní na tretej tyči z materiálu 42CrMo4.

	7. meranie	8. meranie	9. meranie
Obrábaný materiál	42CrMo4		
Povrchovo kalené na	59±1 HRC		
Hĺbka rezu $a_p$ [mm]	1,0	2,0	3,0
Posuv na otáčku $f$ [mm]	0,06		
Rezná rýchlosť $v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	198		

Zo zvolených rezných parametrov je možné ďalej počítať teoretické hodnoty. Potrebné otáčky vretena sa vypočítajú zo vzorca:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_m} \quad (2)$$

Pre reznú rýchlosť 144 m.min<sup>-1</sup> pri pozdĺžnom sústružení tyče s priemerom 63 mm sú teda otáčky vretena  $n_1$ :

$$n_1 = \frac{144 \cdot 1000}{\pi \cdot 63}$$

$$n_1 = 728 \text{ min}^{-1}$$

Pre reznú rýchlosť 198 m.min<sup>-1</sup> pri pozdĺžnom sústružení tyče s priemerom 63 mm sú teda otáčky vretena  $n_2$ :

$$n_2 = \frac{198 \cdot 1000}{\pi \cdot 63}$$

$$n_2 = 1\,000 \text{ min}^{-1}$$

Pre reznú rýchlosť 252 m.min<sup>-1</sup> pri pozdĺžnom sústružení tyče s priemerom 63 mm sú teda otáčky vretena  $n_3$ :

$$n_3 = \frac{252 \cdot 1000}{\pi \cdot 63}$$

$$n_3 = 1\,273 \text{ min}^{-1}$$

Užitočný výkon motora sústruhu sa vypočíta podľa vzťahu:

$$P_c = \frac{v_c \cdot a_p \cdot f_n \cdot k_c}{60 \cdot 10^3} \quad (3)$$

Vypočítaný je s pomocou Kalkulátora rezných rýchlostí od spoločnosti Sandvik Coromant [32]. Hodnoty užitočných výkonov sa môžu ďalej využiť na výpočet merného rezného odporu  $k_c$  a to vyjadrením zo vzťahu:

$$k_c = \frac{P_c \cdot 60 \cdot 10^3}{v_c \cdot a_p \cdot f_n} \quad (4)$$

Z merného rezného odporu sa dá ďalej vypočítať teoretická tangenciálna zložka reznej sily  $F_c$  [1]:

$$F_c = k_c \cdot f_n \cdot a_p \quad (5)$$

Teoretické hodnoty užitočných výkonov, merného rezného odporu  $k_c$  a tangenciálnej zložky reznej sily  $F_c$  sú v tabuľke 2.6.

Tabuľka 2.6 Vypočítané teoretické hodnoty.

Číslo merania	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_c$ [kW]	1,03	1,41	1,8	0,765	1,87	2,76	2,62	5,01	7,33
$k_c$ [MPa]	14 305	14 242	14 285	23 182	11 333	8 363	13 232	12 651	12 340
$F_c$ [N]	429	427,3	428,5	231,8	566	836,3	793,94	1 518	2 221

Posledné meranie nebude vzhľadom k výkonu motora sústruhu SV18R 6kW možné. Po uskutočnení meraní budú reálne a teoretické hodnoty porovnané a zhodnotené.

### 3 EKONOMICKÉ HĽADISKO OBRÁBANIA KALENÝCH MATERIÁLOV

Tvrde obrábanie vytvára možnosti skrátenia technologických časov prostredníctvom nahradenia niektorých operácií ako napríklad brúsenie ale aj vďaka flexibilitě nástrojov. Často stačí jeden nástroj na opracovanie rôznych vonkajších, či vnútorných povrchov čím sa časové náklady na výrobu redukovujú.

V procese tvrdého obrábania nie je potrebné využitie procesných kvapalín. Výrobca teda môže ušetriť na nákladoch na ich nákup, skladovanie, filtrovanie, recyklovanie a likvidovanie. Možnosť nevyužitia reznej kvapaliny navyše prináša ekologický prínos. Napríklad počas brúsenia, sa do reznej kvapaliny dostávajú čiastočky z brúsneho kotúča, triesky a materiál filtra. Tento odpad musí byť odstránený za špeciálnych podmienok. Na rozdiel od tvrdého obrábania, kedy vďaka suchému procesu vzniká nekontaminovaný odpadový materiál, ktorý môže byť ľahko recyklovaný [1].

V súvislosti s tvrdým obrábaním sú ale kladené vysoké nároky na stroje aj nástroje a s tým spojené investície.

#### 3.1 Stroje

K dosiahnutiu požadovanej presnosti zušľachtených obrobkov je potrebné využitie vysoko tuhých strojov, aby prípadná nestabilita sústavy nezmenila polohy reznej hrany a tým znížila presnosť výroby. Na dosiahnutie vyššej tuhosti stroja sa dá využiť napríklad kombinácia guľkových ložísk a nerotujúceho hydrostatického ložiska v prednej časti vretenového systému [33]. Okrem dodatočných úprav pre vylepšenie tuhosti sústavy, je možné priamo využiť stroj určený na obrábanie tvrdého materiálu so špeciálnou konštrukciou. Príkladom takéhoto stroja je CNC sústruh Hembrug Mikroturm 500 XL na obr. 18. Ceny takýchto strojov môžu dosahovať až 250 000 €.



Obr. 18 CNC sústruh Hembrug Mikroturm 500 XL [19]

### 3.2 Nástroje

Rezné nástroje by mali zniest vysoké mechanické a tepelné zaťaženie. Všeobecne sa volia nástroje zo spékaného karbidu s TiN + TiC povlakovaním do tvrdosti maximálne 58 HRC, kubický nitrid bóru (KNB) a zmesná keramika Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiC.

Nástroje z KNB dosahujú najväčšiu trvanlivosť a v porovnaní s keramickými nástrojmi majú širšiu oblasť využitia. Sú vhodné aj na kvázi prerušované a prerušované rezy, umožňujú aplikovať vyššie rezné rýchlosti a tým dosahujú vyššie rýchlosti úberu materiálu [1]. Vysoká kvalita rezného materiálu sa odzrkadľuje aj na jeho cene. Príklady porovnania cien vybraných VRD a nožov od firmy Dormer Pramet® a Sandvik Coromant sú v tabuľke 3.1.

Tabuľka 3.1 Katalógové ceny vybraných VRD a nožov [34; 35].

Dodávateľ Dormer Pramet®	Kód	Katalógová cena v €	Dodávateľ Sandvik Coromant	Kód	Katalógová cena v €
VRD	DCGW 11T304S01020B	<b>52</b>	VRD	DCGW 11T304S01020F 7125	<b>59,1</b>
Nôž	SDJCR 2525 M 11	<b>82</b>	Nôž	SDJCR 2525M 11	<b>x</b>
VRD	VNGA 160408S01020B	<b>52</b>	VRD	VNGA 160408S01030A	<b>127</b>
Nôž	DVJNR 2525 M 16	<b>91,3</b>	Nôž	DVJNR 2525 M 16	<b>111</b>
VRD	WNGA 080408S01020C	<b>76,5</b>	VRD	WNGA 080404S01030A	<b>166</b>
Nôž	DWLNR 2525 M 08	<b>76,1</b>	Nôž	DWLNR 2525M 08	<b>92</b>
Nôž	MWLNR 2525 M 08	<b>76,1</b>	Nôž	MWLNR 2525 M 08	<b>92</b>
VRD	CCGW 09T304S01020B	<b>52</b>	VRD	CCGW 09T304S01020F 7025	<b>61,8</b>
Nôž	SCACR 1616 H 09	<b>70</b>	Nôž	SCACR 1616 K 09-S	<b>84,7</b>
VRD	TNGA 160408S01020C: TB310	<b>76</b>	VRD	TNGA 160408S01530F 7135	<b>79,8</b>

Nôž	MTJNR 2525 M 16	<b>76,4</b>	Nôž	MTJNR 2525 M 16	<b>x</b>
VRD	CNGA 120408S01020B: TB310	<b>52,5</b>	VRD	CNGA 120408S01018A 7025	<b>127</b>
Nôž	PCLNL 2525 M 12	<b>76,4</b>	Nôž	PCLNL 2525 M12	<b>92</b>
Nôž	DCBNR 2020 K 12	<b>72,5</b>	Nôž	DCBNR 2020 K 12	<b>87,20</b>

Pri procese tvrdého obrábania, bez využitia reznej kvapaliny, je potrebné myslieť na možnú zníženú životnosť nástrojov pôsobením vyššieho trenia a teda aj tepla v mieste kontaktu nástroja a obrobku. Okrem toho životnosť nástroja môže byť znížená aj vysokým zaťažením, ktoré je potrebné k opracovaniu zakaleného polotovaru.

Na druhej strane, medzi výhody výroby tvrdým obrábaním patrí aj vhodnosť pre automatizovanú výrobu. Výroba je teda pružnejšia, dá sa obrábať na jednom stroji a redukujú sa mzdové náklady na zamestnancov. Flexibilnejšia a inovatívna výroba zvyšuje konkurencieschopnosť firiem na trhu a prináša nové zákazky.

## ZÁVER

Predmetom bakalárskej práce na tému obrábanie súčastí v kalenom stave bol teoretický rozbor problematiky a návrh experimentálneho merania pre laboratórny záznam silového zaťaženia. Teoretický rozbor bol zameraný na aspekty tvrdého obrábania, rozboru ocelí 42CrMo4, 42CrMoS4 a 50CrMo4 a vnútorných pnutí po kalení a po obrábaní zakalených polotovarov. Spomenuté boli taktiež guľčkové skrutky, produkty tvrdého obrábania kalených materiálov a okružovacie frézovanie, jeden zo spôsobov obrábania závitov kalených súčiastok. Experiment bol navrhnutý, ale jeho realizácia sa nestihla takže jeho výsledky nie je možné vyhodnotiť. Pre každé meranie boli však vypočítané teoretické hodnoty užitočného výkonu motora  $P_c$  spolu s tangenciálnou zložkou reznej sily  $F_c$ .

Medzi hlavné výstupy tejto práce sa zaraďuje:

- návrh experimentu pre optimalizáciu rezných podmienok pri pozdĺžnom sústružení zakalenej ocele 42CrMo4,
- spočítaný výkon podľa zvolených rezných podmienok meraní,
- s reznými podmienkami  $a_p = 3$  mm,  $f = 0,06$  mm a  $v_c = 198$  m.min<sup>-1</sup> nie je možné na hrotovom sústruhu SV18R/1000 sústružiť kvôli presiahnutiu výkonu motora 6 kW a to užitočným výkonom  $P_c = 7,33$  kW,
- najnižší výkon bol vypočítaný pri rezných podmienkach  $a_p = 0,5$  mm,  $f = 0,05$  mm a  $v_c = 198$  m.min<sup>-1</sup> a to  $P_c = 0,765$  kW,
- výpočet teoretických hodnôt tangenciálnej zložky reznej sily  $F_c$ ,
- najvyššia hodnota  $F_c$  bola vypočítaná pri rezných podmienkach  $a_p = 3$  mm,  $f = 0,06$  mm a  $v_c = 198$  m.min<sup>-1</sup> a to  $F_c = 2\,221$  N,
- najnižšia hodnota  $F_c$  bola vypočítaná pri rezných  $a_p = 0,5$  mm,  $f = 0,05$  mm a  $v_c = 198$  m.min<sup>-1</sup> a to  $F_c = 231,8$  N.

**ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV**

- [1] NESLUŠAN, Miroslav. *Sústruženie kalených ocelí*. Žilina: Edis, 2009. ISBN 978-80-554-104-1.
- [2] DAVIM, J. *Paulo, ed. Machining of Hard Materials*. Springer, 2011. ISBN 978-1-84996-449-4.
- [3] NESLUŠAN, Miroslav. *VYBRANÉ ASPEKTY PRESNOSTI OBROBKOV PRI TVRDOM SÚSTRUŽENÍ*. Žilina, 2009. Článok. Žilinská univerzita.
- [4] DAVIM, J. *Paulo, ed. Surface Integrity in Machining*. London: Springer, 2010. ISBN 978-1-84882-873-5.
- [5] TOTTEN, George, C.E. *BATES a N.A. CLINTON. Handbook of Quenchants and Quenching Technology*. 3rd printing. United States of America: ASM International, 1995. ISBN 0-87170-448-X.
- [6] LIŠČÍČ, Božidar, *Hans TENSI, Laurelice CANALE a George TOTTEN, ed. Quenching Theory and Technology*. 2nd edition. United States of America: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. ISBN 978-0-8493-9279-5.
- [7] ĎÁSEK, Josef. *Zápustky a jejich tepelné zpracování*. 1. vyd. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1966. ISBN 04-233-66.
- [8] EDENS, Michael. *Understanding Quenchants and Their Effects*. Industrial Heating [online]. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.industrialheating.com/articles/86778-understanding-quenchants-and-their-effects>
- [9] Kalenie. Encyklopaedia Beliana [online]. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://beliana.sav.sk/heslo/kalenie>
- [10] Materialovy list 1.7225. *Bogner Edelstahl Czech Republic s.r.o.* [online]. Olomouc: Bogner Edelstahl Czech Republic s.r.o., 2016 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: [https://www.bogner.cz/files/files/Materialovy\\_list\\_1.7225.pdf](https://www.bogner.cz/files/files/Materialovy_list_1.7225.pdf)
- [11] EFFECT OF CHEMICAL *ELEMENTS IN STEEL*. STI/SPFA [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.steeltank.com/Products/PressureVessels/EffectofChemicalElementsinSteel/tabid/916/Default.aspx>
- [12] 50CrMo4. Ovako: *Steel Navigator [online]*. Stockholm: Ovako, 2021 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/50crmo4/>
- [13] 50CRMO4, 1.7228 - *ALLOY STEEL: CHROMIUM-MOLYBDENUM MACHINE CONSTRUCTION STEEL 50CRMO4/1.7228 FOR THERMAL IMPROVEMENT IN ACCORDANCE WITH EN 10083-1*. Virgament [online]. Koło: Virgament, 2021 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://virgament.com/50crmo4-48crmo4-50cd4-aisi-4150-1-7228-alloy-steel>
- [14] Material specification sheet: *Saarstahl - 50CrMo4*. Saerstahl [online]. Völklingen: saerstahl, 2021 [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.saerstahl.de/sag/en/general/search/?q=50CrMo4>
- [15] Kuličkové šrouby: *Technické informace. KSK precise motion [online]*. Kuřim: KULIČKOVÉ ŠROUBY KUŘIM, a.s., 2014 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20141023163624/http://www.ks-kurim.cz/kulickove-srouby/technicke-informace/>

- [16] ŠNEVAJS, Matěj. *Tepelné zpracování ocelí pro ozubená kola*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Vít Jan.
- [17] MAZANCOVÁ, Eva. *Technické materiály I: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2577-9.
- [18] How do Ball Screws work?. *Heason: Technology Ltd* [online]. 2020 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.heason.com/news-media/technical-blog-archive/how-do-ball-screws-work->
- [19] NEŠPOR, Vít. *Technologie tvrdého obrábění při výrobě kuličkových šroubů*. Engineering [online]. 2016, , 1 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/strojarnstvo-extra/3843-technologie-tvrdeho-obrabeni-pri-vyrobe-kulickovych-sroubu>
- [20] Thread whirling. In: *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/threading/thread-whirling/pages/default.aspx>
- [21] STEPHENSON, David a John AGAPIOU. *Metal Cutting Theory and Practice*. 2nd edition. United States of America: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 0-8247-5888-9.
- [22] DAVIM, J. Paulo, ed. *Modern machining technology: A practical guide*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. ISBN 978-0-85709-099-7.
- [23] Nástrojové materiály. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
- [24] Brochure, Cutting Force *Measurement*. *KISTLER* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/sensor-technology/cutting-force/960-002e-05.14.pdf>
- [25] Multicomponent Dynamometer. *KISTLER: measure. analyze. innovate.* [online]. [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/files/document/000-151e.pdf?callee=frontend>
- [26] Indexable Tool Catalog - 7939451. *Dormer Pramet* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: [https://www.dormerpramet.com/downloads/pramet\\_inch\\_en-es-fr.pdf](https://www.dormerpramet.com/downloads/pramet_inch_en-es-fr.pdf)
- [27] STFC-Ext. *Dormer Pramet* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <http://ecat.pramet.com/tool.aspx>
- [28] Stroje/ #9865 [online]. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <http://strojesvoboda.cz/katalog.php?page=DETAIL&katalog=Stroje&key=&id=9865&ids=9883&o=1>
- [29] SOUSTRUH HROTOVÝ SV18RA/1000 [online]. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://repoz.cz/soustruh-hrotovy-sv18ra-1000>
- [30] Brochure, Cutting Force, *Cutting Force Measurement*. *KISTLER* [online]. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.m3.tuc.gr/EQUIPMENT/MIKRODYNAMOMETRO/cutting%20force%20measurement.pdf>
- [31] NAKAYAMA, Kazuo, Minoru ARAI a Torahiko KANDA. *Machining Characteristics of Hard Materials*. CIRP Annals. 1988, , 89-92. ISSN 0007-8506.

- [32] Kalkulátor řezné rychlosti. *Sandvik Coromant [online]*. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/toolguide.aspx>
- [33] ŠKŮCI, Michal. *AKTIVNÍ ŘÍZENÍ TLUMENÍ KMITÁNÍ / SAMOBUZENÉHO KMITÁNÍ JEDNOTEK VŘETEN OBRÁBĚCÍCH STROJŮ*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brne.
- [34] Pramet. Dormer Pramet *[online]*. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.shop.pramet.com/webapp/wcs/stores/servlet/TopCategoriesDisplay?langId=10&storeId=11301&catalogId=10102>
- [35] Sandvik Coromant. *Sandvik Coromant [online]*. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/pages/default.aspx>

**ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK**

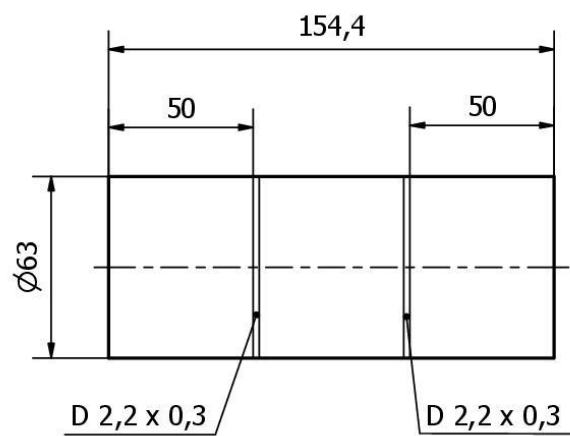
Skratka	Popis
<b>HRC</b>	tvrdosť podľa Rockwella
<b>KNB</b>	kubický nitrid bóru
<b>PCBN</b>	polykryštalický kubický nitrid bóru
<b>PCD</b>	polykryštalický diamant
<b>PVD</b>	Physical Vapour Deposition
<b>VRD</b>	vymeniteľná rezná doštička

Symbol	Jednotka	Popis
$A_{min}$	[%]	minimálna ťažnosť
$a_p$	[mm]	hlbka rezu
$D_m$	[mm]	obrábaný priemer
$F$	[N]	rezná sila
$F_c$	[N]	tangenciálna zložka reznej sily
$F_f$	[N]	posuvová zložka reznej sily
$F_p$	[N]	pasívna zložka reznej sily
$f$	[mm]	posuv na otáčku
$l$	[mm]	dĺžka vyloženia nástroja
$\Delta l$	[mm]	teplotná deformácia nástroja
$k_c$	[MPa]	merný rezný odpor
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky
$P_c$	[kW]	užitočný výkon motora
<b>Re min.</b>	[MPa]	minimálna medza sklzu
<b>Rm</b>	[MPa]	medza pevnosti
$r_\varepsilon$	[mm]	polomer hrotu
$v_c$	[m.min <sup>-1</sup> ]	rezná rýchlosť
$Z_{min}$	[%]	minimálna kontrakcia
$\alpha$	[°C <sup>-1</sup> ]	koeficient lineárnej teplotnej roztťažnosti
$\theta$	[°C]	stredná teplota nástroja
$\theta_0$	[°C]	teplota okolia

**ZOZNAM PRÍLOH**

- Príloha 1      Výkres tyče pre experiment.  
Príloha 2      Charakteristiky hrotového sústruhu SV18R/100.  
Príloha 3      Technologické postupy pre navrhnutý experiment.

# PRÍLOHA 1



Drsnost povrchu Ra 3,2	Hrany $-0,3$ $+0,3$	Měřítko <b>1:1</b>	Přesnost ISO 2768-mH Promítání $\rightarrow$ Sestava
Materiál 15 142.8	Polotovár ø63 - 155 ČSN EN 15 142.8	Hmotnosť 3,78 kg	Chráněno podle ISO 16016
	Druh dokumentu VÝKRES SOUČÁSTI Kreslil SOFIA HEISEROVÁ Schválil Datum vydání 18.05.2021	Název <h2>SÚČASŤ - BP</h2> Číslo dokumentu <h2>BP - 2021</h2>	
			List 1/1

## PRÍLOHA 2

Charakteristiky hrotového sústruhu SV18R/100

Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Obežný priemer nad lôžkom	380	mm
Vzdialenosť hrotov	1 000	mm
Dĺžka sústruženého kužeľa max.	350	mm
Obežný priemer nad suportom	215	mm
Vrtanie vretena	40	mm
Šírka lôžka	340	mm
Priemer skľučovadla	165	mm
Priemer lícnej dosky	320	mm
Priemer unášacieho kotúča	220	mm
Otáčky vretena 21 stupňov v rozsahu	14–2 800	min <sup>-1</sup>
Posuvy v pozdĺžnom rozsahu	0,02–5,6	mm
Posuvy v priečnom rozsahu	0,01–2,8	mm
Počet otáčok elektromotoru	2 800	min <sup>-1</sup>
Výkon elektromotoru	6	kW
Pôdorysná plocha stroja: šírka x dĺžka	950 x 2 720	mm
Váha stroja s normálnym príslušenstvom	1 780	kg
Kužeľ vo vretene	metrický 50	
Kužeľ hrotu	MORSE 3	

VUT FSÚ ST BRNO		TECHNOLOGICKÝ POSTUP		Název súčasti: SUČAST - BP		Číslo výkresu súčasti: BP - 2021	
Dátum: 14.5.2021		Výhotovila: Heiserová Sofia		Polotovár: ø63 - 155 ČSN EN 15 142.8		Číslo meranej tyče: 1	
Poradové číslo op.:	Název, označenie stroja, zariadenia, pracoviska:	Dielňa:	Popis práce v operácii:	Výrobné podmienky:			
				$v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	$n$ [min <sup>-1</sup> ] f [mm]	$a_p$ [mm]	l [mm] i
Orientačné:	Triediace číslo :						
0/0	Pásová píla 45967	Delenie huteho materiálu	Rezať materiál Ø63 na dĺžku 155 mm				
1/1		Kontrola	Medzioperačná kontrola dĺžky 155 mm				
2/2	univerzálny hrotový soustruh SV18R/1000 4125	Obrobňa	Uprnúť do skľučovadla za Ø63				
			Sústružiť čelo Ø63 odobrať 0,3 mm	150	758 0,2	0,3 1	0,22
			Sústružiť 2 zápichy, hĺbka 0,3 mm, šírka 2,2 mm	112	568 0,02	0,3 1	0,19
3/3	univerzálny hrotový soustruh SV18R/1000 4125	Obrobňa	Pozdĺžne sústružiť Ø63 v dĺžke 50 mm na Ø60	144	728 0,05	0,5 3	3,43
			Pozdĺžne sústružiť Ø63 v dĺžke 50 mm na Ø60	198	1000 0,05	0,5 3	2,50
			Otočiť a upnúť do skľučovadla za Ø63				
			Sústružiť čelo Ø63 odobrať 0,3 mm	150	758 0,2	0,3 1	0,22
			Pozdĺžne sústružiť Ø63 v dĺžke 50 mm na Ø60	252	1273 0,05	0,5 3	1,96

Technologický postup pre meranie na prvej tyči.

VUT FSI ÚST BRNO		TECHNOLOGICKÝ POSTUP			Název súčasti: SÚČASŤ - BP			Číslo výkresu súčasti: BP - 2021			
Dátum: 14.5.2021		Výhotovila: Heiserová Sofia			Polotovár: Ø63 - 155 ČSN EN 15 142.8			Číslo meranej tyče: 2			
Poradové číslo op.:	Orientačné :	Název, označenie stroja, zariadenia, pracoviska:	Dielňa:	Popis práce v operácii :	$v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	n [min <sup>-1</sup> ]		$a_p$ [mm]	l [mm]		jednotkový strojný čas $t_{as}$ [min]
						f [mm]			i		
0/0		Pásová píla 45967	Delenie huteľného materiálu	Rezať materiál Ø63 na dĺžku 155 mm							
1/1			Kontrola	Medzioperačná kontrola dĺžky 155 mm							
2/2		univerzálny hrotový soustruh SV18R/1000 4125	Obrobňa	Upnúť do skľučovadla za Ø63							
				Sústružiť čelo Ø63 odobrať 0,3 mm	150	758 0,2	0,3	0,3 1	0,22		
				Sústružiť 2 zápichy, hĺbka 0,3 mm, šírka 2,2 mm	112	568 0,02	0,3	2,2 1	0,19		
				Pozdĺžne sústružiť Ø63 v dĺžke 50 mm na Ø60	198	1000 0,02	0,5	50 3	7,50		
3/3		univerzálny hrotový soustruh SV18R/1000 4125	Obrobňa	Pozdĺžne sústružiť Ø63 v dĺžke 50 mm na Ø60	198	1000 0,1	0,5	50 3	1,50		
				Otočiť a upnúť do skľučovadla za Ø63							
				Sústružiť čelo Ø63 odobrať 0,3 mm	150	758 0,2	0,3	0,3 1	0,22		
				Pozdĺžne sústružiť Ø63 v dĺžke 50 mm na Ø60	198	1000 0,2	0,5	50 3	0,75		

Technologický postup pre meranie na druhej tyči.

VUT FSI ÚST BRNO		TECHNOLOGICKÝ POSTUP			Název súčasti: SÚČASŤ - BP		Číslo výkresu súčasti: BP - 2021		
Dátum: 14.5.2021		Výhotovila: Heiserová Sofia			Polotovár: ø63 - 155 ČSN EN 15 142.8		Číslo meranej tyče: 3		
Poradové číslo op.:	Název, označenie stroja, zariadenia, pracoviska:	Dielňa:	Popis práce v operácii :	v <sub>c</sub> [m.min <sup>-1</sup> ]	n [min <sup>-1</sup> ]		a <sub>p</sub> [mm]	l [mm]	jednotkový strojný čas t <sub>as</sub> [min]
					f [mm]	i			
Orientačné :	Triediace číslo :	Výrobné podmienky:							
0/0	Pásová píla 45967	Delenie hutného materiálu	Rezať materiál Ø63 na dĺžku 155 mm						
1/1		Kontrola	Medzioperačná kontrola dĺžky 155 mm						
2/2	univerzálny hrotový soustruh SV18R/1000 4125	Obrobňa	Upnúť do skľučovadla za Ø63						
			Sústružiť čelo Ø63 odobrať 0,3 mm	150	758	0,3	0,3	0,22	
			Sústružiť 2 zápichy, hĺbka 0,3 mm, šírka 2,2 mm	112	568	0,3	2,2	0,19	
3/3	univerzálny hrotový soustruh SV18R/1000 4125	Obrobňa	Pozdĺžne sústružiť Ø63 v dĺžke 50 mm na Ø60	198	1000	1	50	2,50	
			Pozdĺžne sústružiť Ø63 v dĺžke 50 mm na Ø60	198	1000	2	50	2,50	
			Otočiť a upnúť do skľučovadla za Ø63						
			Sústružiť čelo Ø63 odobrať 0,3 mm	150	758	0,3	0,3	0,22	
			Pozdĺžne sústružiť Ø63 v dĺžke 50 mm na Ø60	198	1000	0,5	50	2,50	
					0,06		3		

Technologický postup pre meranie na tretej tyči.