



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MOŽNOSTI OMEZOVÁNÍ NEŽÁDOUCÍCH JEVŮ PŘI TŘÍSKOVÉM DOKONČOVACÍM OBRÁBĚNÍ

POSSIBILITIES OF LIMITING UNWANTED PHENOMENA DURING CHIP FINISHING MACHINING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Handl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Jiří Handl
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	Ing. Milan Kalivoda
Akademický rok:	2023/24

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 diplomové práce:

Možnosti omezování nežádoucích jevů při třískovém dokončovacím obrábění

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Dokončovací obrábění je přesná záležitost a přitom je vlastní výrobní proces doprovázen řadou negativních jevů. Zvláště u výrobků, které mají stupně lícování v řádu setin až tisícín milimetrů, aby byla zaručena jejich dlouhodobá funkčnost, nelze negativní jevy podceňovat. Zadané téma je rozebírá z několika teoretických pohledů a vyhodnocuje jejich možný dopad na hotový výrobek se zaměřením snížit jejich vliv na dostupné minimum, které je dáno úrovní výrobní techniky.

Cíle diplomové práce:

- Definování pojmu "Třískové dokončovací obrábění".
- Shrnutí nežádoucích (negativních) jevů.
- Rozbor primárního jevu "vibrace" versus "přerušovaný řez".
- Měřicí metody pro vyrobené rozměry na součástech.
- Požadavky na přístrojové vybavení firem.
- Doložení výsledných získaných hodnot na vzorovém výrobku.
- Zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

BHATTACHARYYA, Bijoy a DOLOI, Biswanath. Modern Machining Technology. 1st edition. London: Academic Press, 2020. 764 s. ISBN 978-0-12-812894-7.

BUDYNAS, Richard G. a NISBETT, Keith J. Shigleyho konstruování strojních součástí. Přeložil Martin Hartl et al. 10. vyd. Brno: VUTUM, 2023. 1296 s. ISBN 978-80-214-5471-2.

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

GRZESIK, Wit. Advanced Machining Processes of Metallic Materials. 2nd edition. Amsterdam: Eisevier B. V., 2017. 578 s. ISBN 978-0-444-63711-6.

KARPÍŠEK, Zdeněk. Matematika IV: Statistika a pravděpodobnost. 3. vyd. Olomučany: CERM, s. r. o., 2007. 170 s. ISBN 978-80-241-3380-9.

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

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie (Advanced methods of material removal). 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 276 s. ISBN 80-7099-430-4.

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

PERNIKÁŘ, Jiří a TYKAL, Miroslav. Strojírenská metrologie II. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-8.

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. Nauka o materiálu I. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

SHAW, Milton Clayton. Metal Cutting Principles. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2005. 651 s. 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 diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na možnosti omezování nežádoucích jevů při dokončovacím třískovém obrábění. V teoretické části jsou popsány vybrané negativní jevy vznikající při soustružení spolu se zkoumanými možnostmi jejich omezování. V experimentální části je provedena analýza vlivu řezných podmínek z doporučeného rozmezí řezného nástroje s využitím metody soustružení. Konkrétně je sledována závislost řezné rychlosti a posuvu na velikost řezné síly, teploty a výsledné kvality povrchu u dvou různých materiálů. Získané výsledky slouží k pochopení dané problematiky a optimalizaci výrobního procesu.

Klíčová slova

řezná rychlost, posuv, řezné síly, teplota, kvalita povrchu

ABSTRACT

The diploma thesis focuses on the possibilities of limiting undesirable phenomena during finishing chip machining. In the theoretical part, selected negative phenomena arising during turning are described and the possibilities of their limitation are investigated. In the experimental part, an analysis of the influence of cutting conditions from the recommended range of the cutting tool using the turning method is carried out. Specifically, the dependence of the cutting speed and feed rate on the size of the cutting force, temperature and resulting surface quality for two different materials is monitored. The obtained results serve to understand the issue and optimize the production process.

Keywords

cutting speed, feed, cutting forces, temperature, surface quality

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HANDL, Jiří. *Možnosti omezování nežádoucích jevů při třískovém dokončovacím obrábění* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157941>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Možnosti omezování nežádoucích jevů při třískovém dokončovacím obrábění vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

.....
místo, datum

.....
Bc. Jiří Handl

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Milanu Kalivodovi za cenné rady a připomínky, které mi poskytoval v průběhu psaní diplomové práce.

Dále také děkuji panu Jiřímu Čechovi za jeho pomoc a ochotu při vypracování praktické části. Poděkování patří také mé rodině a blízkým za jejich podporu a trpělivost během celého mého studia.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 OMEZOVÁNÍ NEŽÁDOUCÍCH JEVŮ PŘI SOUSTRUŽENÍ.....	11
2.1 Soustružení	11
2.1.1 Nástroj	13
2.1.2 Stroj	15
2.2 Tepelné ovlivnění	18
2.2.1 Vliv řezných podmínek na teplotu.....	19
2.2.2 Chlazení a mazání.....	20
2.2.3 Metody měření teploty.....	21
2.3 Vibrace	22
2.3.1 Vlastní vibrace	23
2.3.2 Vynucené vibrace	23
2.3.3 Samobuzené vibrace	24
2.3.4 Vliv řezných podmínek na stabilitu procesu	25
2.3.5 Tuhost soustavy	27
2.3.6 Měření vibrací.....	27
2.4 Přerušovaný řez	29
2.5 Opotřebení nástroje	29
2.5.1 Vliv řezných podmínek na opotřebení nástroje	34
2.5.2 Měření opotřebení nástroje	35
3 PRAKTICKÁ ČÁST	37
3.1 Měření řezných sil	41
3.1.1 Výsledky měření řezných sil	42
3.2 Měření teploty	47
3.2.1 Výsledky měření teploty.....	48
3.3 Měření kvality povrchu	50
3.3.1 Výsledky měření kvality povrchu.....	50
3.4 Hodnocení získaných výsledků	53
ZÁVĚR.....	60

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

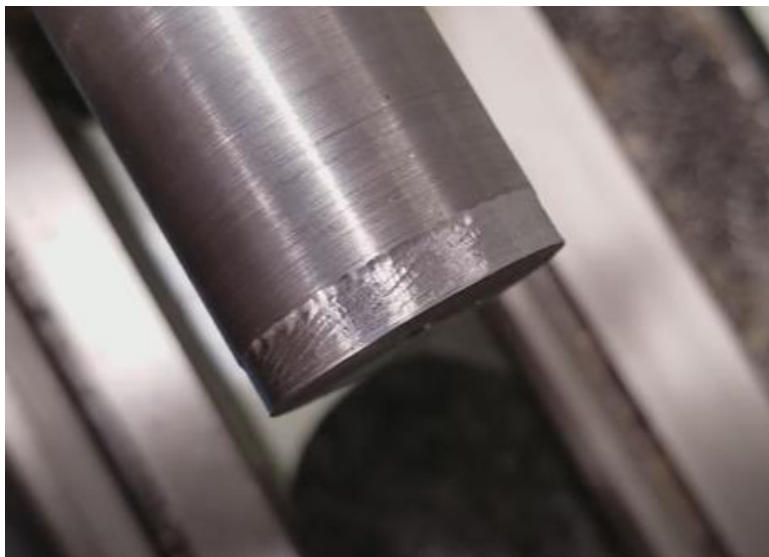
Seznam příloh

ÚVOD

V současné době je kladen velký důraz na přesnost a efektivitu výroby. Cílem firem je vyrábět kvalitní součásti za nízké náklady. Aby výrobky dosahovaly předepsaných hodnot přesnosti a kvality povrchu, je zapotřebí správná volba dokončovací metody. Nicméně při třískovém obrábění je běžné se setkat s různými druhy nežádoucích jevů, které negativně ovlivňují výrobní proces a zároveň zvyšují výrobní náklady. Za účelem zefektivnění výroby je zapotřebí nežádoucí vlivy v řezném procesu co nejvíce minimalizovat a dosáhnout tak optimálních podmínek pro výrobu kvalitních součástí.

Dokončovací operace neodmyslitelně patří k výrobě téměř každé součásti vyráběné třískovým obráběním. Výsledné vlastnosti obrobené plochy ovlivňují správnou funkci, spolehlivost, životnost i estetickou stránku dané součásti. Volba vhodné metody se odvíjí od požadovaných hodnot přesnosti a kvality povrchu, tvaru součásti a dostupnosti technologie. Nejběžnějšími a nejvíce používanými dokončovacími metodami jsou soustružení a frézování na čisto. Je-li vyžadována větší přesnost a jakost povrchu, lze použít technologie broušení, honování, lapování, superfinišování, omílání nebo leštění.

K dosažení kvalitních povrchů součástí je nutné, aby řezný proces probíhal za optimálních podmínek. V praxi je ovšem nezbytné se vypořádat s vlivy, které negativně ovlivňují kvalitu a efektivitu celého výrobního procesu. Je možné se setkat s výzvami spojenými s tepelným namáháním, vznikem vibrací, poškozením břitu, nevhodným ustavením nástroje, nevhodnou tvorbou třísky či přerušovaným řezem.



Obr. 1 Nedokonalý povrch součásti vlivem nežádoucího jevu [1].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Dokončovací metody třískového obrábění jsou navazujícími metodami po hrubovacích operacích. Při požadavku velmi přesných stupňů lícování na sebe dokončovací metody navazují, dokud není dosaženo patřičné přesnosti. Soustružení na čisto představuje jednu z klíčových metod dokončování, která je ve strojírenství běžně využívána (obr. 2). Slouží k obrábění rotačních součástí za účelem vytvořit požadovaný tvar, přesnost, jakost a vzhled povrchu. Při optimálních podmínkách a velmi přesném soustružení je možné dosáhnout přesnosti až **IT 6** a kvality povrchu **Ra 0,4 μm**. Během obrábění se ovšem vyskytují nežádoucí vlivy, které řezný proces komplikují a zabraňují tak vytvoření požadovaného stavu součásti.



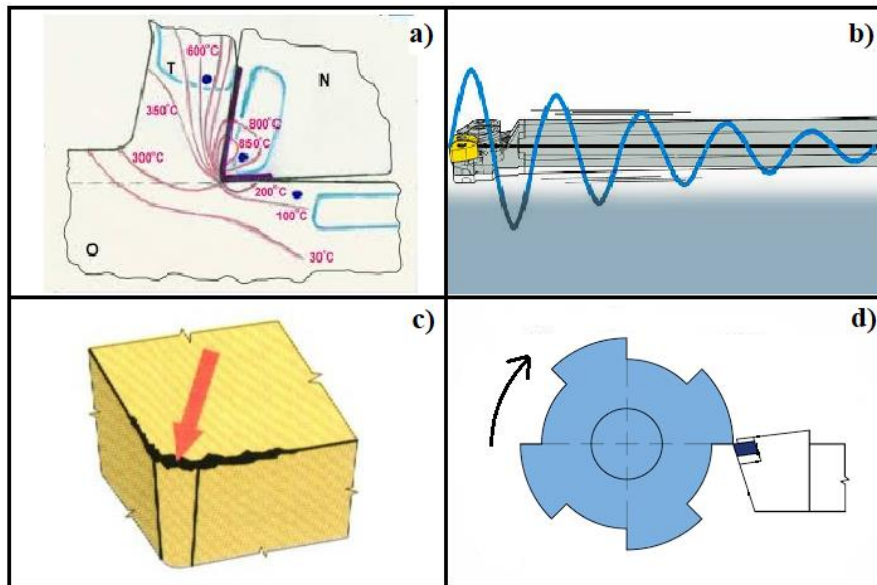
Obr. 2 Soustružení na čisto [2].

Problematikou výroby kvalitních a přesných součástí pomocí soustružení na čisto jsou vstupující negativní vlivy, které je zapotřebí ve výrobním procesu minimalizovat. Nežádoucími jevy ovlivňující řezný proces mohou být například teplota, vibrace, přerušovaný řez, špatné upnutí nástroje, opotřebení břitu, nevhodný tvar třísky nebo tvorba ořepů. Vyskytující se problémy mohou narušit kvalitu obrobenej plochy, snižovat trvanlivost nástroje i stroje. Detailní analýza metod a postupů zaměřených na efektivní omezování nežádoucích vlivů je nezbytná pro vytvoření optimálních podmínek výrobního procesu. [3]

Velmi významným faktorem v omezování nežádoucích jevů může být správné nastavení vstupních podmínek. Každý nástroj má doporučené rozmezí použitelných řezných parametrů, jako je řezná rychlost či posuv. Při volbě optimálních hodnot je zapotřebí zjistit, jakým způsobem tyto parametry ovlivňují hodnotu řezné síly, teploty a kvality povrchu. Taková analýza umožňuje optimální nastavení parametrů, které snižují nežádoucí jevy vyskytující se během procesu na minimum. Porozumění vlivu řezné rychlosti a posuvu tak umožňuje dosažení požadované kvality a efektivity soustružení.

2 OMEZOVÁNÍ NEŽÁDOUCÍCH JEVŮ PŘI SOUSTRUŽENÍ

Výroba součástí metodou jemného soustružení může být často doprovázena i mnoha nežádoucími jevy, které mohou komplikovat dosažení výsledné kvality výrobků. Mezi tyto jevy patří například tepelné ovlivňování, kmitání a vibrace, přerušovaný řez či opotřebení břitu (obr. 3). To vede ke snížení jakosti obrobku, změně mechanických vlastností nebo nižší trvanlivosti nástroje i stroje. Ve většině případů se jevy prolínají a vzájemně na sebe navazují. Ovlivňují zejména povrchovou vrstvu obrobku, a proto je nutné analyzovat podmínky procesu obrábění a snažit se v jisté míře nežádoucí jevy potlačovat a snižovat jejich negativní dopad. [3]



a) tepelné ovlivnění, b) vibrace, c) opotřebování břitu, d) přerušovaný řez

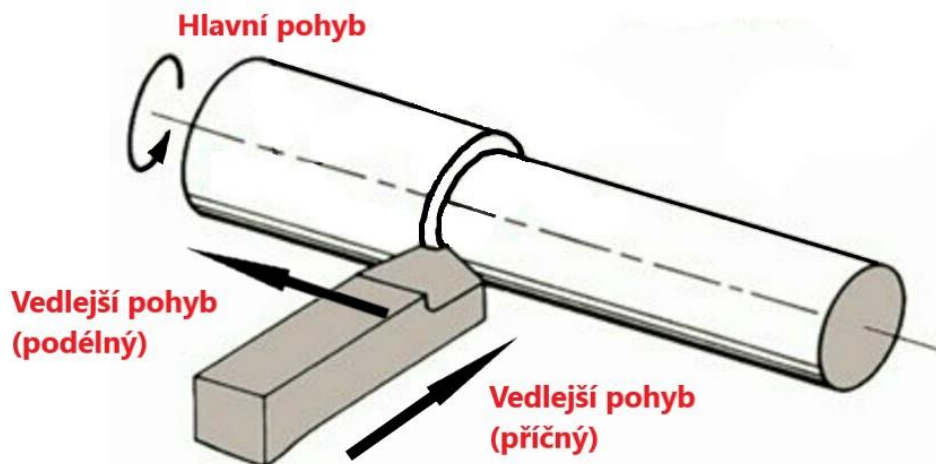
Obr. 3 nežádoucí vlivy [3; 4; 5; 6].

2.1 Soustružení

Jednou z nejvíce preferovaných metod ve všech odvětvích strojírenské výroby je soustružení. Jedná se o třískové obrábění pro výrobu vnějších a vnitřních rotačních ploch. Hlavní řezný pohyb je rotační a vykonává jej obrobek (obr. 4). Typickým polotovarem je tyčový materiál, odlitek či výkovek. Vedlejší pohyb vykonává jednobřítý řezný nástroj svým podélným a příčným posuvem k ose daného obrobku. Soustružení se rozděluje na hrubování a soustružení na čisto. Při hrubování je cílem odebrat co nejvíce materiálu za krátký čas, bez ohledu na kvalitu povrchu. Naopak soustružení na čisto je dokončovací metodou, při níž je vytvářen požadovaný tvar s důrazem na přesnost a kvalitu povrchu (tab. 1). Lze vykonávat operace, jako soustružení válcových, rovinných a kuželových ploch, řezání závitů, kopírování tvaru dle šablony, vrtání nebo vyvrtávání. [7; 8]

Tab. 1 Dosažitelné hodnoty přesnosti a drsnosti povrchu soustružením [9].

Soustružení	Přesnost IT	Drsnost Ra
Hrubování	11 – 14	12,5 – 100
Soustružení na čisto	9 – 11	1,6 – 12,5
Jemné soustružení	5 – 9	0,2 – 1,6



Obr. 4 Řezné pohyby soustružení [10].

Pro docílení co nejnižších výrobních nákladů a nejkratšího výrobního času je zapotřebí optimalizovat řezné podmínky. Mezi ty nejvíce důležité patří posuv, řezná rychlost a hloubka řezu. Při výběru parametrů je nutné brát ohled na obrobitelnost materiálu, řezivost nástroje, výkon stroje nebo tuhost soustavy. Při dokončovací operaci je hlavním kritériem požadovaná výsledná přesnost a kvalita povrchu součásti. Dopad řezných podmínek na ekonomické parametry či výskyt nežádoucích jevů se liší, a proto je nezbytné věnovat pozornost jejich výběru. [9]

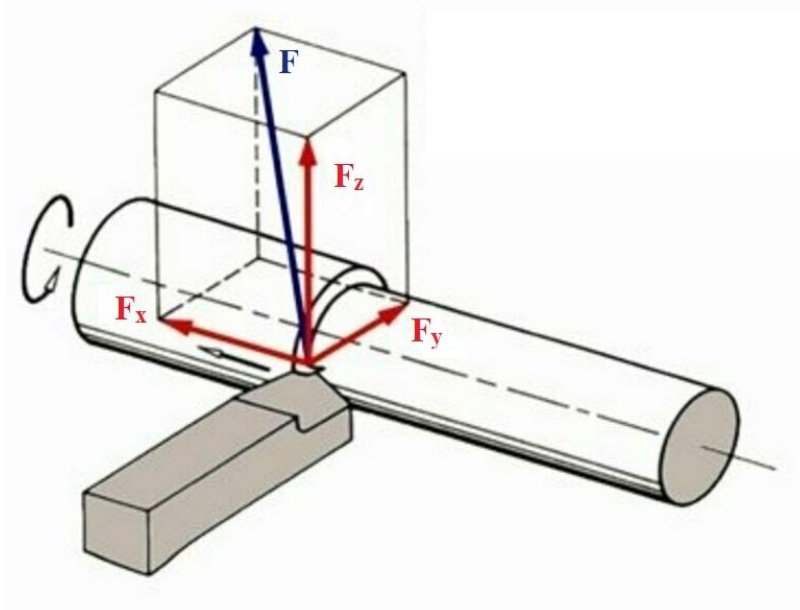
Při tvorbě třísky klade materiál řezný odpor, jenž je nutné překonat za pomoci řezné síly. Řezná síla je ovlivněna zejména obrobitelností materiálu a její hodnota se v průběhu obrábění mění. Pro určení výsledné velikosti a směru působení je vhodné při soustružení rozložení řezné síly \mathbf{F} do tří složek (obr. 5). Složka F_z se označuje jako síla tangenciální a využívá se pro volbu řezných parametrů. Síla kolmá na osu rotace se nazývá síla radiální F_y a ovlivňuje velikost průhybu obrobku. Axiální složka F_x řezné síly je vyvozená posuvovým mechanismem a orientována ve stejném směru. Výpočet jednotlivých složek řezné síly lze podle empirických vztahů [11]:

$$F_z = c_{F_z} \times a_p^{x_{F_z}} \times f^{y_{F_z}} \quad (2.1)$$

$$F_y = c_{F_y} \times a_p^{x_{F_y}} \times f^{y_{F_y}} \quad (2.2)$$

$$F_x = c_{F_x} \times a_p^{x_{F_x}} \times f^{y_{F_x}} \quad (2.3)$$

kde: F_z, F_y, F_x – složky řezné síly [N],
 $c_{F_z}, c_{F_y}, c_{F_x}$ – Materiálové konstanty [-],
 $x_{F_z}, x_{F_y}, x_{F_x}$ – exponenty vlivu šířky záběru [-],
 $y_{F_z}, y_{F_y}, y_{F_x}$ – exponenty vlivu posuvu [-],
 a_p – šířka záběru [mm],
 f – posuv [mm].

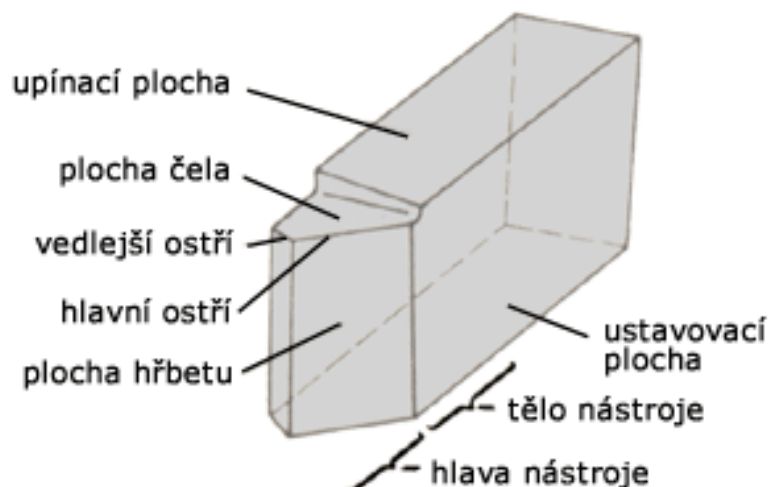


Obr. 5 Rozklad řezné síly [10].

Pracovní podmínky, které ovlivňují velikost jednotlivých složek síly, jsou posuv, hloubka řezu, řezná rychlost, geometrie břitu a řezné prostředí. Poměr rozložení do složek je dán směrem působení, který určuje velikost úhlů ω a ξ . Významný vliv na velikost odporu, a tím pádem i řezné síly má posuv a hloubka řezu. S rostoucím průřezem třísky materiál klade větší odpor a zvyšuje se potřebná řezná síla k jeho překonání. Řezná rychlost nemá vliv na rozložení síly a na složky působí stejnou měrou. Ovlivňuje intenzitu primární deformace, teplotu, velikost tření a tvorbu nárůstku. Vliv řezné rychlosti závisí na úhlu řezu δ , kdy se zmenšuje se zmenšujícím se úhlem. Při $\delta < 70^\circ$ je vliv již velmi malý. [9]

2.1.1 Nástroj

Odebírání materiálu z obrobku se provádí za pomoci jednobřitého nástroje. Je nutné, aby řezný nástroj měl správnou geometrii, byl tvrdší než materiál obrobku, dostatečně pevný i houževnatý, a také odolný proti opotřebení třením. Hlavní části soustružnického nože lze vidět na obr. 6. Rozděluje se na činnou část (hlava nástroje) a upínací část (tělo nástroje). Pomocí ostří je oddělován materiál ve formě třísky, která je po čele odvedena z místa řezu pryč. [7; 8]



Obr. 6 Popis soustružnického nože [8].

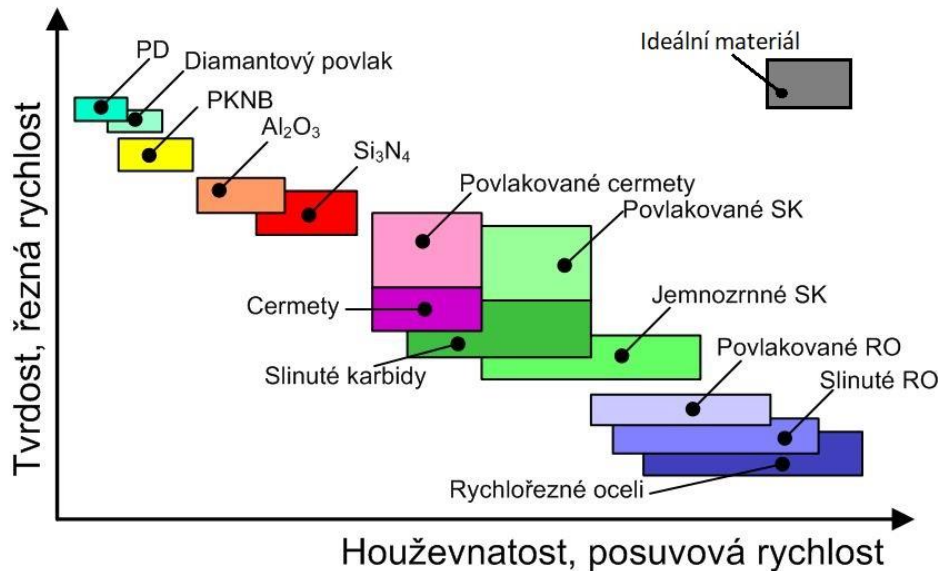
Existuje řada různých typů nástrojů pro soustružení a podle jejich odlišností se rozdělují do několika skupin. Tvarem se rozdělují na radiální, prizmatické, kotoučové a tangenciální. Dle konstrukce se nože člení na celistvé, s pájenými břitovými destičkami nebo s vyměnitelnými břitovými destičkami. Podle směru pohybu na levé či pravé a způsobem obrábění se nože rozlišují na vnější a vnitřní. Druhem materiálu, ze kterého je vyrobena řezná část se nástroje rozdělují na [9]:

- Rychlořezné oceli – jedná se o vysokolegované nástrojové oceli, kde legujícími prvky jsou **W**, **Mo**, **Cr**, **V** a **Co** s obsahem **C** < 1 %. Wolfram a molybden napomáhají ke zvýšení tvrdosti a pevnosti. Chrom vytváří velmi tvrdé karbidy a zvyšuje prokalitelnost oceli. Vanad zjemňuje zrna a vytváří nejtvrďší karbidy, zvyšuje odolnost proti otěru a přispívá ke stálosti tvrdosti i pevnosti za vyšších teplot. Kobalt zabraňuje zhrubnutí zrna při kalení. [12; 13]

Společně tyto legující prvky po tepelném zpracování vytváří nástrojový materiál s vysokou tvrdostí, řezivostí a odolností proti otěru. RO zachovávají stálost mechanických vlastností i při teplotách okolo 600 °C. Dále je možné využít speciálních povlaků za účelem zvýšení tvrdosti, odolnosti proti opotřebení, zlepšení odvodu třísky nebo snížení řezné síly. [7; 12]

- Slinuté karbidy – tento materiál vzniká práškovou metalurgií, slinováním prášků v ochranné atmosféře za vysokých teplot. Jde o směs karbidů wolframu, titanu či tantalu, které jsou ve formě velmi jemného prášku. Jako pojivo je používán kobalt nebo nikl. Vyrábějí se ve tvaru VBD a poměrem jednotlivých složek lze ovlivnit mechanické, tepelné a chemické vlastnosti. V porovnání s RO dosahují vyšší tvrdosti a odolnosti proti opotřebení, ale jsou méně houževnaté. Pro zvýšení řezné rychlosti a snížení opotřebení při zachování houževnatého jádra se SK využívá povlakování. [12; 13]
- Řezná keramika – je nekovový materiál s vysokou tvrdostí a odolností proti otěru, a to až do teplot 1200 °C. Vyrábí se práškovou metalurgií, kde hlavní surovinou je oxid hlinitý (Al_2O_3). Nevýhodou je malá houževnatost, a tím pádem též malá pevnost v ohybu. Není vhodná pro obrábění za přítomnosti vibrací nebo přerušovaného řezu. Naopak vykazují vyšší trvanlivost a možnost použití vyšších řezných rychlostí. Využívají se pro soustružení litin a ocelí. [12]
- Polykrystalický diamant – jedná se o nejtvrďší materiál využívaný pro obrábění. Používá se jak v přírodní formě, tak uměle vytvořený ve formě polykrystalů, který dosahuje lepších mechanických vlastností. Vhodný pro obrábění neželezných slitin, keramiky, tvrzených pryží i plastů. Na břit VBD ze slinutých karbidů je nanášena malá vrstva polykrystalického diamantu. Zaručuje vysokou tvrdost i oteruvzdornost, ale je nezbytné zaručit tuhost soustavy a homogenitu materiálu. [13]
- Kubický nitrid bóru – je materiál, který je velmi podobný diamantu svojí tvrdostí, odolností proti otěru a uspořádáním v krystalové mřížce. Vyrábí se při vysokých teplotách a tlacích spojením kubických krystalů bóru za pomoci keramického nebo kovového pojiva. Rovněž je tenká vrstva kubického nitridu bóru napájena na VBD ze slinutých karbidů. Lze při soustružení dosáhnout vysokých teplot (1400 – 1600 °C), aniž by došlo ke změně mechanických vlastností. Je určený k obrábění velmi tvrdých materiálů, jako je kalená ocel nebo litina, aniž by docházelo k velkému opotřebení nástroje. [8; 13]

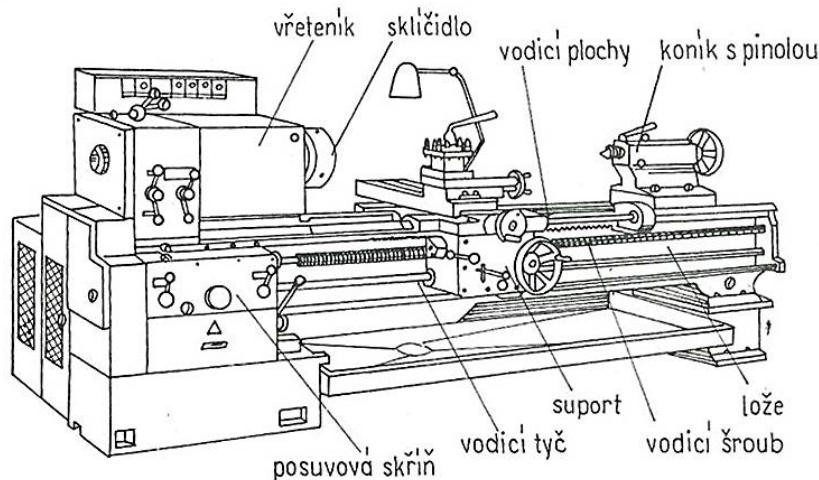
Na obr. 7 lze vidět porovnání řezných materiálů vzhledem k jejich vlastnostem a řezným podmínkám. S rostoucí tvrdostí nástroje je možné použít vyšší hodnoty řezné rychlosti, ale klesá houževnatost a posuvová rychlost. Tvrdší materiály jsou vhodné pro dokončovací operace, kde nedochází k velkému mechanickému zatížení, ale dokážou pracovat i za vysokých teplot. Ideální materiál by byla kombinace vysoké tvrdosti i houževnatosti, který by byl univerzální pro všechny druhy obráběných materiálů, řezných podmínek, a také odolný vůči nežádoucím jevům. V dnešní době ovšem takový materiál neexistuje, a je tedy nutné při výběru řezného nástroje brát ohledy na veškeré faktory obrábění. [14]



Obr. 7 Porovnání vlastností řezných materiálů [14].

2.1.2 Stroj

K výrobě rotačních součástí metodou soustružení se používá obráběcí stroj zvaný soustruh, který patří mezi nejpoužívanější ve strojírenské výrobě. Mezi hlavní části soustruhů se řadí vřeteník, elektromotor, převodovka, posuvová skříň, lože a suport (obr. 8). Hlavní rotační pohyb obrobku je vytvářen pomocí elektromotoru a převodové skříně, která slouží ke změně otáček a pohání vřeteník. Vedlejší pohyb zajišťuje suport, který se posouvá po vnějším vedení lože, a na němž je pevně uchycen nástroj. [15]



Obr. 8 Hlavní části univerzálního hrotového soustruhu [8].

Existuje mnoho typů soustruhů rozlišujících se konstrukcí či velikostí obráběcího prostoru. Lze se setkat se stolními soustružnickými stroji, ale také s několikametrovými stroji, které slouží k obrábění velmi dlouhých nebo objemných polotovarů. Velikost je dána vzdáleností hrotů, tzv. točnou délkou a maximální velikostí průměru nad ložem, tzv. točným průměrem. Soustruhy se dělí také na manuální, poloautomatické, automatické a číslicově řízené. Z pohledu konstrukce je možné soustruhy rozdělit následovně [15]:

- Hrotové soustruhy – dělí se na jednoduchý a univerzální hrotový soustruh, který je zobrazen na obr. 8. Jeho součástí je vodící šroub, pomocí kterého je možné soustružit závity. Díky většímu rozsahu otáček i posuvů je vhodný pro jemné soustružení. Lze obrábět vnější i vnitřní tvarové plochy, čelní a kuželové plochy, řezat závity, vrtat a zapichovat. Používají se hlavně pro kusovou a malosériovou výrobu. [8]
- Čelní soustruhy – využívají se pro soustružení krátkých součástí o velkém průměru. Obrobek je upnut k lícni desce, ovšem někdy je jeho ustavení a vyvážení složité. Lože se suportem jsou samostatně stojící. Používají se například pro obrábění setrvačníků nebo lanových kotoučů. Čelní soustruh lze vidět na obr. 9. [9]



Obr. 9 Čelní soustruh [8].

- Svislé soustruhy – často nazývané jako karusel, slouží pro soustružení rozměrných a těžkých součástí. Lze obrábět vnější i vnitřní plochy, kuželové plochy nebo řezat závity. Hlavní části jsou otočný stůl, sloupy a suport. Mohou být jednosloupové nebo dvousloupové se dvěma suporty (Obr. 10). [8]



Obr. 10 Dvousloupový svislý soustruh [16].

- Revolverové soustruhy – jsou vhodné pro součásti, které vyžadují opracování více nástroji na jedno upnutí. Nástroje pro obrábění povrchů a děr jsou upnuty v revolverové hlavě. Dle polohy revolveru se dělí na soustruhy s vodorovnou, šikmou nebo svislou osou revolverové hlavy (obr. 11). Výhodou je přesné a rychle ustavení nástroje pootočením revolveru a obrábění více nástroji současně za pomoci příčného suportu. Využívá se pro tyčové polotovary, výkovky, výlisky a odlitky. [9]



Obr. 11 Revolverový soustruh se svislou osou revolverové hlavy [17].

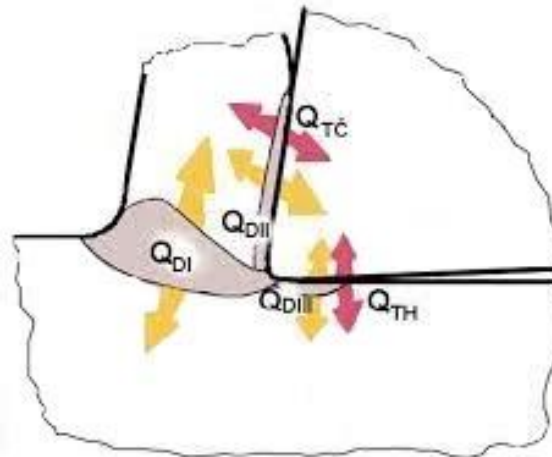
- Poloautomatické a automatické soustruhy – jedná se o zdokonalené hrotové, revolverové nebo čelní soustruhy, kde je pracovní cyklus automatizován pomocí vaček, kopírovacích nebo programovatelných řídicích systémů. Automatické soustruhy jsou na rozdíl od poloautomatických vybaveny podávacím systémem pro zpracování materiálu ve formě tyče. Uplatňují se hlavně pro střední a velkosériovou výrobu. [17]
- Číslicově řízené soustruhy – dříve označovány NC (Numeric Control) a řízené pomocí děrování na papírové pásce. Dnes jsou již nahrazeny CNC (Computer Numeric Control) stroji, který je možné vidět na obr. 12. Řídicím systémem je zde počítač, který ovládá jednotlivé prvky stroje. Jsou vybaveny zásobníkem nástrojů, které lze automaticky měnit v průběhu obrábění. Výhodami CNC soustruhů je přesnost, rychlost a možnost výroby složitých tvarů na jedno upnutí. [18]



Obr. 12 CNC soustruh [18].

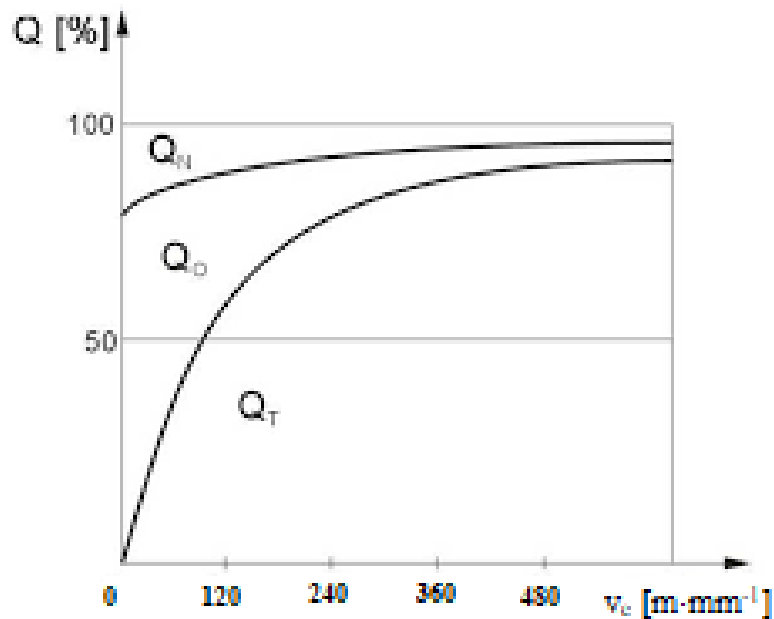
2.2 Tepelné ovlivnění

Při obrábění se až 98 % mechanické energie vynaložené na tvorbu třísky přeměňuje na teplo. Zbytek energie je pak uložen v elastické deformaci třísky a zbytkové napjatosti obrobeného povrchu. Obr. 13 zobrazuje místa vzniku tepla během řezného procesu. Hlavním zdrojem tepla je oblast Q_{DI} primární plastické deformace, tedy v rovině maximálních smykových napětích. Dalším zdrojem je oblast Q_{DII} sekundární plastické deformace, kde je teplo vytvářeno třením mezi třískou a čelem nástroje. Terciální plastická deformace Q_{DIII} je třetí oblastí zdroje tepla, která vzniká třením hřbetu nástroje a obrobené plochy součásti. [12]



Obr. 13 Vznik tepla v oblasti řezu [4].

Celkové vzniklé teplo je při suchém obrábění absorbováno do všech složek řezného procesu. Nelze však říct, že podíl odvodu tepla je konstantní, jak znázorňuje obr. 14, ale záleží na řezných podmínkách či druhu obráběcí technologie. Například pro soustružení je typický podíl odvodu tepla 10 % do obrobku, 10 % do nástroje a 80 % tepla je pak z místa řezu odváděno třískou. Naopak při broušení je největší část tepla absorbována do obrobku, a to až 80 %. [12; 19]

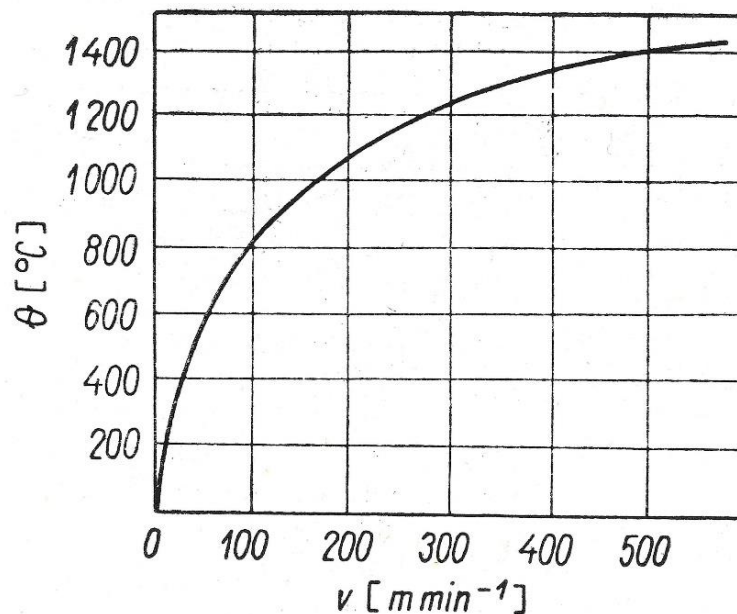


Obr. 14 Podíl odvodu tepla v závislosti na řezné rychlosti [4].

Množství tepla nahromaděného v řezu dosahuje teplot v okolí 1000 °C. Ideálním stavem je co nejvíce vzniklého tepla odvádět z místa řezu třískami. U materiálů s nízkou tepelnou vodivostí je tento způsob odvodu obtížný a více tepla zůstává v oblasti řezu, kde je více absorbováno do řezné hrany nástroje. To vede ke zhoršení vlastností a trvanlivosti nástroje. [12]

2.2.1 Vliv řezných podmínek na teplotu

Z řezných podmínek má největší vliv na výši teploty řezná rychlost. Vyšší hodnoty řezné rychlosti vedou ke zvýšení množství vzniklého tepla, snižují měrný řezný odpor a maximální teplota je tvořena na čele nástroje. Jak lze vidět na obr. 15, se zvyšováním řezné rychlosti teplota rychle roste do určitého bodu, kde se její růst zpomalí. Zároveň se zvyšuje podíl odvodu tepla třískou. Se snižováním řezné rychlosti je teplota více soustředěna v primární oblasti a nejvyšší hodnota teploty je v místě ostří řezného nástroje. [12; 20]



Obr. 15 Vliv řezné rychlosti na teplotu řezání [11].

Vyšší rychlost posuvu vede k rozšíření tepelně ovlivněné oblasti, která je vystavena vysokým teplotám. Teplota řezné hrany je ale nižší než u menších posuvových rychlostí. Při větší posuvové rychlosti a záběru ostří se zvětšuje objem třísky, což vede k většímu odvodu tepla. [12; 20]

Materiály s vysokou tepelnou vodivostí mají schopnost odvádět teplo z řezné oblasti rychleji. To umožňuje snižovat přehřívání nástroje a udržovat jeho teplotu na přijatelné úrovni. Zejména se zvětšující řeznou rychlostí a se zmenšující tloušťkou třísky roste vliv tepelné vodivosti. Jak ukázal výzkum [26], lze zvýšením tepelné vodivosti materiálu nástroje zvýšit hospodárnou rychlost o 3 až 10 %. [12; 21]

Obrobek z materiálu s vyšší tvrdostí klade větší odpor vůči řezání, což vede ke zvýšení teploty v místě řezu než u měkčích materiálů. Pro vyrovnání zvýšené teploty je zapotřebí snížit řeznou rychlost. [11]

Na redukci teploty řezání a dosažení požadovaných výsledků má také vliv řezné prostředí. Řezné prostředí zahrnuje použití chladicích a mazacích látek, které se používají za účelem ochrany nástroje, snížení tření a odvodu tepla.

2.2.2 Chlazení a mazání

Pro minimalizaci nejen teplotního vlivu během řezání je nezbytné zvolit adekvátní řezné prostředí, kterým není pouze vzduch. Fyzikální a chemické vlastnosti řezného média mají také významný vliv na trvanlivost nástroje, řezný odpor, přesnost a kvalitu obrobenej plochy. V porovnání s obráběním za sucha lze optimální volbou řezného prostředí zvýšit efektivitu procesu o 50 až 200 %. Nejčastější formou řezného média je kapalina, olejová mlha a plyn nebo procesní pasty. Používá se za účelem chladicího účinku (snížení teploty řezání), mazacího účinku (snížení tření) a nepřímo působí také jako čistící médium pro odvedení třísek z řezné oblasti. Na obr. 16 můžeme vidět náročnost obráběcích metod na chladicí a mazací účinek procesní kapaliny. [11; 12]



Obr. 16 Náročnost na chladicí a mazací účinek procesní kapaliny [22].

Při suchém obrábění je řezným a tedy chladicím médiem vzduch. Za účelem snížit teplotu řezného procesu efektivněji je během obrábění používána procesní kapalina. Jejím použitím dochází k přechodu tepla z povrchů všech členů vystupujících v oblasti řezu do řezného prostředí. Příznivým faktorem je zejména ochlazování nástroje, a tím zamezení překročení jeho limitní teploty (nástrojová ocel 250 °C, rychlořezná ocel 500 °C nebo slinutý karbid 900 °C), což vede ke zvýšení trvanlivosti. Při kontrolním měření pak lze získat přesnější hodnoty u obrobků s nižší teplotou, a tím dosáhnout požadované přesnosti. To má příznivý vliv především u dokončovacích metod. [12]

Intenzita chladicího účinku procesní kapaliny je dána několika parametry, jako jsou součinitel tepelné vodivosti, součinitel teplotní vodivosti, měrné teplo kapaliny, součinitel přestupu tepla mezi kapalinou, obrobkem a nástrojem nebo smáčivost procesní kapaliny. Nutnou podmínkou je také přivedení dostatečného množství na pokrytí celé oblasti řezu pro účinné odebrání tepla. [11; 12]

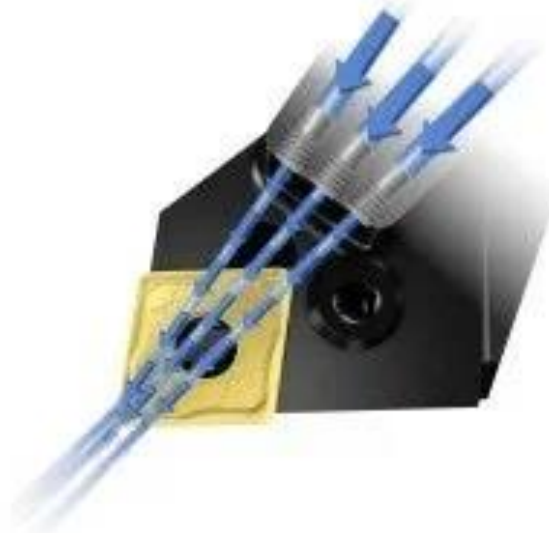
Množství tepla, které vzniká v oblasti sekundární a terciální plastické deformace, lze redukovat tím, že se minimalizuje tření na stykových plochách nástroje. Tohoto efektu je možné dosáhnout použitím procesní kapaliny s mazací schopností. Jedná se ovšem o poměrně složitý proces. Aby byl mazací účinek splněn, musí kapalina na stykových plochách vytvořit mazací film. [11]

Například použitím oleje lze vytvořit mazací film a dosáhnout tzv. polosuchého tření pouze do teplot 120 až 150 °C. Ovšem při obrábění dosahují teploty mezi styčnými plochami hodnot 300 až 1000 °C. Pro zvýšení odolnosti mazacího filmu jsou do procesních kapalin přidávány přísady, kterými mohou být některé druhy alkoholů, mastných kyselin, aldehydů, esterů,

sloučeniny fosforu, chlóru nebo alifatické uhlovodíky. Vytvořená vrstva také brání tvorbě studených svarů a adhezni přilnavosti částic kovů na nástroji. Zvyšováním řezné rychlosti, a s tím spojené zvýšení teploty řezání přesto jejich mazací účinek klesá. [11; 12]

Na parametry řezného procesu má významný vliv také způsob, jakým je procesní kapalina do oblasti řezání přiváděna. Způsoby přivedení kapaliny rozlišujeme na tyto základní typy: [12]

- Standartní chlazení – jedná se o základní způsob přívodu kapaliny. Je tvořeno nádrží, čerpadlem a přívodním potrubím bez jakýchkoliv úprav. Množství přivedeného média je dáno typem čerpadla.
- Tlakové chlazení – je to způsob chlazení, kdy je procesní kapalina přiváděna do místa řezu na spodní část břitu pod vysokým tlakem (3 – 20 MPa). Využívá se pro případy, kdy vzniklé teplo výrazně snižuje trvanlivost nástroje. Tento způsob lze využít pouze v uzavřeném pracovním prostoru, protože dochází k velkému rozstříku kapaliny.
- Vnitřní chlazení – procesní kapalina je vedena do oblasti řezu prostřednictvím vnitřních otvorů v těle nástroje (obr. 17), což je vhodné u nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami. Díky tomuto způsobu je možné při obrábění zvýšit řeznou rychlost, a to až o 25 %. Tato forma chlazení se využívá i při vrtání, kde kapalina rovněž napomáhá k lepšímu odvodu třísky.



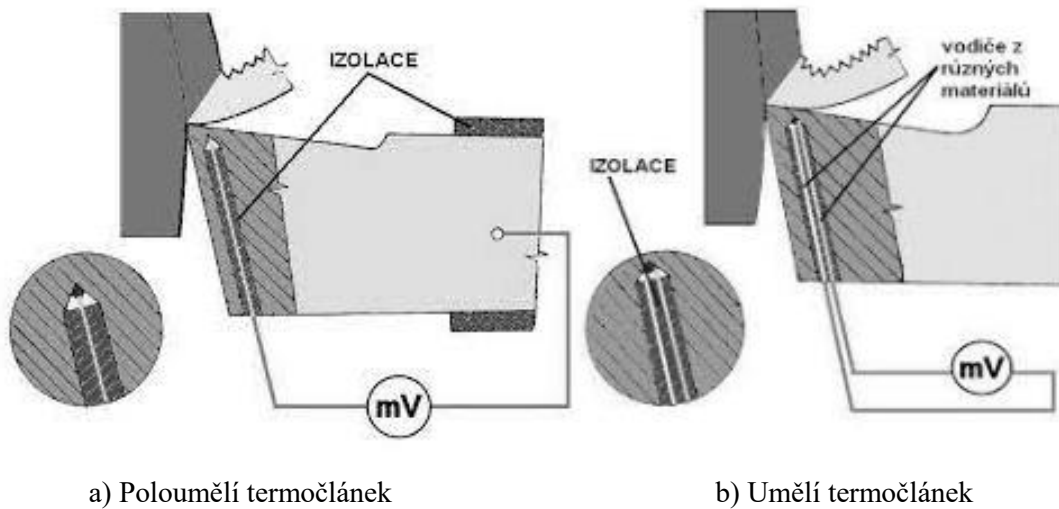
Obr. 17 Vnitřní chlazení soustružnického nože [23].

2.2.3 Metody měření teploty

Zjištění hodnoty teploty při obrábění je důležitý údaj pro získání informací o tepelných podmínkách a správnou optimalizaci procesu. Měření je ale poměrně problematické, protože tepelné pole je rozdělené do více částí, jako je tříska, obrobek či nástroj. Pro zjištění teploty se používají technologie dotykové i bezdotykové. Nevýhodou dotykového měření je nutnost přesného dotyku čidla s měřeným místem tak, aby nedocházelo k jejímu ovlivnění. Použití bezdotykové metody je operativnější a výhodou je možnost sledování změn teplot všech částí během řezu. Nevýhodou je menší přesnost měření z důvodu ovlivnění okolním prostředím. Technologie používané pro měření teploty jsou například termočlánky, termokamery, pyrometry, kalorimetrické měření nebo měření fázových přeměn vyvolaných teplotou v tříске, v nástroji. [12]

Termočlánky slouží k měření teploty řezání a teplotního pole. Je to založeno na jevu, který využívá termoelektrické napětí v obvodu tvořeného dvěma různými vodiči. Sensory se umísťují do blízkosti řezné oblasti a umožňují přesné a rychlé měření teploty. Termočlánky

jsou přírodní, poloumělé nebo umělé. Pro získání lepších výsledků je vhodnější použití posledních dvou jmenovaných, které lze vidět na obr. 18. [11; 12]



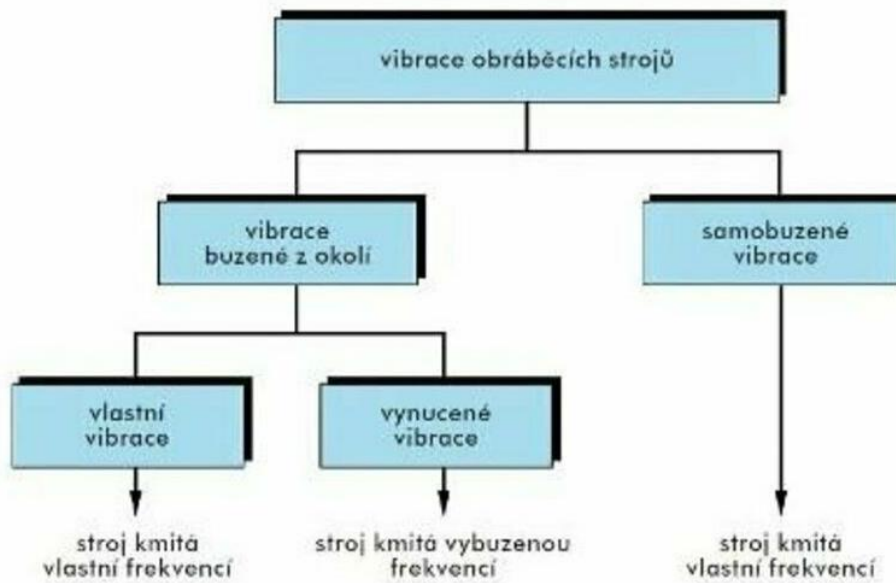
Obr. 18 Termočláanky [24].

Pyrometry jsou bezkontaktní metoda měření teploty, která je založena na detekci viditelného infračerveného záření vyzařovaného během obrábění. Slouží především k měření teploty povrchů. Podle jejich využití se rozdělují na:

- Úhrnné pyrometry jsou vybaveny optickým systémem složeným z čoček nebo zrcadel pro zaznamenání infračerveného záření z různých částí povrchů materiálu. Toto záření je pak koncentrováno na senzor termočláanky nebo odporového teploměru. Po integrování záření je proveden výpočet teploty v celé oblasti. Úhrnné pyrometry dokáží poskytovat přesné výsledky v situacích, kdy se emisivita blíží k 1. To dokáže zaručit například tmavý a matný objekt v uzavřeném prostoru. Proto je potřeba při provádění teplotního měření dbát na hodnotu emisivity. [24]
- Fotoelektrické pyrometry zachycují vyzařované světlo z povrchu měřeného tělesa a detekují toto záření fotoelektrickým čidlem. Jako čidlo se používají například fotonky, fotočláanky či fotodiody. Při měření je využíváno úzkého spektra vlnových délek, což umožňuje přizpůsobit měření specifickým případům. Toto spektrum je určováno volbou optiky, optického filtru a vhodnou spektrální citlivostí fotoelektrického čidla. Jednou z výhod této metody je rychlá reakce na změnu teploty během měření. [24]

2.3 Vibrace

Kmitání představuje opakující se pohyb tělesa kolem své rovnovážné polohy. Tento pohyb je běžným doprovodným jevem v průběhu řezného procesu, který má vliv na výslednou kvalitu a efektivitu parametrů obrábění. Dochází zejména ke zhoršení kvality obrobenej plochy, zhoršení přesnosti rozměrů, zvýšení opotřebení a nepředvídatelnosti poškození nástroje a strojních součástí a v neposlední řadě také ke zhoršení pracovního prostředí. Většinou je považováno kmitání během provozu obráběcích strojů jako nepříznivý jev a je zapotřebí jej co nejvíce omezovat. V některých případech je však kmitání naopak úmyslně buzeno se záměrem zvýšit řezivost nástroje nebo tvarovat třísku. Kmitavé pohyby mohou vznikat z různých zdrojů, kdy podle původu budících sil rozlišujeme kmitání (obr. 19). [11; 12; 24]



Obr. 19 Rozdělení kmitání [25].

2.3.1 Vlastní vibrace

Jedná se o druh kmitání, které je vyvoláno rázem některých částí soustavy stroj-nástroj-obrobek. Může vznikat například při rozběhu stroje, zapnutí spojky nebo záběru nástroje. Vlastní kmity ovšem nemají velký význam, protože vlivem odporů se sami rychle utlumí. Pro řezný proces je jejich vliv zanedbatelný a nemá cenu se vlastními kmity více zabývat. [12]

2.3.2 Vynucené vibrace

Vznik vynucených kmitů je zapříčiněn působením budících sil, které se periodicky mění v čase a nepatří do soustavy stroj-nástroj-obrobek. Jejich typickým znakem je shodující se frekvence kmitání s frekvencí budící síly. Vynucené kmitání pak podle typu budící síly dělíme do dvou skupin: [11]

- Budící síla nesouvisící s procesem řezání – v praxi se jedná o často vyskytující se druh kmitání, který vytváří vlnitost povrchu obrobku a dochází ke změnám řezných sil, což ohrožuje životnost nástroje i stroje. Patří sem kmitání, které vzniká periodickými rázy v sousedních strojích. Přenos vibrací je způsoben přes základy stroje, zejména pak u strojů, které jsou umístěny v patrech budovy. Oddělením nebo odpružením základny od plochy přenášející vibrace z okolí. Typicky se jedná o buchary, stroje s nevyváženým hnacím mechanismem nebo stroje s vratným pohybem. [11; 24]

Další příčinou kmitání jsou nevyvážené rotující části stroje, nástroje nebo obrobek. V případě stroje může jít například o špatně vyvážený rotor elektromotoru. Kmitání vzniklé nevyvážeností rotujícího nástroje je běžné u metod frézování a broušení. Vzhledem k velkým obvodovým rychlostem u nevyvážených brusných kotoučů nastává značné chvění nástroje. Dále kmitání systému vytváří obrobky, které jsou upnuté tak, že jejich těžiště není v ose otáčení. [11; 24]

Dále vibrace systému podněcují setrvačné budící síly vznikající při přímočarém nebo rotačním vratném pohybu součástí stroje. Vznik chvění také může způsobit nepřesná výroba a montáž převodového mechanismu. V neposlední řadě může být zdrojem chvění kolísavá tuhost systému stroj-nástroj způsobena rotací hřídele s drážkou nebo dírou. [11; 12]

- Budicí síla souvisící s procesem řezání – tento typ vynuceného kmitání se vyskytuje zejména při obrábění odlitků, výkovků či jiných nepravidelných polotovarů, kde osa otáčení není v místě osy obrobku. Příčinou vzniku je kolísání hloubky řezu. Při tomto kolísání, lze frekvenci budicí síly popsat vztahem [11]:

$$f_n = \frac{n}{60} \quad (2.4)$$

kde: f_n – frekvence kmitání [Hz],
 n – počet otáček obrobku [min^{-1}].

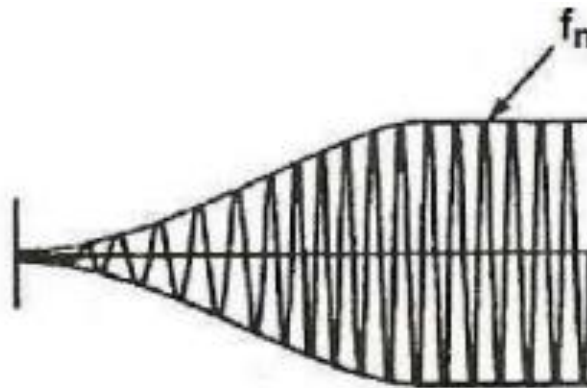
Další příklad vzniku kmitání je typické pro frézování. Při záběru zubů frézy do materiálu obrobku vzniká chvění, které je zapříčiněno periodicky se měnící řeznou silou. Frekvenci lze vyjádřit vztahem [11]:

$$f_n = \frac{n \times z}{60} \quad (2.5)$$

kde: f_n – frekvence kmitání [Hz],
 n – počet otáček obrobku [min^{-1}],
 z – počet zubů frézy.

2.3.3 Samobuzené vibrace

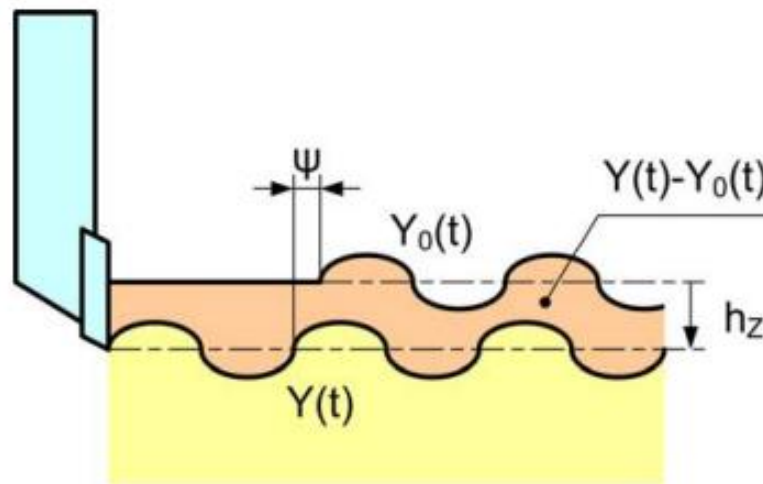
Pro vznik samobuzeného kmitání není zapotřebí jakékoliv vnější periodické síly, jako je tomu u vynuceného kmitání. Zde budicí síla vzniká počátečním impulsem, který vyvede soustavu z rovnovážné polohy bez vnější energie. Jedná se o neperiodické kmitání, jehož hodnota se zpočátku zvětšuje do bodu, na kterém se ustálí (obr. 20). Tento bod závisí na vlastnostech kmitající soustavy. Vniklá frekvence je běžně podobná vlastní frekvenci některého z členů systému. Samobuzené kmitání dělíme dle budicí síly na nesouvisející resp. související s řezným procesem: [11; 12]



Obr. 20 Samobuzené kmitání [21].

- Budicí síla nesouvisející s procesem řezání – tento druh vibrací se nazývá relaxační kmitání. Při obrábění velmi malými posuvovými rychlostmi může docházet v soustavě k vzniku chvění. Z důvodu změny okamžité hodnoty posuvu se mění hodnota součinitele tření na kluzkých plochách. To se projevuje přerušovaným pohybem stolu či suportu. Tento jev nastává například u jemného vyvrtávání nebo soustružení. Relaxačnímu kmitání při malých hodnotách posuvu lze zabránit zvýšením tuhosti posuvového mechanismu, použitím speciálního mazání pro snížení součinitele tření nebo volbou vhodné kombinace kluzkých materiálů. [11; 12]

- Budící síla souvisící s procesem řezání – jedná se nejčastěji se vyskytující druh vibrací. Je-li obráběn zvlněný povrch plochy obrobku vytvořený průjezdem nástroje z předchozího řezu, dochází ke vzniku samobuzeného kmitání, které splňuje teorii regenerativního principu. Při obrábění zvlněného povrchu kmitajícím břitem nástroje se periodicky mění průřez třísky, což zapříčiňuje také změny velikosti řezné síly, která budí kmitání v celém systému (obr. 21). Dochází k posunutí amplitudy vln dalších třísek oproti první tříске (fázový posun), který je klíčovým faktorem k tvorbě samobuzeného kmitání. V případě nulového fázového posunu by nedocházelo ke změně průřezu třísky a systém by zůstal stabilní. [11; 27]

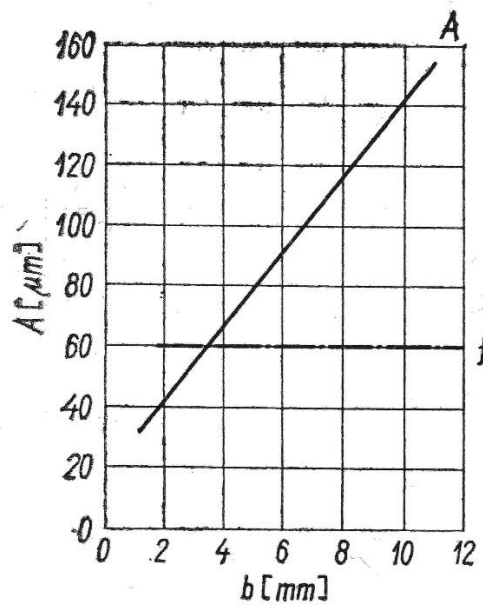


Obr. 21 Regenerativní princip [27].

2.3.4 Vliv řezných podmínek na stabilitu procesu

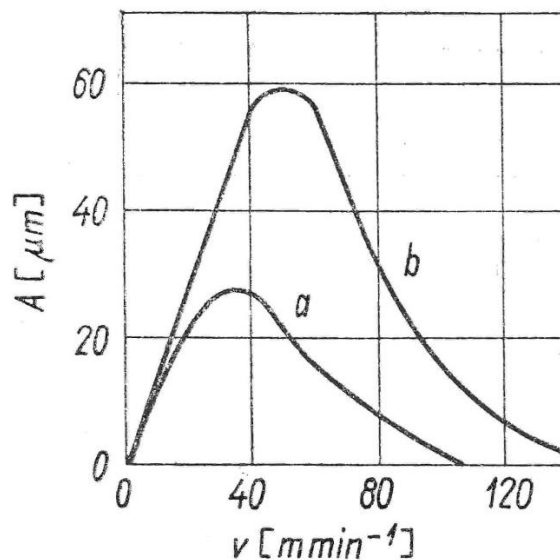
Pro samobuzené kmitání je typické, že v určitém intervalu řezných podmínek nevzniká a proces je tedy stabilní. Změna velikosti a směru řezné síly je ovlivněna řeznými podmínkami a má vliv na stabilitu procesu. Velikost vlivu vybraných podmínek je určena tuhostí, tlumící konstantou, frekvencí a směrem kmitání řídicích členů soustavy. Mezi řezné podmínky, které ovlivňují stabilitu, patří šířka třísky, posuv, řezná rychlost nebo geometrie nástroje. Jejich společný vliv nelze s přesností určit, ale lze experimentálně sledovat vliv jednotlivých členů. [9; 11]

Nejvýznamnější vliv na stabilitu řezného procesu má šířka třísky **b**. Závislost šířky třísky na amplitudě kmitů **A** při soustružení za podmínek $f = 0,2 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$, $v_c = 25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ je zobrazen na obr. 22. Lze vidět, že zvětšující šířkou třísky roste i intenzita kmitání. Naopak při nestabilním procesu řezání je možné postupným zmenšováním dosáhnout stability. [11]



Obr. 22 Vliv šířky třísky na amplitudu kmitání [9].

Posuv, popř. tloušťka třísky má na stabilitu procesu pozitivní vliv. S rostoucí hodnotou posuvu se intenzita vibrační snižuje a přispívá tak k optimálnímu průběhu řezu. Zvyšování řezné rychlosti působí destabilizujícím účinkem do určitého bodu, u kterého se průběh otočí a s rostoucí rychlostí se amplituda kmitání postupně snižuje (obr. 23). Kritický bod zlomu je závislý na ostatních řezných podmínkách, materiálu obrobku a tuhosti soustavy. Křivka **a** vyobrazuje méně tuhý obrobek naopak křivka **b** obrobek s vyšší tuhostí. [9]



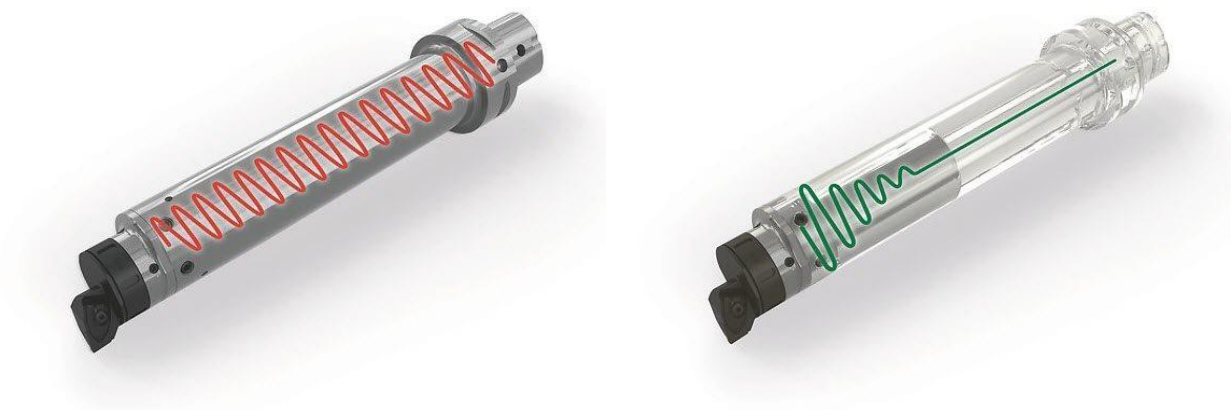
Obr. 23 Vliv řezné rychlosti na amplitudu kmitání [9].

Stejně jako vliv na velikost řezné síly má úhel řezu δ negativní vliv i na stabilitu procesu. Úhel hřbetu α při hodnotách okolo 0° přispívá k nestabilitě, ovšem při jeho zvětšování je proces stabilnější. Nemá ale takový vliv jako úhel řezu. Úhel χ zlepšuje stabilitu řezání zvyšující hodnotou. Velikost vlivu je závislá na pracovních podmínkách, jako je tuhost stroje. [9]

2.3.5 Tuhost soustavy

Při omezování vibrací během obrábění je potřeba zvážit také vliv tuhosti soustavy stroj-nástroj-obrobek. Vyšší tuhost vede ke zvýšení stability procesu a nedochází tak ke vzniku kmitání, které by vedlo k porušení povrchu součásti nebo opotřebení nástroje. Zpevněním a vyplněním konstrukce stroje materiály, které mají schopnost tlumit vibrace lze zvýšit tuhost stroje. Použitím menšího vyložení nože, většího průřezu těla nástroje nebo kratšího vysunutí koníku zvyšuje tuhost nástroje. [11]

Za účelem dosažení potřebné stability procesu se aplikují přípravky, které pomáhají zvýšit tlumicí efekt členů soustavy. Tlumiče se rozdělují na statické a dynamické, kde mezi statické patří například mechanické nebo hydraulické lunety. Dynamické tlumiče bez vlastního tlumení zabraňují kmitání za pomoci tělesa, které vytváří obdobnou frekvenci jako kmitající systém, ale s opačnou fází. V jiném případě je možné použít dynamické tlumicí systémy s vlastním tlumičem, který absorbuje vzniklé vibrace během řezu. Na obr. 24 je vidět porovnání šíření kmitů v nástroji bez tlumení a nástroji s přidaným tlumičem. [11; 28]



Obr. 24 Šíření kmitů v nástroji [28].

2.3.6 Měření vibrací

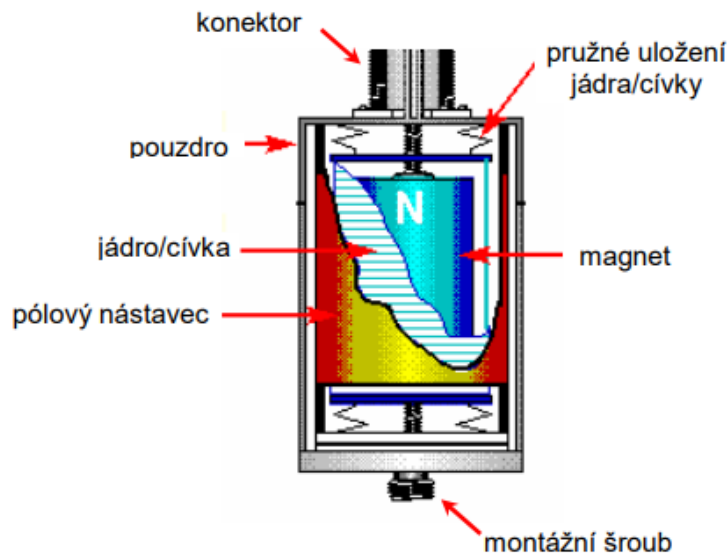
Pro posouzení stability soustavy a dosažení optimálních výrobních podmínek, které by vedly k dodržení potřebné přesnosti, kvality a efektivity výroby je hlavním krokem měření vibrací. Existuje mnoho způsobů, jak vibrace během soustružení měřit a poté analyzovat. Výsledky napomáhají k nalezení vhodného opatření a minimalizování vibrací, kterými mohou být úprava řezných podmínek, geometrie nástroje nebo zvýšení stability soustavy.

Pro zjištění kmitání se měří tři charakteristické veličiny, kterými jsou výchylka, rychlost a zrychlení. Během měření je přítomen šum, který zapříčiňuje nepřesnosti a je nutné zvolit veličinu, která je od šumu odlišná. Důležitým faktorem kvality měření je správné připevnění snímače. To je možné provést šroubem, lepidlem, magnetem nebo včelím voskem. Každý nežádoucí pohyb snímače může znehodnotit naměřená data. Snímače se rozlišují podle typu měřené veličiny na [29]:

- Snímače výchylky – jedná se o bezkontaktní snímače využívající princip změny Foucaultových proudů. Zaznamená-li snímač výchylku neboli změnu vzdálenosti mezi senzorem a měřeným vodivým materiálem, dojde ke generování vysokofrekvenčního střídavého proudu procházejícího cívkou a vytvoření elektromagnetického pole. V materiálu vzniknou vířivé proudy, které se projeví změnou impedance cívky. Tato změna je pak převedena na hodnotu okamžité

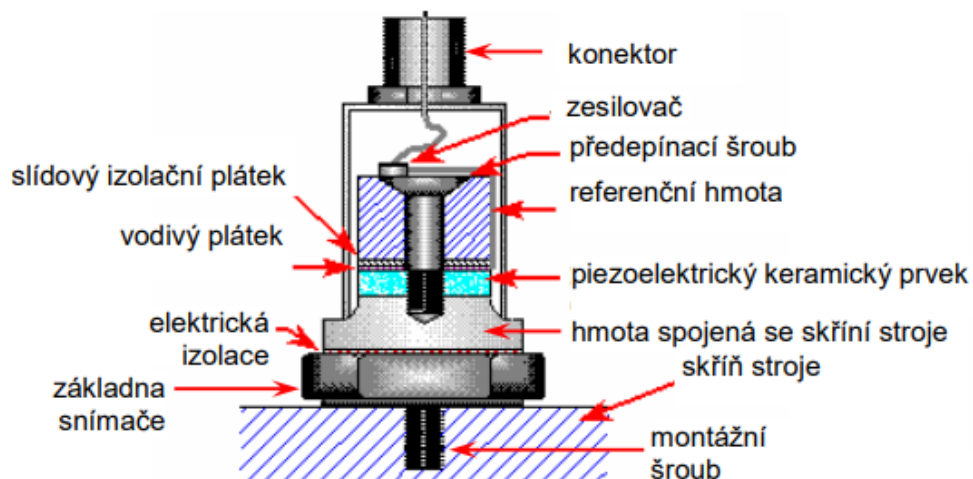
vzdálenosti. Existují také typy laserové, ultrazvukové, kapacitní nebo indukční. Používají se převážně pro měření vibrací hřídelů. [29]

- Snímače rychlosti – pracují na principu elektromagnetické indukce. Popis snímače lze vidět na obr. 25, kde hlavní části jsou permanentní magnet a cívka. Nachází-li se cívka v magnetickém poli, dojde k vytvoření napětí, jehož velikost roste úměrně s relativní rychlostí mezi magnetickým polem a cívkou. Tato relativní rychlost odpovídá rychlosti vibrací měřeného stroje. Výhodou snímačů rychlosti je cena a citlivost měření, naopak nevýhodou je křehká konstrukce náchylná na otřesy. Využívají se k měření vibrací u rotačních strojů. [29]



Obr. 25 Popis částí snímače rychlosti [29].

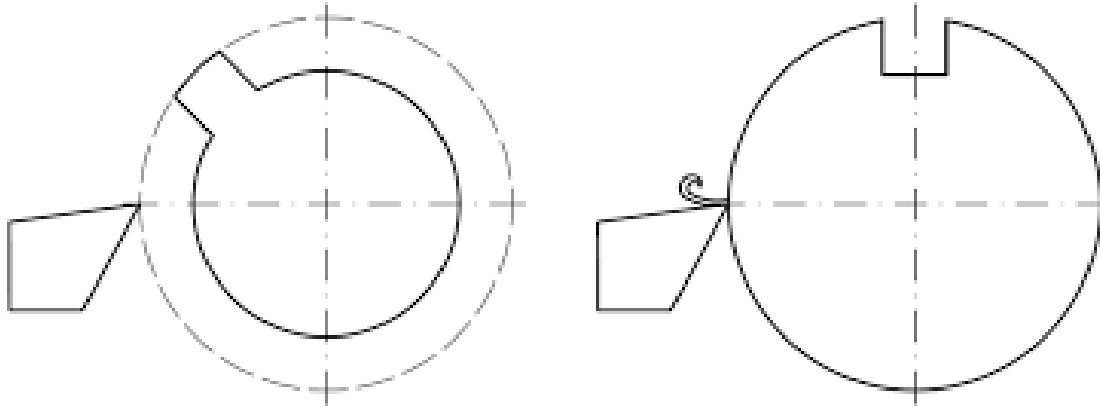
- Snímače zrychlení – nazývané také jako akcelerometr, který je popsán na obr. 26. Měřící zařízení je pevně připevněno ke skříni stroje nejčastěji šroubem. Dojde-li k rozkmitání stroje a tím i hmoty pevně spojené se skříní, vznikne působící síla na piezoelektrický keramický prvek, jelikož referenční hmota zůstává v klidu vlivem předepjatého šroubu. Síla deformuje prvek a vzniká elektrický náboj odpovídající zrychlení skříně stroje. Akcelerometry se rozdělují na tlakové, ohybové a smykové a používají se na měření vibrací nepohyblivých částí rotačních strojů. Výhodou je trvanlivost, spolehlivost a snadná instalace. [29]



Obr. 26 Popis částí snímače zrychlení [29].

2.4 Přerušovaný řez

Je-li obráběna součást, která obsahuje na svém obvodu nespojitosti (například soustružení čtyřhranu, hřídele s drážkou nebo ozubeného kola), dochází k periodickému přerušování kontaktu nástroje s obrobkem během řezného procesu (obr. 27). Tento jev má negativní důsledky na trvanlivost řezného ostří, obrobenou plochu i stroj. Hlavním důvodem je tepelné zatížení a vznikající rázy. [30]



Obr. 27 Přerušovaný řez [6].

Během průběhu řezného procesu s cyklicky se opakujícím přerušováním řezu se nástroj dostává do kontaktu s obráběným materiálem pouze v určitém časovém úseku. V čase, kdy není nástroj v záběru, dochází k jeho ochlazování díky okolnímu prostředí. Tento mechanismus přispívá k tomu, že tepelné ovlivnění břitu je menší ve srovnání s nepřerušovaným řezem. Díky této periodické pauze v řezném procesu má nástroj možnost se dočasně ochladit, což pozitivně ovlivňuje jeho životnost a celkovou výkonnost při obrábění. [30; 31]

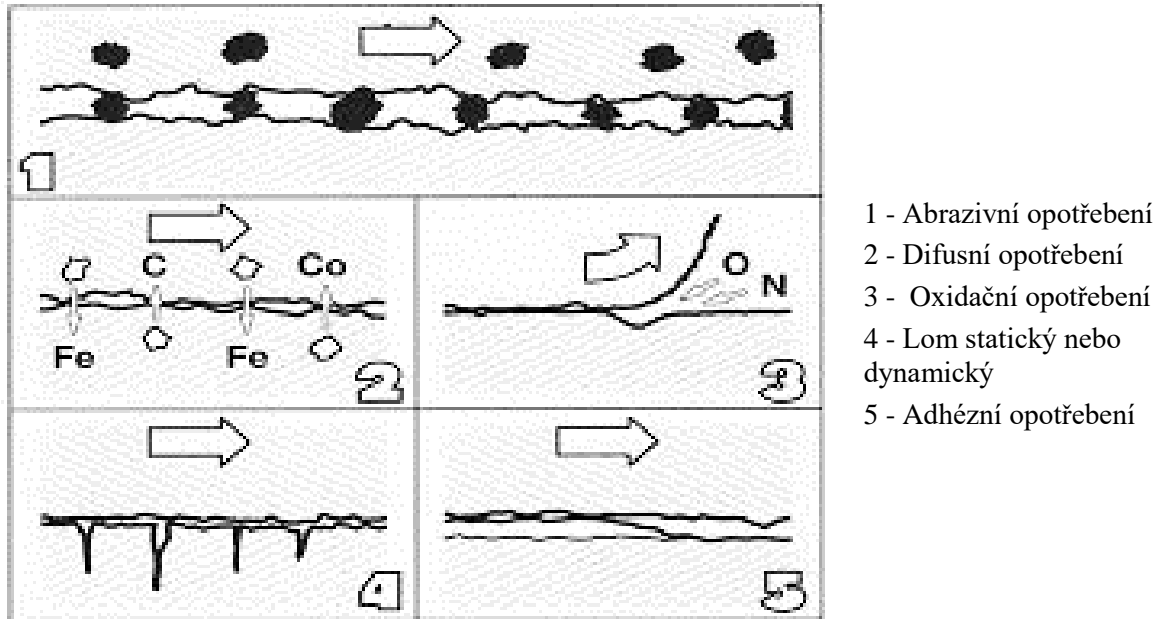
Při přerušovaném řezu jsou významným problémem mechanické rázy vznikající v důsledku opakovaného vnikání nástroje do obrobku. To vede k oslabení a narušení struktury materiálu nástroje a při překročení jeho pevnosti v ohybu, dochází ke vzniku křehkého lomu v okolí břitu. Takové poškození má za následek snížení přesnosti výroby a zkrácení životnosti řezného nástroje. [30; 31]

Vliv přerušovaného řezu je nezbytné pečlivě zvážit při výběru řezného nástroje. Optimální řezný nástroj musí disponovat dobrou houževnatostí pro lepší odolnost vůči mechanickým rázům. Materiály s vyšším obsahem kobaltu prokazují zvýšenou lomovou houževnatost, což zvyšuje jejich trvanlivost a efektivitu při přerušovaném obrábění. Další možností je využití nástrojů s vícevrstevným nanokrystalickým kompozitním povlakem PVD. [31]

2.5 Opotřebení nástroje

Běžným nežádoucím jevem pro všechny strojní součásti je opotřebení, které přispívá k nedokonalé funkci či jí zcela zabraňuje. V případě soustružení nastává v důsledku opakovaného kontaktu mezi nástrojem a obrobkem. S přibývajícím časem kontaktu dochází ke změně tvaru a zhoršení kvality pracovních ploch, což vede k otupení břitu nástroje. Tento proces může být ovlivněn řadou faktorů, jako je materiál nástroje nebo obrobku, řezné podmínky, geometrie nástroje nebo použití procesní kapaliny. [11; 12]

Během řezného procesu na nástroj působí fyzikální, mechanické a chemické faktory, které ovlivňují míru vzniku opotřebení. Vlivem vysokého tepelného zatížení a vysokého tlaku se vytváří povrch, který je náchylný k chemickým nebo difúzním procesům. Hlavní mechanismy tvorby opotřebení lze vidět na obr. 28. [32]



Obr. 28 Hlavní mechanismy opotřebení břitu nástroje [32].

Abrazivní opotřebení vzniká vlivem tvrdých částic obsažených v obráběném materiálu. Přechod atomů mezi materiály nástroje a obrobku zase vede k nežádoucím sloučeninám, a tím k difúznímu opotřebení. Mechanismus oxidace způsobuje u nástroje vznik sloučenin s kyslíkem. Při vysokém mechanickém zatížení nástroje (přerušovaný řez) dochází k tvorbě lomu. Vlivem porušování mikrosvarů vzniklých za vysoké teploty a tlaku mezi nástrojem a třískou dochází k adhezi. Opotřebení se dělí podle tvaru a místa vytvořené nedokonalosti na břitu nástroje na několik typů [32; 33]:

- Opotřebení hřbetu – je běžně vyskytujícím se typem opotřebení břitu nástroje. Hlavním mechanismem, díky kterému tento druh poškození vzniká, je abraze. Vznik je podmíněn vyšší tvrdostí některých mikročástic obsažených v obrobku či třísce než v materiálu nástroje. Při obrábění se tyto mikročástice zasekávají do nástroje a poškozují povlak i samotný materiál břitu. Dochází k vylamování krystalů karbidu (obr. 29). Zvětšuje-li se stejnoměrně, jedná se o žádoucí druh opotřebení z důvodu jeho předvídatelnosti a stability. Ovšem při rychlém rozvíjení způsobuje zhoršení kvality povrchu obrobku i nepřesnost rozměrů. [33; 34]



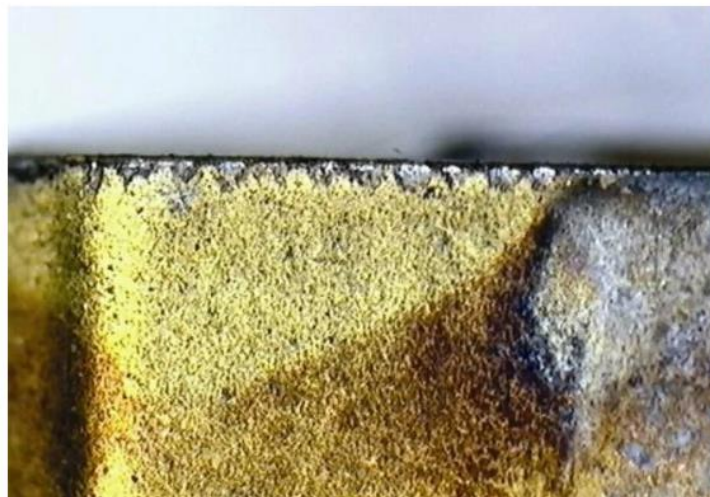
Obr. 29 Opotřebení hřbetu [35].

- Opotřebení ve tvaru žlábků na čele – je způsobeno mechanismem difuze v kombinaci s abrazí. Vlivem tepla z uvolněných třísek odcházejících po čele dochází k migraci atomů mezi materiálem třísky a nástroje a vytváří nežádoucí sloučeniny. Uvolňováním atomů z nástroje vznikají na čele břitu výmoly ve tvaru žlábků (obr. 30). Velkém opotřebení vede k oslabení břitu a změně geometrie, která určuje směr řezné síly a tvar třísky. K mechanismu difuze může docházet při teplotách 680 ° až 1200 °C. [11; 32]



Obr. 30 Opotřebení ve tvaru žlábků na čele [35].

- Vydrolení ostří – je následkem nestability soustavy stroj-nástroj-obrobek. Opotřebení nastává vylamováním malých částí materiálu nástroje v místě ostří (obr. 31). Způsobeno bývá tvrdými vměstkami na povrchu obrobku v kombinaci s vyšší koncentrací napětí. Typickými příčinami je chvění a vibrace soustavy nebo přerušovaný řez. Vydrolování ostří a trhliny velmi často vedou k tvorbě křehkého lomu břitu. Možným opatřením může být zvýšení tuhosti soustavy, zvolení houževnatější třídy rezného materiálu nebo snížení posuvu. [32; 34]



Obr. 31 Vydrolení ostří [34].

- Plastická deformace – se projevuje změnou tvaru břitu. Vysoké teplotní a mechanické zatížení přispívá k měknutí pojiva nebo ztrátě pevnosti substrátu a zvýšení plasticity materiálu nástroje. Vyšší tlak pak způsobuje na břitu plastickou deformaci v oblasti ostří, jak je zobrazeno na obr. 32. Změna geometrie nástroje má za následek nepřesnost rozměrů součástí či snížení kvality obrobeneho povrchu. Tento druh opotřebení

se vyskytuje u obrábění vysokými řeznými rychlostmi nebo posuvy, kde je nástroj vystaven vysokým teplotám. Minimalizovat riziko plastické deformace je možné použitím správné procesní kapaliny, snížení řezné rychlosti a posuvu nebo volba nástroje s větším zaoblením špičky. [12; 33]



Obr. 32 Plastická deformace břitu [35].

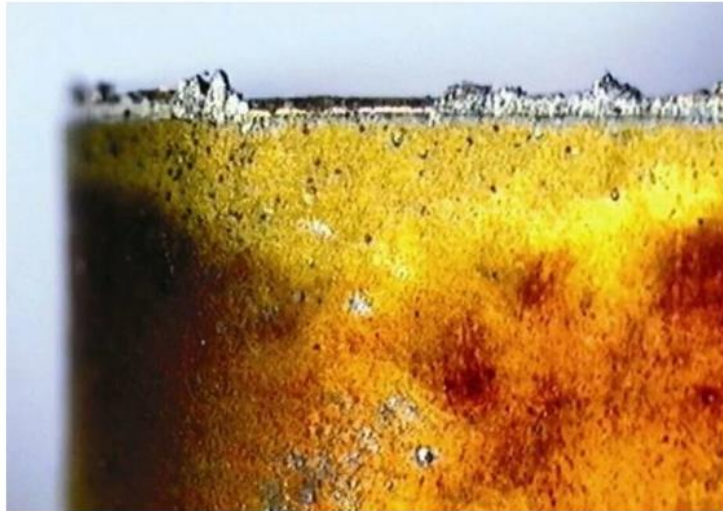
- Opotřebení ve tvaru vrubu – bývá zapříčiněno zpevněným povrchem obrobku, který je tvrdší, a tím také abrazivnější. Díky tomu se nástroj rychleji opotřebovává a v místě koncentrace zatížení dochází ke vzniku vrubu (obr. 33). Hloubka vzniklého vrubu zpravidla odpovídá hloubce záběru, kde je nástroj vystaven vysokému namáhání. Opotřebení se často vyskytuje při obrábění odlitků, výkovků, korozivzdorných a žárupevných ocelí, které disponují tvrdou povrchovou vrstvou. Zmenšením hloubky řezu, snížením posuvu a zvýšením řezné rychlosti lze snížit výskyt vrubu, a tím zabránit rychlému opotřebení nástroje. [34]



Obr. 33 Opotřebení ve tvaru vrubu [35].

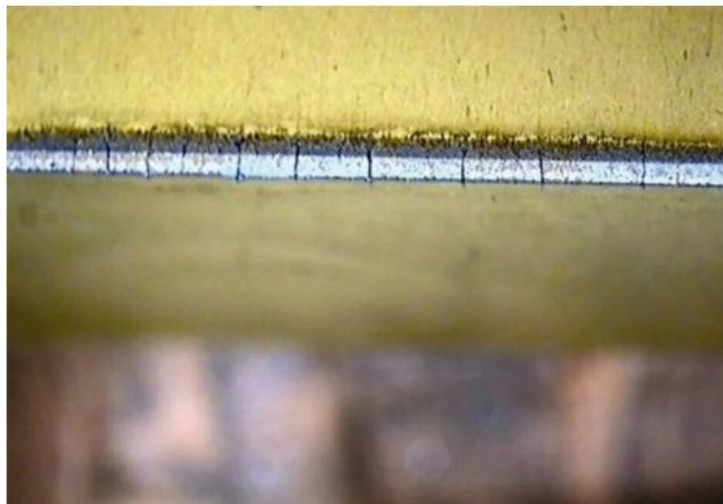
- Tvoření nárůstku – vzniká pomocí mechanismu adheze, kde za pomoci vysokého tlaku dochází k vytvoření mikrosvarů v oblasti ostří (obr. 34). Tvořbě nárůstků přispívá zejména dobrá chemická afinita. Při kontaktu nástroje s povrchem obrobku či třískou dochází k velkému tlaku i vzniku vyšší teploty, což vede k vytvoření lokálního spoje na břitu. Při odlomení nárůstku dojde k odtržení částice břitu a dojde tím k porušení

ostří a rychlejšímu opotřebení nástroje. Tento jev se projevuje zvláště při nižších řezných rychlostech a negativně ovlivňuje kvalitu a přesnost obrobeneých ploch. [32; 34]



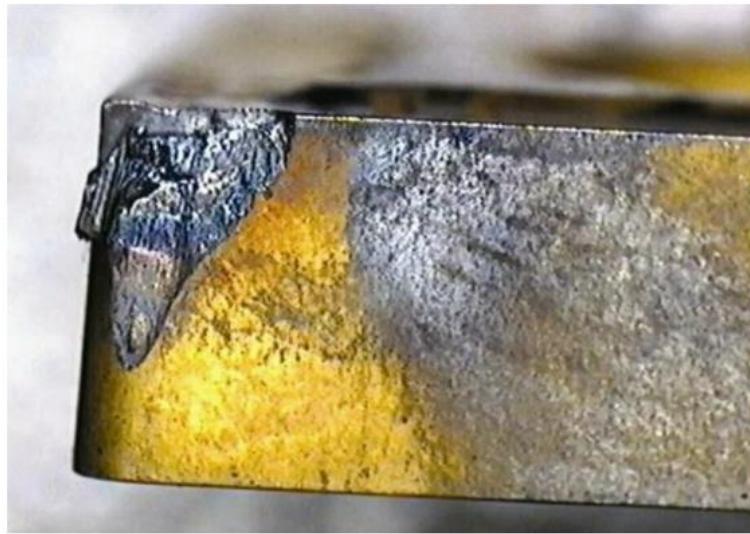
Obr. 34 Tvoření nárůstku [34].

- Vznik hřebenových trhlinek – je důsledkem tepelného namáhání nástroje. Je-li břit vystaven střídání vyšších a nižších teplot a zároveň mechanickému namáhání, tak může dojít k vzniku tepelných trhlin podél břitu (obr. 35). To může mít za následek vydrolení ostří nebo náhlí lom břitu. Typickou operací pro vznik hřebenových trhlinek je přerušovaný řez. Použití procesní kapaliny přispívá k rychlejšímu ochlazení nástroje v době, kdy není v záběru. To zvyšuje rozdíl teplot a vede k tepelným trhlinám. [32; 34]



Obr. 35 Vznik hřebenových trhlinek [34].

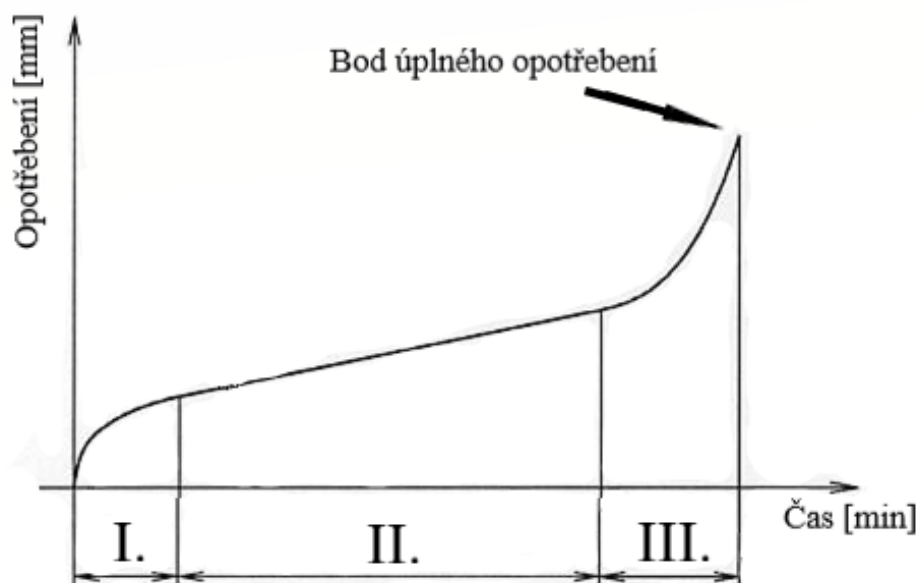
- Lom břitu – není tak úplně opotřebením, jako spíše úplným koncem trvanlivosti a použitelnosti nástroje. Vzniku lomu předchází velké zatížení, které je vyšší než pevnost materiálu břitu v ohybu. Typicky se jedná o neúměrně velkou hloubku řezu a posuv, ráz při přerušovaném řezu nebo neočekávané zvýšení řezného odporu. Lom břitu může být také důsledkem již jmenovaných typů opotřebení, které oslabují pevnost nástroje. Pro zamezení lomu je tedy nutné kontrolovat stav břitu nástroje. [11; 33]



Obr. 36 Lom břitu [34].

2.5.1 Vliv řezných podmínek na opotřebení nástroje

V případě, kdy ovlivnění řeznými podmínkami není výrazné a otupení břitu je způsobeno převážně otěrem nástroje a obrobku, je průběh opotřebení dán křivkou, kterou lze vidět na obr. 37. První část ovlivňuje záběh nástroje a zvýšený měrný tlak, což vede ke zrychlenému růstu opotřebení. V druhé části dochází ke zpomalení a nárůst opotřebení je v závislosti na čase lineární. Následkem tepelného a mechanického zatížení klesá pevnost materiálu nástroje a v momentě většího zeslabení nastává třetí fáze, kdy je intenzita opotřebení velmi rychlá až do bodu úplného otupení břitu. [11; 32]



Obr. 37 Průběh opotřebení [11].

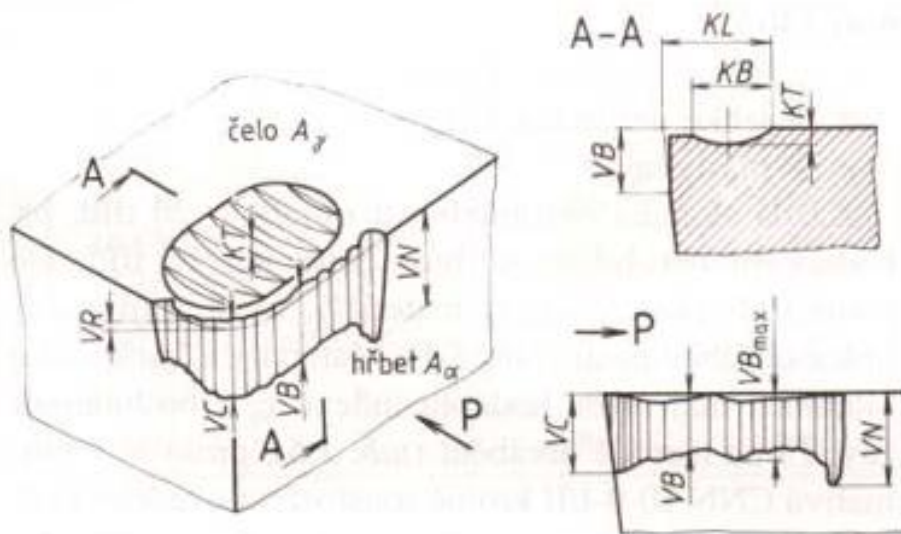
Největší vliv na intenzitu opotřebení nástroje na hřbetu i na čele má tepelné zatížení. Tudiž z řezných podmínek závisí především na hodnotě řezné rychlosti. Se zvyšující rychlostí dochází ke vzniku vyšší teploty a otupení nastává v kratším čase. Při malých rychlostech v oblasti tvorby nárůstku je vliv spíše nepravidelný. [11; 12]

Vliv posuvu je podobný vlivu hloubky řezu, kde oba parametry přispívají svým zvýšením k vyššímu opotřebení břitu. Geometrie břitu ovlivňuje mechanické a tepelné zatížení břitu, což souvisí s jejím ovlivněním otupování nástroje. Nejvíce ovlivňuje intenzitu opotřebení úhel řezu δ , kdy jeho zvětšování vede k vyššímu opotřebení otěrem. Ovšem při velmi malém úhlu je riziko vzniku křehkých lomů. [11]

Určitou mírou ovlivňují velikost a intenzitu opotřebení také materiály nástroje i obrobku. Vliv u materiálu obrobku je dán jeho obrobiteľností, tedy mechanickými a fyzikálními vlastnostmi, zejména pevností, tvrdostí, houževnatostí nebo tepelnou vodivostí. V případě materiálu nástroje je vliv dán stupněm řezivosti, který udává jeho odolnost proti tepelnému a mechanickému namáhání. Použitím správné procesní kapaliny je možné snížit teplotu nástroje, což vede ke snížení opotřebení břitu. [11]

2.5.2 Měření opotřebení nástroje

Pro správnou volbu materiálu a geometrie nástroje nebo volbu optimálních rezných podmínek je důležité analyzovat opotřebení nástroje. Pro měření míry opotřebení břitu existuje několik metod. Základní metodou je sledování a měření rozměrů vzniklého opotřebení (obr. 38). Hodnotí se zde průměrné opotřebení hřbetu **VB**, opotřebení hřbetu v oblasti špičky **VC**, vrub na hřbetu **VN**, hloubka žlábků **KT**, šířka žlábků **KB**, vzdálenost žlábků od špičky **KL** a radiální opotřebení špičky **VR**. Nejedná se ovšem o zcela objektivní metodu měření. Protože naměřená šířka či výška opotřebení může být různá u totožných hodnot objemu ztraceného materiálu. [11; 32]



Obr. 38 Měřené rozměry opotřebení nástroje [36].

Jednou ze dvou skupin měření opotřebení jsou metody přímé. Tyto metody vynikají velkou přesností, ale také složitostí. Nevýhodami je nutnost přerušení obrábění, odepnutí nástroje i omezené použití metod. Mezi přímé metody měření patří metoda optická, nanesené odporové vrstvy, pneumatická nebo také [32]:

- Váhová metoda – je založena na měření úbytku hmotnosti rezného materiálu. Řezný nástroj je zvážen před i po použití a získaný rozdíl hodnot určuje míru opotřebení. Jedná o poměrně přesnou metodu měření. Nevýhodou zůstává nutnost odepnutí nástroje a tedy menší změny ustavení při opětovném upnutí. V případě vytvoření nárůstku nelze správně změřit opotřebení břitu. [11]

- Radioizotopová metoda – je nejpřesnější a nejcitlivější metoda měření opotřebení. Je založena na zjišťování hmotnosti ztraceného materiálu břitu a dokáže určit úbytek až v řádech 10^{-3} mg. Využívá předpokladu, že největší část opotřebovaného materiálu ulpívá na třísece. Před samotným měřením je zapotřebí nejprve docílit aktivace řezného nástroje. To je možné ozářením nástroje v toku neutronů v reaktoru nebo přidáním radioizotopů již při slinování břitu. Dále aktivovaným nástrojem provedeme obrábění určitého množství třísek. Pomocí scintilačního počítače je zjišťováno počet impulsů za minutu aktivních třísek. Následně je rozpuštěna část kovu v kyselině a určena měrná aktivita dle počtu impulsů/min. Díky tomu je zjištěna hmotnost ulpěného materiálu. [11; 32]

Druhou skupinou metod pro měření opotřebení nástroje jsou metody nepřímé. Jedná se o doprovodné jevy způsobené zhoršenou kvalitou břitové destičky, a tudíž je určování míry opotřebení těmito metodami spíše nepřesné. Nelze určit ani časový průběh či zachytit vznik opotřebení, protože otupení břitu nejprve musí dosáhnout určité míry. Typickými znaky mohou být [11]:

- Optické znaky – může se jednat o výskyt lesklého proužku na povrchu obrobku nebo také změnu zbarvení třísek.
- Změna řezných sil – při vzniku určitého opotřebení může dojít ke změně geometrie břitu, čímž vzrůstá řezný odpor a to vede ke zvýšení složek řezných sil.
- Zhoršení kvality – opotřebení nástroje vede ke zvětšení průměru a zhoršení kvality povrchu obráběné součásti.
- Zvýšení teploty řezání
- Vznik chvění nástroje a obrobku

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Pro dosažení potřebné kvality povrchu součásti je nezbytné provést optimalizaci výrobního procesu. Klíčovou roli v této optimalizaci hraje správné nastavení rezných podmínek, které umožňuje eliminaci nežádoucích jevů vznikajících v průběhu obrábění. Porozumění vlivu těchto podmínek je zásadní pro dosažení efektivního výrobního procesu.

Hlavním cílem diplomové práce je provést detailní analýzu vlivu zvolených rezných podmínek na vybrané parametry procesu. Pro dosažení cíle byly během obrábění získány výsledky pomocí měření. Naměřené hodnoty byly zpracovány a porovnány s cílem dosáhnouti optimálních rezných podmínek.

Pomocí metody soustružení byl sledován vliv rezné rychlosti a následně také vliv posuvu. Pro každý z těchto parametrů byly vybrány čtyři hodnoty z doporučeného rozmezí specifikovaného pro daný rezný nástroj podle katalogu výrobce. S měnicími se hodnoty byly v průběhu obrábění měřeny dynamometrem rezné síly a pomocí termokamery bylo sledováno teplo vznikající v řezu. Po dokončení byla změřena také drsnost obrobeného povrchu.

K provedení experimentu byl použit univerzální hrotový soustruh TOS Kuřim SU 50 A, který lze vidět na obr. 30. Využívá se pro soustružení středně velkých rotačních součástí v kusové a malosériové výrobě. Na stroji je možné nastavení přesných hodnot rezných rychlostí i posuvů a zároveň zde bylo možné připevnění měřicí aparatury. Technická data stroje jsou vypsány v tab. 2.

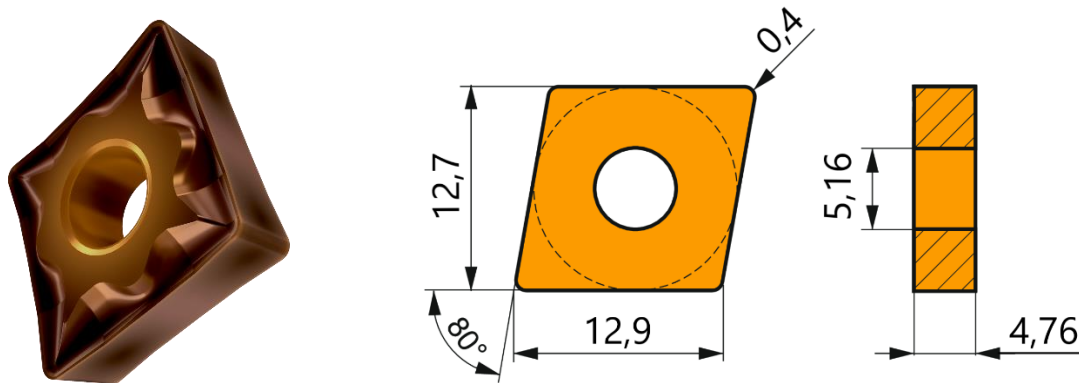


Obr. 30 Univerzální hrotový soustruh TOS Kuřim SU 50 A.

Tab. 2 Technické parametry stroje.

Oběžný průměr nad ložem	500 mm
Oběžný průměr nad suportem	250 mm
Vzdálenost mezi hroty	1500 mm
Počet stupňů posuvu	22
Maximální hmotnost obrobku	850 kg
Motor pro pohon vřeteníku	11 kW
Rozměry stroje	1180 x 3900 mm
Hmotnost stroje	2980 kg

Jako řezný nástroj byla zvolena vyměnitelná břitová destička CNMG 120404E-NF (obr. 31) připevněna v nožovém držáku PCLNR 2525 M 12 od firmy Dormer Pramet. Jedná se o VBD vyrobenou z jemnozrnného substrátu na bázi WC-CO s PVD povlakem, který je označován T8430. Tvarem je 80° kosočtverec s oboustrannou negativní geometrií a utvařečem třísky typu NF. Používá se pro jemné až střední soustružení oceli. Katalogový list nástroje lze vidět v příloze 1. [37]



Obr. 31 Vyměnitelná břitová destička CNMG 120404E-NF [37].

Pro experiment byly vybrány dva materiály a to konkrétně ocel 11 600 a ocel 14 220.3 v podobě válcové tyče. Oba materiály byly před provedením měření soustruženy na průměr 64 mm, aby byla odstraněna nekvalitní vrstva povrchu a po celé délce byl povrch stejný. Následně na přístroji ZHR 4150AK od firmy Zwick Roell (obr. 32) byla změřena tvrdost obou materiálů, která je zapsána v tabulkách mechanických vlastností (tab. 4 a tab. 6).



Obr. 32 Tvrdoměr Zwick Roell ZHR 4150AK.

Ocel 11 600 je neušlechtilou konstrukční ocelí obvyklé jakosti s vyšším obsahem uhlíku. Vhodná pro výrobu strojních součástí namáhaných staticky i dynamicky. Odolává velkému měrnému tlaku, ale není vhodná ke svařování. Používá se například pro výrobu hřídelí, ozubených kol, kladek nebo čepů. Chemické složení lze vidět v tab. 3 a mechanické vlastnosti v tab. 4. [38]

Tab. 3 Chemické složení oceli 11 600 [38].

C [%]	P [%]	S [%]	N [%]
0,5	max. 0,045	max. 0,045	max. 0,009

Tab. 4 Mechanické vlastnosti oceli 11 600 [38].

R _m [MPa]	R _e [MPa]	Tvrđost [HB]
540 - 710	255 - 355	200

Ocel 14 220.3 je ušlechtilá mangan-chromová konstrukční ocel žíhaná na měkko a určená pro cementování. Materiál má dobré vlastnosti pro snadné tváření za tepla a po provedení žíhání na měkko také pro tváření za studena. Ocel je dobře obrobitelná a svařitelná. Používá se na výrobu strojních součástí k cementování s velkou pevností v jádře. Jako například pro hřídel, ozubená kola, vačkové hřídele, pístní čepy nebo zubové spojky. Chemické složení lze vidět v tab. 5 a mechanické vlastnosti v tab. 6. [39]

Tab. 5 Chemické složení oceli 14 220.3 [39].

C [%]	Mn [%]	Cr [%]	Si [%]	P [%]	S [%]
0,14 – 0,19	1,1 – 1,4	0,8 – 1,1	0,17 – 0,37	max. 0,035	max. 0,035

Tab. 6 Mechanické vlastnosti oceli 14 220.3 [39].

R _m [MPa]	R _e [MPa]	Tvrđost [HB]
690 - 880	590	141

V první části experimentu, kdy byl sledován vliv řezné rychlosti, byly hodnoty posuvu a šířky záběru konstantní. Čtyři hodnoty řezné rychlosti, které byly zvoleny z doporučeného rozsahu řezného nástroje CNMG 120404E-NF, byly v průběhu obrábění měněny pro každé měření. V tab. 7 lze vidět doporučený rozsah řezných podmínek pro obrábění materiálů patřících do skupiny P, kterými jsou ocele s obsahem legujících prvků menších než 10 %. Vstupní podmínky pro sledování vlivu řezné rychlosti lze vidět v tab. 8. V druhé části, kdy byl sledován vliv posuvu, byly konstantními hodnoty řezná rychlost i šířka záběru. Vybrané hodnoty posuvu je možné vidět v tab. 9, kde hodnota $f = 0,27 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ je mimo rozsah z důvodu nastavitelnosti na stroji.

Ostatní podmínky, které vstupují do řezného procesu, zůstaly v celém průběhu experimentu konstantní. Jedná se například o geometrii nástroje nebo řezné prostředí. Průměr materiálu byl pro první část experimentu 64 mm a pro druhou část 62 mm. Bylo tedy nutné přepočítat otáčky stroje, aby odpovídaly řezné rychlosti a danému průměru.

Tab. 7 Doporučené rozmezí řezných podmínek [37]

v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	f [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$]	a_p [mm]
130 - 245	0,13 – 0,26	0,4 - 3

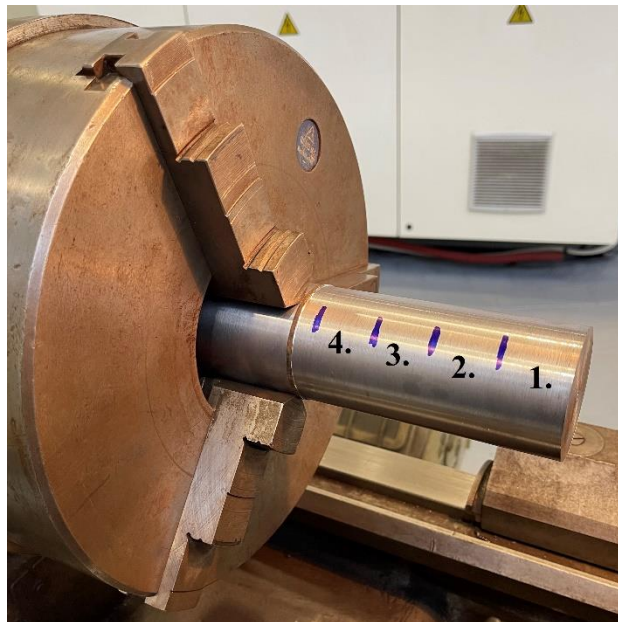
Tab. 8 Vstupní řezné podmínky ke sledování vlivu řezné rychlosti.

Měření	v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	f [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$]	a_p [mm]
1.	130	0,2	1
2.	170		
3.	205		
4.	245		

Tab. 9 Vstupní řezné podmínky ke sledování vlivu posuvu.

Měření	v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	f [$\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$]	a_p [mm]
1.	205	0,13	1
2.		0,16	
3.		0,2	
4.		0,27	

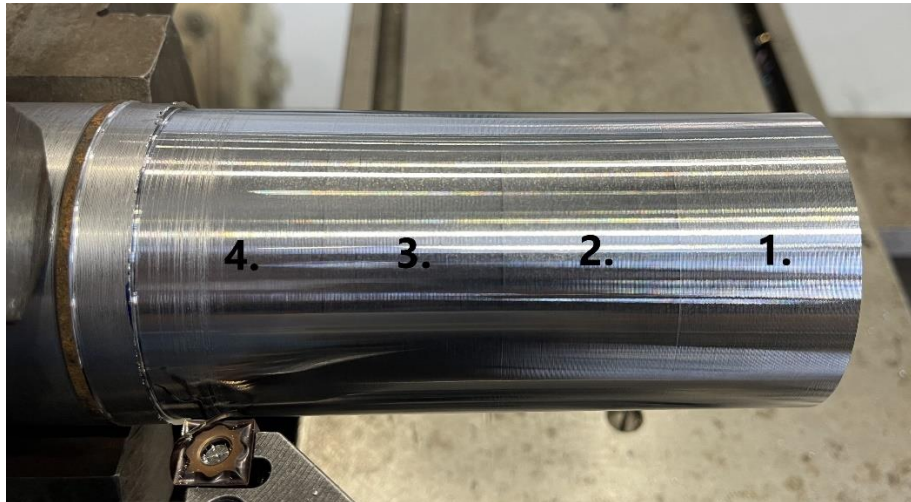
Před samotným začátkem měření bylo nutné vizuálně zkontrolovat stroj i nástroj. Následně byla provedena příprava měřícího zařízení. To zahrnovalo umístění zařízení pro měření řezných sil na místo, kde se nacházela nožová hlava. Termokamera byla postavena vedle stroje a namířena tak, aby snímala místo řezu. Obě zařízení byla propojena s počítačem, na kterém byly nainstalovány potřebné programy pro měření. Položením závaží o známé hodnotě bylo otestováno správnost měření dynamometru. Dalším krokem bylo upnutí materiálu do sklíčidla tak, aby bylo dostatečně tuhé. Obrobek byl rozdělen na čtyři části po 30 mm a každá část byla určena k obrábění jinými řeznými rychlostmi, resp. posuvy (obr. 33).



Obr. 33 Upnutý materiál 14 220.3 rozdělený na části podle počtu měření.

Po nastavení posuvu a šířky záběru na konstantní zvolené hodnoty byla nastavena také první hodnota otáček a vykonán první průjezd nástroje. Během tohoto průjezdu byly zaznamenány naměřené hodnoty řezných sil a teploty. Po dokončení všech čtyř průjezdů, byla ve všech částech obrobku změřena a zaznamenána kvalita povrchu. Poté, co došlo k výměně materiálu, byl experiment zopakován.

Za účelem sledování vlivu posuvu byla nastavena konstantní hodnota řezné rychlosti i šířky záběru. Materiál bych opět rozdělen na čtyři části a každá z těchto částí byla obráběna pomocí zvolených řezných podmínek. Během soustružení byly opět měřeny a zaznamenávány hodnoty zkoumaných parametrů u obou materiálů. Výsledný obrobený materiál je zobrazen na obr. 34, kde lze pozorovat přechody mezi jednotlivými částmi.



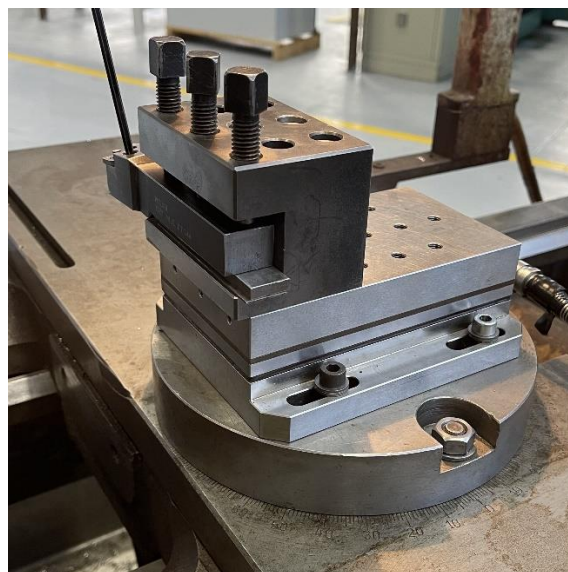
Obr. 34 Obrobený materiál 14 220.3.

3.1 Měření řezných sil

K zjištění silového působení během řezného procesu byl použit piezoelektrický třísložkový dynamometr 9257B od firmy Kistler, ke kterému byl připevněn nožový držák (obr. 36). Dále byl připojen 8 – kanálovému zesilovači 5070A a získaný signál byl přes nábojový zesilovač 5697A poslán do počítače, kde byl zpracován pomocí programu DynoWare. Schéma zapojení lze vidět na obr. 35.



Obr. 35 Schéma zapojení dynamometru [40; 41].



Obr. 36 Upevnění nástroje k dynamometru.

Výstupem z programu DynoWare je graf, který zobrazuje průběh řezné síly v čase měření. Řezná síla je rozložena do složek F_x , F_y a F_z a pomocí patričné funkce jsou zjišťovány jejich nejvyšší, nejnižší a průměrné hodnoty v době, kdy je nástroj v záběru. Ze získaných hodnot je následně dopočítána výsledná řezná síla F dle vzorce [9]:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3.1)$$

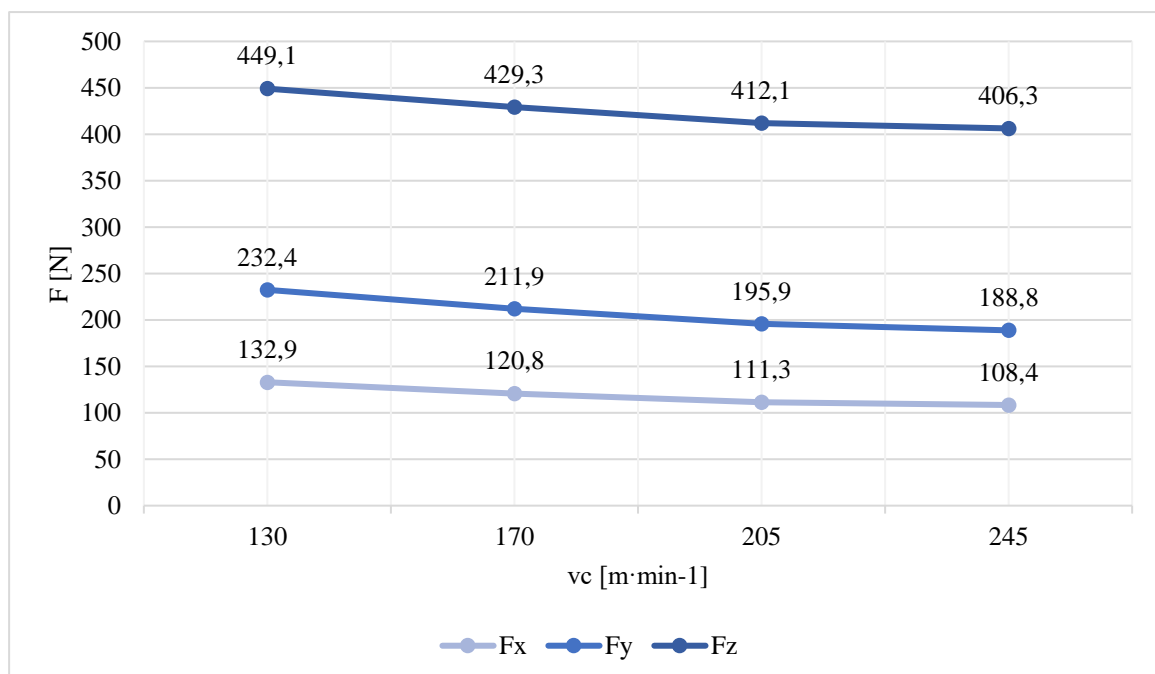
kde: F – výsledná řezná síla [N],
 F_x, F_y, F_z – složky řezné síly [N].

3.1.1 Výsledky měření řezných sil

Jako první bylo provedeno měření vlivu měnících se řezných sil během obrábění materiálu 11 600. Získané výsledky jsou zapsány v tab. 10 a následně byly hodnoty složek sil vyneseny do grafu na obr. 36. Nejvyšší hodnoty byly dosahovány u tangenciální složky F_z , a naopak nejnižší hodnoty nabývaly axiální složky F_x . Po dopočítání výsledné síly lze vidět, že se zvyšující rychlostí, dochází k poklesu řezné síly. Tento pokles není moc výrazný a rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší měřenou hodnotou je 61,9 N. Mezi třetím a čtvrtým měřením je rozdíl hodnot téměř zanedbatelný.

Tab. 10 Měření vlivu řezných rychlostí u materiálu 11 600.

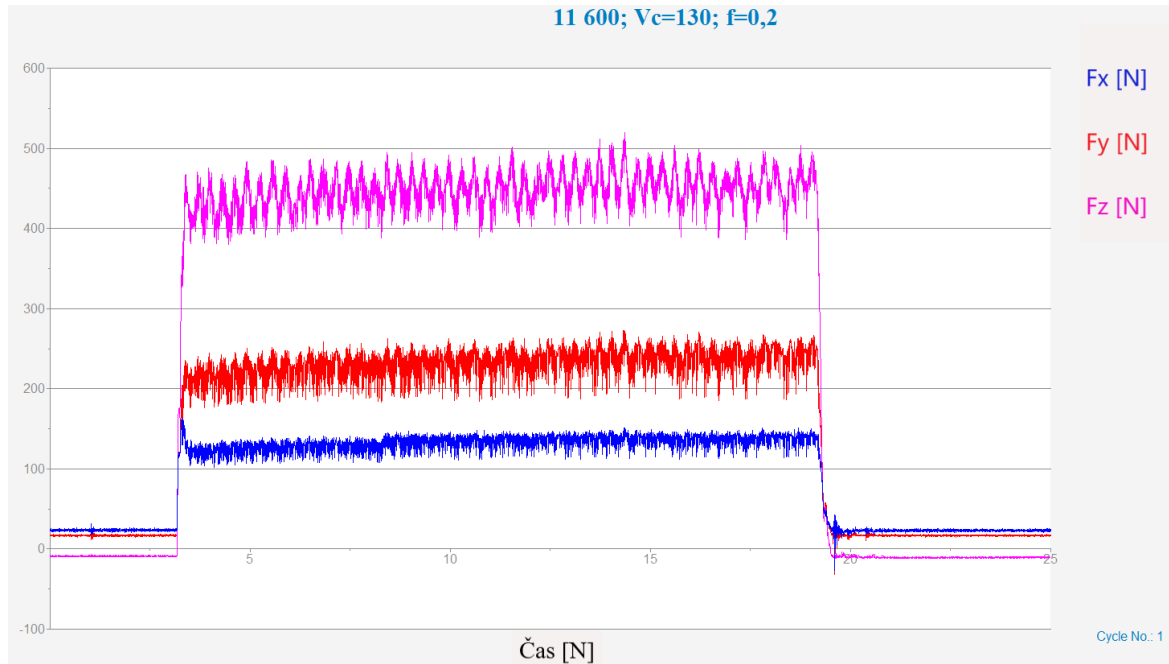
Měření	v_c [$m \cdot min^{-1}$]	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	F [N]
1.	130	132,9	232,4	449,1	522,8
2.	170	120,8	211,9	429,3	493,7
3.	205	111,3	195,9	412,1	469,7
4.	245	108,4	188,8	406,3	460,9



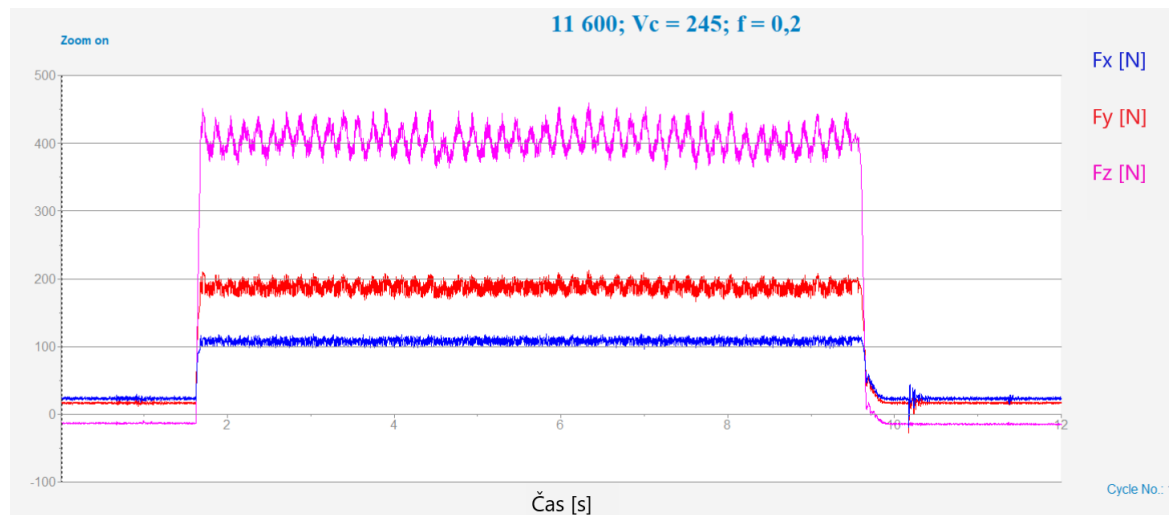
Obr. 36 Závislost řezné rychlosti na složky řezné síly u materiálu 11 600.

Na obr. 37 je zobrazen graf z prvního měření soustružení materiálu 11 600, kde byla použita řezná rychlost $v_c = 130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuv $f = 0,2 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ a hloubka záběru $a_p = 1 \text{ mm}$. Během měření byla pozorována pulzující řezná síla, kde největší rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou byl zaznamenán u složky F_z , dosahující hodnoty 141,2 N. Složka v ose y vykazovala rozdíl 102,5 N a nejméně pulzuje složka síly ve směru osy x s hodnotou rozdílu 51 N.

Při měření za užití nejvyšší řezné rychlosti $v_c = 245 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, lze na obr. 38 vidět menší rozsah pulzujících složek řezné síly. Složka F_z zde vykazovala rozdíl maxima a minima 100 N. Složka F_y dosahovala rozdílu 47,6 N a opět nejmenší rozdíl byl u složky F_x o hodnotě 22,4 N.



Obr. 37 Průběh složek řezné síly při prvním měření.

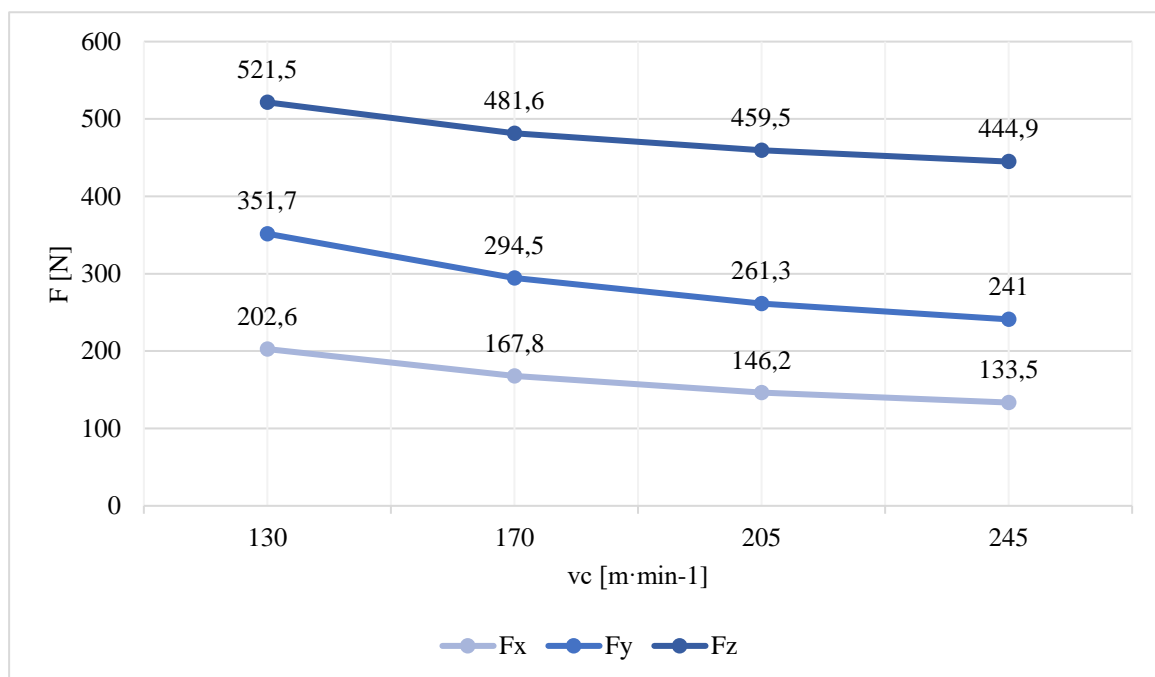


Obr. 38 Průběh složek řezné síly při zvýšení řezné rychlosti.

Druhá část měření vlivu řezné rychlosti na řezné síly byla provedena za stejných vstupních podmínek, avšak tentokrát při soustružení materiálu 14 220.3. Získané hodnoty jsou prezentovány v tab. 11 a grafické znázornění zkoumaného vlivu je zobrazeno na obr. 39. I zde je možné pozorovat snižování silového zatížení s rostoucí řeznou rychlostí, kde rozdíl výsledných sil mezi prvním a posledním měřením je 137 N.

Tab. 11 Měření vlivu řezných rychlostí u materiálu 14 220.3.

Měření	v_c [$m \cdot min^{-1}$]	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	F [N]
1.	130	202,6	351,7	521,5	660,3
2.	170	167,8	294,5	481,6	588,9
3.	205	146,2	261,3	459,5	547,9
4.	245	133,5	241	444,9	523,3

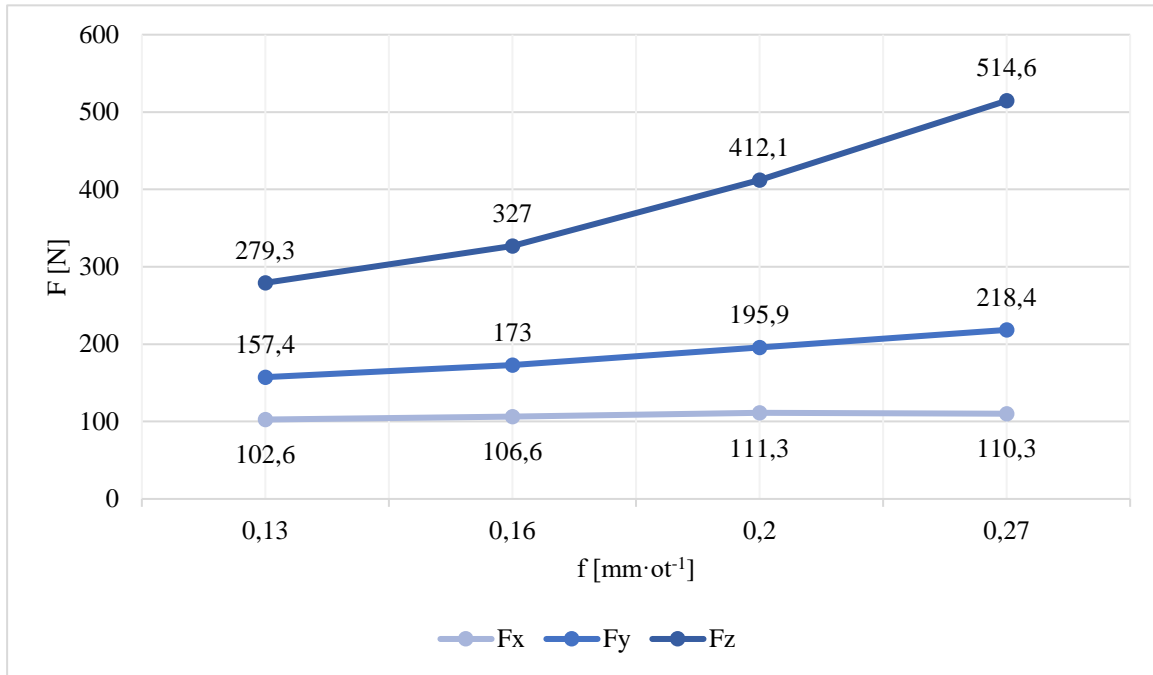


Obr. 39 Závislost řezné rychlosti na složky řezné síly u materiálu 14 220.3.

Po nastavení zvolených vstupních podmínek, které sloužily ke sledování vlivu posuvu na řezné síly, bylo provedeno měření při soustružení materiálu 11 600. Získané hodnoty tří složek silového zatížení byly následně zaznamenány a použity k dopočítání jejich výslednice, jak je uvedeno v tab. 12. Z naměřených údajů je patrné, že při zvyšování posuvu došlo k postupnému zvýšení řezných sil. Tento nárůst je patrný zejména u složky F_z , která vykazovala největší změny hodnot. Naopak hodnoty složky F_x zůstaly téměř neměnné během celého měření, jak znázorňuje graf na obr. 40.

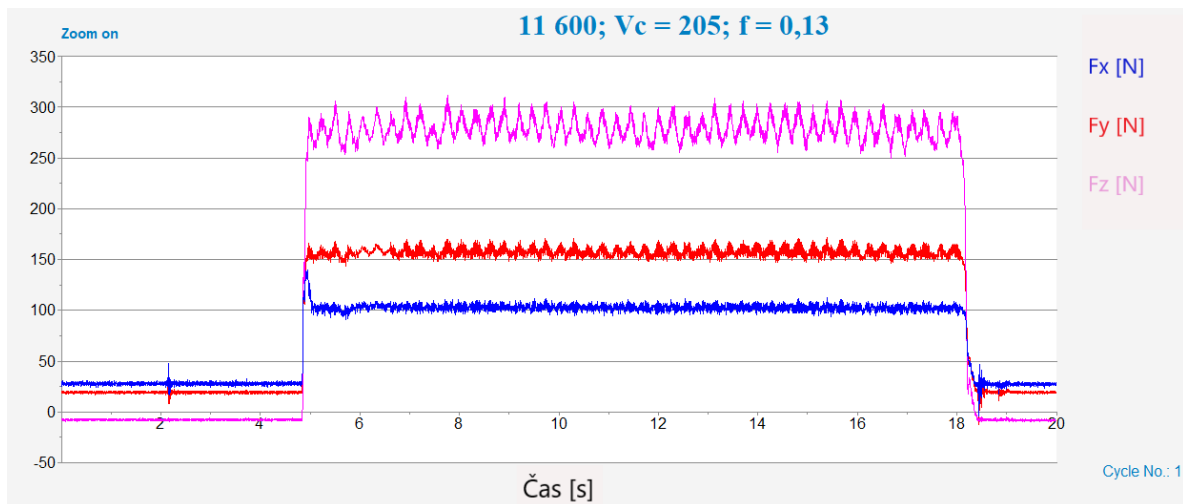
Tab. 12 Měření vlivu posuvu u materiálu 11 600.

Měření	f [$mm \cdot ot^{-1}$]	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	F [N]
1.	0,13	102,6	157,4	279,3	336,6
2.	0,16	106,6	173	327	385
3.	0,2	111,3	195,9	412,1	469,7
4.	0,27	110,3	218,4	514,6	569,7



Obr. 40 Závislost posuvu na složky řezné síly u materiálu 11 600.

Během obrábění řeznými podmínkami, které byly nastaveny pro první měření vlivu posuvu, byl zaznamenán průběh složek řezné síly, který je zobrazen na obr. 41. Z analýzy grafu je patrné, že nebylo pozorováno výrazné kmitání a rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou byl zvýšený pouze u složky v ose **z**, kde dosahoval hodnoty 61,9 N. Při dalších měřeních s vyššími posuvy se tento rozdíl postupně zvětšoval, přičemž u čtvrtého měření již dosahoval hodnoty 114,2 N.

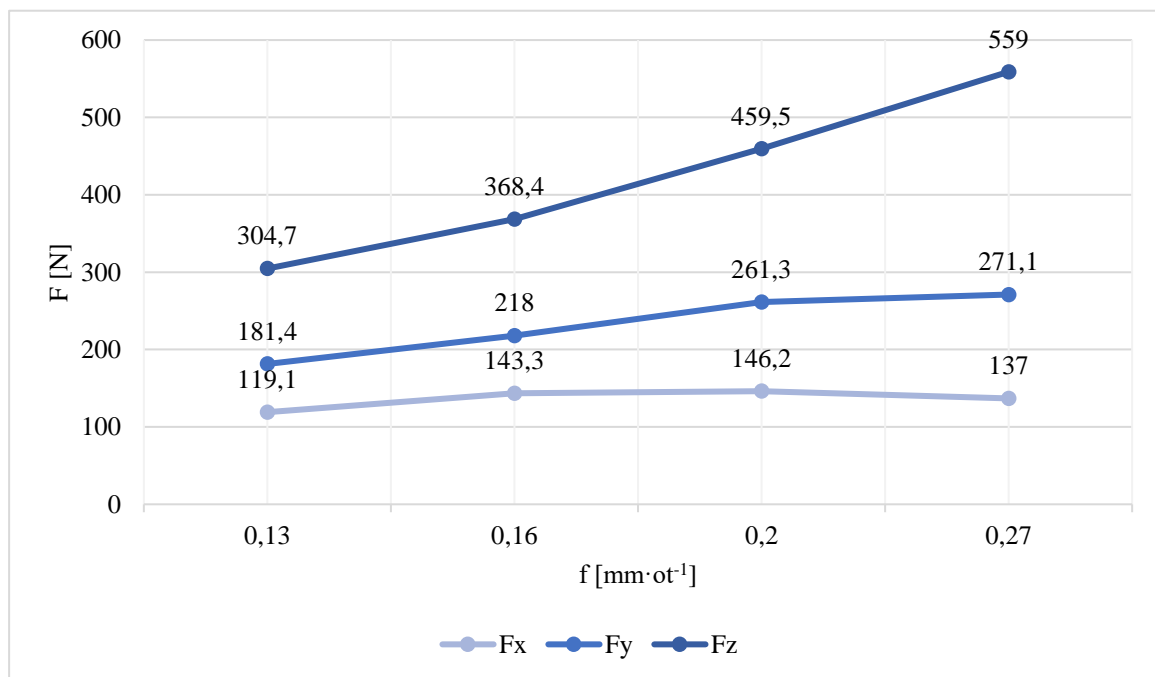


Obr. 41 Průběh složek řezné síly při prvním měření.

Hodnoty řezných sil naměřené během obrábění materiálu 14 220.3 čtyřmi zvolenými posuvy jsou zapsány v tabulce 13. Z grafického znázornění na obr. 41 lze vidět trend růstu řezných sil při zvyšování hodnoty posuvu. Nárůst výsledného silového zatížení mezi prvním a čtvrtým měřením je roven 262,1 N. Jednalo se tedy o poměrně výrazné zvýšení, kde nejvyšší podíl růstu byl pozorován u složky F_z .

Tab. 13 Měření vlivu posuvu u materiálu 14 220.3.

Měření	f [mm·ot ⁻¹]	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	F [N]
1.	0,13	119,1	181,4	304,7	374,1
2.	0,16	143,3	218	368,4	451,4
3.	0,2	146,2	261,3	459,5	547,9
4.	0,27	137	271,1	559	636,2



Obr. 41 Závislost posuvu na složky řezné síly u materiálu 14 220.3.

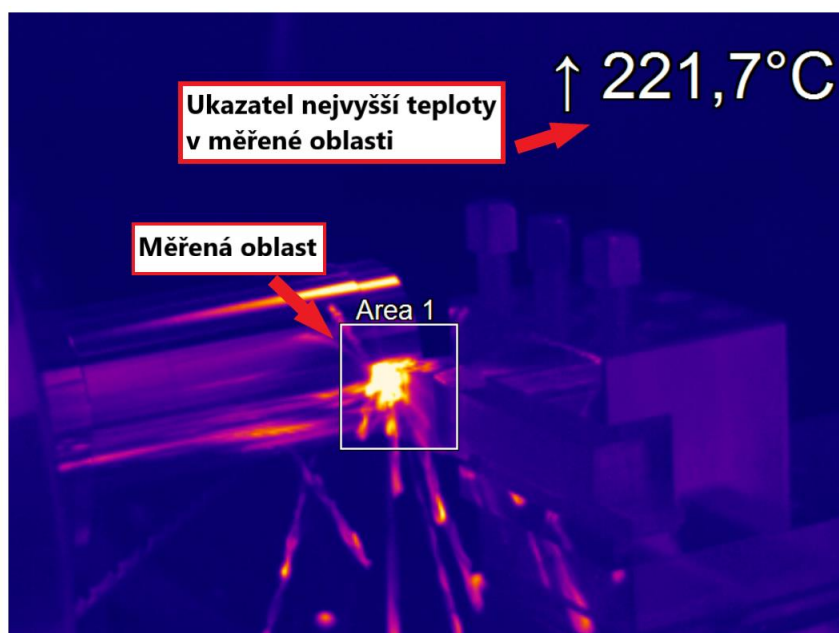
3.2 Měření teploty

Za účelem zjištění vzniklého tepla v místě řezu v čase soustružení byla použita termokamera od firmy Micro-epsilon, konkrétně model thermoIMAGER TIM QVGA, které lze vidět na obr. 42. Jedná se o zařízení pro bezkontaktní měření povrchového tepla v rozmezí -20° až 1900° C. Kamera byla umístěna vedle stroje do vzdálenosti přibližně jeden metr a nastavena tak, aby snímala místo řezu. Propojení s počítačem bylo zajištěno pomocí USB kabelu a kamera byla ovládána prostřednictvím softwaru TIM connect.



Obr. 42 Termokamera thermoIMAGER TIM QVGA.

Záznam získaný z měření během soustružení byl následně v programu TIM connect vyhodnocován. Zjišťována byla nejvyšší naměřená teplota T_n a střední teplota T_s v době, kdy byl nástroj v záběru. Získané výsledky byly sepsány do tabulek. Ukázkou záznamu během měření lze vidět na obr. 43.



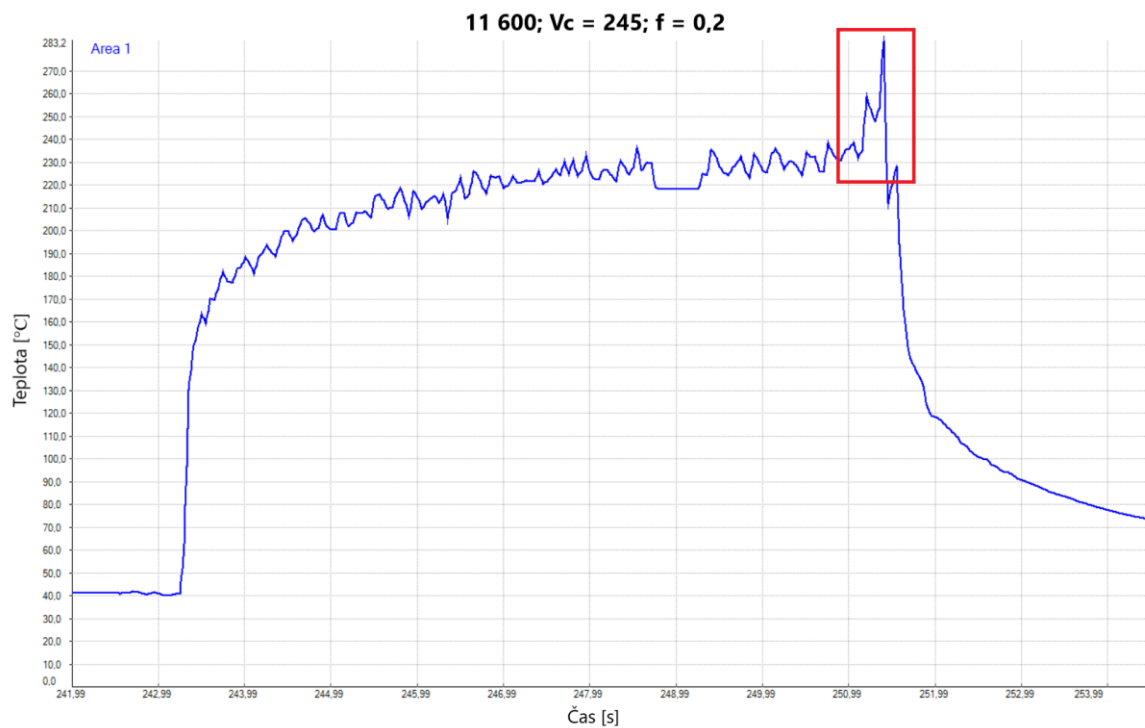
Obr. 43 Snímek pořízený z měření teploty.

3.2.1 Výsledky měření teploty

Při první skupině měření byl sledován vliv rostoucí hodnoty řezné rychlosti na teplotu v místě řezu během soustružení materiálu 11 600. Jak je možné vidět v tab. 14, při obrábění vyšší rychlostí docházelo k mírnému poklesu tepla. Při čtvrtém měření bylo vyzorováno výrazné zvýšení teploty na konci, jak je znázorněno na obr. 44. Tento nárůst byl způsoben zachycením odlomené třísky na nástroji.

Tab. 14 Měření vlivu řezných rychlostí u materiálu 11 600.

Měření	v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	Nejvyšší T [$^{\circ}\text{C}$]	Střední T [$^{\circ}\text{C}$]
1.	130	282	240
2.	170	270	230
3.	205	255	225
4.	245	240 (283)	215



Obr. 44 Průběh teplot čtvrtého měření.

Po výměně materiálu za ocel 14 220.3 proběhla druhá skupina sledování vlivu řezné rychlosti na teplotu. Střední i nejvyšší naměřené hodnoty teplot byly zaznamenány do tab. 15. V tomto případě byly vyzorovány jen nepatrné změny teplot. Pouze mezi druhým a třetím měřením došlo u střední hodnoty k rozdílnému poklesu.

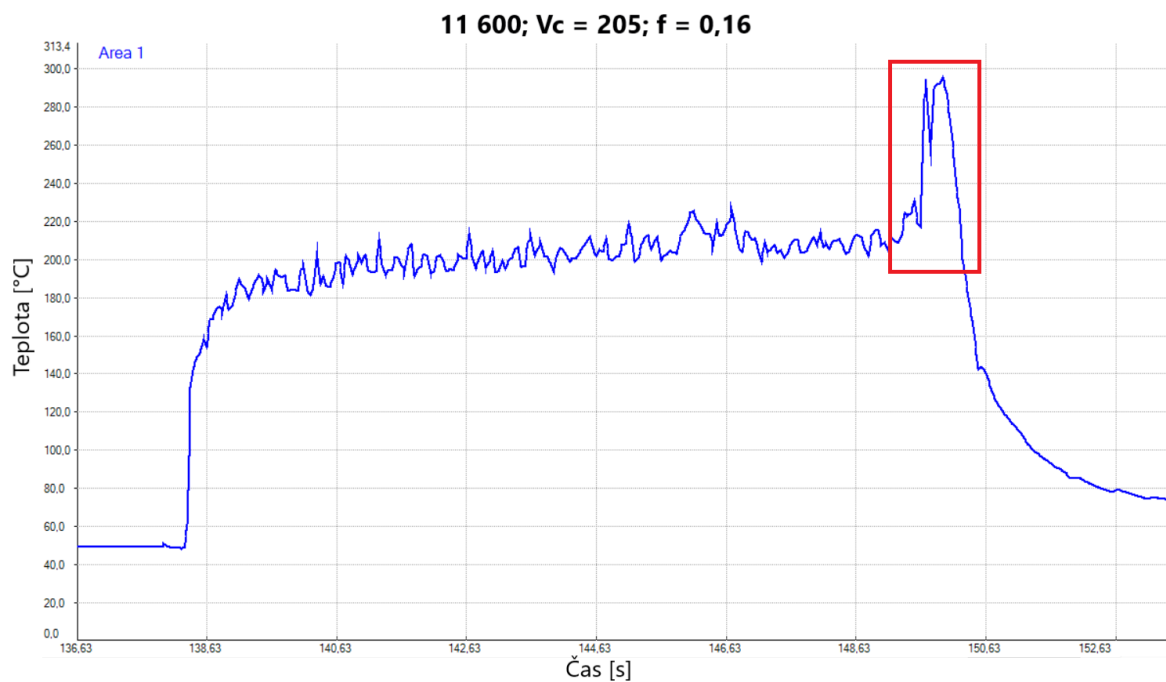
Tab. 15 Měření vlivu řezných rychlostí u materiálu 14 220.3.

Měření	v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	Nejvyšší T [$^{\circ}\text{C}$]	Střední T [$^{\circ}\text{C}$]
1.	130	298	288
2.	170	300	288,5
3.	205	298,5	278,5
4.	245	298,5	278,5

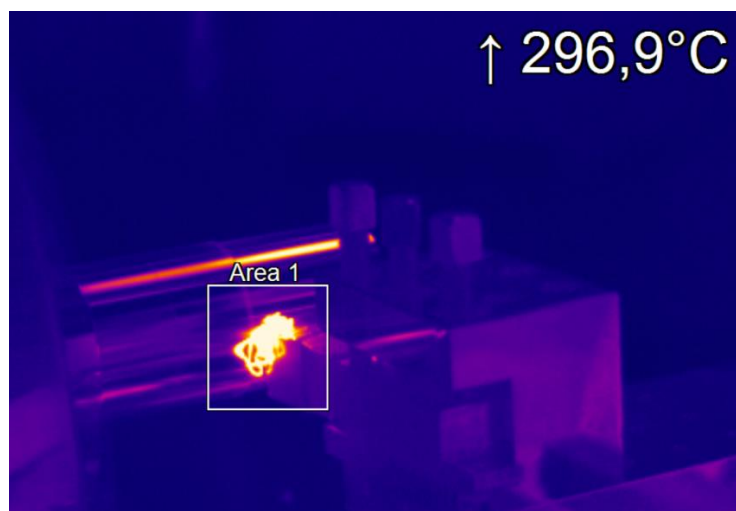
Do tab. 16 byly zapsány naměřené hodnoty získané během soustružení materiálu 11 600 se zvyšujícími hodnotami posuvu. Z výsledných teplot lze vidět, že s rostoucím posuvem dochází k růstu teploty v místě řezu. U prvního a druhého měření došlo k namotání třísky na nástroj. Snímek třísky z druhého měření je možné vidět na obr. 46. Graf zobrazující průběh druhého měření s vyznačeným chvilkovým zvýšením teploty je na obr. 45.

Tab. 16 Měření vlivu posuvů u materiálu 11 600.

Měření	f [mm·ot ⁻¹]	Nejvyšší T [°C]	Střední T [°C]
1.	0,13	200 (295)	178,5
2.	0,16	232 (296,9)	205
3.	0,2	255	225
4.	0,27	285	248,5



Obr. 45 Průběh teplot druhého měření.



Obr. 46 Snímek zachycené třísky během druhého měření.

Výsledky poslední skupiny měření teploty bohužel nejsou k dispozici. Měření bylo provedeno stejným způsobem, jako u předchozích skupin. Ovšem vlivem selhání techniky tento záznam nebylo možné otevřít pro účely vyhodnocení. Nelze tedy analyzovat vliv posuvu na teplotu během soustružení materiálu 14 220.3.

3.3 Měření kvality povrchu

Po dokončení soustružení zvolenými řeznými parametry bylo provedeno měření kvality povrchu obrobených ploch. K měření byl použit dílenský drsnoměr ISR-C003 od firmy Insize (obr. 47). V jeho spodní části se nachází čidlo, které bylo nutné přiložit k obrobenému povrchu a provést měření. Sledovány byly parametry **Ra** a **Rz**, kde u každé plochy byly provedeny dvě měření a následně spočítána jejich průměrná hodnota.



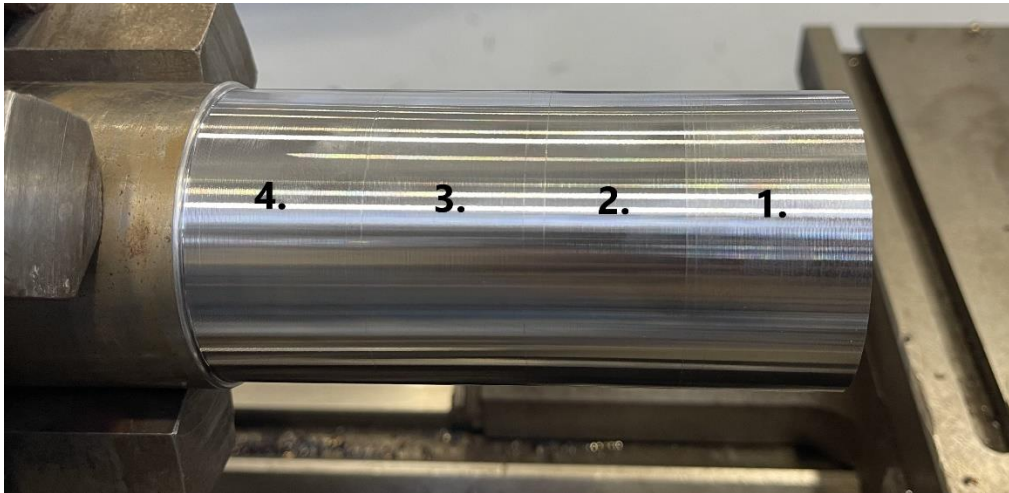
Obr. 47 Drsnoměr Insize ISR-C003.

3.3.1 Výsledky měření kvality povrchu

Výsledky z měření kvality povrchu získané po obrábění materiálu 11 600 byly zapsány do tab. 17. Se zvyšující hodnotou řezné rychlosti byl vyzorován mírný nárůst hodnot **Ra**. Výsledky parametru **Rz** měly spíše kolísavý průběh. Obrobený povrch pro všechny měření je zobrazen na obr. 48. Vizualně se liší nejvíce úsek prvního měření, ovšem měření větší odlišnost kvality nepotvrdilo.

Tab. 17 Měření vlivu řezných rychlostí u materiálu 11 600.

Měření	v_c [$m \cdot min^{-1}$]	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	130	1,97	8,63
2.	170	2,08	8,40
3.	205	2,21	9,20
4.	245	2,18	8,89

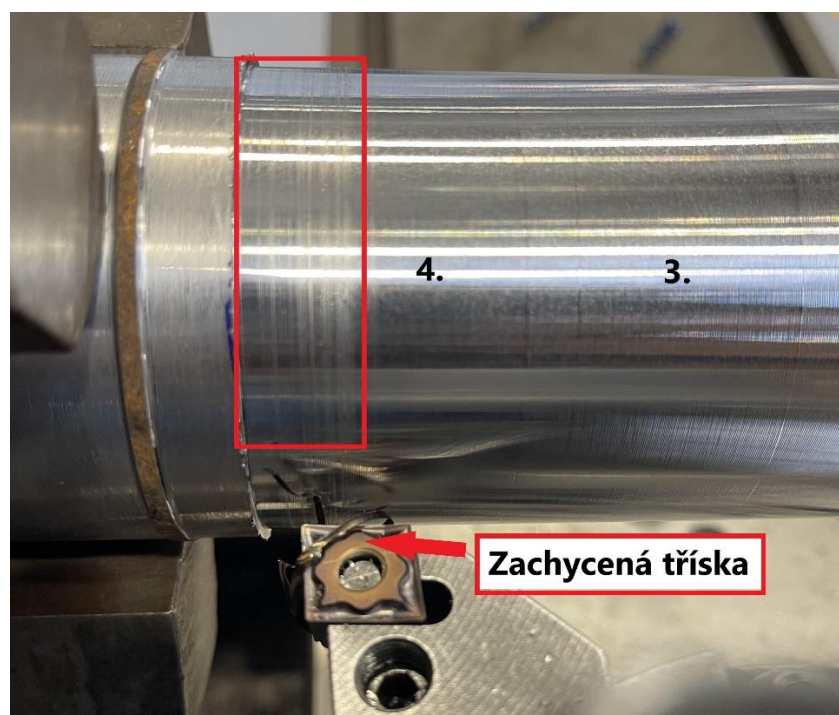


Obr. 48 Výsledný materiál 11 600.

Po dokončení soustružení materiálu 14 220.3 bylo provedeno měření kvality povrchu a získané hodnoty lze vidět v tab. 18. Hodnoty **Ra** zůstaly téměř konstantní při všech zkoumaných řezných rychlostech, zatímco hodnoty parametru **Rz** klesaly s rostoucími rychlostmi. Při čtvrtého měření bylo zpozorováno zhoršení povrchu v části, kde došlo k zachycení třísky na nástroji (obr. 49). V této části se hodnota **Ra** zvýšila na 2,58 μm .

Tab. 18 Měření vlivu řezných rychlostí u materiálu 14 220.3.

Měření	v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	130	2,14	9,59
2.	170	2,09	9,22
3.	205	2,16	9,37
4.	245	2,18 (2,58)	9,27 (10,89)

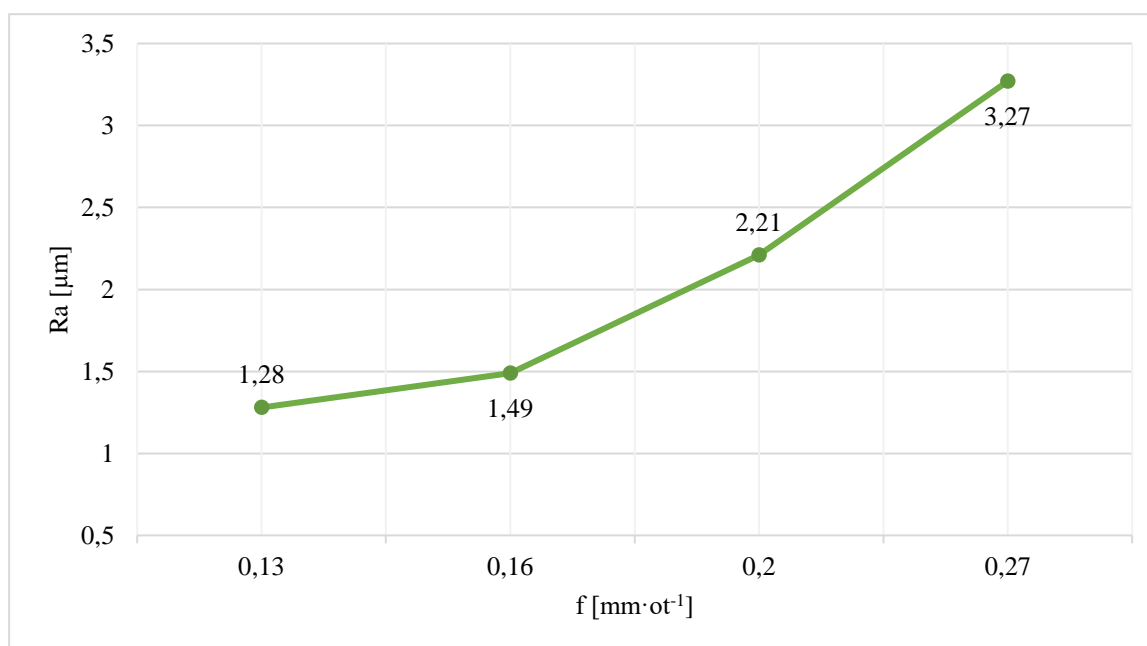


Obr. 49 Vyznačené zhoršení povrchu během čtvrtého měření.

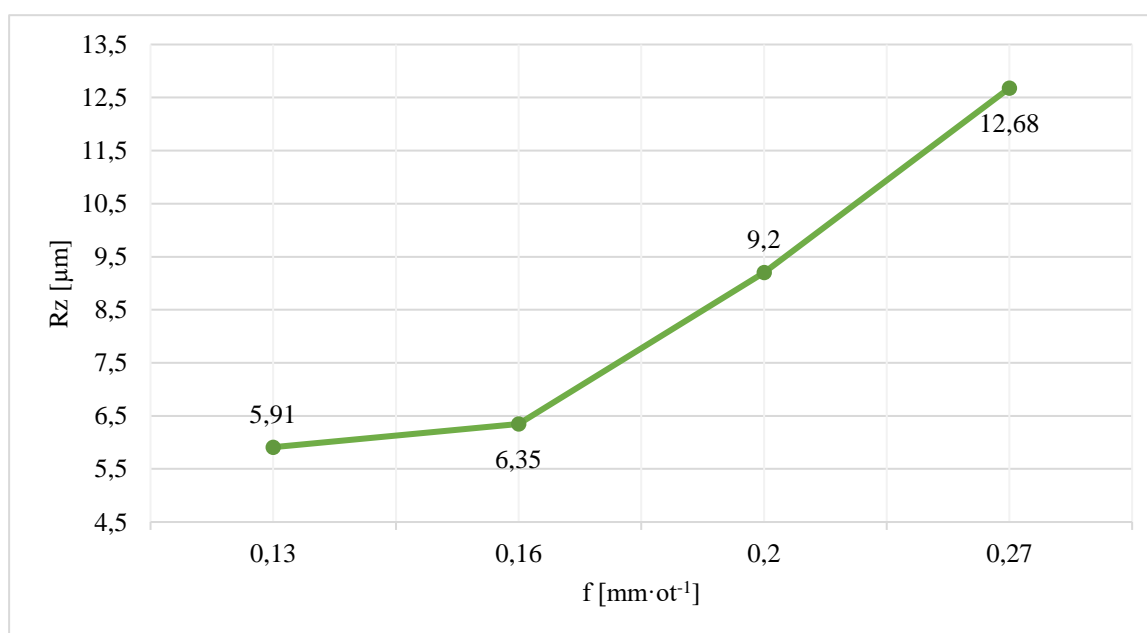
Při analyzování vlivu posuvu na kvalitu povrchu byl soustružen materiál 11 600. Získané výsledky z provedeného měření byly zaznamenány do tab. 19. Je patrné, že zvyšování posuvu přispívá k horší kvalitě povrchu, což dokazuje výrazná rostoucí tendence sledovaných parametrů, jak je možné vidět v grafu (obr. 50 a obr. 51).

Tab. 19 Měření vlivu posuvů u materiálu 11 600.

Měření	f [$\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$]	R_a [μm]	R_z [μm]
1.	0,13	1,28	5,91
2.	0,16	1,49	6,35
3.	0,2	2,21	9,2
4.	0,27	3,27	12,68



Obr. 50 Závislost posuvu na kvalitu povrchu materiálu 14 220.3.



Obr. 51 Závislost posuvu na kvalitu povrchu materiálu 14 220.3.

V tab. 19 jsou zapsány výsledky z měření kvality povrchu, získané po dokončení soustružení materiálu 14 220.3 za konstantních řezných podmínek s výjimkou měnícího se posuvu. Lze vidět, že při zvýšení hodnoty posuvu dochází k nárůstu parametrů **Ra** a **Rz**. Při obrábění zvoleným posuvem $f = 0,13 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ došlo k vytvoření nevhodné dlouhé třísky ve tvaru stužkové smotané (obr. 52). Díky tomu měl výsledný povrch zhoršenou kvalitu jak vizuálně, tak i naměřenými hodnotami.

Tab. 19 Měření vlivu posuvů u materiálu 14 220.3.

Měření	$f \text{ [mm} \cdot \text{ot}^{-1}]$	$Ra \text{ [}\mu\text{m]}$	$Rz \text{ [}\mu\text{m]}$
1.	0,13	1,81	10,03
2.	0,16	1,52	6,35
3.	0,2	2,16	9,37
4.	0,27	2,75	11,95



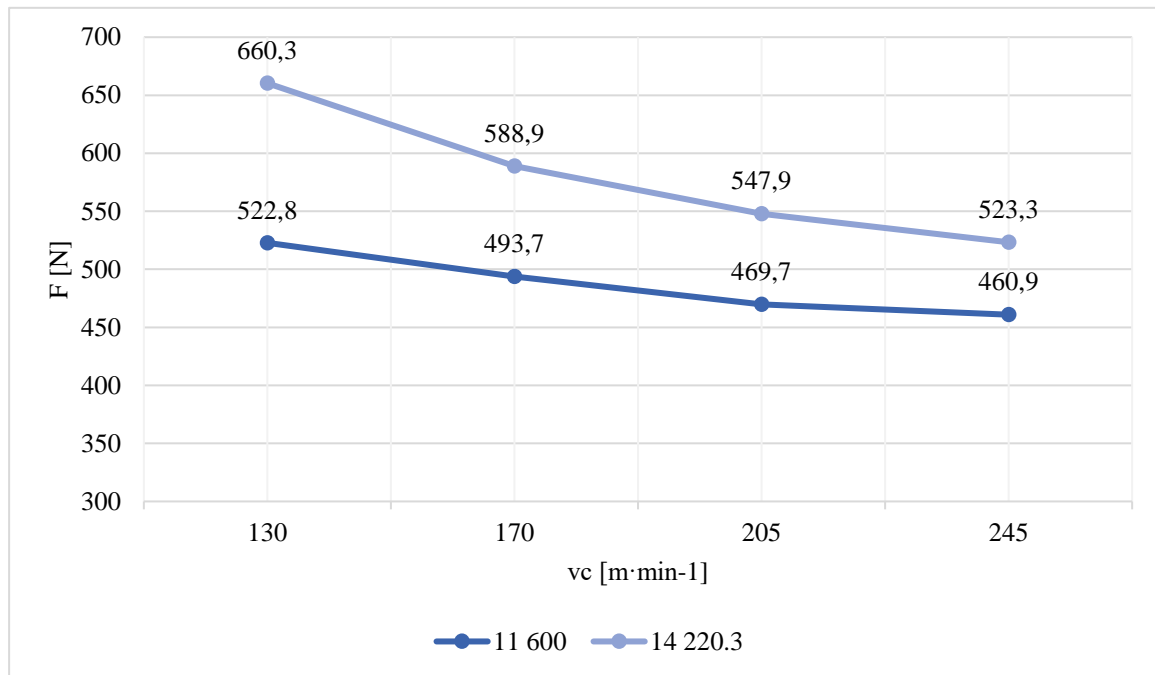
Obr. 52 Tříška ve tvaru stužkové smotané.

3.4 Hodnocení získaných výsledků

Z naměřených výsledků pro oba materiály byl vytvořen graf, který znázorňuje závislost řezné rychlosti na silovém zatížení. Tento graf je prezentován na obr. 50. Během soustružení materiálu 14 220.3 byly zaznamenány vyšší hodnoty řezné síly ve srovnání s ocelí 11 600, i když tento materiál má nižší tvrdost. Tento rozdíl je možné vysvětlit tím, že materiál 14 220.3 má vyšší mez pevnosti, což zvyšuje jeho odolnost proti vniknutí nástroje a vytvoření třísky. Pro úspěšné obrobení je nástroj vystaven vyššímu silovému zatížení.

Se zvyšující se řeznou rychlostí je u obou zkoumaných materiálů sledován trend klesání řezných sil. Celkový pokles u materiálu 11 600 je velmi malý a zejména v části mezi třetím a čtvrtým měřením je téměř zanedbatelný. V případě materiálu 14 220.3 je pokles řezných sil výraznější. Největší pokles byl pozorován mezi rychlostmi 130 a $170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ s rozdílem

hodnot 71.4 N. Lze tedy říci, že snížení řezných sil je možné dosáhnout zvýšením řezných rychlostí, tento vliv ale není tolik výrazný.

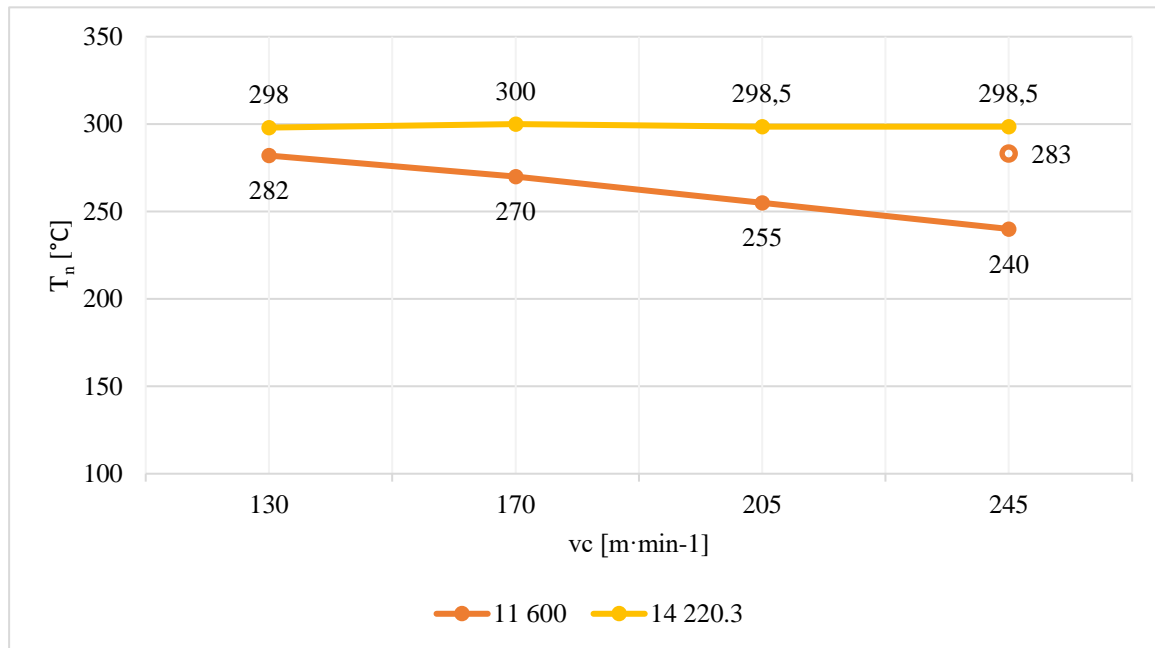


Obr. 50 Závislost řezné rychlosti na řezné síle.

Při sledování závislosti řezné rychlosti na teplotu v místě řezu, byly nejvyšší naměřené teploty pro oba soustružené materiály vyneseny do grafu (obr. 51). Očekávané výsledky měření byly teploty pohybující se v okolí 500° C. Nejvyšší zaznamenaná teplota byla při obrábění materiálu 14 220.3, dosahující hodnoty 300° C. Získané výsledky byly tedy pod očekávanou hodnotou.

Lze vidět, že v případě materiálu 11 600 došlo při zvyšování rychlosti ke snížení teploty v řezu. Naopak u materiálu 14 220.3 byla teplota téměř konstantní. Zároveň zde dosáhli naměřené teploty vyšších hodnot. Vzhledem k vyšší pevnosti klade materiál 14 220.3 větší odpor proti plastické deformaci, což vede k vzniku více tepla.

Dle teoretické části zvýšení řezné rychlosti zapříčiňuje vyšší vznik tepla způsobený rychlejší deformací materiálu. Ovšem s vyšší rychlostí dochází k vyššímu odvodu tepla ve formě třísky. Vzhledem k použité metodě měření pomocí termokamery nelze s dostatečnou přesností změřit přímo vzniklé teplo nebo odletující třísky. Je tedy pravděpodobné, že pokles teploty u vyšších hodnot řezné rychlosti je zapříčiněn vyšším odvodem tepla ve formě třísky. Vysoké rychlosti vedou k většímu počtu odlomených třísek v menším časovém úseku, tudíž teplota v místě řezu klesá. To potvrzuje také zachycení odletující třísky o nástroj během čtvrtého měření. Díky tomu bylo možné změřit teplotu třísky, a jak bylo možné vidět na obr. 44, došlo k chvilkovému zvýšení teploty na hodnotu 283° C.

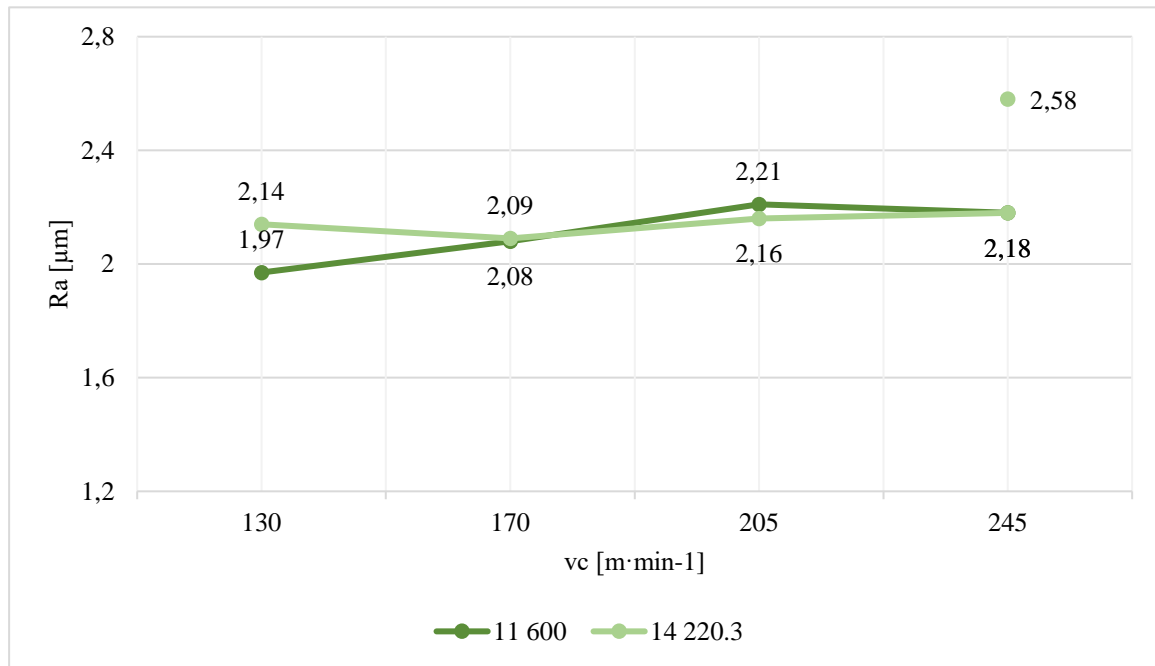


Obr. 51 Závislost řezné rychlosti na teplotu.

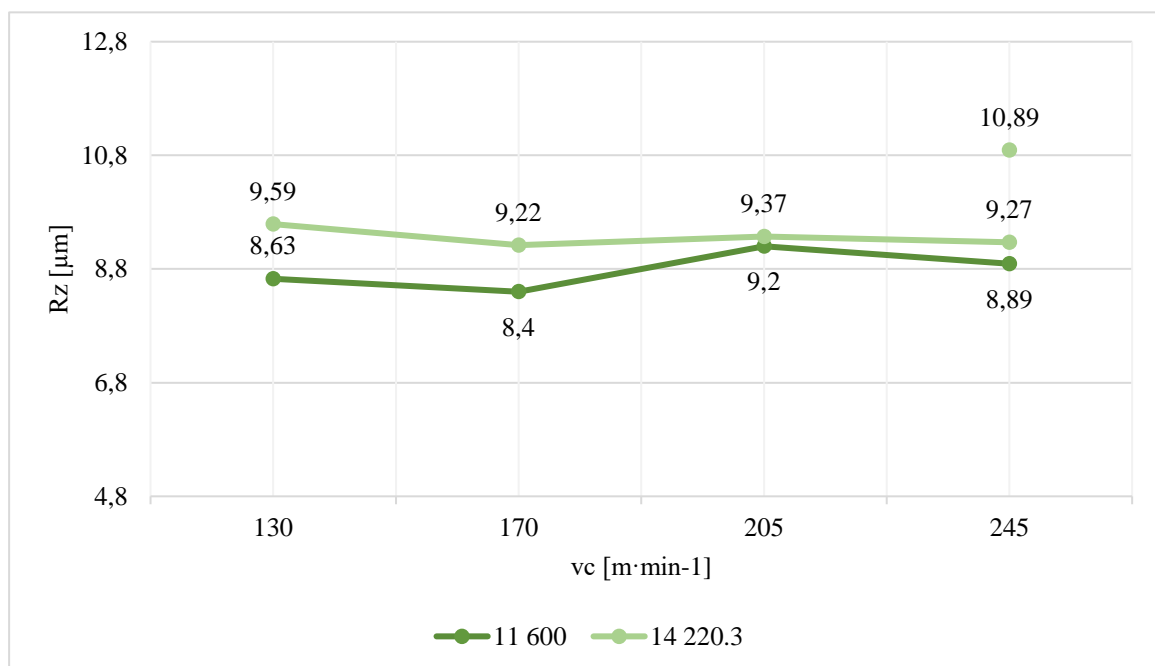
Výsledky analýzy vlivu řezné rychlosti na kvalitu soustruženého povrchu u obou materiálů byly zaznamenány a graficky zobrazeny na obr. 51. Při srovnání výsledků materiálů 11 600 a 14 220.3 není pozorován výrazný rozdíl u jednotlivých rychlostí. Odchytky v hodnotách mohli být způsobené chybou měření, proto lze vliv vlastností materiálů v tomto případě považovat za zanedbatelný.

V případě materiálu 11 600 je patrné, že zvyšující hodnota řezné rychlosti přispívá k růstu hodnot parametru kvality povrchu **Ra**. Tento nárůst není velký a u posledního měření došlo i k mírnému snížení. Také rozdíl výsledků u materiálu 14 220.3 je velmi malý. Vezme-li se v potaz míra nepřesnosti měření dílenského drsnoměru, lze považovat rozdíly hodnot **Ra** za zanedbatelné. Řezná rychlost tedy nemá významný vliv na kvalitu povrchu při soustružení zkoumaných materiálů.

Důležitým faktorem pro dosažení požadované kvality povrchu je zajištění správného lámání třísky, aby bylo zamezeno zachycení třísky na nástroji. Právě při soustružení řeznou rychlostí $v_c = 245 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ došlo u materiálu 14 220.3 k zachycení třísky. Tento incident vedl k zaznamenání zvýšených hodnot parametrů **Ra** a **Rz**, jak je patrné z grafů. Zhoršení kvality povrchu bylo možné rozpoznat také vizuálně.

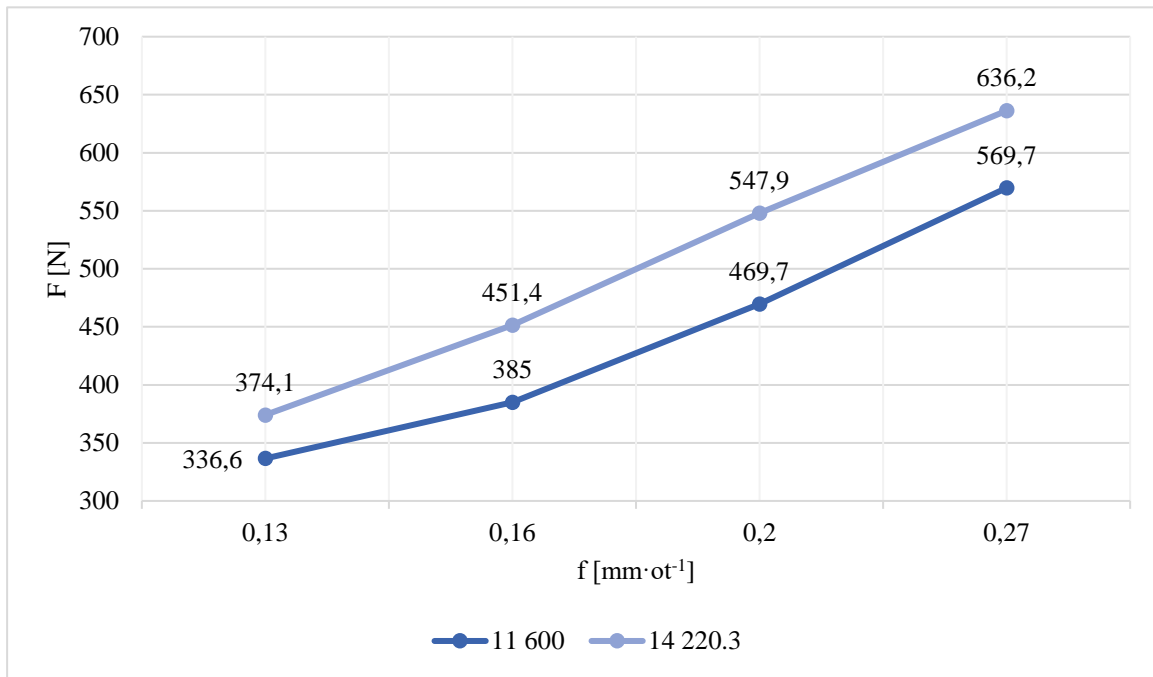


Obr. 51 Závislost řezné rychlosti na kvalitě povrchu.



Obr. 51 Závislost řezné rychlosti na kvalitě povrchu.

Ze získaných hodnot během sledování, jak změna posuvu ovlivňuje hodnotu řezné síly, byl vytvořen graf. Tento graf (obr. 53) zobrazuje hodnoty řezných sil při soustružení obou materiálů. Zjištěno bylo, že se zvyšujícím se posuvem roste i silové zatížení. U materiálu 14 220.3 byly i v tomto případě naměřeny vyšší síly, ale trend zvyšování je u obou materiálů podobný. V porovnání s vlivem řezné rychlosti je růst řezných sil s rostoucím posuvem výraznější, jak ukazuje rozdíl mezi první a čtvrtou hodnotou, který činil 233,1 N u materiálu 11 600 a 262,1 N u materiálu 14 220.3.

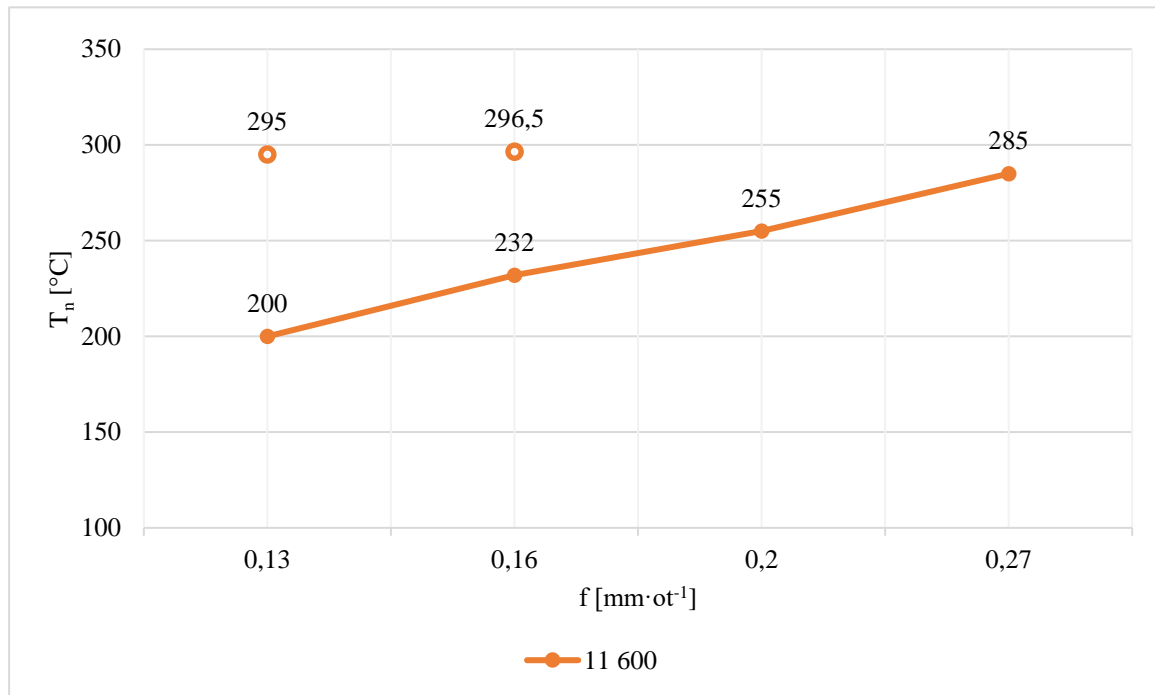


Obr. 53 Závislost posuvu na řezné síle.

Z důvodu selhání techniky není možné porovnat vliv posuvu na teplotu u obou zkoumaných materiálů. Nejvyšší naměřené teploty během soustružení materiálu 11 600 za předem stanovených podmínek jsou zobrazeny v grafu na obr. 54. Z grafu je patrné, že se zvyšující hodnotou posuvu stoupá teplota v místě řezu. Při prvním a druhém měření došlo opět k zachycení třísky na nástroji, což vedlo k chvilkovému zvýšení teploty na hodnoty, které jsou vyznačené v grafu.

Nárůst teploty s rostoucím posuvem, který byl zjištěn, není zcela v souladu s očekávanými teoretickými poznatky. Studie [42] provedla analýzu soustružení materiálu 19 452 za použití řezných podmínek $v_c = 150 - 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,05 - 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ a $a_p = 0,3 \text{ mm}$. Teplota byla měřena pomocí radičního pyrometru. Výsledkem jejich analýzy bylo snížení teploty s rostoucí hodnotou posuvu. Zároveň naměřené teploty dosahovali hodnot v okolí 700°C , což je výrazně vyšší.

Naopak studie [43] zabývající se soustružením materiálu 12 050 řeznými podmínky $v_c = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,04 - 0,202 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ a $a_p = 1 \text{ mm}$, kde byl k měření využit termočlánek. Výsledná závislost zde měla vzrůstající trend teploty při rostoucím posuvu a naměřené hodnoty se pohybovali v okolí 600°C .

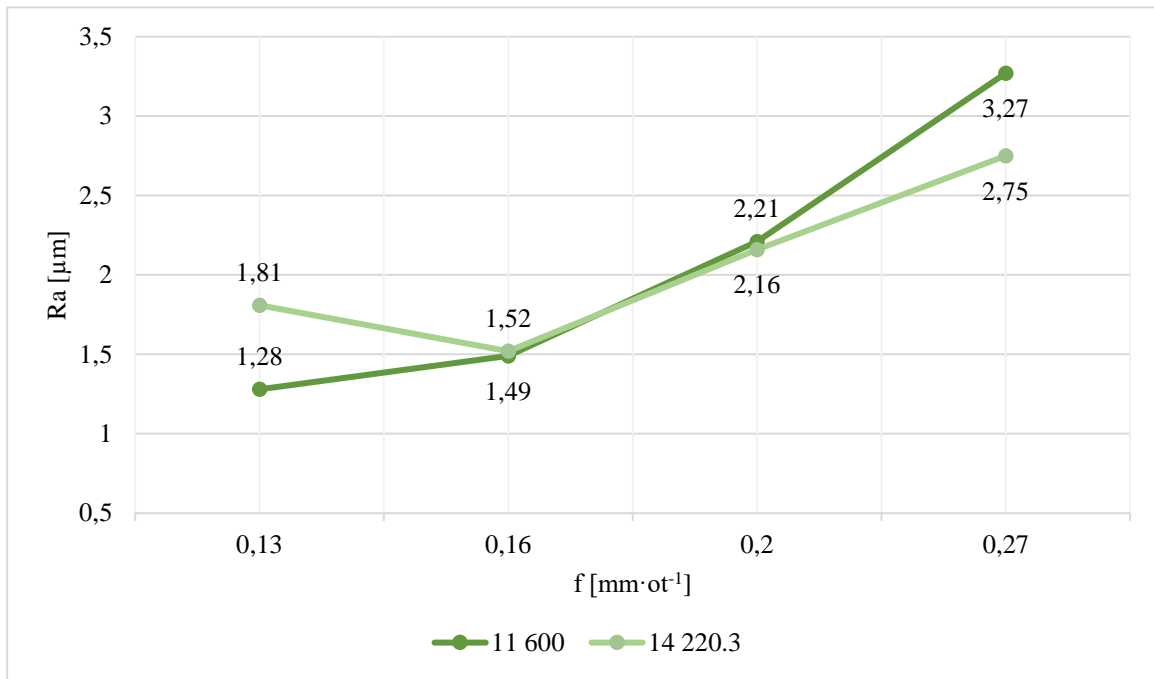


Obr. 54 Závislost posuvu na teplotu.

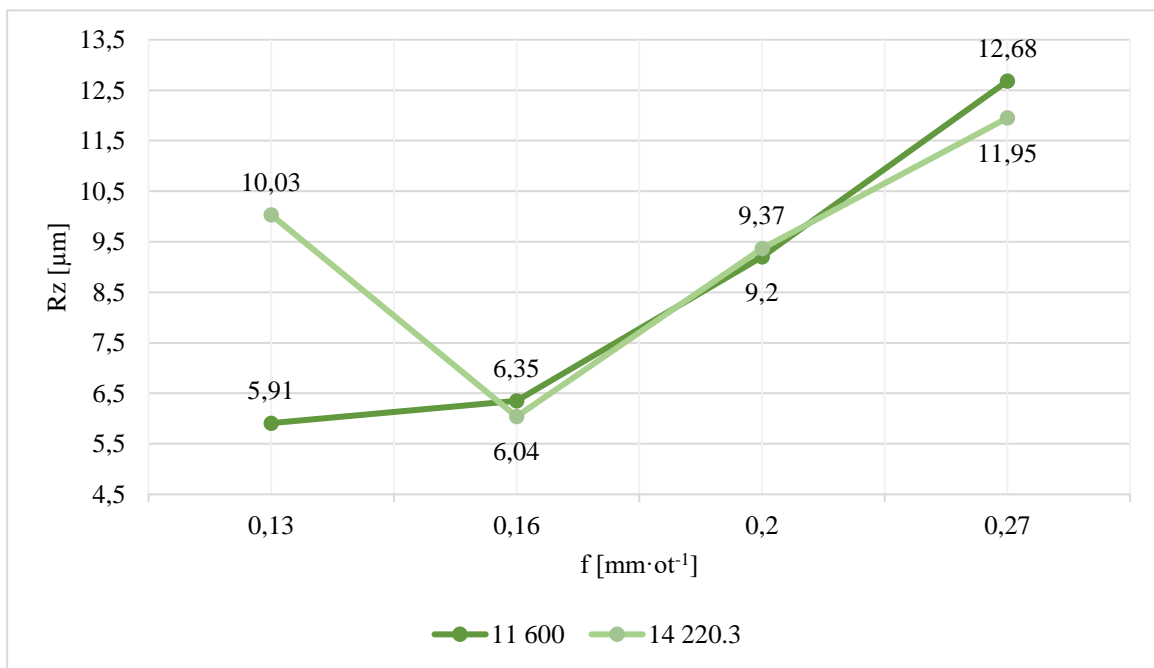
Naměřené hodnoty parametrů kvality povrchu **Ra** a **Rz** byly zaznamenány a vyneseny do grafů (obr. 50 a obr. 51). Tyto grafy poskytují vizuální závislost posuvu a umožňují snadnější porovnání jeho vlivu na kvalitu povrchu pro oba zkoumané materiály. Z analýzy je zřejmé, že se zvyšováním posuvu dochází k postupnému zhoršení obrobeného povrchu. Tento jev je zejména patrný u materiálu 11 600, kde bylo pozorováno výrazné zvýšení hodnot parametrů kvality, kdy hodnota **Ra** vzrostla přibližně o 61 %. Tato skutečnost naznačuje, že vlivu posuvu je nutné věnovat pozornost při volbě rezných parametrů. V porovnání s vlivem rezné rychlosti, který byl nepatrný, je hodnota posuvu významným faktorem při docílení požadované kvality.

Získané výsledky potvrzuje také práce [44], která se věnuje vlivu posuvu na kvalitu povrchu korozivzdorné oceli 17 240. Při soustružení reznými podmínky $v_c = 2,2 - 55,7 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,05 - 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ a $a_p = 3 \text{ mm}$ bylo zjištěno zhoršení kvality povrchu s rostoucí hodnotou posuvu, kde vzrostla průměrná hodnota **Ra** přibližně o 61 %.

Důležitým faktorem při dosažení požadované kvality povrchu je zajištění správného lámání třísky, aby bylo zamezeno zachycení třísky na nástroji. Z analýzy je patrné, že při prvním měření u materiálu 14 220.3 došlo k neočekávanému zvýšení hodnot obou parametrů kvality povrchu. Právě v této části se při soustružení vytvořila dlouhá tříska ve tvaru stužkové smotané, která se namotala na nástroj.



Obr. 50 Závislost posuvu na kvalitu povrchu.



Obr. 51 Závislost posuvu na kvalitu povrchu.

ZÁVĚR

Magisterská práce byla věnována soustružení dvou materiálů 11 600 a 14 220.3 vybranou vyměnitelnou břitovou destičkou CNMG 120404E-NF. Z doporučeného rozmezí nástroje byly vybrány jako vstupní řezné podmínky čtyři hodnoty řezné rychlosti a čtyři hodnoty posuvu. Hlavním cílem bylo provést analýzu vlivu řezné rychlosti a vlivu posuvu na řezné síly, teplotu a získanou kvalitu povrchu. Sledován byl také vliv mechanických vlastností materiálů.

V případě vlivu řezné rychlosti bylo vyzorováno postupné snižování řezných sil při soustružení vyššími hodnotami rychlosti. Naopak při zvyšování posuvu došlo k růstu silového zatížení. Výsledky provedené analýzy jsou v souladu s teoretickými předpoklady, které naznačují, že vliv posuvu je obvykle výraznější než vliv řezné rychlosti. Proto při snaze snížit řeznou sílu je účinnější snížit hodnotu posuvu. Dále, v případě soustružení materiálu 14 220.3, který má vyšší mez pevnosti, byly naměřené hodnoty řezných sil vyšší ve srovnání s materiálem 11 600.

Během analýzy teploty bylo zjištěno, že rostoucí hodnota řezné rychlosti nemá v tomto případě významný vliv na hodnotu tepla v místě řezu. U materiálu 11 600 došlo k mírnému snížení teploty, zatím co u materiálu 14 220.3 zůstala teplota téměř konstantní. Analyzování vlivu posuvu bylo možné pouze u materiálu 11 600, kde bylo pozorováno zvýšení teplot při rostoucí hodnotě posuvu. Použitá metoda měření termokamerou snímá teplotu po odlomení třísky, což může vést k nižším naměřeným hodnotám teploty, než je očekáváno. Pro přesnější analýzu vzniku tepla by bylo nutné využít jinou metodu měření.

Po dokončení soustružení byly změřeny parametry kvality povrchu **Ra** a **Rz**. Při analyzování závislosti řezné rychlosti nebyl sledován významný vliv na výslednou kvalitu povrchu a došlo pouze k mírnému zvýšení hodnot **Ra** u materiálu 11 600. Zjištěný vliv posuvu byl výraznější a zvyšování hodnot posuvu vedlo ke zhoršení kvality obrobene plochy. Dalším nepříznivým faktorem na kvalitu byl nežádoucí tvar třísky vytvořený ve dvou úsecích měření. Získané výsledky analýzy kvality povrchu potvrzují teoretické předpoklady.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Metal Lathe Tutorial 6: Chatter*. Online. 2019. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=HotV4HtmR6Y&t=18s>. [cit. 2024-05-13].
 2. *Jak při soustružení dosáhnout dobré kvality obroběných součástí*. Online. Sandvik coromat. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/how-to-achieve-good-component-quality-in-turning>. [cit. 2024-05-13].
 3. BORO VAN, Petr. *Řezné nástroje*. Online. Technický týdeník. 2011. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-4_8516.html. [cit. 2024-05-12].
 4. JERSÁK, Jan. *Technologie III. - obrábění: Teplo a teploty při obrábění, opotřebení řezných nástrojů*. Online. In: *Educom*. Technická univerzita v Liberci, 2013. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://educom.tul.cz/educom/inovace/TOB/VY_03_36-Teplo%20a%20teploty%20p%C5%99i%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD,%20opot%C5%99eben%C3%AD%20C5%99ezn%C3%BDch%20n%C3%A1stroj%C5%AF_MZ_6%20%20.pdf. [cit. 2024-05-13].
 5. *Vibrace při obrábění kovů a možnosti, jak je potlačovat*. Online. Portál profesionálů Strojírenství.cz. 2022. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/vibrace-pri-obrabeni-kovu-a-moznosti-jak-je-potlacovat/>. [cit. 2024-05-13].
 6. *Metal cutting tools and systems*. Online. Greenleaf. Dostupné z: http://www.greenleafcorporation.com/Greenleaf_Imperial.pdf. [cit. 2024-05-13].
 7. HLUCHÝ, Miroslav a KOLOUCH, Jan. *Strojírenská technologie 1*. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.
 8. *Základní soustružnické nože a jejich popis*. Online. Multimediální výuka soustružení. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/lekce3.htm>. [cit. 2024-05-12].
 9. VIGNER, Miloslav a PŘIKRYL, Zdeněk. *Obrábění*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.
 10. Příručka pro technology - Jak je to s řeznými silami? Online. *MM průmyslové spektrum*. 2012, roč. 2012, č. 3. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami>. [cit. 2024-05-13].
 11. PŘIKRYL, Zdeněk a MUSÍLKOVÁ, Rosa. *Teorie obrábění: učebnice pro vysoké školy*. 2., upr. a rozš. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1975.
 12. FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
 13. HLUCHÝ, Miroslav a HANĚK, Václav. *Strojírenská technologie 2*. 2., upr. vyd. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-245-6.
 14. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Online. Ústav strojírenské technologie. 2006. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf. [cit. 2024-05-13].
 15. *Soustružnické stroje*. Online. Techstroj. C2012. Dostupné z: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://techstroj.g6.cz/S/S13.pdf>. [cit. 2024-05-13].
-

-
16. *Vertikální soustruhy*. Online. IBuilder. C2015-2021. Dostupné z: <https://ibuilder-cs.techinfus.com/stanki/tokarnyj/karuselnye/>. [cit. 2024-05-13].
 17. *Druhy soustruhů*. Online. Tumlikovo. C2010. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/druhy-soustruhu/>. [cit. 2024-05-13].
 18. *CNC soustruh*. Online. Raptor technologies. C2024. Dostupné z: <https://www.raptor-cnc.com/cnc-soustruh.html>. [cit. 2024-05-13].
 19. *Tepelné zatížení při frézování*. Online. Seco. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/21483?language=cs>. [cit. 2024-05-12].
 20. MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007, c1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
 21. *Co jsou to vibrace při obrábění a jak je potlačovat?* Online. Seco. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/120669?language=cs>. [cit. 2024-05-13].
 22. MANG, Theo a DRESEL, Wilfried. *Lubricants and Lubrication*. Wienheim: Wiley-VCH, 2007. ISBN 978-3-527-31497-3.
 23. *Použití řezné kapaliny a chlazení při soustružení*. Online. Sandvik coromat. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/how-to-apply-coolant-and-cutting-fluid-in-turning>. [cit. 2024-05-12].
 24. ČEP, Robetr. *Měření teploty při obrábění*. Online. Fakulta strojní, VŠB - Technická Univerzita Ostrava. 2011. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://home1.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_04.pdf. [cit. 2024-05-12].
 25. *Tlumicí úložné základové prvky snižují vibrace*. Online. 2015, roč. 2015, č. 11. 2015. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tlumici-ulozne-zakladove-prvky-snizuji-vibrace>. [cit. 2024-05-12].
 26. MUSÍLKOVÁ, Rosa. *Písemný referát k aspirantskému minimu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956.
 27. FOJTŮ, Petr. *Problematika samobuzeného kmitání při obrábění*. Online. Fakulta strojní ČVUT v Praze. Dostupné z: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://stc.fs.cvut.cz/history/2009/sbornik/Papers/pdf/FojtuPetr-304483.pdf>. [cit. 2024-05-12].
 28. *Pasivně-dynamická technologie tlumení vibrací*. Online. T+T technika a trh. Dostupné z: <https://m.technikaaatrh.cz/obrabeni/pasivne-dynamicka-technologie-tlumeni-vibraci>. [cit. 2024-05-13].
 29. BILOŠ, Jan a BILOŠOVÁ, Alena. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika*. Online. Projekty s podporou EU. 2012. Dostupné z: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2755-1.pdf>. [cit. 2024-05-13].
 30. JANÁSEK, Adam. *Obrábění materiálu*. Online. FAKULTA STROJNÍ, VŠB-TU OSTRAVA. Projekty s podporou EU. 2012. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://projekty.fs.vsb.cz/170/dokumenty/KA1_Praxe/OBR%C3%81B%C4%9AN%C3%8D_Jan%C3%A1sek.pdf. [cit. 2024-05-13].
 31. *Hrubovací soustružení nástroji s VBD*. Online. *MM průmyslové spektrum*. 2001, roč. 2001, č. 6. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/hrubovaci-soustruzeni-nastroji-s-vbd>. [cit. 2024-05-13].
-

-
32. ČEP, Robert. *Měření opotřebení nástrojů*. Online. Fakulta strojní, VŠB - Technická Univerzita Ostrava. 2011. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf. [cit. 2024-05-13].
 33. *PŘEHLED ZÁKLADNÍCH PROJEVŮ OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ PRO OBRÁBĚNÍ KOVŮ*. Online. Seco. 2023. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/122073?language=cs>. [cit. 2024-05-13].
 34. Příručka pro technology - Opotřebení se nevyhne!. Online. *MM průmyslové spektrum*. 2012, roč. 2012, č. 6. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhne>. [cit. 2024-05-13].
 35. *Opotřebení břitu*. Online. Sandvik coromat. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/wear-on-cutting-edges>. [cit. 2024-05-13].
 36. KRÍŽ, Rudolf a VÁVRA, Pavel. *Strojírenská příručka: 24 oddílů v osmi svazcích*. Praha: Scientia, 1996. ISBN 80-718-3024-0.
 37. *CNMG 120404E-NF:T8430*. Online. Dormer pramet. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/cz/cs/p/7977059>. [cit. 2024-05-13].
 38. *Jakost E335 (ČSN 11 600, St 60-2, Fe 590, ozn. W nr. 1.0060)*. Online. Atreon. C2024. Dostupné z: <https://www.atreon.cz/jakost-e335/>. [cit. 2024-05-13].
 39. *Konstrukční ocel ČSN 14220*. Online. T-prom s.r.o. C2009-2024. Dostupné z: <https://www.tprom.cz/wiki/ocel/14220>. [cit. 2024-05-13].
 40. *Vícesložkový dynamometr, 5 kN, krycí deska 100x170 mm / 9257B*. Online. Kistler Group. C2024. Dostupné z: <https://www.kistler.com/CZ/en/p/multicomponent-dynamometers-9257b/000000000018007542>. [cit. 2024-05-13].
 41. *DynoWare*. Online. Cutting tool engineering. 2011. Dostupné z: <https://www.ctemag.com/products/dynoware>. [cit. 2024-05-13].
 42. Střední povrchová teplota třísky a řezné síly při experimentálním soustružení v režimu HSC. Online. In: *IV. ročník mezinárodní konference konané ve dnech 25. - 26.1.2011 v Plzni*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní. Katedra technologie obrábění, 2011, s. 1-8. ISBN 978-80-7043-934-0. Dostupné z: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16396/1/Svec.pdf>. [cit. 2024-05-13].
 43. PÍCHA, Václav. *Tepelné jevy při obrábění*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Ing. Vítězslav Rázek, CSc. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2021. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/97268/F2-BP-2021-Picha-Vaclav-Picha_Bakalarska_prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [cit. 2024-05-13].
 44. BĚLA, Alois. *Analýza vlivu nárůstu na drsnost povrchu při soustružení nerezové oceli*. Online, Bakalářská práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2022. Dostupné z: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/99ebd874-36e5-4f02-aaca-5dba4bfb8070/content>. [cit. 2024-05-13].
 45. Soustružení [katalog výrobků]. In: *DORMER PRAMET* [online]. ©2021-2022. Dostupné z: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://5wyuco84ao39w9tsgkmmmx.blob.core.windows.net/cms/DORMER-PRAMET-Turning-Catalogue-2021-CZ.pdf>. [cit. 2024-05-13].
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbole

Označení	Legenda	Jednotka
a_p	šířka záběru	[mm]
b	šířka třísky	[mm]
F_x	axiální složka řezné síly	[N]
F_y	radiální složka řezné síly	[N]
F_z	tangenciální složka řezné síly	[N]
f	posuv	[mm·ot ⁻¹]
f_n	frekvence kmitů	[Hz]
n	počet otáček	[min ⁻¹]
T_n	nejvyšší naměřená teplota	[°C]
T_s	Střední hodnota teploty	[°C]
v_c	řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
z	Počet zubů	[-]

Zkratky

Označení	Legenda
HB	tvrdost dle Brinella
PVD	Physical Vapour Deposition
VB	opotřebení hřbetu
VC	opotřebení hřbetu v oblasti špičky
VN	vrub na hřbetu
VR	radiální opotřebení špičky
KT	hloubka žlábků
KB	šířka žlábků
KL	vzdálenost žlábků od špičky

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 List nástroje CNMG 120404E-NF z katalogu Dormer Pramet [45]
