



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TEPLOTNÍ DĚJE PŘI OBRÁBĚNÍ KOVOVÝCH I NEKOVOVÝCH MATERIÁLŮ

THERMAL PROCESSES IN MACHINING OF METAL AND NON-METAL MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Čermák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Filip Čermák
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Milan Kalivoda
Akademický rok:	2019/20

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

Teplotní děje při obrábění kovových i nekovových materiálů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Třískové obrábění je doprovázeno teplotními ději. Téma formou experimentální studie zachycuje různé případy, vyskytující se v průmyslu.

Cíle bakalářské práce:

- Metody třískového obrábění
- Rozbor teplotních dějů
- Výběr materiálů k experimentálnímu obrábění
- Měření dat v experimentech
- Vyhodnocení
- Formulace obecně využitelných dopadů z experimentů

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7.

MÁDL, Jan et al. Jakost obráběných povrchů. 1. vyd. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 180 s. ISBN 80-7044-639-4.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2009. 252 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu I. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-72-4283-1.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-72-4283-1.

SHAW, Milton Clayton. Metal Cutting Principles. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2005. p. 651. ISBN 0-19-514206-3.

ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce formou experimentální studie zkoumá teplotní děje během obrábění různých materiálů. Zpracování tohoto tématu obsahuje seznámení s obráběcími technologiemi frézování a soustružení, úvod do problematiky teplotních dějů při obráběcím procesu a jejich měření. Druhá část bakalářské práce je zaměřena na experiment, ve kterém probíhá měření teploty pomocí pyrometru při obrábění kovových i nekovových materiálů. V závěru jsou naměřené výsledky vyhodnoceny a prezentovány.

Klíčová slova

teplota, pyrometr, obrábění, soustružení, frézování

ABSTRACT

This bachelor's thesis examines the temperature processes during the machining of various materials in the form of an experimental study. The elaboration of this topic includes acquaintance with machining technologies of milling and turning, introduction to the issue of temperature processes during the machining process and their measurement. The second part of the bachelor's thesis is focused on an experiment in which the temperature is measured by a pyrometer during the machining of metallic and non-metallic materials. In the end, the measured results are evaluated and presented.

Key words

temperature, pyrometer, machining, turning, milling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČERMÁK, Filip. *Teplotní děje při obrábění kovových i nekovových materiálů* [online]. Brno, 2020. 63 s., 3 přílohy. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124772>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Teplotní děje při obrábění kovových i nekovových materiálů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Filip Čermák

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto poděkovat panu Ing. Milanu Kalivodovi z VUT v Brně za vřelou spolupráci v nelehké době, cenné připomínky, rady a odborné znalosti, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval panu Jiřímu Čechovi za odbornou asistenci při vykonávání experimentů, které jsou stěžejní pro mou bakalářskou práci.

OBSAH

ABSTRAKT	3
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD	8
1 METODY TRÍSKOVÉHO OBRÁBĚNÍ	9
1.1 Soustružení	10
1.2 Frézování	11
2 ROZBOR TEPLOTNÍCH DĚJŮ	14
2.1 Vliv řezných podmínek a nástrojových úhlů	15
2.2 Odvádění teploty z místa řezu.....	15
3 MĚŘENÍ TEPLoty PŘI OBRÁBĚNÍ.....	17
3.1 Měření termočlánkem	17
3.2 Měření termistorem	20
3.3 Měření termokamerou	21
3.4 Měření pyrometrem.....	23
4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ TEPLoty	28
4.1 Materiál obrobků	28
4.2 Volba obráběcích nástrojů.....	28
4.3 Použitá zařízení při experimentu.....	29
4.4 Postup experimentu	30
4.4.1 Nesousledné frézování do rohu.....	31
4.4.2 Podélné soustružení vnější plochy	32
5 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	34
5.1 Vyhodnocení teploty při frézování.....	35
5.2 Vyhodnocení teploty při soustružení	47
6 OBECNĚ VYUŽITELNÉ DOPADY.....	55
7 DISKUZE	56
ZÁVĚR	57
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	58
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	61
SEZNAM PŘÍLOH.....	63

ÚVOD

Proces třískového obrábění je doprovázen teplotními ději, které mají vliv na řezný nástroj i samotný obrobek. Znalost teplotních dějů při obrábění je jednou z důležitých složek zajišťujících úspěšné vyrobení součásti s minimálním opotřebením řezného nástroje. Se správným vybalancováním teplotních dějů během obráběcího procesu lze získat vyšší trvanlivost řezného nástroje, kvalitněji opracovaný obrobek a celkově efektivnější obráběcí proces. Jedná se tedy o významnou problematiku vyžadující pozornost.

Z tohoto důvodu se autor rozhodl v bakalářské práci věnovat zkoumání teplotních dějů při obráběcích technologiích soustružení a frézování u materiálů obrobků kovových i nekovových, za pomoci bezdotykové metody měření.

Cílem bakalářské práce je formou experimentální studie zpracovat téma teplotních dějů při obrábění a zjistit, zda se teplota řezného nástroje s rostoucí řeznou rychlostí zvyšuje, a zda se tato tendence liší u různých materiálů obrobků.

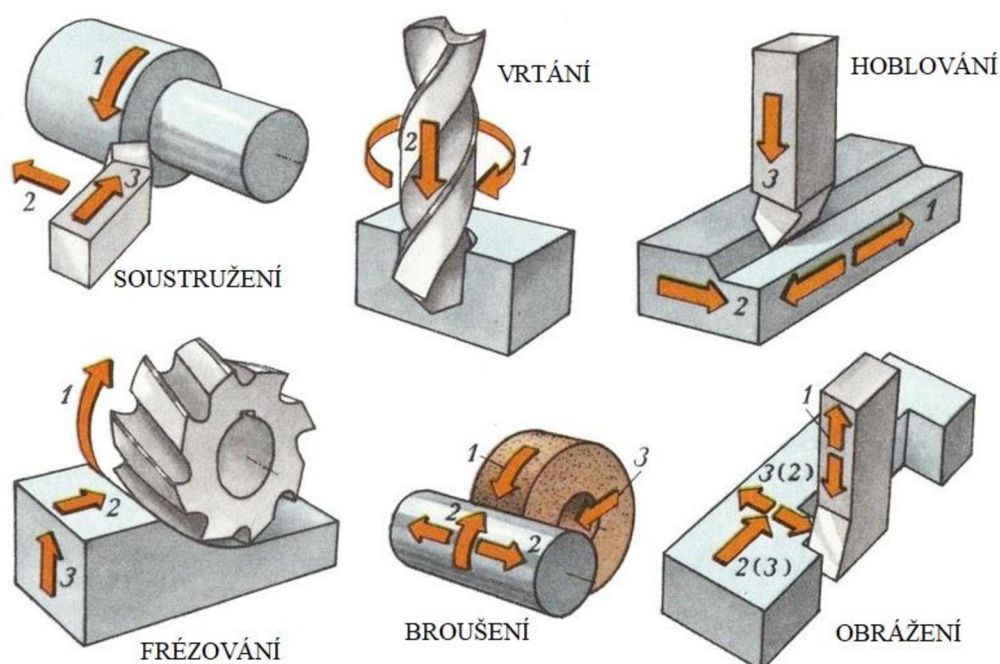
První část bakalářské práce je zaměřena na obecné vysvětlení a charakteristiku použitých obráběcích technologií, uvedení do problematiky vznikajících teplotních dějů během obráběcího procesu a na možnosti měření těchto teplotních dějů.

Druhá část bakalářské práce se zaměřuje na experimentální měření teploty a stanovení vstupních podmínek pro tato měření. V této části je shrnuta volba materiálů obrobků (kovových i nekovových), použitých řezných nástrojů a stanovení řezných podmínek, za kterých byly experimenty prováděny.

1 METODY TRÍSKOVÉHO OBRÁBĚNÍ

Třískové obrábění je proces přeměny polotovaru na výrobek, při kterém je obráběný materiál deformován a následkem této deformace se odděluje ve formě třísek. Vlastní proces fyzikálně-mechanického oddělování obráběného materiálu je specifikován jako řezný proces. Dle způsobu oddělování materiálu se řezný proces dělí na [1]:

- kontinuální – soustružení, vrtání a vyvrtávání,
- diskontinuální – hoblování a obrážení,
- cyklický – frézování a broušení.

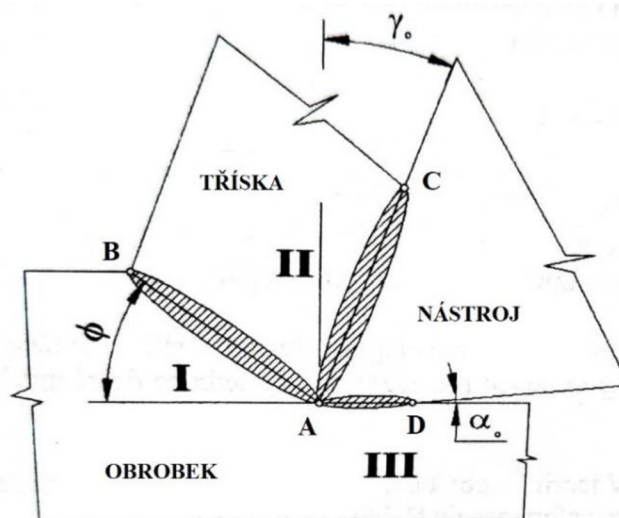


1 – hlavní pohyb, 2 – vedlejší pohyb (posuv), 3 – vedlejší pohyb (přísvuv)

Obr. 1: Pohyby nástroje a obrobku u různých druhů obráběcích technologií [2].

Kořenem třísky je nazývána oblast materiálu, ve které dochází k jeho přetváření na třísku vlivem řezného nástroje při řezném procesu. V oblasti odřezávané vrstvy vznikají pružné a následně plastické deformace. Tato oblast obsahuje tři výrazné plastické deformace (obr. 2) [1; 3]:

- oblast primární plastické deformace materiálu I je v rovině maximálních smykových napětí vymezena rovinou AB, která je skloněna pod úhlem Φ . Tato oblast je typickým místem největší plastické deformace a lomového porušení,
- oblast sekundární plastické deformace materiálu II je na obr. 2 vyznačena mezi body AC. Probíhá zde tření třísky po čele nástroje,
- oblast terciální plastické deformace materiálu III je mezi body AD a probíhá zde tření nástroje o obrobený povrch materiálu. Toto tření ovlivňuje výslednou kvalitu obrobené plochy.

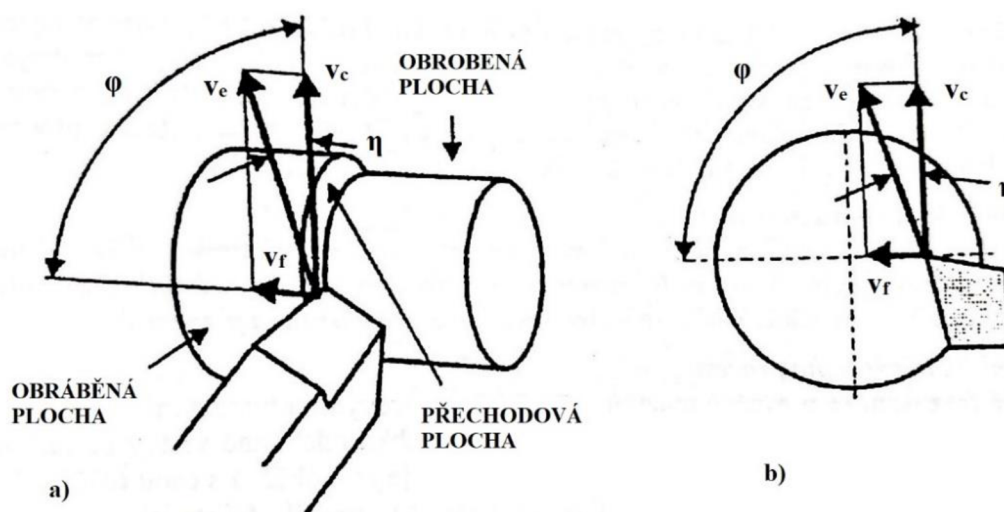


Obr. 2: Oblasti plastických deformací v kořenu třísky [3].

1.1 Soustružení

Jedná se o technologii třískového obrábění, která je využívána pro zhotovení součástí rotačních tvarů, většinou za použití jednobřitého nástroje v různém provedení. Po vrtání patří mezi nejstarší obráběcí operace. Stroj, na kterém se soustružení provádí, se nazývá soustruh a jako nástroj se používá soustružnický nůž. Z mnoha hledisek je soustružení považováno za nejjednodušší způsob obrábění, díky čemuž je hojně využívanou metodou ve strojírenství. [1; 4; 5; 6]

Hlavním pohybem u soustružení je pohyb rotační, jenž koná obrobek, který je upnut ve sklíčidle nebo mezi hroty. Vedlejší pohyby, jako jsou posuv (rovnoběžný s osou otáčení obrobku – podélné soustružení) a přísv (kolmý k ose obrobku – čelní soustružení), vykonává nástroj, který je upnutý v nožové nebo revolverové hlavě. Vektory pohybů při soustružení jsou vyobrazeny na obr. 3. [5; 6]



v_c – řezná rychlost, v_f – posuvová rychlost, v_e – rychlost řezného pohybu φ

Obr. 3: Schématické znázornění vektorů pohybů při soustružení [1]: a) podélné soustružení válcové plochy, b) příčné soustružení čelní plochy.

Řezné podmínky

Řezná rychlost v_c závisí především na řezných vlastnostech nástroje, vlastnostech obráběného materiálu, jmenovitém průřezu třísky a na trvanlivosti břitu nástroje T. [1]

Posuv u soustružení je brán jako posuv na otáčku obrobku f . V závislosti na tuhosti obroku a na požadovaných parametrech struktury obrobeného povrchu se volí co největší. Při hrubování je snahou odstranit co nejvíce přebytečného materiálu za co nejkratší čas, z tohoto důvodu se posuv volí v rozmezí $0,4 \div 0,7$ mm nebo i vyšší. Při dokončování (obrábění na čisto) je odebíráno jen malé množství materiálu a obrobek dosahuje konečných parametrů. K tomu je zapotřebí pracovat s posuvem v rozsahu mezi $0,06 \div 0,3$ mm. Nejvyšší hodnoty posuvů se používají při jemném soustružení a pohybují se mezi $0,005 \div 0,05$ mm. [1; 6]

Rozdíl mezi obráběnou a obrobenou plochou se nazývá šířka záběru ostří a_p . Z hlediska hospodárnosti se volí co největší, přičemž snahou je odebrat celý přídavek na obrábění na jeden záběr. Je omezena mechanickými vlastnostmi materiálu obroku, jeho tuhostí a způsobem obrábění. S ohledem na zatížení a tvar břitu je vhodné volit poměr šířky záběru ostří k posuvu v rozsahu $3:1 \div 10:1$. [1; 5; 6]

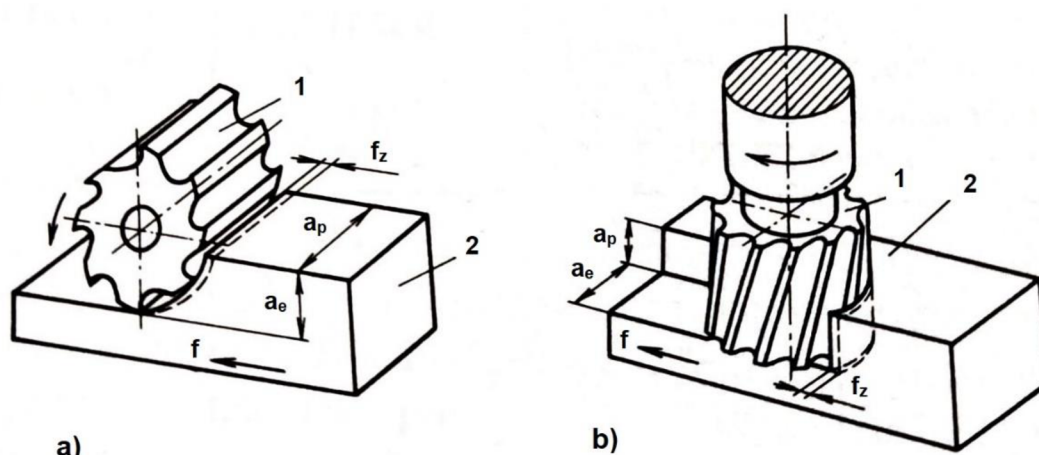
1.2 Frézování

Jedná se o technologii třískového obrábění, která se využívá pro obrobení rovinných či tvarových ploch a vnitřních nebo vnějších ploch pomocí otáčejícího se vícebřitého nástroje. Oproti soustružení je frézování mladší způsob obrábění. Stroj, na kterém se frézování provádí se nazývá frézka a vícebřitý nástroj pro frézování se nazývá fréza. Frézky jsou velice výkonné stroje a po soustružích jsou v průmyslu nejrozšířenější. [1; 6]

Hlavním pohybem u frézování je pohyb rotační, jenž koná nástroj. Vedlejší pohyby, tj. posuv a přísuv, koná obrobek. Výchozím relativním pohybem ostří vůči obrobku je zkrácená cykloida. Tvar této cykloidy se vzhledem k malé rychlosti posuvu vůči obvodové rychlosti frézy blíží kružnici. [6]

Oproti soustružení, kde byl řezný proces kontinuální, má frézování cyklický neboli přerušovaný řezný proces. Jednotlivé zuby frézovacího nástroje postupně vcházejí a vycházejí z materiálu obroku. Každý zub odřezává materiál v podobě krátkých třísek proměnné tloušťky. Při frézování tedy může být rovina proložená ostřím rovnoběžná nebo nakloněná k ose nástroje. [1; 4; 6]

V závislosti na použitém nástroji lze z technologického hlediska rozlišit frézování obvodem válcové frézy (obr. 4) a frézování čelem čelní frézy (obr. 4). Od těchto základních způsobů jsou odvozeny další způsoby, jako například frézování okružní a planetové. [1; 6]

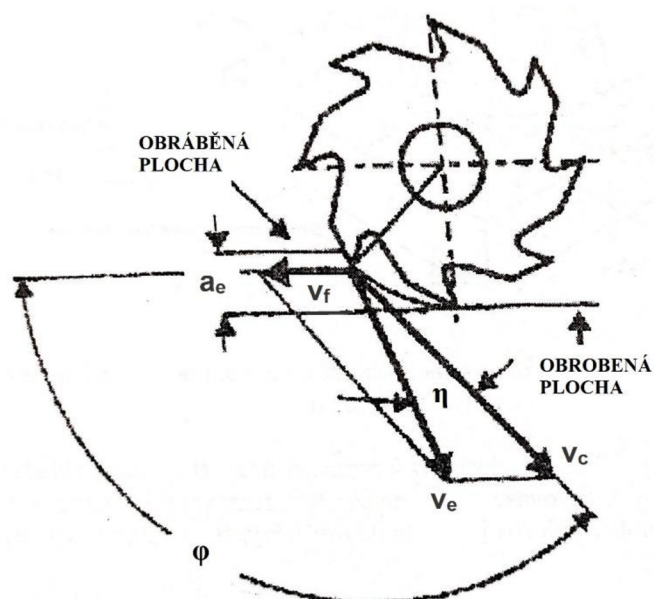


1 – fréza, 2 – obrobek, a_p – axiální hloubka řezu, a_e – radiální hloubka řezu, f – posuv, f_z – posuv na zub

Obr. 4: Frézování [6]: a) obvodem válcové frézy, b) čelem čelní frézy.

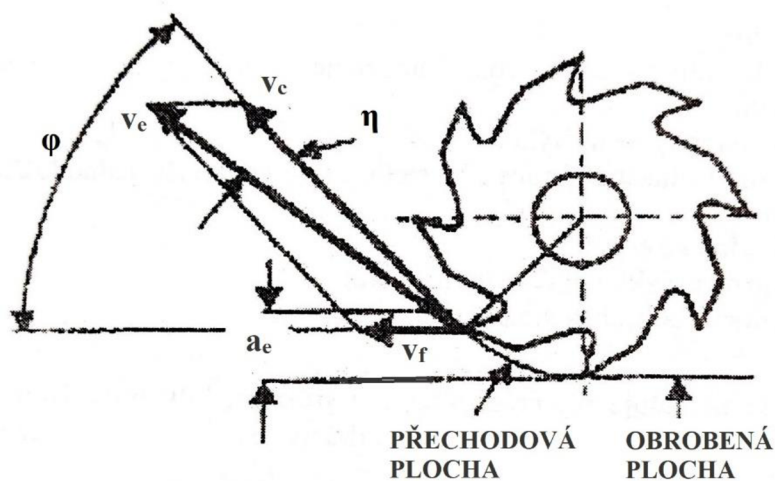
S ohledem na kinematiku obráběcího procesu se frézování dělí na sousledné (sousměrné) a nesousledné (protisměrné). [1]

U sousledného frézování (obr. 5) je směr posuvu obrobku orientován ve směru rotace nástroje. Průřez odebírané třísky se mění od maxima do nuly. Při vycházení zubu ze záběru se vytváří obrobená plocha. Řezné síly, které obvykle působí směrem dolů, přitlačují obrobek ke stolu, díky čemuž lze použít jednodušších upínacích přípravků. Výhody oproti nesouslednému frézování jsou například u trvanlivosti břitů, která je zde vyšší a mohou být použity vyšší rezní rychlosti a posuvy. Sousledné frézování má menší sklon ke chvění a lze dosáhnout menší drsnosti obrobeného povrchu. [1]



Obr. 5: Kinematika sousledného frézování [1].

U nesousledného frézování (obr. 6) je směr posuvu obrobku orientován proti smyslu rotace nástroje. Průřez třísky se postupně mění z nulové na maximální hodnotu. Při vnikání nástroje do záběru vzniká obrobena plocha. Tříška není oddělena v okamžiku své nulové hodnoty, ale až po určitém skluzu břitu po ploše, která byla vytvořena předcházejícím zubem. Záběr zubů frézy je nezávislý na hloubce řezu. Řezné síly působící směrem vzhůru odtahují obrobek od stolu. Tím jsou zvýšeny nároky na upínání. Výhody oproti souslednému frézování jsou v trvanlivosti nástroje, která nezávisí na okujích a písčitém povrchu. Dále je zde menší opotřebení šroubu a matice. [1]



Obr. 6: Kinematika nesousledného frézování [1].

2 ROZBOR TEPLOTNÍCH DĚJŮ

Teplo je neodmyslitelnou součástí obráběcího procesu, a proto je nutné věnovat mu pozornost. Proces obrábění je doprovázen teplotními ději, které mají vliv na nástroj i na obráběný materiál. Vysoká teplota v místě řezu ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálů zasažených touto teplotou. Toto ovlivnění mechanických vlastností má především vliv na opotřebení a životnost nástroje či na změnu struktury materiálu obrobku. Vzniklé teplo také značně ovlivňuje řezný proces, jelikož negativně působí na řezné vlastnosti nástroje, či má vliv na pěchování a zpevňování obráběného materiálu, případně ovlivňuje podmínky tření na čele i hřbetě nástroje. [3]

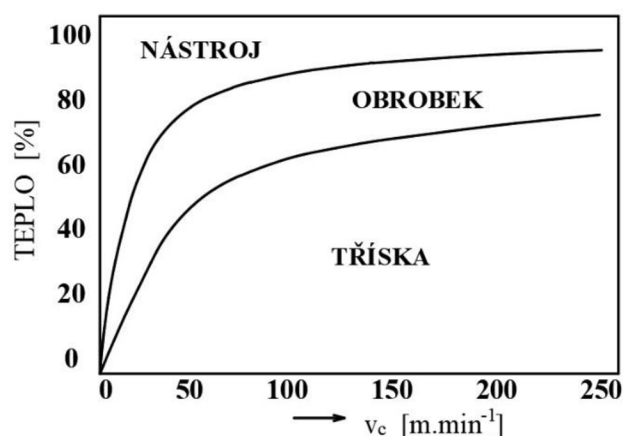
V podstatě všechna mechanická energie E_e vynaložená na tvorbu třísky se přeměňuje v energii tepelnou (jedná se o 95÷98 %). Zbývající malá část energie je uložena v deformovaných třískách a ve zbytkové napjatosti obrobeného povrchu jako elastická energie. Celkovou tepelnou energii lze vypočítat podle vztahu (1) [3]:

$$Q = Q_{Sh} + Q_{\gamma} + Q_{\alpha} + Q_{Ch} \approx E_e \quad (1)$$

Kde:

- Q = celková tepelná energie [J]
- Q_{Sh} = teplo způsobené plastickou deformací ve smykové rovině [J]
- Q_{γ} = teplo způsobené třením mezi třískou a čelem nástroje [J]
- Q_{α} = teplo způsobené třením mezi obrobenou plochou a hřbetem nástroje [J]
- Q_{Ch} = teplo způsobené utvářením a dělením třísky [J]
- E_e = veškerá mechanická energie vynaložená na tvorbu třísky [J]

Tepelná energie není rozdělena konstantně, stejně tak i poměrný odvod tepla třískou, nástrojem, obrobkem, resp. procesní kapalinou. Rozdělení tepelné energie s měnící se řeznou rychlostí je vyobrazeno na obr. 7. Velký vliv na rozdělení tepelné energie má i druh použité obráběcí technologie. [3]



Obr. 7: Poměrná distribuce tepla v závislosti na řezné rychlosti (při obrábění za sucha) [3].

Největší množství tepla se tvoří v oblasti primární plastické deformace, následovanou oblastí sekundární plastické deformace. Vznikající teplo v oblasti hřbetu by mělo být udržováno na co možná nejnižší hodnotě. Z tohoto důvodu je třeba volit úhel hřbetu co největší a zamezit jeho velkému opotřebení, které ve svém konečném efektu úhel hřbetu dále zmenšuje. Množství vzniklého tepla závisí na několika faktorech. Mezi tyto faktory se řadí vlastnosti obráběného materiálu, geometrie nástroje a řezné podmínky. [3]

2.1 Vliv řezných podmínek a nástrojových úhlů

Při zvyšování řezné rychlosti roste množství vzniklého tepla, jelikož se materiál rychleji deformuje. V první fázi lze pozorovat rychlejší nárůst teploty, ten se ale následně zpomalí. Se zvyšující se hodnotou řezné rychlosti v_c klesá měrný řezný odpor a s ním i teplota v oblasti primární plastické deformace. Oproti tomu značně roste práce a tření na čele nástroje. Hodnota řezné rychlosti musí být dostatečně velká, aby bylo zajištěno optimální změkčení obráběného materiálu v oblasti řezu. Pokud je materiál obráběn nízkými řeznými rychlostmi, je maximální teplota na špičce nástroje. Při použití vyšších řezných rychlostí je maximální teplota v určité vzdálenosti od ostří nástroje. [1; 3; 7]

Se zvyšováním hodnot posuvové rychlosti v_f a šířky záběru ostří a_p se také zvyšuje množství vzniklého tepla. Zvýšení tepla je však méně razantní než při zvyšování řezné rychlosti. Nejen z hlediska tepelného zatížení nástroje je výhodnější štíhlá tříska. Ta vzniká při malých hodnotách f a velkých hodnotách a_p . [3]

Při zvyšování pracovního úhlu nastavení hlavního ostří κ_{re} se vzniklé teplo soustředí na menší část břitu, a to je důvodem nárůstu tepelného zatížení nástroje. Velikost nástrojového úhlu nastavení hlavního ostří κ_r ovlivňuje tvar třísky, drsnost obrobené plochy, tuhost špičky obráběcího nástroje a její opotřebení. [3; 8]

Úhel čela γ_o a úhel řezu δ_o mají největší vliv na průběh řezání, jelikož oba tyto nástrojové úhly určují polohu čela nástroje vzhledem k pracovní rovině řezu. Při zmenšujícím se úhlu čela narůstá úhel řezu a následně dochází ke zvětšování intenzity plastické deformace vlivem většího tření třísky po čele nástroje. To je příčinou nárůstu množství vzniklého tepla. [3; 8]

Nástrojový úhel hřbetu α_o výrazně ovlivňuje velikost tření, které vzniká pohybem hřbetu nástroje po řezné ploše. Čím je úhel α_o menší, tím více narůstá práce tření na hřbetě nástroje a tím i množství vzniklého tepla. Vysoké teploty vzniklé vlivem velikosti úhlu hřbetu mají za následek rychlý lom břitu. [1; 3; 8]

2.2 Odvádění teploty z místa řezu

Nejvíce tepla vzniká v rovině stříhu. Části jednotlivých odváděných složek tepla při řezném procesu do třísky, obrobku, nástroje a prostředí jsou závislé na tepelné vodivosti materiálů obrobku a nástroje, na řezných podmínkách, řezném prostředí a na geometrii břitu nástroje. [1]

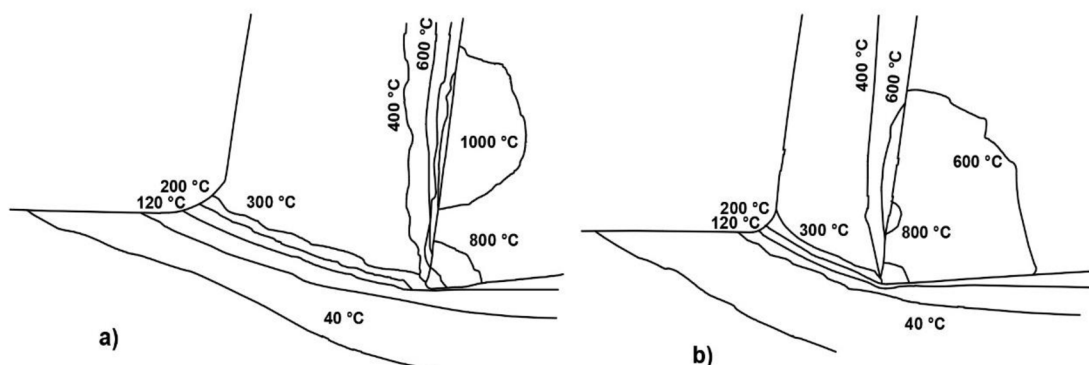
Při obrábění je ze zóny řezání největší část vzniklého tepla odváděna pomocí třísky. Ve většině případů tříska odvádí zhruba 80 % tepla vzniklého v místě řezu, někdy i více. Nástroj a obrobek pak odvedou zbylé množství, které je mezi ně rozděleno přibližně

v rovnoměrném poměru. Tříska svou teplotou zatěžuje řezný nástroj jen po dobu kontaktu s ním. V případě nízké tepelné vodivosti obráběného materiálu (např. nerezové oceli) je odvod tepla třískami obtížnější. Se snižující se tepelnou vodivostí se zvyšuje množství tepla, které zůstává v řezné zóně a zvyšuje teplotu v řezu. Tepelná a teplotní vodivost řezného materiálu je korigována pomocí tvrdých, otěruvzdorných povlaků, které působí jako izolační štíty a snižují tok tepla nástrojem. [1; 3; 7]

Zlepšení odvodu tepla lze dosáhnout i za použití vyšších posuvů, jelikož s vyššími posuvy vznikají silnější třísky. Větší objem materiálu třísky zapříčiní větší odvod tepla. S vyššími posuvy vzniká větší tepelně ovlivněná oblast, ale teploty u řezné hrany se sniží. Výsledkem je delší životnost nástroje, a to především při obrábění nerezových ocelí a vysoce legovaných slitin. [7]

U soustružení konstrukčních ocelí je největší část tepla odváděna ve formě třísky a při rostoucí řezné rychlosti tento podíl narůstá, zejména pak při soustružení řeznou keramikou, kde lze dosáhnout podmínek, které jsou blízké adiabatickým, se třískou odvádí až 95 % vzniklého tepla. Jinak je tomu u broušení ocelí, kde je největší podíl tepla odváděn obrobkem (70÷90 %). Při vrtání ocelí za použití chlazení se většina vzniklého tepla (50÷70 %) odvádí procesní kapalinou. [3]

Na obr. 8 je vyobrazeno rozložení teplotních polí v primární a sekundární oblasti tvorby třísky. Experiment byl prováděn s obrobkem z automatové oceli a řezným materiálem SK-P20. Dalšími důležitými vstupními parametry byly $\gamma_o = 20^\circ$, $v_c = 155$ m/min, $f = 0,27$, $h_D = 0,1$ mm. [3]



Obr. 8: Rozložení teplotních polí v primární a sekundární oblasti tvorby třísky [3]:
a) $\Phi = 18,7^\circ$, b) $\Phi = 23,7^\circ$.

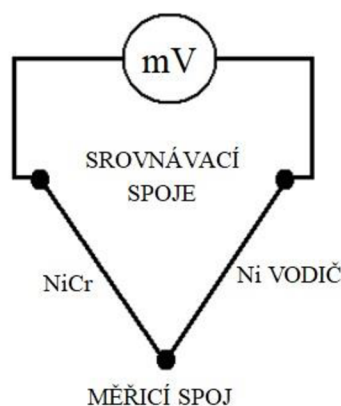
3 MĚŘENÍ TEPLoty PŘI OBRÁBĚNÍ

Měření teploty při obrábění je značně obtížné kvůli rozložení tepelného pole. To je rozloženo do třísky, nástroje a obrobku, a tato pole se neustále mění podle pohybu nástroje, třísky a obrobku. To vše je navíc ještě závislé na čase řezání. Identifikace teplotního pole se tedy považuje za náročný metrologický problém, který vyžaduje složité měřicí systémy a nástroje. [1; 3]

Teplota řezání je střední teplota všech stykových ploch mezi nástrojem a obrobkem a lze ji měřit v jednotlivých částech řezání různými způsoby. Mezi nejběžnější metody měření a záznamu teplotního pole patří metoda pomocí termočlánku, pyrometru, termokamery, termistoru, kalorimetrické metody a měření fázových přeměn materiálu vyvolaných teplotou v třisce nebo v nástroji. [1; 3]

3.1 Měření termočlánkem

Při měření teploty pomocí termočlánku je využíván termoelektrický jev. V obvodu tvořeném dvěma různými elektrickými vodiči, které jsou na koncích vodivě spojeny, vzniká termoelektrické napětí, pokud jsou oba spoje udržovány na rozdílných teplotách. Měřicí spoj se nachází v místě měření teploty a na srovnávacím spoji je udržována známá teplota (převážně teplota okolí). K těmto vodičům je pak následně připojen milivoltmetr (obr. 9). [9]



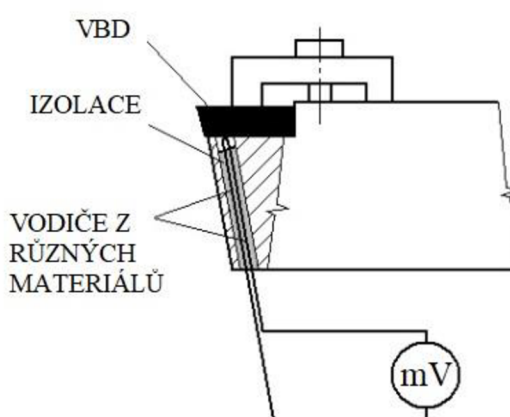
Obr. 9: Schéma zapojení vodičů termočlánku [9].

Na hodnotu vzniklého termoelektrického napětí má mimo rozdílu teplot vliv také druh materiálu použitých vodičů tvořících termočlánek. Termočlánek lze dle provedení rozdělit na [9]:

- umělé,
- poloumělé,
- přirozené,
- termoduo.

Umělý termočlánek

Umělý termočlánek je přímo umístěn do místa měření teploty (místo řezu). Za pomoci dvou cizích vodičů lze měřit teplotu na různých místech nástroje i obrobku, mimo plochy řezu a stykových ploch břítu nástroje s odebíranou třískou. Nejčastěji je využíván pro měření teploty na břítu nástroje. Zabudování upraveného a izolovaného termočláneku na dno v nástroji je složité, jelikož nelze lehce určit přesnou polohu měřicího spoje termočláneku, která má vliv na podmínky vedení tepla a často znehodnocuje měření. Z tohoto důvodu se častěji používají u nástrojů s vyměnitelnou břitovou destičkou, kde je termočlánek stabilně zabudovaný v nástroji a snímá teplotu na spodní ploše VBD (obr. 10). [9]



Obr. 10: Schéma zapojení umělého termočláneku pro nástroj s VBD [9].

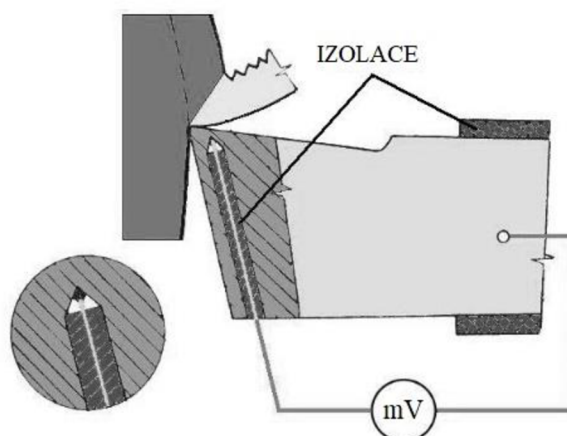
Izolace je velmi důležitý faktor a nejčastěji se používají skleněné, popř. keramické kapiláry. Za největší výhodu umělých termočláneků se považuje známost charakteristiky závislosti termoelektrického napětí na teplotě. [9]

Poloumělý termočlánek

U poloumělého termočláneku tvoří jeden z vodičů termočláneku materiál nástroje nebo obrobku a druhý cizí vodič je vodivě spojený s místem řezu (obr. 11). Malé rozměry cizího vodiče zajišťují jeho lepší umístění do místa měření a díky tomu jsou poloumělé termočláneky na rozdíl od umělých více použitelné. Využití poloumělého termočláneku je závislé na možnosti umístění do místa řezu a vodivém spojení s materiálem obrobku či nástroje. [9]

Používají se dvě varianty zapojení. Jedna z variant je uspořádání s přivařeným vodičem na dno otvoru a u druhé varianty je izolovaný vodič vyvedený až na povrch čela břítu. Při procesu řezání dochází v místě řezu k deformaci vlivem odcházející třísky a vytváří se měřicí spoj termočláneku spolu s břitem obráběcího nástroje. Pro změření teplotních polí na čele nástroje musí být použito více cizích vodičů systematicky rozmístěných po čele nástroje. Je také nutné, aby nástroj s obrobkem byly elektricky odizolovány. [9]

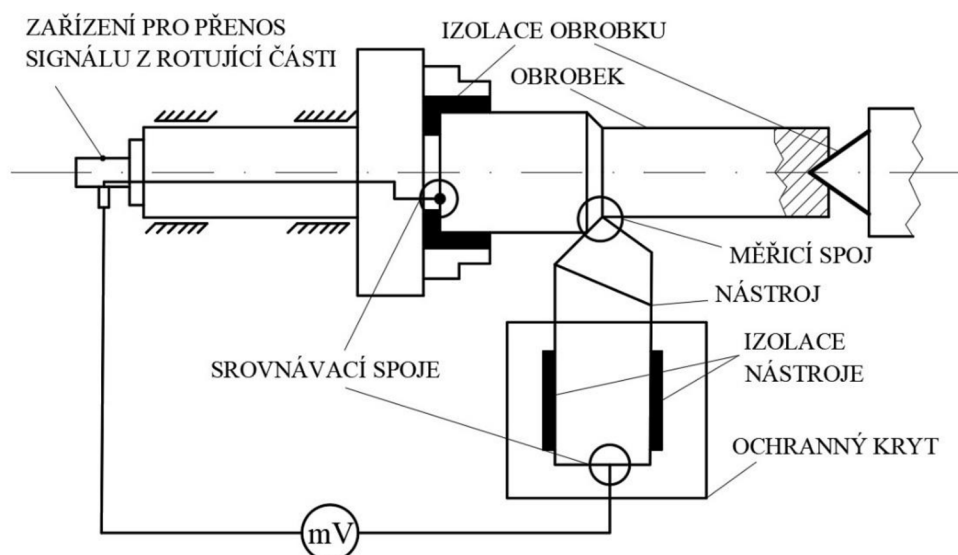
Pokud je cizí vodič zabudovaný do odřezávané vrstvy obrobku, lze poloumělý termočlánek využít pro měření teplot v oblasti primární plastické deformace. V průběhu plastické deformace této vrstvy a její přeměně v třísku dojde k vodivému spojení. [9]



Obr. 11: Schéma zapojení poloumělého termočlánu [9].

Přirozený termočlánek

Měření teploty přirozeným termočlánkem je relativně jednoduchá metoda. Při této metodě není přítomen cizí vodič. Jeden z vodičů tvoří materiál nástroje a druhým je materiál obrobku. Měřicí spoj přirozeného termočlánu se nachází na stykové ploše třísky s čelem a hřbetu s plochou řezu (obr. 12). Nutné je dodržet vzájemnou elektrickou izolaci nástroje a obrobku. [1; 3; 9]



Obr. 12: Schéma měření teploty přirozeným termočlánkem při soustružení [1].

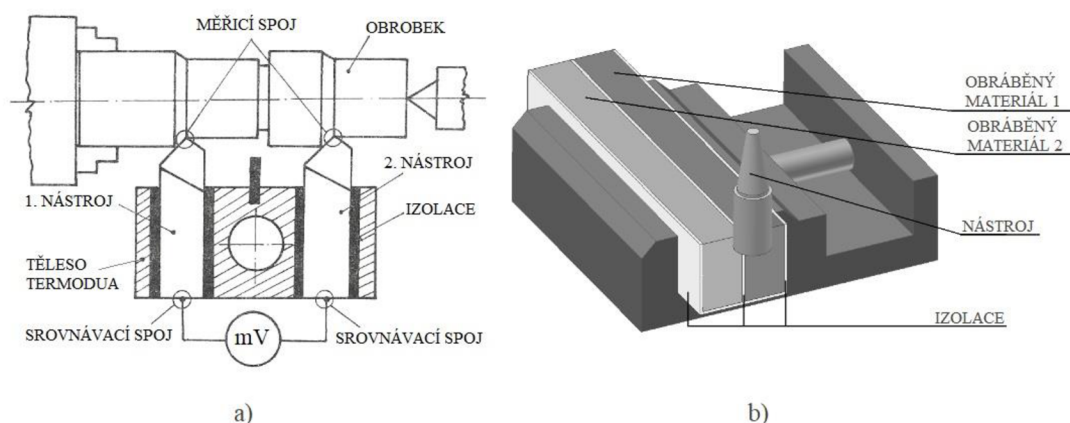
Pomocí přirozeného termočlánu lze měřit střední teplotu u všech stykových míst mezi nástrojem a obrobkem. Termoelektrické napětí je zde úměrné střední teplotě řezání. Díky možnosti registrovat okamžité změny teploty řezání je tato metoda využívána nejen při experimentální práci, ale nachází své využití jako jedna z možností snímačů obráběcího procesu u obráběcích strojů s adaptivním řízením. Nevýhodou u přirozeného termočlánu tvoří kombinace materiálu nástroje a obrobku, pro kterou musí být stanovena cejchovní křivka, která se s každou kombinací mění. [1; 9]

Termoduo

V porovnání s předchozími metodami je metoda Termoduo jednoduchá a snadněji se připravuje. Tato metoda je však vhodnější pro celistvé nástroje, protože u nástrojů s pájenými nebo vyměnitelnými břitovými destičkami není výstupem spolehlivý výsledek měření, jelikož dochází k postupnému prohřívání i stykové plochy mezi destičkou a držákem a dochází k tzv. parazitním termočládkům. Způsob a provedení metody se liší dle použité obráběcí technologie. [9]

Pro soustružení (obr. 13), metoda spočívá v současném záběru dvou nástrojů z odlišných materiálů, stejné geometrie při stejných řezných podmínkách. Tyto nástroje spolu tvoří vlastní termočlánek a vzájemně se odlišují chemickým složením pro získání dostatečně velkého termoelektrického napětí, které zajistí spolehlivost měření. Nutnou podmínkou je odizolování nástrojů od stroje a mezi sebou. Po ocejchování použitých řezných materiálů je možné stanovit teplotu řezání pro jakýkoliv elektricky vodivý materiál obrobku. [9]

Pro obráběcí technologii frézování (obr. 13) je nutné upravit konstrukci a seskupení obráběcí soustavy, která spočívá v záměně funkce obrobku a nástroje. Jedním nástrojem se obrábí dva materiály různého chemického složení. Zde je nutné vzájemné odizolování obrobků i jejich odizolování vůči celé soustavě, které zabrání vzniku parazitních termočláneků. Parazitní termočláanky mohou vznikat i z důvodu špatného odchodu třísky z místa řezu a je tedy nutné brát ohled na tento problém. Vhodný odchod třísky z místa řezu lze zajistit například použitím vhodného tvaru izolátorů. [9]



Obr. 13: Schéma měření metodou Termoduo [9]: a) soustružení, b) frézování.

3.2 Měření termistorem

Termistor je odporová nelineární elektrická součástka, která využívá teplotní závislosti elektrického odporu materiálu. U polovodičů elektrický odpor s rostoucí teplotou klesá, v případě kovů je tomu naopak a elektrický odpor se s rostoucí teplotou zvyšuje. Termistory se podle teplotního koeficientu dělí na záporné NTC (Negative Temperature Coefficient) a kladné PTC (Positive Temperature Coefficient), které jsou vyobrazeny na obr. 14. [9; 10]



Obr. 14: Termistory: a) NTC [11] b) PTC [12].

Termistory NTC, jinak nazývány negastory, mají záporný teplotní koeficient odporu. S rostoucí teplotou roste i koncentrace nosičů náboje a elektrický odpor klesá. Jsou vyráběny pomocí práškové, tenkovrstvé nebo tlustovrstvé technologie. Tenkovrstvé termistory se vyrábí ze směsi oxidů kovů a po vylisování jsou následně zpevněny slinováním za vysokých teplot. Tlustovrstvé se vyrábějí nanášením speciálních past a poté se vypalují. Obvyklý rozsah teplot je $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výhodou je široké rozmezí hodnot odporu ($0,1\ \Omega$ až řády několika $\text{M}\Omega$) a velká citlivost, díky které je možné měřit i dosti rychlé teplotní změny. Největší nevýhodou zde tvoří značná nelinearita. [10]

Termistory PTC, jinak nazývány pozistory, mají kladný teplotní koeficient odporu. Při rostoucí teplotě jejich odpor nejdříve lehce klesá a následně po překročení Curieovy teploty strmě roste. Hodnota se zvětší přibližně o tři řády a pak odpor zase mírně klesá (s tímto úsekem klesání se však obvykle nepracuje). Pozistory jsou vyráběny z polykrytalické keramiky pomocí technologie sintrování práškových směsí nejčastěji do tvaru malého disku. Teplota přechodu je závislá na chemickém složení. V běžném rozsahu $60\div 180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jejich výhodou je značně vysoký teplotní součinitel odporu, díky čemuž je lze využít pro měření teploty ve velmi úzkém teplotním pásmu. [10]

3.3 Měření termokamerou

Termokamera je bezdotykový přístroj pro měření teploty v povrchové části zkoumaného tělesa či soustavy těles, který využívá zpracování infračerveného záření. Její konstrukce se podobá konstrukci klasické kamery nebo fotoaparátu (obr. 15). [13–15]



Obr. 15: Termokamera [16].

Výstupem měření je termogram zobrazený na displeji termokamery nebo na monitoru počítače propojeného s termokamerou. Pomocí termokamery se neměří teplota přímo, neboť termokamera stanovuje teplotu výpočtem dle rovnice termografie z naměřené intenzity tepelného záření. [1; 13; 14; 15]

K tepelnému záření, které snímá termokamera, neodmyslitelně patří pojem emisivita. Ta je vyjádřena jako poměr zářivého toku reálného objektu a černého tělesa při stejné teplotě. Dle Stefan-Boltzmanova zákona pro vyzařování šedého tělesa, určuje emisivita povrchu tělesa jeho způsobilost emitovat tepelné záření. Na emisivitu je tedy možno nahlížet jako na efektivitu vyzařování. S rostoucí emisivitou roste vyzařování tepelného záření předmětem při určité teplotě. Těleso pohlcující všechno na něj dopadající záření je nazýváno černým tělesem a má nejvyšší emisivitu, která je rovna 1. V případě reálného tělesa je emisivita pokaždé menší než 1 (tab. 1). [13; 14; 17]

Tab. 1: Emisivity pro různé druhy povrchů [14].

Druh povrchu	Teplota [°C]	Emisivita
Absolutně černé těleso	-	1
Černý lak matný	40÷100	0,96÷0,98
Lidská pokožka	32	0,96
Voda	20	0,96
Cihla (červená, normální)	20	0,93
Papír (bílý, matný)	20	0,93
Dřevo hoblované	20	0,8÷0,9
Železo zoxidované	100	0,74
Železo lesklé	150	0,16
Měď leštěná	100	0,03

Hodnota emisivity zkoumaného povrchu závažným způsobem ovlivňuje výsledek měření termokamerou i pyrometrem. Pokud je na přístroji nastavena špatně, nemusí být výsledky měření správné. Zkoumané těleso při stejné povrchové teplotě může vlivem odlišné emisivity na různých místech vykazovat rozdílně naměřené teploty. [13; 17]

Zdánlivá odražená teplota představuje tepelné záření, které je odraženo od měřeného objektu. Odrazivost je vyjádřena jako poměr odraženého a dopadajícího zářivého toku. Odrazivost povrchu je úzce spjata s emisivitou, jelikož čím menší bude emisivita měřeného povrchu, tím větší bude vliv zdánlivé odražené teploty. Pro použití v praxi z toho vyplývá, že je jednodušší měřit povrchy s velkou emisivitou a pokud je to možné, volit spektrální rozsah měřicího přístroje takový, kde bude emisivita co největší. [13; 14]

U termokamer je vždy možné nastavit emisivitu a zdánlivou odraženou teplotu. Modernější termokamery s lepším vybavením mají možnost nastavit parametr atmosféry, který zahrnuje teplotu atmosféry, relativní vlhkost atmosféry a vzdálenost měřeného objektu od termokamery. U některých druhů termokamer je navíc možné korigovat vliv externí optiky. [13]

Výhody u bezdotykových měřicích zařízení jsou bezesporu v rychlosti měření, možnosti měřit teplotu na pohybujících se objektech, lze měřit i dosti vysoké teploty,

nehrozí riziko kontaminace a vlivem měření nejsou vyvíjeny žádné mechanické účinky na povrch měřeného objektu. Největší nevýhodou pro bezdotykové měření je, že lze měřit pouze povrchovou teplotu a pro správné výsledky měření je nutné nastavit různé parametry měření. [18]

Termokamery jsou oproti pyrometrům výhodnější například v možnosti pořizování termogramů s velkým rozlišením, lze dosáhnout větší teplotní citlivosti (méně než 0,02 °C), z termogramu lze získat lepší a celistvější představu o tepelném rozložení v místě měření a vlivu tepelných odrazů okolí. [13]

Termokamery spolu s pyrometry představují moderní a výkonnou měřicí techniku, která se používá pro termografii a termodiagnostiku v širokém spektru průmyslových odvětví. Na jejich využitelnost v terénu nebo laboratoři nemají vliv pouze základní parametry, ale i další měřicí a vyhodnocovací funkce. Pro průmyslové aplikace tvoří výkonné a neinvazivní nástroje pomocí kterých lze provádět monitorování a diagnostiku stavu elektrických a mechanických zařízení. [14; 19; 20]

3.4 Měření pyrometrem

Pyrometry jsou stejně jako termokamery bezdotykové měřicí přístroje pro zjišťování povrchové teploty v daném místě měřeného objektu. Měřicí oblast je nejčastěji kruhového tvaru, ale u speciálních pyrometrů může mít tato oblast i jiný tvar (např. obdélníkový, který se využívá při měření teploty tekutých kovů při procesu lití). Pyrometry pracují na stejném principu jako termokamery, tudíž zachycují tepelné záření v infračervené oblasti spektra a následně ho převádějí na tepelnou hodnotu. I u pyrometrů se musí počítat s různými parametry měření jako je například emisivita, která lze vždy při měření na pyrometru nastavit. Výstupem měření je zápis teploty zobrazený na displeji pyrometru. [13; 21]

Na pyrometr se vztahují všechny výhody i nevýhody pro bezkontaktní měřicí zařízení, které již byly zmíněny u termokamer. [18]

Přednosti pyrometru vůči termokameře jsou zejména v nižších pořizovacích nákladech (pokud se nevyžaduje univerzálnost), vyšší přesnosti v oblasti vysokých teplot (ve srovnání s běžnými termokamerami), možnosti pořízení pyrometru s větší mechanickou a tepelnou odolností (v případě termokamery by se jednalo o vyšší cenu) nebo i odolností vůči magnetickým či elektrickým polím. S pyrometrem lze také levněji měřit teplotu přes sklo. Při použití poměrového pyrometru pracujícího na principu měření intenzity tepelného záření na dvou různých vlnových délkách není nutné nastavovat emisivitu měřeného povrchu. [13]

Pro některé aplikace bezdotykového měření teploty je použití termokamer cenově neefektivní nebo z technického hlediska nevhodné a díky použití pyrometru lze dosáhnout zásadní finanční úspory nebo i výhodnějších technických parametrů. Pyrometry jsou v průmyslu využívány především pro kontrolu a optimalizaci výrobních procesů a technologií. Jsou vhodné pro zjišťování teploty na těžce přístupných místech, u pohyblivých objektů nebo v případě, kdy nesmí být měřený objekt následky měření poškozen. Pyrometry jsou nejčastěji využívány ve slévárenském a kovozpracujícím průmyslu, kde se s jejich pomocí měří teploty při zpracování oceli (obr 16). Dále jsou hojně využívány i v laboratořích, díky rychlé indikaci teploty. [14; 21]



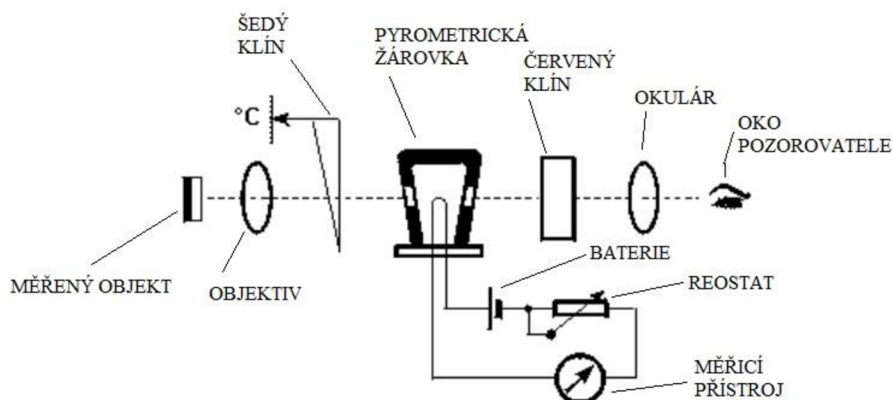
Obr. 16: Měření teploty tekutého kovu během lití pomocí pyrometru [14].

Z hlediska praxe je nejlepší dělit pyrometry podle spektrální oblasti využitého záření. Dle tohoto kritéria se tedy dělí na spektrální, barvové, radiační a pásmové. [22]

Spektrální pyrometry

Spektrální pyrometry, někdy také jasové či optické, respektive monochromatické, pracují na principu snímání tepelného záření vyzařovaného měřeným objektem, jenž odpovídá jedné vlnové délce elektromagnetického spektra. Jasové pyrometry (obr. 17) fungují na principu porovnání intenzity přijatého záření s intenzitou záření pomocného srovnávacího zdroje. Tímto srovnávacím zdrojem bývá pyrometrická žárovka s wolframovým vláknem, na kterém se dá pomocí regulátoru měnit teplota. [22]

Srovnávání se provádí pomocí lidského oka nebo různými elektrooptickými kompenzačními metodami. Lze měnit jas wolframového vlákna (srovnávacího zdroje) až do chvíle, než vlákno splyne s pozadím nebo se při zachování stejného jasu srovnávacího zdroje omezuje jas měřeného objektu (zářiče) šedým klínovým filtrem. [22]



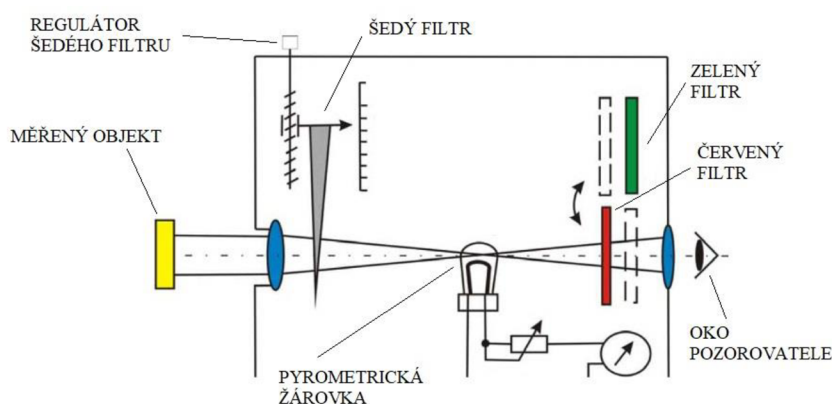
Obr. 17: Schéma zapojení jasového pyrometru [9].

Barvé pyrometry

U barvových i spektrálních pyrometrů je čidlem oko pozorovatele. Barvé pyrometry pracují na principu využívání záření ve viditelné oblasti spektra (ve dvou úzkých vlnových rozsazích $\lambda_1 = 0,55 \mu\text{m}$ a $\lambda_2 = 0,65 \mu\text{m}$, což odpovídá zelené a červené barvě). Teplota je vyhodnocena pomocí barevného vjemu vyvolaného těmito spektry (k určení teploty je využit poměr jasů nebo srovnání záření). Jsou vhodné pro měření teploty šedých zářičů, pokud u nich neznáme emisivitu, nebo u nich emisivita silně kolísá. Chyba měření bývá menší než 3 % z měřicího rozsahu. Barvé pyrometry jsou rozděleny na srovnávací a poměrové. [22; 23]

Srovnávací barvý pyrometr je vybaven šedým, černým a červozeleným klínovým barevným filtrem. Dále obsahuje pyrometrickou žárovku a regulační obvod pro žhavení žárovky na určitou teplotu. Šedým klínem je srovnáván jas zářiče s jasem žárovky a zároveň je na stupnici indikována jasová teplota. Následně se pomocí červeného klínu dosáhne totožné barvy měřeného objektu s barvou pyrometrické žárovky – poloha klínu určí na stupnici velikost barvové teploty. Tento typ pyrometru je vhodný pouze na měření, kde se teplota nemění příliš rychle. [22; 23]

Poměrový barvý pyrometr (obr. 18) funguje jako dva samostatné jasové pyrometry s odlišnými vlnovými délkami. Tento druh barvého pyrometru je vybaven dvěma výměnnými barvovými filtry (červeným a zeleným) a určuje dvě jasové teploty pomocí srovnání jasů zářiče s jasem pyrometrické žárovky s využitím šedého klínu. [22; 23]

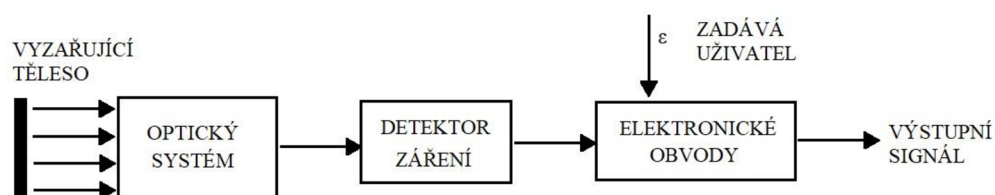


Obr. 18: Schéma uspořádání poměrového barvého pyrometru [23].

Radiační pyrometry

Radiační neboli úhrnné pyrometry využívají celkové tepelné záření, které je vyzářeno tělesem v celém spektru vlnových délek. Pomocí optické soustavy (obr. 19) je tepelné záření soustředěno na teploměrné čidlo (nejčastěji termočlánek či odporový teploměr). Následně se termoelektrické napětí měří milivoltmetrem (nejčastěji) se stupnicí, které je kalibrována přímo na $^{\circ}\text{C}$. [9]

Pro zaručení správného měření teploty zářiče, je nutné, aby na přijímač zařízení dopadaly jen tepelné paprsky zářiče. Chyby v měření nejčastěji způsobuje rušivé denní světlo (měřený objekt ozářený sluncem nelze měřit). [9]



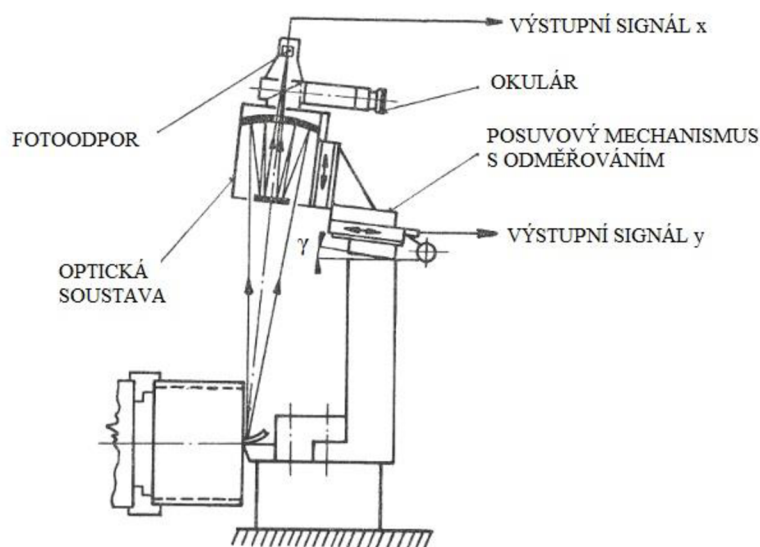
Obr. 19: Schéma úhrnného pyrometru [9].

Ke zpracování signálu se pro současně vyráběné přístroje používají moderní elektronické obvody řízeny mikroprocesorem. Na displeji přístroje se zobrazí měřený údaj i případné hlášení o poruchových stavech. Do paměti systému jsou uloženy údaje o maximální a minimální měřené teplotě, střední hodnota měřené teploty a údaj o rychlosti změny teploty. [9]

Pásmové pyrometry

V případě měření pásmovým (fotoelektrickým) pyrometrem je využívána pouze určitá šířka spektra tepelného záření, které je vymezeno pomocí optiky, filtrů a spektrální citlivostí fotoelektrického čidla. Jako fotoelektrická čidla jsou často používány fotonky, fotočlánky či fotodiody. Výhodou u fotoelektrických pyrometrů tvoří značně rychlá reakce na změnu teploty s dostatečnou přesností a citlivostí v daném spektrálním pásmu. [9]

Jaké z provedení pásmového pyrometru je pro daný případ vhodné, závisí na rozmezí, ve kterém se pohybuje měřená teplota objektu, na materiálu měřeného objektu, vlastnostech jeho povrchu a atmosféře, jež se nachází mezi měřeným objektem a pyrometrem. Pásmové pyrometry se s výhodou používají tam, kde se mezi měřeným objektem a pyrometrem nachází plyny s absorpčními pásmy v oblasti infračerveného záření. Mezi tyto plyny se řadí například CO_2 nebo vodní pára. [9; 24]



Obr. 20: Schéma měření teploty třísky pásmovým pyrometrem [9].

Vliv přítomnosti těchto plynů lze omezit vhodnou volbou pásma vlnových délek použitých u přístroje. Aby se absorpce plynů neuplatňovala, jsou využívány pyrometry s takovými čidly, které toto zajistí. Při technologii obrábění jsou tyto pyrometry využívány zejména pro měření teploty na povrchu třísky (obr. 20), břitu nástroje či povrchu obrobku. [9; 24]

4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ TEPLoty

Jak již bylo zmíněno, v této bakalářské práci je zkoumána teplota nástroje při obrábění různorodých materiálů (kovových i nekovových). Jako obráběcí technologie byly vybrány technologie frézování a soustružení, které zastupují nejpoužívanější obráběcí technologie ve strojírenském průmyslu.

4.1 Materiál obrobků

Pro experimentální měření bylo vybráno 10 různých materiálů se zastoupením 7 kovových a 3 nekovových. Tyto materiály byly následně rozděleny dle své tvarové vhodnosti, pro dané technologie obrábění, do dvou skupin, z nichž první byla určena pro frézování a druhá pro soustružení. Tyčový materiál, který představuje typický polotovar pro obrábění na soustruhu, protože lze snadno upnout do vřetena soustruhu a následně plynule obrábět, byl zařazen do druhé skupiny. Materiál ve formě desek či kvádrů, který je typickým představitelem polotovaru pro frézování, jelikož při frézování jdou tyto tvary snadněji upnout do svěráku, byl zařazen do první skupiny.

Kovové materiály

Za představitele kovových materiálů při experimentu byly zvoleny materiály: ČSN 11 109, ČSN 11 373, ČSN 12 050, ČSN 15 260, ČSN 17 243, ČSN 42 4254.64 a ČSN 42 4401. Kovové materiály lze rozdělit na železné kovy, které jsou v experimentu zastoupeny pěti materiály, a neželezné kovy zastoupeny dvěma materiály.

Nekovové materiály

Skupinu nekovových materiálů při experimentálním měření zastupovaly: umělé dřevo, polyamid PA6 a dubové dřevo. Nekovové materiály lze rozdělit na přírodní a uměle vytvořené (syntetické) materiály.

Informace o výše zmíněných kovových i nekovových materiálech jsou uvedeny v příloze 1.

4.2 Volba obráběcích nástrojů

Nástroje pro experimentální obrábění výše zmíněných materiálů byly zapůjčeny z dílny VUT v Brně z FSI. Jednalo se o stopkovou frézu a soustružnický nůž. Vyměnitelné břitové destičky v těchto nástrojích nebyly úplně nové, ale již lehce opotřebené ($VB = 0,10 \div 0,15$ mm).

Frézování

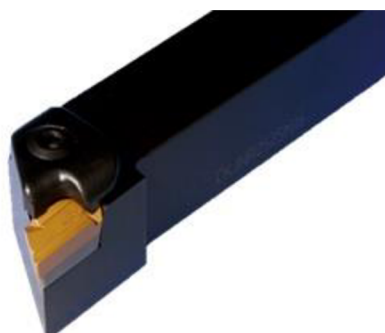
Pro frézování byla zvolena stopková fréza od firmy PRAMET. Fréza s ISO označení 20A3R032B20-SAP10D-C byla vybavena třemi vyměnitelnými břitovými destičkami s ISO označením APKT 1003PDER-M z materiálu 8240 (obr. 21). Technické údaje o fríze a VBD jsou uvedeny v příloze 2.



Obr. 21: Fréza 20A3R032B20-SAP10D-C [25].

Soustružení

Pro technologii soustružení byl zvolen soustružnický nástroj CKJNR2020K16 s VBD KNUX 160405SR-73 z materiálu 6640 (obr. 22). Technické údaje o soustružnickém nástroji a VBD jsou uvedeny v příloze 2.



Obr. 22: Soustružnický nástroj CKJNR2020K16 [26].

4.3 Použitá zařízení při experimentu

Experimentální měření bylo prováděno na školních strojích a s pomocí školního vybavení. K experimentu byly využity dva stroje, konzolová vertikální frézka FV 25 CNC A a hrotový soustruh SV 18 RD. V rámci měření bylo využito dvou měřicích zařízení, a to ručního otáčkoměru typu H6 a infračerveného teploměru (pyrometru) Raytek Raynger MX4+NI.

Konzolová vertikální frézka FV 25 CNC A

Typickou částí konzolové frézky je výškově přestavitelná konzola, která má svou pohyblivost omezenou vedením stojanu. Konzola je vybavena pohyblivým příčným stolem a podélným pracovním stolem, které zajišťují přestavitelnost upnutého obrobku ve třech pravouhlých souřadnicích orientovaných vůči nástroji. Konzolové frézky se obecně používají na frézování rovinných a tvarových ploch pro malé či středně velké obrobky. Využití nacházejí v kusové a malosériové výrobě. [27]

Konzolová vertikální (svislá) frézka má oproti horizontální frézce osu pracovního vřetena kolmou k upínací ploše pracovního stolu. Svislé konzolové frézky se zejména využívají k frézování rovinných ploch rovnoběžných s upínací plochou pracovního stolu. Dále je lze využít k vytváření drážek v těchto rovinných plochách nebo k frézování ploch tvarových. Technické údaje a fotografie konzolové frézky FV 25 CNC A jsou v příloze 3. [27]

Hrotový soustruh SV 18 RD

Hrotové soustruhy jsou převážně používány v kusové a malosériové výrobě, pro soustružení hřídelových a přírubových součástí rozmanitých tvarů a rozměrů. Výhodou je nenáročnost seřízení stroje. Na takovém soustruhu lze obrábět vnitřní i vnější rotační plochy, čelní rovinné plochy, vytvářet zápichy, řezat závity a v neposlední řadě soustružit kuželové či tvarové plochy. Fotografie a technické údaje o hrotovém soustruhu SV 18 RD jsou v příloze 3. [27]

Ruční otáčkoměr H6

Ruční otáčkoměr H6 (informace uvedeny v příloze 3) byl využit pro zjištění co nejpřesnější hodnoty otáček na soustruhu, jelikož otáčkoměry zabudované v soustruhu neukazovaly přesné hodnoty. Přesnost ručního otáčkoměru a zároveň chybovost otáčkoměrů zabudovaných na soustruhu byla ověřena pomocí stroboskopu.

Pyrometr Raytek Raynger MX4+NI

Pomocí pyrometru byla měřena teplota na povrchu břitu nástroje při procesu obrábění. Měřicí zařízení teploty v podobě pyrometru bylo zvoleno s ohledem na přesnost, rychlost a komfortnost měření a také z důvodu podmínek pracoviště. Měření teploty termokamerou, by při tomto experimentu nebylo vhodné, jelikož by musela být zajištěna řádná ochrana optiky termokamery před odlétávajícími třískami během obráběcího procesu.

Fotografie a technické údaje o pyrometru Raytek Raynger MX4+NI, který byl použit pro měření teploty při experimentech, jsou uvedeny v příloze 3.

4.4 Postup experimentu

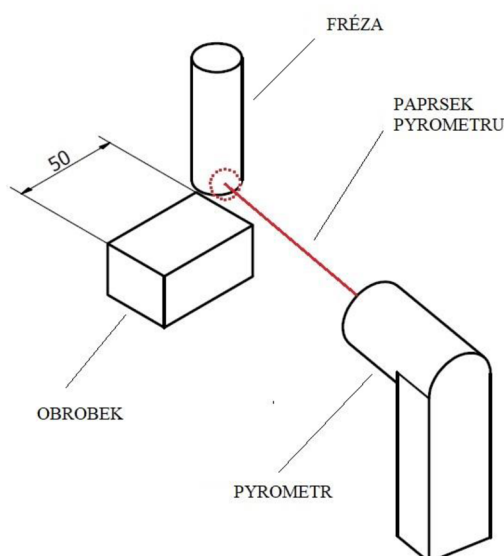
Experimentální měření teploty bylo prováděno při obráběcí technologii soustružení a frézování. Jednalo se o nesusledné frézování do rohu a podélné soustružení vnější plochy. Veškeré obráběcí operace probíhaly bez použití procesní kapaliny.

Měřicí sestavu tvořil obráběcí nástroj, obrobek a pyrometr. Pyrometr během celého procesu obrábění zaznamenával teplotu na povrchu obráběcího nástroje a v daném okamžiku byla teplota zapsána do pracovní tabulky.

Volba pyrometru a jeho vhodnost pro daný experiment byla zhodnocena již v předchozí podkapitole (4.3 Použitá zařízení při experimentu) v části Pyrometr Raytek Raynger MX4+NI.

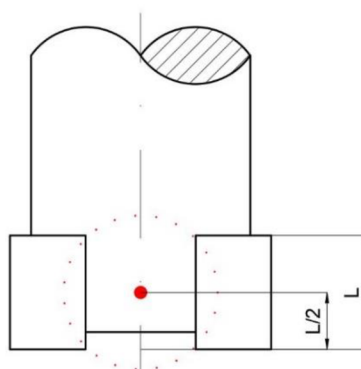
4.4.1 Nesousledné frézování do rohu

Polotovar určený pro obrábění frézováním byl vyhotoven ve formě kvádrů. Připravený polotovar pro obrábění byl upnut do svěráku s dostatečně velkým vyložení, aby bylo možné uskutečnit všechny požadované průjezdy. Následně byly spuštěny otáčky frézy a provedlo se zaměření polohy obrobku na pracovním stole frézky vůči nástroji. Potom byly na frézce nastaveny řezné podmínky (posuv, otáčky, radiální a axiální hloubka řezu). Radiální a axiální hloubka řezu byly stále konstantní pro všechny průjezdy nástroje. Radiální hloubka řezu byla zvolena $a_e = 8$ mm a axiální hloubka řezu $a_p = 2$ mm. Schéma soustavy fréza–obrobek–pyrometr při procesu měření je na obr 23.



Obr. 23: Schéma měření teploty při frézování.

Na pyrometru byla nastavena emisivita, byl umístěn na okraj pracovního stolu konzolové frézky a byl zacílen co nejpřesněji do osy nástroje ($\pm 0,5$ mm) v polovině výšky břitové destičky ($\pm 0,5$ mm) pomocí laserového zaměřování (obr. 24). Při celém procesu obrábění byla na pyrometru zaznamenávána teplota, která se neustále měnila. Teplota ve $2/3$ dráhy nástroje (± 2 mm) byla zaznamenána do pracovní tabulky, která byla podkladem pro tabulky 2÷9 a z nich se následně provedlo vyhodnocení v podobě grafů.



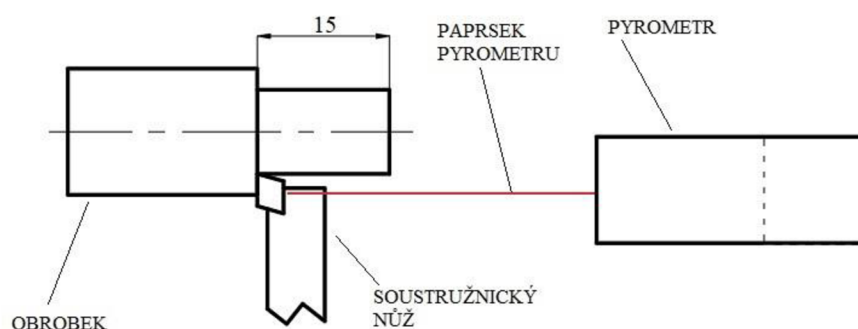
Obr. 24: Schéma zaměření pyrometru na tělo frézy.

Počet průjezdů byl stanoven dle tvarových možností obrobku. Nejvíce záleželo na velikosti a možnosti dostatečného upnutí ve svěráku. Minimálně byly však stanoveny čtyři průjezdy při konstantních řezných podmínkách z důvodu získání přesnější hodnoty následným aritmetickým průměrem z naměřených hodnot.

Před každým průjezdem byla změřena a zaznamenána počáteční teplota nástroje. Po každém průjezdu se břity nástroje ohřály, a tudíž se vždy začínalo obrábět s odlišnou počáteční teplotou. Rozdíl počátečních teplot a tím i naměřených teplot byl regulován odečtením od první naměřené počáteční teploty před prvním průjezdem (teplota okolí), čímž došlo k eliminaci nežádoucích odchylek.

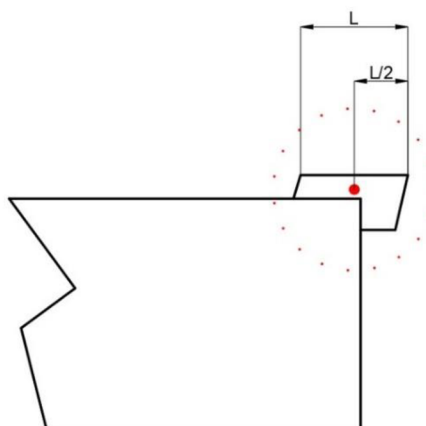
4.4.2 Podélné soustružení vnější plochy

Polotovár zvolený pro obrábění soustružením byl vybrán ve formě hřídele. Připravený polotovár pro obrábění byl upnut do sklíčidla s dostatečně velkým vyložení, aby bylo možné uskutečnit všechny požadované průjezdy. Následně byly spuštěny otáčky vřetena a provedlo se zaměření polohy obrobku ve sklíčidle vůči soustružnickému nástroji. Potom byly na soustruhu nastaveny řezné podmínky (posuv, otáčky a šířka záběru ostří). Šířka záběru ostří $a_p = 2$ mm byla během celého procesu obrábění konstantní. Schéma soustavy nástroj–obrobek–pyrometr při procesu měření je na obr 25.



Obr. 25: Schéma měření teploty při soustružení.

Na pyrometru byla nastavena emisivita, byl umístěn na okraj příčného suportu k nožové hlavě a byl pomocí laserového zaměřování co nejpřesněji zacílen do poloviny délky břitové destičky s tolerancí $\pm 0,5$ mm (obr. 26). Při celém procesu obrábění byla na pyrometru zaznamenávána neustále se měnící teplota. Teplota ve $2/3$ dráhy nástroje byla zaznamenána do pracovní tabulky, která byla podkladem pro tabulky $10 \div 14$ a z nich se následně provedlo vyhodnocení v podobě grafů.



Obr. 26: Schéma zaměření pyrometru na VBD.

Dle tvarových možností obrobku byl stanoven počet průjezdů. Nejvíce záleželo na velikosti a možnosti dostatečného upnutí ve sklíčidle. Z důvodu malých vzorků obráběných materiálů byly stanoveny čtyři průjezdy při konstantních řezných podmínkách. I zde byl z naměřených hodnot z důvodu získání přesnější hodnoty následně vypočten aritmetickým průměr.

U soustružení, stejně jako u frézování, byla před každým průjezdem změřena a zaznamenána počáteční teplota nástroje. Po každém průjezdu se břitová destička nástroje ohřála, a tudíž se vždy začínalo obrábět s odlišnou počáteční teplotou. Rozdíl počátečních teplot a tím i naměřených teplot byl regulován odečtením od první naměřené počáteční teploty před prvním průjezdem (teplota okolí), čímž došlo k eliminaci nežádoucích odchylek.

5 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Každá teplota byla měřena při určitých řezných podmínkách, které byly stanoveny dle použité VBD a rozsahu otáček stroje. Ve většině případů byl rozsah otáček stroje hlavním kritériem pro stanovení řezných podmínek. Frézka je omezena maximální hodnotou otáček $n = 6\,000\text{ min}^{-1}$ a soustruh je omezen hodnotou $n = 2\,200\text{ min}^{-1}$. Tyto krajní hodnoty převážně omezovaly obrábění nekovových a neželezných materiálů.

Doporučené řezné podmínky (řezná rychlost, posuv a šířka záběru ostří) pro obrábění určitého druhu materiálu pomocí VBD jsou uvedeny na krabičce s VBD. U materiálů, které byly vhodné pro obrábění použitými VBD, byly řezné rychlosti stanoveny tak, aby pokryly celý rozsah možnosti použití dle doporučení výrobce. Pro materiály na jejichž obrábění použité VBD nebyly určeny, a tudíž na krabičce nebyly uvedeny doporučené řezné podmínky, byly řezné podmínky převzaty z tabulek a upraveny dle možností použitých obráběcích strojů.

Pro frézování bylo nutné vypočítat posuv stolu frézky a otáčky obráběcího nástroje. Posuv stolu frézky lze vypočítat pomocí počtu zubů, posuvu na zub a otáček frézy. Posuv stolu frézky byl vypočten podle vztahu (2):

$$v_f = z \cdot f_z \cdot n \quad (2)$$

Kde:

v_f = posuvová rychlost [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]

z = počet zubů [-]

f_z = posuv na zub [mm]

n = otáčky [min^{-1}]

Otáčky obráběcího nástroje lze spočítat pomocí řezné rychlosti a průměru použité frézy. Otáčky byly spočítány dle vztahu (3):

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad (3)$$

Kde:

n = otáčky [min^{-1}]

v_c = řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

D = průměr frézy [mm]

Při soustružení bylo nutné zohledňovat měnící se průměr obrobku, který ovlivňuje velikost řezné rychlosti. Řezná rychlost byla vypočtena podle vztahu (4):

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (4)$$

Kde:

v_c = řezná rychlost [$m \cdot min^{-1}$]

D = průměr obrobku [mm]

n = otáčky [min^{-1}]

Naměřené teploty povrchu obráběcího nástroje byly zapsány do přehledné tabulky a následně z nich byl vytvořen graf závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti.

Grafy a tabulky byly vytvořeny pomocí softwarového programu Microsoft Excel. Tento tabulkový software umožňuje vytvářet velké množství grafů a tabulek. Pro účely zpracování naměřených dat v této bakalářské práci je dostačující.

Pro vytvoření grafů mohl být také použit například statistický software Minitab, který obsahuje rozsáhlé množství statistických metod určených pro analýzy dat.

Vzniklé body v grafech lze v softwaru Microsoft Excel proložit několika druhy křivek (spojnicemi trendu – lineární, mocninná, logaritmická a exponenciální). Na základě hodnoty spolehlivosti R^2 byla vybrána křivka, u které se její hodnota R^2 nejvíce blížila jedné. Koeficient determinace neboli hodnota spolehlivosti R^2 ukazuje, do jaké míry lze předpovědi věřit. Hodnoty blížící se nule napovídají, že zvolená funkce není vhodná. Naopak hodnoty blížící se jedné napovídají, že rovnice je velmi vhodná pro extrapolaci. [28]

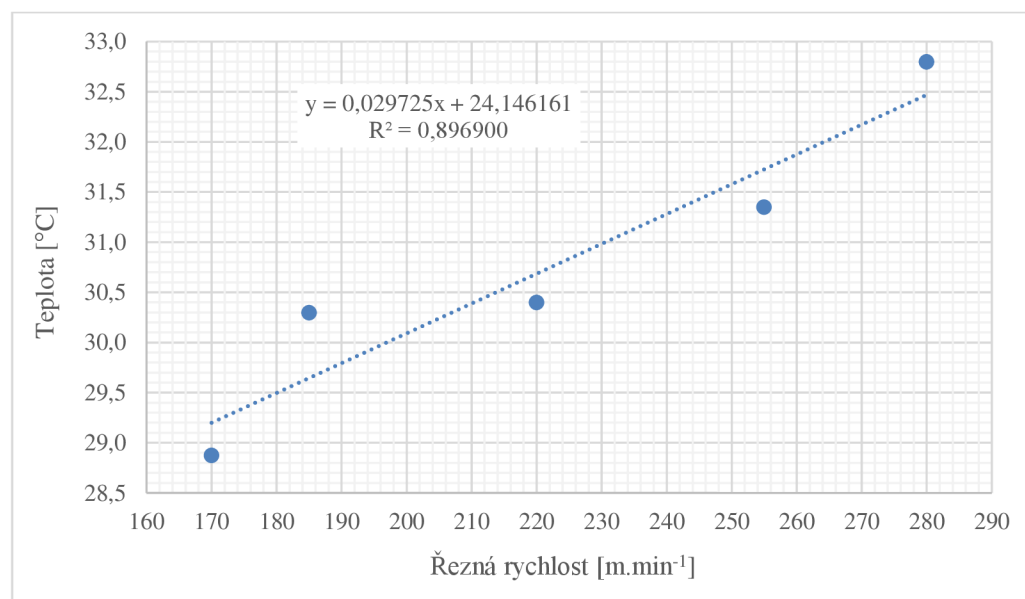
5.1 Vyhodnocení teploty při frézování

ČSN 12 050

Řezné podmínky a naměřené teploty při experimentálním obrábění materiálu ČSN 12 050 jsou uvedeny v tabulce 2. Z naměřených teplot pro jednotlivé řezné rychlosti byl vypočten aritmetický průměr, který slouží jako vstupní hodnota pro graf závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti (obr. 27). Body vynesené do grafu byly následně proloženy lineární spojnici trendu, jelikož díky hodnotě spolehlivosti $R^2 = 0,896900$ vychází lineární spojnice trendu jako nejpřesnější a nejrelevantnější z možností, protože její hodnota R^2 se nejvíce blíží jedné.

Tab. 2: ČSN 12 050 – řezné podmínky a teplota zaznamenaná při měření.

Materiál: ČSN 12 050										
Řezné podmínky						Teplota				
n [min^{-1}]	v_c [$m \cdot min^{-1}$]	a_p [mm]	a_e [mm]	v_f [$mm \cdot min^{-1}$]	f_z [mm]	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	4 [°C]	$\bar{\varnothing}$ [°C]
2706	170	2	8	812	0,1	25,4	29,7	30,8	29,6	28,9
2944	185	2	8	883	0,1	30,2	29,8	32,3	28,9	30,3
3501	220	2	8	1050	0,1	31,6	26,7	30,5	32,8	30,4
4058	255	2	8	1217	0,1	31,5	29,6	31,2	33,1	31,4
4456	280	2	8	1337	0,1	31,2	34,2	34,5	31,3	32,8



Obr. 27: Graf závislosti teploty na řezné rychlosti pro materiál ČSN 12 050.

Z grafu závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti pro materiál obrobku ČSN 12 050 je viditelné, že teplota se s rostoucí řeznou rychlostí zvětšuje. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší průměrnou hodnotou v tabulce 2 je 3,9 °C a rozdíl mezi prvním a posledním bodem křivky v grafu je 3,270 °C. Toto zvýšení potvrzuje, že i velikost teploty řezu s rostoucí řeznou rychlostí narůstá, čímž dochází k ohřívání obráběcího nástroje a v podstatě celé soustavy nástroj–obrobek–tříska. Teplota v řezu je však mnohonásobně vyšší než teplota na povrchu nástroje.

Vzhledem k realizaci experimentu jsou věrohodnější výsledky brány z křivky (rozdílná teplota 3,270 °C), jelikož vyobrazuje předpokládaný průběh tepelného zatížení na základě bodů v grafu. Body v grafu slouží primárně jako vstupní údaje pro vytvoření předpokládaného průběhu teploty na povrchu nástroje, a proto hodnota jejich rozdílu (a bodů samotných) nemá takovou relevantnost jako hodnota odečtená z křivky. V případě spojnice trendu lze dosáhnout i přesnějších výsledků (více desetinných míst) než u samotných bodů, které mají podobu své hodnoty omezenou pyrometrem, jelikož použitý pyrometr měří s přesností na jedno desetinné místo.

Počet průjezdů při frézování a tím i počet měření byly ovlivněny velikostí a tvarovými možnostmi obráběného materiálu (podkapitola 4.4.1). Z důvodu malého počtu měřených bodů vzniká velká nepřesnost měření. Pro vytvoření co nejreálnější křivky je zapotřebí co největší počet vstupních dat (bodů).

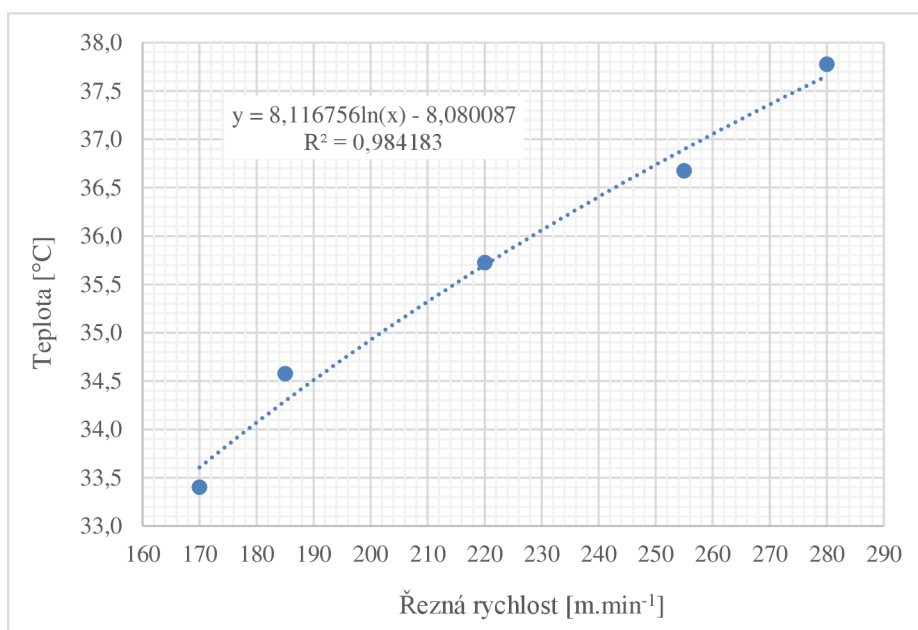
V tomto experimentu je křivka vytvořena z pěti bodů, jejichž hodnota je rovna aritmetickému průměru čtyř měření při určité řezné rychlosti. I zde by bylo lepší provést více měření, čímž by došlo ke zmenšení chyby měření a získání reálnější hodnoty. Přesnější hodnoty by bylo možné také získat při provádění experimentu v laboratorních podmínkách a s použitím lepšího vybavení.

ČSN 15 260

Řezné podmínky a naměřené teploty při experimentálním obrábění materiálu ČSN 15 260 jsou uvedeny v tabulce 3. Z naměřených teplot pro jednotlivé řezné rychlosti byl vypočten aritmetický průměr, který slouží jako vstupní hodnota pro graf závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti (obr. 28). Body vynesené do grafu byly následně proloženy logaritmickou spojnici trendu, jelikož díky hodnotě spolehlivosti $R^2 = 0,984183$ vychází logaritmická spojnice trendu jako nejpřesnější a nejrelevantnější z možností, protože její hodnota R^2 se nejvíce blíží jedné.

Tab. 3: ČSN 15 260 – řezné podmínky a teplota zaznamenaná při měření.

Materiál: ČSN 15 260										
Řezné podmínky						Teplota				
n [min ⁻¹]	v _c [m.min ⁻¹]	a _p [mm]	a _e [mm]	v _f [mm.min ⁻¹]	f _z [mm]	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	4 [°C]	Ø [°C]
2706	170	2	8	812	0,1	33,3	32,9	33,6	33,8	33,4
2944	185	2	8	883	0,1	35,4	33,2	34,1	35,6	34,6
3501	220	2	8	1050	0,1	35,7	34,6	35,8	36,8	35,7
4058	255	2	8	1217	0,1	36,6	35,8	37,2	37,1	36,7
4456	280	2	8	1337	0,1	37,5	37,8	37,6	38,2	37,8



Obr. 28: Graf závislosti teploty na řezné rychlosti pro materiál ČSN 15 260.

Z grafu závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti pro materiál obrobku ČSN 15 260 je viditelné, že teplota se s rostoucí řeznou rychlostí zvětšuje. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší průměrnou hodnotou v tabulce 3 je 4,4 °C a rozdíl mezi prvním a posledním bodem křivky v grafu je 4,050 °C. Toto zvýšení potvrzuje, že i velikost teploty řezu s rostoucí řeznou rychlostí narůstá, čímž dochází k ohřívání obráběcího nástroje

a v podstatě celé soustavy nástroj–obrobek–tříska. Teplota v řezu je však mnohonásobně vyšší než teplota na povrchu nástroje.

Vzhledem k realizaci experimentu jsou věrohodnější výsledky brány z křivky (rozdílná teplota 4,050 °C), jelikož vyobrazuje předpokládaný průběh tepelného zatížení na základě bodů v grafu. Body v grafu slouží primárně jako vstupní údaje pro vytvoření předpokládaného průběhu teploty na povrchu nástroje, a proto hodnota jejich rozdílu (a bodů samotných) nemá takovou relevantnost jako hodnota odečtená z křivky. V případě spojnice trendu lze dosáhnout i přesnějších výsledků (více desetinných míst) než u samotných bodů, které mají podobu své hodnoty omezenou pyrometrem, jelikož použitý pyrometr měří s přesností na jedno desetinné místo.

Počet průjezdů při frézování a tím i počet měření byly ovlivněny velikostí a tvarovými možnostmi obráběného materiálu (podkapitola 4.4.1). Z důvodu malého počtu měřených bodů vzniká velká nepřesnost měření. Pro vytvoření co nejreálnější křivky je zapotřebí co největší počet vstupních dat (bodů).

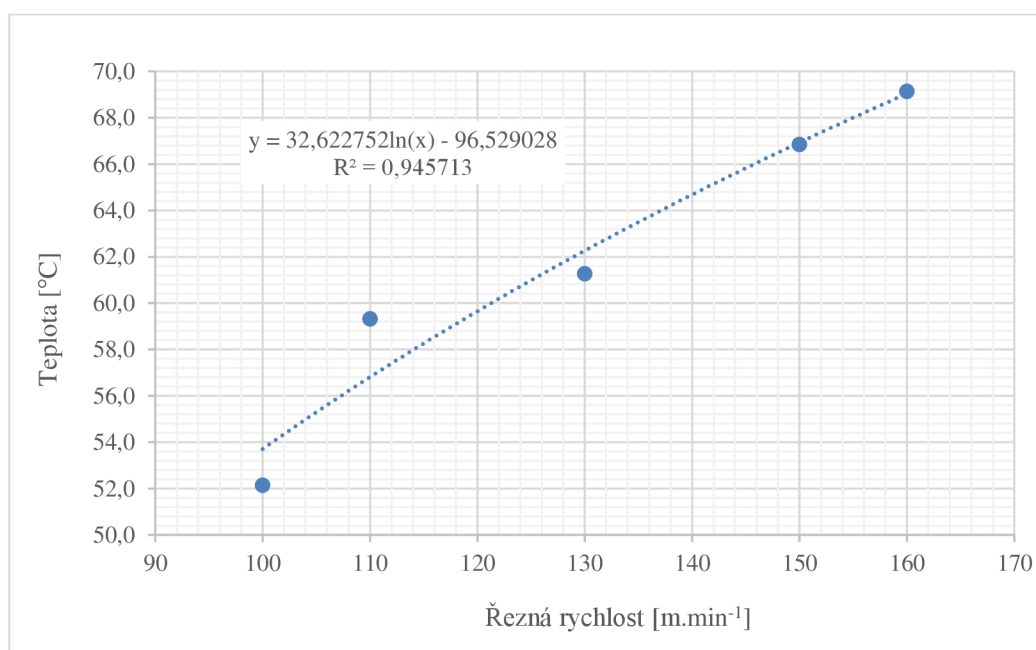
V tomto experimentu je křivka vytvořena z pěti bodů, jejichž hodnota je rovna aritmetickému průměru čtyř měření při určité řezné rychlosti. I zde by bylo lepší provést více měření, čímž by došlo ke zmenšení chyby měření a získání reálnější hodnoty. Přesnější hodnoty by bylo možné také získat při provádění experimentu v laboratorních podmínkách a s použitím lepšího vybavení.

ČSN 17 243

Řezné podmínky a naměřené teploty při experimentálním obrábění materiálu ČSN 17 243 jsou uvedeny v tabulce 4. Z naměřených teplot pro jednotlivé řezné rychlosti byl vypočten aritmetický průměr, který slouží jako vstupní hodnota pro graf závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti (obr. 29). Body vynesené do grafu byly následně proloženy logaritmickou spojnici trendu, jelikož díky hodnotě spolehlivosti $R^2 = 0,945713$ vychází logaritmická spojnice trendu jako nejpřesnější a nejrelevantnější z možností, protože její hodnota R^2 se nejvíce blíží jedné.

Tab. 4: ČSN 17 243 – řezné podmínky a teplota zaznamenaná při měření.

Materiál: ČSN 17 243										
Řezné podmínky						Teplota				
n [min ⁻¹]	v _c [m.min ⁻¹]	a _p [mm]	a _e [mm]	v _f [mm.min ⁻¹]	f _z [mm]	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	4 [°C]	Ø [°C]
1592	100	2	8	478	0,1	47,9	53,2	54,7	52,8	52,2
1751	110	2	8	525	0,1	55,8	59,5	58,7	63,3	59,3
2069	130	2	8	621	0,1	62,1	58,9	59,6	64,5	61,3
2387	150	2	8	716	0,1	66,2	67,5	65,4	68,3	66,9
2546	160	2	8	764	0,1	67,4	69,5	66,2	73,5	69,2



Obr. 29: Graf závislosti teploty na řezné rychlosti pro materiál ČSN 17 243.

Z grafu závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti pro materiál obrobku ČSN 17 243 je viditelné, že teplota se s rostoucí řeznou rychlostí zvětšuje. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší průměrnou hodnotou v tabulce 4 je 17,0 °C a rozdíl mezi prvním a posledním bodem křivky v grafu je 15,333 °C. Toto zvýšení potvrzuje, že i velikost teploty řezu s rostoucí řeznou rychlostí narůstá, čímž dochází k ohřívání obráběcího nástroje a v podstatě celé soustavy nástroj–obrobek–tříška. Teplota v řezu je však mnohonásobně vyšší než teplota na povrchu nástroje.

Vzhledem k realizaci experimentu jsou věrohodnější výsledky brány z křivky (rozdílná teplota 15,333 °C), jelikož vyobrazuje předpokládaný průběh tepelného zatížení na základě bodů v grafu. Body v grafu slouží primárně jako vstupní údaje pro vytvoření předpokládaného průběhu teploty na povrchu nástroje, a proto hodnota jejich rozdílu (a bodů samotných) nemá takovou relevantnost jako hodnota odečtená z křivky. V případě spojnice trendu lze dosáhnout i přesnějších výsledků (více desetinných míst) než u samotných bodů, které mají podobu své hodnoty omezenou pyrometrem, jelikož použitý pyrometr měří s přesností na jedno desetinné místo.

Počet průjezdů při frézování a tím i počet měření byly ovlivněny velikostí a tvarovými možnostmi obráběného materiálu (podkapitola 4.4.1). Z důvodu malého počtu měřených bodů vzniká velká nepřesnost měření. Pro vytvoření co nejreálnější křivky je zapotřebí co největší počet vstupních dat (bodů).

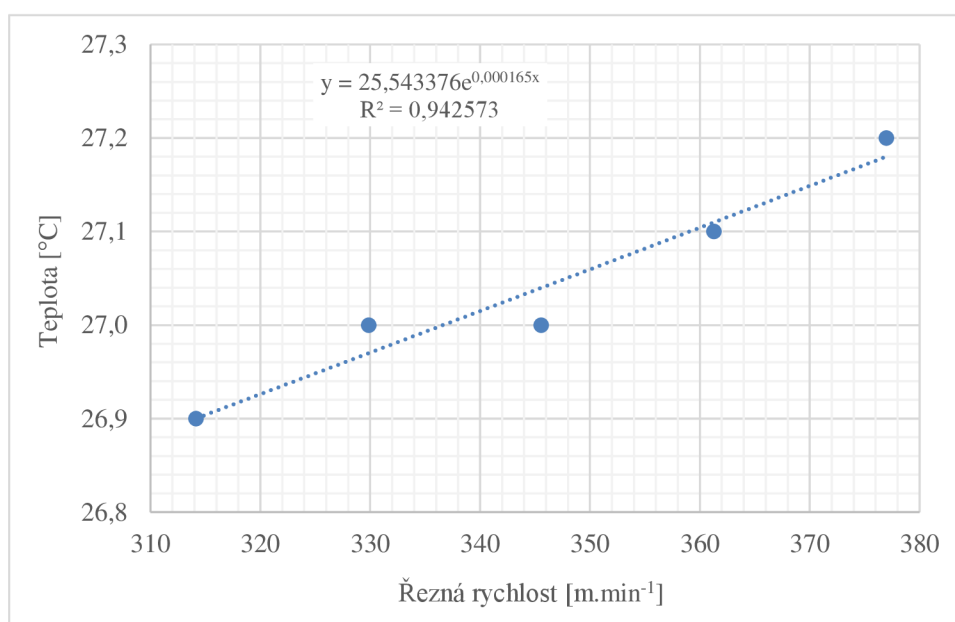
V tomto experimentu je křivka vytvořena z pěti bodů, jejichž hodnota je rovna aritmetickému průměru čtyř měření při určité řezné rychlosti. I zde by bylo lepší provést více měření, čímž by došlo ke zmenšení chyby měření a získání reálnější hodnoty. Přesnější hodnoty by bylo možné také získat při provádění experimentu v laboratorních podmínkách a s použitím lepšího vybavení.

ČSN 42 4254.64

Řezné podmínky a naměřené teploty při experimentálním obrábění materiálu ČSN 42 4254.64 jsou uvedeny v tabulce 5. Z naměřených teplot pro jednotlivé řezné rychlosti byl vypočten aritmetický průměr, který slouží jako vstupní hodnota pro graf závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti (obr. 30). Body vynesené do grafu byly následně proloženy exponenciální spojnici trendu, jelikož díky hodnotě spolehlivosti $R^2 = 0,942573$ vychází exponenciální spojnice trendu jako nejpřesnější a nejrelevantnější z možností, protože její hodnota R^2 se nejvíce blíží jedné.

Tab. 5: ČSN 42 4254.64 – řezné podmínky a teplota zaznamenaná při měření.

Materiál: ČSN 42 4254.64										
Řezné podmínky						Teplota				
n [min ⁻¹]	v _c [m.min ⁻¹]	a _p [mm]	a _e [mm]	v _f [mm.min ⁻¹]	f _z [mm]	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	4 [°C]	Ø [°C]
5000	314	2	8	1500	0,1	26,8	27,1	27,0	26,7	26,9
5250	330	2	8	1575	0,1	26,8	27,1	27,2	27,0	27,0
5500	346	2	8	1650	0,1	26,5	27,2	27,2	26,9	27,0
5750	361	2	8	1725	0,1	26,8	27,3	27,4	26,8	27,1
6000	377	2	8	1800	0,1	27,1	27,3	27,4	27,0	27,2



Obr. 30: Graf závislosti teploty na řezné rychlosti pro materiál ČSN 42 4254.64.

Z grafu závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti pro materiál obrobku ČSN 42 4254.64 je viditelné, že teplota se s rostoucí řeznou rychlostí zvětšuje. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší průměrnou hodnotou v tabulce 5 je 0,3 °C a rozdíl mezi prvním a posledním bodem křivky v grafu je 0,281 °C. Toto zvýšení potvrzuje, že i velikost teploty řezu s rostoucí řeznou rychlostí narůstá, čímž dochází k ohřívání obráběcího nástroje a v podstatě celé soustavy nástroj–obrobek–tříška. Teplota v řezu je však mnohonásobně vyšší než teplota na povrchu nástroje.

Vzhledem k realizaci experimentu jsou věrohodnější výsledky brány z křivky (rozdílná teplota 0,281 °C), jelikož vyobrazuje předpokládaný průběh tepelného zatížení na základě bodů v grafu. Body v grafu slouží primárně jako vstupní údaje pro vytvoření předpokládaného průběhu teploty na povrchu nástroje, a proto hodnota jejich rozdílu (a bodů samotných) nemá takovou relevantnost jako hodnota odečtená z křivky. V případě spojnice trendu lze dosáhnout i přesnějších výsledků (více desetinných míst) než u samotných bodů, které mají podobu své hodnoty omezenou pyrometrem, jelikož použitý pyrometr měří s přesností na jedno desetinné místo.

Počet průjezdů při frézování a tím i počet měření byly ovlivněny velikostí a tvarovými možnostmi obráběného materiálu (podkapitola 4.4.1). Z důvodu malého počtu měřených bodů vzniká velká nepřesnost měření. Pro vytvoření co nejreálnější křivky je zapotřebí co největší počet vstupních dat (bodů).

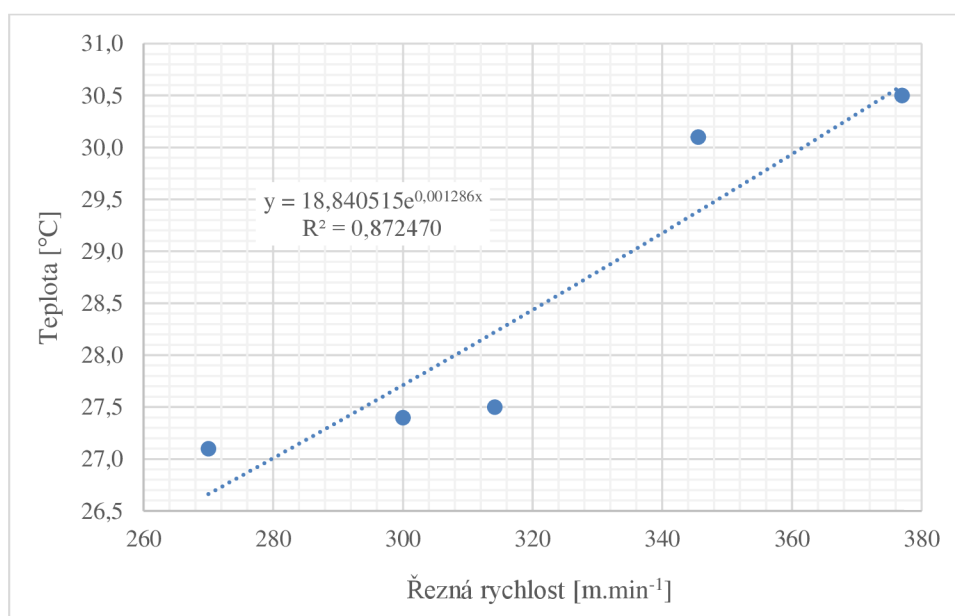
V tomto experimentu je křivka vytvořena z pěti bodů, jejichž hodnota je rovna aritmetickému průměru čtyř měření při určité řezné rychlosti. I zde by bylo lepší provést více měření, čímž by došlo ke zmenšení chyby měření a získání reálnější hodnoty. Přesnější hodnoty by bylo možné také získat při provádění experimentu v laboratorních podmínkách a s použitím lepšího vybavení.

ČSN 42 4401

Řezné podmínky a naměřené teploty při experimentálním obrábění materiálu ČSN 42 4401 jsou uvedeny v tabulce 6. Z naměřených teplot pro jednotlivé řezné rychlosti byl vypočten aritmetický průměr, který slouží jako vstupní hodnota pro graf závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti (obr. 31). Body vynesené do grafu byly následně proloženy exponenciální spojnicí trendu, jelikož díky hodnotě spolehlivosti $R^2 = 0,872470$ vychází exponenciální spojnice trendu jako nejpřesnější a nejrelevantnější z možností, protože její hodnota R^2 se nejvíce blíží jedné.

Tab. 6: ČSN 42 4401 – řezné podmínky a teplota zaznamenaná při měření.

Materiál: ČSN 42 4401											
Řezné podmínky						Teplota					
n [min ⁻¹]	v _c [m.min ⁻¹]	a _p [mm]	a _e [mm]	v _f [mm.min ⁻¹]	f _z [mm]	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	4 [°C]	5 [°C]	Ø [°C]
4297	270	2	8	1289	0,1	27,4	26,8	27,1	27,3	26,9	27,1
4775	300	2	8	1433	0,1	27,6	27,9	27,2	27,2	27,3	27,4
5000	314	2	8	1500	0,1	28,1	28,6	28,5	23,8	28,5	27,5
5500	346	2	8	1650	0,1	29,7	30,3	30,6	29,8	30,1	30,1
6000	377	2	8	1800	0,1	30,2	31,1	30,3	30,5	30,3	30,5



Obr. 31: Graf závislosti teploty na řezné rychlosti pro materiál ČSN 42 4401.

Z grafu závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti pro materiál obrobku ČSN 42 4401 je viditelné, že teplota se s rostoucí řeznou rychlostí zvětšuje. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší průměrnou hodnotou v tabulce 6 je 3,4 °C a rozdíl mezi prvním a posledním bodem křivky v grafu jsou 3,933 °C. Toto zvýšení potvrzuje, že i velikost teploty řezu s rostoucí řeznou rychlostí narůstá, čímž dochází k ohřívání obráběcího nástroje a v podstatě celé soustavy nástroj–obrobek–tříška. Teplota v řezu je však mnohonásobně vyšší než teplota na povrchu nástroje.

Vzhledem k realizaci experimentu jsou věrohodnější výsledky brány z křivky (rozdílná teplota 3,933 °C), jelikož vyobrazuje předpokládaný průběh tepelného zatížení na základě bodů v grafu. Body v grafu slouží primárně jako vstupní údaje pro vytvoření předpokládaného průběhu teploty na povrchu nástroje, a proto hodnota jejich rozdílu (a bodů samotných) nemá takovou relevantnost jako hodnota odečtená z křivky. V případě spojnice trendu lze dosáhnout i přesnějších výsledků (více desetinných míst) než u samotných bodů, které mají podobu své hodnoty omezenou pyrometrem, jelikož použitý pyrometr měří s přesností na jedno desetinné místo.

Počet průjezdů při frézování a tím i počet měření byly ovlivněny velikostí a tvarovými možnostmi obráběného materiálu (podkapitola 4.4.1). Z důvodu malého počtu měřených bodů vzniká velká nepřesnost měření. Pro vytvoření co nejreálnější křivky je zapotřebí co největší počet vstupních dat (bodů).

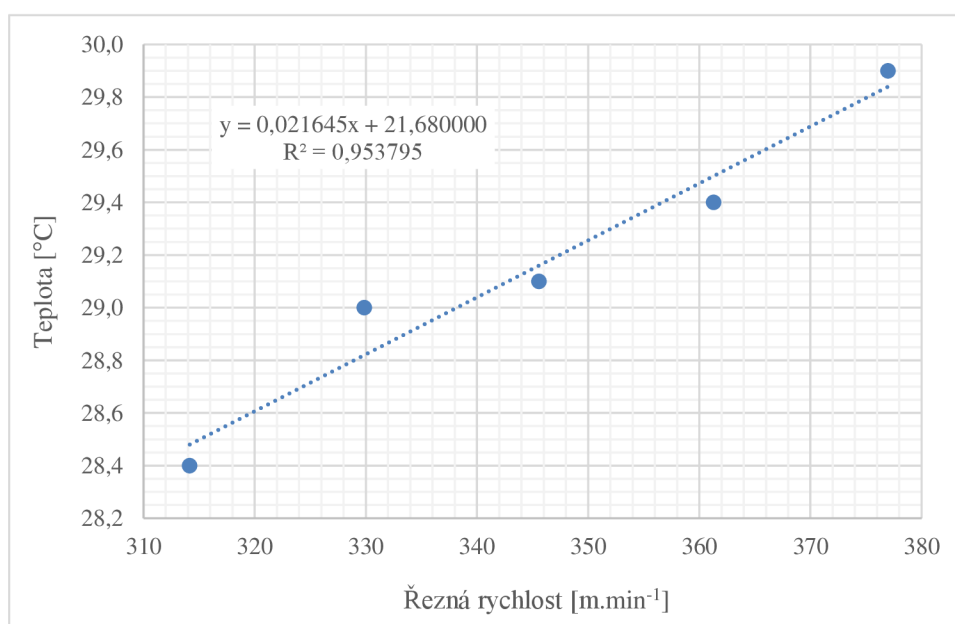
V tomto experimentu je křivka vytvořena z pěti bodů, jejichž hodnota je rovna aritmetickému průměru pěti měření při určité řezné rychlosti. I zde by bylo lepší provést více měření, čímž by došlo ke zmenšení chyby měření a získání reálnější hodnoty. Přesnější hodnoty by bylo možné také získat při provádění experimentu v laboratorních podmínkách a s použitím lepšího vybavení.

Dubové dřevo

Řezné podmínky a naměřené teploty při experimentálním obrábění materiálu z dubového dřeva jsou uvedeny v tabulce 7. Z naměřených teplot pro jednotlivé řezné rychlosti byl vypočten aritmetický průměr, který slouží jako vstupní hodnota pro graf závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti (obr. 32). Body vynesené do grafu byly následně proloženy lineární spojnicí trendu, jelikož díky hodnotě spolehlivosti $R^2 = 0,953795$ vychází lineární spojnice trendu jako nejpřesnější a nejrelevantnější z možností, protože její hodnota R^2 se nejvíce blíží jedné.

Tab. 7: Dubové dřevo – řezné podmínky a teplota zaznamenaná při měření.

Materiál: Dubové dřevo											
Řezné podmínky						Teplota					
n [min ⁻¹]	v _c [m.min ⁻¹]	a _p [mm]	a _e [mm]	v _f [mm.min ⁻¹]	f _z [mm]	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	4 [°C]	5 [°C]	Ø [°C]
5000	314	2	8	1500	0,1	28,6	28,3	28,2	28,5	28,5	28,4
5250	330	2	8	1575	0,1	28,7	29,4	29,1	28,8	28,9	29,0
5500	346	2	8	1650	0,1	28,8	29,3	29,4	29,1	29,1	29,1
5750	361	2	8	1725	0,1	29,2	29,5	29,6	29,2	29,3	29,4
6000	377	2	8	1800	0,1	29,7	30,1	29,8	29,9	30,1	29,9



Obr. 32: Graf závislosti teploty na řezné rychlosti pro materiál z dubového dřeva.

Z grafu závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti pro materiál obrobku z dubového dřeva je viditelné, že teplota se s rostoucí řeznou rychlostí zvětšuje. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší průměrnou hodnotou v tabulce 7 je 1,5 °C a rozdíl mezi prvním a posledním bodem křivky v grafu je 1,363 °C. Toto zvýšení potvrzuje, že i velikost teploty řezu s rostoucí řeznou rychlostí narůstá, čímž dochází k ohřívání obráběcího nástroje a v podstatě celé soustavy nástroj–obrobek–tříška. Teplota v řezu je však mnohonásobně vyšší než teplota na povrchu nástroje.

Vzhledem k realizaci experimentu jsou věrohodnější výsledky brány z křivky (rozdílná teplota 1,363 °C), jelikož vyobrazuje předpokládaný průběh tepelného zatížení na základě bodů v grafu. Body v grafu slouží primárně jako vstupní údaje pro vytvoření předpokládaného průběhu teploty na povrchu nástroje, a proto hodnota jejich rozdílu (a bodů samotných) nemá takovou relevantnost jako hodnota odečtená z křivky. V případě spojnice trendu lze dosáhnout i přesnějších výsledků (více desetinných míst) než u samotných bodů, které mají podobu své hodnoty omezenou pyrometrem, jelikož použitý pyrometr měří s přesností na jedno desetinné místo.

Počet průjezdů při frézování a tím i počet měření byly ovlivněny velikostí a tvarovými možnostmi obráběného materiálu (podkapitola 4.4.1). Z důvodu malého počtu měřených bodů vzniká velká nepřesnost měření. Pro vytvoření co nejreálnější křivky je zapotřebí co největší počet vstupních dat (bodů).

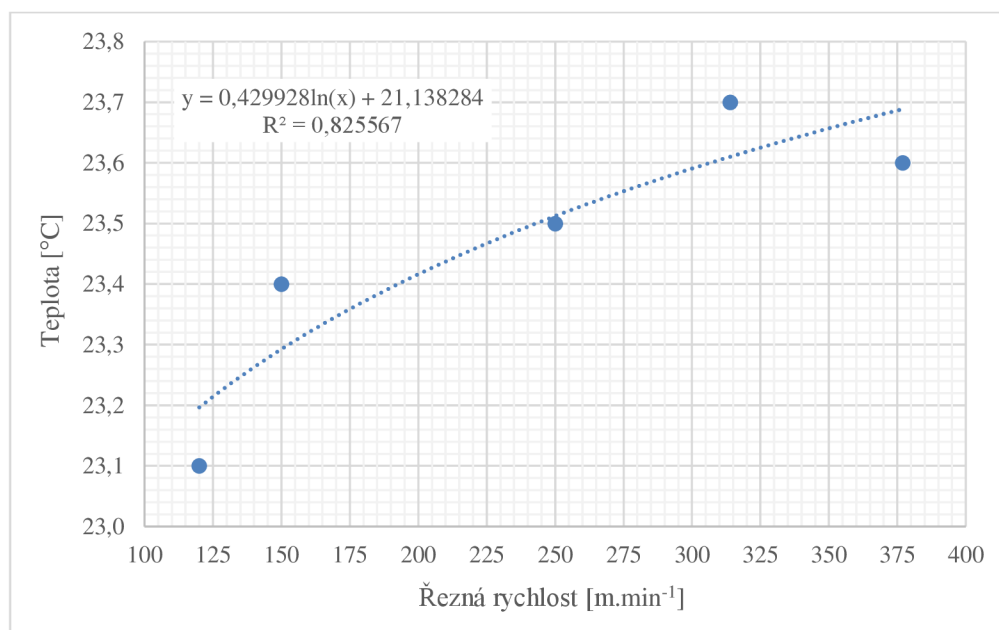
V tomto experimentu je křivka vytvořena z pěti bodů, jejichž hodnota je rovna aritmetickému průměru pěti měření při určité řezné rychlosti. I zde by bylo lepší provést více měření, čímž by došlo ke zmenšení chyby měření a získání reálnější hodnoty. Přesnější hodnoty by bylo možné také získat při provádění experimentu v laboratorních podmínkách a s použitím lepšího vybavení.

Umělé dřevo (WPC)

Řezné podmínky a naměřené teploty při experimentálním obrábění materiálu z umělého dřeva jsou uvedeny v tabulce 8. Z naměřených teplot pro jednotlivé řezné rychlosti byl vypočten aritmetický průměr, který slouží jako vstupní hodnota pro graf závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti (obr. 33). Body vynesené do grafu byly následně proloženy logaritmickou spojnicí trendu, jelikož díky hodnotě spolehlivosti $R^2 = 0,825567$ vychází logaritmická spojnice trendu jako nejpresnější a nejrelevantnější z možností, protože její hodnota R^2 se nejvíce blíží jedné.

Tab. 8: Umělé dřevo – řezné podmínky a teplota zaznamenaná při měření.

Materiál: Umělé dřevo											
Řezné podmínky						Teplota					
n [min ⁻¹]	v _c [m.min ⁻¹]	a _p [mm]	a _e [mm]	v _f [mm.min ⁻¹]	f _z [mm]	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	4 [°C]	5 [°C]	Ø [°C]
1910	120	2	8	573	0,1	23,0	22,8	23,2	23,1	23,3	23,1
2387	150	2	8	716	0,1	23,4	23,6	23,3	23,4	23,3	23,4
3979	250	2	8	1194	0,1	23,7	23,5	23,5	23,6	23,4	23,5
4997	314	2	8	1500	0,1	23,6	23,6	23,9	23,7	23,6	23,7
6000	377	2	8	1800	0,1	23,6	23,5	23,6	23,6	23,5	23,6



Obr. 33: Graf závislosti teploty na řezné rychlosti pro materiál umělé dřevo.

Z grafu závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti pro materiál obrobku z umělého dřeva je viditelné, že teplota se s rostoucí řeznou rychlostí zvětšuje. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší průměrnou hodnotou v tabulce 8 je 0,5 °C a rozdíl mezi prvním a posledním bodem křivky v grafu je 0,492 °C. Toto zvýšení potvrzuje, že i velikost teploty řezu s rostoucí řeznou rychlostí narůstá, čímž dochází k ohřívání obráběcího nástroje a v podstatě celé soustavy nástroj–obrobek–tříška. Teplota v řezu je však mnohonásobně vyšší než teplota na povrchu nástroje.

Vzhledem k realizaci experimentu jsou věrohodnější výsledky brány z křivky (rozdílná teplota 0,492 °C), jelikož vyobrazuje předpokládaný průběh tepelného zatížení na základě bodů v grafu. Body v grafu slouží primárně jako vstupní údaje pro vytvoření předpokládaného průběhu teploty na povrchu nástroje, a proto hodnota jejich rozdílu (a bodů samotných) nemá takovou relevantnost jako hodnota odečtená z křivky. V případě spojnice trendu lze dosáhnout i přesnějších výsledků (více desetinných míst) než u samotných bodů, které mají podobu své hodnoty omezenou pyrometrem, jelikož použitý pyrometr měří s přesností na jedno desetinné místo.

Počet průjezdů při frézování a tím i počet měření byly ovlivněny velikostí a tvarovými možnostmi obráběného materiálu (podkapitola 4.4.1). Z důvodu malého počtu měřených bodů vzniká velká nepřesnost měření. Pro vytvoření co nejreálnější křivky je zapotřebí co největší počet vstupních dat (bodů).

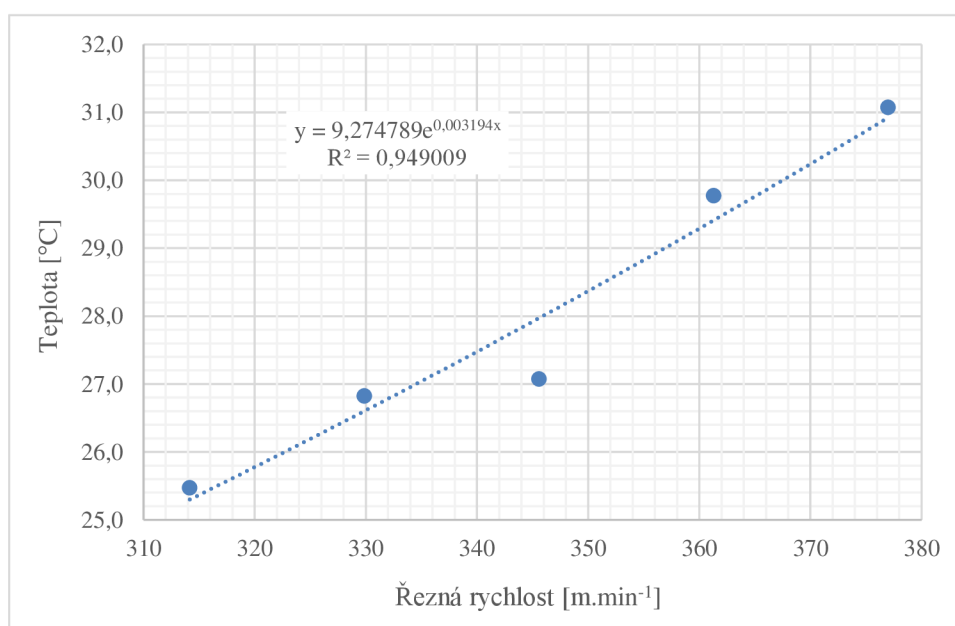
V tomto experimentu je křivka vytvořena z pěti bodů, jejichž hodnota je rovna aritmetickému průměru pěti měření při určité řezné rychlosti. I zde by bylo lepší provést více měření, čímž by došlo ke zmenšení chyby měření a získání reálnější hodnoty. Přesnější hodnoty by bylo možné také získat při provádění experimentu v laboratorních podmínkách a s použitím lepšího vybavení.

Polyamid PA6

Řezné podmínky a naměřené teploty při experimentálním obrábění materiálu PA6 jsou uvedeny v tabulce 9. Z naměřených teplot pro jednotlivé řezné rychlosti byl vypočten aritmetický průměr, který slouží jako vstupní hodnota pro graf závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti (obr. 34). Body vynesené do grafu byly následně proloženy exponenciální spojnicí trendu, jelikož díky hodnotě spolehlivosti $R^2 = 0,949009$ vychází exponenciální spojnice trendu jako nejpřesnější a nejrelevantnější z možností, protože její hodnota R^2 se nejvíce blíží jedné.

Tab. 9: Polyamid PA6 – řezné podmínky a teplota zaznamenaná při měření.

Materiál: Polyamid PA6										
Řezné podmínky						Teplota				
n [min ⁻¹]	v _c [m.min ⁻¹]	a _p [mm]	a _e [mm]	v _f [mm.min ⁻¹]	f _z [mm]	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	4 [°C]	Ø [°C]
5000	314	2	8	1500	0,1	25,2	25,5	26,4	24,8	25,5
5250	330	2	8	1575	0,1	26,8	26,7	27,4	26,4	26,8
5500	346	2	8	1650	0,1	27,3	26,9	27,1	27,0	27,1
5750	361	2	8	1725	0,1	29,5	30,3	29,6	29,7	29,8
6000	377	2	8	1800	0,1	31,3	31,8	31,6	29,6	31,1



Obr. 34: Graf závislosti teploty na řezné rychlosti pro materiál PA6.

Z grafu závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti pro materiál PA6 je viditelné, že teplota se s rostoucí řeznou rychlostí zvětšuje. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší průměrnou hodnotou v tabulce 9 je 5,6 °C a rozdíl mezi prvním a posledním bodem křivky v grafu je 5,636 °C. Toto zvýšení potvrzuje, že i velikost teploty řezu s rostoucí řeznou rychlostí narůstá, čímž dochází k ohřívání obráběcího nástroje

a v podstatě celé soustavy nástroj–obrobek–tříska. Teplota v řezu je však mnohonásobně vyšší než teplota na povrchu nástroje.

Vzhledem k realizaci experimentu jsou věrohodnější výsledky brány z křivky (rozdílná teplota 5,636 °C), jelikož vyobrazuje předpokládaný průběh tepelného zatížení na základě bodů v grafu. Body v grafu slouží primárně jako vstupní údaje pro vytvoření předpokládaného průběhu teploty na povrchu nástroje, a proto hodnota jejich rozdílu (a bodů samotných) nemá takovou relevantnost jako hodnota odečtená z křivky. V případě spojnice trendu lze dosáhnout i přesnějších výsledků (více desetinných míst) než u samotných bodů, které mají podobu své hodnoty omezenou pyrometrem, jelikož použitý pyrometr měří s přesností na jedno desetinné místo.

Počet průjezdů při frézování a tím i počet měření byly ovlivněny velikostí a tvarovými možnostmi obráběného materiálu (podkapitola 4.4.1). Z důvodu malého počtu měřených bodů vzniká velká nepřesnost měření. Pro vytvoření co nejreálnější křivky je zapotřebí co největší počet vstupních dat (bodů).

V tomto experimentu je křivka vytvořena z pěti bodů, jejichž hodnota je rovna aritmetickému průměru čtyř měření při určité řezné rychlosti. I zde by bylo lepší provést více měření, čímž by došlo ke zmenšení chyby měření a získání reálnější hodnoty. Přesnější hodnoty by bylo možné také získat při provádění experimentu v laboratorních podmínkách a s použitím lepšího vybavení.

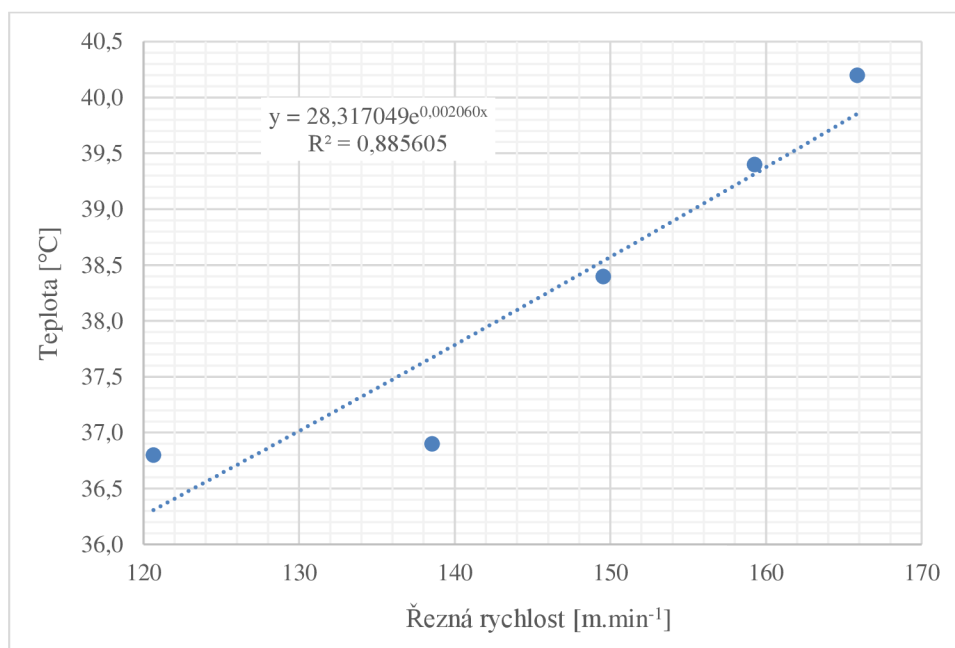
5.2 Vyhodnocení teploty při soustružení

ČSN 11 109

Řezné podmínky a naměřené teploty při experimentálním obrábění materiálu ČSN 11 109 jsou uvedeny v tabulce 10. Z naměřených teplot pro jednotlivé řezné rychlosti byl vypočten aritmetický průměr, který slouží jako vstupní hodnota pro graf závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti (obr. 35). Body vynesené do grafu byly následně proloženy exponenciální spojnicí trendu, jelikož díky hodnotě spolehlivosti $R^2 = 0,885605$ vychází exponenciální spojnice trendu jako nejpřesnější a nejrelevantnější z možností, protože její hodnota R^2 se nejvíce blíží jedné.

Tab. 10: ČSN 11 109 – řezné podmínky a teplota zaznamenaná při měření.

Materiál: ČSN 11 109									
Řezné podmínky					Teplota				
n [min ⁻¹]	v _c [m.min ⁻¹]	a _p [mm]	D [mm]	f _n [mm]	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	4 [°C]	Ø [°C]
1200	121	1	32	0,2	36,2	36,6	37,0	37,2	36,8
1470	139	1	30	0,2	36,4	37,3	36,7	37,0	36,9
1700	150	1	28	0,2	38,2	37,9	38,6	38,8	38,4
1950	159	1	26	0,2	38,9	39,3	39,7	39,6	39,4
2200	166	1	24	0,2	40,2	38,9	40,3	41,3	40,2



Obr. 35: Graf závislosti teploty na řezné rychlosti pro materiál ČSN 11 109.

Z grafu závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti pro materiál obrobku ČSN 11 109 je viditelné, že teplota se s rostoucí řeznou rychlostí zvětšuje. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší průměrnou hodnotou v tabulce 10 je 3,4 °C a rozdíl mezi prvním a posledním bodem křivky v grafu je 3,529 °C. Toto zvýšení potvrzuje, že i velikost teploty řezu s rostoucí řeznou rychlostí narůstá, čímž dochází k ohřívání obráběcího nástroje a v podstatě celé soustavy nástroj–obrobek–tříška. Teplota v řezu je však mnohonásobně vyšší než teplota na povrchu nástroje.

Vzhledem k realizaci experimentu jsou věrohodnější výsledky brány z křivky (rozdílná teplota 3,529 °C), jelikož vyobrazuje předpokládaný průběh tepelného zatížení na základě bodů v grafu. Body v grafu slouží primárně jako vstupní údaje pro vytvoření předpokládaného průběhu teploty na povrchu nástroje, a proto hodnota jejich rozdílu (a bodů samotných) nemá takovou relevantnost jako hodnota odečtená z křivky. V případě spojnice trendu lze dosáhnout i přesnějších výsledků (více desetinných míst) než u samotných bodů, které mají podobu své hodnoty omezenou pyrometrem, jelikož použitý pyrometr měří s přesností na jedno desetinné místo.

Počet průjezdů při soustružení a tím i počet měření byly ovlivněny velikostí a tvarovými možnostmi obráběného materiálu (podkapitola 4.4.2). Z důvodu malého počtu měřených bodů vzniká velká nepřesnost měření. Pro vytvoření co nejreálnější křivky je zapotřebí co největší počet vstupních dat (bodů).

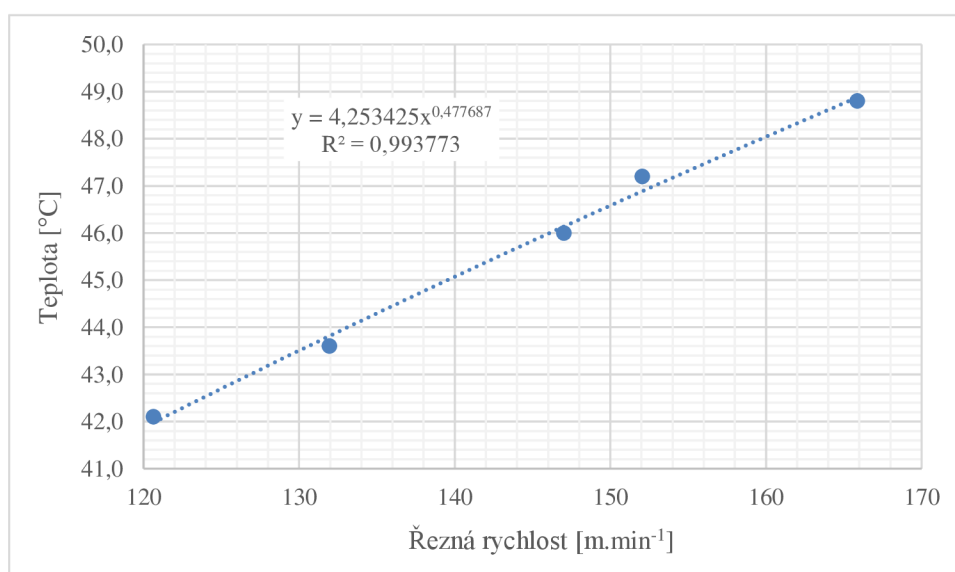
V tomto experimentu je křivka vytvořena z pěti bodů, jejichž hodnota je rovna aritmetickému průměru čtyř měření při určité řezné rychlosti. I zde by bylo lepší provést více měření, čímž by došlo ke zmenšení chyby měření a získání reálnější hodnoty. Přesnější hodnoty by bylo možné také získat při provádění experimentu v laboratorních podmínkách a s použitím lepšího vybavení.

ČSN 11 373

Řezné podmínky a naměřené teploty při experimentálním obrábění materiálu ČSN 11 373 jsou uvedeny v tabulce 11. Z naměřených teplot pro jednotlivé řezné rychlosti byl vypočten aritmetický průměr, který slouží jako vstupní hodnota pro graf závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti (obr. 36). Body vynesené do grafu byly následně proloženy mocninnou spojnicí trendu, jelikož díky hodnotě spolehlivosti $R^2 = 0,993773$ vychází mocninná spojnice trendu jako nejpřesnější a nejrelevantnější z možností, protože její hodnota R^2 se nejvíce blíží jedné.

Tab. 11: ČSN 11 373 – řezné podmínky a teplota zaznamenaná při měření.

Materiál: ČSN 11 373									
Řezné podmínky					Teplota				
n [min ⁻¹]	v _c [m.min ⁻¹]	a _p [mm]	D [mm]	f _n [mm]	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	4 [°C]	Ø [°C]
1280	121	1	30	0,2	41,4	42,3	42,6	41,9	42,1
1500	132	1	28	0,2	42,2	44,4	43,7	44,1	43,6
1800	147	1	26	0,2	46,3	45,1	47,1	45,6	46,0
2200	166	1	24	0,2	48,3	49,2	48,6	49,0	48,8
2200	152	1	22	0,2	47,2	46,3	48,5	46,9	47,2



Obr. 36: Graf závislosti teploty na řezné rychlosti pro materiál ČSN 11 373.

Z grafu závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti pro materiál obrobku ČSN 11 373 je viditelné, že teplota se s rostoucí řeznou rychlostí zvětšuje. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší průměrnou hodnotou v tabulce 11 je 6,7 °C a rozdíl mezi prvním a posledním bodem křivky v grafu je 6,854 °C. Toto zvýšení potvrzuje, že i velikost teploty řezu s rostoucí řeznou rychlostí narůstá, čímž dochází k ohřívání obráběcího nástroje a v podstatě celé soustavy nástroj–obrobek–tříška. Teplota v řezu je však mnohonásobně vyšší než teplota na povrchu nástroje.

Vzhledem k realizaci experimentu jsou věrohodnější výsledky brány z křivky (rozdílná teplota 6,854 °C), jelikož vyobrazuje předpokládaný průběh tepelného zatížení na základě bodů v grafu. Body v grafu slouží primárně jako vstupní údaje pro vytvoření předpokládaného průběhu teploty na povrchu nástroje, a proto hodnota jejich rozdílu (a bodů samotných) nemá takovou relevantnost jako hodnota odečtená z křivky. V případě spojnice trendu lze dosáhnout i přesnějších výsledků (více desetinných míst) než u samotných bodů, které mají podobu své hodnoty omezenou pyrometrem, jelikož použitý pyrometr měří s přesností na jedno desetinné místo.

Počet průjezdů při soustružení a tím i počet měření byly ovlivněny velikostí a tvarovými možnostmi obráběného materiálu (podkapitola 4.4.2). Z důvodu malého počtu měřených bodů vzniká velká nepřesnost měření. Pro vytvoření co nejreálnější křivky je zapotřebí co největší počet vstupních dat (bodů).

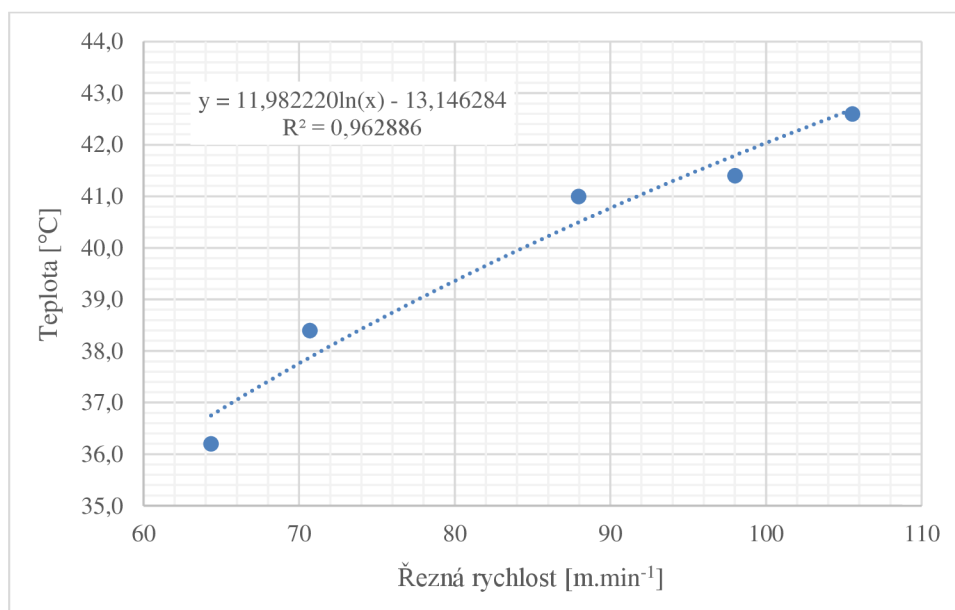
V tomto experimentu je křivka vytvořena z pěti bodů, jejichž hodnota je rovna aritmetickému průměru čtyř měření při určité řezné rychlosti. I zde by bylo lepší provést více měření, čímž by došlo ke zmenšení chyby měření a získání reálnější hodnoty. Přesnější hodnoty by bylo možné také získat při provádění experimentu v laboratorních podmínkách a s použitím lepšího vybavení.

ČSN 17 243

Řezné podmínky a naměřené teploty při experimentálním obrábění materiálu ČSN 17 243 jsou uvedeny v tabulce 12. Z naměřených teplot pro jednotlivé řezné rychlosti byl vypočten aritmetický průměr, který slouží jako vstupní hodnota pro graf závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti (obr. 37). Body vynesené do grafu byly následně proloženy logaritmickou spojnicí trendu, jelikož díky hodnotě spolehlivosti $R^2 = 0,962886$ vychází logaritmická spojnice trendu jako nejpřesnější a nejrelevantnější z možností, protože její hodnota R^2 se nejvíce blíží jedné.

Tab. 12: ČSN 17 243 – řezné podmínky a teplota zaznamenaná při měření.

Materiál: ČSN 17 243									
Řezné podmínky					Teplota				
n [min ⁻¹]	v _c [m.min ⁻¹]	a _p [mm]	D [mm]	f _n [mm]	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	4 [°C]	Ø [°C]
640	64	1	32	0,2	35,7	36,4	36,6	35,9	36,2
750	71	1	30	0,2	37,6	38,5	38,6	38,9	38,4
1000	88	1	28	0,2	40,5	41,2	41,3	41,0	41,0
1200	98	1	26	0,2	40,6	41,6	41,4	41,8	41,4
1400	106	1	24	0,2	42,1	42,3	43,1	42,9	42,6



Obr. 37: Graf závislosti teploty na řezné rychlosti pro materiál ČSN 17 243.

Z grafu závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti pro materiál obrobku ČSN 17 243 je viditelné, že teplota se s rostoucí řeznou rychlostí zvětšuje. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší průměrnou hodnotou v tabulce 12 je 6,4 °C a rozdíl mezi prvním a posledním bodem křivky v grafu je 6,046 °C. Toto zvýšení potvrzuje, že i velikost teploty řezu s rostoucí řeznou rychlostí narůstá, čímž dochází k ohřívání obráběcího nástroje a v podstatě celé soustavy nástroj–obrobek–tříška. Teplota v řezu je však mnohonásobně vyšší než teplota na povrchu nástroje.

Vzhledem k realizaci experimentu jsou věrohodnější výsledky brány z křivky (rozdílná teplota 6,046 °C), jelikož vyobrazuje předpokládaný průběh tepelného zatížení na základě bodů v grafu. Body v grafu slouží primárně jako vstupní údaje pro vytvoření předpokládaného průběhu teploty na povrchu nástroje, a proto hodnota jejich rozdílu (a bodů samotných) nemá takovou relevantnost jako hodnota odečtená z křivky. V případě spojnice trendu lze dosáhnout i přesnějších výsledků (více desetinných míst) než u samotných bodů, které mají podobu své hodnoty omezenou pyrometrem, jelikož použitý pyrometr měří s přesností na jedno desetinné místo.

Počet průjezdů při soustružení a tím i počet měření byly ovlivněny velikostí a tvarovými možnostmi obráběného materiálu (podkapitola 4.4.2). Z důvodu malého počtu měřených bodů vzniká velká nepřesnost měření. Pro vytvoření co nejreálnější křivky je zapotřebí co největší počet vstupních dat (bodů).

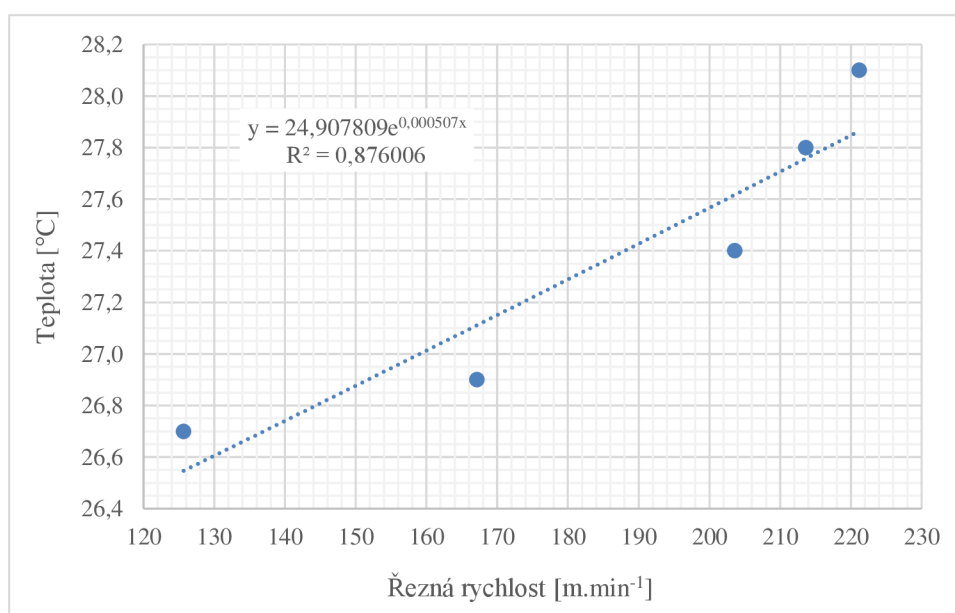
V tomto experimentu je křivka vytvořena z pěti bodů, jejichž hodnota je rovna aritmetickému průměru čtyř měření při určité řezné rychlosti. I zde by bylo lepší provést více měření, čímž by došlo ke zmenšení chyby měření a získání reálnější hodnoty. Přesnější hodnoty by bylo možné také získat při provádění experimentu v laboratorních podmínkách a s použitím lepšího vybavení.

ČSN 42 4254.64

Řezné podmínky a naměřené teploty při experimentálním obrábění materiálu ČSN 42 4254.64 jsou uvedeny v tabulce 13. Z naměřených teplot pro jednotlivé řezné rychlosti byl vypočten aritmetický průměr, který slouží jako vstupní hodnota pro graf závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti (obr. 38). Body vynesené do grafu byly následně proloženy exponenciální spojnicí trendu, jelikož díky hodnotě spolehlivosti $R^2 = 0,876006$ vychází exponenciální spojnice trendu jako nejpřesnější a nejrelevantnější z možností, protože její hodnota R^2 se nejvíce blíží jedné.

Tab. 13: ČSN 42 4254.64 – řezné podmínky a teplota zaznamenaná při měření.

Materiál: ČSN 42 4254.64									
Řezné podmínky					Teplota				
n [min ⁻¹]	v _c [m.min ⁻¹]	a _p [mm]	D [mm]	f _n [mm]	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	4 [°C]	Ø [°C]
1000	126	1	40	0,2	26,1	26,8	26,5	27,3	26,7
1400	167	1	38	0,2	26,3	27,6	26,3	27,1	26,8
1800	204	1	36	0,2	26,7	27,8	27,6	27,5	27,4
2000	214	1	34	0,2	27,1	28,0	27,8	28,2	27,8
2200	221	1	32	0,2	27,5	28,4	28,1	28,5	28,1



Obr. 38: Graf závislosti teploty na řezné rychlosti pro materiál ČSN 42 4254.64.

Z grafu závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti pro materiál obrobku ČSN 42 4254.64 je viditelné, že teplota se s rostoucí řeznou rychlostí zvětšuje. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší průměrnou hodnotou v tabulce 13 je 1,4 °C a rozdíl mezi prvním a posledním bodem křivky v grafu je 1,310 °C. Toto zvýšení potvrzuje, že i velikost teploty řezu s rostoucí řeznou rychlostí narůstá, čímž dochází k ohřívání obráběcího nástroje a v podstatě celé soustavy nástroj–obrobek–tříska. Teplota v řezu je však mnohonásobně vyšší než teplota na povrchu nástroje.

Vzhledem k realizaci experimentu jsou věrohodnější výsledky brány z křivky (rozdílná teplota 1,310 °C), jelikož vyobrazuje předpokládaný průběh tepelného zatížení na základě bodů v grafu. Body v grafu slouží primárně jako vstupní údaje pro vytvoření předpokládaného průběhu teploty na povrchu nástroje, a proto hodnota jejich rozdílu (a bodů samotných) nemá takovou relevantnost jako hodnota odečtená z křivky. V případě spojnice trendu lze dosáhnout i přesnějších výsledků (více desetinných míst) než u samotných bodů, které mají podobu své hodnoty omezenou pyrometrem, jelikož použitý pyrometr měří s přesností na jedno desetinné místo.

Počet průjezdů při soustružení a tím i počet měření byly ovlivněny velikostí a tvarovými možnostmi obráběného materiálu (podkapitola 4.4.2). Z důvodu malého počtu měřených bodů vzniká velká nepřesnost měření. Pro vytvoření co nejreálnější křivky je zapotřebí co největší počet vstupních dat (bodů).

V tomto experimentu je křivka vytvořena z pěti bodů, jejichž hodnota je rovna aritmetickému průměru čtyř měření při určité řezné rychlosti. I zde by bylo lepší provést více měření, čímž by došlo ke zmenšení chyby měření a získání reálnější hodnoty. Přesnější hodnoty by bylo možné také získat při provádění experimentu v laboratorních podmínkách a s použitím lepšího vybavení.

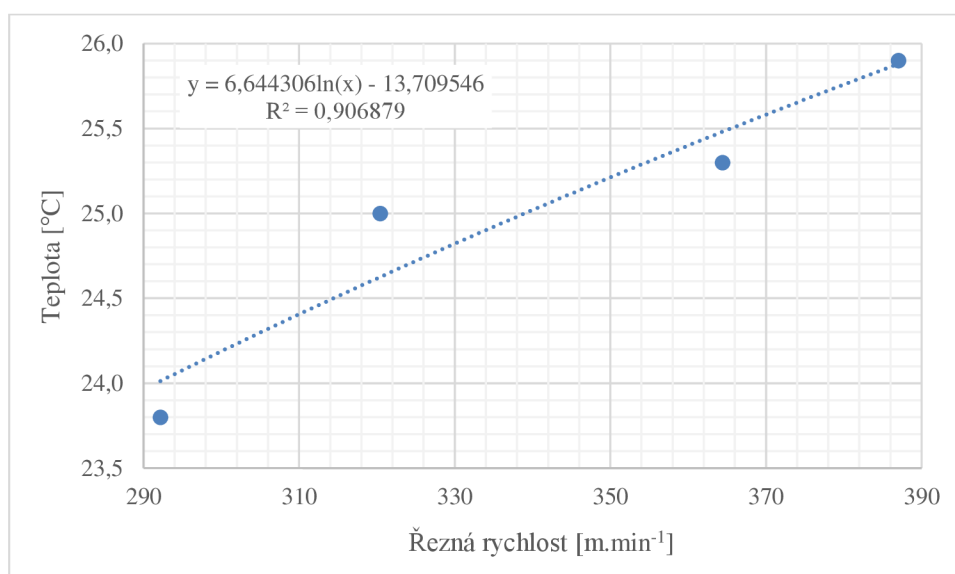
Polyamid PA6

Řezné podmínky a naměřené teploty při experimentálním obrábění materiálu PA6 jsou uvedeny v tabulce 14. Z naměřených teplot pro jednotlivé řezné rychlosti byl vypočten aritmetický průměr, který slouží jako vstupní hodnota pro graf závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti (obr. 39). Body vynesené do grafu byly následně proloženy logaritmickou spojnicí trendu, jelikož díky hodnotě spolehlivosti $R^2 = 0,906879$ vychází logaritmická spojnice trendu jako nejpřesnější a nejrelevantnější z možností, protože její hodnota R^2 se nejvíce blíží jedné.

Tab. 14: Polyamid PA6 – řezné podmínky a teplota zaznamenaná při měření.

Materiál: Polyamid PA6									
Řezné podmínky					Teplota				
n [min ⁻¹]	v _c [m.min ⁻¹]	a _p [mm]	D [mm]	f _n [mm]	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	4 [°C]	Ø [°C]
1500	292	1	62	0,2	23,2	24,1	24,0	23,8	23,8
1700	320	1	60	0,2	24,7	24,8	25,4	25,2	25,0
2000	364	1	58	0,2	25,4	24,3	25,6	25,9	25,3
2200	387	1	56	0,2	26,0	26,3	25,4	25,8	25,9

U polyamidu PA6 byla teplota měřena jen při čtyřech řezných rychlostech, jelikož horní hranici ($n = 2200 \text{ min}^{-1}$) stanovil soustruh svými maximálními otáčkami a dolní hranici ($n = 1500 \text{ min}^{-1}$) stanovil obráběný materiál. Při nižších otáčkách docházelo k namotávání odebraného materiálu na soustružnický nástroj a obrobek, čímž docházelo k znehodnocení naměřených dat. Namotaný materiál totiž zasahoval i do oblasti měření a svou teplotou ovlivňoval naměřené hodnoty.



Obr. 39: Graf závislosti teploty na řezné rychlosti pro materiál PA6.

Z grafu závislosti teploty povrchu obráběcího nástroje na řezné rychlosti pro materiál obrobku PA6 je viditelné, že teplota se s rostoucí řeznou rychlostí zvětšuje. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší průměrnou hodnotou v tabulce 14 je 2,1 °C a rozdíl mezi prvním a posledním bodem křivky v grafu je 1,871 °C. Toto zvýšení potvrzuje, že i velikost teploty řezu s rostoucí řeznou rychlostí narůstá, čímž dochází k ohřívání obráběcího nástroje a v podstatě celé soustavy nástroj–obrobek–třiska. Teplota v řezu je však mnohonásobně vyšší než teplota na povrchu nástroje.

Vzhledem k realizaci experimentu jsou věrohodnější výsledky brány z křivky (rozdílná teplota 1,871 °C), jelikož vyobrazuje předpokládaný průběh tepelného zatížení na základě bodů v grafu. Body v grafu slouží primárně jako vstupní údaje pro vytvoření předpokládaného průběhu teploty na povrchu nástroje, a proto hodnota jejich rozdílu (a bodů samotných) nemá takovou relevantnost jako hodnota odečtená z křivky. V případě spojnice trendu lze dosáhnout i přesnějších výsledků (více desetinných míst) než u samotných bodů, které mají podobu své hodnoty omezenou pyrometrem, jelikož použitý pyrometr měří s přesností na jedno desetinné místo.

Počet průjezdů při soustružení a tím i počet měření byly ovlivněny velikostí a tvarovými možnostmi obráběného materiálu (podkapitola 4.4.2). Z důvodu malého počtu měřených bodů vzniká velká nepřesnost měření. Pro vytvoření co nejreálnější křivky je zapotřebí co největší počet vstupních dat (bodů).

V tomto experimentu je křivka vytvořena ze čtyř bodů, jejichž hodnota je rovna aritmetickému průměru čtyř měření při určité řezné rychlosti. I zde by bylo lepší provést více měření, čímž by došlo ke zmenšení chyby měření a získání reálnější hodnoty. Přesnější hodnoty by bylo možné také získat při provádění experimentu v laboratorních podmínkách a s použitím lepšího vybavení.

6 OBECNĚ VYUŽITELNÉ DOPADY

Povědomí o teplotních dějích při obrábění se řadí mezi důležité složky zajišťující úspěšné vyrobení součásti. Správné vybalancování teplotních dějů během obráběcího procesu zaručí větší trvanlivost rezného nástroje a kvalitněji opracovaný obrobek. Jedná se tedy o významnou problematiku vyžadující pozornost.

Tato bakalářská práce jako celek by mohla najít své využití v podobě studijního materiálu při výuce nebo samostudiu o problematice obrábění, teplotních dějů při obrábění a měření teploty během obráběcího procesu. K tomuto účelu poslouží především teoretická část bakalářské práce, která se ve třech kapitolách touto problematikou zabývá (jsou zde shrnuty a vysvětleny obráběcí technologie soustružení a frézování, teplotní děje při obráběcím procesu a způsoby měření těchto teplotních dějů). Díky svému rozsahu i odbornosti by mohla být teoretická část bakalářské práce použita při výuce jak na středních, tak i na vysokých či vyšších odborných školách s technickým zaměřením.

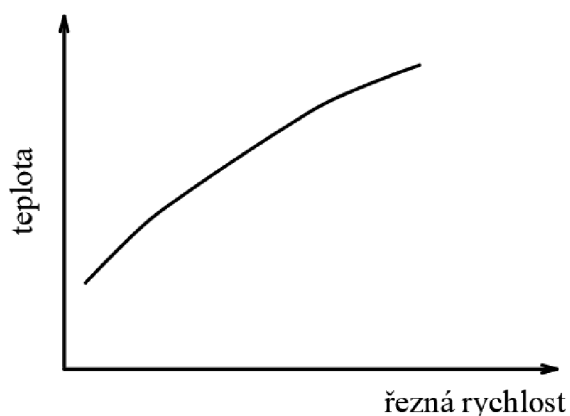
Poznatky z praktické části bakalářské práce, která se zabývá provedením a vyhodnocením experimentálního měření teploty při obrábění, lze využít v praxi ve strojírenském průmyslu, přesněji v oblastech zabývajících se obráběcí technologií. Hodnoty teplotního zatížení nástroje naměřené v experimentech při obráběcím procesu lze brát jako orientační a je možné z nich vycházet při obrábění v praxi za předpokladu použití stejných vstupních podmínek jako při experimentech v bakalářské práci. Je nutné zdůraznit, že za jiných vstupních podmínek (např. při použití procesní kapaliny, při změně obráběcího nástroje nebo při použití jiného materiálu obrobku) by bylo dosaženo zcela odlišných výsledků.

V neposlední řadě by bakalářská práce mohla posloužit jako inspirace a výchozí bod pro další experimentální zkoumání teploty při obrábění. Bakalářskou práci by bylo možné rozšířit o jiné obráběcí technologie, o širší spektrum materiálů obrobků nebo obráběcí nástroje. Další možností pro rozšíření využitelnosti tohoto tématu by mohlo být zlepšení vstupních podmínek, použití přesnějších měřicích zařízení, eventuálně využití jiných postupů měření, díky kterým by došlo k naměření přesnějších výsledků. V rámci zpřesnění výsledků by bylo dále vhodné zvýšit počty měření na co možná nejvyšší hodnotu, čímž by došlo ke zmírnění chyby při měření.

Zajímavým obohacením bakalářské práce by mohlo být její rozšíření např. v diplomové práci, která by se zabývala porovnáním provedeného experimentu s experimentem za použití stejných vstupních podmínek (materiál obrobků, obráběcí nástroje a rezné podmínky při obrábění), ale s jiným přístrojem měřícím teplotu, např. s termokamerou.

7 DISKUZE

Dle použité literatury [5] tvar křivky závislosti teploty při obrábění na řezné rychlosti odpovídá vyobrazení na obr. 40. Křivka má logaritmický charakter a je v celém svém intervalu rostoucí, což znamená, že se teplota s řeznou rychlostí zvětšuje. Rostoucího charakteru křivky bylo dosaženo i u všech křivek z experimentálního měření v kapitole 5.



Obr. 40: Graf závislosti teploty při obrábění na řezné rychlosti [5].

Určité průběhy křivek z kapitoly 5 odpovídají předpokládanému průběhu závislosti teploty při obrábění na řezné rychlosti dle obr. 40 a mají nejen rostoucí charakter, ale i logaritmickou spojnicí trendu. V ostatních případech se jedná o mocninné, exponenciální či lineární spojnice trendu.

Vytvořené křivky vyhodnocující experimentální měření teploty při obráběcím procesu jsou vzhledem k velké chybě měření spíše orientačního charakteru a nelze je tedy považovat za reálný průběh teploty na povrchu řezného nástroje. Tato chyba měření způsobuje u určitých křivek odlišnost od křivky z obr. 40. Pro zvýšení relevantnosti křivek by bylo nutné provést větší počet měření nebo použít přesnější metodu měření.

ZÁVĚR

Tématem a cílem bakalářské práce bylo formou experimentální studie zpracovat a vyhodnotit teplotní děje při obráběcím procesu. Úvodní teoretické části se zaměřují na charakteristiku použitých obráběcích technologií, uvedení do problematiky vznikajících teplotních dějů během obráběcího procesu a způsobů měření těchto dějů. Následující praktické části jsou zaměřeny na volbu materiálů obrobků, řezných nástrojů a stanovení vstupních podmínek, za kterých bylo experimentální měření prováděno. V závěrečné části bakalářské práce proběhlo vyhodnocení naměřených dat a formulace obecně využitelných dopadů.

Z vyhodnocených dat zaměřujících se na technologii frézování lze vypořadovat, že řezný nástroj byl při obrábění ušlechtilějších materiálů (ČSN 17 243) více tepelně zatížen než při obrábění obrobků z materiálů méně ušlechtilých (ČSN 12 050). Toto vyšší tepelné zatížení v oblasti řezu bylo možné pozorovat i na barvě třísek, které byly zbarveny modrofialovou barvou.

Největší tepelné zatížení řezného nástroje u frézování bylo vypořadováno u materiálu ČSN 17 243 u něhož bylo naměřeno zvýšení teploty na povrchu obráběcího nástroje o 15,333 °C. Nejméně náročným materiálem na obrábění technologií frézování byl obrobek z materiálu ČSN 42 4254.64, při jehož obrábění došlo k nejmenšímu tepelnému zatížení řezného nástroje (nárůst teploty o 0,281 °C).

Při vyhodnocování dat u obráběcí technologie soustružení bylo zjištěno, že řezný nástroj nebyl více tepelně zatížen při obrábění ušlechtilějších materiálů, jelikož největší nárůst teploty byl pozorován u materiálu ČSN 11 373, což je materiál méně ušlechtilý než materiál ČSN 17 243. Tato abnormalita mohla být způsobena tím, že materiál ČSN 11 373 byl obráběn většími řeznými rychlostmi, než materiál ČSN 17 243. I zde je možné větší teploty během obrábění pozorovat na barvě třísek.

Maximální tepelné zatížení soustružnického nástroje bylo v experimentu vypořadováno u materiálu ČSN 11 373 u kterého byl naměřen nárůst teploty o 6,854 °C. Nejméně náročným materiálem na obrábění pomocí technologie soustružení se z experimentu jeví obrobek stejný jako u obráběcí technologie frézování (z materiálu ČSN 42 4254.64). Nárůst teploty na povrchu řezného nástroje zde činil pouze 1,310 °C.

Experimentální formou bylo potvrzeno, že teplota nástroje se se zvyšující řeznou rychlostí zvyšuje. Zvýšení teploty se však pro různé materiály obrobků liší, přičemž vyšší teplota se zpravidla projevuje při obrábění ušlechtilějších materiálů obrobků, což je dáno jejich kvalitnějším chemickým složením.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [2] Pohyby při obrábění. *ELUC* [online]. 20. 11. 2014 [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1185>
- [3] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. : il. ISBN 80-214-2374-9.
- [4] SHAW, Milton Clayton. *Metal Cutting Principles*. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2005. p. 651. ISBN 0-19-514206-3.
- [5] SANDVIK COROMANT a Miroslav KUDELA. *Příručka obrábění: kniha pro praxe*. 1. sv. Praha: Scientia, 1997, 857 s. ISBN 91-972299-4-6.
- [6] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3: Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2005, 256 s. ISBN 80-7183-337-1.
- [7] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology: Není teplota příliš vysoká nebo nízká?. *MM spektrum*. 2012, č. 5, s. 30. ISSN 1212-2572. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-neni-teplota-prilis-vysoka-nebo-nizka.html>
- [8] Popis obecné geometrie břitu rezných nástrojů. *TumliKOVO: Technologie strojního obrábění kovů a broušení nástrojů* [online]. [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/geometrie-britu-obecne/>
- [9] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011, 146 s. ISBN 978-80-248-2533-5.
- [10] Měření teploty – polovodičové odporové senzory teploty. *Vývoj.HW.cz* [online]. Redakce HW serveru, 2004 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>
- [11] Termistor Epcos B57236S160M. *Conrad Electronic – obchod s elektronikou a technikou* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/termistor-epcos-b57236s160m-20s236-16-20-3-5-a.k500406?icc=cross-sell&icn=lastviewed>
- [12] PTC termistor TDK B5989-C120-A70. *Conrad Electronic – obchod s elektronikou a technikou* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/ptc-termistor-tdk-b5989-c120-a70-150--1-ks.k500752?icc=cross-sell&icn=lastviewed>

- [13] SOVA, Jan a Jan KOVÁŘ. Termokamery a pyrometry. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. 2014, roč. 20, č. 4, s. 16–22. ISSN 1210–9592. Dostupné také z: https://automa.cz/cz/web-clanky/termokamery-a-pyrometry-52891_07333/
- [14] SOVA, Jan a Karel KADLEC. Termokamery a pyrometry v praxi. *Allforpower*. 2014, roč. 8, č. 1, s. 110–120. ISSN 1802–8535. Dostupné také z: <http://www.floowie.com/cs/cti/afp-komplet-01-14-foowie/#/strana/112/zvacseni/100/>
- [15] Konstrukce termokamery. *Termokamera.cz* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
- [16] Nová termokamera T840. *GeoBusiness - geoinformatika v praxi* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.geobusiness.cz/termokamera-flir-t840/>
- [17] Tepelné záření. *Termokamera.cz* [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/tepelne-zareni/>
- [18] Princip bezdotykového měření teploty a vysvětlení pojmů. *QTEST - měřicí přístroje* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/bezdotykovye-teplomery/bezdotykovye-mereni-teploty.htm>
- [19] Parametry termokamery. *Termokamera.cz* [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/parametry-termokamery/>
- [20] Využití termografie v průmyslu: Informační příručka o aplikacích termografie v průmyslu. *Conrad Electronic – obchod s elektronikou a technikou* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: http://velkoobchod.conrad.cz/data/flir/vyuziti_termografie_v_prumyslu.pdf
- [21] Infračervené teploměry, pyrometry. *Conrad Electronic – obchod s elektronikou a technikou* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/infracervene-teplomery-pyrometry.c0510034>
- [22] NOVÁ, I., S. KRÝSLOVÁ a Z. KRÝSLOVÁ. Metody bezdotykového měření teploty. *MM spektrum*. 2004, č. 11, s. 44. ISSN 1212-2572. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/metody-bezdotykoveho-mereni-teploty.html>
- [23] SEGEŤA, Petr. *Bezdotykové měření teploty* [online]. Brno, 2012, 27 s. [2020-03-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52638. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Kamil podaný, Ph.D.
- [24] BEŤÁK, Jindřich. Pásmové pyrometry. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. 2003, roč. 9, č. 1. ISSN 1210–9592. Dostupné také z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/pasmove-pyrometry-2003_01_28673_1874/

- [25] SAP10D. In: *Pramet.com* [online]. 26. ledna 2010 20:03:08 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <http://ecat.pramet.com/img/PICTURES/Milling/Main/SAP10D-end.JPG>
- [26] CKJN. In: *Pramet.com* [online]. 28. ledna 2010 17:16:38 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <http://ecat.pramet.com/img/PICTURES/Turning/Main/CKJN-Ext.JPG>
- [27] HUMÁR, A. *Strojírenská technologie I: Technologie obrábění – I. část*. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění [online]. 2006 [cit. 2020-04-07]. Dostupný z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [28] 0_regrese. In: *ČVUT v Praze Fakulta dopravní* [online]. 2013 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.fd.cvut.cz/departament/k611/pedagog/K611THO_soubory/0_regrese.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
FSI	Fakulta strojního inženýrství
NTC	Negative Temperature Coefficient
PTC	Positive Temperature Coefficient
SK	slinutý karbid
VBD	vyměnitelná břitová destička
VUT	Vysoké učení technické

Symbol	Jednotka	Popis
D	[mm]	frézování – průměr frézy, soustružení – průměr obrobku
E_e	[J]	veškerá mechanická energie vynaložená na tvorbu třísky
Q	[J]	celková tepelná energie
Q_{ch}	[J]	teplo způsobené utvářením a dělením třísky
Q_{sh}	[J]	teplo způsobené plastickou deformací ve smykové rovině
Q_a	[J]	teplo způsobené třením mezi obrobenou plochou a hřbetem nástroje
Q_γ	[J]	teplo způsobené třením mezi třískou a čelem nástroje
R²	[-]	hodnota spolehlivosti
T	[min]	trvanlivost
VB	[mm]	opotřebení
a_e	[mm]	radiální hloubka řezu
a_p	[mm]	axiální hloubka řezu
f	[mm]	posuv na otáčku
f_n	[mm]	posuv na otáčku
f_z	[mm]	posuv na zub
h_D	[mm]	šířka záběru ostří (a _p)
n	[min ⁻¹]	otáčky
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
v_e	[m.min ⁻¹]	rychlost řezného pohybu φ
v_f	[mm.min ⁻¹]	posuvová rychlost

z	[-]	počet zubů
Φ	[°]	úhel posuvového pohybu
α_o	[°]	nástrojový úhel hřbetu
γ_o	[°]	nástrojový úhel čela
δ_o	[°]	nástrojový úhel řezu
ε	[-]	emisivita
κ_r	[°]	nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
κ_{re}	[°]	pracovní úhel nastavení hlavního ostří
$\lambda_{1,2}$	[μm]	vlnová délka

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Informace o materiálech obrobků použitých v experimentu
- Příloha 2 Informace o použitých obráběcích nástrojích
- Příloha 3 Použitá zařízení při experimentu

Informace o materiálech obrobků použitých v experimentu

ČSN 11 109

Jedná se automatovou ocel, která je velmi dobře obrobitelná. Automatové oceli obecně dosahují dobré obrobitelnosti s kvalitní drsností obrobené plochy při velké řezné rychlosti. Dalším typickým znakem automatové oceli je snadná lámavost odebírané třísky. Další informace o oceli jakosti ČSN 11 109 jsou v tabulce 15. [29; 32]

Tab. 15: ČSN 11 109. [29–31]

Označení	EN	W. Nr.	ČSN	DIN
	11SMn30	1.0715	11 109	9SMn28
Chemické složení	C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
	max. 0,13	0,9÷1,5	0,1	0,21÷0,32
Mechanické vlastnosti	Rm [MPa]	Re [MPa]	A ₅ [%]	
	380÷520	min. 215	min. 6÷9	

ČSN 11 373

Neušlechtilá, neuklidněná nebo polouklidněná konstrukční ocel obvyklých jakostí vhodná na součásti konstrukcí a strojů namáhaných staticky a dynamicky, dále na různé výrobky běžného použití. Je také vhodná pro svařování. Další informace o oceli jakosti ČSN 11 373 jsou v tabulce 16. [29; 32]

Tab. 16: ČSN 11 373. [33]

Označení	EN	W. Nr.	ČSN	DIN
	S235JRG1	1.0036	11 373	USt37-2
Chemické složení	C [%]	P [%]	S [%]	N [%]
	max. 0,17	max. 0,045	max. 0,045	max. 0,007
Mechanické vlastnosti	Rm [MPa]	Re [MPa]	A ₁₀ [%]	
	min. 370	min. 250	min. 7	

Informace o materiálech obrobků použitých v experimentu

ČSN 12 050

Ocel jakosti ČSN 12 050 je brána jako uhlíková ocel k zušlechťování a povrchovému kalení. Tato uklidněná ocel je vhodná pro výrobu středně namáhaných strojních součástí (čepy, šrouby, rotory šroubových kompresorů, kolíky, vrtací tyče, frézovací trny, ...). Další informace jsou v tabulce 17. [29; 34; 35]

Tab. 17: ČSN 12 050. [34; 36]

Označení	EN		W. Nr.		ČSN		DIN	
	C45		1.1191		12 050		C45	
Chemické složení	Mn [%]	C [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	P [%]	S [%]
		0,5 ÷ 0,8	0,42 ÷ 0,50	max. 0,4	max. 0,4	max. 0,4	max. 0,1	max. 0,035
Mechanické vlastnosti	Rm [MPa]		Re [MPa]		HB			
	630÷700		310÷440		180÷200			

ČSN 15 260

Ocel jakosti ČSN 15 260 je dobře tvárná za tepla a ve stavu žíhaném naměkko i dobře obrobitelná. Je vhodná pro značně namáhané strojní součásti silničních motorových vozidel nebo pro strojní součásti, u kterých se požaduje vysoká pevnost v tahu a dostatečná tažnost. Z této oceli jsou například vyráběny ozubená kola, pastorky, hřídele, torzní tyče a pružiny větších průřezů. Další informace jsou v tabulce 18. [37; 38]

Tab. 18: ČSN 15 260. [39; 40]

Označení	EN		W. Nr.		ČSN		DIN	
	51CrV4		1.8159		15 260		zrušena	
Chemické složení	Cr [%]	Mn [%]	C [%]	Si [%]	V [%]	P [%]	S [%]	
		0,9 ÷ 1,2	0,7 ÷ 1,1	0,47 ÷ 0,55	max. 0,4	0,1 ÷ 0,25	max. 0,035	max. 0,035
Mechanické vlastnosti	Rm [MPa]		A ₅ [%]		HB			
	660÷1980		min. 9÷13		200÷360			

Informace o materiálech obrobků použitých v experimentu

ČSN 17 243

Jedná se o austenitickou nestabilizovanou chrom niklovou ocel (korozivzdorná ocel), jejíž hlavní požadovanou vlastností je odolnost vůči korozi. Mezi její základní vlastnosti patří velmi špatná svařitelnost, velká vhodnost pro třískové obrábění, malá vhodnost pro tažení za studena (poměrně značné zpevnění) a její leštění zvyšuje korozní odolnost. Používá se na výrobu spojovacích součástí a pro různé součásti v potravinářském průmyslu. Přehled označení, chemického složení a mechanických vlastností je uveden v tabulce 19. [41; 42]

Tab. 19: ČSN 17 243. [43]

Označení	EN		W. Nr.		ČSN		DIN	
	X8CrNiS 18-9		1.4305		17 243		1.4305	
Chemické složení	Cr [%]	Ni [%]	Mn [%]	Si [%]	Cu [%]	S [%]	C [%]	N [%]
	17 ÷ 19	8 ÷ 10	max. 2,0	max. 1,0	max. 1,0	0,15 ÷ 0,35	max. 0,1	max. 0,1
Mechanické vlastnosti	Rm [MPa]			Re [MPa]		HB		
	610÷900			220÷570		200÷270		

ČSN 42 4254.64

Jedná se o automatový dural (slitina hliníku), který je díky krátké třísce vhodný pro obrábění na automatech. Slitiny hliníku spolu s ocelmi v současnosti patří mezi nejpoužívanější kovové konstrukční materiály, díky jejich nízké hmotnosti a dobré obrobiteľnosti. Dural se vyznačuje velmi dobrou obrobiteľností, nemožnou svařitelností, špatnou korozní odolností a zhoršenou lešitelností. Druhy označení, přehled chemického složení a mechanických vlastností je uveden v tabulce 20. [44–46]

Tab. 20: ČSN 42 4254.64. [47]

Označení	EN		W. Nr.		ČSN		DIN	
	AlCu4PbMg		-		42 4254.64		-	
Chemické složení	Cu [%]	Pb [%]	Mg [%]	Mn [%]	Si [%]	Fe [%]	Zn [%]	Ti [%]
	3,3 ÷ 4,5	0,8 ÷ 1,5	0,5 ÷ 1,3	0,2 ÷ 1,0	max. 0,8	max. 0,7	max. 0,5	max. 0,2
Mechanické vlastnosti	Rm [MPa]				Re [MPa]			
	370÷420				240÷270			

Informace o materiálech obrobků použitých v experimentu

ČSN 42 4401

Jedná se o slitinu hliníku s křemíkem tzv. silumin. Slitiny hliníku díky kombinaci nízké hmotnosti a specifických mechanických vlastností mají využití zejména v automobilovém, leteckém a elektrotechnickém průmyslu. Základními vlastnostmi siluminu jsou dobrá tvářitelnost za studena, svařitelnost a pájitelnost, odolnost proti korozi a dobrá obrobitelnost. Druhy označení, přehled chemického složení a mechanických vlastností siluminu je uveden v tabulce 21. [46; 48]

Tab. 21: ČSN 42 4401. [49; 50]

Označení	EN		W. Nr.		ČSN		DIN	
	AlMgSi		3.3206		42 4401		3.3206	
Chemické složení	Mg [%]	Si [%]	Fe [%]	Zn [%]	Mn [%]	Ti [%]	Cu [%]	Cr [%]
	0,35 ÷ 0,6	0,3 ÷ 0,6	0,1 ÷ 0,3	max. 0,15	max. 0,1	max. 0,1	max. 0,1	max. 0,05
Mechanické vlastnosti	Rm [MPa]		Re [MPa]		HB			
	140÷220		71÷170		45÷70			

Umělé dřevo

Umělé dřevo neboli WPC (Wood–plastic composite) je kompozitní materiál, který spojuje nejlepší vlastnosti dřeva a polymerů. Vyrábí se spojením kvalitní dřevité moučky a plastového polymeru s podílem dřevěné složky 60÷70 % a 30÷40 % polymeru. Díky tomuto poměru je zaručena vysoká míra imitace dřevěného povrchu. S větším zastoupením polymerové složky se povrch jeví pocitově i vizuálně více plastový. Mezi nejčastěji se objevující polymer v materiálech WPC patří HDPE (high–density polyethylene) nebo PP (polypropylene). [51–53]

Hlavní výhody WPC materiálů oproti klasickému dřevu jsou odolnost vůči vlhku a mrazu, stálobarevnost, menší hořlavost, odolnost vůči škůdcům a hnilobě, netvoří třísky a nepraská. [51; 54]

Umělé dřevo se díky svým vlastnostem (vzhledová imitace klasického dřeva a lepší vlastnosti oproti dřevu) nejčastěji používá ve stavebnictví ve formě prken, tyčí či desek. Své využití nalézá ale i ve strojírenském průmyslu, kde ho lze využít na výrobu modelů. [54]

Informace o materiálech obrobků použitých v experimentu

Polyamid PA6

Polyamidy obsahují poměrně velký podíl vody, jenž se v závislosti na typu a oblasti použití může podle relativní vlhkosti vzduchu měnit. Právě pouze s určitým podílem vlhkosti si polyamidy uchovávají svou tuhost, pružnost a rázovou pevnost. Pro zvýšení pevnosti a tuhosti se při výrobním procesu do polyamidové směsi přidávají krátká skelná vlákna. Přidáním skelných vláken se rovněž dosáhne vyšší ohebnosti a tvarové stálosti při zahřátí. [55]

Polyamid PA6 je materiál s optimální kombinací vlastností jako jsou mechanická tuhost, pevnost, houževnatost, odolnost vůči opotřebení a schopnost tlumit rázy a chvění. Zároveň díky své odolnosti vůči chemikáliím a elektroizolačním vlastnostem jsou polyamidy PA6 univerzálně použitelné v oblasti konstrukce i údržby. [56; 57]

Při obrábění plastů dochází k určitým odlišnostem oproti obrábění kovových materiálů a je třeba těmto skutečnostem věnovat pozornost. Větší tepelná roztažnost plastů zapříčiňuje změnu rozměrů polotovaru při obrábění. Malá tepelná vodivost má za následek větší tepelné zatížení bříty nástroje a tím dochází k jeho rychlejšímu opotřebení. Některé plasty kvůli velké adhezi k materiálu bříty obráběcího nástroje způsobují jeho větší opotřebení adhezním otěrem. [58]

Z materiálu PA6 jsou vyráběny spojovací součásti, ozubená kola, kluzná ložiska, kladky, hadice, různá vlákna (silon, nylon atd.) a struny. Dále ho lze ve formě povlaku využít k ochraně proti korozi a otěru. [57]

Dubové dřevo

Rozličné dřeviny mají velmi odlišné vlastnosti, ale i ta samá dřevina se může v různých vzorcích lišit velikostí jádra v závislosti na odlišných růstových podmínkách. Co se týče našich dřev, dub nejdéle vzdoruje povětrnostním podmínkám, vlhku a suchu. Mezi základní vlastnosti dubového dřeva patří tvrdost, pevnost, houževnatost a trvanlivost. [59; 60]

Výsledek obrábění dřeva je ovlivněn jeho fyzikálními, mechanickými a technologickými vlastnostmi. Tyto vlastnosti závisí na jeho anatomické a chemické stavbě, na lokalitě a na podmínkách, za jakých dřevo rostlo. Na řezný odpor má z fyzikálních vlastností vliv převážně hustota (s rostoucí hustotou roste i řezný odpor) a vlhkost dřeva. Vlhkost mimo řezného odporu ovlivňuje i tvoření třísky a trvanlivost bříty. Z mechanických vlastností hraje největší roli tvrdost, pevnost a plasticita. Dle tvrdosti jsou dřeva rozdělena na velmi měkká (smrk, lípa), měkká (modřín, olše), středně tvrdá (platan, jilm), tvrdá (dub, buk) a velmi tvrdá (exotická dřeva). Mezi technologické vlastnosti ovlivňující obrábění dřeva patří dělitelnost, štípatelnost, tvárnost a obrobitelnost. [58]

- [29] Jakosti ocelí. *www.feromat.cz* [online]. 2010 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: http://www.feromat.cz/jakosti_oceli
- [30] CZ FERRO STEEL. ČSN 11109: automatová ocel. *In: CZ FERRO STEEL* [online]. 2018 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-11109.pdf>
- [31] Jakosti materiálů. *ARET STEEL* [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://www.aretsteel.com/en/steel-grades>
- [32] Neušlechtilé oceli třídy 11, složení a tepelné zpracování. *Tumlikovo.cz* [online]. © 2010 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/neuslechtilé-uhlikovekonstrukcni-oceli-tridy-11-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/>
- [33] CZ FERRO STEEL. ČSN 11373: nelegovaná ocel obvyklých jakostí pro konstrukce. *In: CZ FERRO STEEL* [online]. 2018 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-11373.pdf>
- [34] ČSN 12 050. *Nástrojové a speciální oceli - JKZ Bučovice* [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.jkz.cz/cs/produkty/konstrukcni-oceli/csn-12-050-11191-c45/>
- [35] CZ FERRO STEEL. ČSN 12050: ocel k zušlechťování. *In: CZ FERRO STEEL* [online]. 2018 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-12050.pdf>
- [36] EN 1.1191 (C45E) Non-Alloy Steel. *MakeItFrom.com: Material Properties Database* [online]. 2019 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.1191-C45E-Non-Alloy-Steel>
- [37] Nízkolegované oceli třídy 15, složení a tepelné zpracování. *Tumlikovo.cz* [online]. © 2010 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/nizkolegovane-konstrukcni-oceli-tridy-15-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/>
- [38] Oceli třídy 15. *Strojrenstvi - Vše co student potřebuje vědět* [online]. © 2020 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://strojrenstvi.studentske.cz/2008/10/oceli-tdy-15.html>
- [39] EN 1.8159 (51CrV4) Chromium-Vanadium Steel. *MakeItFrom.com: Material Properties Database* [online]. 2019 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.8159-51CrV4-Chromium-Vanadium-Steel>
- [40] Material specification sheet. *In: saarstahl.de* [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.saarstahl.de/sag/en/general/search/?q=1.8159>

- [41] NEREZOVÁ OCEL 1.4305. *INOX: Prodej nerezového hutního materiálu* [online]. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <http://www.nerezove-plechy.cz/nerezova-ocel-14305.html>
- [42] Materiálove normy. *Nerez NOVEL* [online]. © 2011-2020 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <http://www.novel.sk/materialove-normy/>
- [43] EN 1.4305 (X8CrNiS18-9) Stainless Steel. *MakeItFrom.com: Material Properties Database* [online]. 2018 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.4305-X8CrNiS18-9-Stainless-Steel>
- [44] Hliník. *AlCuSteel s.r.o.* [online]. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <http://www.alcusteel.cz/produkty/hlinik>
- [45] AL slitiny. *Ing. Petr Spáčil – kovoobrábění* [online]. 2019 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <http://www.kovo-spacil.cz/alloys/cz.htm>
- [46] ROLEČEK, J. *Mechanické vlastnosti a struktura slitiny hliníku po tepelném zpracování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Juliš, Ph.D.
- [47] 2030 (AlCu4PbMg, A92030) Aluminum. *MakeItFrom.com: Material Properties Database* [online]. 2019 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/2030-AlCu4PbMg-A92030-Aluminum>
- [48] Alloy 3.3206 EN AW 6060 Aluminium. *Your supplier for stainless steel, aluminium, titanium and nickel* [online]. 2016 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.delta-trading.de/en/product-overview/aluminium-heavy-metals/alloy-33206-en-aw-6060-aluminium/>
- [49] NEDAL_Datasheet-6060.pdf. *Nedal Aluminium - Aluminium profiles and lighting columns* [online]. 2018 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: https://www.nedal.com/wp-content/uploads/2019/07/NEDAL_Datasheet-6060.pdf
- [50] 6060 (AlMgSi, 3.3206, A96060) Aluminum. *MakeItFrom.com: Material Properties Database* [online]. 2019 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/6060-AlMgSi-3.3206-A96060-Aluminum>
- [51] WPC MATERIÁL A JEHO VÝHODY. *NejlevnějšíPolykarbonát.cz* [online]. 2017 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.nejlevnejsipolykarbonat.cz/informace/wpc-material/>
- [52] Co je to WPC. *Terasa na celý život* [online]. © 2011 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.mojeterasa.cz/co-je-to-wpc>

- [53] Vše o materiálu WoodPlastic. *Český výrobce WP6C teras, plotů a obkladů* [online]. © 2019 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.woodplastic.cz/vse-o-wpc/>
- [54] K čemu se používá umělé dřevo? A co to je?. *Stavebni-vzdelani.cz* [online]. © 2013–2020 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.stavebni-vzdelani.cz/pouziti-umeleho-dreva/>
- [55] Vlastnosti polyamidu.pdf. In: *Heyman: access & fastening solutions* [online]. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: https://www.heyman.cz/media/useruploads/files/documentation_cz/Kazub/Vlastnosti polyamidu.pdf
- [56] PA6. *Polyamidy* [online]. © 2020 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.polyamidy.cz/pa6/>
- [57] LEINVEBER, J., J. ŘASA a P. VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 3.vyd. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-7183-164-6.
- [58] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojirenská technologie 3: Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2005, 256 s. ISBN 80-7183-337-1.
- [59] Dřevo a jeho vlastnosti. *Obkladové palubky, podlahové palubky, plotovky* [online]. © 2014 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: https://www.artisan.cz/drevo-a-jeho-vlastnosti?gclid=CjwKCAjw95D0BRBFEiwAcO1KDiedLyMYZt_kh_AnQpfs773Tbf07fDaH-QWsb9TJYhb7Jv__2JwISBoCl0cQA_vD_BwE
- [60] Dub. *Lesy České republiky* [online]. © 2020 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://lesy.cz/drevo/charakteristika-dreva-jednotlivych-drevin/dub/>

Informace o použitých obráběcích nástrojích

Stopková fréza [61]

- ISO kód: 20A3R032B20-SAP10D-C
- Výrobce: Pramet

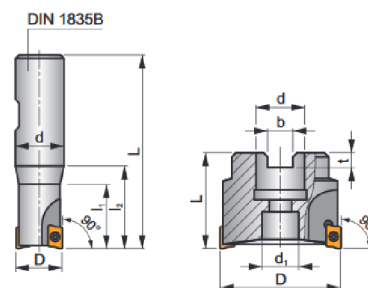
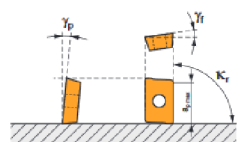
SAP10D

P M K N S

S



K_r	90°
a_{pmax}	9,0 mm



h_{max}	0,08 - 0,16								
h_{min}	0,06 - 0,13								

ISO	D	L	d	d ₁	l ₁	l ₂	b	t	γ_f°	γ_b°					kg		
10A1R020B16-SAP10D-C	10	78	16	-	20	30	-	-	+12	+2	1	-	39000	✓	0,09	GI081	SQ215
12A1R027B16-SAP10D-C	12	75	16	-	-	27	-	-	+12	+2	1	-	35600	✓	0,10	GI081	SQ210
14A1R027B16-SAP10D-C	14	75	16	-	-	27	-	-	+12	+2	1	-	32900	✓	0,13	GI081	SQ210
16A2R032B16-SAP10D-C	16	80	16	-	-	32	-	-	+12	+4	2	-	30800	✓	0,13	GI081	SQ210
18A2R032B20-SAP10D-C	18	82	20	-	-	32	-	-	+12	+4	2	-	29100	✓	0,15	GI081	SQ210
20A3R032B20-SAP10D-C	20	82	20	-	-	32	-	-	+12	+4	3	-	27600	✓	0,16	GI081	SQ210
25A3R042B25-SAP10D-C	25	98	25	-	-	42	-	-	+12	+4	3	-	24700	✓	0,36	GI081	SQ210
40A6R-S90AP10D	40	40	16	14	-	-	8,4	5,6	0	+3	6	✓	19500	-	0,23	GI081	SQ211
50A7R-S90AP10D	50	40	22	18	-	-	10,4	6,3	0	+3	7	✓	17400	-	0,41	GI081	SQ211
63A9R-S90AP10D	63	50	22	18	-	-	10,4	6,3	0	+3	9	✓	15500	-	0,57	GI081	SQ211


GI081	APKT 1003..							

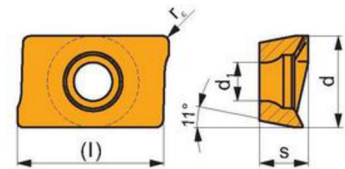
SQ210	US 2506-T07P	1,2	M 2,5	6	-	-	Flag T07P
SQ211	US 2506-T07P	1,2	M 2,5	6	D-T07P/T09P	FG-15	-
SQ215	US 2505-T07P	1,2	M 2,5	5	-	-	Flag T07P









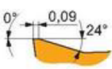
Informace o použitých obráběcích nástrojích

VBD pro frézování [61]

- ISO kód: APKT 1003PDER-M
- Výrobce: Pramet

APKT 10				
	d	d _i	l	s
1003	6,700	2,88	11,00	3,50

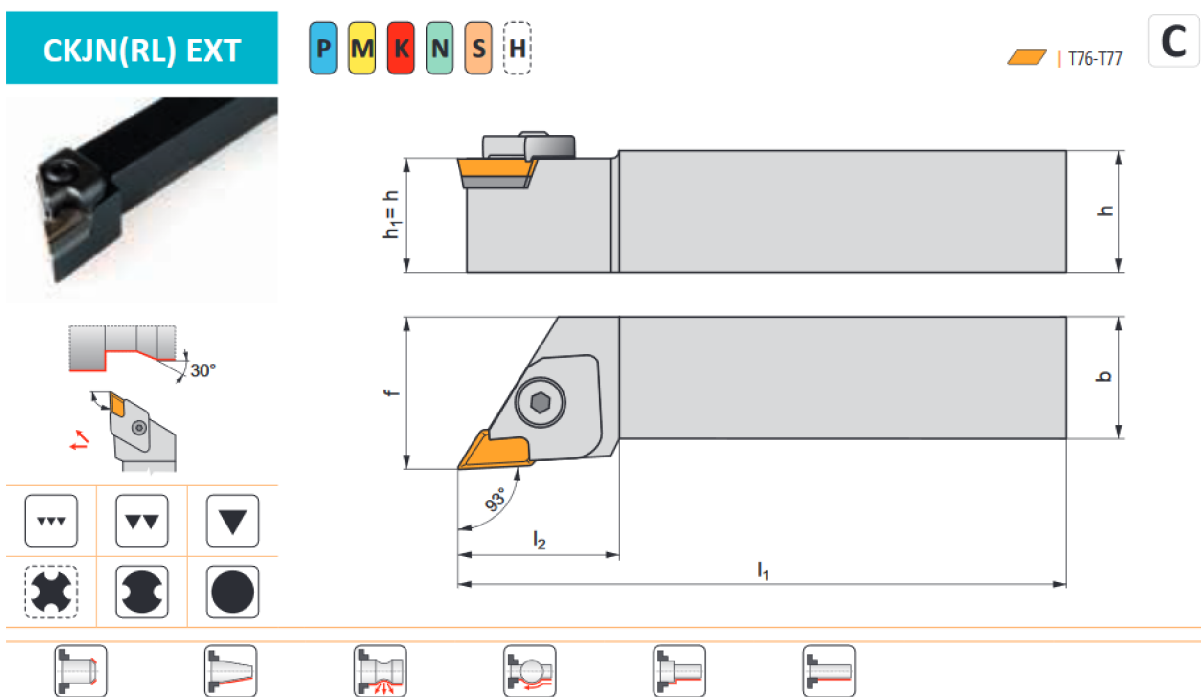


		ISO		P	M	K	N	S	H			r _e	f _{min}	f _{max}	a _{p min}	a _{p max}
		APKT 1003PDER-M	M9315	■	■	■				●	---	0,5	0,10	0,20	1,0	9,0
			M9325	■	■	■		■		●	---	0,5	0,10	0,20	1,0	9,0
			M9340	■	■	■				●	---	0,5	0,10	0,20	1,0	9,0
			M8340	■	■	■		■		●	+/-	0,5	0,10	0,25	1,0	9,0
			8215	■	■	■		□		●	-	0,5	0,10	0,25	1,0	9,0
			8230	■	■	■		■		●	-	0,5	0,10	0,25	1,0	9,0
			8240	■	■	■		■		●	-	0,5	0,10	0,25	1,0	9,0

Informace o použitých obráběcích nástrojích

Soustružnický nástroj [62]

- ISO kód: CKJNR2020K16
- Výrobce: Pramet



ISO	$h=h_1$	b	f	l_1	l_2	λ_s°	γ°	kg		
CKJNR 2020 K 16	20	20	30	125	34,0	1	-5	0,45	GI066	R1
CKJNR 2525 M 16	25	25	32	150	34,0	1	-5	0,70	GI066	R
CKJNR 3225 P 16	32	25	32	170	34,0	1	-5	1,00	GI066	R
CKJNL 2020 K 16	20	20	30	125	34,0	1	-5	0,45	GI067	L1
CKJNL 2525 M 16	25	25	32	150	34,0	1	-5	0,70	GI067	L
CKJNL 3225 P 16	32	25	32	170	34,0	1	-5	1,00	GI067	L

GI066	KN.X 1604...R
GI067	KN.X 1604...L


L	KNN 190412 L	NT 03	-	UP 26	US 83	6,0	PR 07	K 23	HXX 4
L1	KNN 190412 L	NT 03	-	UP 26	US 83	6,0	PR 07	K 22	HXX 4
R	KNN 190412 R	NT 03	UP 25	-	US 83	6,0	PR 07	K 23	HXX 4
R1	KNN 190412 R	NT 03	UP 25	-	US 83	6,0	PR 07	K 22	HXX 4

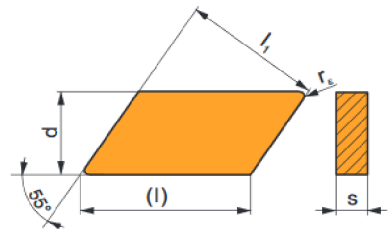
PŘÍLOHA 2 (4/4)













Informace o použitých obráběcích nástrojích

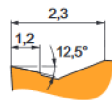
VBD pro soustružení [62]

- ISO kód: KNUX 160405SR-73
- Výrobce: Pramet

KNUX				
	d	l	l ₁	s
1604	9,525	19,5	16,15	4,76



		ISO										r _c	f _{min}	f _{max}	a _{p min}	a _{p max}
				P	M	K	N	S	H							
		KNUX 160405SR-73	6640	■	■	▣	□	●	++	0,5	0,20	0,30	0,5	4,8		
		KNUX 160410SR-73	T5315	▣	□	▣	□	●	++	1,0	0,20	0,60	1,0	4,8		
			6640	■	■	▣	□	●	+++	1,0	0,20	0,60	1,0	4,8		



- [61] *General Catalogue PRAMET 2017*. Dormer Pramet, 2017. Dostupné také z: <http://lab2u.ru/litcevaia-storona-oblozhki-kataloga-metallorzhushchego-instrumenta-pramet-2017-na-russkom-cheshskom-polskom-i-slovatckom-iazykakh-toche-nie-naruzhnoe-i-vnutrennee-katalog-pramet-2017-metallorzhushchii-instrument-str-0001-lab2u.html>
- [62] *General Catalogue PRAMET 2019*. Dormer Pramet, 2019. Dostupné také z: <https://www.dormerpramet.com/downloads/2019%20general%20catalogue%20pramet%20set4%20cz-ru-pl-sk.pdf>

Použitá zařízení při experimentu

Konzolová vertikální frézka FV 25 CNC A [63]

Tab. 22: Technické parametry konzolové vertikální frézky FV 25 CNC A.

Technické parametry stroje		
Velikost stolu šířka x délka	300x1300	mm
Podélný zdvih NC – osa X	760	mm
Příčný zdvih NC – osa Y	355	mm
Svislý výsuv pinoly NC – osa Z	152	mm
Pracovní posuvy – osy X, Y, Z	2,5÷2500	mm.min ⁻¹
Rychloposuv – osy X, Y, Z	7000	mm
Svislé přestavení konzoly ruční	415	mm
Vřeteno		vertikální
Dutina vřetena		ISO 40
„T“ drážky (počet, rozměr, rozteč)	5/14/50	
Maximální přípustné zatížení stolu	200	kg
Vzdálenost vřetena od vedení stolu	373	mm
Průměr vřetena v předním ložisku	50	mm
Průměr pinoly	110	mm
Vzdálenost čela vřetena od upínací plochy stolu	0÷520	mm
Otáčky vřetena – plynule měnitelné ve dvou stupních	50÷1500	min ⁻¹
	1500÷6000	min ⁻¹
Maximální krouticí moment	140	Nm
Jmenovitý výkon stroje	5,5	kW
Hmotnost stroje	1500	Kg
Půdorysné rozměry délka x šířka	2750÷2588	mm
Výška stroje	2030	mm
Příkon stroje	9	kVA
Přesnost A (dle ISO 230–2)	0,015	mm
Jednostranný rozptyl (ISO 230–2)	0,007	mm
Odměřovací jednotka	0,001	mm
Zpětná vazba v uzavřené smyčce		ano
Posuvová síla (servo DC)	7700	N
Maximální průměr vrtáku (měkká ocel)	50	mm
Frézovací výkon	200	cm ³ .min ⁻¹

Použitá zařízení při experimentu

FV 25 CNC A.



Použitá zařízení při experimentu

Hrotový soustruh SV 18 RD [64]

Tab. 23: Technické parametry hrotového soustruhu SV 18 RD.

Technické parametry			
Oběžný průměr nad ložem	380	mm	
Vzdálenost hrotů – odstupňovaná po 250 mm	500÷1250	mm	
Točná délka při použití kuželového pravítka	350	mm	
Oběžný průměr nad suportem	215	mm	
Vrtání vřetena	41	mm	
Kužel ve vřetenu	metrický	50	
Kužel hrotů	Morse	4	
Přední konec vřetena		M 68	
Maximální krouticí moment	207	Nm	
Největší průměr soustružení v opěrce pevné	100	mm	
Největší průměr soustružení v opěrce souběžné	100	mm	
Šířka lože	340	mm	
Průměr upínací desky	360	mm	
Průměr unášecí desky	220	mm	
Průměr sklíčidla	160, 200	mm	
Vzdálenost stran čtyřnožové hlavy	80÷125	mm	
Největší průřez nože	22x22	mm	
Zdvih hrotové objímky koníku	120	mm	
Největší hmotnost obrábění součásti	300	kg	
Rozsah otáček vřetena: předloha	1:1	56÷2800	min ⁻¹
	1:4	14÷700	min ⁻¹
Posuvy: rozsah podélných		0,02÷2,8	mm
	rozsah příčných	0,01÷1,4	mm
Stoupání vodícího šroubu		4 záv/1 [“]	
Závity: rozsah závitů metrických, stoupání v mm		0,2÷70	
	rozsah závitů palcových, počet závitů na 1 [“]	2/5÷140	
	rozsah závitů modulových	2÷224	mod.
	rozsah závitů Diametral pitch	0,2÷35	DP
Výkon hlavního motoru při 2800 ot/min		14	kW
Otáčky motoru pro čerpadla na chladicí kapalinu		2800	min ⁻¹
Výkon motoru pro čerpadla na chladicí kapalinu		0,115	kW
Půdorysná plocha stroje (šířka x délka)		950x2450	mm
		950x2700	mm
		950x2900	mm
		950x3200	mm
Půdorysná plocha elektro skříně		510x390	mm

Použitá zařízení při experimentu

Hmotnost stroje s normálním příslušenstvím	1710	kg
	1780	kg
Hmotnost stroje s obalem	1950	kg
	2000	kg
	1740	kg
	1825	kg
	2000	kg
	2100	kg

SV 18 RD.



Použitá zařízení při experimentu

Ruční otáčkoměr H6 [65]

- Výrobní číslo: 6401

Tab. 24: Technické údaje o ručním otáčkoměru H6.

Technické údaje			
Poloha	Měřicí rozsah	Dělení měřítka	Chyba ($\pm 2\%$)
1	40÷160	2	$\pm 3,2$
2	120÷480	5	$\pm 9,6$
3	400÷1600	20	± 32
4	1200÷4800	50	± 96
5	4000÷16000	200	± 320
6	12000÷48000	500	± 960

Maximální dovolená chyba je $\pm 2\%$ příslušné plné hodnoty stupnice.

Ruční otáčkoměr H6.



PŘÍLOHA 3 (6/7)

Použitá zařízení při experimentu

Pyrometr Raytek Raynger MX4+NI [66]

Technické údaje o pyrometru Raytek Raynger MX4+NI.

Specifications and Features	MX2	MX4+	MX4+NI
Temperature Range	-30°C to 900°C (-25°F to 1600°F)		
Temperature Range with SZ option	-50°C to 500°C (-58°F to 932°F)		—
Accuracy (Assumes ambient operating temperature of 23°C (73°F))	±0.75% of reading or ±1°C (±2°F) whichever is greater		
Repeatability	≤ ±0.5 of reading or ≤ ±1°C (±2°F), whichever is greater		
Response Time	250 mSec (95% of reading)		
Spectral Response	8 to 14μm, thermopile detector		
Adjustable Emissivity* (from 0.1 to 1.0 by 0.01)	✓	✓	✓
Ambient Operating Temp.	0°C to 50°C (32°F to 122°F)		
Relative Humidity	10-90% at 30°C (86°F) non-condensing		
Storage Temperature	-20°C to 50°C (-25°F to 122°F)		
Weight	480g (1 lb. 6 oz.)		
Power	2 AA Batteries	2 AA Batt./AC adapter	2 AA Batt./AC adapter
Power Supply (110 or 220V), PS232 Computer Cable, 1.5 m (60 in), K thermocouple probe	—	✓	✓
Laser Class II	3-dot laser sighting (Meets IEC Class 2 & FDA Class II requirements)		
Single Laser Class III	Option (U.S. only)	—	—
Distance to Spot (D:S)	60:1 (50:1 with Close Focus Option)		60:1
Minimum Measurement Diameter	19mm (0.76") (6mm (0.24") with Close Focus Option)		19mm (0.76")
Maximum and Minimum Temperature	✓	✓	✓
Audible/Visible High/Low Alarm	✓	✓	✓
Differential and Average Temperature	—	✓	✓
Bar Graph Display	✓	✓	✓
100 Points Data Logging	—	✓	✓
Display Hold	✓	✓	✓
LCD Backlit	✓	✓	✓
Temperature Display	°C or °F selectable		
Display Resolution	0.1°C of reading up to 900°C (0.2°F up to 999.8°F)		
Data Graphing Software (Windows compatible)	—	✓	✓
Data Output: RS232 or 1mV per degree (°C or °F)	—	✓	✓
Hard Carrying Case	✓	✓	✓
Tripod Mount	1/4-20 UNC		
Nonincendive (Factory Mutual Research Nonincendive Rated, Class I, Division 2, Groups A, B, C, D; Class I, Zone 2 IIC; T4 Ta=50°C when used with 1.5V alkaline batteries. WARNING: Battery changes non-hazardous locations only. Only Raytek temp probes part XXXMXTIP or XXXMXTCK2 can be connected)	—	—	✓
Close Focus	Option	Option	—
Subzero	Option	Option	—
NIST DKD Calibration Certificate	Option	Option	Option
Warranty 1 Year**	✓	✓	✓

Použitá zařízení při experimentu

Pyrometr Raytek Raynger MX4+NI.



- [63] *Návod pro obsluhu stroje FV 25 CNC A.* Obráběcí stroje Olomouc s. r. o., [b.r.].
- [64] *Univerzálny hrotový sústruh SV 18 RD.* TOS Trenčín, [b.r.].
- [65] *Gebrauchsanweisung für Hand-Tachometer H6.* Meßgerätewerk Beierfeld, [b.r.].
- [66] *Raytek MX Series Infrared Thermometer.* Raytek Corporation, 2003, 4 s. Dostupné také z: <https://www.yumpu.com/en/document/read/40614393/raytek-mx-series-infrared-thermometer>