

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie-technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti zvyšování trvanlivosti nástrojů z RO

Autor: **Jiří NĚMEC**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK, Ph. D.**

Akademický rok 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří NĚMEC**  
Osobní číslo: **S10N0055P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**  
Název tématu: **Možnosti zvyšování trvanlivosti nástrojů z RO**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh experimentu a hodnocení
4. Provedení experimentu
5. Technicko-ekonomické zhodnocení
6. Závěry, návrh dalšího řešení

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **50 - 70 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**  
Seznam odborné literatury:

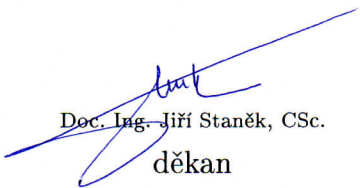
**SOVA, F.:** Technologie obrábění a montáže. Plzeň: ZČU, 1998, ISBN 80-7082-449-2

**HUMÁR, A.:** Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing, 2008, ISBN 978-80-254-2250-2

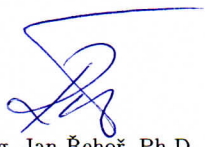
**FAJT, J., ŠTĚPÁNEK, I., BOHÁČ, D. :** Optimalizace povrchových úprav nástrojů, MM Průmyslové spektrum č 12/2010, str. 14-16, MKČR E 7645, ISSN 1212-2572

**STANĚK, J.-NĚMEJC, J.** Metodika zpracování a úprava diplomových prací. Plzeň: ZČU, 2005 ISBN 80-7043-363-9

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Josef Fajt, CSc.**  
PILSEN-TOOLS , s.r.o.  
Ostatní konzultanti: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění  
Datum zadání diplomové práce: **12. října 2011**  
Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



  
Ing. Jan Řehoř, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 12. prosince 2011

## **Garance a vedení diplomové práce**

Vedoucí katedry: Ing. Jan Řehoř, Ph.D. ZČU v Plzni, FST-KTO

Vedoucí oddělení: Ing. Miroslav Zetek, Ph. D. ZČU v Plzni, FST-KTO

Vedoucí diplomové práce: Ing. Miroslav Zetek, Ph. D. ZČU v Plzni, FST-KTO

Konzultant diplomové práce: Ing. Miroslav Zetek, Ph. D. ZČU v Plzni, FST-KTO

Odborný konzultant pro praxi: Ing. Josef Fajt, CSc., PILSEN TOOLS s.r.o.

## **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 vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

**V Plzni dne:** .....

.....  
**Bc. Jiří Němec**

## **Poděkování za pomoc při zpracování diplomové práce**

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomohli při zpracování diplomové práce, za cenné rady a připomínky.

Jmenovitě bych chtěl poděkovat:

vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph. D., ZČU v Plzni,

odbornému konzultantovi Ing. Josefu Fajtovi, CSc., PILSEN TOOLS s.r.o.,

vedoucímu dílen Ing. Josefu Skleničkovi, Ph. D., ZČU v Plzni,

a obsluze frézovacího stroje Jiřímu Tengovi, ZČU v Plzni.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Němec	Jméno Jiří	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2303T004 Strojírenská technologie-technologie obrábění		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, Ph. D.	Jméno Miroslav	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se <b>škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Možnosti zvyšování trvanlivosti nástrojů z RO		

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

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	83	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	61	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	22
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Diplomová práce je zaměřena na zvýšení trvanlivosti nástrojů z RO pomocí kryogenního tepelného zpracování. V práci jsou zmapovány možnosti zvyšování trvanlivosti nástrojů z RO a práce obsahuje experimentální ověření kryogenně tepelně zpracovaných nástrojů z RO. Hlavním cílem této práce je aplikace poznatků získaných ověřovacími experimenty do praxe.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	rychlořezná ocel, trvanlivost nástroje, opotřebení břitu, tepelné zpracování, kryogenní tepelné zpracování

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Němec	<b>Name</b> Jiří
<b>FIELD OF STUDY</b>	2303T004 Machine-industry technology – machining technology	
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Zetek, Ph. D.	<b>Name</b> Miroslav
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b> <span style="float: right;"><b>Delete when not applicable</b></span>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Possibilities of increasing the durability of the tools from HSS	

<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>	83	<b>TEXT PART</b>	61	<b>GRAPHICAL PART</b>	22
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION</b> <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The diploma thesis is focused on increasing the durability of HSS tools using cryogenic treatment. The thesis describes the possibilities of their durability enhancement and it contains an experimental verification of the effects of cryogenic treatment. The main aim of this thesis is to apply the findings of the verification experiments in practice.
<b>KEY WORDS</b>	high speed steel, durability of tool, edge abrasion, heat treatment, cryogenic treatment

## Obsah

1	Úvod .....	9
1.1	Cíle práce .....	9
1.2	Zadávací firma .....	9
2	Rozbor současného stavu .....	11
2.1	Možnosti zvýšení trvanlivosti nástrojů z RO .....	13
2.1.1	Depozice tenkých vrstev .....	13
2.1.2	Úpravy geometrie břitu nástroje .....	14
2.1.3	Tepelné zpracování RO .....	15
2.1.4	Kryogenní tepelné zpracování RO .....	15
2.2	Teoretický rozbor .....	17
2.2.1	Zušlechťování RO .....	17
2.2.2	Otupování břitu nástroje .....	19
2.2.3	Trvanlivost a životnost břitu nástroje .....	23
3	Návrh experimentu a hodnocení .....	25
3.1	Návrh experimentu kryogenně tepelně zpracovaných čelní válcových fréz .....	25
3.1.1	Výběr režimů TZ pro experimentální ověření trvanlivosti válcových fréz .....	27
3.1.2	Volba řezných podmínek experimentu .....	28
3.2	Návrh experimentu kryogenně tepelně zpracovaných soustružnických nožů .....	29
3.2.1	Volba řezných podmínek experimentu .....	30
4	Provedení experimentu .....	31
4.1	Experiment kryogenně tepelně zpracovaných čelní válcových fréz .....	32
4.1.1	Testování válcových fréz z oceli 19 830 .....	34
4.1.2	Testování válcových fréz z oceli 19 852 .....	38
4.1.3	Doplňující zkoušky čelních válcových fréz .....	40
4.2	Experiment kryogenně tepelně zpracovaných soustružnických nožů .....	44
4.2.1	Testování soustružnických nožů z oceli 19 830 .....	46
4.2.2	Testování soustružnických nožů z oceli 19 856 .....	51
4.2.3	Další testování soustružnických nožů .....	52
4.2.4	Problémy při testování soustružnických nožů na soustruhu Masturn 50 .....	55
5	Technicko-ekonomické zhodnocení .....	57
5.1	Porovnání s výsledky nástrojů s deponovanou tenkou vrstvou .....	58
6	Závěry, návrh dalšího řešení .....	60

## Použité zkratky

RO	rychlořezná ocel	
SK	slinutý karbid	
PKBN	polykrystalický nitrid bóru	
PD	polykrystalický diamant	
CVD	chemical vapor deposition; metoda depozice tenkých vrstev	
PACVD	plasma assisted chemical vapor deposition; metoda depozice tenkých vrstev	
MTCVD	medium temperature chemical vapor deposition; metoda depozice tenkých vrstev	
PVD	physical vapor deposition; metoda depozice tenkých vrstev	
S-N-O-P	soustava stroj – nástroj – obrobek – přípravak	
TZ	tepelné zpracování	
NC	numerical control; číslicově řízený	
Ms	martenzit start; teplota zahájení martenzitické přeměny	[°C]
Mf	martenzit finish; teplota ukončení martenzitické přeměny	[°C]
T	teplota	[°C]
Ta	teplota austenitizace	[°C]
Tp	teplota popouštění	[°C]
t	čas	[min]
VB	rozměr opotřebení hřbetu břítu	[mm]
VB <sub>30</sub>	rozměr opotřebení hřbetu břítu po 30 minutách v řezu	[mm]
VB poč	počáteční hodnota opotřebení břítu	[mm]
VB kon	konečná hodnota opotřebení hřbetu břítu	[mm]
ΔVB	přírůstek opotřebení hřbetu břítu	[mm]
VB <sub>B</sub>	rozměr opotřebení hřbetu břítu	[mm]
VB <sub>B max</sub>	maximální rozměr opotřebení hřbetu břítu	[mm]
VB <sub>B krit</sub>	rozměr kritického opotřebení hřbetu břítu	[mm]
VB <sub>C</sub>	rozměr opotřebení hřbetu břítu na špičce nástroje	[mm]
VB <sub>N</sub>	rozměr opotřebení hřbetu břítu v místě kontaktu břítu se zpevněnou vrstvou	[mm]
KT <sub>B</sub>	rozměr hloubky opotřebení čela břítu	[mm]
KB <sub>B</sub>	vzdálenost zadní hrany výmolu od ostří	[mm]
T	trvanlivost břítu	[min]
t <sub>VB</sub>	trvanlivost břítu při dosažení kritériálního opotřebení	[min]
Ž	životnost břítu	[min]
z <sub>o</sub>	počet přeostření břítu	[-1-]
v <sub>c</sub>	řezná rychlost	[m/min]
f	minutový posuv	[mm/min]
f <sub>o</sub>	posuv na otáčku	[mm]
f <sub>z</sub>	posuv na zub	[mm]
n	otáčky	[min <sup>-1</sup> ]
a <sub>p</sub>	šířka řezu	[mm]
a <sub>e</sub>	hloubka řezu	[mm]



## 1 Úvod

Tato práce vznikla na základě dlouhodobé spolupráce se společností PILSEN TOOLS s.r.o., která se zabývá výrobou speciálních nástrojů z rychlořezné oceli, a proto se věnuje problematice zvyšování trvanlivosti nástrojů i při řešení mnohých projektů. Zvýšení trvanlivosti nástrojů má pozitivní vliv na ekonomickou stránku řezného procesu, protože se snižují náklady spojené s nutností přestřovat a vyměňovat používané nástroje. Možností zvyšování trvanlivosti nástrojů z RO je celá řada. V současné době se hojně využívá depozice tenkých vrstev. Dále se s rozvojem v oblasti tepelného zpracování objevila možnost zvyšování trvanlivosti nástrojů z RO pomocí kryogenního tepelného zpracování. Jelikož tato práce navazuje na moji bakalářskou práci, která se věnovala vlivu technologických a procesních parametrů deponovaných tenkých vrstev na nástroje z rychlořezné oceli. Proto byla tato práce více zaměřena na kryogenní tepelné zpracování RO a přínos tohoto tepelného zpracování ke zvyšování trvanlivosti nástrojů. Přínosy ke zvýšení trvanlivosti nástrojů byly stanovovány na základě experimentů, které jsou popsány v této práci.

### 1.1 Cíle práce

V této práci bylo cílem především zmapování možností zvyšování trvanlivosti nástrojů z rychlořezné oceli s důrazem na nové možnosti v oblasti tepelného zpracování. S rozvojem vakuových pecí pro tepelné zpracování se objevily nové možnosti kryogenního tepelného zpracování. Proto bylo dalším cílem experimentální ověření trvanlivosti kryogenně zpracovaných nástrojů z rychlořezné oceli. Dalším z cílů bylo porovnání výsledků experimentů nástrojů s deponovanou tenkou vrstvou z předcházející bakalářské práce s výsledky experimentů kryogenně zpracovaných nástrojů a zhodnocení přínosů daných metod zvyšování trvanlivosti břitů pro aplikaci nově nabytých poznatků v praxi při výrobě nástrojů z RO. V neposlední řadě bylo cílem v práci využít nabyté znalosti a zkušenosti, získané během studia, praktických stáží a brigád.

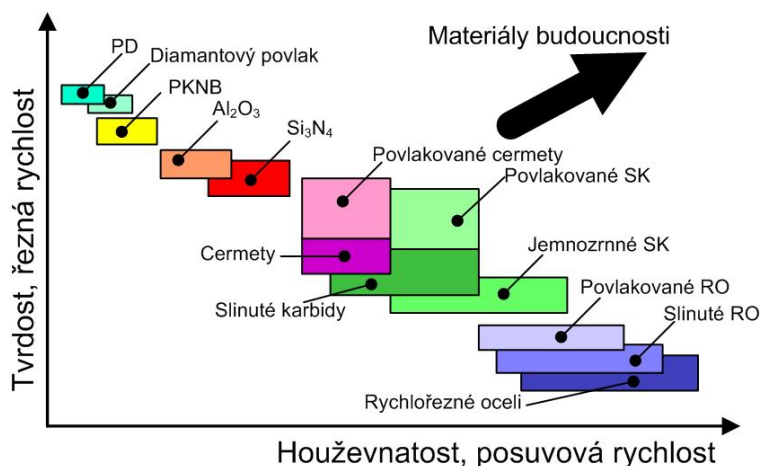
### 1.2 Zadávající firma

Společnost PILSEN TOOLS s.r.o. sídlí v hlavním areálu Škodových závodů v Plzni a působí na trhu řadu let. Vznikla v roce 1999 pod názvem ŠKO-TOOLS s.r.o. odkoupením aktivit a převzetím zaměstnanců bývalé společnosti ŠKODA UNITECH s.r.o.. Na nynější název společnost přešla v roce 2008. Společnost PILSEN TOOLS s.r.o. splňuje požadavky normy ISO 9001:2008, což dokládá certifikátem od společnosti Loyd's Register Quality Assurance. [12]

Společnost je rozdělena do dvou výrobních divizí (divize Nářadí a divize Opravná strojí) a jedné nevýrobní divize (divize Finance). Společnost je zaměřena na výrobu řezných nástrojů, upínacího nářadí, měřidel, svařenců a opravy obráběcích strojů. [12]

## 2 Rozbor současného stavu

V současné době se na trhu objevuje velmi široký sortiment řezných materiálů počínaje nástrojovými oceli, přes slinuté karbidy, cermety, řezné keramiky, až ke kubickému nitridu bóru a diamantu. Všechny tyto materiály se liší svými vlastnostmi, cenou a tedy i použitím. Vzhledem k velkému množství řezných materiálů není v současné době prioritou hledání nových řezných materiálů, ale více se výrobci řezných nástrojů soustředí na možnosti zvyšování užitečných vlastností již známých řezných materiálů. [9]



Obr. 2.1 Řezné materiály [10]

Dnes se stále více využívá vysokorychlostní obrábění, ale ne ve všech případech je tato metoda obrábění nejehospodárnější. Přestože je možné nalézt stále větší množství nových typů vyměnitelných břitových destiček a monolitních nástrojů ze slinutých karbidů, i tak se v této záplavě řezných materiálů najde místo pro použití houževnatých nástrojových a rychlořezných ocelí. Na trhu s řeznými nástroji se v současné době objevují pilové listy a kotouče, vrtáky, frézy a soustružnické nože z nástrojové nebo rychlořezné oceli. Tyto nástroje se například vyrábějí i ze slinutých karbidů, ale výroba nástrojů z rychlořezné oceli je jednodušší a cena těchto nástrojů je nižší. Rychlořezné oceli se stále významně objevují u tvarově složitých řezných nástrojů, jako jsou například sdružené vrtací nástroje a tvarové frézy. Ve společnosti PILSEN TOOLS s.r.o. se využívá rychlořezných ocelí především na výrobu protahovacích trnů, odvalovacích fréz (viz Obr. 2.2) a speciálních tvarových fréz. Ve většině případů se jedná o kusovou výrobu. [9]



Obr. 2.2 Příklad řezných nástrojů vyráběných ve společnosti PILSEN TOOLS s.r.o., vlevo odvalovací frézy a vpravo kulaté protahovací trny [12]

Největším konkurentem rychlořezných ocelí jsou slinuté karbidy. Z obrázku Obr. 2.1 je patrné, že rychlořezné oceli jsou houževnatější než slinuté karbidy, což dává rychlořezné oceli výhodu u velmi silově namáhaných nástrojů, jako jsou protahovací a protlačovací trny. Protahovací a protlačovací trny se prakticky výlučně vyrábějí z rychlořezných ocelí, případně se objevují protahovací trny s pájenými destičkami ze slinutého karbidu. Naopak u slinutých karbidů je snaha co nejvíce zvýšit houževnatost, protože slinuté karbidy umožňují nasazení vyšších řezných rychlostí, čímž zvyšují produktivitu řezného procesu. Pokud je srovnávána rychlořezná ocel a slinuté karbidy, je třeba zmínit cenu těchto řezných materiálů. Slinuté karbidy sice mohou přinést zvýšení produktivity obrábění, ale karbidové nástroje jsou výrazně dražší než nástroje z rychlořezné oceli. Nevýhodou u rychlořezných ocelí je velká citlivost na zvýšené teploty, je tedy nutné nástroje v procesu řezání chladit, případně i mazat. Při překročení popouštěcí teploty ztrácí rychlořezná ocel tvrdost a dochází k znehodnocení nástroje. Maximální pracovní teplota rychlořezných ocelí se pohybuje kolem 600°C. Naopak slinuté karbidy mohou pracovat za vyšších teplot. V praxi je možné se setkat i s přístupem, že slinuté karbidy jsou teplotně nezničitelné. Avšak maximální pracovní teplota slinutých karbidů je cca 1000°C. Při této teplotě ze slinutého karbidu difundují jednotlivé prvky materiálu nástroje. Tyto prvky odcházejí do třísky, což vede k degradaci řezného nástroje. Difúze probíhá již od 680°C, kdy začíná difundovat kobalt z nástroje, kolem 900°C difunduje uhlík, při 950°C dochází k difúzi wolframu a při teplotě kolem 1050°C dochází k difúzi titanu. [4]

Již bylo zmíněno, společnost PILSEN TOOLS s.r.o. se zabývá výrobou nástrojů z rychlořezné oceli. K tomuto účelu společnost má vlastní kalírnu, kde jsou vyráběné nástroje tepelně zpracovávány. Převážná část nástrojů je kalena v solních lázních nebo ve dvoukomorové vakuové peci. Nově se také ve společnosti zabývají možnostmi kryogenního

tepelného zpracování, které je v současné době na vzestupu. Vzhledem k tomu, že společnost nemá k dispozici vlastní zařízení na kryogenní tepelné zpracování, spolupracuje na rozvoji v této oblasti s dalšími společnostmi. Spolupráce se především týká společnosti COMTES FHT a.s. a výzkumného institutu IMP z Polska.

## 2.1 Možnosti zvýšení trvanlivosti nástrojů z RO

Jednou z možností, jak zvýšit trvanlivost nástrojů z rychlořezné oceli, je aplikace tenké vrstvy. Tenké vrstvy aplikované na nástroje mají zvýšit otěruvzdornost, zlepšit tepelné zatížení nástroje pomocí rozvedení tepla na větší plochu břitu nebo vytvořením teplotní bariéry, která chrání substrát břitu před tepelnou degradací. Další možnost, jak zvýšit trvanlivost nástroje, je optimalizace geometrie břitu z hlediska obráběného materiálu. Je vhodné upravovat jak makrogeometrii břitu (nastavení jednotlivých řezných úhlů břitu), tak je vhodné věnovat pozornost mikrogeometrii a kvalitě činných ploch břitu. V neposlední řadě je možné použít nové způsoby tepelného zpracování. Především je vhodné použití kryogenního tepelného zpracování rychlořezných ocelí, které se značně rozšířilo s příchodem vakuových pecí.

### 2.1.1 Depozice tenkých vrstev

Pro depozici tenkých vrstev na nástroje je v dnešní době využíváno dvou základních pochodů. Jedná se o pochody na chemickém a fyzikálním principu. Chemických procesů využívá metoda CVD (chemical vapor deposition). U metody CVD se deponuje tenká vrstva na substrát převážně z plynného prostředí. Aby byla umožněna chemická reakce mezi materiálem tenké vrstvy a základním materiálem substrátu, probíhá celý proces za velmi vysokých teplot. Tyto teploty se pohybují kolem 1000°C, čímž je použití této metody pro depozici tenkých vrstev na nástrojích z rychlořezné oceli vyloučeno. U rychlořezných ocelí by při této teplotě došlo k popuštění substrátu, což by vedlo ke ztrátě tvrdosti, které bylo dosaženo předcházejícím kalením, a nástroj by ztratil schopnost obrábět. Další nevýhodou je samotné prostředí, kde chemické reakce probíhají. Jedná se často o toxická prostředí, která jsou nemalou zátěží pro životní prostředí. Avšak tato metoda má i mnohé nesporné výhody. Metodou CVD vznikají tenké vrstvy, které dosahují větších tloušťek a tyto vrstvy se vyznačují lepšími adhezními silami mezi tenkou vrstvou a substrátem. V současné době se vyvíjejí metody založené na principu CVD, u kterých by teplota při depozici nebyla tak vysoká. Především se jedná o metody PACVD (plasma assisted chemical vapor deposition), kdy je

využito plazmatu na dodání energie probíhajícími chemickými reakcemi, a tím je možné snížit teplotu, a MTCVD (medium temperature chemical vapor deposition). [2]

Přes tyto nově vznikající metody založené na chemických procesech je pro vytváření tenkých vrstev na nástrojích z rychlořezné oceli v praxi nejvíce využívána depozice pomocí fyzikálních procesů. Jde o metodu PVD (physical vapor deposition). Depozice pomocí metody PVD probíhá za nižších teplot, které se pohybují cca do 500°C. Metodu PVD je možné rozdělit na dva základní druhy depozice tenkých vrstev. Jedná se o napařování a naprašování. Princip PVD napařování spočívá v odpaření deponovaného materiálu tenké vrstvy. Deponovaný materiál může být odpařován průchodem proudu, induktivním ohřevem, elektronovým svazkem, elektrickým obloukem nebo laserovým zářením. Z důvodu rychlejšího odpařování materiálu, a tím tedy i progresivnější depozice tenké vrstvy, je v praxi především využíváno odpařování pomocí elektrického oblouku, elektronového svazku a laseru. Druhou metodou je PVD naprašování, kdy je katoda bombardována ionty a z katody se uvolňují částice. Posléze tyto odprašené částice kondenzují na povrchu substrátu. Celý proces probíhá za velmi nízkých tlaků, kdy se hodnoty tlaku pohybují kolem 0,01 Pa. Odprašené částice se k povrchu substrátu pohybují v plazmatu z inertního plynu. V některých případech je používána směs inertního a aktivního plynu. Výhody použití PVD naprašování jsou v homogenitě deponované tenké vrstvy, a to i na rozměrnějších plochách. Další výhodou tkví v možnosti ovlivňování mikrostruktury tenké vrstvy změnou tlaku pracovního plynu. Tato metoda má ale i nevýhody. Nevýhodou je vyšší teplota při odprašování katody a ovlivnění deponované tenké vrstvy inotovým bombardem. Naprašování se začalo hojně využívat až po příchodu magnetronového naprašování, které odstranilo některé nedostatky dříve používaného diodového naprašování. [2]

### 2.1.2 Úpravy geometrie břítu nástroje

O úpravě geometrie se v současnosti stále více hovoří, a to především ve spojitosti s předdepozičními úpravami břítu. Mezi tyto úpravy patří například omílání naostřených nástrojů v ořechových skořápkách. Odstraňují se stopy po broušení nástrojů, které by vytvářely nepříznivá pnutí v deponované tenké vrstvě. Avšak nejen před depozicí tenkých vrstev je vhodné provádět úpravy. Například leštěním šroubovité drážky u vrtacích nástrojů je dosaženo lepšího odvodu vznikající třísky. Ohledně makrogeometrie břítu se jednoznačně vyplatí zvážení, jaký materiál bude obráběn a jakým řezným materiálem bude obráběno. V případě vhodně zvolené geometrie břítu se výsledná trvanlivost břítu výrazně prodlouží.

### 2.1.3 Tepelné zpracování RO

Nejčastěji se nástroje z rychlořezné oceli zušlechťují, což znamená, že je nástroj nejprve zakalen a následně popuštěn. Aby bylo možné nástroj zakalit, je třeba ohřát materiál na kalící teplotu. Protože nástrojové oceli a především rychlořezné oceli obsahují velké množství legujících prvků, je nutné rozdělit ohřev do několika stupňů. Stupňovitý ohřev na kalící teplotu má několik významů. Primární funkcí jednotlivých stupňů je vyrovnání teplot mezi povrchem a jádrem ohřívané součásti, protože velké množství legujících prvků značně snižuje tepelnou vodivost rychlořezných ocelí. Další funkcí je snížení strukturního pnutí, které vyvolávají strukturní změny v ohříváném materiálu. V průběhu ohřevu je nutné přeměnit a homogenizovat strukturu rychlořezné oceli na austenit. Tento proces se nazývá austenitizace. Dále je nutné ve vzniklém austenitu rozpustit co největší množství karbidů legujících prvků. Proto jsou kalící teploty rychlořezných ocelí velmi vysoké. Kalící teploty RO se pohybují blízko teploty solidu, což bývá problematické. I při malém překročení kalících teplot dochází k natavení hranic austenitických zrn, a tím dochází k degradaci materiálu. Po dosažení kalící teploty se součást zakalí. Kalení probíhá ve více variantách. Rychlořezné oceli jsou díky legujícím prvkům dobře prokalitelné, mohou se tedy zakalit i na vzduchu, ale častěji se používá lomené kalení. Lomené kalení spočívá v ochlazení součásti v solné lázni nad teplotu, kdy začíná probíhat martenzitická přeměna ( $M_s$ ), následně je součást vyjmuta a dochlazena na vzduchu. K dokončení zušlechtění následuje po kalení popouštění. U rychlořezných ocelí je voleno vícenásobné popouštění. Během popouštění dochází k přeměně zbytkového austenitu na bainit, snižuje se pnutí v martenzitu a vylučují se jemné karbidy, které zvyšují sekundární tvrdost. [3]

### 2.1.4 Kryogenní tepelné zpracování RO

Myšlenka kryogenního tepelného zpracování se objevila již v dřívějších dobách, kdy na základě experimentů bylo zjištěno, že podchlazení nástrojových ocelí přináší zvýšení otěruvzdornosti. Jelikož proces obrábění je silně spojen s mechanickým otěrem funkčních ploch nástroje, bylo zvýšením otěruvzdornosti dosaženo prodloužení životnosti rezných nástrojů.

Historicky se objevily dva přístupy ke kryogennímu zpracování rychlořezných ocelí. První ze způsobů spočíval v zanoření nástroje do kapalného dusíku na krátkou dobu. Doba zanoření se pohybovala řádově v minutách. Tento způsob se především rozvíjel v bývalém Sovětském svazu, kde byla tato metoda nazývána „úder chladem“. Při zanoření nástroje do tekutého dusíku docházelo na povrchu nástroje k varu dusíku, přičemž se vyvíjel parní

polštář, který zabraňoval ochlazování nástroje. Po mírném ochlazení se začal parní polštář rozpadat a páry odcházely z povrchu nástroje ve formě bublin. Obdobný parní polštář se vyskytuje například při klasickém kalení do vody. [7]

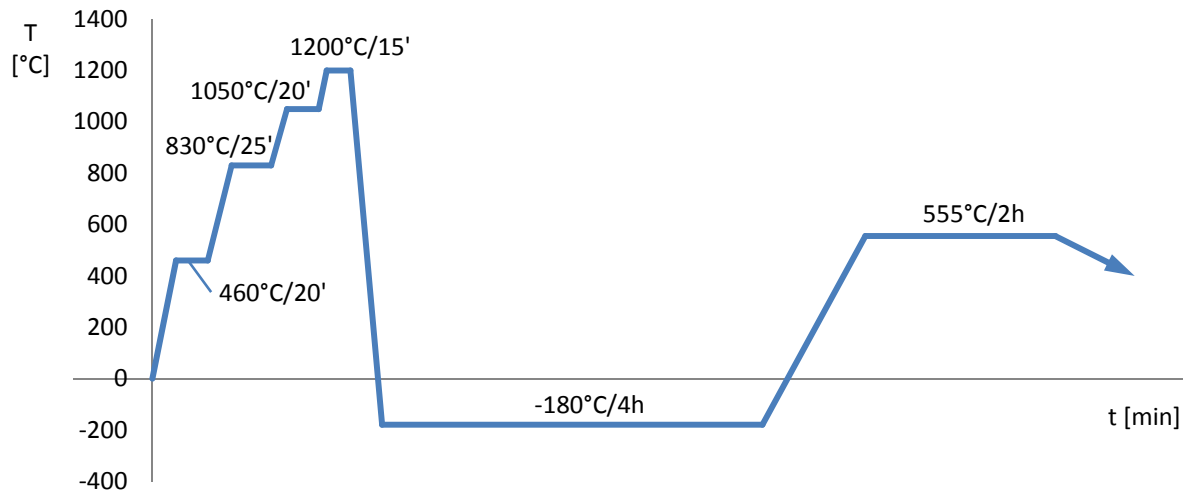
Druhým způsobem kryogenního zpracování bylo pomalé ochlazení ve speciální komoře, kde byly součásti nejprve ochlazovány parami uvolňovanými z kapalného dusíku, aniž by se součásti dostaly do přímého kontaktu s kapalným dusíkem. Takto byly součásti ochlazeny na  $-120^{\circ}\text{C}$ , poté byla zvýšena hladina kapalného dusíku v ochlazovací komoře, čímž byly součásti kapalným dusíkem zaplaveny. Následně byly součásti drženy na teplotě  $-196^{\circ}\text{C}$  po dobu několika hodin. Nakonec byly součásti pozvolně ohřáty na normální teplotu. Tato metoda byla nazývána „cryo – tech“. [6]

V současné době se s rozvojem v oblasti tepelného zpracování objevuje možnost kryogenního zpracování rychlořezných ocelí ve vakuových pecích, kde je možné přesně řídit proces podchlazování.

Princip kryogenního tepelného zpracování spočívá v podchlazení součástí pod teplotu  $M_f$ , kdy končí přeměna austenitu na martenzit a teoreticky by měl být martenzit v celém objemu součásti. Úplné odstranění zbytkového austenitu však není možné dosáhnout, ale kryogenní tepelné zpracování podíl zbytkového austenitu značně sníží. [3] Dále se během kryogenního tepelného zpracování rychlořezných, a tedy vysoce legovaných, ocelí vylučují drobné disperzní karbidy legujících prvků. Tyto disperzní karbidy spolu s odstraněním co největšího množství zbytkového austenitu mají pozitivní vliv na výslednou ořezvzdornost oceli, tedy i na délku životnosti takto tepelně zpracovaného nástroje. [6]

Aby mohl být zbytkový austenit odstraněn, je nutné kryogenní zpracování nasadit ihned po kalení. Pokud se při ochlazování mezi teplotami  $M_s$  a  $M_f$  vyskytne prodleva, dochází ke zvýšení podílu zbytkového austenitu. Navíc takto vzniklý zbytkový austenit se stává stabilizovaným a již se nedá dodatečným podchlazením odstranit. Příčinou stabilizace austenitu může být jednak relaxace pnutí v krystalové mřížce, jednak zablokování dislokací intersticiálními na mezifázovém rozhraní austenit/martenzit. [3]



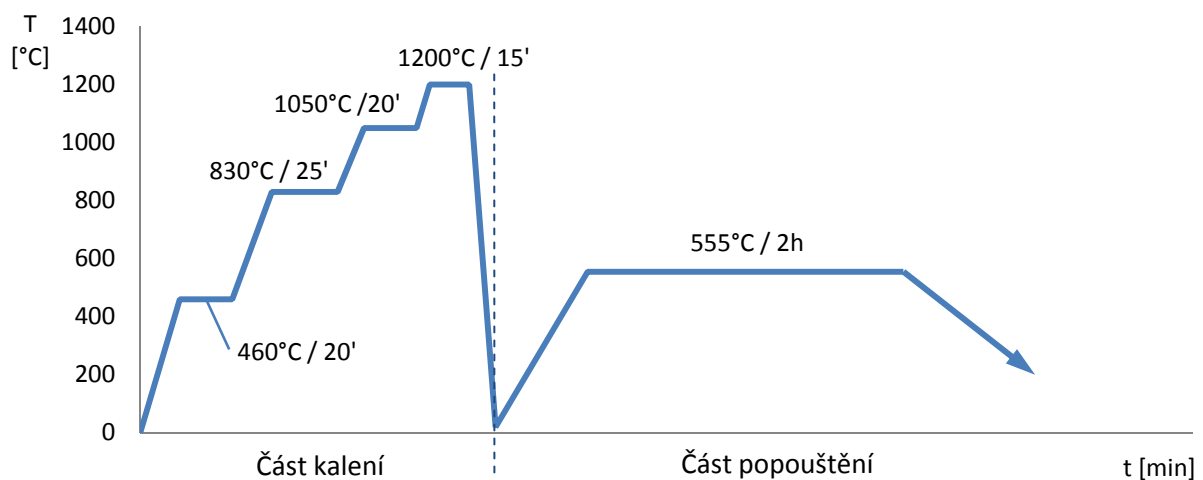


Obr. 2.3 Režim kryogenního tepelného zpracování fréz s označením 30/3 a 30/4 z materiálu 19 830

## 2.2 Teoretický rozbor

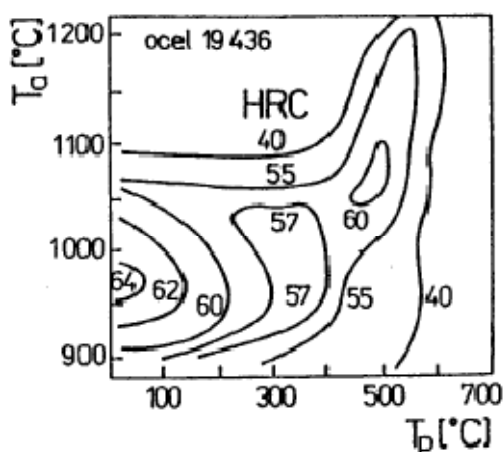
### 2.2.1 Zušlechťování RO

Zušlechťování se obecně skládá ze dvou základních částí (viz Obr. 2.4). Je to část kalení a část popouštění. Kalení se dále rozděluje na dvě hlavní části. Je to část ohřevu a austenitizace součásti, po níž následuje část nerovnovážného ochlazování součásti. Během kalení dochází ke vzniku nerovnovážných struktur vlivem rychlého ochlazování součásti. Nerovnovážnými strukturami se rozumí struktura bainitická nebo struktura martenzitická. Při kalení rychlořezných ocelí je žádoucí, aby vznikla martenzitická struktura, která je charakteristická vysokou tvrdostí. Spolu s tvrdostí martenzitické struktury se zároveň objevuje křehkost kalené součásti. Tato nežádoucí křehkost je následně odstraněna popouštěním.



Obr. 2.4 Režim klasického tepelného zpracování fréz z materiálu 19 830

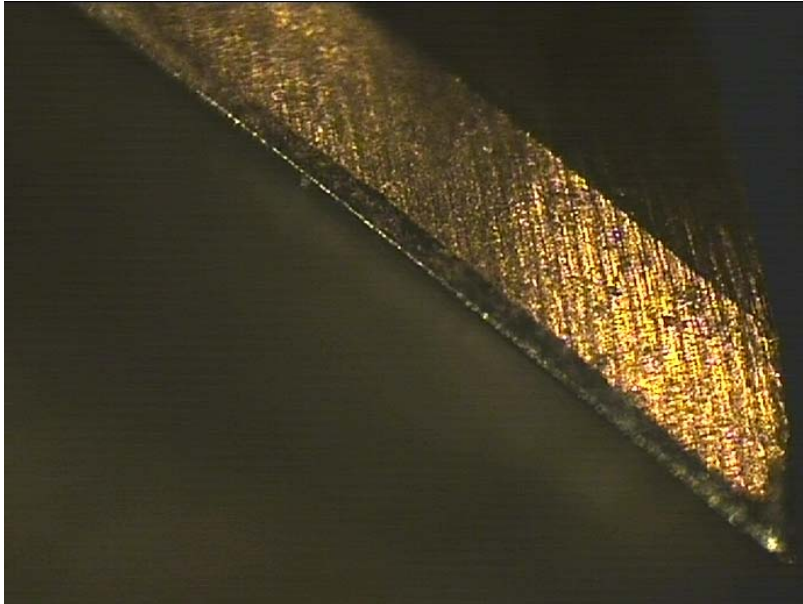
Popouštění je proces, při kterém zahříváme kalenou součást na určitou teplotu a na této teplotě setrváme jistou dobu, aby se odstranila křehkost martenzitu. U popouštění se vyskytují čtyři stádia. Každé stádium je spojené se specifickým rozmezím teplot a charakteristickými pochody uvnitř materiálu. V prvním stádiu, které se objevuje při teplotách přibližně do 200°C, dochází k rozpadu silně přesyceného tetragonálního martenzitu. Tento tetragonální martenzit se rozpadá na nerovnovážený karbid  $Fe_{2,4}C$  a nízkouhlíkový martenzit s obsahem uhlíku 0,25%. Směs nerovnováženého karbidu a nízkouhlíkového martenzitu se nazývá popuštěný, popřípadě kubický, martenzit. V tomto prvním stádiu dochází k mírnému snížení vnitřního pnutí. Druhé stádium se vyskytuje v rozmezí teplot 200 – 300°C. Mezi těmito teplotami probíhá rozpad zbytkového austenitu. Zbytkový austenit se rozpadá na bainit, který nemá takovou tvrdost jako martenzit. Navíc se ve druhé fázi popouštění nejvýznamněji zvětší měrný objem oceli. Třetí stádium popouštění se vyskytuje již od teplot kolem 250°C. V tomto stádiu dochází ke vzniku rovnovážných feritických zrn z nízkouhlíkového martenzitu. Během třetího stádia popouštění dochází k výrazným změnám vlastností ocelí, snižuje se tvrdost oceli, zvyšuje se houževnatost a vzniká jemná sorbitická struktura. Posledním stádiem popouštění je čtvrté stádium, které se vyskytuje při teplotách vyšších než 500°C. Při těchto vysokých teplotách hrubnou feritická zrna a sorbitická struktura se přeměňuje na perlitickou strukturu, čímž dále klesá tvrdost oceli. Pokud však čtvrtého stádia popouštění dosáhnou silně legované oceli, jako například rychlořezné oceli, dochází k precipitaci karbidů legujících prvků. Tyto karbidy naopak tvrdost oceli zvyšují a tato skutečnost je označována jako sekundární tvrdost. [3]



Obr. 2.5 Příklad vlivu teploty austenitizace a teploty popouštění na tvrdost legované nástrojové oceli 19 436 [3]

### 2.2.2 Otupování břítu nástroje

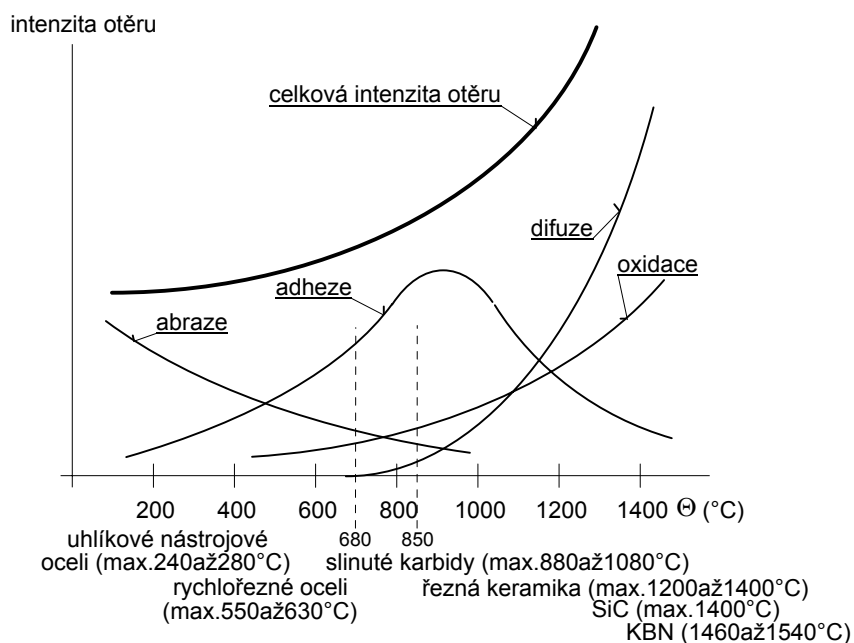
Otupování je proces, kdy dochází ke změně tvaru a kvality činných ploch nástroje. K tomuto otupování břítu nástroje dochází vlivem působení silového a teplotního zatížení, které při obrábění řezáním vzniká. Obecně otupení břítu nástroje vzniká třemi možnými způsoby. [4]



Obr. 2.6 Rovnoměrné opotřebení hřbetu frézy

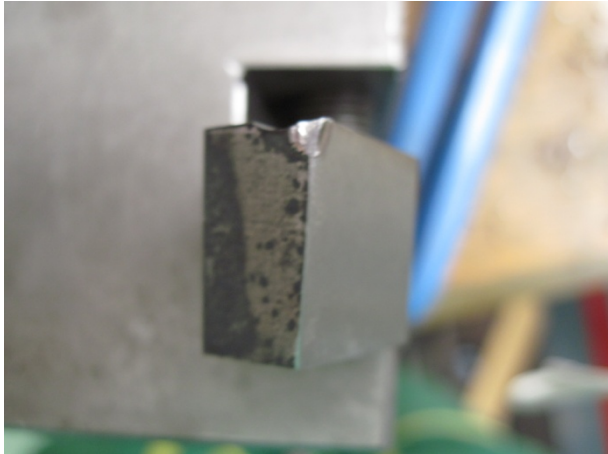
Prvním způsobem je ořezání břítu nástroje. Ořezání vzniká v místě dotyku břítu s odebíraným materiálem obrobku, případně odcházející třískou. Otupení ořezáním je způsobeno fyzikálními a chemickými procesy, které vznikají za vysokých hodnot tlaku a teploty ve stykových plochách. Z fyzikálních procesů se na ořezání projevuje abrazivní ořezání břítu nástroje, kdy tvrdé částice v odebíraném materiálu vytváří rýhy v měkkých fázích řezného materiálu. Nejčastěji se na abrazivním ořezání podílí karbidy, nitridy, vměstky a odlomené nestabilní nárůstky. Další ořezání s fyzikální podstatou je adhezní ořezání břítu nástroje, kdy dochází vlivem chemické příbuznosti materiálů a vysokých teplot k vytváření svarů. Tyto svary se vytvářejí v oblasti, kde dochází k bodovému styku třísky, případně obrobku, s břitem nástroje. Na čele břítu se bodový styk objevuje za váznoucí vrstvou. Ve váznoucí vrstvě dochází k plošnému styku třísky s břitem nástroje, který se posléze mění na bodový styk. V oblasti s bodovým stykem tedy dochází k vytržení svaru pohybující se třískou. Zároveň se svarem dojde i k vyštípnutí části břítu a tyto tvrdé částice dále zvyšují abrazivní ořezání. Adhezní ořezání můžeme částečně omezit použitím procesní kapaliny, která odvádí vzniklé teplo a zároveň má i mazací účinek. Další dva druhy ořezání jsou založeny na chemických procesech. Jedná se o difúzní ořezání, kdy

dojde k překročení disociační teploty a začne probíhat difúze prvků z břitu nástroje do třísky a naopak. Druhý otěr s chemickou podstatou je chemický otěr. K chemickému otěru dochází za teplot, kdy prvky řezného nebo obráběného materiálu začnou vlivem vzdušného kyslíku oxidovat. K chemickému a difúznímu otěru je zapotřebí natolik vysokých teplot, přibližně kolem 700°C, že se tyto druhy otěru u nástrojů z rychlořezných ocelí prakticky nevyskytují. [4]



Obr. 2.7 Vliv teploty na intenzitu otěru [4]

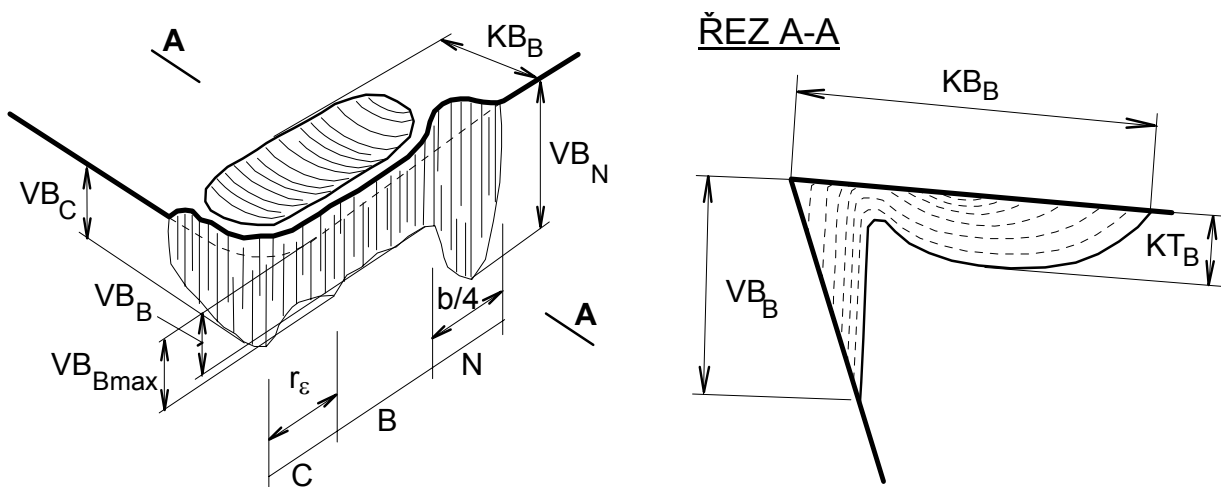
Druhým způsobem vzniku otupení je plastická deformace břitu nástroje. Tato deformace vzniká při velmi vysokém silovém a teplotním zatížení břitu nástroje. Vlivem vysoké teploty a tlaku dojde k vytvoření plastického stavu v řezném materiálu. Tento plastický stav se vytvoří buď v tenké povrchové vrstvě, nebo ve větším objemu řezného materiálu, což vede až k tzv. lavinovitému otupení břitu (viz Obr. 2.8). Nástrojové a rychlořezné oceli jsou náchylnější ke vzniku plastických deformací, protože u těchto řezných materiálů dochází při překročení kritické teploty k prudkému poklesu tvrdosti. K překročení kritických teplot může dojít nasazením vysoké řezné rychlosti nebo koncentrací tepla v břitu. Teplo se koncentruje v břitu nástroje vlivem obrábění materiálů s malou teplotní vodivostí, jako jsou například pryže nebo dřevo. [4]



Obr. 2.8 Lavinovité otupení břitu testovaného soustružnického nože

Třetím způsobem vzniku otupení břitu nástroje je křehký lom. Při tomto způsobu otupení dochází k vylamování částí břitu. Ke křehkému lomu dochází při překročení mechanických vlastností řezného materiálu. Mechanické vlastnosti řezného materiálu jsou nejčastěji překročeny dynamickými silami, které vznikají při přerušovaném řezu, nebo vlivem chvění. Dále se na vzniku křehkých lomů břitu mohou negativně podílet nečistoty v obráběném materiálu tzv. vměšky nebo nevhodně zvolené řezné parametry a geometrie břitu nástroje. V neposlední řadě se křehké lomy mohou také objevit vlivem teplotních rázů. Jak název napovídá, dochází ke křehkým lomům u řezných materiálů s menší houževnatostí. [4]

Tvar otupení břitu významně závisí na řezném materiálu, řezných podmínkách, geometrii břitu nástroje, obráběném materiálu a způsobu práce nástroje. Pro označování tvaru otupení vznikla norma, aby bylo možné porovnávat výsledky z různých měření. [4]

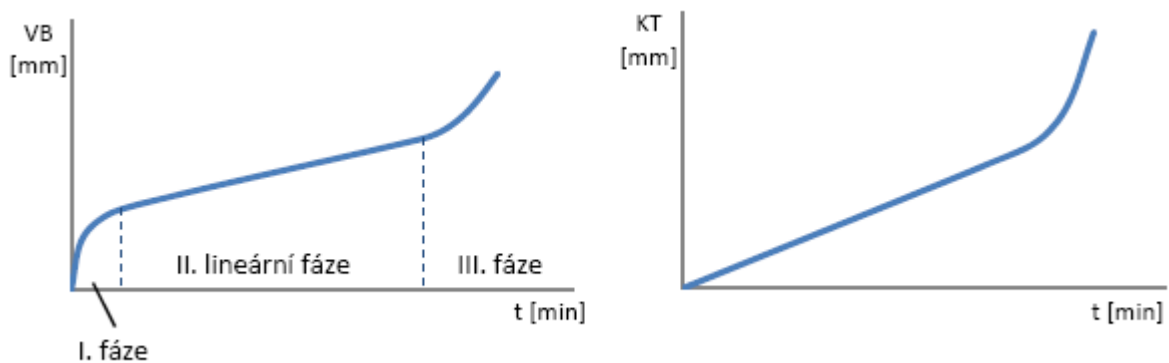


Obr. 2.9 Obecný tvar otupení [4]

Otupení na hřbetě nástroje je označováno VB a toto otupení se dále rozděluje podle místa, kde otupení vzniklá. Otupení hřbetu na špičce nástroje má index C, vrubové otupení v místě styku břitu se zpevněnou případně oxidickou vrstvou je značeno indexem N a rovnoměrné otupení mezi předchozími dvěma oblastmi hřbetu je označováno indexem B. Na čele břitu se vlivem otupení vytváří výmol. U tohoto výmolu se sleduje hloubka výmolu, nesoucí označení  $KT_B$  a vzdálenost zadní hrany výmolu od ostří. Tato vzdálenost je označena  $KB_B$  (viz Obr. 2.9). [4]

Zda bude vznikat otupení na hřbetě či na čele břitu nástroje je dáno hodnotami posuvu a řezné rychlosti. Při nižších hodnotách řezné rychlosti a posuvu se otupuje hřbet nástroje. Naopak při vysokých hodnotách řezné rychlosti a posuvu se vytváří výmol na čele nástroje. Z doporučených řezných podmínek jednotlivých řezných materiálů vyplývá, jaké se bude tvořit otupení. Rychlořezné oceli nepracují při tak vysokých řezných rychlostech, proto se výrazně otupují na hřbetě. U slinutých karbidů se vytváří obě formy otupení a změnou poměru řezné rychlosti a posuvu se mění poměr opotřebení hřbetu a čela nástroje. Doporučené řezné podmínky řezných keramik předesílají, že se opotřebení bude objevovat především na čele nástroje. [4]

Otupování břitu je proces a s dobou řezání se velikost otupení mění. Růst opotřebení na hřbetě VB se velmi často dá rozdělit do tří fází (viz Obr. 2.10). [4]



Obr. 2.10 Teoretický vývoj otupení v čase [1]

V první fázi se koncentruje napětí na velmi malé plošce a dochází tedy k rychlému růstu opotřebení VB. V této fázi se břit tzv. zařezává. Dochází k zahlazení stop po ostření nástroje a k zaoblení ostří. Jak je vidět z grafu závislosti otupení VB na čase (viz Obr. 2.10) intenzita otupování v první fázi s časem klesá a proces obrábění se stabilizuje. Následně se růst otupení dostává do druhé fáze. Tato fáze otupování hřbetu má nejčastěji lineární průběh růstu opotřebení nebo se k lineárnímu průběhu blíží. S postupem času se opotřebení zvětšuje

až na mez, kdy se objevuje velká třecí plocha a s tím spojený velký vývin tepla. Tyto skutečnosti mají za následek přechod do třetí fáze otupování hřbetu. Ve třetí fázi probíhá otupování velice rychle a má progresivní charakter růstu opotřebení. Někdy se však vyskytnou takové podmínky, že se do třetí fáze břit nástroje ani nedostane, protože s velkým teplem a vysokými silami, které jsou pro tuto fázi typické, může dojít až k plastickému otupení břitu. [4]

Na rozdíl od otupování hřbetu se na čele tvoří výmol pozvolně až do doby, kdy se vlivem nárůstu  $KT$  zhorší odvod tepla a výmol se začne rychle prohlubovat (viz Obr. 2.10). [4]

Výše bylo uvedeno, jak a kde otupení na břitu nástroje vzniká. Aby bylo možné tato otupení sledovat a vyhodnocovat, je zapotřebí se zmínit o experimentálních metodách měření otupení břitu. Rozměry otupení jsou měřeny lupou s průměrnou stupnicí v 0,1 mm, nebo dílenským mikroskopem. Měření lupou slouží spíše jako orientační. Naopak dílenský mikroskop je přesnější, proto je využíván při experimentálních měřeních častěji. [4]

Další metodou určování opotřebení břitu je zjišťování úbytku hmoty břitu nástroje. To je prováděno vážením břitu nebo měřením radioaktivity vznikajících třísek. Vážení břitu se používá u řezných destiček, kde se úbytek hmotnosti projeví markantněji, protože mají nízkou hmotnost. Měření radioaktivity třísek je sice přesná metoda, avšak je velice náročná. Princip spočívá v ozáření nástroje radioaktivním prvkem. Nástroj je následně použit pro obrábění a částičky břitu vlivem otěru ulpívají na odcházející tříse. U odebraných třísek se posléze změří radioaktivita, z čehož se zjistí, jak velké množství částic z břitu na tříse ulpělo. [4]

V neposlední řadě je možné sledovat opotřebení břitu podle průvodních jevů. Průvodními jevy signalizující opotřebení břitu jsou zvláště změna rozměru obrobku, zhoršení jakosti obrobeného povrchu, vznik chvění v soustavě S-N-O-P a její akustická emise, změna tvaru a barvy vznikajících třísek. Tyto jevy jsou sledovány především v provozu. Při vzniku některého z výše uvedených projevů opotřebení dostává obsluha stroje signál, že v procesu došlo ke změně a je třeba vhodným způsobem zasáhnout. [4]

### **2.2.3 Trvanlivost a životnost břitu nástroje**

Trvanlivost břitu nástroje  $T$  je doba řezání břitu nejčastěji v minutách, kdy je břit schopen obrábět. Jedná se o dobu mezi novým „ostrým“ stavem břitu až do stavu otupení. Jelikož tato práce pojednává o rychlořezných ocelích, jež se nejvíce otupují na hřbetě břitu, bude tato část více zaměřena na kritérium otupení  $VB_B$ . Trvanlivost je tedy doba, za kterou

opotřebením dosáhne kritériální hodnoty  $VB_B$ . Kritériální hodnota  $VB_{B\text{ krit}}$  je volena na základě rozličných hledisek. Těmito hledisky se rozumí technologická a ekonomická hlediska. Do technologických hledisek patří výsledná drsnost obrobeného povrchu, dosažení geometrické a rozměrové přesnosti obrobených ploch a zaručení spolehlivé funkce břítu. Je snaha se vyhnout třetí fázi otupení břítu (viz Obr. 2.10). Do ekonomických hledisek jsou zařazeny požadavky na dosažení maximální životnosti břítu nástroje a dosažení minimálních nákladů na nástroj. [4]

Životnost břítu  $Z$  je součet trvanlivostí od doby, kdy je břit použit poprvé do doby, kdy je břit vyřazen. Nový břit nástroje je po dosažení určitého opotřebením přeostřen. Při čemž přeostřování břítu je možné provádět pouze do doby, než dojde ke ztrátě funkčnosti břítu. Ztrátou funkčnosti břítu se rozumí zeslabení břítu nástroje natolik, že by při dalším použití daného břítu došlo k destrukci. Dalším důvodem ztráty funkčnosti břítu může být změna profilu břítu u tvarových nástrojů. Výsledná životnost je rovna součinu trvanlivosti s počtem možných přeostření  $z_0$ , kdy počet přeostření je navýšen o hodnotu jedna. Tato přidaná hodnota reprezentuje použití nového břítu. [4]



### 3 Návrh experimentu a hodnocení

Téma diplomové práce bylo koncipováno tak, aby bylo možné zvýšit trvanlivost speciálních nástrojů z rychlořezné oceli, především se jedná o protahovací trny a tvarové frézy, jejichž výrobou se společnost PILSEN TOOLS s.r.o. převážně zabývá. Vzhledem k finančním možnostem bylo při návrhu experimentální části této diplomové práce přihlédnuto k tomu, že testování speciálních nástrojů by bylo velice drahé a časově neefektivní. V návrhu tedy bylo přistoupeno k zjednodušení, kdy byly speciální nástroje nahrazeny dostupnějšími komunálními nástroji. Jako náhrada byly zvoleny čelní válcové frézy a soustružnické nože. Toto zjednodušení bylo přijato za předpokladu podobnosti procesu řezání a předpokladu, že dosažení zvýšení trvanlivosti u klasického nástroje bude mít stejný efekt i u nástroje speciálního.

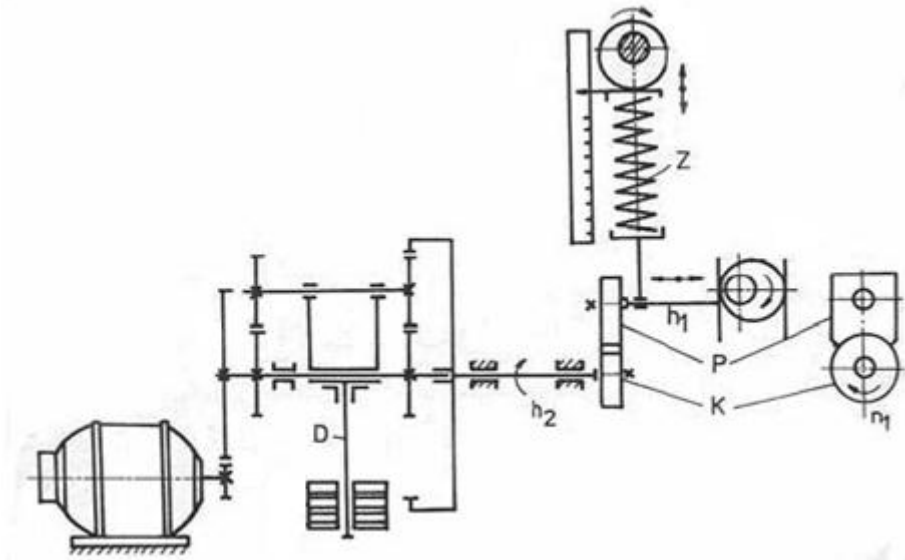
Z možností zvyšování trvanlivosti nástrojů z rychlořezné oceli bylo rozhodnuto zaměřit se na tepelné zpracování, především na možnosti spojené s kryogenním tepelným zpracováním. Byly navrženy dva hlavní experimenty, kdy se jeden experiment týkal kryogenně zpracovaných čelních válcových fréz a druhý experiment se týkal obdobně tepelně zpracovaných přímých uběracích soustružnických nožů.

#### 3.1 Návrh experimentu kryogenně tepelně zpracovaných čelní válcových fréz

Jak již bylo zmíněno, pro experimentální část práce bylo rozhodnuto zaměřit se na přínos podchlazení nástrojů při tepelném zpracování. V závislosti na používaných ocelích ve společnosti PILSEN TOOLS s.r.o. na výrobu nástrojů byly zvoleny rychlořezné oceli 19 830 a 19 852. Z těchto materiálů byly zhotoveny testovací sestavy pro provedení testu opotřebení na stroji Amsler A-135 (viz Obr. 3.1).

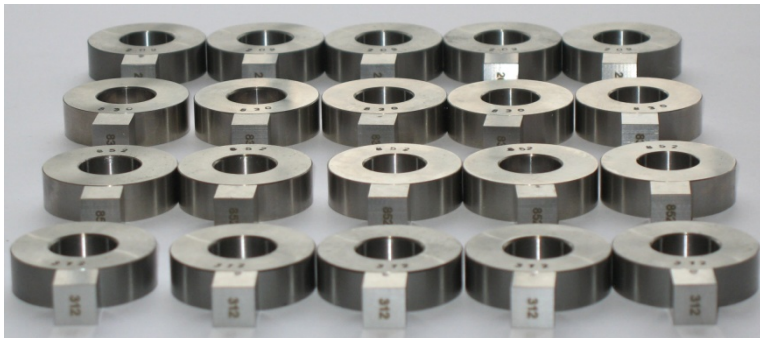


Obr. 3.1 Stroj Amsler A - 135 [8]



Obr. 3.2 Schéma přístroje Amsler (P – vzorek, K – kontrolní vzorek, Z – přitlačná pružina, D – dynamometr) [11]

Testovací sestavy pro test opotřebení se skládaly ze dvou částí, brzdy „vzorku“ a kotouče „kontrolního vzorku“ (viz Obr. 3.3). Vzorek byl pomocí přitlačné pružiny přitlačován na rotující kontrolní vzorek silou 250 N a kontrolní vzorek rotoval 200 otáčkami za minutu. Celá testovaná sestava byla ponořena v olejové lázni a bylo prováděno průběžné kontrolní měření vždy po půl hodině testu. Celková doba testování opotřebení byla 3 hodiny. Při kontrolních měřeních byl zjišťován úbytek hmotnosti vzorku a celé testovací sestavy. [8]

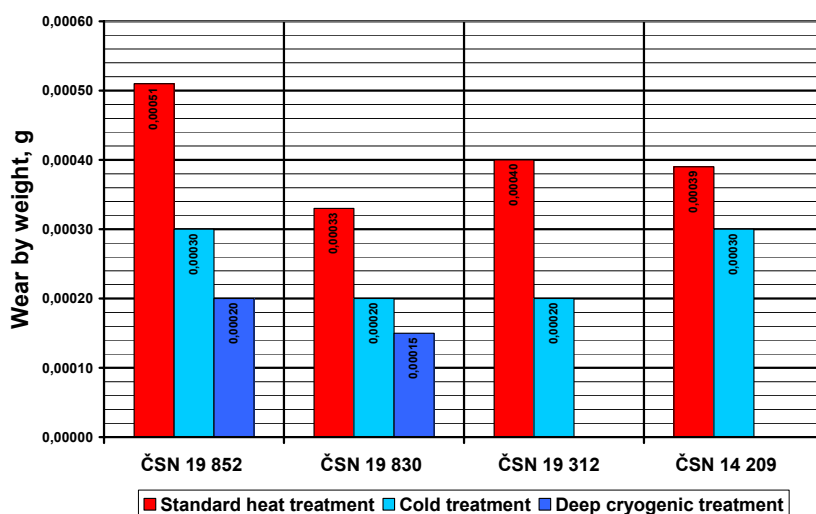


Obr. 3.3 Testovací sestavy [8]

Pro jednotlivé materiály byly zvoleny tři způsoby tepelného zpracování. Prvním způsobem bylo klasické tepelné zpracování, které se ve firmě PILSEN TOOLS s.r.o. aplikuje na nástroje z těchto materiálů. Druhým způsobem bylo kryogenní tepelné zpracování, při kterém byly vzorky podchlazeny na  $-80^{\circ}\text{C}$ , a třetím způsobem bylo hluboké kryogenní zpracování, kdy byly vzorky podchlazeny na teplotu  $-180^{\circ}\text{C}$ . Tepelné zpracování testovacích sestav z oceli 19 830 se skládalo ze stupňovitého ohřevu na kalící teplotu  $1200^{\circ}\text{C}$ , poté následovalo ochlazení stlačeným dusíkem o tlaku 0,6 MPa. U kryogenně zpracovaných

testovacích sestav následovalo podchlazení. Nakonec byly všechny testovací sestavy popuštěny na teplotu 280°C. Testovací sestavy z oceli 19 852 byly zpracovány obdobně, pouze se lišily hodnoty kalicí teploty (1220°C) a popouštěcí teploty (200°C).

Z výsledků těchto testů opotřebení vyplynulo, že kryogenní tepelné zpracování přineslo zvýšení odolnosti proti opotřebení až o 65%. Proto byly zhotoveny další testovací sestavy, aby bylo zjištěno, zda má na nárůst odolnosti proti opotřebení vliv doba, po kterou je materiál vystaven nízkým teplotám při kryogenním tepelném zpracování.



Obr. 3.4 Průměrná hodnota úbytku hmotnosti pro různé oceli [8]

### 3.1.1 Výběr režimů TZ pro experimentální ověření trvanlivosti válcových fréz

Na základě předchozích testů a výsledků bylo rozhodnuto testovat přínosy kryogenního tepelného zpracování při reálném řezném procesu, protože zjišťovaný úbytek hmotnosti prováděný na přístroji Amsler A-135 příliš neodpovídá reálnému namáhání nástroje při procesu řezání. Zásadním rozdílem mezi reálným procesem řezání a laboratorním testováním opotřebení je fakt, že celý test opotřebení probíhal v olejové lázni a vzorek i kontrolní vzorek byly ze shodného materiálu. Na základě předcházejících výsledků bylo tedy vybráno několik způsobů kryogenního tepelného zpracování, které v laboratorních podmínkách vykazovaly největší přínos odolnosti proti opotřebení. Těmito režimy tepelného zpracování byly zpracovány vždy dvě čelní válcové frézy Ø20 mm. Tento počet byl zvolen z důvodu finanční a časové náročnosti experimentu. Režimy tepelného zpracování pro jednotlivé nástrojové materiály jsou popsány níže v tabulkách Tab. 3.1 a Tab. 3.2.

Režimy tepelného zpracování fréz z nástrojové rychlořezné oceli 19 830								
Označení frézy	30/1	30/2	30/3	30/4	30/5	30/6	30/9	30/10
Ohřev	460°C/20', 830°C/25', 1050°C/20'							
Kalící teplota	1200°C/15'							
Ochlazení	N <sub>2</sub> 0,6 MPa							
Podchlazení	-80°C/8h	-180°C/4h		-180°C/8h		-		
Popouštění	555°C/2h							

Tab. 3.1: Režimy TZ fréz z materiálu 19 830

Režimy tepelného zpracování fréz z nástrojové rychlořezné oceli 19 852								
Označení frézy	52/1	52/2	52/3	52/4	52/5	52/6	52/9	52/10
Ohřev	450°C/25', 850°C/20', 1080°C/15'							
Kalící teplota	1220°C/10'							
Ochlazení	N <sub>2</sub> 0,6 MPa							
Podchlazení	-80°C/8h	-180°C/4h		-180°C/8h		-		
Popouštění	555°C/2h							

Tab. 3.2: Režimy TZ fréz z materiálu 19 852

### 3.1.2 Volba řezných podmínek experimentu

Na základě předchozích zkušeností z experimentálního ověřování trvanlivosti nástrojů s deponovanou vrstvou, které bylo náplní bakalářské práce, bylo rozhodnuto test provádět na zušlechtěném bloku materiálu z konstrukční oceli 15 260.6. Tento materiál 15 260.6 byl zušlechtěn na hodnotu meze pevnosti 900MPa. Díky těmto hodnotám je materiál zařazen do třídy obrobitelnosti 11b, což znamená, že je hůře obrobitelným materiálem než etalonová ocel 12 050. Dále bylo zvoleno kritériální opotřebení na hřbetě břitu  $VB_{B \text{ krit}}$ , jehož hodnota byla stanovena na 0,15 mm. Vzhledem k tomu, že experimentálně ověřované nástroje jsou z rychlořezné oceli, bylo rozhodnuto, že bude použito procesní kapaliny. Bylo určeno, že ověřovací experiment bude proveden v halové laboratoři katedry technologie obrábění na tříšém frézovacím stroji MCV 750 A od firmy Kovošvit Sezimovo Ústí. Pro upnutí nástroje do vřetene stroje byl zvolen hydroplastický upínač s vnitřním průměrem 20 mm.

Předběžně byly zvoleny řezné parametry. Řezná rychlost  $v_c$  byla stanovena na 20m/min, posuv na zub  $f_z$  byl stanoven na 0,05 mm, hloubka řezu  $a_p$  byla stanovena na 5 mm a šířka řezu  $a_e$  byla stanovena na 0,5 mm. Dále bylo rozhodnuto, že bude frézováno sousledně.

### 3.2 Návrh experimentu kryogenně tepelně zpracovaných soustružnických nožů

Jako druhý experiment s kryogenně tepelně zpracovanými nástroji z rychlořezné oceli byl zvolen experiment se soustružnickými noži. Tyto soustružnické nože byly zhotoveny z materiálů 19 830 a 19 856. V tomto experimentu však byly režimy tepelného zpracování zvoleny odborným odhadem. Nástroje vyrobené z oceli 19 856 byly nejprve testovány firmou COMTES FHT a.s. a experimenty s nástroji z materiálu 19 830 probíhali v halové laboratoři katedry technologie obrábění na Západočeské univerzitě v Plzni.

Režimy tepelného zpracování jednotlivých soustružnických nožů jsou uvedeny v následujících tabulkách Tab. 3.3 a Tab. 3.4

Režimy tepelného zpracování soustružnických nožů z materiálu 19 856	
Označení nástroje	Režim tepelného zpracování
56/1, 56/2	kalení: 1245°C/180s/olej zmrazování: -80°C/8h/vzduch popouštění: 220°C/2h/vzduch
56/3, 56/4	kalení: 1245°C/180s/olej zmrazování: -180°C/4h/vzduch popouštění: 220°C/2h/vzduch
56/5, 56/6	kalení: 1245°C/180s/olej zmrazování: -180°C/8h/vzduch popouštění: 220°C/2h/vzduch
56/7, 56/8	kalení: 1210°C/20min/dusík popouštění: 2x560°C, 1x580°C, 1x560°C/cca 2h/vzduch zmrazování: náběh 8h/-190°C/24h/temperováno na normální teplotu 8h/komora
56/9, 56/10	kalení: 1210°C/20min/dusík popouštění: 2x560°C, 1x580°C, 1x560°C/cca 2h/vzduch

Tab. 3.3: Režimy TZ soustružnických nožů z materiálu 19 856

Režimy tepelného zpracování soustružnických nožů z materiálu 19 830	
Označení nástroje	Režim tepelného zpracování
30/1, 30/2	kalení: 1220°C/180s/olej zmrazování: -80°C/6h/vzduch popouštění: 180°C/2h/vzduch
30/3, 30/4	kalení: 1220°C/180s/olej zmrazování: -180°C/5h/vzduch popouštění: 180°C/2h/vzduch
30/5, 30/6	kalení: 1220°C/180s/olej zmrazování: -180°C/8h/vzduch popouštění: 180°C/2h/vzduch
30/7, 30/8	kalení: 1190°C/20min/dusík popouštění: 2x560°C, 1x580°C, 1x560°C/cca 2h/vzduch zmrazování: náběh 8h/-190°C/24h/temperováno na normální teplotu 8h/komora
30/9, 30/10	kalení: 1190°C/20min/dusík popouštění: 2x560°C, 1x580°C, 1x560°C/cca 2h/vzduch

Tab. 3.4: Režimy TZ soustružnických nožů z materiálu 19 830

### 3.2.1 Volba řezných podmínek experimentu

Bylo rozhodnuto, že experiment se soustružnickými noži bude probíhat na stroji Masturn 50 od firmy Kovosvit Sezimovo Ústí, který nachází v halové laboratoři katedry technologie obrábění. Tento soustruh byl vybrán, protože je vybaven plynulou změnou otáček vřetene, což umožňuje udržovat stálou řeznou rychlost i při změně průměru obráběného vzorku. Jako testovací obrobek byla zvolena tyč Ø 170 mm x 600 mm z materiálu 11 523.0.

Řezné parametry experimentu byly zvoleny na základě zkušeností odborného konzultanta a byl zahrnut fakt, že tento experiment byl součástí rozsáhlejšího projektu. Proto byly navrženy následující parametry: řezná rychlost  $v_c$  byla stanovena na 56 m/min, hloubka řezu  $a_p$  byla zvolena 2 mm a otáčkový posuv  $f_0$  byl zvolen 0,12 mm. Dále bylo rozhodnuto, že oblast řezu bude intenzivně chlazena procesní kapalinou.

Hodnocení experimentu bylo nastaveno tak, že byl sledován vývoj a hodnota otupení po 30 minutách řezu nástroje. U nástrojů, které nedosáhly kritéria opotřebení na hřbetě VB<sub>B</sub> 0,2 mm, bylo následně sledováno, v jakém čase této kritériální hodnoty opotřebení dosáhnou.

## 4 Provedení experimentu

Experimenty prováděné v rámci této diplomové práce probíhaly převážně v halové laboratoři katedry technologie obrábění Západočeské univerzity v Plzni. Práce na jednotlivých strojích byla vykonávána po patřičném proškolení a pod dohledem zkušených pracovníků katedry technologie obrábění. Na výrobních strojích probíhalo otupování břitů nástrojů a pro vyhodnocování velikosti otupení bylo použito dílenského mikroskopu Multicheck PC 500 (viz Obr. 4.1).



Obr. 4.1 Dílenský mikroskop Multicheck PC 500

Dílenský mikroskop Multicheck PC 500 se skládá ze dvou hlavních částí. Jedna z částí je granitová deska, na níž je umístěn otočný přípravek pro upínání nástrojů v držácích s kuželovou stopkou. Dále jsou zde umístěny pohybové šrouby, které zajišťují pohyb objektivu v osách x a z. Mikroskop je vybaven několika objektivy s 15 násobným, 30 násobným, 75 násobným a 150 násobným zvětšením. Zaostřování objektivu se provádí pomocí ozubeného převodu s pastorkem a hřebem, který umožňuje pohybovat s objektivem v ose y. Sestava objektivu je vybavena optickým čipem, který převádí zvětšený obraz do digitálního formátu a tento digitalizovaný obraz je následně zobrazen na monitoru. Další částí mikroskopu je počítač, který umožňuje pomocí sofistikovaného softwaru odměřovat velikost opotřebení.

Pracoviště mikroskopu je také vybaveno přídatným světelným zdrojem a světlovodou, díky nimž bylo možné vhodně nastavit světelné podmínky při měření.

#### 4.1 Experiment kryogenně tepelně zpracovaných čelní válcových fréz

Jak již bylo zmíněno, testování trvanlivosti čelních válcových fréz probíhalo na tříosé CNC frézce MCV 750 A od firmy Kovosvit Sezimovo Ústí (viz Obr. 4.3). V rámci testování byl obráběn blok materiálu z oceli 15 260.6 o rozměrech 192 x 365 x 145 mm. Testovány byly čelní válcové frézy Ø20 mm se 4 zuby ve šroubovici (viz Obr. 4.2). Frézy byly upnuty pomocí hydroplastického upínače s vnitřní upínací dutinou Ø20 mm, nebylo tedy pro upnutí nutné používat redukční pouzdra. Po upnutí frézy do upínače byl zkontrolován a zdokumentován stav ostří na dílenském mikroskopu Multicheck PC 500, za použití objektivu se 75 násobným zvětšením. Poté byl nástroj upnut do vřetene stroje. Při prvním upnutí nového nástroje bylo zapotřebí nastavit délkovou korekci nástroje v ose z. Délková korekce byla nastavena tzv. naškrtáním nástroje pomocí útržku papíru. Dalším krokem bylo umístění nástroje do zásobníku nástrojů, aby došlo ke spárování nastavené délkové korekce s nástrojem. Po těchto krocích bylo již možné spustit NC program, kterým byly řízeny pohyby stroje a počet přejezdů nástroje po obrobku.



Obr. 4.2 Čelní válcová fréza Ø 20 mm se čtyřmi zuby ve šroubovici z materiálu 19 852

NC program obsahoval cykly, které umožnily jednoduchým zásahem do programu měnit počet přejezdů nástroje po testovacím obrobku. Díky této snadné změně počtu přejezdů bylo možné efektivně volit časy měření otupení nástroje a tím pružně reagovat na proces obrábění.





Obr. 4.3 Tříosá CNC frézka MAS MCV 750A

Během procesu obrábění byla především sledována akustická emise a výkon vřetene potřebný pro uskutečnění řezání. Tyto dva signály spolu s výsledky průběžných měření otupení dávaly jistou představu, jak se proces obrábění a velikost otupení vyvíjí s postupujícím časem.

Po uskutečnění určitého počtu přejezdů, počet přejezdů se pohyboval od jednoho přejezdu až do pěti přejezdů, bylo prováděno průběžné měření otupení na obvodové části frézy. Průběžné měření probíhalo na dvou předem vybraných břitech frézy. Jeden břit byl vybrán zcela náhodně a jako druhý břit byl vybrán protilehlý břit k náhodně zvolenému břitu. Břity byly označeny lihovým popisovačem, aby v průběhu měření byly měřeny stále stejné břity a nedošlo tak k hrubé chybě měření. Fréza i s upínačem byla umístěna a upnuta do dutiny přípravku, který je součástí dílenského mikroskopu Multicheck PC 500. Poté byl nastaven jeden z měřených břitů tak, aby bylo možné odečíst hodnotu opotřebení. Opotřebení bylo měřeno od špičky nástroje do vzdálenosti 3 mm od špičky nástroje. Tento měřicí rozsah byl zvolen na základě zkušenosti a z technických důvodů spojených s dílenským mikroskopem. Ze zkušenosti bylo známo, že obráběný materiál vytváří ořep. Tento ořep v místě styku s nástrojem výrazně zvyšoval míru opotřebení nástroje, místo styku bylo ve vzdálenosti hloubky řezu od špičky nástroje. Jelikož se ořep vyskytoval nepravidelně, byl jeho vliv zanedbán. Dalším důvodem, proč bylo opotřebení nástroje měřeno pouze do vzdálenosti 3 mm od ostří docházelo ke zkreslení obrazu. Toto zkreslení bylo způsobené tím, že osa objektivu mikroskopu nebyla již kolmá na rovinu ostří. Tento problém by musel být

řešen mechanickým spojením posuvu objektivu a rotace nástroje, což by bylo technicky velmi náročné a případné ruční nastavení by bylo velice nepřesné.

Po odečtení hodnoty opotřebení byl obraz archivován a pootočením frézy o 180° v ose rotace nástroje bylo možné postup opakovat na protilehlém břitu. Když bylo průběžné měření dokončeno, bylo možné nástroj opět upnout do stroje, kde mohl být znovu spuštěn NC program. Takovýto postup se opakoval do doby, než při průběžném měření byla naměřena hodnota opotřebení větší než hodnota  $VB_{B \text{ krit.}}$ . Poté byl nástroj vyřazen a opakoval se celý postup s další ještě netestovanou frézou.

Vzhledem k velkému objemu experimentálních prací byl tento experiment rozdělen na více částí. První rozdělení bylo podle řezného materiálu fréz a to na část testování fréz z oceli 19 830 a část testování fréz z oceli 19 852. K dalšímu členění došlo po první sérii zkoušek, kdy došlo k výběru určitých fréz za účelem potvrzení výsledků z první série zkoušek.

Během testování bylo zjištěno, že byly zvoleny nepříznivé záběrové podmínky, a proto došlo ke korekci řezných podmínek proti navrhovaným řezným podmínkám.

#### 4.1.1 Testování válcových fréz z oceli 19 830

Při testování čelních válcových fréz z materiálu 19 830 bylo použito navržených řezných parametrů (viz Tab. 4.1). V průběhu experimentu se však vyskytla nepříjemná akustická emise a docházelo k velkému tření hřbetu nástroje po obrobku vlivem malé šířky řezu. Tato skutečnost měla dopad na výslednou trvanlivost nástrojů, což vedlo k již zmíněné korekci řezných parametrů v průběhu dalšího postupu při experimentu.

Řezná rychlost	$v_c$	20 m/min
Otáčky vřetene	$n$	318 $\text{min}^{-1}$
Posuv na zub	$f_z$	0,05
Minutový posuv	$f$	63 mm/min
Hloubka řezu	$a_p$	5 mm
Šířka řezu	$a_e$	0,5 mm
Kriteriální opotřebení břitu	$VB_{B \text{ krit.}}$	0,15 mm

Tab. 4.1 Řezné parametry při testování čelních válcových fréz z materiálu 19 830

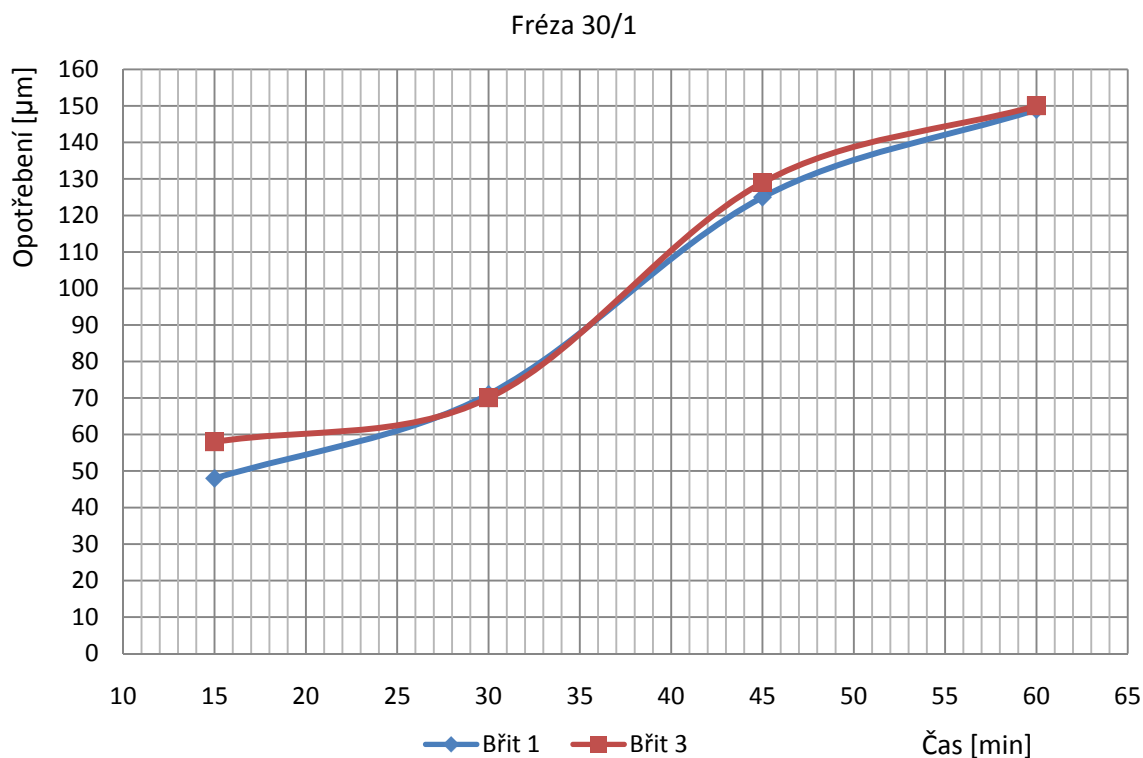
Režim kryogenního tepelného zpracování jednotlivých fréz z materiálu 19 830 byl již popsán výše v tabulce Tab. 3.1.

V průběhu testování byly zaznamenávány hodnoty opotřebení jednotlivých fréz získaných z průběžných měření. Tato data byla zaznamenána do následující tabulky Tab. 4.2.

Fréza	Břit	počet přejezdů	5p	10p	15p	20p			
		čas [min]	15	30	45	60			
30/1	1	VB <sub>B</sub> [μm]	48	71	125	149			
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	58	70	129	150			
Fréza	Břit	počet přejezdů	5p	10p	15p	20p	1p		
		čas [min]	15	30	45	60	63		
30/2	1	VB <sub>B</sub> [μm]	64	84	110	142	159		
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	66	75	122	146	150		
Fréza	Břit	počet přejezdů	5p	10p	15p	19p			
		čas [min]	15	30	45	57			
30/3	1	VB <sub>B</sub> [μm]	58	88	133	174			
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	63	80	105	143			
Fréza	Břit	počet přejezdů	5p	10p	15p	19p			
		čas [min]	15	30	45	57			
30/4	1	VB <sub>B</sub> [μm]	70	89	131	154			
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	56	71	124	137			
Fréza	Břit	počet přejezdů	5p	10p	15p	2p			
		čas [min]	15	30	45	51			
30/5	1	VB <sub>B</sub> [μm]	71	111	143	188			
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	85	103	142	182			
Fréza	Břit	počet přejezdů	5p	10p	15p	20p			
		čas [min]	15	30	45	60			
30/6	1	VB <sub>B</sub> [μm]	53	82	128	160			
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	55	88	105	141			
Fréza	Břit	počet přejezdů	3p	6p	9p	12p	15p	18p	
		čas [min]	9	18	27	36	45	51	
30/9	1	VB <sub>B</sub> [μm]	52	64	80		109	137	
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	51	66	77	97	102	158	
Fréza	Břit	počet přejezdů	1,5p	4,5p	7,5p	10,5p	13,5p	17,5p	20,5p
		čas [min]	4,5	13,5	22,5	31,5	40,5	52,5	61,5
30/10	1	VB <sub>B</sub> [μm]	49	63	74	83	108	137	149
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	57	63	75	85	109	135	158

Tab. 4.2 Naměřená data hodnot opotřebení fréz z materiálu 19 830

Na základě tabulky Tab. 4.2 byly zhotoveny grafy vývoje opotřebení jednotlivých fréz v závislosti na čase. Z těchto grafů byl následně odečten čas, kdy míra opotřebení jednoho ze sledovaných břitů dosáhla kritériální hodnoty opotřebení  $VB_{B \text{ krit.}}$ .

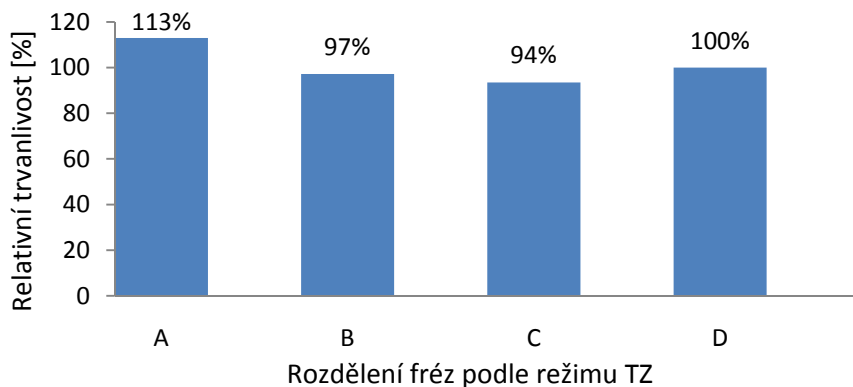


Graf 4.1 Příklad grafu zachycující vývoj opotřebení frézy 30/1 na době řezání

Časy, kdy bylo dosaženo kritériálního opotřebení, byly zaneseny do tabulky Tab. 4.3, která posloužila k následnému vyhodnocení této části experimentu. V této zmíněné tabulce Tab. 4.3 byly zprůměrovány hodnoty trvanlivostí fréz se shodným režimem tepelného zpracování a následně byl porovnán procentní přínos kryogenně zpracovaných nástrojů (skupiny A, B a C) vůči klasicky tepelně zpracovaným nástrojům (skupina D). V konečném kroku byl zhotoven sloupcový Graf 4.2, který graficky znázorňuje přínosy kryogenního tepelného zpracování.

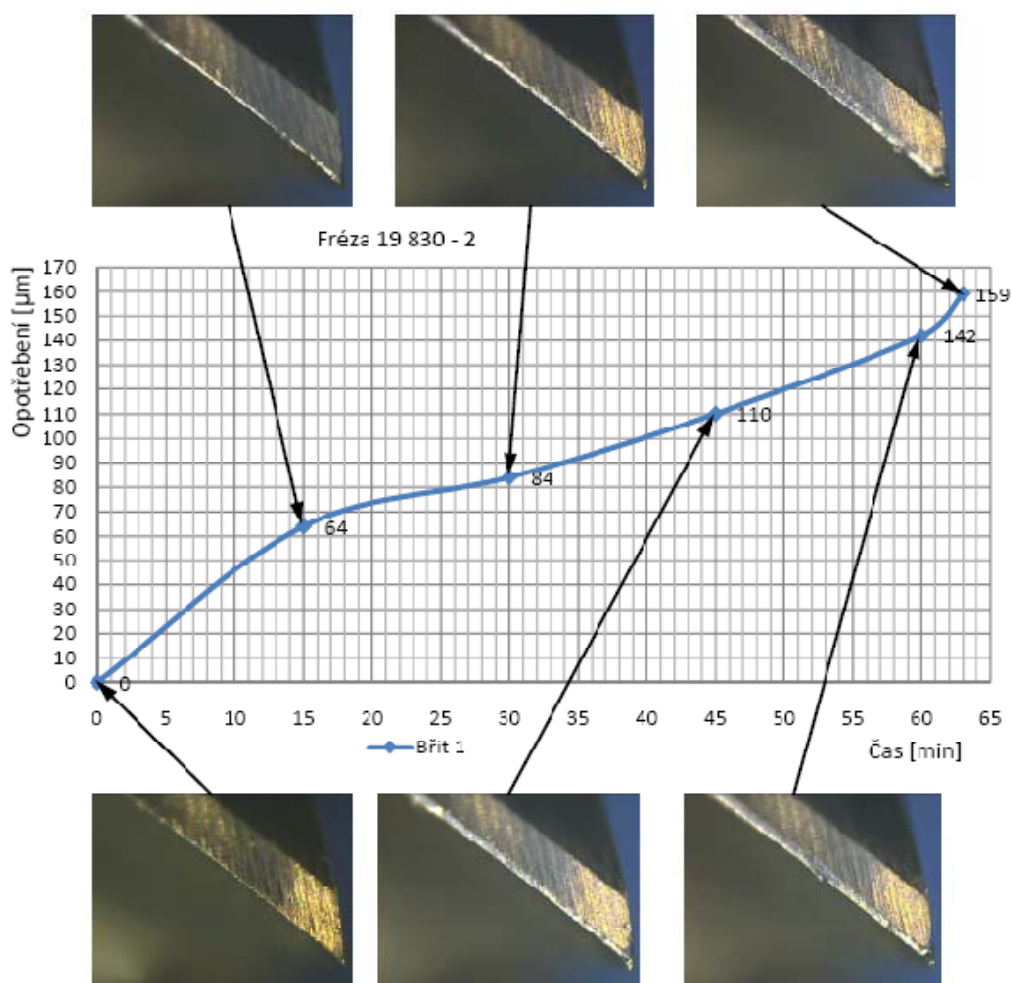
Fréza	$t_{VB}$ [min]	Frézy podle TZ	$\overline{t_{VB}}$ [min]	Relativní trvanlivost [%]
30/1	60	A	61	113%
30/2	62			
30/3	50	B	52,5	97,2%
30/4	55			
30/5	46	C	50,5	94%
30/6	55			
30/9	50	D	54	100%
30/10	58			

Tab. 4.3 Hodnoty trvanlivostí fréz a porovnání kryogenně tepelně zpracovaných fréz s klasicky tepelně zpracovanými frézami z materiálu 19 830



Graf 4.2 Porovnání kryogenně tepelně zpracovaných fréz s klasicky tepelně zpracovanými frézami z materiálu 19830

Z grafu Graf 4.2 je možné vysledovat, že kryogenně zpracované frézy skupiny B a C měly menší trvanlivost než klasicky tepelně zpracované frézy. Tato skutečnost nebyla očekávána, proto se přistoupilo na již dříve zmíněnou korekci řezných parametrů.



Obr. 4.4 Vývoj opotřebení břitu v závislosti na čase řezání doplněný o snímky pořízené při měření opotřebení na dílenském mikroskopu Multicheck PC 500

Na obrázku Obr. 4.4 je zachycen vývoj opotřebení v závislosti na době řezání. Z jednotlivých snímků pořízených při měření opotřebení je patrný vývoj rovnoměrného opotřebení břitu frézy v čase. Takto rovnoměrné opotřebení se vyskytovalo v převážné většině případů, avšak v některých případech se břity fréz více opotřebovávaly v místě dotyku obvodu frézy s již dříve obrobenou horní plochou. Zároveň se s postupným otupováním fréz objevoval ořep na vzniklé hraně materiálu. Před nasazením nové frézy byl tento ořep odstraněn pomocí pilníku, aby nedošlo k negativnímu ovlivnění nově nasazené frézy.

#### 4.1.2 Testování válcových fréz z oceli 19 852

V následující tabulce Tab. 4.4 jsou uvedeny korigované řezné parametry, za kterých probíhalo další testování kryogenně zpracovaných fréz z materiálu 19 852.

Řezná rychlost	$v_c$	17,6 m/min
Otáčky vřetene	n	280 min <sup>-1</sup>
Posuv na zub	$f_z$	0,056 mm
Minutový posuv	f	63 mm/min
Hloubka řezu	$a_p$	5 mm
Šířka řezu	$a_e$	1 mm
Kritériální opotřebení břitu	$VB_{B \text{ krit}}$	0,15 mm

Tab. 4.4 Řezné podmínky pro testování čelních válcových fréz z materiálu 19 852

Jelikož během první části experimentu docházelo k velkému tření hřbetu nástroje po obrobené ploše, došlo ke korekci řezných parametrů. V první řadě byla zvětšena šířka řezu, aby se prodloužila doba řezu jednotlivých zubů a zvětšila se odřezávaná vrstva materiálu. Dále byla snížena řezná rychlost, z důvodu snížení silového zatížení nástroje. Tyto změny byly plánovány a byly provedeny na základě konzultace s odborným konzultantem a na základě zkušeností obsluhy stroje. Neplánovanou změnou řezných parametrů bylo zvýšení posuvu na zub. Došlo k tomu tím, že změnou řezné rychlosti došlo ke změně otáček vřetene. Otáčky vřetene byly v programu pozměněny, ale nedopatřením nedošlo k přepsání minutového posuvu. Výsledná změna posuvu na zub však nebyla natolik velká, aby ovlivnila výsledky měření.

Jednotlivé tepelné režimy, jakými byly frézy z materiálu 19 852 zpracovány, se nacházejí v tabulce Tab. 3.2.

Postup testování fréz z materiálu 19 852 byl obdobný, jako tomu bylo u předcházející části testování fréz z materiálu 19 830. Opět byly zaznamenávány hodnoty opotřebení fréz při průběžných měřeních. Výsledky průběžných měření jsou v tabulce Tab. 4.5.

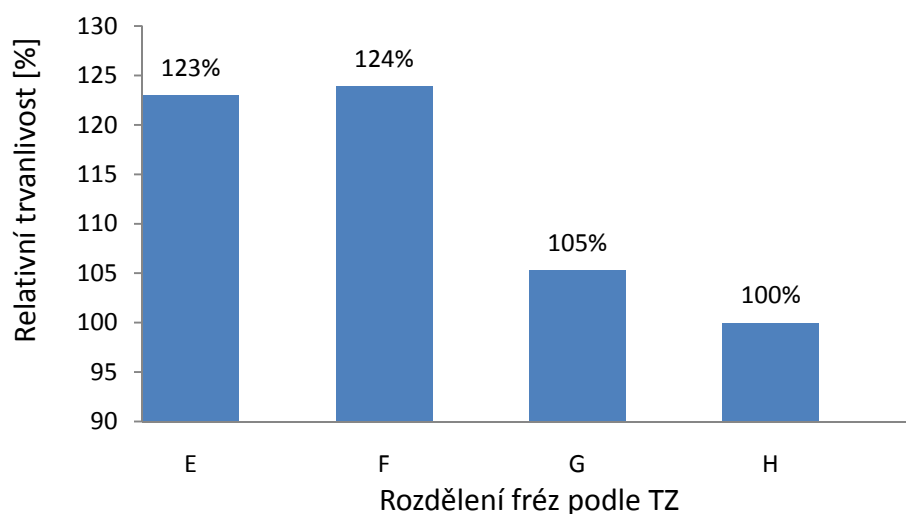
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	5p	10p	15p	20p	25p	
		čas [min]	0	15	30	45	60	75	
52/1	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	76	91	107	122	138	
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	64	80	108	126	152	
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	5p	10p	15p	20p	23p	
		čas [min]	0	15	30	45	60	69	
52/2	1	VB <sub>B</sub> [μm]	87	99	122	130	140	165	
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	85	91	95	136	148	
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	5p	10p	15p	20p	24p	
		čas [min]	0	15	30	45	60	72	
52/3	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	98	112	124	132	151	
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	73	82	110	132	144	
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	5p	10p	15p	20p	24p	
		čas [min]	0	15	30	45	60	72	
52/4	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	87	93	117	131	156	
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	80	89	104	127	150	
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	5p	10p	15p	20p		
		čas [min]	0	15	30	45	60		
52/5	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	90	106	132	161		
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	76	87	105	141		
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	5p	10p	15p	20p	22p	
		čas [min]	0	15	30	45	60	66	
52/6	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	90	103	119	131	157	
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	85	99	111	141	150	
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	3p	6p	9p	12p	15p	18p
		čas [min]	0	9	18	27	36	45	54
52/9	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	74	100	113	124	134	151
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	72	82	101	110	122	132
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	3p	8p	13p	18p	20p	
		čas [min]	0	9	24	39	54	60	
52/10	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	61	82	109	118	135	
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	73	91	116	137	153	

Tab. 4.5 Naměřené hodnoty opotřebení čelních válcových fréz z materiálu 19 852

Z tabulky naměřených hodnot byly sestrojeny grafy vyjadřující závislost míry opotřebení na čase (viz Graf 4.1). Z grafů bylo odečteno, kdy bylo dosaženo kritériálního opotřebení. Výsledné trvanlivosti jednotlivých fréz byly zaznamenány do tabulky Tab. 4.6 a následně byly porovnány trvanlivosti kryogenně zpracovaných fréz (skupiny E, F a G) vůči klasicky tepelně zpracovaným frézám (skupina H). Grafické znázornění výsledků porovnání byly zachyceny v grafu Graf 4.3.

Fréza	$t_{VB}$ [min]	Frézy podle TZ	$\overline{t_{VB}}$ [min]	Relativní trvanlivost [%]
52/1	74	E	69,5	123%
52/2	65			
52/3	71	F	70	124%
52/4	69			
52/5	54	G	59,5	105%
52/6	65			
52/9	54	H	56,5	100%
52/10	59			

Tab. 4.6 Hodnoty trvanlivostí fréz a porovnání kryogenně tepelně zpracovaných fréz s klasicky tepelně zpracovanými frézami z materiálu 19 852



Graf 4.3 Porovnání kryogenně tepelně zpracovaných fréz s klasicky tepelně zpracovanými frézami z materiálu 19 852

V této části experimentu bylo zjištěno, že u všech kryogenně tepelně zpracovaných fréz v porovnání s klasicky tepelně zpracovanými frézami došlo k prodloužení trvanlivosti břitu. Z výsledků je patrné, že korekce řezných podmínek byla na místě a měla pozitivní vliv na průběh experimentu.

#### 4.1.3 Doplnující zkoušky čelních válcových fréz

Na základě výsledků předcházejících částí experimentu s kryogenně zpracovanými frézami bylo rozhodnuto, že bude provedeno ještě doplňující měření. Doplňující měření mělo ověřit dosažené výsledky z první série testování fréz. Vzhledem k velkému časovému objemu prací spojených s testováním všech fréz bylo rozhodnuto vybrat pouze některé frézy. K doplňujícímu testování byly vybrány frézy z materiálu 19 830 s označením 30/1, 30/2 (skupina fréz A); 30/3, 30/4 (skupina fréz B); 30/9 a 30/10 (skupina fréz D). Frézy skupiny D



byly vybrány jako referenční, frézy skupiny A byly vybrány na základě největšího zvýšení trvanlivosti vůči klasicky tepelně zpracovaným frézám a frézy skupiny B byly vybrány, protože měly obdobný režim kryogenního zpracování jako frézy skupiny F, které dosáhly nejlepšího výsledku při testování fréz z materiálu 19 852. Z fréz z materiálu 19 852 byly k doplňujícím testům vybrány frézy 52/1, 52/2 (skupina fréz E); 52/3, 52/4 (skupina fréz F); 52/9 a 52/10 (skupina fréz H). Skupina fréz H byla vybrána jako referenční díky klasickému režimu tepelného zpracování, skupiny E a F byly zvoleny na základě zvýšení trvanlivosti břitu nástroje. Aby bylo možné doplňkové testování realizovat, bylo nutné nechat vybrané frézy přeastřit. K přeastření nástrojů došlo ve firmě PILSEN TOOLS s.r.o., kde bylo přeastření nástrojů svěřeno kvalifikovanému pracovníkovi.

Doplňující testování bylo dále spojeno se změnou řezných podmínek. Na základě předcházející volby řezných podmínek a následné korekci těchto parametrů byla provedena nová volba řezných podmínek (viz Tab. 4.7). Hloubka a šířka řezu zůstaly nezměněny vůči korigovaným řezným parametrům, které se používaly u testování fréz z materiálu 19 852. Řezná rychlost a posuv na zub byly zvýšeny, aby se alespoň částečně urychlil průběh doplňujících testů.

Řezná rychlost	$v_c$	22 m/min
Otáčky vřetene	n	350 min <sup>-1</sup>
Posuv na zub	$f_z$	0,075
Minutový posuv	f	105 mm/min
Hloubka řezu	$a_p$	5 mm
Šířka řezu	$a_e$	1 mm
Kriteriální opotřebení břitu	$VB_{B \text{ krit}}$	0,15 mm

Tab. 4.7 Řezné podmínky pro doplňkové testování čelních válcových fréz

Doplňující testy probíhaly podle stejného postupu jako předcházející části experimentu s čelními válcovými frézami. Naměřená data byla zaznamenána do tabulek Tab. 4.8 a Tab. 4.9.

Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	5p	10p	15p	20p	23p
		čas [min]	0	10	20	30	40	46
52/1	1	$VB_B$ [ $\mu\text{m}$ ]	0	71	84	98	134	151
	3	$VB_B$ [ $\mu\text{m}$ ]	0	68	78	99	127	160
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	5p	10p	15p	20p	23p
		čas [min]	0	10	20	30	40	46
52/2	1	$VB_B$ [ $\mu\text{m}$ ]	0	66	78	96	126	145
	3	$VB_B$ [ $\mu\text{m}$ ]	0	79	79	113	130	158

Tab. 4.8 Naměřené hodnoty opotřebení z doplňkových testů fréz z materiálu 19 852

Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	5p	10p	15p	20p	25p
		čas [min]	0	10	20	30	40	50
52/3	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	72	94	108	121	160
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	65	75	99	127	149
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	5p	10p	15p	20p	22p
		čas [min]	0	10	20	30	40	44
52/4	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	73	91	113	140	151
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	66	73	108	130	142
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	3p	8p	13p	18p	
		čas [min]	0	6	16	26	36	
52/9	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	57	83	107	150	
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	51	79	103	140	
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	3p	6p	11p	16p	19p
		čas [min]	0	6	12	22	32	38
52/10	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	53	68	94	122	159
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	61	75	90	127	166

Tab. 4.8 Naměřené hodnoty opotřebení z doplňkových testů fréz z materiálu 19 852 (pokračování)

Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	4p	9p	14p	19p	24p
		čas [min]	0	8	18	28	38	48
30/1	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	65	71	99	120	156
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	74	77	87	114	155
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	5p	10p	15p	20p	24p
		čas [min]	0	10	20	30	40	48
30/2	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	81	85	105	132	151
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	73	85	105	130	159
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	5p	10p	15p	20p	22p
		čas [min]	0	10	20	30	40	44
30/3	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	64	86	107	143	174
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	74	78	110	139	159
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	5p	10p	15p	19p	
		čas [min]	0	10	20	30	38	
30/4	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	73	88	110	141	
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	78	86	107	154	
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	3p	8p	13p	17p	19p
		čas [min]	0	6	16	26	34	38
30/9	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	64	79	102	121	138
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	77	97	114	138	154
Fréza	Břit	počet přejezdů	0p	3p	8p	13p	17p	20p
		čas [min]	0	6	16	26	34	40
30/10	1	VB <sub>B</sub> [μm]	0	62	76	88	115	141
	3	VB <sub>B</sub> [μm]	0	65	80	102	135	158

Tab. 4.9 Naměřené hodnoty opotřebení z doplňkových testů fréz z materiálu 19 830

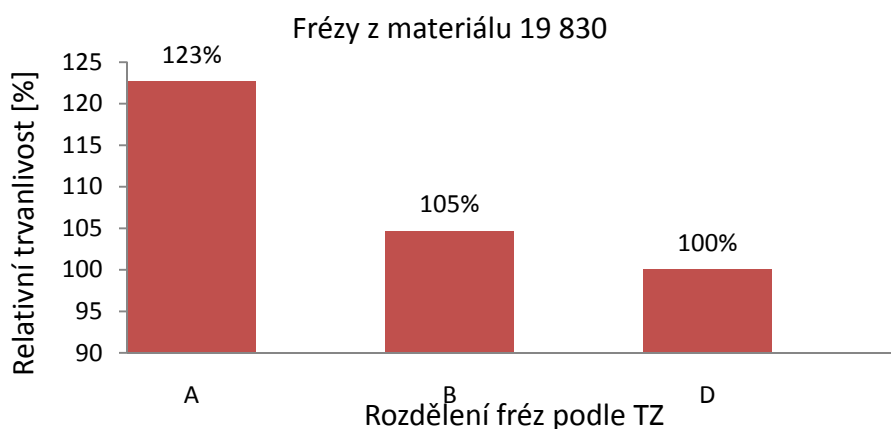
Z tabulek naměřených hodnot byly sestrojeny grafy vyjadřující závislost hodnoty opotřebení na čase (viz Graf 4.1). Z grafů bylo odečteno, kdy bylo dosaženo kritériálního opotřebení  $VB_{B \text{ krit.}}$ . Výsledné trvanlivosti jednotlivých fréz byly zaznamenány do tabulek Tab. 4.10 a Tab. 4.11. Následně byly porovnány trvanlivosti kryogenně zpracovaných fréz (skupiny A, B, E a F) vůči klasicky tepelně zpracovaným frézám (skupiny D a H). Grafické znázornění výsledků porovnání byly zachyceny v grafech Graf 4.4 a Graf 4.5.

Fréza	$t_{VB}$ [min]	Frézy podle TZ	$\overline{t_{VB}}$ [min]	Relativní trvanlivost [%]
30/1	46,5	A	46	123%
30/2	45,5			
30/3	41	B	39,25	105%
30/4	37,5			
30/9	37	D	37,5	100%
30/10	38			

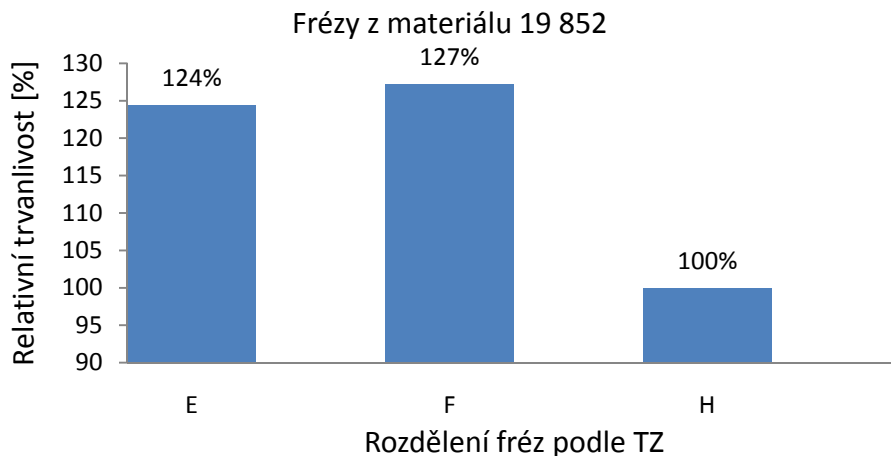
Tab. 4.10 Hodnoty trvanlivosti fréz a porovnání kryogenně tepelně zpracovaných fréz s klasicky tepelně zpracovanými frézami z materiálu 19 830

Fréza	$t_{VB}$ [min]	Frézy podle TZ	$\overline{t_{VB}}$ [min]	Relativní trvanlivost [%]
52/1	44,5	E	44,5	124%
52/2	44,5			
52/3	47,5	F	45,5	127%
52/4	43,5			
52/9	36	H	35,75	100%
52/10	35,5			

Tab. 4.11 Hodnoty trvanlivosti fréz a porovnání kryogenně tepelně zpracovaných fréz s klasicky tepelně zpracovanými frézami z materiálu 19 852



Graf 4.4 Porovnání kryogenně tepelně zpracovaných fréz s klasicky tepelně zpracovanými frézami z materiálu 19 830



Graf 4.5 Porovnání kryogenně tepelně zpracovaných fréz s klasicky tepelně zpracovanými frézami z materiálu 19 852

Doplňující testy potvrdily očekávání. Kryogenní tepelné zpracování nástrojů z materiálu 19 852 mělo stejný přínos jako v první sérii testů. Dále se potvrdilo, že změna řezných podmínek v první sérii byla opodstatněná, jelikož frézy skupiny A z materiálu 19 830 dosáhly výraznějšího zlepšení trvanlivosti břitu proti klasicky tepelně zpracovaným frézám skupiny D.

#### 4.2 Experiment kryogenně tepelně zpracovaných soustružnických nožů

Experiment s kryogenně tepelně zpracovanými soustružnickými noži byl v první fázi rozdělen na dvě části, obdobně jako tomu bylo u testování kryogenně zpracovaných fréz. Nejprve byl experiment rozdělen podle řezného materiálu soustružnických nožů. Nože z oceli 19 856 byly testovány ve firmě COMTES FHT a.s.. Testování trvanlivosti nožů z oceli 19 830 probíhaly v halové laboratoři katedry technologie obrábění Západočeské univerzity v Plzni na stroji Masturn 50 od firmy Kovosvit Sezimovo Ústí (viz Obr. 4.5). Tento stroj nebyl vybaven plnohodnotným řídicím systémem a programování bylo řešeno pomocí cyklů. Programování pohybu nástroje pomocí zmíněných cyklů bylo značně nepružné, proto bylo po konzultaci s ing. Matějkou, který s tímto soustruhem má největší zkušenosti, rozhodnuto provádět testy pomocí ručního řízení. Při ručním řízení bylo možné nastavit konstantní řeznou rychlost a požadovaný posuv nástroje. Najíždění do místa řezu, nastavování hloubky řezu, odjíždění z místa řezu a přejíždění mimo obrobku bylo prováděno ručně. Aby se nástroj pohyboval nastaveným pracovním posuvem, bylo nutné stlačit a držet příslušný ovládací prvek.



Obr. 4.5 Soustruh MAS Masturn 50

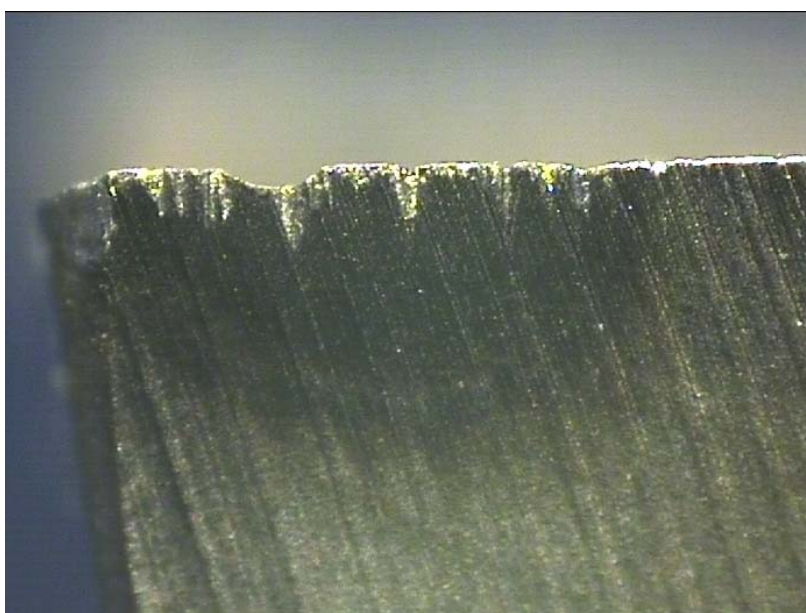
Testování trvanlivosti soustružnických nožů bylo prováděno na obrobku z tyčoviny. Tyčovina byla z oceli 11 523.0 o rozměrech polotovaru  $\text{Ø}170 \times 600 \text{ mm}$ . Testované nástroje byly monolitní ubírací soustružnické nože pravé.

Jelikož nebyla dráha nástroje předem jasně stanovená NC programem a se změnou obráběného průměru se měnila posuvová rychlost nástroje, bylo opotřebenění nástrojů měřeno po stejné době řezu. Tato doba byla měřena pomocí stopky. Když bylo dosaženo předem dané doby řezu, bylo nástrojem vyjeto z řezu a byla změřena hodnota opotřebenění na mikroskopu Multicheck PC 500. Postup měření opotřebenění soustružnických nožů se částečně lišil od měření válcových fréz. Především se jednalo o umístění měřeného nástroje v mikroskopu. Pro soustružnické nože bylo třeba vyskládat několik ocelových kvádrů na sebe. Na tyto kvádry se následně položil měřený soustružnický nůž. Podložení nože bylo nezbytné, protože rozsah pojezdu objektivu v ose z neumožňuje sjet tak nízko nad granitovou desku. Pro měření se stejně jako u měření fréz používal objektiv se 75 násobným zvětšením. Po změření opotřebenění bříty nástroje byl nasazen další nástroj, aby všechny nástroje měly stejné záběrové podmínky, které se mění se změnou obráběného průměru. Ke střídání nástrojů docházelo na základě stanoveného schématu (viz Obr. 4.6).

Obráběný průměr	Nástroj a ujetá dráha od počátku obrobku v ose X					
167	R (96,11 mm)	1 (192,22 mm)	3 (288,33 mm)	5 (384,44 mm)	7 (480,55 mm)	9 (576,66 mm)
163	6 (98,47 mm)	8 (197,21 mm)	10 (295,68 mm)	4 (394,15 mm)	2 (492,62 mm)	3 (571,94 mm)
159	10 (120,57 mm)	2 (221,51 mm)	R (322,45 mm)	6 (423,39 mm)	4 (524,33 mm)	5 (566,63 mm)
155	5 (60,16 mm)	7 (163,71 mm)	1 (267,26 mm)	9 (370,81 mm)	8 (474,36 mm)	R (561,66 mm)
151	R (16,6 mm)	7 (122,98 mm)	4 (229,38 mm)	6 (335,58 mm)	1 (441,88 mm)	8 (548,18 mm)
147	2 (109,19 mm)	5 (218,38 mm)	10 (327,57 mm)	3 (436,76 mm)	9 (545,95 mm)	
143	8 (112,24 mm)	3 (234,48 mm)	7 (336,72 mm)	10 (448,96 mm)	1 (523,96 mm)	
139	1 (38,32 mm)	4 (153,79 mm)	R (269,26 mm)	2 (384,73 mm)	6 (500,2 mm)	
135	5 (118,9 mm)	9 (237,8 mm)				

Obr. 4.6 Rozvržení postupného střídání nožů a předpokládané ujeté dráhy nožů

V průběhu testování soustružnických nožů se objevil charakteristický vývoj opotřebení ve formě vrubu (viz Obr. 4.7). Nejčastěji se vrub vytvářel na břitu nástroje v místě styku nástroje s obráběnou plochou. Vlivem otupování špičky nástrojů a častého opětovného najíždění na hloubku řezu, se zmíněný vrub posléze rozšiřoval.



Obr. 4.7 Charakteristické opotřebení testovaných soustružnických nožů

#### 4.2.1 Testování soustružnických nožů z oceli 19 830

Testování probíhalo podle navržených řezných podmínek (viz Tab. 4.12). Ve schematickém rozvržení postupného testování soustružnických nožů (viz Obr. 4.6) se vyskytuje nůž s označením „R“. Tento nůž byl referenční, jednalo se o soustružnický nůž

uběrací pravý. Řezná část nástroje byla z materiálu 19 830 a tato řezná část byla natupo svařena s tělem soustružnického nože. Jednalo se o běžně dostupný nůž, který byl zakoupen pro porovnání hodnot trvanlivosti s klasicky tepelně zpracovanými noži s označením 30/9 a 30/10. Tepelné zpracování veškerých testovaných soustružnických nožů z materiálu 19 830 se nachází v tabulce Tab. 3.4. Referenční nůž s označením „R“ byl podle výrobce obdobně tepelně zpracován jako testované nože s označením 30/9 a 30/10.

Řezná rychlost	$v_c$	56 m/min
Posuv na otáčku	$f_o$	0,12 mm
Hloubka řezu	$a_p$	2 mm
Kritériální opotřebení břítu	$VB_B$ krit	0,2 mm
Minimální doba řezu	$t_{min}$	30 min

Tab. 4.12 Řezné podmínky při testování soustružnických nožů z oceli 19 830

Během testu byla nejprve zjišťována hodnota opotřebení po 30 minutách řezu. Aby bylo možné sestavit graf s průběhem hodnoty opotřebení v závislosti na čase, byla doba řezu rozdělena na 4 měření po 7,5 minutách. Některé testované nože nedosáhly po 30 minutách v řezu kritériálního opotřebení břítu. Těmito noži se dále obrábělo, dokud hodnota opotřebení nedosáhla stanovené kritické hodnoty. Výstupem z této části testování byla tabulka Tab. 4.13 s naměřenými hodnotami opotřebení.

Nástroj	Měření	1	2	3	4	5	6
30/1	Doba řezu [min]	07:31	15:06	22:37	30:13	37:44	45:14
	$VB_B$ [mm]	0,08	0,091	0,144	0,144	0,182	0,224
	$VB_{B\ max}$ [mm]			0,203	0,224	0,262	0,288
30/2	Doba řezu [min]	07:34	14:57	22:23	29:51	37:23	
	$VB_B$ [mm]	0,08	0,123	0,155	0,166	0,203	
	$VB_{B\ max}$ [mm]			0,214	0,24	0,278	
30/3	Doba řezu [min]	07:29	15:22	22:53	30:23		
	$VB_B$ [mm]	0,08	0,134	0,155	0,224		
	$VB_{B\ max}$ [mm]				0,278		
30/4	Doba řezu [min]	07:30	14:56	22:27	29:57		
	$VB_B$ [mm]	0,24	0,299	0,449	0,534		
	$VB_{B\ max}$ [mm]		0,769	0,769	0,78		
30/5	Doba řezu [min]	07:17	14:46	22:16	29:52		
	$VB_B$ [mm]	0,09	0,139	0,187	0,214		
	$VB_{B\ max}$ [mm]				0,287		

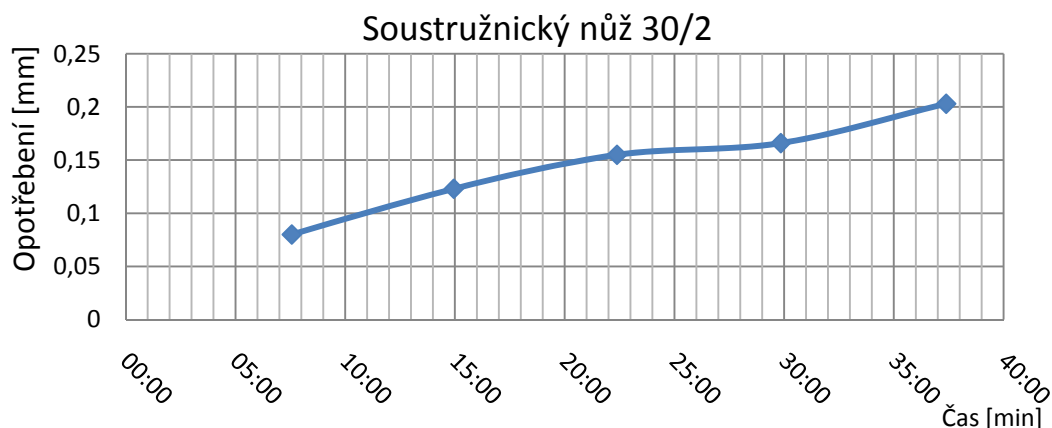
Tab. 4.13 Naměřené hodnoty opotřebení v průběhu testování soustružnických nožů z materiálu 19 830

Nástroj	Měření	1	2	3	4	5
30/6	Doba řezu [min]	07:35	15:06	22:49	30:21	
	$VB_B$ [mm]	0,08	0,134	0,16	0,187	
	$VB_{B \max}$ [mm]			0,294	0,294	
30/7	Doba řezu [min]	07:34	15:03	22:37	30:15	37:45
	$VB_B$ [mm]	0,09	0,134	0,182	0,198	0,214
	$VB_{B \max}$ [mm]			0,246	0,278	0,299
30/8	Doba řezu [min]	07:36	14:57	22:37	30:21	37:51
	$VB_B$ [mm]	0,09	0,117	0,16	0,192	0,219
	$VB_{B \max}$ [mm]			0,279	0,279	0,32
30/9	Doba řezu [min]	07:32	15:05	22:43	30:17	37:48
	$VB_B$ [mm]	0,09	0,144	0,171	0,192	0,224
	$VB_{B \max}$ [mm]			0,23	0,262	0,272
30/10	Doba řezu [min]	07:24	14:40	22:12	29:55	37:28
	$VB_B$ [mm]	0,09	0,112	0,155	0,192	0,208
	$VB_{B \max}$ [mm]			0,24	0,256	0,283
R	Doba řezu [min]	07:29	14:51	22:25	29:56	
	$VB_B$ [mm]	0,08	0,187	0,256	0,283	
	$VB_{B \max}$ [mm]			0,368	0,411	

Tab. 4.13 Naměřené hodnoty opotřebení v průběhu testování soustružnických nožů z materiálu 19 830 (pokračování)

Hodnota  $VB_B$  byla stanovena jako rovnoměrné opotřebení břitu testovaných nástrojů. Toto rovnoměrné opotřebení bylo stanovováno odborným odhadem. Hodnota  $VB_{B \max}$  je velikost maximálního opotřebení břitu v místě, kde se vyskytlo vrubové opotřebení nástroje.

Ve sloupci 4 tabulky Tab. 4.13 jsou zvýrazněny hodnoty opotřebení jednotlivých testovaných nožů přibližně po 30 minutách řezu. Jemné odchylky v čase měření byly způsobeny vlivy, které jsou podrobně popsány níže v kapitole 4.2.4.



Graf 4.6 Příklad grafu závislosti opotřebení soustružnického nože na čase řezání

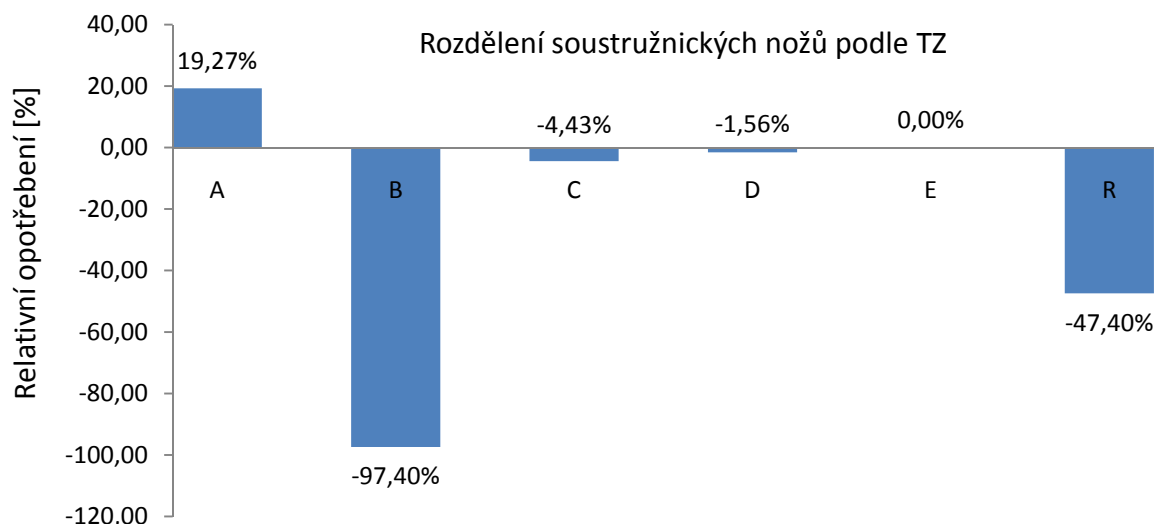


Z naměřených hodnot opotřebení byly sestrojeny grafy závislosti míry opotřebení na době řezání (viz Graf 4.6). Následně byla zpracována tabulka Tab. 4.14, kde byly zachyceny hodnoty opotřebení po 30 minutách řezu. Vzhledem k ručnímu měření času (stopkami) docházelo k odchylkám v době řezu od stanovaných 30 minut. Odchytky byly řádově ve vteřinách a při měření velikosti opotřebení břitu byly zanedbatelné. Dále byla tabulka Tab. 4.14 rozšířena o porovnání relativního opotřebení jednotlivých skupin nástrojů se stejným tepelným zpracováním. Předpis tepelného zpracování je přesně popsán v tabulce Tab. 3.4, která je uvedena výše. Nástroje skupiny A až D byly kryogenně tepelně zpracovány, nástroje skupiny E byly klasicky tepelně zpracovány a nástroj skupiny R byl referenční. Relativní opotřebení bylo porovnáváno vůči průměrnému opotřebení nástrojů skupiny E.

Nástroj	VB <sub>30</sub> [mm]	Skupina	$\overline{VB}_{30}$ [mm]	Relativní opotřebení [%]
30/1	0,144	A	0,155	19,27%
30/2	0,166			
30/3	0,224	B	0,379	-97,40%
30/4	0,534			
30/5	0,214	C	0,201	-4,43%
30/6	0,187			
30/7	0,198	D	0,195	-1,56%
30/8	0,192			
30/9	0,192	E	0,192	0,00%
30/10	0,192			
30/R	0,283	R	0,283	-47,40%

Tab. 4.14 Hodnoty opotřebení nástrojů po 30 minutách řezu a porovnání relativního opotřebení kryogenně zpracovaných nástrojů vůči klasicky tepelně zpracovaným nástrojům

Z tabulky Tab. 4.14 byl sestrojen Graf 4.7, kde byly graficky znázorněny výsledky porovnání relativního opotřebení kryogenně zpracovaných nástrojů vůči klasicky tepelně zpracovaným nástrojům.

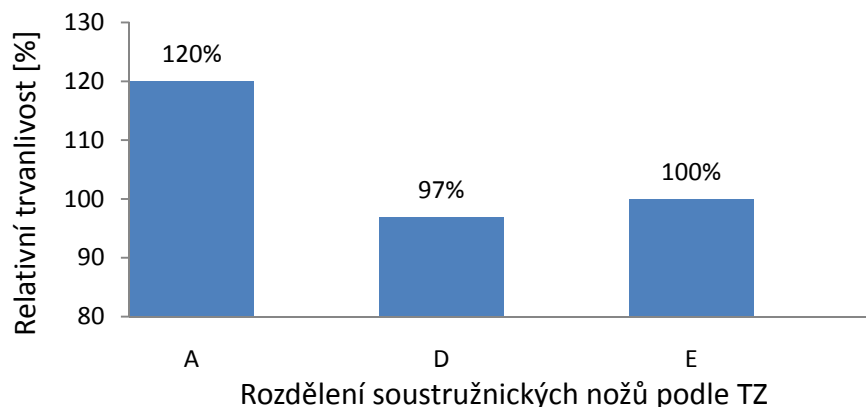


Graf 4.7 Grafické znázornění výsledků relativního opotřebení kryogenně zpracovaných nástrojů vůči klasicky tepelně zpracovaným nástrojům

Dalším kritériem pro hodnocení byla trvanlivost nástrojů při kritickém opotřebení 0,2 mm, dosažené hodnoty byly zaznamenány do tabulky Tab. 4.15. V této tabulce byly zachyceny pouze ty nástroje, které nedosáhly kritické hodnoty opotřebení do 30 minut řezu. Těmito nástroji byly nástroje skupiny A, D a E. V tabulce Tab. 4.15 byla uvedena relativní trvanlivost kryogenně zpracovaných soustružnických nožů vůči klasicky tepelně zpracovaným nožům. Výsledek porovnání relativní trvanlivosti byl následně graficky znázorněn v grafu Graf 4.8.

Nástroj	$t_{VB}$ [min]	Skupina	$\overline{t_{VB}}$ [min]	Relativní trvanlivost [%]
30/1	41	A	39	120,0%
30/2	37			
30/7	31	D	31,5	96,9%
30/8	32			
30/9	32	E	32,5	100,0%
30/10	33			

Tab. 4.15 Hodnoty trvanlivosti nástrojů při dosažení kritické míry opotřebení a porovnání relativního opotřebení kryogenně zpracovaných soustružnických nožů vůči klasicky tepelně zpracovaným soustružnickým nožům



Graf 4.8 Grafické znázornění relativní trvanlivosti kryogenně zpracovaných soustružnických nožů vůči klasicky tepelně zpracovaným soustružnickým nožům

#### 4.2.2 Testování soustružnických nožů z oceli 19 856

Jak již bylo zmíněno výše, prvotní testování soustružnických nožů z oceli 19 856 probíhalo ve firmě COMTES FHT a.s.. Testování probíhalo na CNC soustružnickém centru SKT 250M od výrobce Hyundai – Kia. Zbylé parametry testu byly shodné s testem soustružnických nožů z oceli 19 830. Obráběný tedy byl tyčový materiál z oceli 11 523.0 o rozměrech Ø170 x 600 mm. Řezné podmínky byly uvedeny v předcházející tabulce Tab. 4.12. Dále se ovšem lišila kritéria pro vyhodnocování experimentu. Při tomto testu byla sledována míra opotřebení nejprve po 30 minutách řezu, následně byla z nedostatečných rozdílů ve výsledcích doba řezu zvýšena na 60 minut a dále na 90 minut. Vždy po 3é, 60 a 90 minutách doby řezu bylo provedeno měření opotřebení jednotlivých nožů za pomoci lupy s měřítkem. Výsledky z tohoto experimentu byly zaznamenány do tabulky Tab. 4.16.

Nástroj číslo	VB [mm]			$\overline{VB}$ [mm]	Relativní trvanlivost [%]
	t=30'	t=60'	t=90'		
56/1	0,18	0,32	0,40	0,41	90,24
56/2	0,24	0,34	0,42		
56/3	0,18	0,27	0,40	0,37	100
56/4	0,18	0,30	0,34		
56/5	0,18	0,29	0,38	0,35	105,71
56/6	0,18	0,26	0,32		
56/7	0,12	0,22	0,38	0,37	100
56/8	0,15	0,26	0,36		
56/9	0,14	0,28	0,38	0,37	100
56/10	0,16	0,26	0,36		

Tab. 4.16 Naměřené hodnoty opotřebení soustružnických nožů z oceli 19 856

#### 4.2.3 Další testování soustružnických nožů

V návaznosti na předcházející testování soustružnických nožů z ocelí 19 830 a 19 856, došlo ve společnosti COMTES FHT a.s. k novému kryogennímu tepelnému zpracování všech dříve použitých soustružnických nožů vyjma referenčního nože 30/R. Po opětovném tepelném zpracování se však u mnohých nástrojů objevily trhliny, čímž se tyto nástroje staly nepoužitelnými. Použitelné byly pouze nástroje s označením 30/7, 30/8, 30/9, 30/10, 56/7, 56/8, 56/9 a 56/10. Nové tepelné zpracování bylo popsáno v následující tabulce Tab. 4.17.

Materiál	19 830				19 856			
Označení soustružnického nože	30/7	30/8	30/9	30/10	56/7	56/8	56/9	56/10
Kalici teplota	1220°C/180“				1245°C/180“			
Ochlazovací médium	0,6 MPa N <sub>2</sub>							
Podchlazení	-150°C/4h		-80°C/5h		-150°C/8h		-80°C/8h	
Popouštění	280°C/2h				300°C/2h			

Tab. 4.17 Nový způsob tepelného zpracování soustružnických nožů z ocelí 19 830 a 19 856

Po novém tepelném zpracování byla trvanlivost nástrojů testována ve firmě COMTES FHT a.s.. Test probíhal za stejných podmínek jako předcházející test se soustružnickými noži z oceli 19 856, který je detailněji popsán v předcházející kapitole 4.2.2. Výstupem z tohoto testu byla tabulka naměřených hodnot opotřebení po 30 minutách a po 60 minutách řezu (viz Tab. 4.18).

Nástroj	VB	VB <sub>max</sub>	VB	VB <sub>max</sub>	Skupina	$\bar{VB}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
	t=30‘		t=60‘			
56/7	0,25	0,40	0,33	0,45	F	0,320
56/8	0,18	0,35	0,31	0,41		
56/9	0,32	0,45	0,38	0,50	G	0,390
56/10	0,25	0,38	0,40	0,50		
30/7	0,20	0,33	0,30	0,40	H	0,285
30/8	0,20	0,20	0,27			
30/9	0,21		0,23		I	0,265
30/10	0,29	0,30	0,30	0,40		

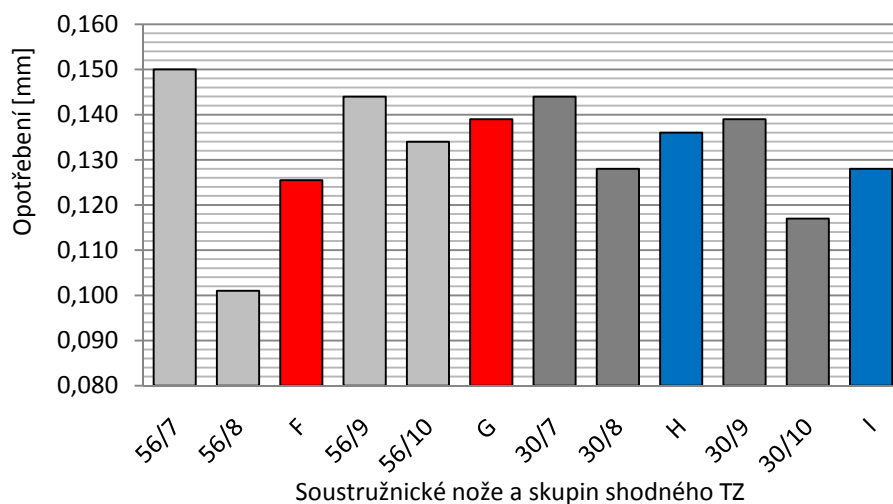
Tab. 4.18 Naměřené hodnoty opotřebení získané při testu soustružnických nožů z ocelí 19 830 a 19 856 provedených ve firmě COMTES FHT a.s.

Po tomto testu ve firmě COMTES FHT a.s. proběhlo přeostření nástrojů a přeostřené nástroje byly znovu nasazeny na testování. V tomto případě se jednalo o test v halové laboratoři katedry technologie obrábění Západočeské univerzity v Plzni. Následující test probíhal na soustruhu Masturn 50 od firmy Kovošvit Sezimovo Ústí. Po sérii předchozích

testů se stejnými řeznými podmínkami, které nepřinesly očekávané výsledky, bylo rozhodnuto vyzkoušet kryogenně zpracované soustružnické nože za vyšších řezných podmínek. Řezná rychlost byla navýšena z 56 m/min na 80 m/min. Zároveň byl zvýšen otáčkový posuv  $f_0 = 0,18$  mm. Těmito řeznými parametry bylo obráběno 15 minut. Jako v předcházejících testech byl obráběn tyčový materiál z oceli 11 523.0. Po změření jednotlivých hodnot opotřebení byla tato data zaznamenána do tabulky Tab. 4.19 a graficky znázorněny v grafu Graf 4.9.

Nástroj	VB	VB <sub>max</sub>	Skupina	VB
	[mm]	[mm]		[mm]
$t = 15'$				
56/7	0,150	0,352	F	0,1255
56/8	0,101	0,171		
56/9	0,144	0,278	G	0,1390
56/10	0,134	0,171		
30/7	0,144	0,326	H	0,1360
30/8	0,128	0,283		
30/9	0,139	0,262	I	0,1280
30/10	0,117	0,203		

Tab. 4.19 Hodnoty opotřebení soustružnických nožů po 15 minutách v řezu při zvýšených řezných parametrech



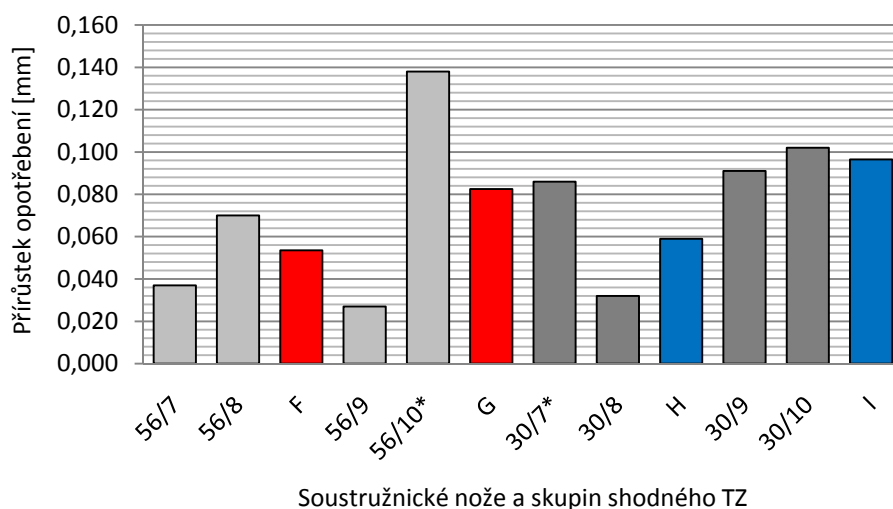
Graf 4.9 Grafické znázornění hodnot opotřebení jednotlivých soustružnických nožů a průměrného opotřebení soustružnických nožů se stejným režimem TZ

Použití vyšších řezných parametrů nepřineslo výraznější rozdíly v naměřených hodnotách opotřebení a nedošlo k odstranění problému s plynulou třískou, proto bylo operativně rozhodnuto otestovat soustružnické nože při nových řezných podmínkách. Řezná rychlost byla snížena na 60 m/min a otáčkový posuv byl výrazně navýšen na 0,35 mm. Tyto řezné parametry byly zvoleny na základě krátkého testu, kdy byla sledována vytvářená tříška.

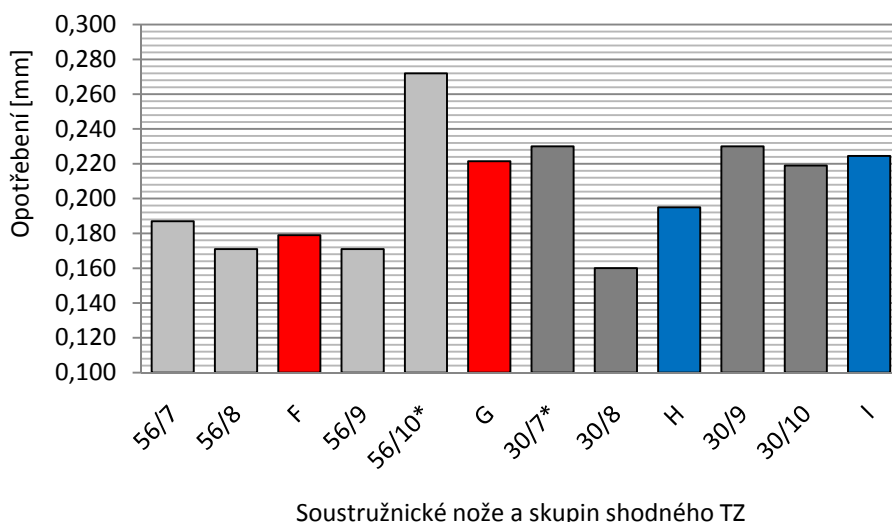
Především bylo sledováno, jak tříška odchází z místa řezu a jak dochází k dělení vznikající třísky, aby bylo zabráněno namotávání třísky na nástroje. Nasazení takto vysokého posuvu a řezné rychlosti však přineslo nečekaný problém. Vlivem narůstajícího opotřebení jednotlivých nožů došlo k nárůstu řezných sil na takovou hranici, že byla vyčerpána tuhost obráběcího stroje. Vyčerpání tuhosti se projevilo silným akustickým signálem a vibracemi. Následně byla řezná rychlost korigována na 50 m/min. Toto snížení řezné rychlosti bylo dostatečné a projevy spojené s vyčerpáním tuhosti obráběcího stroje se už neobjevily. Z důvodu výše zmíněných potíží bylo obráběno těmito řeznými parametry pouze 5 minut. V tabulce Tab. 4.20 byly zaznamenány hodnoty přírůstku opotřebení a hodnoty konečného opotřebení dosažené po ukončení série testů prováděných v halové laboratoři katedry technologie obrábění. V grafech Graf 4.10 a Graf 4.11 byly zachyceny hodnoty přírůstku opotřebení a hodnoty konečného opotřebení uvedené v tabulce Tab. 4.20.

Nástroj	VBpoč [mm]	VBkon [mm]	$\Delta VB$ [mm]	VBmax [mm]	Skupina	$\overline{\Delta VB}$ [mm]	$\overline{VB}$ [mm]
56/7	0,150	0,187	0,037	0,449	F	0,0535	0,1790
56/8	0,101	0,171	0,070	0,336			
56/9	0,144	0,171	0,027	0,347	G	0,0825	0,2215
56/10*	0,134	0,272	0,138	0,465			
30/7*	0,144	0,230	0,086	0,347	H	0,0590	0,1950
30/8	0,128	0,160	0,032	0,379			
30/9	0,139	0,230	0,091	0,427	I	0,0965	0,2245
30/10	0,117	0,219	0,102	0,358			

Tab. 4.20 Hodnoty opotřebení soustružnických nožů po 5 minutách v řezu při korigovaných řezných parametrech, nástroje označené „\*“ obráběly řeznou rychlostí  $v_c = 60$  m/min



Graf 4.10 Grafické znázornění přírůstku opotřebení po 5 minutách řezu



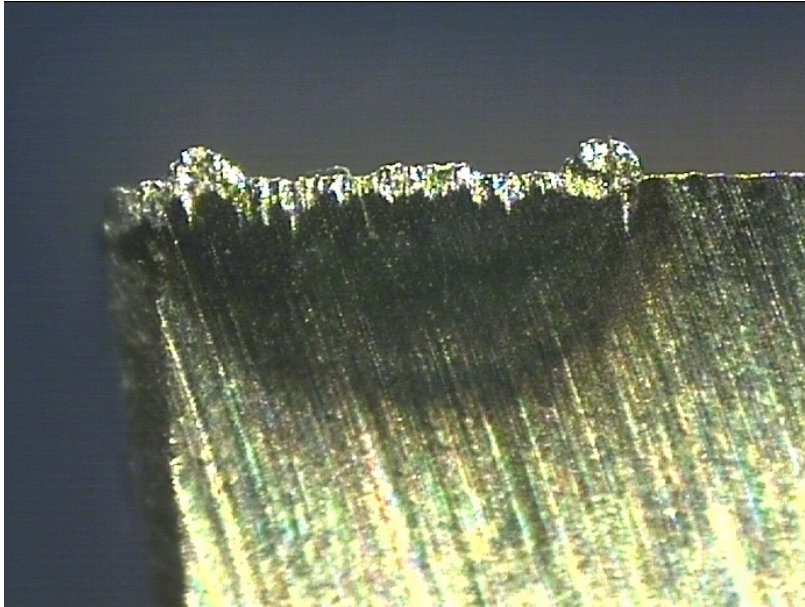
Graf 4.11 Grafické znázornění hodnot opotřebení soustružnických nožů po sérii testování v halové laboratoři katedry technologie obrábění

#### 4.2.4 Problémy při testování soustružnických nožů na soustruhu Masturn 50

Při testování soustružnických nožů se vyskytlo hned několik problémů. První z problémů byl částečně nastíněn v úvodu kapitoly 4.2, kde bylo zmíněno, že soustruh Masturn 50 od firmy Kovosvit Sezimovo Ústí, nebyl vybaven plnohodnotným řídicím systémem. Tento neúplný řídicí systém například neumožňoval programovat pohyby nástroje v ISO kódu, ale podporoval pouze programování v cyklech. Z tohoto důvodu bylo v průběhu obrábění nutné soustavně držet stisknutý ovládací prvek pro pracovní posuv nástroje. Obsluha provádějící měření měla volnou pouze jednu ruku pro vykonávání dalších činností, jako byly odjezdy z místa řezu, operování se stopkami na měření doby řezu a odstraňování případné třísky, která se namotala na nástroj, čímž bránila v plynulém přívodu procesní kapaliny. Zároveň byla obsluha vystavena monotónnímu zatížení prstů jedné ruky, kterými byl ovládací prvek stlačen.

Další z problémů bylo namotávání třísky na nástroj. Vzhledem k povaze obráběného materiálu a řezným parametrům se tvořila plynulá šroubovitá tříska. Bylo nutné zabránit v namotávání třísky na nástroj, a proto bylo nutné často přerušovat řez, odstraňovat namotanou třísku a znovu najíždět do místa řezu. Tento fakt mohl značně ovlivnit měření, protože nebylo v silách obsluhy, aby zaručila stejné podmínky testování pro všechny nástroje. Byla snaha tento problém odstranit změnou řezných parametrů, avšak při hledání optimálních řezných podmínek pro lepší dělení třísky, byla vlivem velkých řezných sil překročena tuhost obráběcího stroje, což znemožnilo produktivní nasazení těchto optimálních řezných podmínek.

Během testování soustružnických nožů se soustavně na břitu vytvářel nárůstek (viz Obr. 4.8). Tento nárůstek znemožňoval odečtení hodnoty opotřebení na dílenském mikroskopu, a proto bylo zapotřebí nárůstek před měřením odstranit. Odstraňováním nárůstku mohlo dojít k vylomení i části břitu, což by také negativně ovlivnilo výsledky měření.



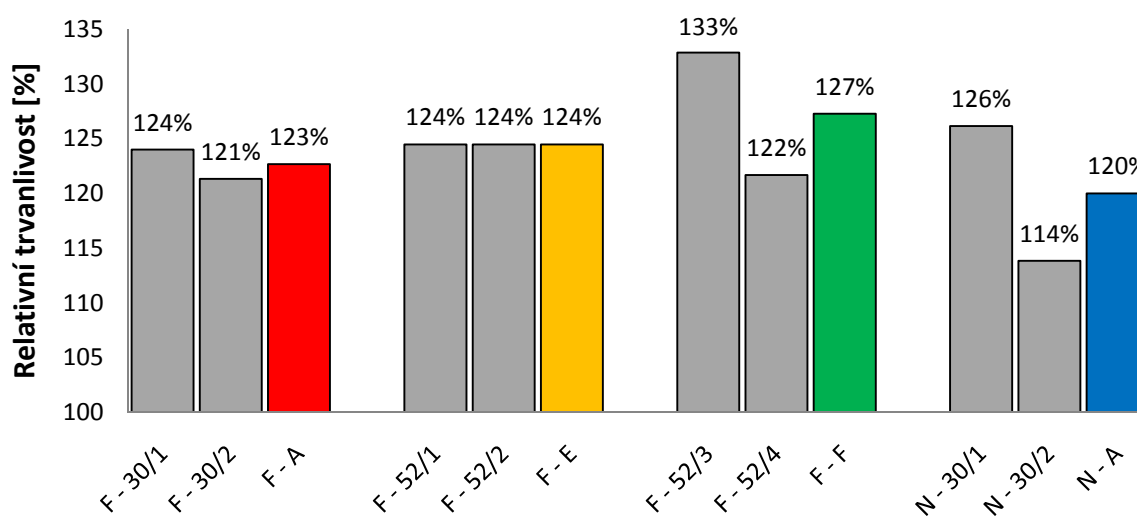
Obr. 4.8 Snímek nárůstku na břitu soustružnického nože



## 5 Technicko-ekonomické zhodnocení

Kryogenní tepelné zpracování nástrojů je dražší než klasické tepelné zpracování. Aby bylo možné rozhodnout, zda se ekonomicky vyplatí nástroje kryogenně zpracovávat, je zapotřebí porovnat navýšení ceny nástroje s nárůstem trvanlivosti. Podle ceníku společnosti COMTES FHT a.s., kde byla část nástrojů použitých při experimentech tepelně zpracovávána, stojí klasické tepelné zpracování 95 Kč za jeden kilogram vsázky. Při kryogenním tepelném zpracování se cena jednoho kilogramu vsázky navýší o 25 Kč. Pokud je vyjádřeno navýšení ceny v procentech, jedná se o 26% nárůst ceny. Z toho vyplývá, že nástroje, které mají relativní trvanlivost o 26% vyšší než klasicky tepelně zpracované nástroje, jsou ekonomicky přínosné.

Během experimentálních testů bylo dosaženo 26% nárůstu trvanlivosti pouze u fréz skupiny F (frézy s označením 52/3 a 52/4). Avšak v průběhu testování se objevily další nástroje, které se k hranici 26% nárůstu přiblížily. Jedná se o průměrnou trvanlivost fréz skupiny E (frézy s označením 52/1 a 52/2), které zaznamenaly průměrný nárůst trvanlivosti o 24%, frézy skupiny A (frézy s označením 30/1 a 30/2), které dosáhly 23% nárůstu průměrné trvanlivosti, a soustružnické nože skupiny A (soustružnické nože s označením 30/1 a 30/2), kde průměrná trvanlivost narostla o 20%. Nárůst trvanlivosti byl stanovován vůči klasicky tepelně zpracovaným nástrojům, které byly ze shodného řezného materiálu, a bylo s nimi obráběno za shodných podmínek. Graf 5.1 uvádí relativní trvanlivosti jednotlivých nástrojů a průměrnou relativní trvanlivost skupin nástrojů se shodným kryogenním tepelným zpracováním.



Graf 5.1 Souhrn přírůstku relativních trvanlivostí vybraných nástrojů; označení typu nástroje  
F – čelní válcové frézy, N – přímé uběrací soustružnické nože

Vlivem změny řezných podmínek se během testů měnila i relativní trvanlivost jednotlivých nástrojů s kryogenním tepelným zpracováním. Proto je možné, že kryogenní tepelné zpracování může přinést větší nárůst relativní trvanlivosti, než bylo zaznamenáno v této práci. Měla by být věnována větší pozornost vhodnému zvolení řezných parametrů, případně nalézt vhodné řezné parametry novou sérií experimentů.

Například změna řezných parametrů mezi prvotním testováním fréz z materiálu 19 830 a doplňkovým testováním těchto fréz přinesla zvýšení relativní trvanlivosti fréz skupiny A (frézy s označením 30/1 a 30/2) z 13% na 23%. Přičemž došlo pouze k výraznější změně šířky řezu, ostatní řezné parametry se změnily minimálně.

### 5.1 Porovnání s výsledky nástrojů s deponovanou tenkou vrstvou

V bakalářské práci s názvem „Výzkum vzájemných vazeb procesních a technologických parametrů u řezných nástrojů s povlaky“ byly provedeny experimenty s nástroji opatřenými tenkými vrstvami. Na základě těchto experimentů byl zjištěn nárůst relativní trvanlivosti proti nástrojům bez deponované vrstvy o 29 – 53% (viz Graf 5.2). [5]

Porovnat náklady na depozici tenkých vrstev a kryogenní tepelné zpracování by bylo obtížné, protože cena deponované vrstvy byla stanovena na jeden nástroj, zatím co cena kryogenního tepelného zpracování byla stanovena na jeden kilogram vsázky. Navíc při depozici tenké vrstvy byl předpoklad, že použitý nástroj bude výrazně dražší než samotná depozice tenké vrstvy.



Graf 5.2 Relativní trvanlivost fréz s deponovanou tenkou vrstvou vůči frézám bez deponované vrstvy [5]

Vyskytly se však i nástroje s deponovanou tenkou vrstvou, které nedosáhly ani trvanlivosti nástrojů bez deponované vrstvy. Obdobné negativní výsledky byly zaznamenány i při experimentech s kryogenně tepelně zpracovanými nástroji, kdy některé kryogenně zpracované nástroje nedosáhly trvanlivosti klasicky tepelně zpracovaných nástrojů.

V průběhu prací se objevila myšlenka možné pozitivní interakce kryogenně tepelně zpracovaného substrátu a deponované tenké vrstvy. Tato interakce by mohla mít významný vliv na výslednou trvanlivost takto zpracovaných nástrojů. Může být očekáváno, že zlepšením vlastností substrátu kryogenním tepelným zpracováním, dojde i ke zlepšení vlastností deponované tenké vrstvy, protože vlastnosti deponované vrstvy významně závisí na kvalitě substrátu.

Na druhou stranu by zvýšení trvanlivosti muselo být tak zásadní, aby byly vyváženy dodatečné náklady vynaložené na kryogenní tepelné zpracování substrátu a depozici tenké vrstvy.

## 6 Závěry, návrh dalšího řešení

Tato práce dokázala, že ve většině případů kryogenní tepelné zpracování zvyšuje trvanlivost řezných nástrojů. V experimentální části práce byla zjištěna silná vazba mezi druhem rychlořezné oceli a režimem kryogenního tepelného zpracování. Každý druh rychlořezné oceli vyžaduje specifický režim kryogenního tepelného zpracování, aby bylo dosaženo maximálního zvýšení trvanlivosti nástroje. Zvýšení trvanlivosti kryogenně tepelně zpracovaných nástrojů je významně ovlivněno řeznými parametry použitými v procesu obrábění.

Z ekonomického hlediska se v práci ukázalo, že bude zapotřebí dosahovat výraznějšího zvýšení trvanlivosti nástrojů, protože kryogenní tepelné zpracování je nákladnější než klasické tepelné zpracování. Ovšem ekonomické hodnocení je založeno pouze na datech od jednoho dodavatele kryogenního tepelného zpracování, který upravoval část nástrojů použitých v experimentální části této práce. V případě nasazení kryogenního tepelného zpracování do výroby je možné předpokládat, že dojde ke snížení nákladů na toto tepelné zpracování z důvodu větší sériovosti. Další možnost, jak snížit náklady na kryogenní tepelné zpracování, může být poptání kryogenního tepelného zpracování u více dodavatelů a následné vybrání nejvhodnějšího dodavatele na základě kvality a ceny dodávaných služeb.

Na tuto práci by mohlo být navázáno experimentálním zjištěním optimálních řezných podmínek, při kterých by kryogenní tepelné zpracování nejvíce zvyšovalo trvanlivost nástrojů z RO. Dále by se v oblasti zvyšování trvanlivosti nástrojů z RO mohlo přistoupit ke kombinaci kryogenního tepelného zpracování a depozici tenkých vrstev, jelikož vlastnosti deponované tenké vrstvy značně závisí na vlastnostech substrátu.

## Seznam použité literatury

- [1] SOVA, F. *Technologie obrábění a montáže*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. 273 s. ISBN 80-7082-823-4
- [2] ŠTĚPÁNEK, I., BLÁHOVÁ, O., KOLEGA, M. *Tenké vrstvy – vytváření, vlastnosti*. Plzeň 1994. ISBN 80-969310-1-6
- [3] KRAUS, V. *Tepelné zpracování a slinování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. 273 s. ISBN 80-7082-582-0
- [4] HOFMANN, P. *Podklady k předmětu teorie obrábění*. Plzeň, 2003
- [5] NĚMEC, J. *Výzkum vzájemných vazeb procesních a technologických parametrů u řezných nástrojů s povlaky*. Plzeň, 2010. bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta strojní. Vedoucí práce Petr Hofmann
- [6] SMITH, J. *Apparatus and method for the deep cryogenic treatment of materials* [patent]. United States Patent, 4739622. Zapsáno 26. 4. 1988
- [7] PECA, P. ŠKODA - ÚVZÚ. *Kryogenní zpracování nástrojových ocelí*. Plzeň, 1988
- [8] IMP. *Report from wear test with aid of amsler machine*. Varšava, 2009
- [9] KESL, M. *Rychlořezné ocele stále aktuální*. [online]. [cit. 20. 04. 2012]. dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rychlomezne-occele-stale-aktualni.html>
- [10] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. [online]. [cit. 12. 03. 2012] dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz>
- [11] GUZANOVÁ, A., BREZINOVÁ, J. *Hodnotenie tribologických procesov v trecom uzle materiálovej dvojice kov - plast*. [online]. [cit. 25. 04. 2012] dostupné z: <http://web.tuke.sk/fvtpo/journal/pdf08/2-str-100-104.pdf>
- [12] PILSEN TOOLS s.r.o. [online]. [cit. 15. 02. 2012] dostupné z: [www.pilsentools.cz](http://www.pilsentools.cz)

## Seznam příloh

### Grafy k prvnímu testu s čelními válcovými frézami z materiálu 19 830

P 1.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/1 na čase .....	III
P 2.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/2 na čase .....	III
P 3.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/3 na čase .....	IV
P 4.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/4 na čase .....	IV
P 5.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/5 na čase .....	V
P 6.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/6 na čase .....	V
P 7.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/9 na čase .....	VI
P 8.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/10 na čase .....	VI

### Grafy k prvnímu testu s čelními válcovými frézami z materiálu 19 852

P 9.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/1 na čase .....	VII
P 10.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/2 na čase .....	VII
P 11.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/3 na čase .....	VIII
P 12.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/4 na čase .....	VIII
P 13.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/5 na čase .....	IX
P 14.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/6 na čase .....	IX
P 15.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/9 na čase .....	X
P 16.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/10 na čase .....	X

### Grafy k doplňujícím testům čelních válcových fréz

P 17.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/1 na čase .....	XI
P 18.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/2 na čase .....	XI
P 19.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/3 na čase .....	XII
P 20.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/4 na čase .....	XII
P 21.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/9 na čase .....	XIII
P 22.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/10 na čase .....	XIII
P 23.	Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/1 na čase .....	XIV

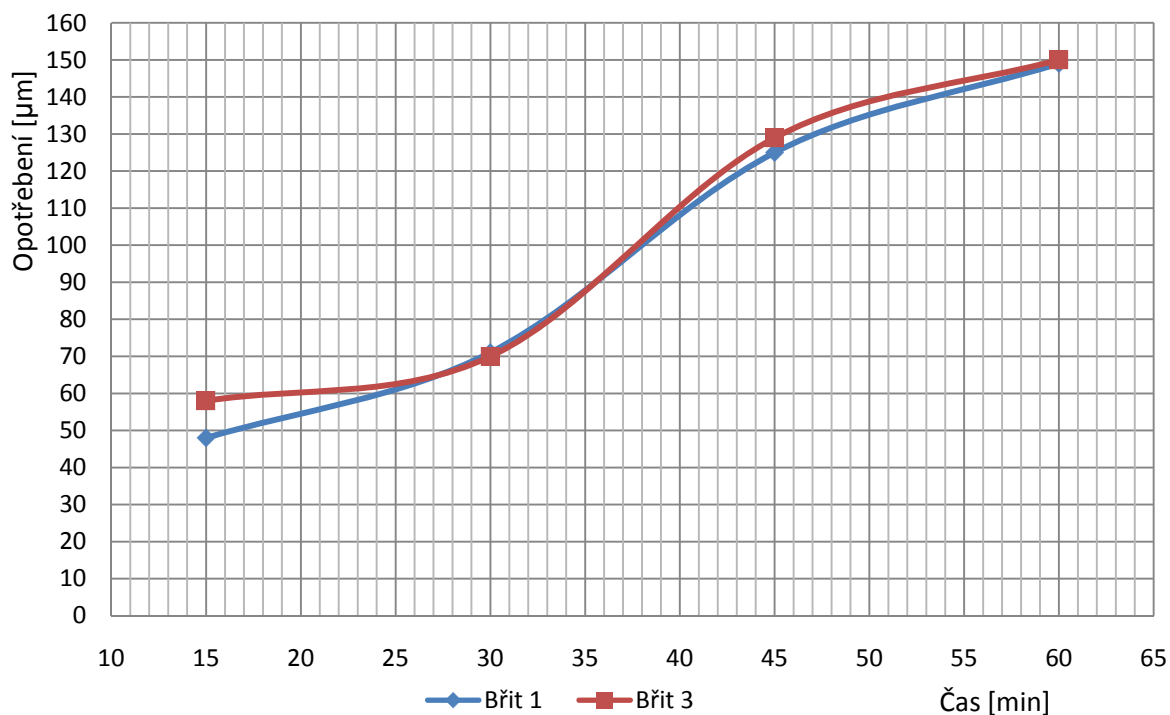
- P 24. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/2 na čase ..... XIV  
P 25. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/3 na čase ..... XV  
P 26. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/4 na čase ..... XV  
P 27. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/9 na čase ..... XVI  
P 28. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/10 na čase ..... XVI

Grafy k prvnímu testu soustružnických nožů z materiálu 19 830

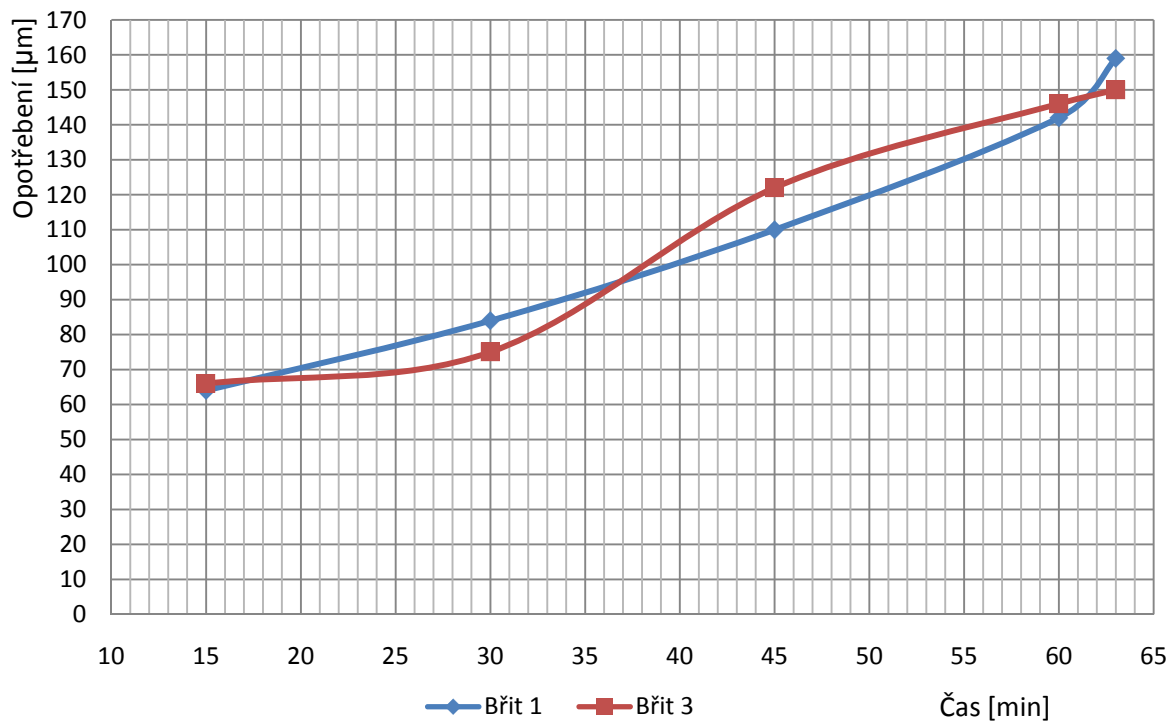
- P 29. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/1 na čase ..... XVII  
P 30. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/2 na čase ..... XVII  
P 31. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/3 na čase ..... XVIII  
P 32. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/4 na čase ..... XVIII  
P 33. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/5 na čase ..... XIX  
P 34. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/6 na čase ..... XIX  
P 35. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/7 na čase ..... XX  
P 36. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/8 na čase ..... XX  
P 37. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/9 na čase ..... XXI  
P 38. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/10 na čase ..... XXI  
P 39. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/R na čase ..... XXII

### Grafy k prvnímu testu s čelními válcovými frézami z materiálu 19 830

P 1. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/1 na čase

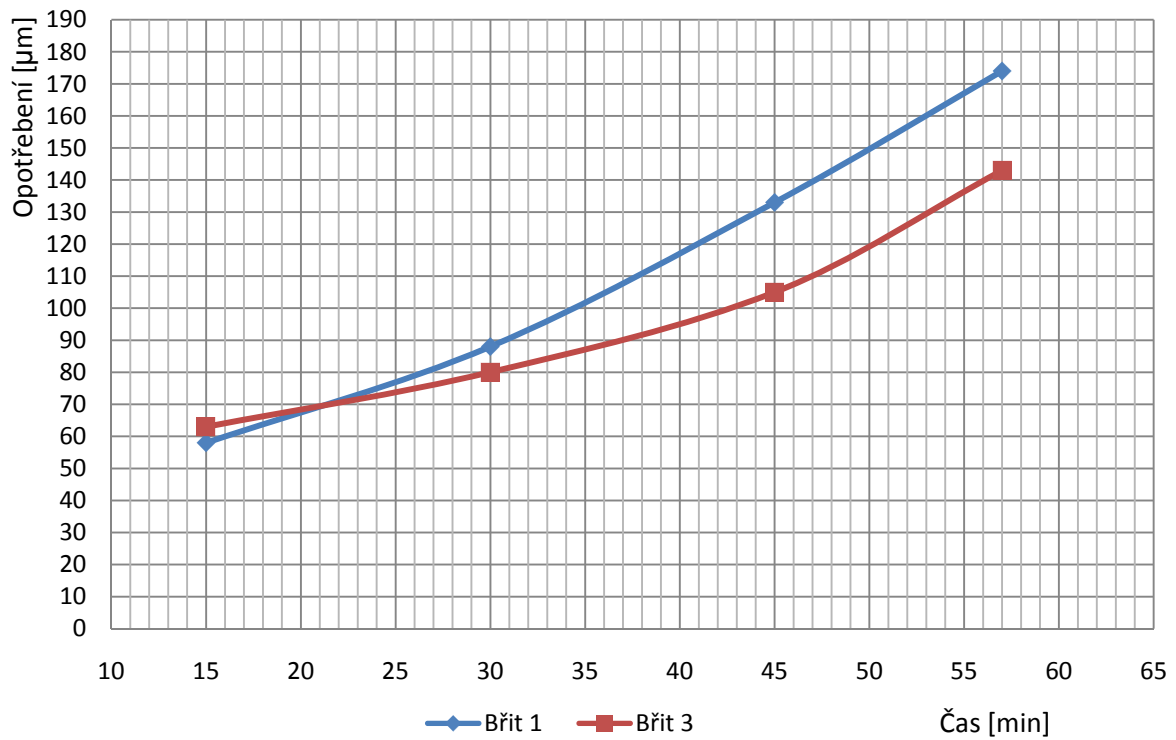


P 2. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/2 na čase

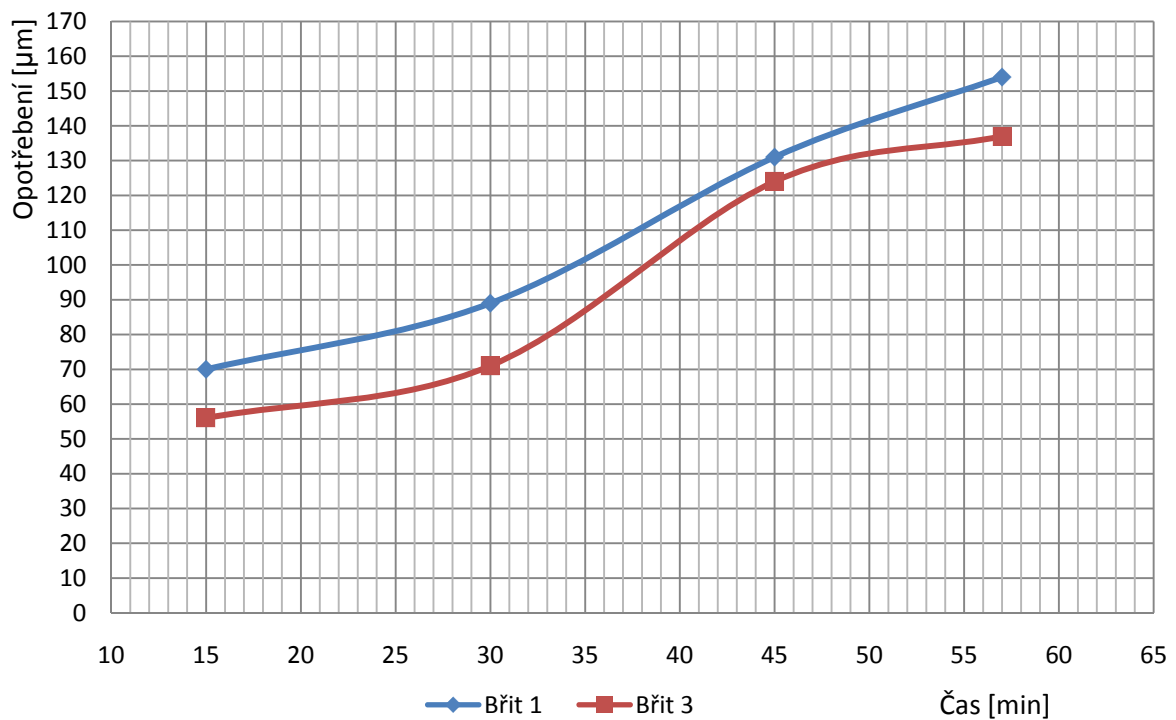




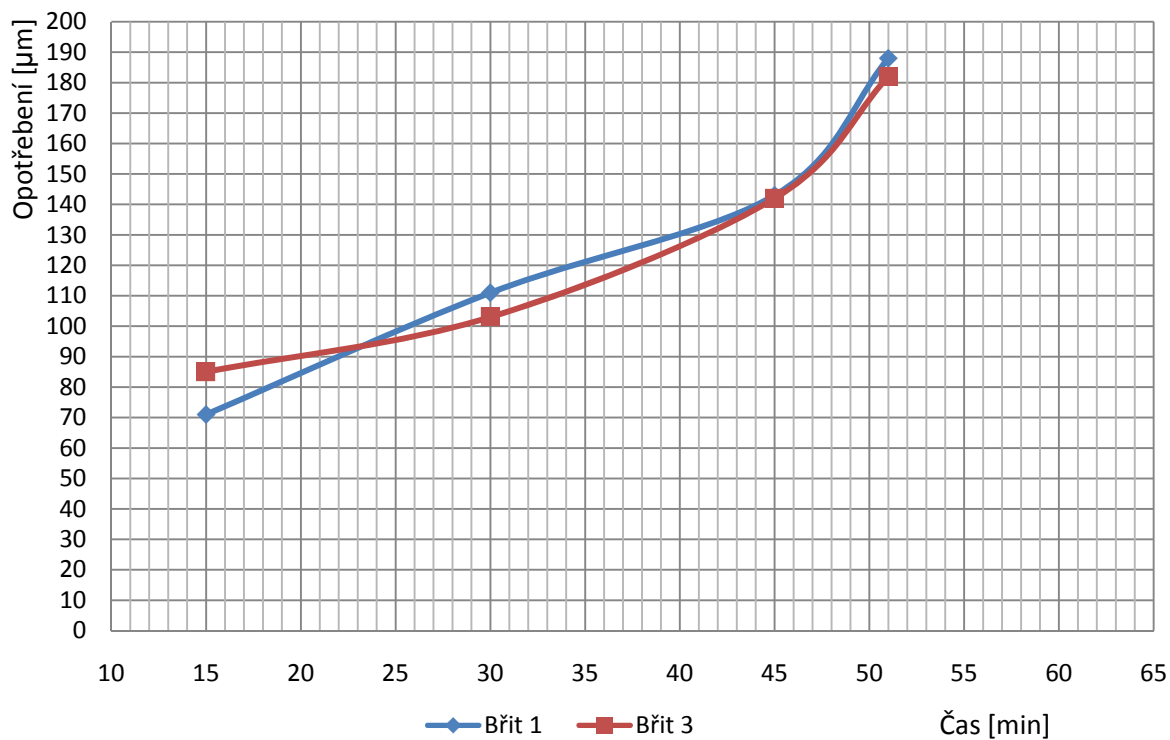
P 3. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/3 na čase



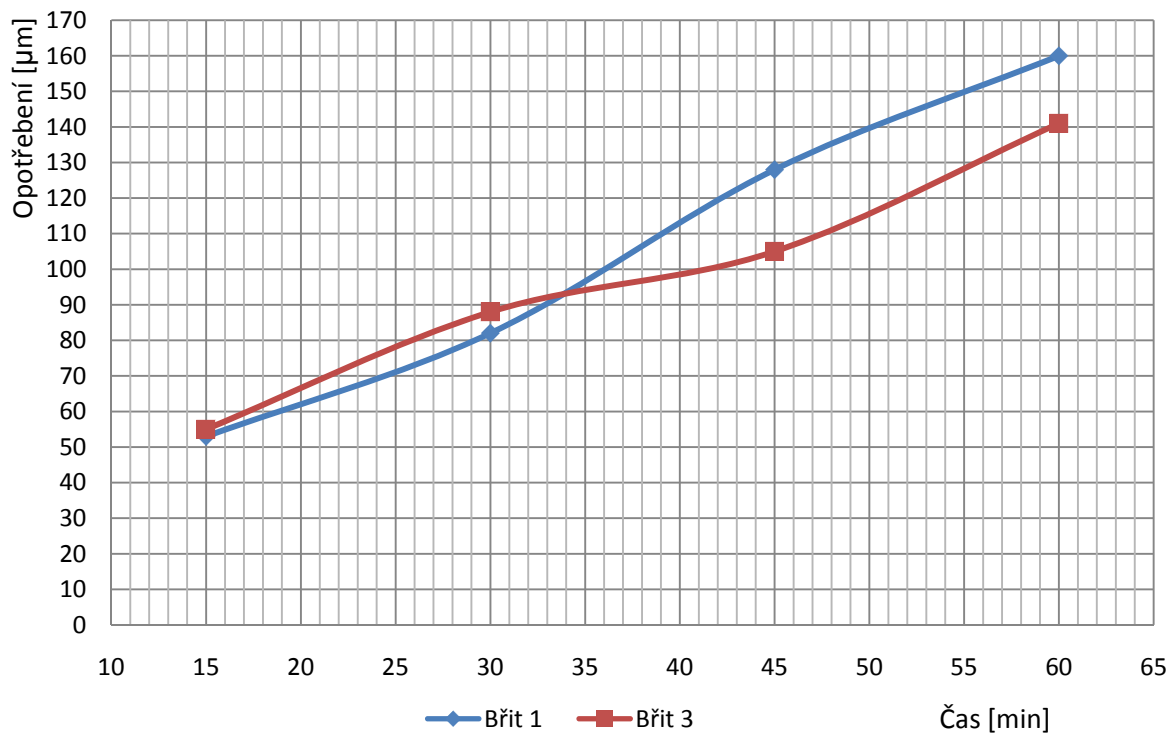
P 4. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/4 na čase



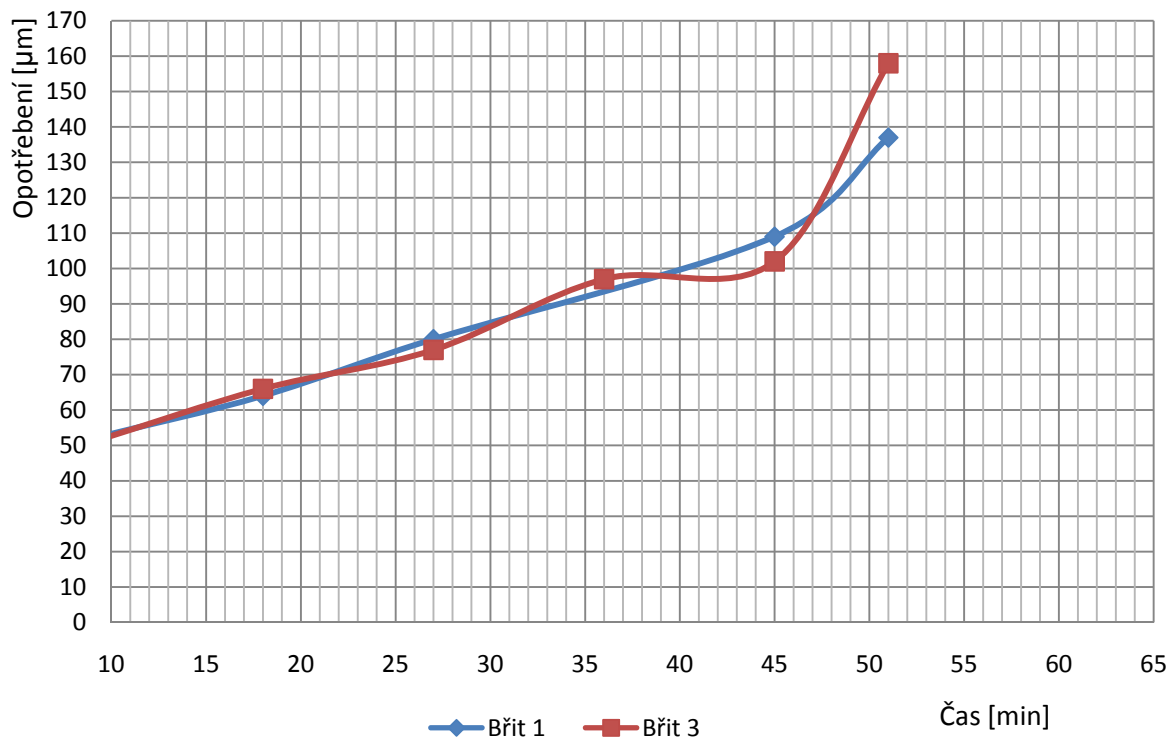
P 5. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/5 na čase



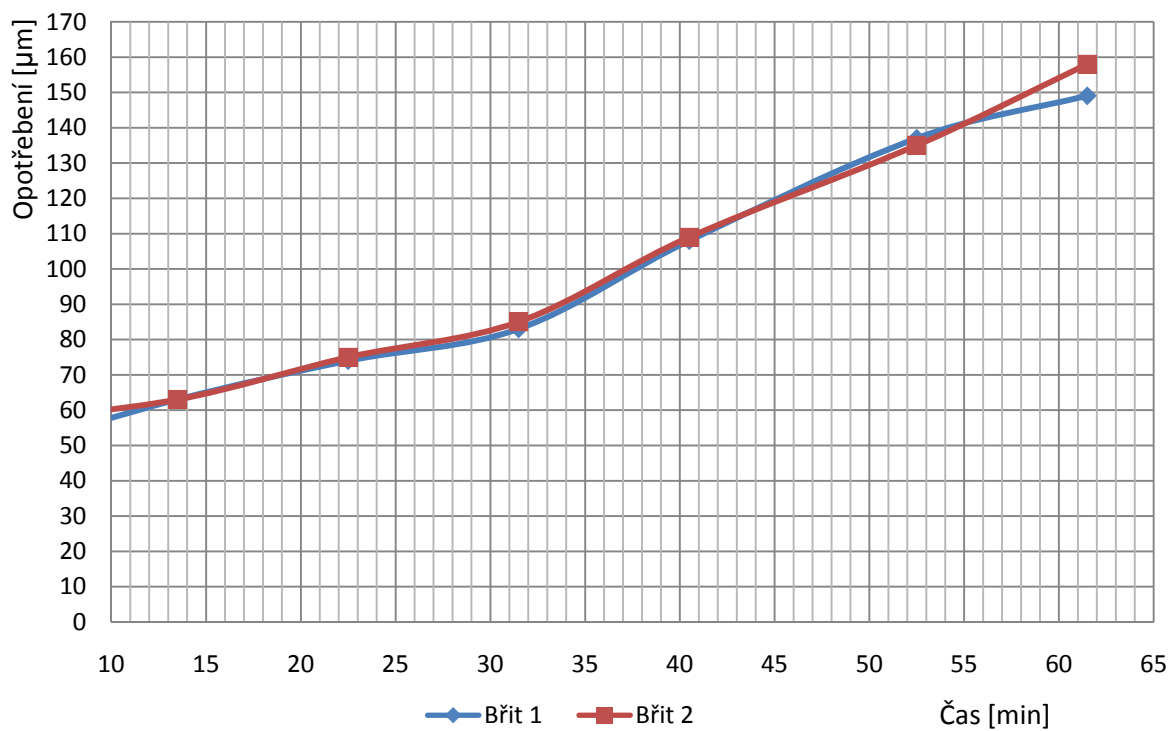
P 6. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/6 na čase



P 7. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/9 na čase

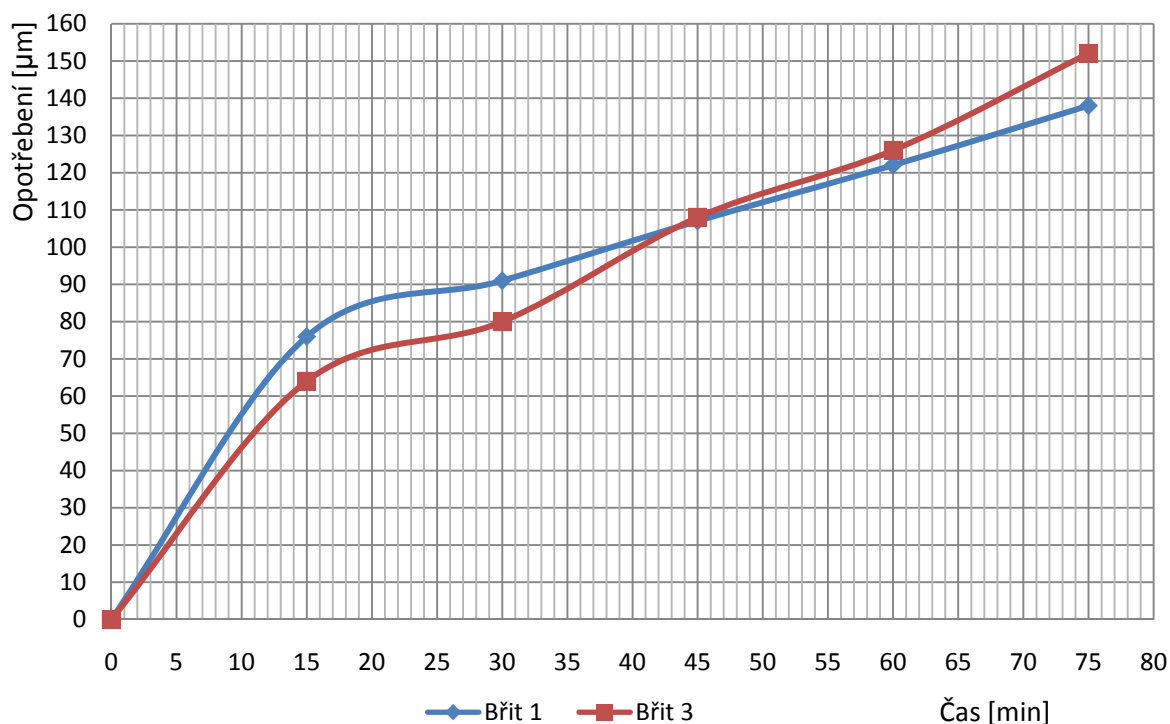


P 8. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/10 na čase

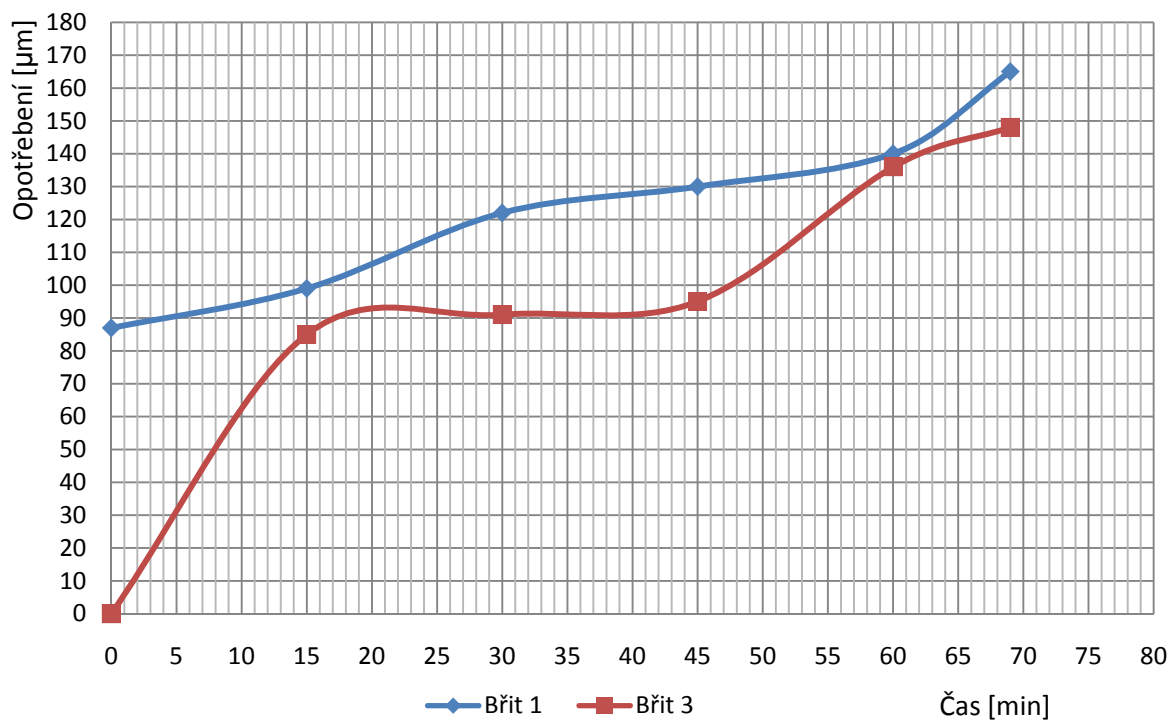


### Grafy k prvnímu testu s čelními válcovými frézami z materiálu 19 852

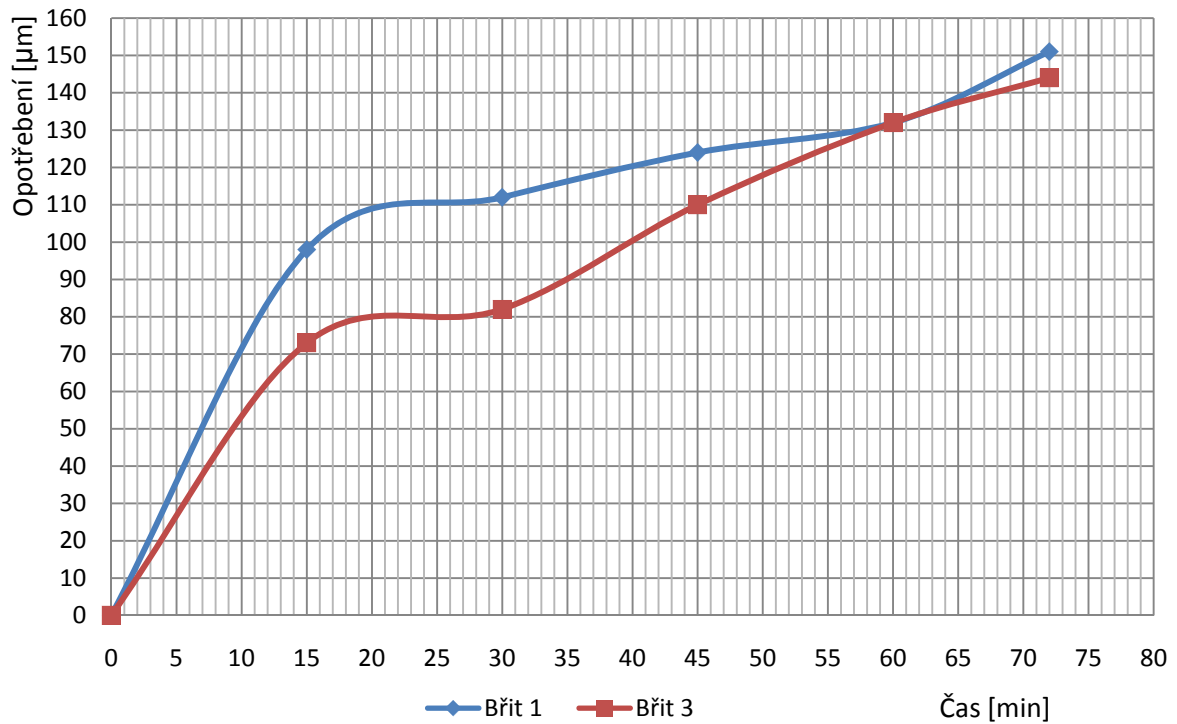
P 9. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/1 na čase



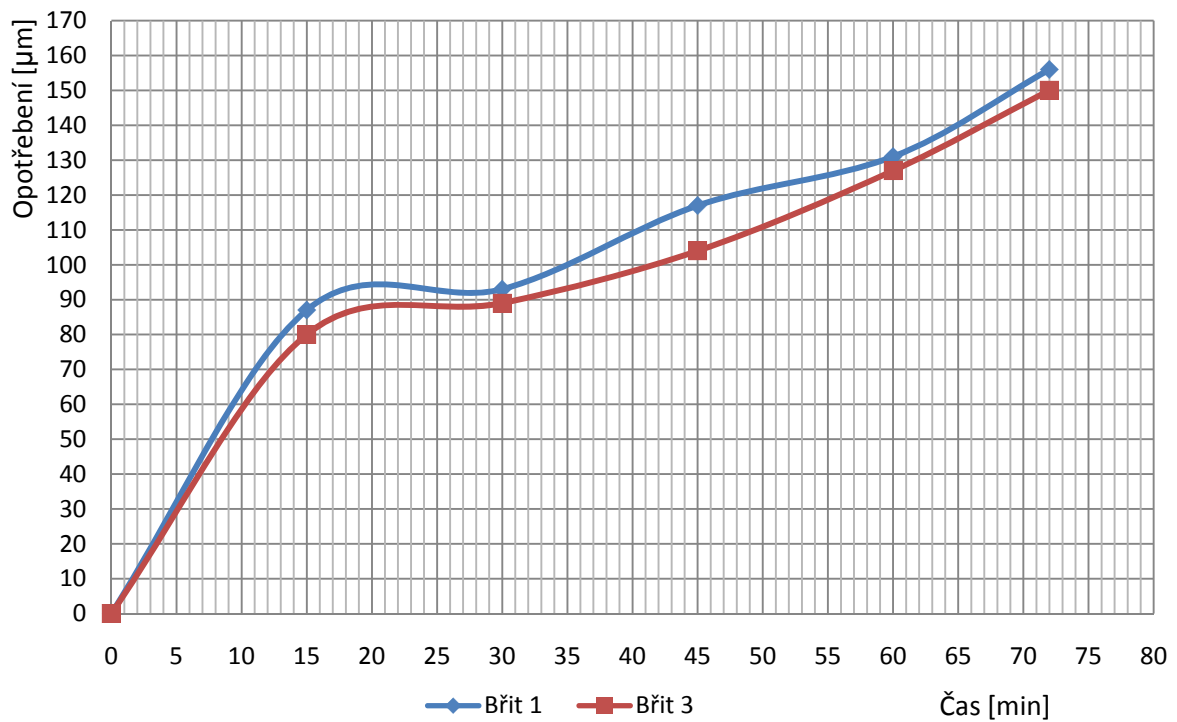
P 10. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/2 na čase



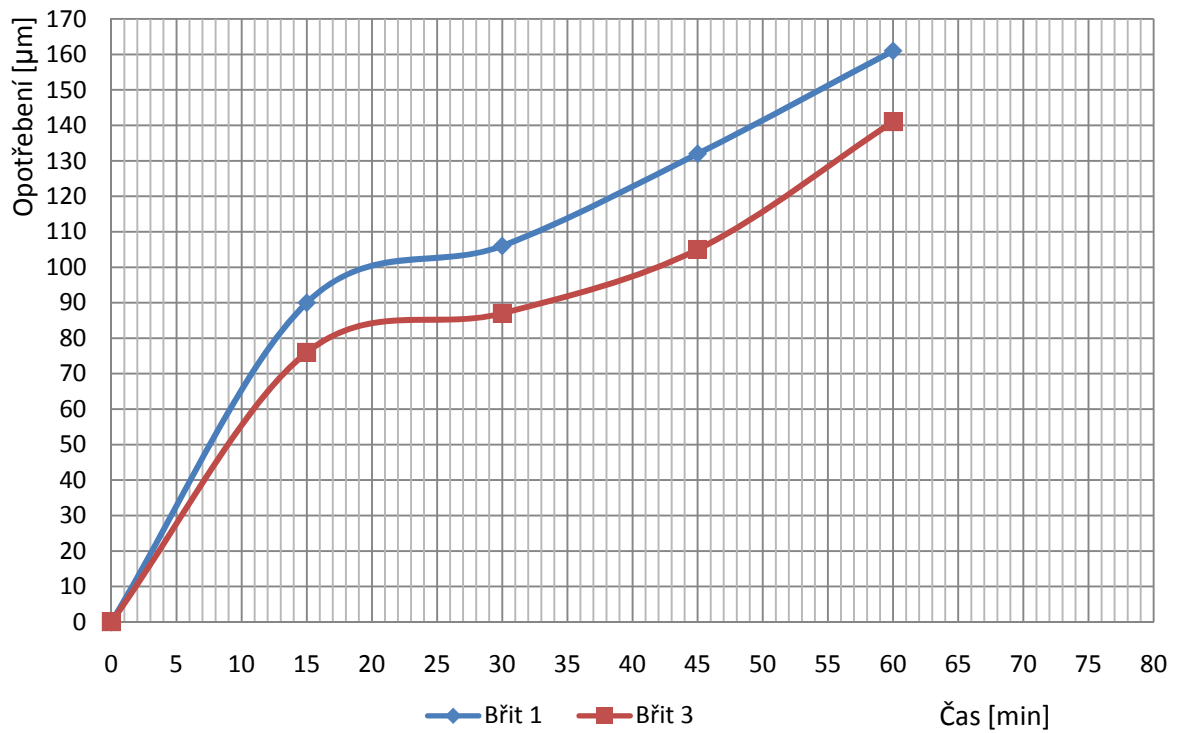
P 11. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/3 na čase



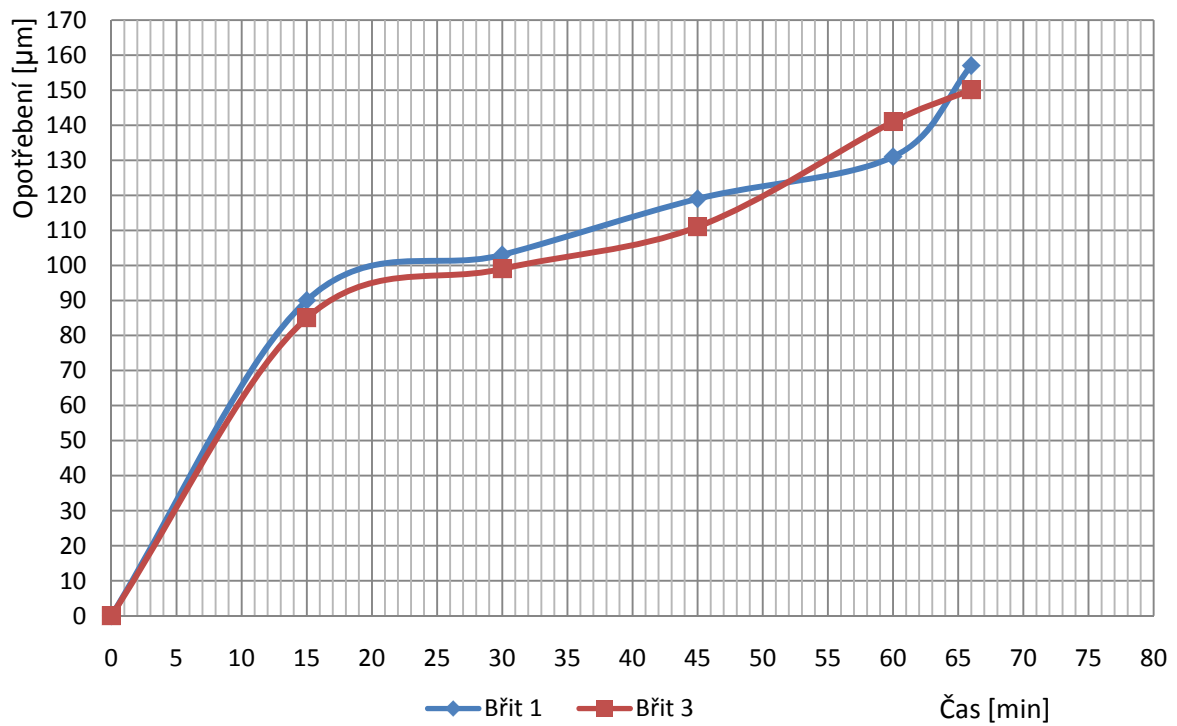
P 12. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/4 na čase



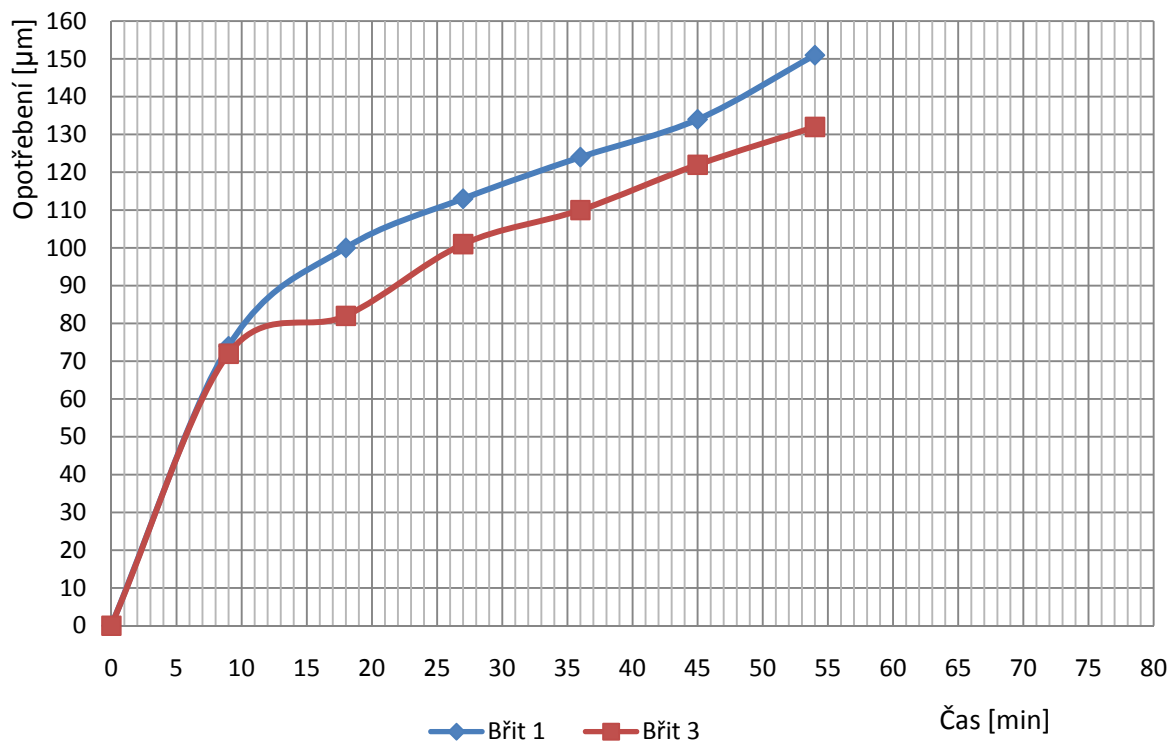
P 13. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/5 na čase



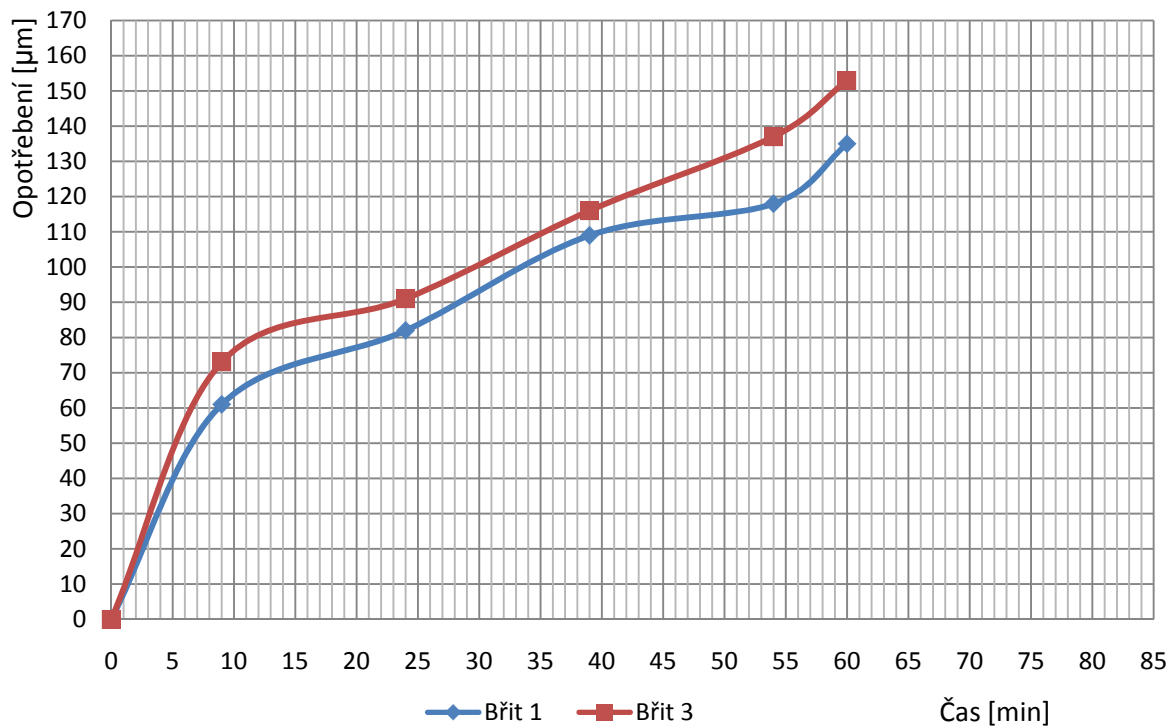
P 14. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/6 na čase



P 15. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/9 na čase

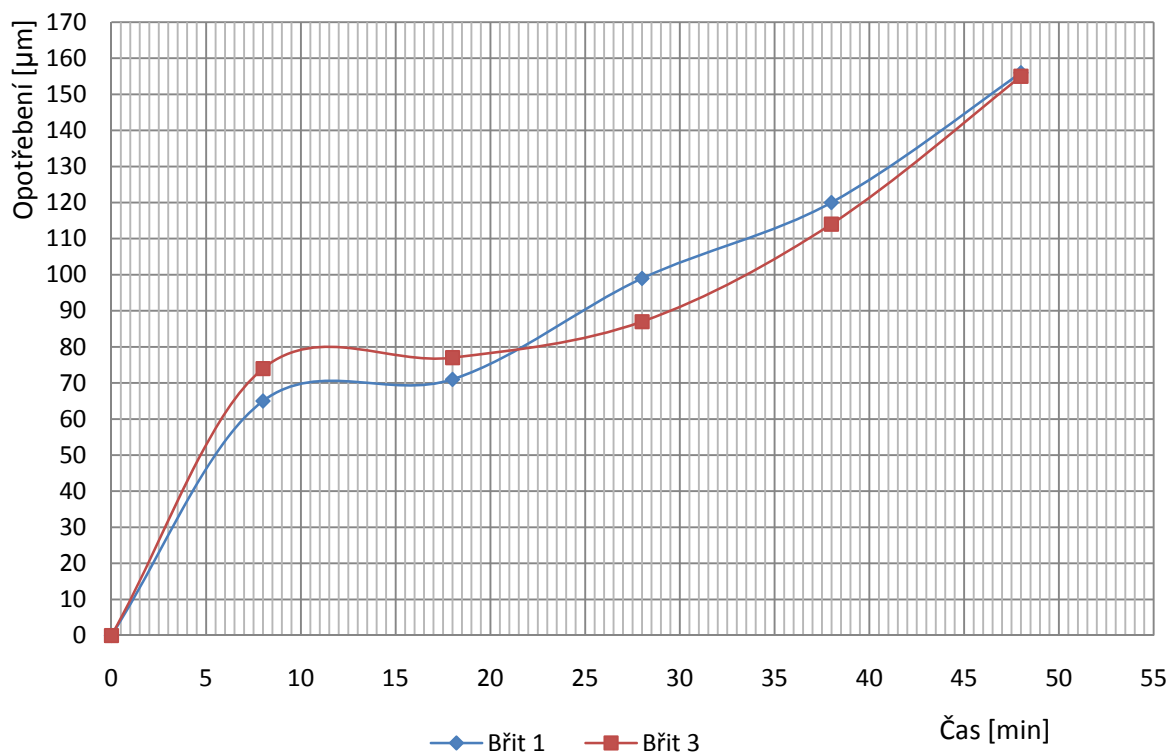


P 16. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/10 na čase

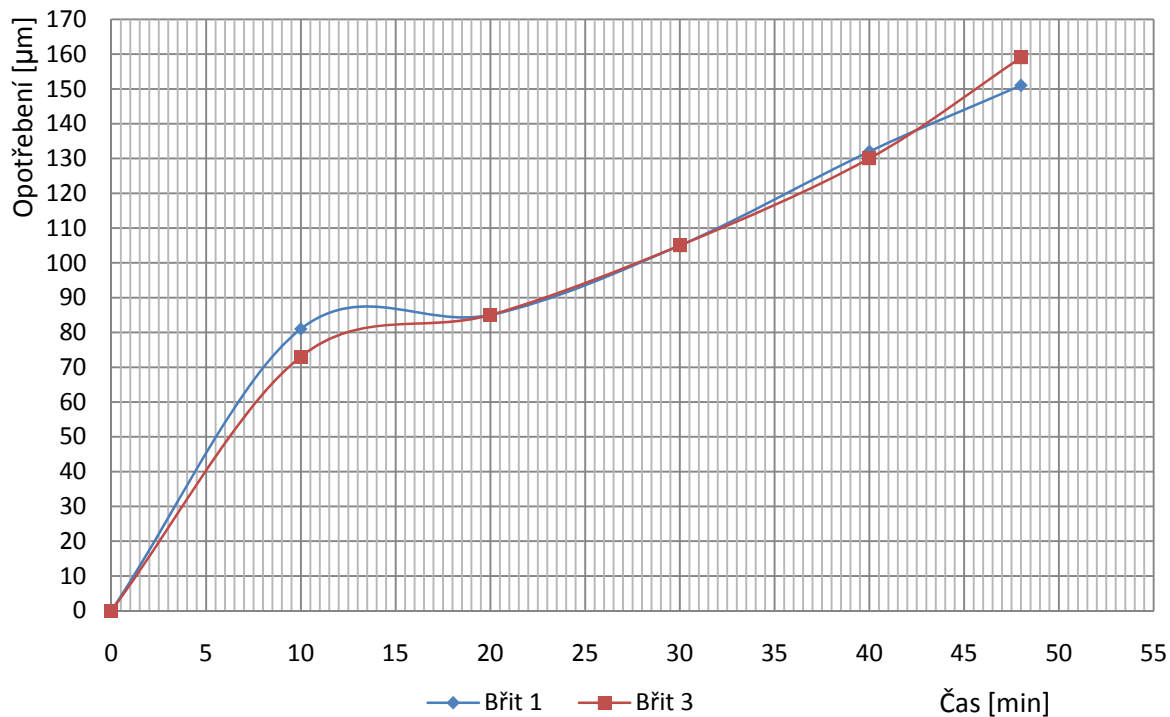


### Grafy k doplňujícím testům čelních válcových fréz

P 17. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/1 na čase

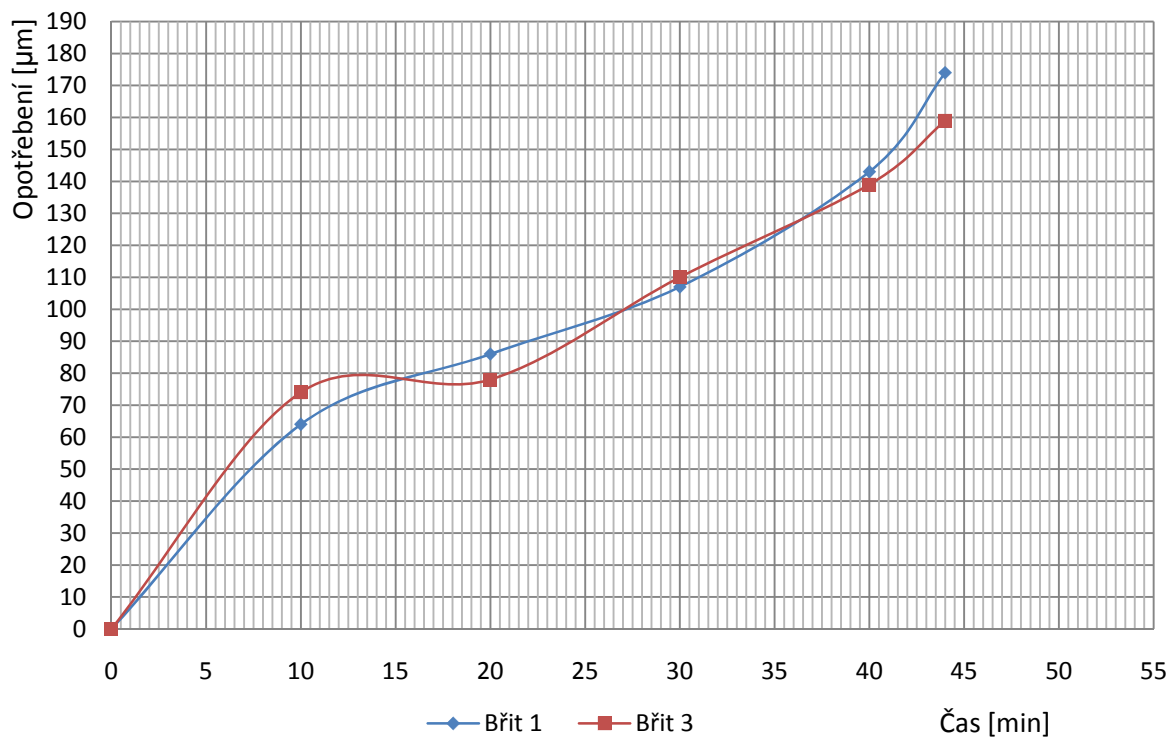


P 18. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/2 na čase

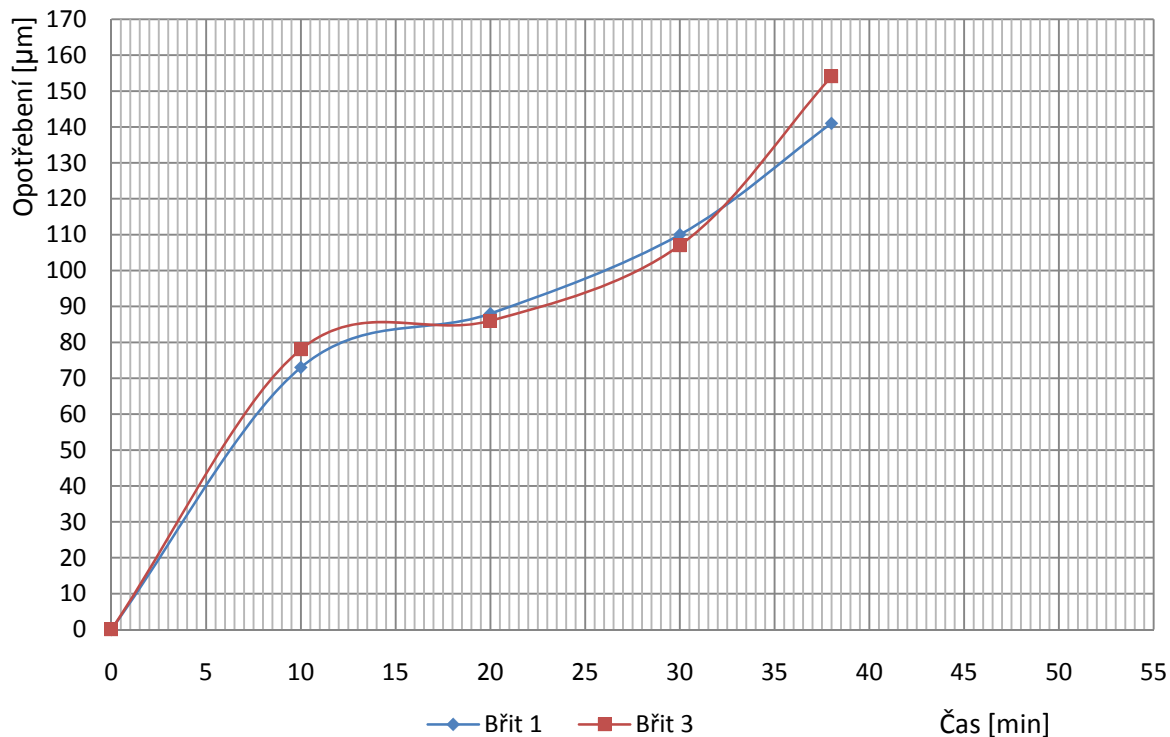




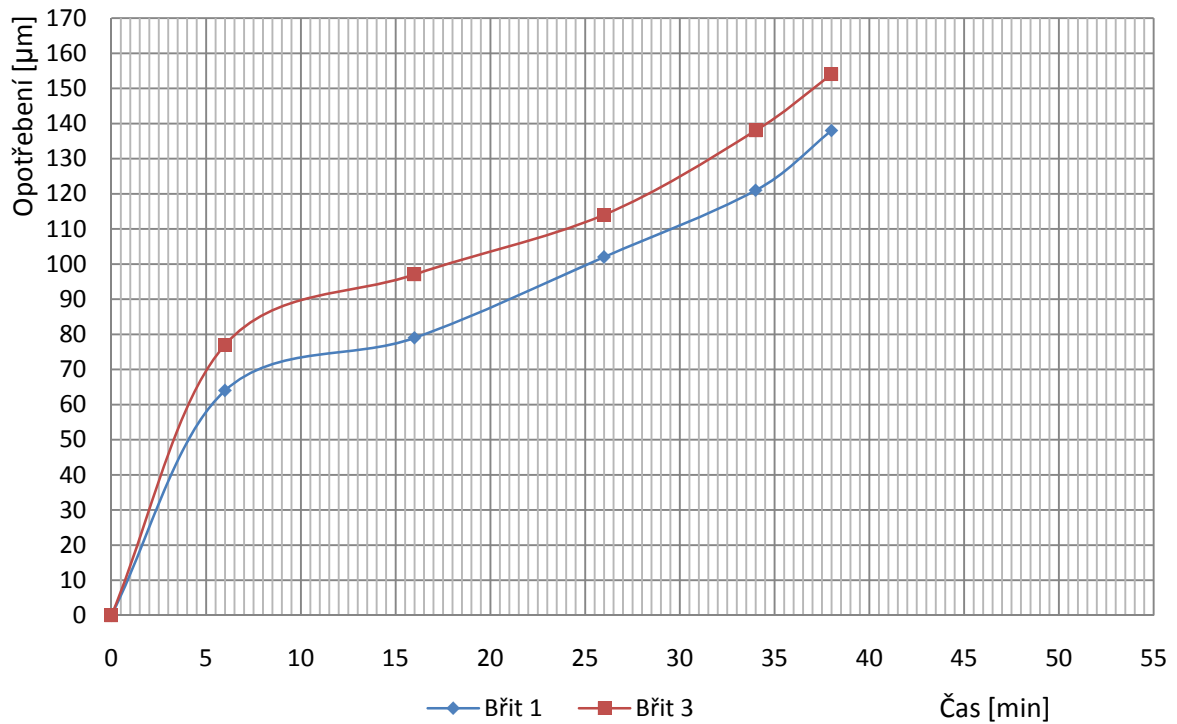
P 19. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/3 na čase



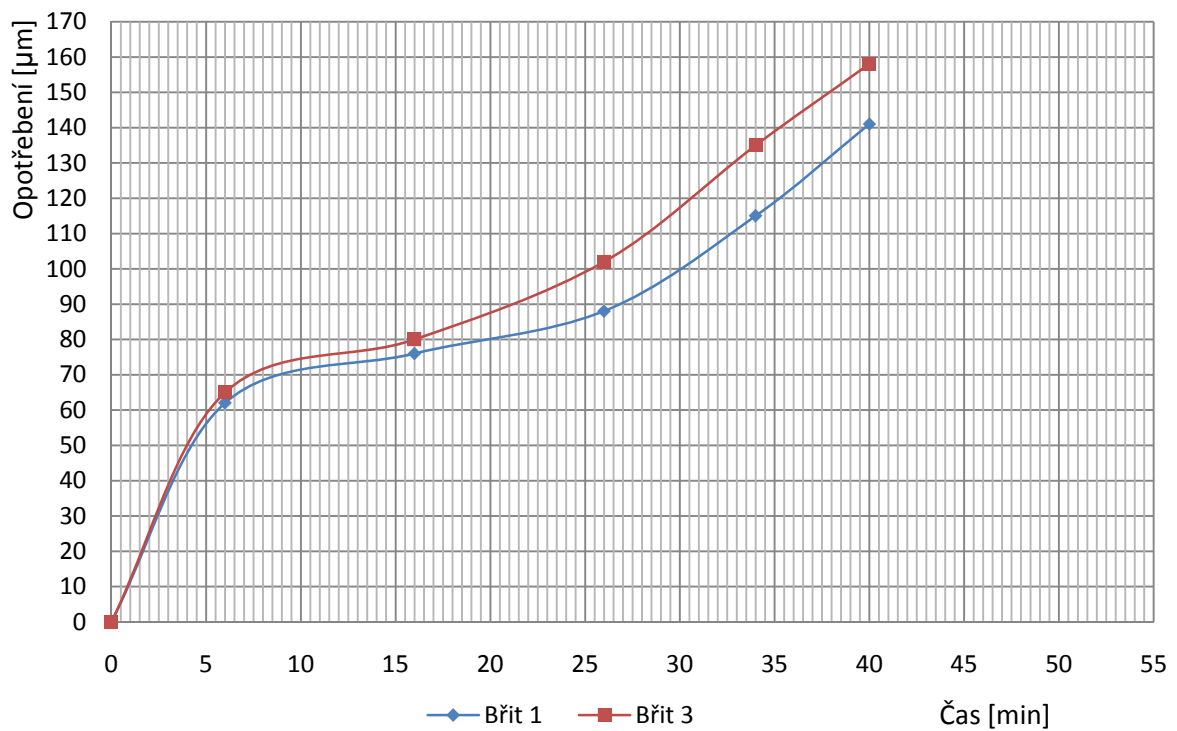
P 20. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/4 na čase



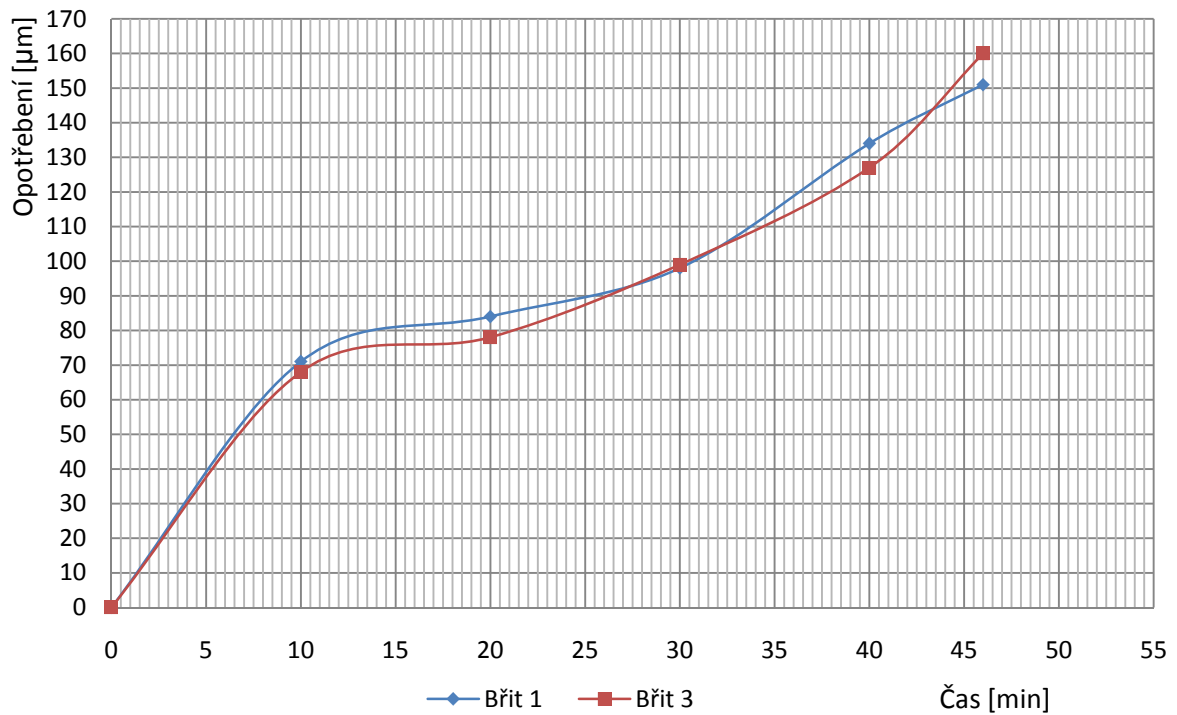
P 21. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/9 na čase



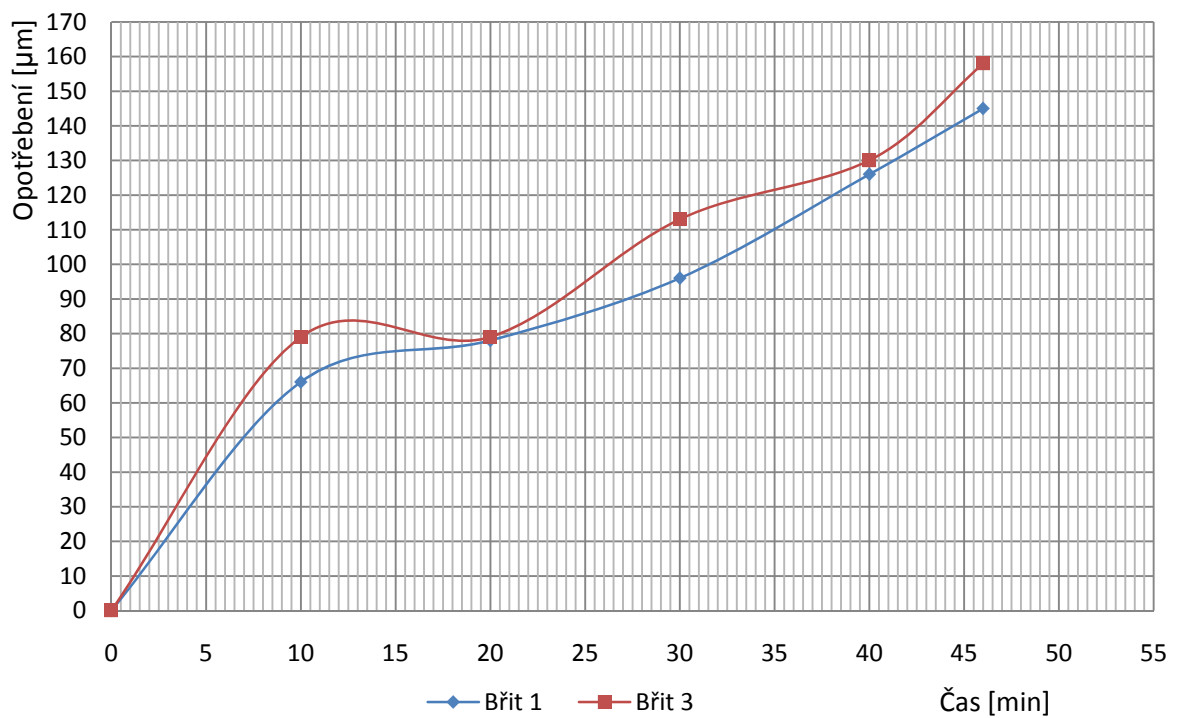
P 22. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 30/10 na čase



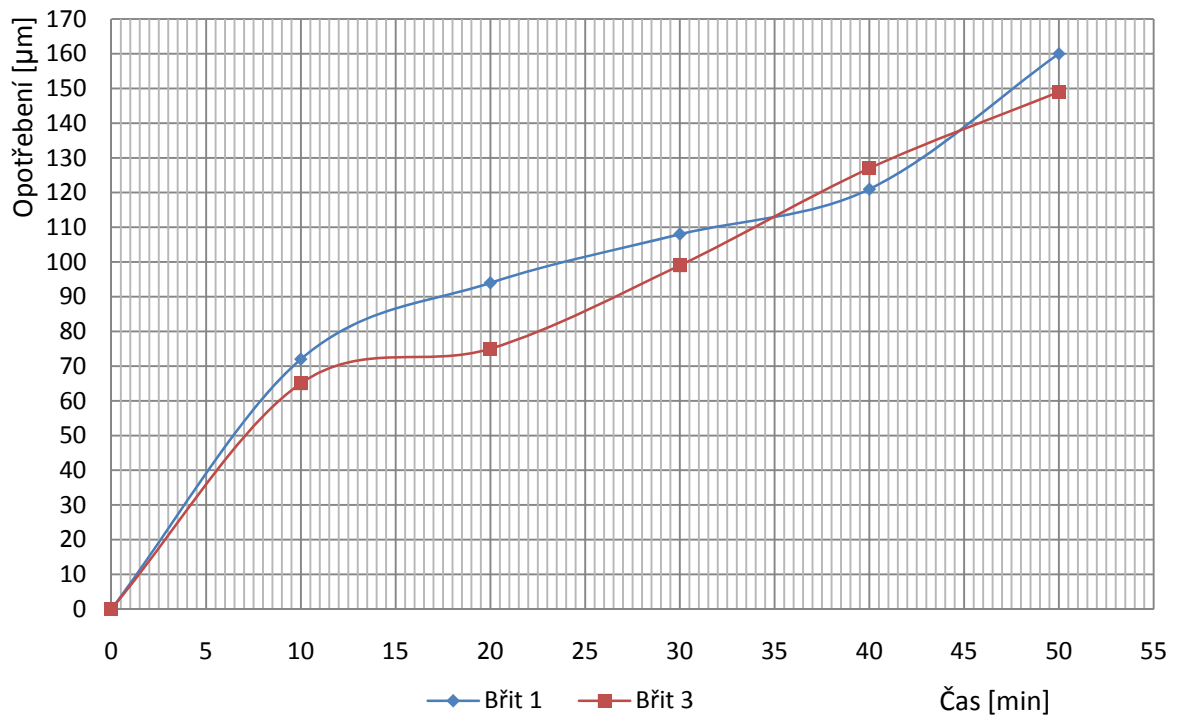
P 23. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/1 na čase



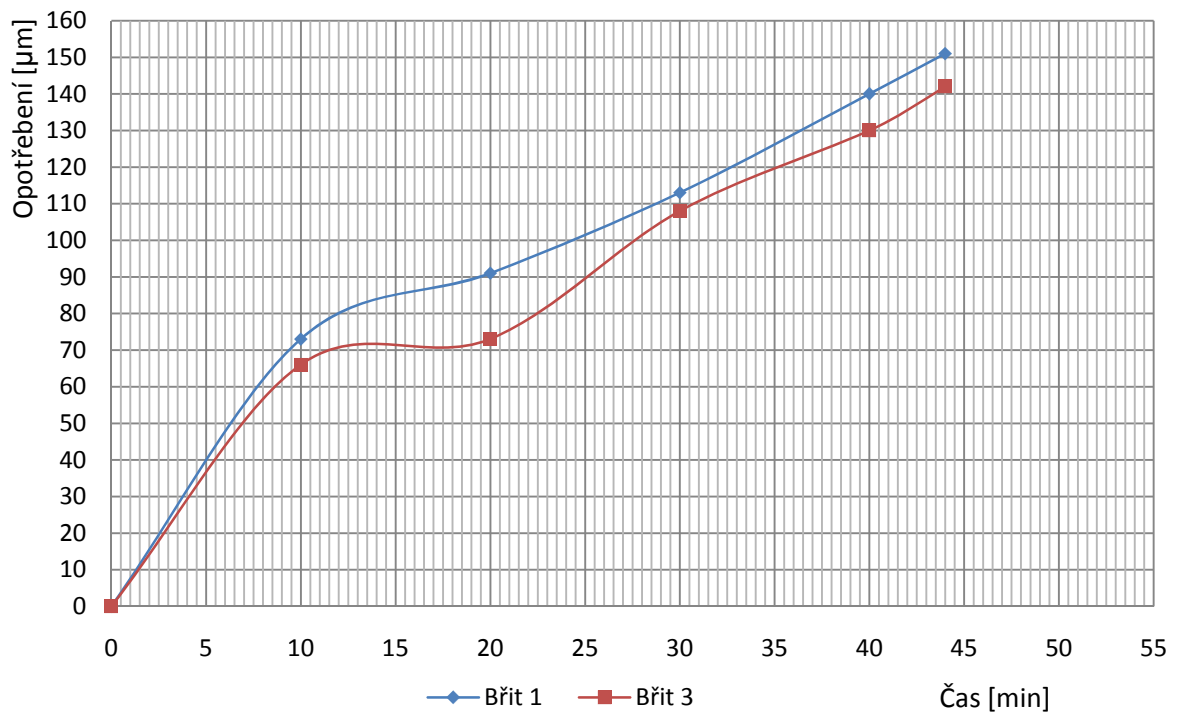
P 24. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/2 na čase



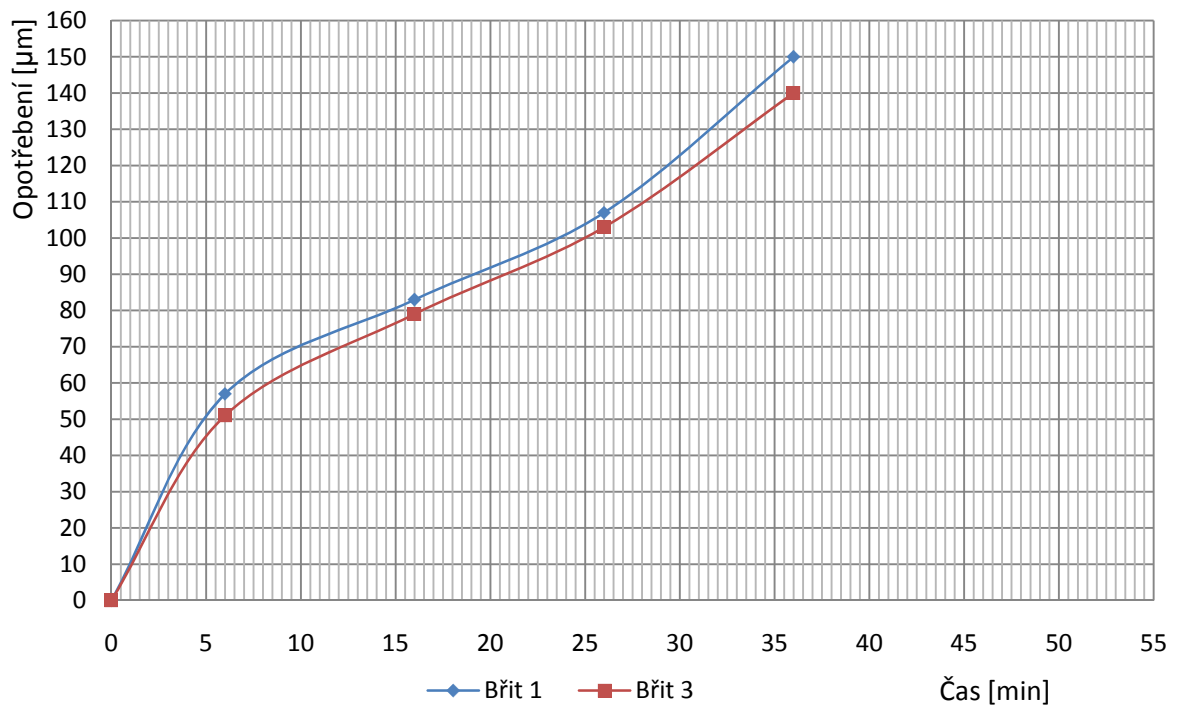
P 25. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/3 na čase



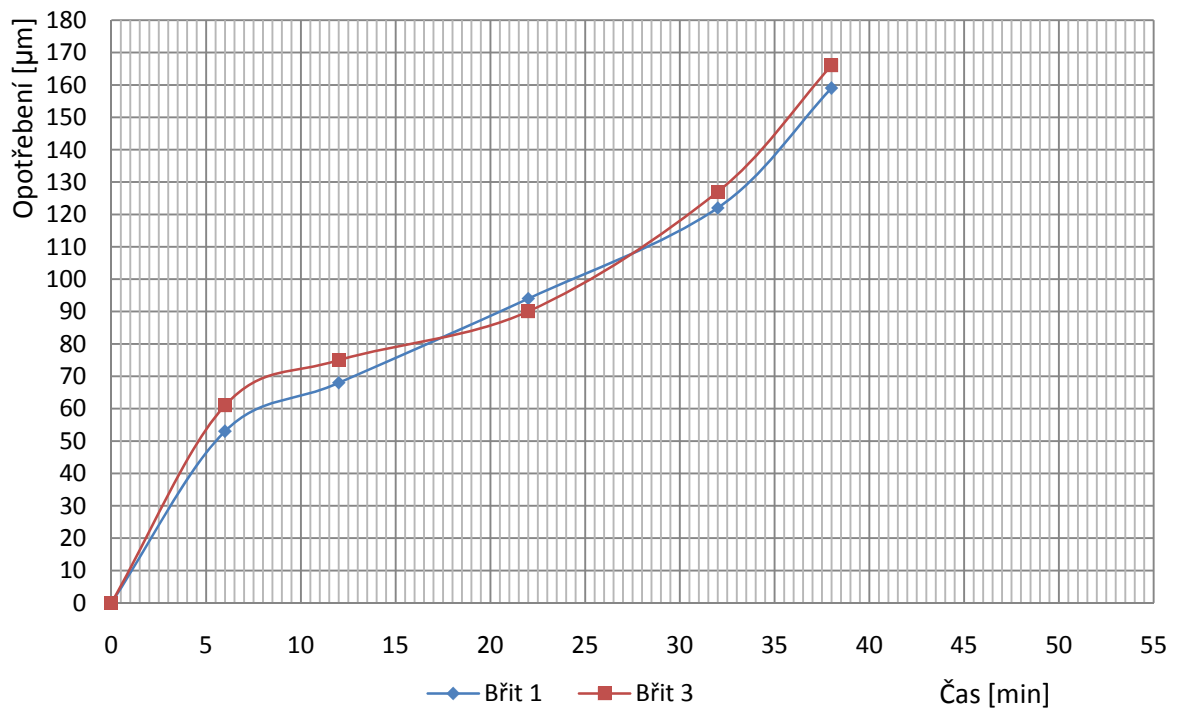
P 26. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/4 na čase



P 27. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/9 na čase

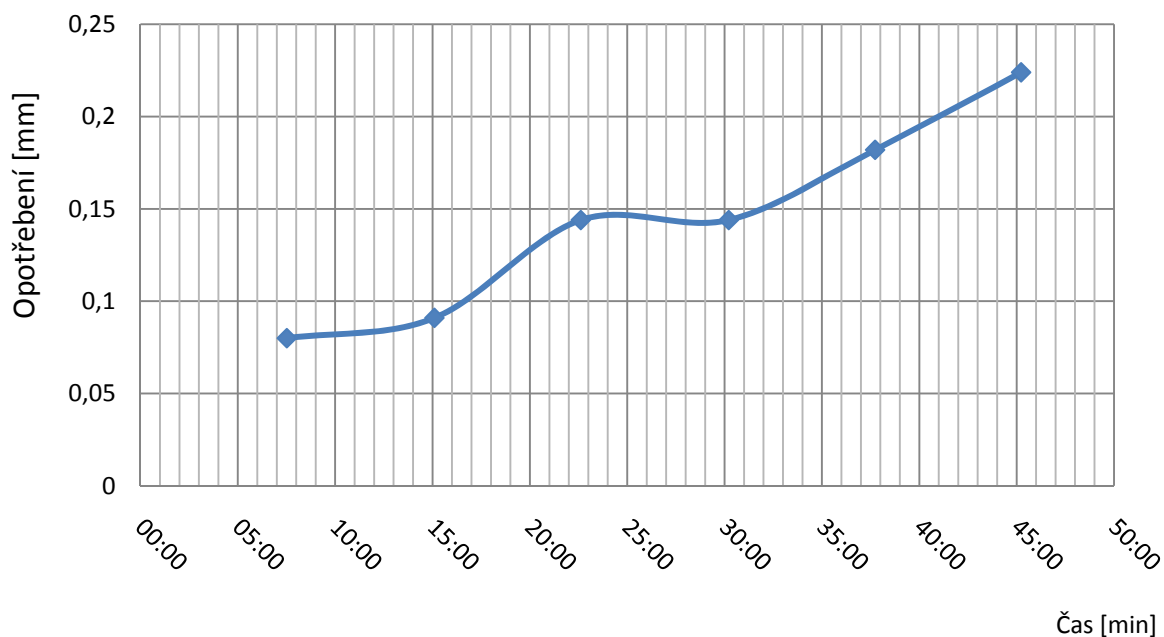


P 28. Graf závislosti velikosti opotřebení frézy 52/10 na čase

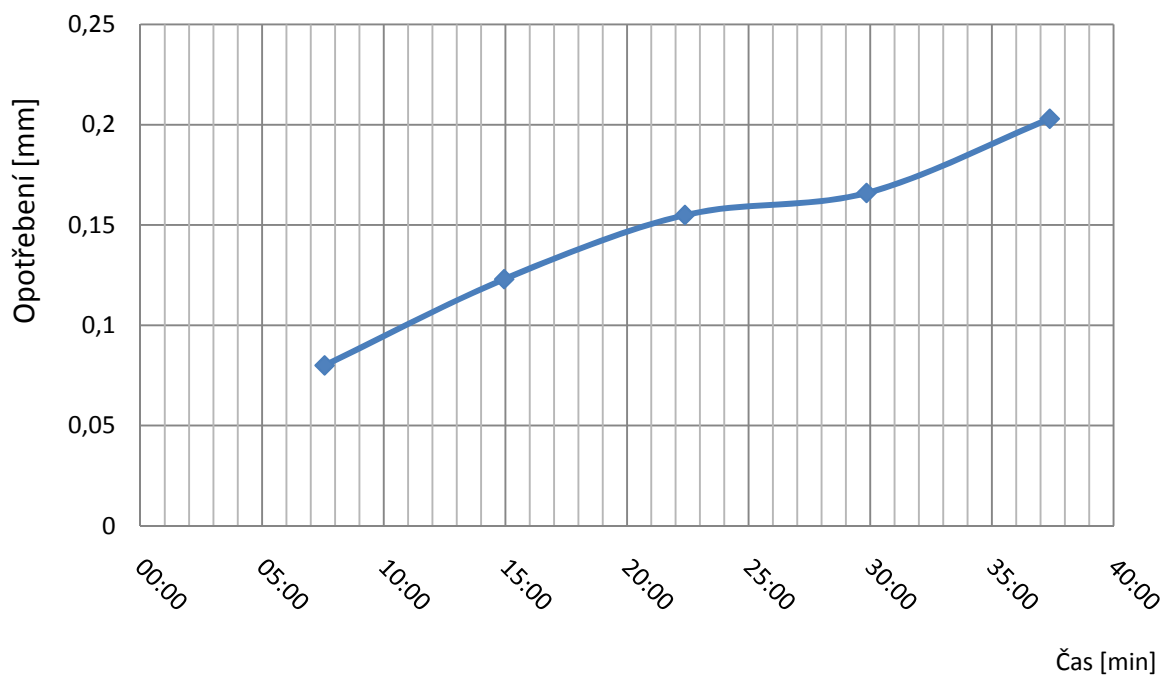


### Grafy k prvnímu testu soustružnických nožů z materiálu 19 830

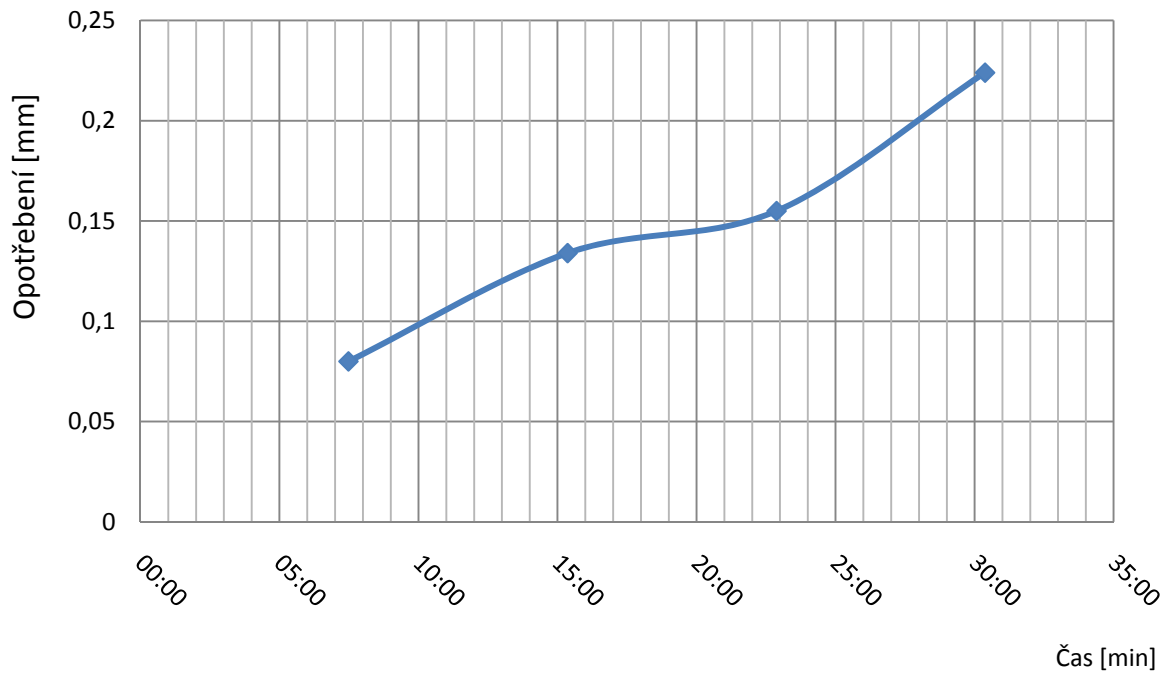
P 29. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/1 na čase



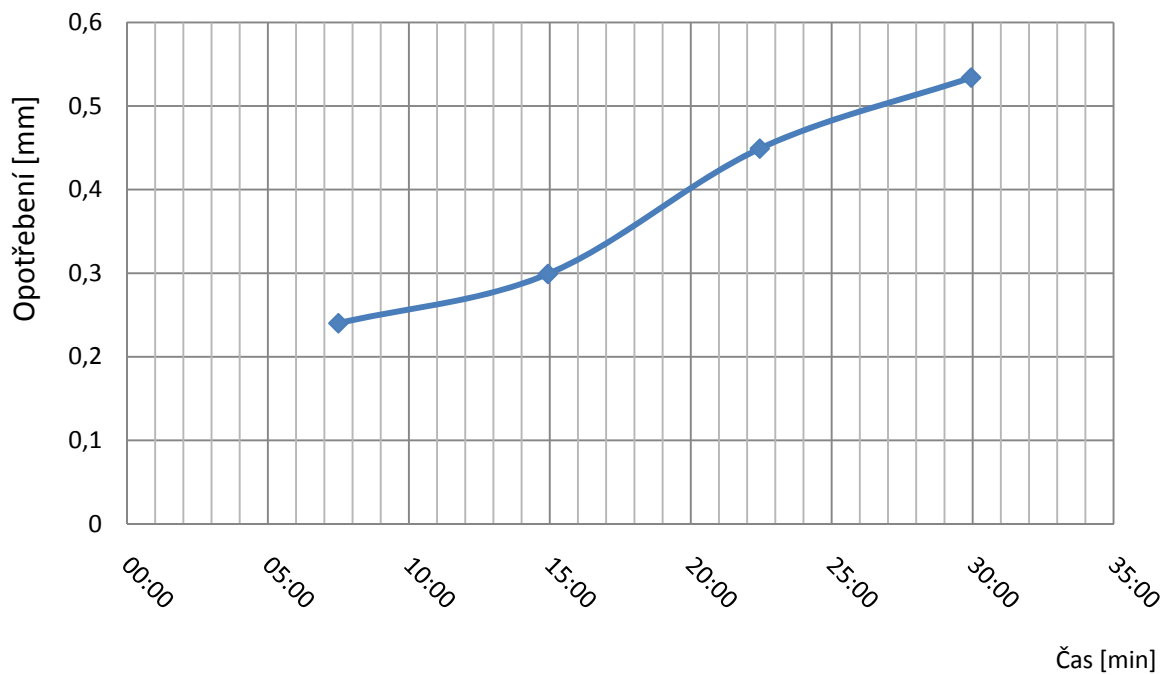
P 30. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/2 na čase



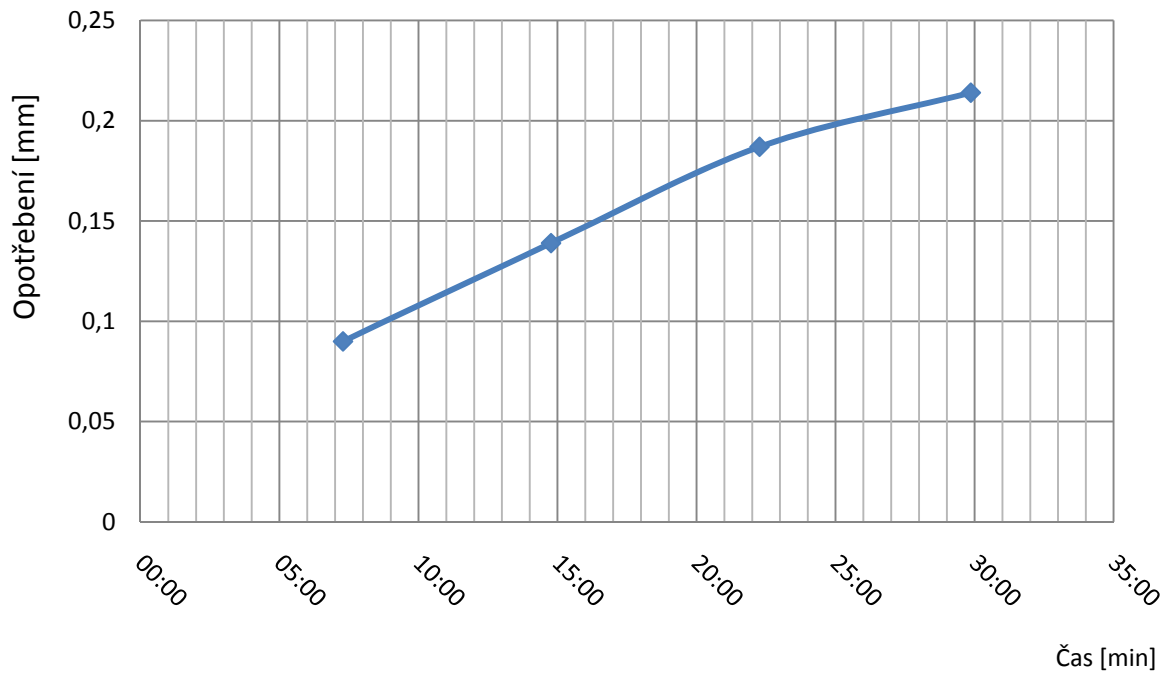
P 31. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/3 na čase



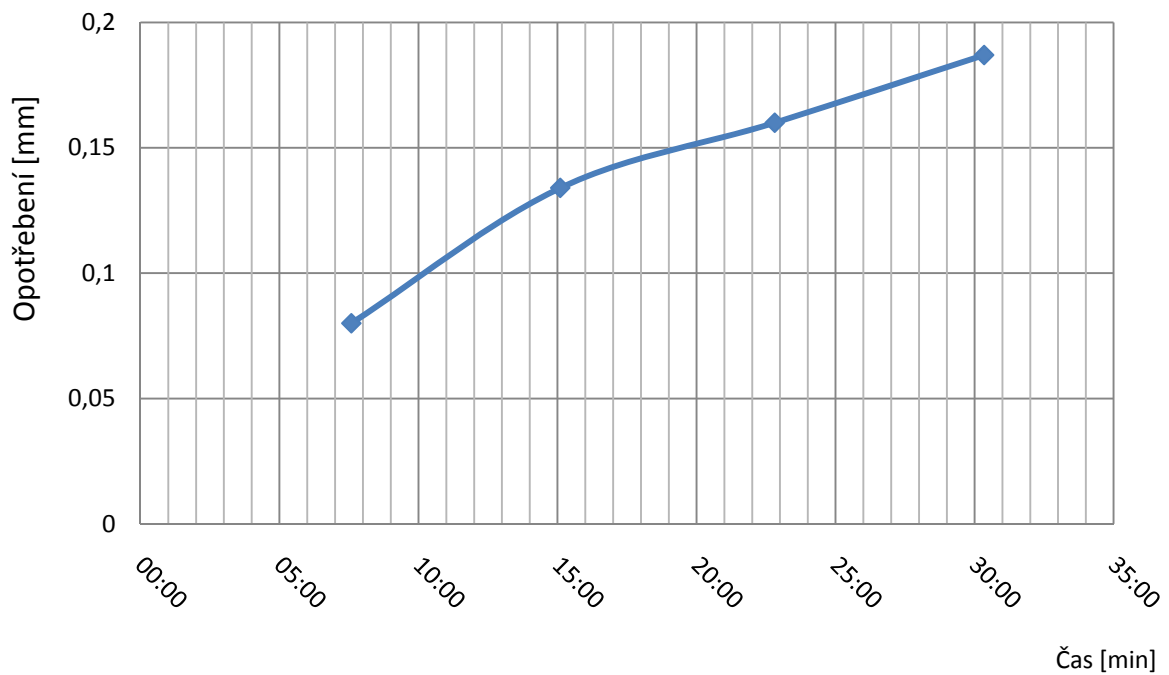
P 32. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/4 na čase



P 33. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/5 na čase

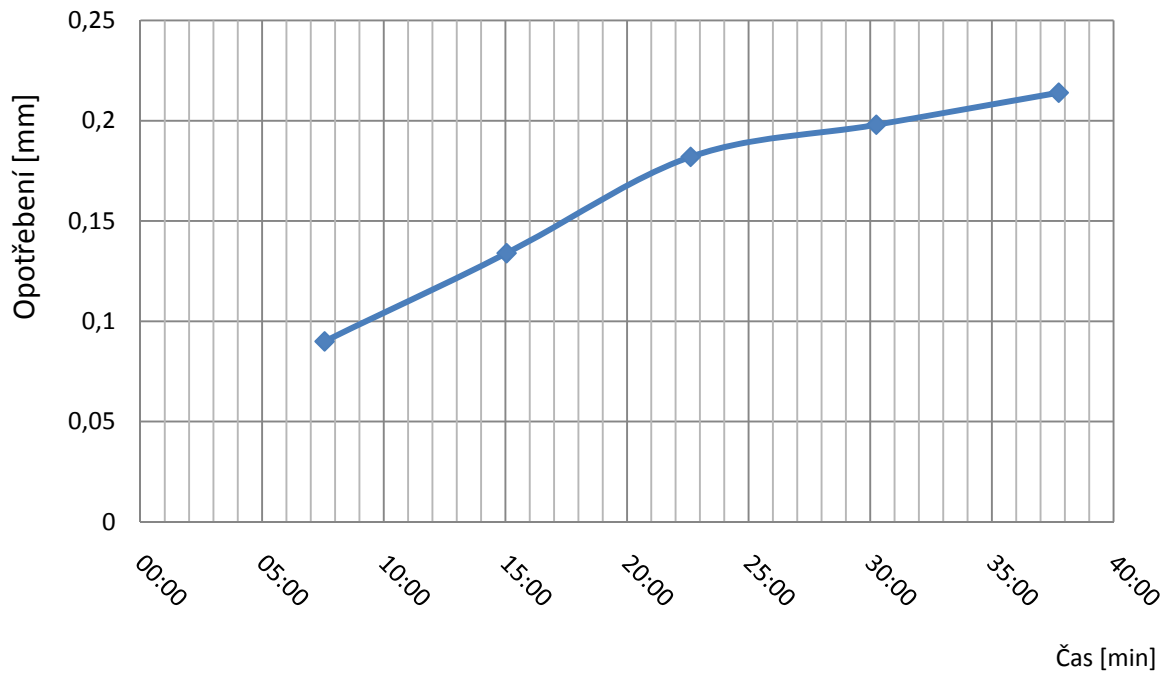


P 34. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/6 na čase

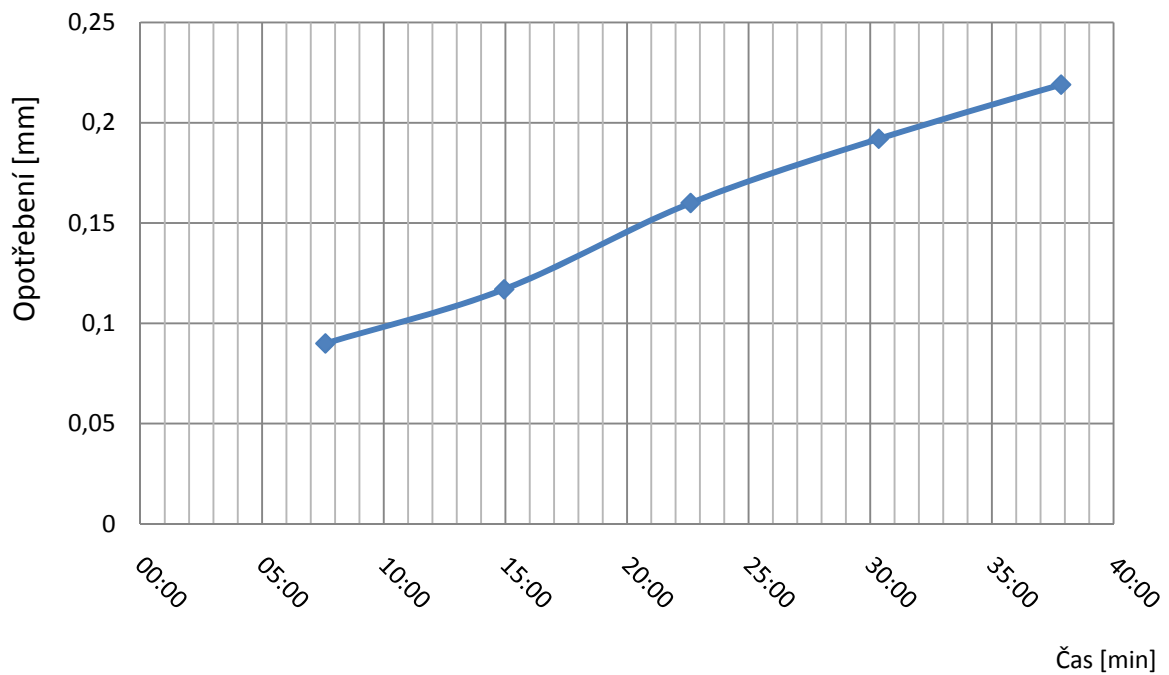




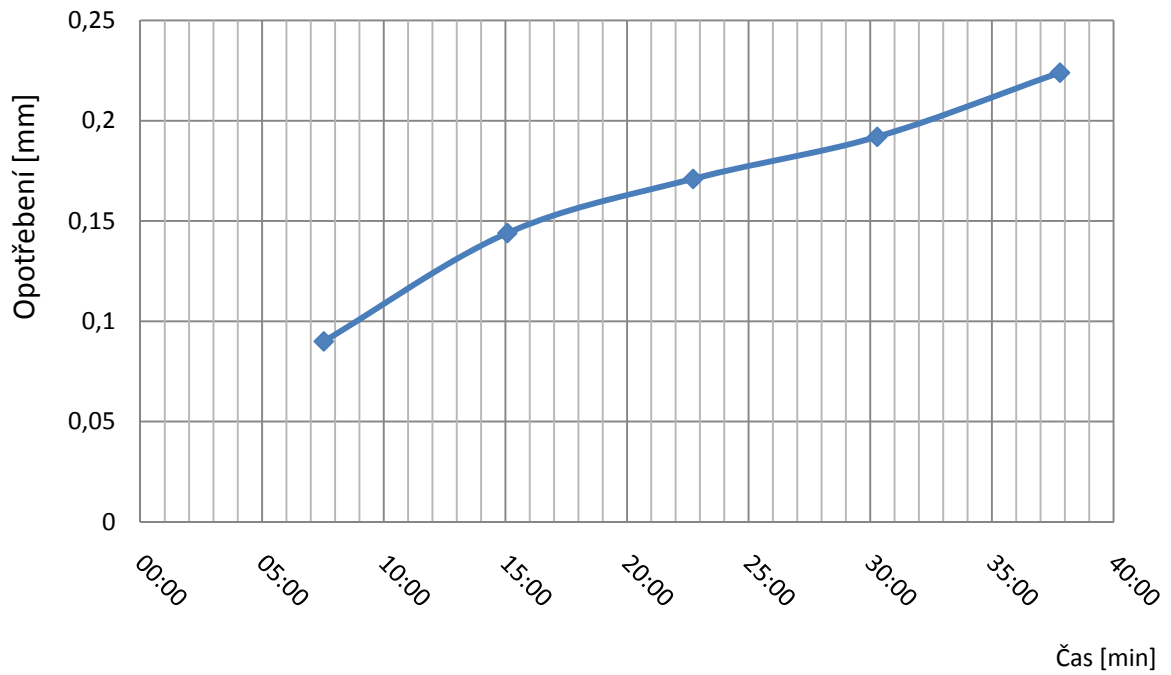
P 35. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/7 na čase



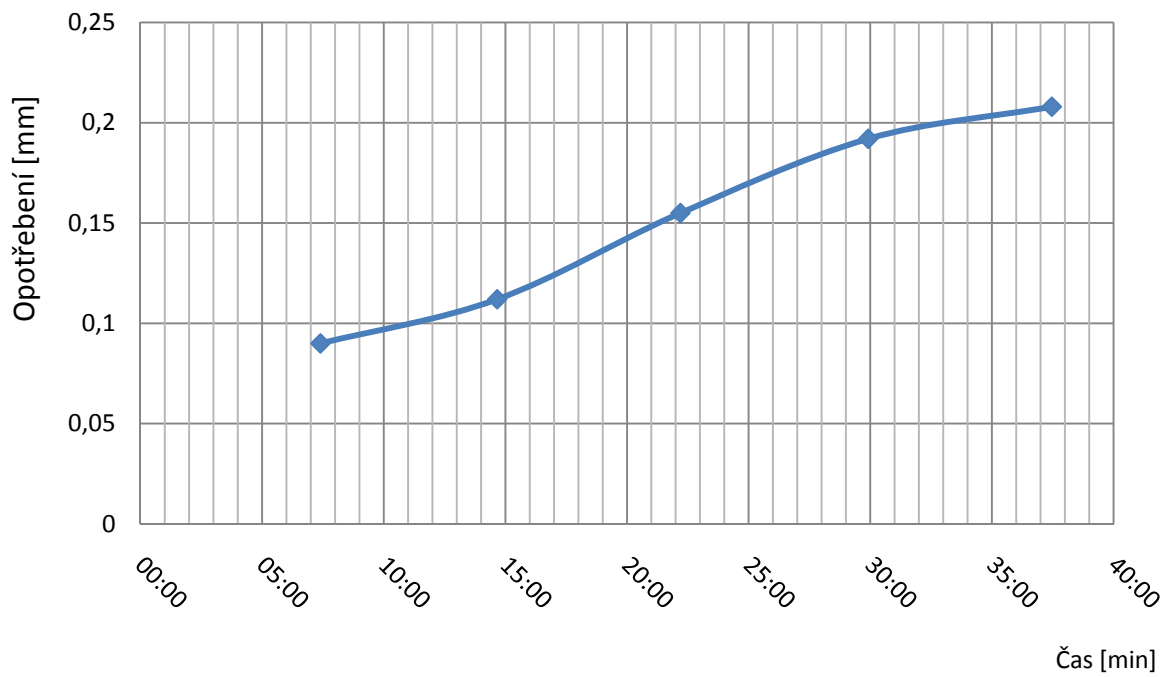
P 36. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/8 na čase



P 37. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/9 na čase



P 38. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/10 na čase



P 39. Graf závislosti velikosti opotřebení sous. nože 30/R na čase

