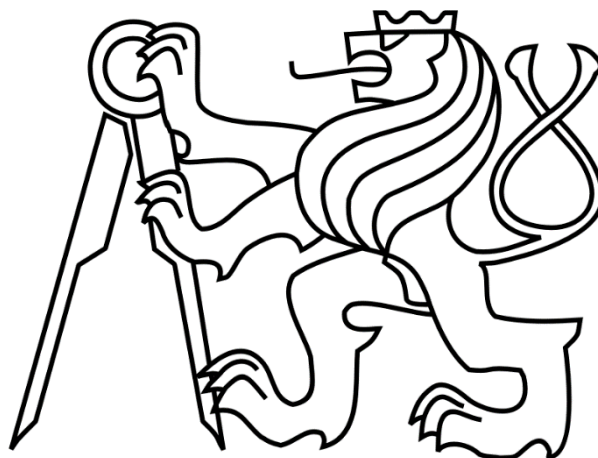


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

**Srovnání a vyhodnocení suchého a mokrého obrábění z hlediska teplotně
mechanického chování stroje, nástroje a obrobku**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Divíšek** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **465354**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Srovnání a vyhodnocení suchého a mokrého obrábění z hlediska teplotně mechanického chování stroje, nástroje a obrobku

Název bakalářské práce anglicky:

Comparison and evaluation of dry and wet machining in terms of the thermomechanical behavior of the machine, the tool and the workpiece

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je provést analýzu vlivu obráběcích procesů (suchého/mokrého) na průběh teplotních chyb soustavy stroj-nástroj-obrobek; Osnova: 1. Rešerše v oblasti výhod a nevýhod suchého a mokrého obrábění z pohledu teplotních chyb (problematika tepelného chování obráběcích strojů), 2. Zpracování a interpretace naměřených dat během technologických zkoušek suchého a mokrého obrábění, 3. Evaluace vzájemných výhod a nevýhod použití procesu mokrého a suchého obrábění z teplotně-mechanického hlediska provozu stroje.; Rozsah grafické části: schémata konfigurace měřicí aparatury a provedených experimentů, zpracované výsledky měření; Rozsah textové části: 40 -60 stran;

Seznam doporučené literatury:

BRYAN, J. 1990. International status of thermal error research. CIRP Annals - Manufac-turing Technology, 39(2):645-656.; PUTZ, M. RICHTER, C. REGEL, J. BRÄUNIG, M. 2018. Industrial relevance and causes of thermal issues in machine tools. Proceedings of the Conference on Thermal Issues in Machine Tools, Dresden; HOREJŠ, O. MAREŠ, M. HORNYCH, J. FIALA, Š. HAVLÍK, L. NOVOTNÝ, J. 2017. Výsledek na stroji-KOVOSVIT MAS-2017: využití software pro zpracování a posouzení vlivu technologického procesu na teplotní chyby obráběcího stroje. Výzkumná zpráva V-17-026, ČVUT v Praze, FS, ú12135.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Hornych, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Otakar Horejš, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Jan Hornych, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

29.4.2019
Datum převzetí zadání

Divíšek
Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 21. 7. 2019

.....

podpis

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce Ing. Janu Hornychovi, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady, ochotu a čas, který mi při psaní této práce věnoval. Dále děkuji konzultantovi panu Ing. Otakaru Horejšovi, Ph.D., který byl při tvorbě práce nápomocen.

Anotace

Jméno autora:	Daniel Divíšek
Název bakalářské práce:	Srovnání a vyhodnocení suchého a mokrého obrábění z hlediska teplotně mechanického chování stroje, nástroje a obrobku
Rozsah práce:	76 str., 36 obr., 14 tab.
Školní rok vyhotovení:	2019
Škola:	ČVUT FS
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jan Hornych, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Otakar Horejš, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT FS
Využití:	Zjištění a porovnání nákladů na eliminaci teplotních deformací při mokrému a suchému obrábění.
Klíčová slova:	řezný proces, mokré obrábění, suché obrábění, teplotní deformace
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá teplotními deformacemi během obráběcího procesu a možnostmi jejich eliminace. V práci je porovnáno teplotní chování při mokrému a suchému obrábění.

Annotation

Author:	Daniel Divíšek
Title of bachelor:	Comparison and evaluation of dry and wet machining in terms of the thermomechanical behavior of the machine, the tool and the workpiece
Extent:	76 p., 36 fig., 14 tab.
Academic year:	2019
University:	CTU, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Jan Hornych, Ph.D.
Consultant:	Ing. Otakar Horejš, Ph.D.
Submitter of the Theme:	CTU, Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Finding and comparing the costs of elimination of thermal errors in wet and dry machining.
Key words:	cutting process, wet machining, dry machining thermal errors
Annotation:	The bachelor thesis deals with temperature deformations during the machining process and possibilities of their elimination. The work compares the temperature behavior of wet and dry machining.

Obsah

Obsah	7
Seznam použitých symbolů.....	9
1. Úvod.....	10
2. Cíle práce	11
3. Úvod do problematiky teplotního chování obráběcího stroje	12
3.1. Základní popis fyzikálních jevů, způsobujících tepelné deformace	12
3.1.1. Teplo.....	12
3.1.2. Délková a objemová teplotní roztažnost	12
3.1.3. Vznik tepla ve strukturách obráběcího stroje	13
3.1.4. Základní klasifikace zdrojů tepla	14
3.1.5. Sdílení tepla.....	15
4. Tepelné chování OS při mokřém a suchém obrábění.....	17
4.1. Mokřé obrábění.....	18
4.1.1. Vlastnosti technických kapalin	18
4.1.2. Druhy řezných kapalin.....	22
4.1.3. Přehled řezných kapalin na trhu	27
4.1.4. Vliv řezné kapaliny	28
4.2. Suché obrábění.....	32
4.3. Stav řešené problematiky.....	32

5. Vlastní řešení: Experimenty	34
5.1. Popis experimentů.....	34
5.2. Výsledky experimentů	39
5.2.1. Suché obrábění – úběr třísky 1,5 mm	39
5.2.2. Suché obrábění – úběr třísky 3 mm	44
5.2.3. Mokrý obrábění – úběr třísky 1,5 mm	49
5.2.4. Mokrý obrábění – úběr třísky 3 mm	54
5.2.5. Air Cutting	58
5.3. Shrnutí experimentů (resumé).....	62
6. Zhodnocení nákladů na eliminaci teplotních deformací	64
6.1. Náklady na suché obrábění	65
6.2. Náklady na mokré obrábění	67
7. Závěr	68
Seznamy	70
Seznam obrázků	70
Seznam tabulek	72
Seznam použitého softwaru	73
Seznam příloh	73
Seznam použité literatury	74

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Název
c_j	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
l	$[m]$	současná délka
l_1	$[m]$	výchozí délka
m	$[kg]$	hmotnost
pH	$[-]$	vodíkový exponent
\dot{q}	$[-]$	plošná hustota tepelného toku
Q	$[J]$	teplo
T	$[K]$	teplota
T_1	$[K]$	teplota povrchu při konvekci, teplota ozařovaného tělesa při radiaci
T_2	$[K]$	teplota vzduchu při konvekci, teplota zářiče při radiaci
V	$[m^3]$	současný objem
V_1	$[m^3]$	výchozí objem
α	$[K^{-1}]$	součinitel teplotní délkové roztažnosti
α	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
β	$[K^{-1}]$	součinitel objemové roztažnosti
δ	$[\mu m]$	deformace
ε	$[-]$	emisivita
λ	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti
σ	$[W.m^{-2}.K^{-4}]$	Stefanova – Boltzmannova konstanta



1. Úvod

Obráběcí stroj je jedním ze základních výrobních prostředků. Mnoho předmětů, které člověk každodenně používá, bylo vyrobeno právě jeho pomocí. U každého výrobku vždy požadujeme určité specifické vlastnosti. Mezi tyto vlastnosti patří například rozměry dané přesností. Dosažená přesnost rozměrů u obrobku závisí především na přesnosti obráběcího stroje. Zde působí několik faktorů. Kromě vlastností, které jsou dány výrobou, montáží a opotřebením, je to především sdílení tepla (nestacionární stavy) a síla. Bakalářská práce se zabývá hlavně popisem působení tepla a možnostmi jeho eliminace.

Dnešním trendem v obrábění je zvyšování úběru třísky spolu s častějším používáním těžko obrobitelných materiálů. Roste zájem o ekologicky šetrnější suché nebo MQL obrábění (z angl. *Minimum Quantity of Lubrication*). Rovněž se zvyšují požadavky na pružnost a flexibilitu výroby, kdy se stroj nemůže ocitnout v teplotně kvazistabilním stavu. Tyto trendy vedou ke vzniku velkých a proměnlivých zdrojů tepla v celé konstrukci stroje. V důsledku toho dochází v rámci termomechanického systému „stroj – nástroj – obrobek“ k neustálým a výrazným změnám tvarů teplotních polí, a tedy také ke vzniku tvarových a objemových změn v konstrukci stroje, nástroje i obrobku. Dle [14] a [16] platí, že 40 – 70 % celkových nepřesností ve výrobě je způsobeno právě tepelným působením. Dalším současným trendem jsou zvyšující nároky na přesnost a stabilitu výroby, a to téměř ve všech oblastech průmyslu. Proto se nyní minimalizaci nepřesností v důsledku teplotních chyb věnuje intenzivní výzkum [3].

Dalším trendem je nárůst požadavků na stabilitu a přesnost při zachování výrobní pružnosti. Nejznámějším systémem je tzv. Just in Time. Základem tohoto systému je důraz na 100 % kvalitu výrobků a výrobu jen toho, co je potřebné. Celý systém se snaží zamezit plýtvání prostředky, časem a kapacitou. Další možností, jak tohoto stavu dosahovat je systém Kanban [15]. Pružná výroba s sebou nese potřebu vypořádat se s nestacionárními termomechanickými jevy.



2. Cíle práce

Hlavním cílem práce je analýza výhod jednotlivých procesů (suchého / mokrého) z pohledu teplotních chyb řetězce „stroj – nástroj – obrobek“ a poskytnutí náhledu na rozdíl v nákladech na eliminaci teplotních deformací.

Dílčím cílem je zpracovat naměřená data a analyzovat teplotní chování „stroje – nástroje – obrobku“ během obrábění. Dále porovnat chování při suchém a mokrému obrábění. Na závěr provést ekonomické zhodnocení teplotních eliminací, které vede k hlavnímu cíli bakalářské práce.



3. Úvod do problematiky teplotního chování obráběcího stroje

3.1. Základní popis fyzikálních jevů, způsobujících tepelné deformace

3.1.1. Teplo

„Teplo Q [J] je formou energie přenášené mezi systémem a okolím systému. Jeho přenos je vyvolán tepelným působením mezi systémem a okolím neboli rozdílem teplot systému a okolí. Jinak řečeno, jde také o část vnitřní energie systému [16].“

Měrná tepelná kapacita c_j [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] je veličina, která závisí na druhu materiálu. Pokud známe její hodnotu, snadno z rovnice (1) určíme množství tepla Q potřebného k ohřátí objektu o hmotnosti m [kg] o teplotu ΔT [K] [19].

$$dQ = m \cdot c_j \cdot dT \quad (1)$$

3.1.2. Délková a objemová teplotní roztažnost

Změna teploty části obráběcího stroje je doprovázena změnou rozměrů a tvaru této části. To je způsobeno materiálovými vlastnostmi – délkovou a objemovou roztažností. Základem je zjednodušený vztah (2) (součinitel α je považován za konstantní) popisující změnu délky objektu v závislosti na teplotě [19].

$$l = l_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T), \quad (2)$$

kde l_1 [m] je výchozí délka objektu, α [K^{-1}] součinitel teplotní délkové roztažnosti a ΔT [K] změna teploty objektu.

Ve vztahu (3) pro objemovou roztažnost z výchozího objemu V_1 [m^3] vystupuje součinitel objemové roztažnosti β [K^{-1}]. Pro izotropní materiály platí, že $\beta = 3 \cdot \alpha$ [19].

$$V = V_1 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T) \quad (3)$$



3.1.3. Vznik tepla ve strukturách obráběcího stroje

Teplo vzniká podle kinetické teorie přeměnou kinetické energie uspořádaného pohybu na kinetickou energii neuspořádaného pohybu částic a naopak. Základní způsoby vzniku tepla ve vlastních zdrojích obráběcího stroje jsou tyto [19]:

- ztráty v mechanických odporech
 - smykové tření
 - valivé odpory
 - viskózní třecí odpory
- ztráty v elektrickém zařízení
 - Joulovo teplo
 - ztráty v železe
- technologický proces

Mechanické odpory jsou ve všech pohybových spojeních, kdy během pohybu dochází vlivem ztrát k přeměně mechanické energie na teplo. Množství vzniklého tepla závisí na velikosti třecí síly, valivém odporu nebo rychlosti relativního pohybu [19].

Další skupinou jsou ztráty v elektrickém zařízení. Joulovo teplo vzniká při průchodu proudu vodičem v důsledku Ohmova odporu. Ztráty v železe se objevují při střídavém magnetování magnetických obvodů elektrických zařízení [19].

Technologický proces jako faktor ovlivňující tepelné chování je podrobněji popsán v samostatné kapitole 4.



3.1.4. Základní klasifikace zdrojů tepla

Zdroje tepla můžeme rozdělit podle místa působení na vnější a vnitřní. Dále na tepelné chování obráběcího stroje působí okolní podmínky ovlivňující intenzitu sdílení tepla.

Vnější zdroje tepla

Vnější zdroje tepla jsou takové, které působí na obráběcí stroj z okolí jako například jiné stroje, vytápění haly, klimatizace nebo ohřátý polotovár určený k obrábění. Na stroj může působit také sluneční záření nebo špatně izolované základy stroje. Dále může pozitivně i negativně (problém určit, jak daný zdroj působí [pozn. autora]) ovlivnit chování stroje i teplota okolí (například vzduchu, chladící kapaliny atd.) [1], [14]. Tyto zdroje tepla nesouvisí s funkcí stroje (alespoň ne přímo).

Vnitřní zdroje tepla

Vnitřní zdroje tepla jsou přímo spjaty s funkcí stroje. Jsou způsobeny především tepelnými ztrátami motorů, třením v převodech, a hlavně samotným obráběcím procesem. Mechanická energie vzniklá odebráním třísky se z velké části přemění na teplo. Toto teplo zvyšuje teplotu na kontaktních plochách až na 1200 °C. Jakékoli zvýšení teploty nepříznivě ovlivňuje nejen vlastnosti obrobku, ale i celý proces obrábění [1], [14].



3.1.5. Sdílení tepla

Vedení (kondukcce)

Vedení tepla je šíření mechanických forem energie mikroskopického pohybu částic hmoty v prostředí s teplotním gradientem. Hmotu v tomto případě můžeme považovat za kontinuum, ve kterém se vytvoří teplotní pole. Při odvození rovnice teplotního pole můžeme vycházet z empirického Fourierova zákona, který říká, že plošná hustota tepelného toku je úměrná teplotnímu gradientu a směřuje proti němu. Plošná hustota tepelného toku se v tomto případě vyjádří vzorcem

$$\dot{q} = -\lambda \operatorname{grad}T, \quad (4)$$

kde $\dot{q} = \frac{dq}{d\tau}$ je plošná hustota tepelného toku a λ [W.m⁻¹.K⁻¹] je součinitel tepelné vodivosti [17], [18], [19].

Proudění (konvekce)

Konvekce je způsob sdílení tepla mezi proudícími tekutinami a tuhými tělesy nebo mezi tekutinami navzájem. Částice tekutiny přijímají za pohybu teplo od tepelných zdrojů a přenášejí ho jako tepelnou formu energie. Konvekci dělíme na vynucenou a volnou. Je-li proudění tekutiny vyvoláno uměle (ofukování, čerpání), jedná se o vynucenou konvekci. Pokud je však proudění způsobeno pouze teplotními rozdíly jednotlivých částic, mluvíme o volné konvekci.

Typickým příkladem je přestup tepla na rozhraní mezi pevnou stěnou a tekutinou (okolní vzduch). Plošná hustota se v tomto případě vyjádří vzorcem

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_2 - T_1), \quad (5)$$

kde T_1 [K] je teplota povrchu, T_2 [K] je teplota vzduchu a α [W.m⁻².K⁻¹] je součinitel přestupu tepla [17], [18], [19].



Záření (radiace)

Hmotný objekt zahřátý na termodynamickou teplotu T [K] přeměňuje část své vnitřní energie na elektromagnetické vlny. Ty mohou procházet tzv. průteplivým prostředím. Při dopadu na jiný hmotný objekt, který může elektromagnetické vlny pohlcovat, se alespoň část energie vlnění přemění opět na vnitřní energii tohoto přijímacího tělesa. Zbytek energie se odrazí. Poměr odražené a pohlcené energie je dán vlastností povrchu zvanou emisivita. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která nabývá hodnot v intervalu $(0, 1)$ a značí se ε . Pokud je $\varepsilon = 1$, mluvíme o tzv. dokonale černém tělese, které má schopnost spojitě vyzařovat i pohlcovat elektromagnetické vlny v celém spektru vlnových délek. Plošnou hustotu tepelného toku sdíleného radiací zjistíme bilancováním plošných hustot toků zářivých energií sledovaného objektu dle vztahu

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4), \quad (6)$$

kde ε je emisivita, σ [W.m⁻².K⁻⁴] je Stefanova – Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8}$), T_1 [K] je teplota ozařovaného tělesa a T_2 [K] je teplota zářiče [17], [18], [19].

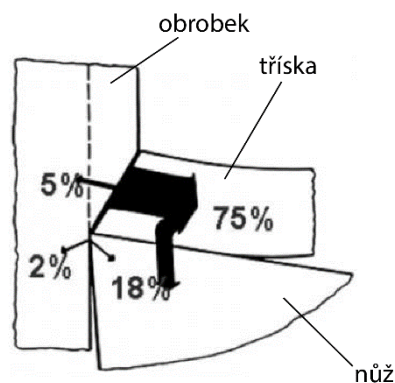
Okolní (konvektivní) okrajová podmínka

Důležitý je také únik tepla ze stroje jako celku do okolí. Intenzitu úniku tepla ovlivňuje konvektivní okrajová podmínka. Princip konvekce byl již vysvětlen dříve. Okrajové podmínky jsou například pohyby vzduchu v okolí stroje, teplota okolí, ale také chladicí systém stroje. Mezi chladicí systémy patří chlazení vnitřních zdrojů, vřetene, pohonů os a obráběcího procesu. Právě zjištění vlivu procesního chlazení je tématem této práce.

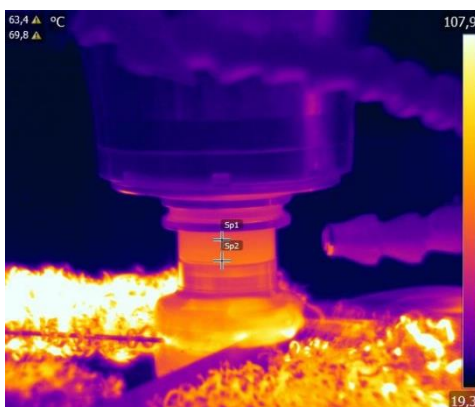


4. Tepelné chování OS při mokrém a suchém obrábění

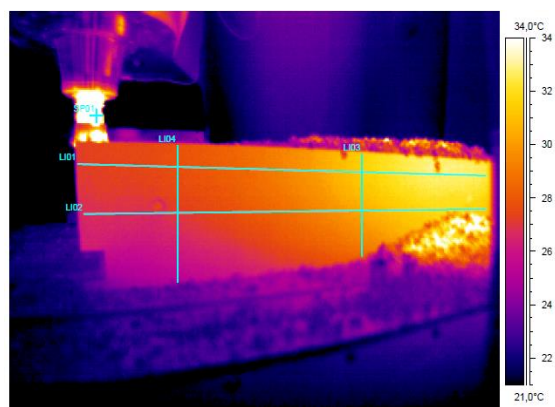
Teplo vzniklé při řezném procesu je odváděno do nástroje, obrobku, třísky a prostředí (znázorněno na Obr. 1, Obr. 2 a Obr. 3). Podíl jednotlivých složek je dán tepelnou vodivostí nástroje, obrobku, řeznými podmínkami, řezným procesem nebo také geometrií nástroje a jeho opotřebením. Největší část tepla (cca 75 – 80 %) je však odváděna z místa řezu třískou [1]. Na Obr. 2 je vidět usazování třísek v okolí řezu, na Obr. 3 usazování na pravé straně stolu.



Obr. 1: Odvod tepla z místa řezu při soustružení ([2] a upraveno)



Obr. 2: Teplotní pole v místě řezu [20]



Obr. 3: Teplotní pole v případě usazování třísek mimo místo řezu [20]



4.1. Mokrý obrábění

Základní způsob obrábění je tzv. mokré obrábění. V tomto případě jsou teplotní deformace částečně eliminovány intenzivní konvekcí způsobenou prouděním technické kapaliny.

4.1.1. Vlastnosti technických kapalin

Technické kapaliny lze rozdělit podle účinku na obráběcí proces do dvou skupin, a to na kapaliny s převažujícím chladícím účinkem a kapaliny s převažujícím mazacím účinkem. Úkolem kapalin je zajištění stálosti nástroje a kvality obrobené plochy při co nejmenší energetické náročnosti výroby [4], [5].

Kapaliny mají všeobecně tyto funkce:

- snížit tření mazáním, a tím vývin tepla
- odvádění tepla
- zajištění vyplavování a odvodu třísek z místa obrábění

V důsledku těchto funkcí dochází k:

- zlepšení kvality obrobeného povrchu
- zvýšení trvanlivosti nástroje
- zamezení zhoršení geometrie nástroje

Kromě chladícího, mazacího a čistícího účinku musí dále splňovat provozní stálost a zdravotní nezávadnost [4], [5].



Chladicí účinek

Technická kapalina musí odvádět teplo z prostoru obrábění. Požadavky na chladicí účinek kapaliny stoupají s množstvím vzniklého tepla. Odvod tepla docílíme přívodem kapaliny přímo na nástroj, obrobek a vznikající třísku. Kapalina teplo převezme a odchází zpět do nádrže. Při zpětném toku se ochlazuje samovolně předáváním tepla do okolního prostředí a částem stroje. K ochlazení kapaliny může také docházet za pomoci chladicího agregátu [4], [5], [6].

Chladicí účinek kapaliny závisí na jejích smáčecích schopnostech, výparném teple, rychlosti vypařování a na tepelné vodivosti. Čím jsou tyto veličiny větší, tím je chladicí účinek výraznější. Výparné teplo zvyšuje chladicí účinek, je však nežádoucí, a proto musí být výpary ihned odsávány do chladících nádrží, kde opět kondenzují. Chladicí účinek lze zvýšit rychlostí proudění, protože v jistém rozmezí platí, že čím je větší rychlost proudění, tím větší je součinitel přestupu tepla. Tato úměra však není lineární a při určité rychlosti proudění již nedochází k růstu chladicího účinku [4], [5], [6].

Mazací účinek

Mazací účinek je schopnost vytvořit na povrchu obrobku a nástroje velmi tenkou vrstvu, která brání přímému styku nástroje a obrobku a tím snižuje vzájemné tření. Se zvětšujícím mazacím účinkem kapaliny klesají řezné síly i spotřeba energie a stoupá kvalita obrobeného povrchu. Vysoký mazací účinek je proto vyžadován u dokončovacích nebo velmi složitých operací (protahování, výroba závitů a ozubení, ...) [4], [5], [6].

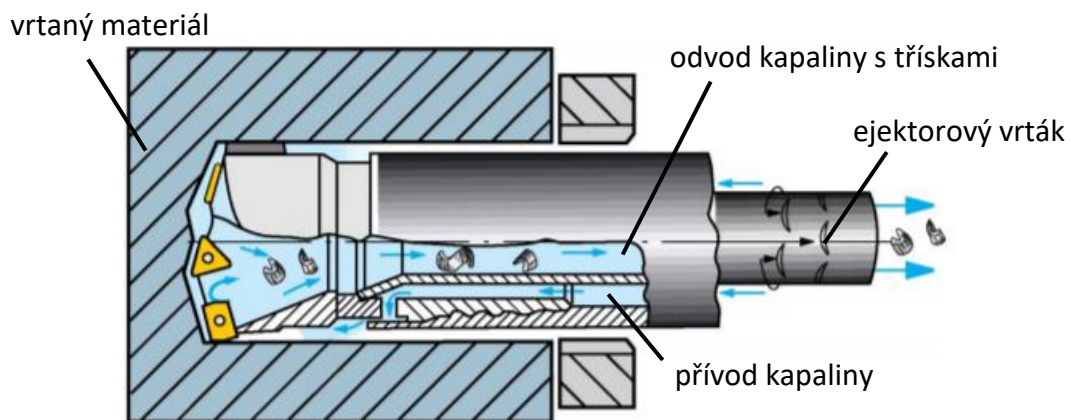
Mazací schopnost závisí na viskozitě použité kapaliny. Viskóznější kapaliny se však obtížněji dostávají mezi nástroj a obrobek a také ulpívají na třísce, čímž dochází k jejímu značnému úbytku [4], [5], [6].



Čistící účinek

Proud řezné kapaliny má za úkol odplavit třísky z místa obrábění a tím čistit nástroj i obrobek. Také zabraňuje poškození již hotového povrchu ulpělou třískou [4], [5], [6].

Největší význam má čistící účinek u hlubokého vrtání. Kapalina zde odvádí vzniklé třísky, protože geometrie nástroje to jinak neumožňuje. Příklad můžeme vidět u vrtání ejektorovým vrtákem na Obr. 4, kdy proud kapaliny strhává vznikající třísky, které jsou odváděny středem nástroje a nepřichází do styku s již obrobenou plochou [4], [5], [6].



Obr. 4: Ejektorový vrták [7]

Provozní stálost

Provozní stálost je vlastnost, která zaručuje neměnnost vlastností technických kapalin po dobu deklarovanou výrobcem.

Trvanlivost řezné kapaliny závisí na několika faktorech, jako je druh operace, při které je použita (soustružení, broušení, frézování atd.), materiál obrobku (ocel, litina atd.) a provoz (občasný, jednosměrný atd.). Čím je operace častější a náročnější, tím se více dostávají do řezné kapaliny nežádoucí nečistoty nebo bakterie. Proto je lhůta pro výměnu vodných roztoků a emulzí variabilní a pohybuje se kolem 3 – 6 týdnů, u kapalin olejového typu okolo 6 – 12 měsíců [8], [9].



Degradace olejové řezné kapaliny se projevuje pryskyřičnatými usazeninami, které mohou poškodit chod stroje. Dochází ke ztrátě vlastností kapaliny, např. zmenšení mazacího účinku, rozpad na složky, hnilobný zápach. V krajních případech může způsobovat korozi obrobku [8], [9].

Zdravotní nezávadnost

Požadavek na zdravotní nezávadnost řezných kapalin je velmi důležitý. Obsluha obráběcích strojů přichází do kontaktu s kapalinou po celou dobu výroby [4], [5].

Technická kapalina nesmí:

- být jedovatá
- být zdraví škodlivá
- zápachem zamořovat okolí
- obsahovat látky dráždící sliznice a pokožku

S technickými kapalinami je nutno zacházet podle bezpečnostních pokynů, které výrobce uvádí v technickém listu [4], [5].

Přiměřené náklady

Přiměřené náklady samozřejmě souvisí se spotřebou řezné kapaliny. Při rozboru nákladů je důležité nejdříve zhodnotit její vliv na obráběcí proces, tj. kvalitu obrobku, trvanlivost nástroje i spotřebu energie. Poté je třeba posoudit řeznou kapalinu s ohledem na spotřebu, provozní stálost a výměnu (také míru eliminace teplotních deformací [pozn. autora]). Nesmíme však také zapomenout na náklady spojené s likvidací použité kapaliny [4], [5].

Aby technické kapaliny splňovaly výše uvedené požadavky, musíme dodržovat instrukce na přípravu a použití uvedené v technickém listu výrobcem.

Při přípravě je velmi důležité dodržovat správnou koncentraci řezné kapaliny nejen pro chlazení nástroje, ale i k ochraně stroje před korozí. U většiny řezných kapalin



se doporučená koncentrace pohybuje okolo 5 – 7 %. Přesnou hodnotu koncentrace, které se snažíme dosáhnout, nalezneme v dokumentaci k výrobku. K zjišťování používáme refraktometr. V dokumentaci řezné kapaliny nalezneme údaj – faktor refraktometru. Pokud je faktor roven jedné, naměřená hodnota se rovná skutečné hodnotě koncentrace řezné kapaliny. Faktor refraktometru může mít i jinou hodnotu. V tomto případě musíme naměřenou hodnotu násobit tímto faktorem, abychom získali skutečnou koncentraci [10].

Z důvodu ověření výše uvedených vlastností byl vytvořen dotazník pro uživatele. Z dotazníkového šetření vyplývá, že pokud jsou dodržovány pokyny uvedené v technickém listu, kapalina tyto vlastnosti vykazuje. Dílny, které méně hledí na kvalitu obrobku, se pokyny víceméně neřídí a u kapalin může dojít k zhoršení jejího stavu. Ve všech experimentech, které byly provedeny v rámci bakalářské práce, byly dodržovány pokyny výrobce kapaliny.

4.1.2. Druhy řezných kapalin

Řezné kapaliny primárně dělíme na:

- řezné oleje – převažuje mazací účinek
- chladící kapaliny – převažuje chladící účinek

Jejich praktické využití se řídí hlavně tím, co pro náš obráběcí proces potřebujeme. Pokud potřebujeme dobré chladící vlastnosti, musíme použít kapalinu s vysokým stupněm tepelné vodivosti. Tento požadavek splňuje voda, která má ale špatnou mazací schopnost a způsobuje korozi u kovů. Naproti tomu máme olej, který má vysoký mazací účinek a chrání kovy před korozí. Oleje však vykazují nízkou tepelnou vodivost, a proto jejich chladící vlastnosti jsou minimální [4], [6].



U některých výrobních operací je však nutné splňovat mazací i chladící účinek. Proto moderní řezné kapaliny vykazují obě vlastnosti a postupně jsou stírány rozdíly mezi jednotlivými skupinami [4], [6].

Na základě složení můžeme řezné kapaliny dělit do těchto skupin:

- vodné roztoky
- emulzní kapaliny
- mastné oleje
- zušlechtěné mastné oleje
- syntetické kapaliny

Vodné roztoky

Vodné roztoky jsou nejjednodušší řezné kapaliny. Základem je voda, která vyžaduje řadu úprav. Musí být změkčována a poté jsou do ní přidány přísady pro zlepšení smáčivosti a zabránění pěnivosti. Také musí obsahovat látky, které omezí korozi obrobku. Vodný roztok musí být vždy alkalický [4].

U tohoto druhu kapalin hrozí množení anaerobních bakterií, které způsobují tvorbu kalů a zápachu [4].

Emulzní kapaliny

Emulzní řezná kapalina je disperzní soustava dvou látek, které jsou vzájemně nerozpustné. Jedna tvoří mikroskopické kapky, které jsou rozptýleny ve druhé kapalině. Obvykle se jedná o olej ve vodě za použití tzv. emulgátoru. Emulgátor je organická látka, která zmenšuje povrchové napětí mezi kapalinami [4].

Emulzní kapaliny spojují chladící účinek vody s mazacím účinkem oleje. Velikost chladícího účinku závisí na koncentraci emulze. S rostoucí koncentrací emulgačního prostředku chladící účinek klesá. Mazací účinek je úměrný koncentraci a vlastnostem



emulgačního prostředku. Schopnost ochrany závisí na hodnotě pH směsi. Emulze o hodnotě pH = 8 – 9 zajišťuje dostatečně velkou ochranu proti korozi obrobku (slitiny železa) [4].

Emulzní kapaliny zahrnují asi 80 % sortimentu řezných kapalin [4].

Emulgační prostředky musí vykazovat stálost vlastností i při vysokých tlacích. Provozní vlastnosti emulzí závisí na jejich přípravě. Je třeba respektovat určitý postup:

- k přípravě použít upravenou vodu (změkčenou, s přísadami)
- emulgační přípravek přidávat pozvolna za stálého míchání
- koncentraci výsledné emulze volit podle druhu operace; většinou se pohybuje v rozmezí 2 – 10 % [4]

Mastné oleje a tuky

Mastné oleje a tuky jsou látky živočišného a rostlinného původu. Mají podobné vlastnosti jako minerální oleje. Oproti minerálním olejům mají menší povrchové napětí a tím i lepší smáčivost. To přispívá k účinnějšímu odvodu tepla [4].

Mezi velké nevýhody těchto kapalin patří sklon ke stárnutí. Zvyšuje se jejich kyselost a tvoří se pryskyřičné látky. Mezi mastné látky užívané při obrábění patří řepkový olej, ricinový olej a lněný olej [4].

Minerální oleje

Minerální oleje jsou vyráběny z ropy. Vykazují dobré mazací vlastnosti, ale horší chladicí účinek. Jsou odolné proti stárnutí a mají ochrannou funkci [4].

Z důvodu velmi dobrých provozních vlastností jsou minerální oleje využívány jako základ řezných olejů [4].



Řezné oleje

Při výrobě řezných olejů jsou používány minerální oleje, které jsou zušlechťovány. Přísadami jsou zlepšovány některé vlastnosti, například zvýšení tlakové únosnosti nebo mazacího účinku [4], [6].

Mezi přísady patří:

- mastné látky
- organické sloučeniny
- pevná maziva

Do první skupiny spadají zmýdelnitelné mastné oleje, mastné kapaliny nebo syntetické estery. Tyto látky zvyšují přilnavost kapaliny ke kovu a zlepšují mazací účinek, ne však za extrémních tlaků [4], [6].

Ve druhé skupině jsou organické sloučeniny určitých prvků, například síry, chloru a fosforu. Všechny tyto přísady jsou vysokotlaké. Na povrchu bříty i obrodku se vytvoří vrstvička kovových mýdel, která zabrání svarům a usnadňuje klouzavý pohyb třecích ploch. Sloučeniny obsahující chlor zmenšují tření, účinek však klesá při teplotách nad 400 °C. Ostatní sloučeniny jsou účinnější [4], [6].

Do třetí skupiny patří pevná maziva. Při obrábění působí mechanickým účinkem. Svou afinitou ke kovu vytváří na povrchu mezní vrstvu, která je odolná vůči tlakům a zlepšuje mazací schopnosti kapaliny. Mezi pevná maziva patří grafit a sirník molybdenu. Nevýhodou je, že se v kapalině nerozpustí, a proto se musí udržovat v rozptýleném stavu [4], [6].

Veškeré přísady musí být vybírány tak, aby nepodporovaly korozi a nebyly zdravotně závadné [4], [6].



Syntetické a polosyntetické kapaliny

Syntetické kapaliny neobsahují minerální oleje. Vyznačují se velkou provozní stálostí. Jejich chladicí a mazací účinky však nejsou větší než u minerálních olejů [4], [6].

Aplikace syntetických kapalin je proti kapalinám na bázi oleje ekonomicky výhodná. Navíc rychle odvádí teplo z místa řezu, má dobré čistící vlastnosti a jednoduchou přípravu. Další výhodou aplikace je, že kapalina je průsvitná a umožňuje sledování procesu obrábění [4], [6].

Voda se v syntetických kapalinách jednoduše rozptýlí. Jelikož má voda tendenci se vypařovat, a tím zvyšovat koncentraci kapaliny, musí být koncentrace neustále kontrolována. Zvýšení koncentrace znamená zvýšení hodnoty pH. V případě extrémní hodnoty pH může dojít k alergické reakci u obsluhy stroje [4], [6].

Pokud v syntetických kapalinách rozpustíme olej získáme polosyntetickou řeznou kapalinu. Ta má většinou podobné vlastnosti jako syntetická kapalina, navíc má lepší mazací schopnost. U některých operací je použití těchto kapalin výhodnější, například u broušení [4], [6].

S postupným vývojem strojů se vyvíjí i nové možnosti chlazení a mazání při procesu obrábění. Mezi novinky v této oblasti patří například chlazení různými plyny, které by mohly kapaliny nahradit. Plyn se aplikuje pod vysokým tlakem a odvádí třísky z místa řezu. Nejčastějším plynným médiem je vzduch, oxid uhličitý a kapalný dusík [6].

Kryogenní chlazení neboli chlazení kapalným dusíkem je velmi populární metoda chlazení. Jelikož se kapalný dusík musí přivádět při teplotě až $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ a je zapotřebí složitý systém přívodů a skladování, je tato metoda nákladná. Další metodou kryogenního chlazení je chlazení paprskem CO_2 při teplotě $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$. Největší potenciál tohoto chlazení je při obrábění slitin titanu a niklu nebo duplexních



ocelí. Vysoké termické zatížení břitu vede při tomto obrábění k extrémně rychlému opotřebení až jeho destrukci [6].

4.1.3. Přehled řezných kapalin na trhu

Finanční náklady na pořízení kapaliny se liší podle typu. Ze sortimentu řezných kapalin byly pro srovnání vybrány od každého typu ty nejprodávanější. Přehled je uveden v Tab. 1.

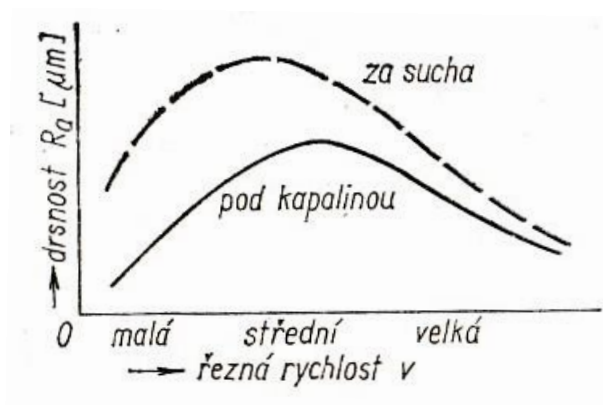
Tab. 1: Přehled typů řezných kapalin

druh	výrobce a typ	refrakční index	cena Kč za 1l	zdroj
řezný sprej	Metaflux 70-27	bez přípravy	1453	[21]
řezný sprej	Würth Perfect	bez přípravy	1087	[22]
emulgační olej	Ekolube Ero SB	koncentrace 3 – 8 %	95	[23]
emulgační olej	Quakercool 3530 FF	1,6	164	[24]
řezný olej	Total Valona MS 7023	bez přípravy	111	[25]
chladící kapalina	Morris Supercut 1000	konc. 5 – 10 %	170	[26]
chladící kapalina	Paramo Ero 1070	konc. 4 – 7 %	100	[27]
řezná pasta	Würth Cut + Cool	bez přípravy	1070	[28]
řezná emulze	Total Lactuca WBA 5400	1,4	178	[29]



4.1.4. Vliv řezné kapaliny

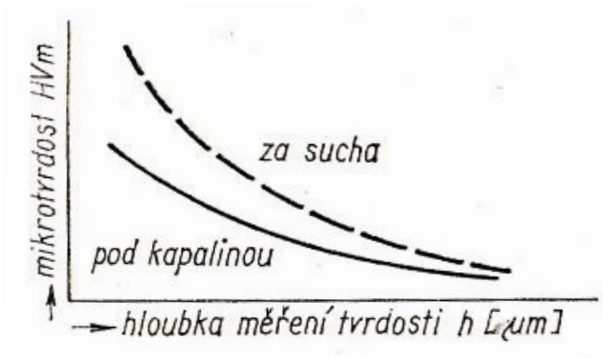
Při použití řezné kapaliny se snižuje plastická deformace v obráběném materiálu. Proto má řezná kapalina kladný vliv na jakost obrobeného povrchu. Při malých až středních řezných rychlostech se drsnost výsledného povrchu sníží až o 50 % oproti obrábění za sucha. S dalším růstem řezné rychlosti je tento účinek minimalizován. Vliv řezné kapaliny na drsnost je znázorněn na Obr. 5 [11].



Obr. 5: Vliv řezné kapaliny [11]

Vliv na zpevnění obrobeného povrchu

Mazací účinek řezné kapaliny zmenšuje úroveň a hloubku ztvrdnutí obrobeného povrchu. Porovnání s obráběním za sucha je na Obr. 6 [11].

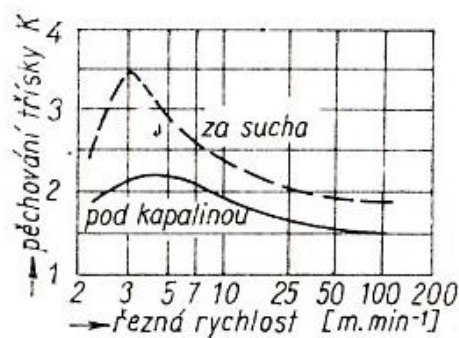


Obr. 6: Vliv řezné kapaliny na hloubku ztvrdnutí [11]



Pěchování třísky

Řezná kapalina minimalizuje pěchování třísky. Při větších posuvech a řezných rychlostech je tento účinek menší. Vliv řezné kapaliny na pěchování třísky je znázorněn na Obr. 7 [11].

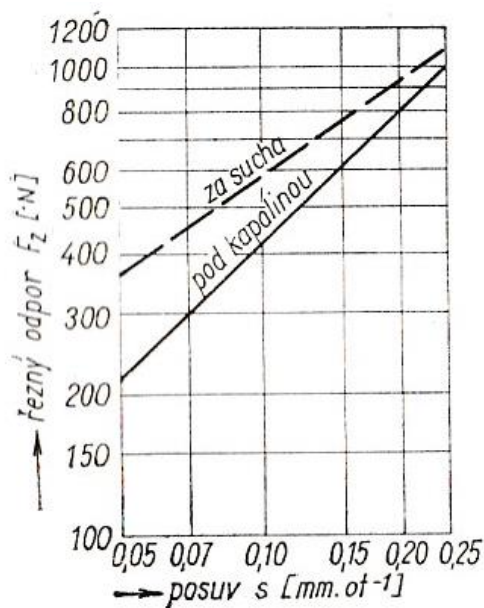


Obr. 7: Vliv řezné kapaliny na pěchování třísky [11]

Řezný odpor

Velikost řezného odporu ovlivňuje hlavně mazací účinek řezné kapaliny. U kapalin s převažujícím mazacím účinkem je snížení řezného odporu až o 25 %, u kapalin s převažujícím chladícím účinkem je snížení až o 10 %. Pokud zvolíme úběr třísky o malém průřezu, můžeme dosáhnout snížení až o 50 %. Při velkých průřezech třísky je tento účinek nulový.

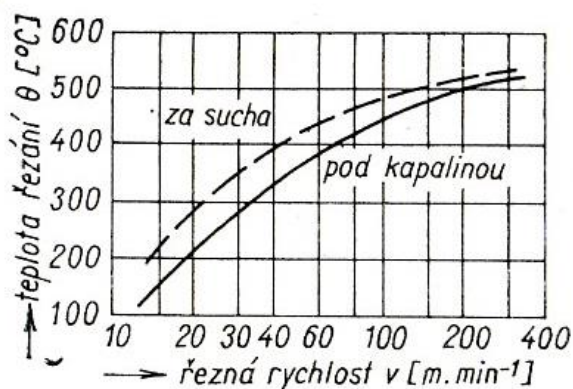
Velikost řezného odporu lze také ovlivnit posuvem. Závislost řezného odporu na posuvu můžeme vidět na Obr. 8 [11].



Obr. 8: Vliv řezné kapaliny na řezný odpor [11]

Teplota řezání

Zmenšením plastických deformací a použitím řezné kapaliny s chladícím účinkem výrazně snížíme teplotu řezání. Výrazný rozdíl oproti obrábění za sucha je při nižších rychlostech. Při zvýšení rychlosti je rozdíl nepatrný. Vliv řezné kapaliny na teplotu řezání je znázorněn na Obr. 9 [11].

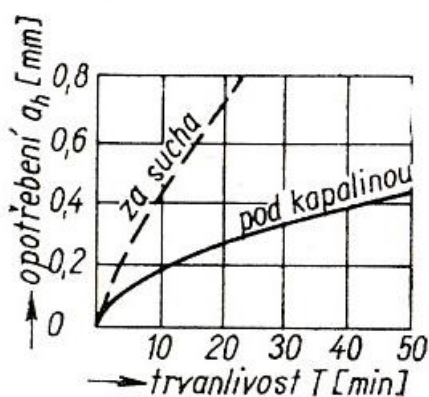


Obr. 9: Vliv řezné kapaliny na teplotu řezání [11]



Trvanlivost nástroje

Snížení teploty řezání se značně projeví na trvanlivosti nástroje a na snížení teplotních deformací. U rychlořezných nástrojů je 5 až 8násobné zvýšení trvanlivosti působením řezné kapaliny. Průběh opotřebení je vidět na Obr. 10 [11].



Obr. 10: Vliv řezné kapaliny na průběh opotřebení [11]

Negativní účinky

Negativní účinek řezné kapaliny je hlavně zjevný v oblasti existence nárůstku při nižší řezné rychlosti. Působením řezné kapaliny dochází k rychlejšímu uvolnění nárůstku, který působí abrazivně a mechanicky na břit nástroje. Zároveň umožní difuzi [11].

Řezná kapalina v oblasti kladného vlivu zajistí zvýšení řezné rychlosti o 10 až 25 % při zachování stejné trvanlivosti jako při suchém obrábění [11].

Obrázky použité v této kapitole jsou pouze ilustrativní a průběhy grafů závisí na mnoha dalších parametrech.



4.2. Suché obrábění

Další ze způsobů obrábění je tzv. suché obrábění. Při tomto způsobu není použita žádná kapalina. Eliminace tepelné deformace je možné zajišťovat pomocí softwarové kompenzace. Je to jedna z nejrozšířenějších metod, a to hlavně díky nízkým nákladům a snadné implementaci do řídicích systémů stroje. Současné modely softwarové kompenzace, které nalezneme ve většině obráběcích strojů českých i zahraničních výrobců, však nejsou dostatečně robustní. Nejsou totiž schopny s dostatečnou přesností simulovat celé spektrum pracovních režimů stroje a proměnné vlivy okolí. Proto v přesnosti a robustnosti kompenzačních algoritmů existují značné rezervy [3].

4.3. Stav řešené problematiky

Problematika rozdílu v nákladech na suché a mokré obrábění zatím byla (z hlediska veřejných publikací) řešena jen velmi okrajově. Jednou z firem, která ji řešila, je firma SKF. Ta se ovšem zabývala pouze rozdílem v nákladech bez ohledu na kvalitu obrobku. Výsledek jejich experimentu je vidět na Obr. 11.

Porovnáváno bylo obrábění nasucho, namokro, vnější MQL a vnitřní MQL. Řezné podmínky byly na obráběcím centru IBARMIA ZV 25 u všech měření nastaveny takto [12] :

- otáčky 2228 min⁻¹
- řezná rychlost 70 m/min
- posuv na jeden břit 0,05 mm/břit
- hloubka řezu 8 mm
- šířka řezu 4 mm



	Chod nasucho	Řezná kapalina	MQL – vnější	MQL – vnitřní
Životnost nástroje/délka třísky (m)	12,4	44	55,2	96,8
Objem třísky (cm ³)	397	1408	1766	3098
Čas obrábění (životnost nástroje v minutách)	1'46''	6'17''	7'53''	13'50''
Objemová rychlost řezu (cm ³ /min)	14,2	14,2	14,2	14,2
Cena nástroje (€)	60	60	60	60
Náklady za nástroje €/1000 cm ³	153	42,16	33,97	19,37
Cena kapaliny €/1000 cm ³	-	0,20	0,74	0,12
Cena energie €/1000 cm ³	0,68	1,34	0,90	0,90
Stlačený vzduch €/1000 cm ³	-	-	0,17	0,10
Cena systému €/1000 cm ³	-	0,88	0,27	0,44
Zpracování kapaliny €/1000 cm ³	-	0,12	-	-
Čištění filtrů €/1000 cm ³	-	0,49	-	-
Celkové náklady €/1000 cm³	153,68	44,99	36,05	20,93

Obr. 11: Výsledky experimentu firmy SKF [12]

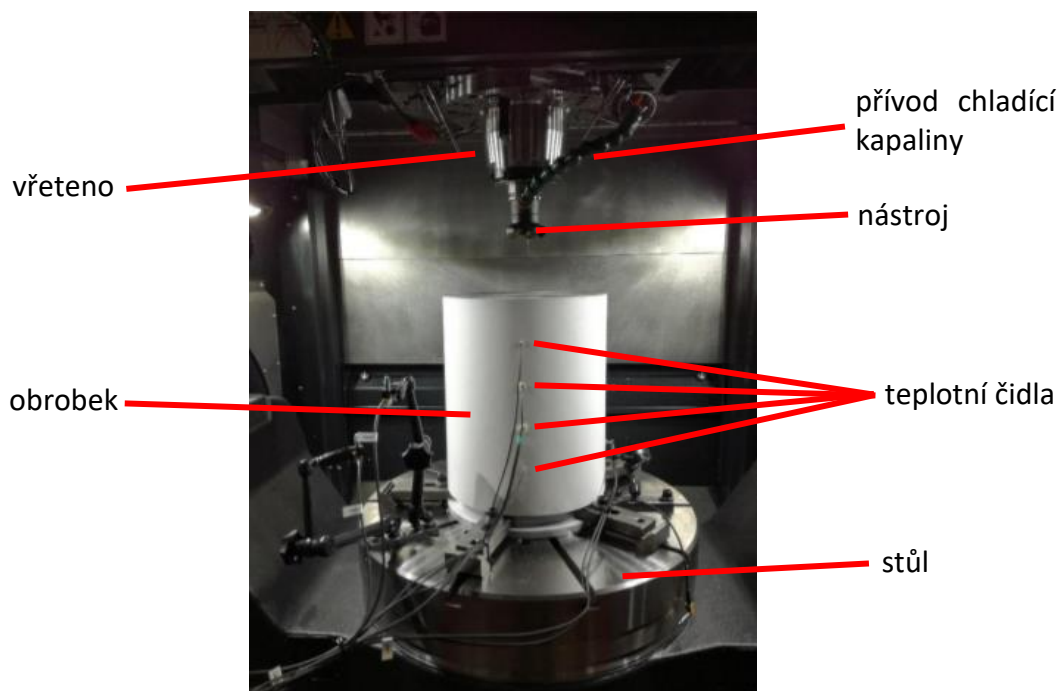


5. Vlastní řešení: Experimenty

Experimenty, ze kterých bakalářská práce vychází, byly provedeny v rámci dřívějšího výzkumu, který je popsán ve zprávě [3]. V rámci experimentů bylo získáno mnoho dat, která sloužila k dalším výzkumům. Pro tuto práci je podstatné pouze měření teplot a deformací. Informativně je dále popsán celý experiment. Naměřená data byla předána v surové podobě bez důkladnějšího zpracování. Měřené veličiny byly pouze pojmenovány.

5.1. Popis experimentů

K zjištění teplotně mechanického chování stroje, nástroje a obrobku bylo provedeno 5 měření. Při suchém i mokřém obrábění nůž odebíral třísky o šířce 1,5 mm a 3 mm. Poslední měření bylo tzv. Air Cutting – nástroj jezdí po obráběcí trase bez přítomnosti obrobku. Tím jsou eliminovány deformace vzniklé v důsledku obrábění. Všechny experimenty proběhly na pětiosém obráběcím centru.



Obr. 12: Uspořádání experimentu ([3] a upraveno)



Popis obráběcího stroje:

- pětiosé obráběcí centrum (v experimentech použity 3 osy)
- typ horní gantry
- rozměry stroje 4200 × 3500 × 3530 mm
- jmenovité otáčky 800 min⁻¹

Jako obrobek byl použit válec z konstrukční oceli o průměru 300 mm a výšce 400 mm (viz Obr. 12 a Obr. 17). Pro všechny experimenty byl použit jednotný nástroj – fréza Sandvik CoroMill® 245 (Obr. 13) s vyměnitelnými destičkami (parametry uvedeny v Tab. 2). Parametry obrábění jsou uvedeny v Tab. 3 [3].

Tab. 2: Parametry nástroje

Označení frézy	Sandvik CoroMill® 245
Průměr frézy	63 mm
Úhel nastavení	45°
Počet zubů	5



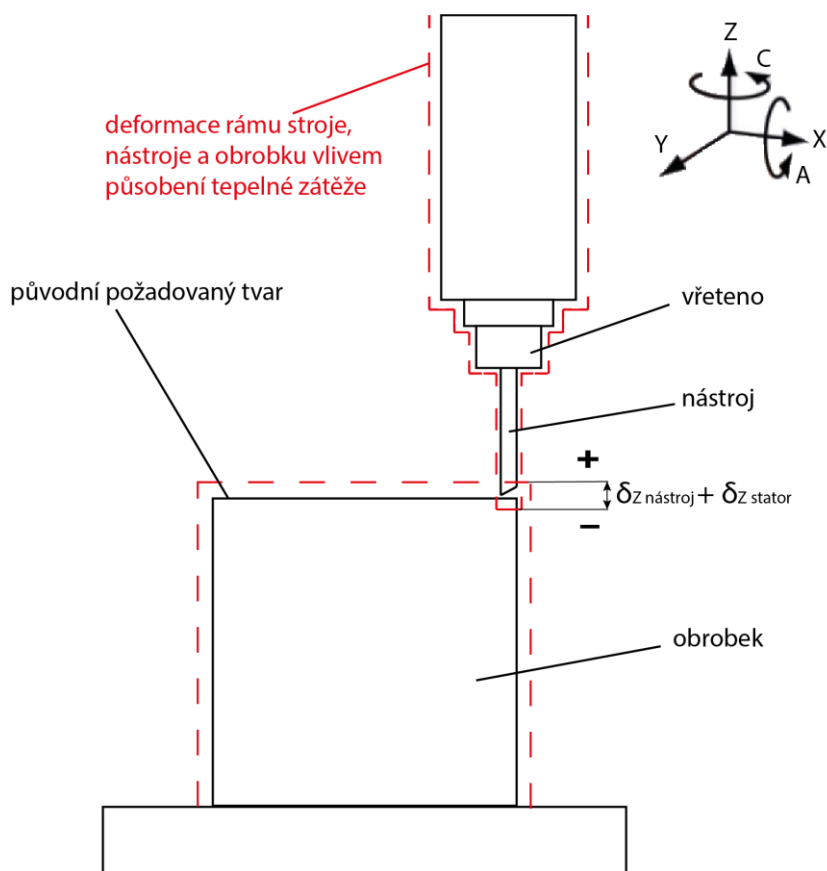
Obr. 13: Fréza Sandvik CoroMill® 245 [3]



Tab. 3: Parametry experimentu

číslo experimentu	1	2	3	4	5 (Air Cutting)
výkon [kW]	1,52	3	1,52	3	0 ¹
otáčky [ot/min]	758	758	758	758	758
úběr třísky [mm]	1,5	3	1,5	3	-
přívod chladicí kapaliny	NE	NE	ANO	ANO	NE
počet použitých nástrojů	2	3	1	1	1

Uspořádání celého experimentu je znázorněno na Obr. 12 a 14. V blízkosti zdrojů a propadů tepla (ložiska vřetena, pohony os, chladicí okruhy atd.) byla umístěna teplotní čidla (Pt100, třída přesnosti A, 3850 ppm/K). Teploty naměřené těmito čidly slouží primárně k diagnostice a jsou zavedeny do řídicího systému [3].



Obr. 14: Celkové schéma experimentu

¹ naměřený výkon 0 kW, skutečný není známý



Stroj byl za účelem zjištění teplotního chování vybaven také bezkontaktním snímačem teploty (Optris CT LT na bázi snímání infračerveného spektra) (viz. Obr. 15). Tento snímač kontinuálně a dostatečně přesně měřil a zaznamenával teplotu nástroje během experimentu. Teplota byla snímána IR senzorem, který byl pomocí speciálního přípravku připevněn na vřeteník. Tělo senzoru a kabel chránila flexibilní hadice. Tato flexibilní hadice se často používá například pro přívod chladicí kapaliny. IR senzor byl namířen na válcovou část nástroje. Z důvodu bezkontaktního měření byly nástroje opatřeny páskou s definovanou emisivitou. V průběhu experimentu se objevoval problém se zanášením IR čidla kovovým prachem. Tento problém byl řešen překrytím čidla potravinářskou folií, která je pro infračervené záření o vlnové délce 7 až 14 μm , na rozdíl od skla, propustná. Výrobce tento problém řeší krytem optiky senzoru z germaniového skla [3].

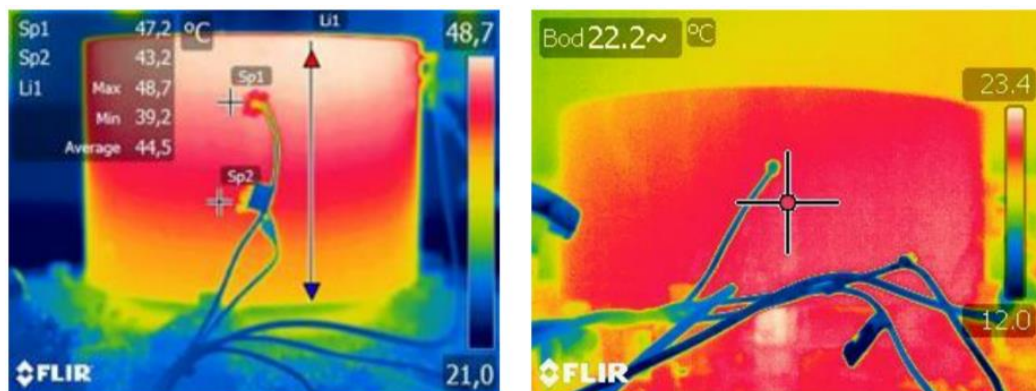


Obr. 15: IR čidlo Optris CT (vlevo), box s elektronikou (vpravo) [3]

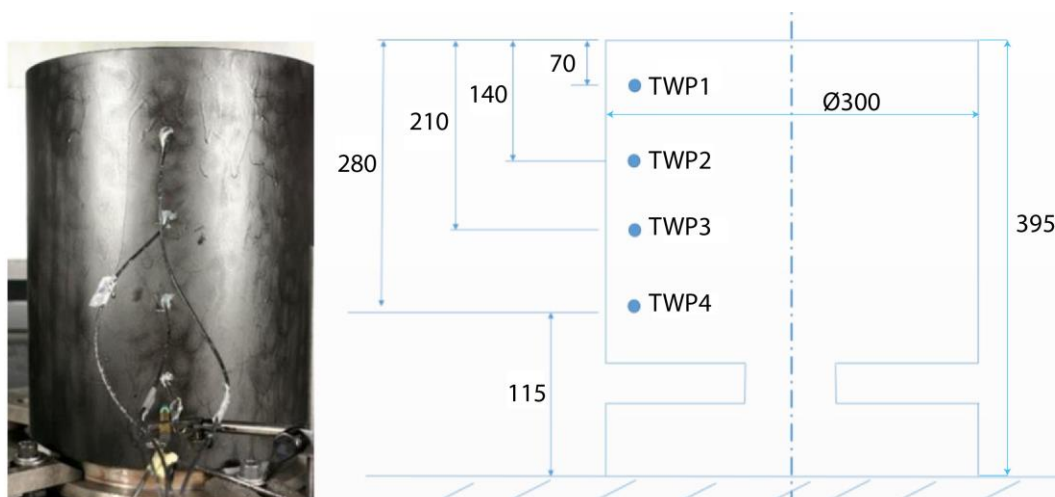
Obrobek byl před obráběním nastříkán barvou o definované emisivitě 0,96. V průběhu experimentu byly pořizovány termografické snímky pomocí termovizní kamery FLIR T640, která má rozlišení 640 × 480 bodů, snímací frekvenci 30 snímků za sekundu a citlivost 0,035 °C (ukázka snímků na Obr. 16). V obrobku byly dále 4 otvory se 4 odporovými teplotními senzory (Pt100, třída přesnosti A, 3850 ppm/K). Umístění snímačů je znázorněno na Obr. 17. Tyto teploty jsou označeny *TWP1*, *TWP2*, *TWP3*, *TWP4*. Sensory byly zavrtány do obrobku v hloubce 10 mm. Po postupném odebrání vrstev materiálu byly horní teplotní senzory demontovány, aby nedošlo k jejich



poškození. Dále pak bylo na obrobku připraveno několik otvorů pro měření teplotních deformací obrobku ve směru strojní osy Z vůči rovině stolu. Toto měření probíhalo několika senzory (kontaktní indukční snímače posunutí od firmy MESING), které byly upnuty do magnetických stojánků na desce stolu [3].



Obr. 16: Porovnání teplotních polí při suchém (vlevo) a mokřém (vpravo) obrábění [20]



Obr. 17: Umístění odporových teplotních čidel v obrobku [3]

Teplotní deformace na špičce nástroje a statorové části vřetena byly měřeny ve směru strojní osy Z také pomocí indukčních kontaktních senzorů od firmy MESING.



Stejně jako měření teplotních deformací obrobku, i v tomto případě jsou snímače upnuty do magnetických stojánků na desce stolu [3].

Veškeré experimenty byly prováděny při čelním frézování. Postup byl pro všechna měření totožný. Před zahájením musel být stroj v ustáleném stavu s okolním prostředím. Průběh celého experimentu byl řízen pomocí připraveného NC programu [3].

Počátek měření probíhal v měřicí pozici (v pracovním prostoru mimo obrobek). Zde proběhl odečet počátečních deformací na špičce nástroje a statorové části vřetena, který trval 10 sekund. Poté nástroj odjel vykonat jeden cyklus obrábění. Po odebrání jedné vrstvy materiálu se vracel zpět do měřicí pozice pro záznam změn deformací. Jeden cyklus úběru materiálu trval cca 20 minut a celý měřicí cyklus cca 30 sekund. Tento proces se opakoval až do dosažení přibližné termodynamické rovnováhy stroje s aktivními zdroji a propady tepla (cca 4-5 hodin). Po ukončení frézovacích operací nástroj zůstal v měřicí pozici pro záznam změn teplotních deformací při chladnutí celého systému. Po teplotním ustálení stroje, nástroje a obrobku s okolím byl test ukončen [3].

5.2. Výsledky experimentů

5.2.1. Suché obrábění – úběr třísky 1,5 mm

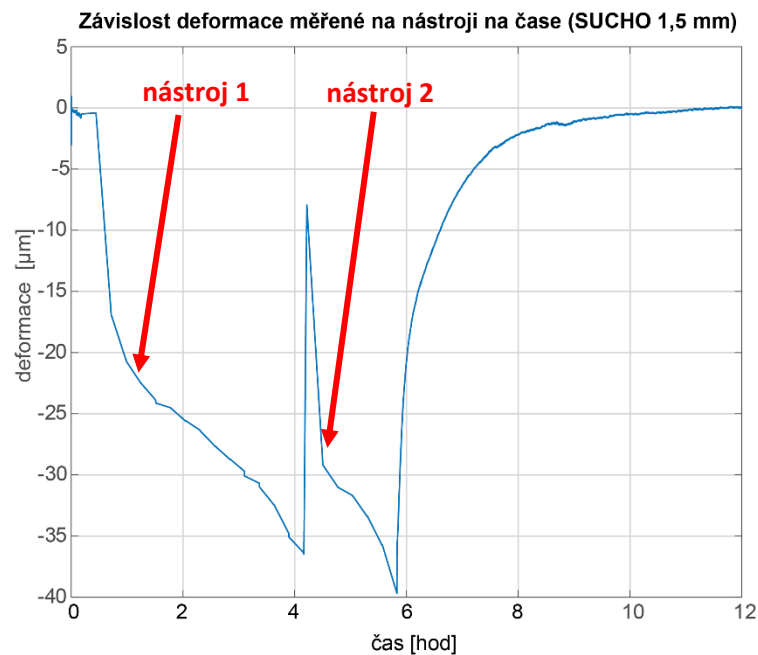
Do 0,5 hodiny od začátku měření probíhala instalace celého experimentu. Výkyvy, které se v tomto intervalu objevily na průbězích deformací a teplot, jsou způsobeny právě touto instalací. Poté došlo ke spuštění vřetene a otáčky se ustálily na hodnotě 758 ot/min. Na této hodnotě setrvaly až do konce obrábění, tedy do 5,75 hodiny od začátku měření.



Deformace nástroje

Průběh deformace měřené na nástroji (deformace systému stroj + nástroj) v závislosti na čase je vidět na Obr. 18. Po spuštění vřetene (0,5 hodiny) začalo frézování obrobku. Poté je v grafu deformace vidět, jak byl nástroj zatěžován. Okolo 2,25 hodiny došlo k mírnému ustálení, které bylo narušeno otupením nástroje. Otupení vedlo opět k prudkému nárůstu deformace. Když deformace dosáhla hodnoty $-36,3 \mu\text{m}$, nástroj byl vyměněn. Protože nový nástroj byl špatně seřízen nebo byl již deformován, deformace se nevrátila na hodnotu $0 \mu\text{m}$ ale pouze na $-7,9 \mu\text{m}$.

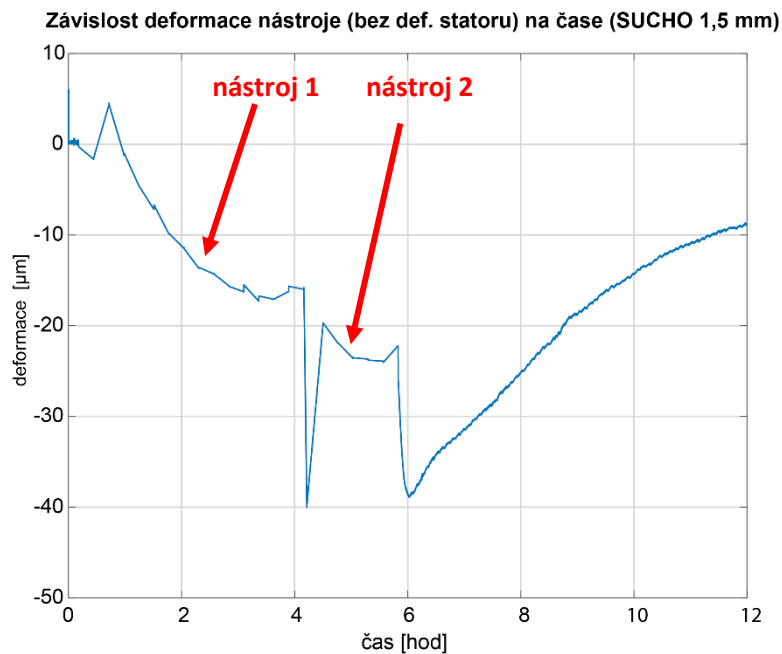
Po výměně byl nástroj opět přesunut do záběru. V grafu se to projevilo opět lineárním nárůstem deformace, který vrcholil pozvolným ustalováním. To bylo opět narušeno otupením nástroje při deformaci $-31,5 \mu\text{m}$ (5 hodin). Otupení pokračovalo až do dosažení deformace $-39,7 \mu\text{m}$ (5,75 hodiny). Dále by zřejmě následovala opět výměna nástroje, ale již nebylo nutné dále obrábět. Experiment byl tedy ukončen a na grafu je výborně vidět pozvolný návrat na nulovou deformaci.



Obr. 18: Závislost deformace měřené na nástroji na čase pro suché obrábění (1,5 mm tříška)



Odečtením deformace statoru získáme skutečnou deformaci nástroje, která je zobrazena na Obr. 19. V důsledku instalace experimentu deformace nástroje rostla ještě před začátkem obrábění. Po nastavení pracovních otáček deformace lehce stoupla do plusových hodnot až na 4 μm . Poté již pozvolna rostla v mínusových hodnotách až do první výměny nástroje (-16,6 μm). Během této výměny deformace prudce narostla (-39,7 μm) a poklesla na -20,3 μm . Dále deformace pozvolna stoupala (-24 μm). Těsně před koncem obrábění deformace lehce poklesla. Po ukončení deformace prudce rostla a poté pozvolna klesala.



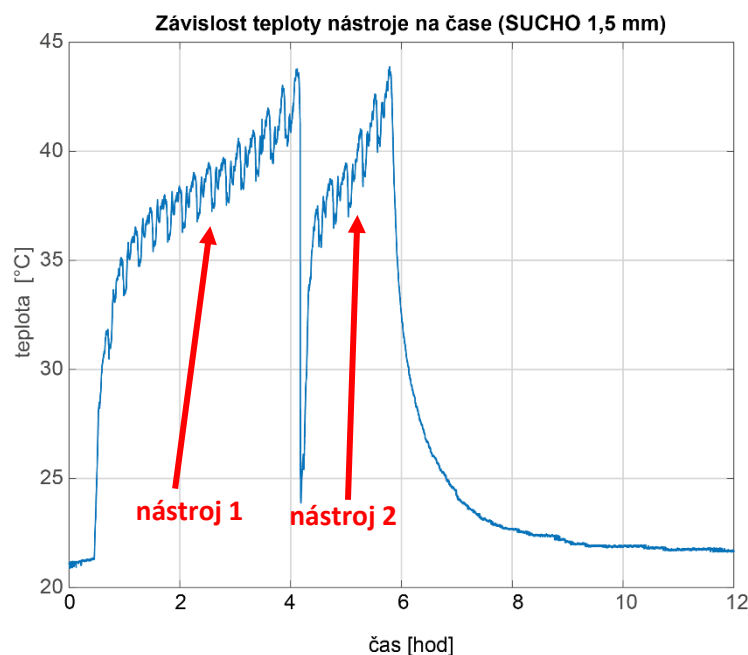
Obr. 19: Skutečná deformace nástroje



Teplota nástroje

Průběh teploty nástroje v závislosti na čase je vidět na Obr. 20. Průběh budeme řešit opět až po spuštění vřetene (0,5 hodiny). Nejdříve je v grafu vidět prudký nárůst z teploty okolí (21 °C) na teplotu 31 °C. Tento nárůst je způsoben najetím nástroje do záběru a dotykem na roztočený obrobek. Poté probíhalo kolísavé ustálení, které bylo narušeno otupením nástroje. To způsobilo opět nárůst teploty až na 43,75 °C. Poté bylo nutné nástroj vyměnit. Výměnou nástroje došlo k okamžitému poklesu na teplotu nového nástroje (23,9 °C).

Po najetí nového nástroje do záběru opět teplota prudce narostla. Ustalování průběhu teploty bylo narušeno otupením nástroje, a to způsobilo nárůst na teplotu 43,8 °C. Poté již bylo obrábění ukončeno a teplota pozvolna klesala na teplotu okolí.



Obr. 20: Závislost teploty nástroje na čase pro suché obrábění (1,5 mm tříska)

Na průběhu teploty je možné pozorovat zpoždění oproti průběhu deformace nástroje. Například inflexe průběhu deformace po 2 hodinách od začátku měření se na průběhu teploty nástroje promítla až o 0,75 hodin déle. Zřejmě je to způsobeno tím, že



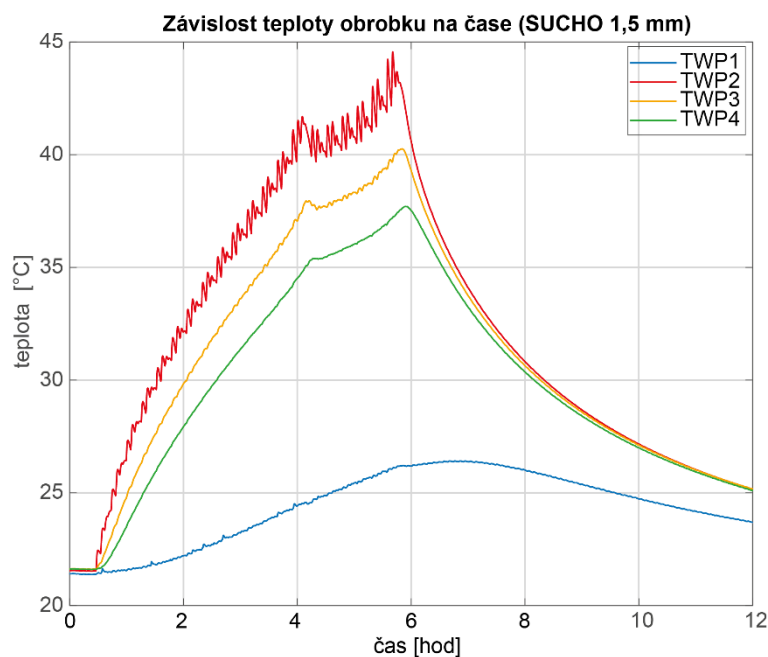
teplota byla měřena poměrně vysoko na nástroji a nárůst teploty se v místě měření projevil později než nárůst deformace, což bylo dáno rychlostí šíření tepla.

Teplota obrobku

Průběh závislosti teploty obrobku na čase je vidět na Obr. 21. Teplota byla měřena pomocí čidel, která byla umístěna na obrobku (Obr. 17).

Teplotní čidlo *TWP1* naměřilo průběh teploty, který byl ovlivněn teplotami okolních částí a jen minimálně od samotného obráběcího procesu.

Na průbězích, které byly naměřeny ostatním čidly, bylo patrné ovlivnění obráběcím procesem. Všechny tři charakteristiky mají podobný průběh, proto bude dále popsán pouze průběh teploty *TWP2*. Čidlo *TWP2* bylo nejbližší místu obrábění, proto je průběh nejvíce ovlivněn.



Obr. 21: Závislost teploty obrobku na čase pro suché obrábění (1,5 mm tříska)



Po spuštění vřetene (0,5 hodiny) teplota prudce stoupala z teploty okolí (21,5 °C). Tento nárůst byl přerušen výměnou nástroje (4 hodiny). Před výměnou teplota obrobku dosahovala 41 °C. Při výměně obrobek nepatrně zchladl. Po opětovném spuštění obrábění nastal postupný nárůst teploty na 44,5 °C (6 hodin). Při této teplotě byl experiment ukončen a obrobek postupně chladl až na teplotu okolí.

Shrnutí experimentu

Důležitá data, která vyplývají z experimentu jsou uvedena v Tab. 4.

Tab. 4: Důležitá data z experimentu pro suché obrábění (úběr 1,5 mm)

Max. deformace stroj + nástroj	- 40 μm
Max. teplota nástroje	43,8 °C
Max. teplota obrobku	44,5 °C
Počet potřebných nástrojů	2

5.2.2. Suché obrábění – úběr třísky 3 mm

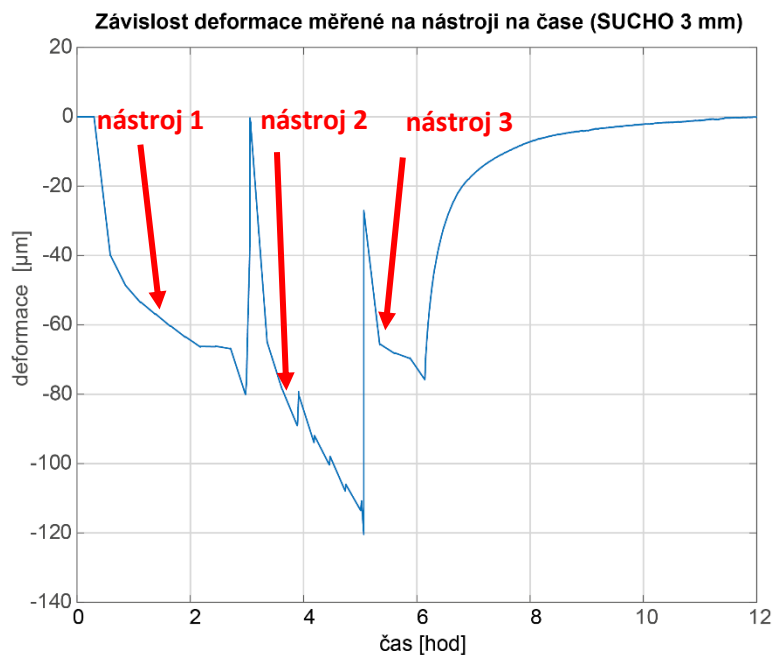
Do 0,25 hodiny od začátku měření probíhala instalace celého experimentu. Poté došlo ke spuštění vřetene a otáčky se ustálily na hodnotě 758 ot/min. Na této hodnotě setrvaly až do konce obrábění, tedy do 6 hodin od začátku měření.

Deformace nástroje

Průběh deformace měřené na nástroji je zobrazen na Obr. 22. Před spuštěním vřetene byla deformace nulová. Z důvodu najetí nástroje do místa řezu (0,5 hodiny) začala prudce narůstat. Po 2 hodinách od začátku měření došlo k ustálení deformace, které bylo narušeno otupením nástroje. V důsledku otupení po 2,75 hodiny od začátku deformace prudce narůstala na -80 μm. Poté bylo nutné vyměnit nástroj, kdy došlo



k dokonalému návratu deformace na nulovou hodnotu (3 hodiny). Opětovné najetí nástroje do záběru způsobilo prudký lineární nárůst deformace na hodnotu $-88,4 \mu\text{m}$ (3,75 hodiny). Následně se na průběhu opět projevilo otupení nástroje. Deformace dále rostla až na hodnotu $-120,3 \mu\text{m}$, kdy byla nutná výměna nástroje (5 hodin). Výměnou nástroje se ale deformace vrátila pouze na hodnotu $-27,5 \mu\text{m}$. Po výměně byl nástroj prudce zatěžován až do okamžiku, než se opět otupil. Při maximálním otupení, deformace dosahovala hodnoty $-75,6 \mu\text{m}$. V tuto chvíli bylo obrábění ukončeno a deformace se pozvolna vrátila na nulovou hodnotu.

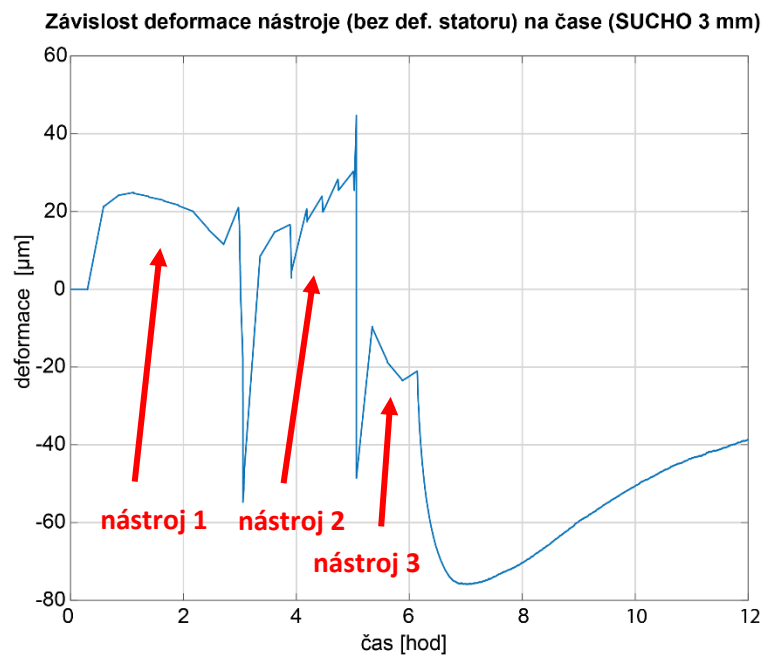


Obr. 22: Závislost deformace měřené na nástroji na čase pro suché obrábění (3 mm tříška)

Odečtením deformace statoru získáme skutečnou deformaci nástroje, která je zobrazena na Obr. 23. Tato deformace má velmi podobný průběh jako deformace měřená na nástroji. Do první výměny nástroje deformace stoupla v kladném směru až na $25 \mu\text{m}$. Během výměny pak vystoupala do záporného směru na $-54,3 \mu\text{m}$ a opět klesla na $8 \mu\text{m}$ v kladném směru. Po výměně nástroje deformace rostla v kladném směru a dosáhla až na $44,7 \mu\text{m}$. Při druhé výměně nástroje deformace opět velmi prudce klesla



a dále stoupla až na $-48 \mu\text{m}$. Po výměně nástroje deformace klesla na hodnotu $-10,2 \mu\text{m}$, dále až do konce obrábění pouze rostla na $-23,2 \mu\text{m}$. Při ukončení obrábění deformace lehce poklesla a po ukončení prudce vzrostla.



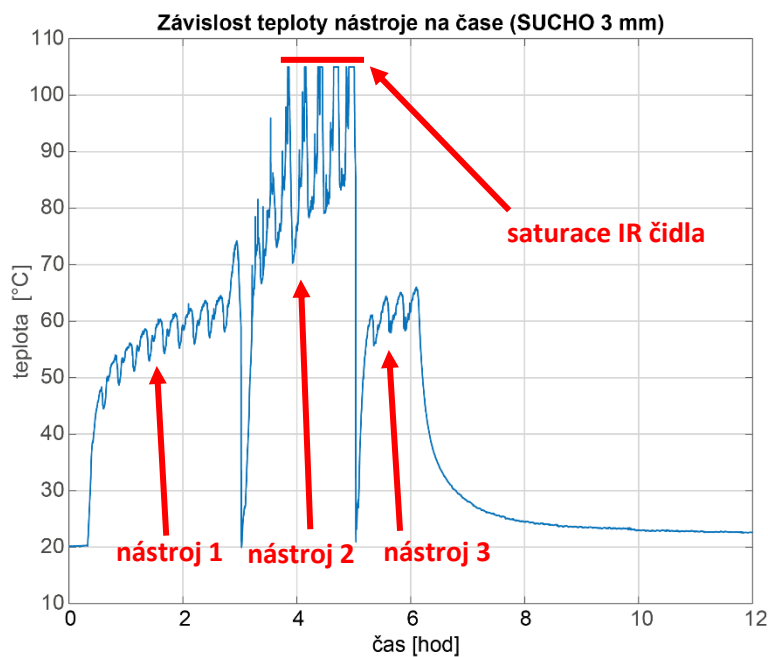
Obr. 23: Skutečná deformace nástroje

Teplota nástroje

Průběh teploty nástroje v závislosti na čase je vidět na Obr. 24. Před spuštěním vřetene byla teplota rovna teplotě okolí, tedy $20,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Po spuštění vřetene a najetí nástroje do místa řezu (0,5 hodiny) teplota prudce stoupla na $43 \text{ }^\circ\text{C}$. Poté teplota během obrábění pozvolna stoupala až na $64 \text{ }^\circ\text{C}$ (2,75 hodiny). Následně se na průběhu projevil otupení nástroje. Teplota prudce stoupla na hodnotu $75 \text{ }^\circ\text{C}$ (3 hodiny) a nástroj bylo nutné vyměnit. Nový nástroj se na průběhu projevil okamžitým poklesem teploty na teplotu okolí ($20,2 \text{ }^\circ\text{C}$).



Po najetí nového nástroje do záběru teplota prudce rostla na 62,7 °C. Poté jsou na průběhu znát prudké výkyvy. Ty mohou být způsobeny špatným odečtem nebo znečištěním plochy, na které byla teplota měřena. Dále je vidět, že teplota nepřesahuje hodnotu 105 °C a na této hodnotě je průběh občas konstantní. Důvodem je saturace IR čidla. Po 5 hodinách od začátku měření bylo nutné nůž vyměnit.



Obr. 24: Závislost teploty nástroje na čase pro suché obrábění (3 mm tříska)

Nový nástroj se na průběhu opět projevil okamžitým poklesem teploty na teplotu okolí (21 °C). Teplota znovu po najetí nástroje do záběru prudce rostla na hodnotu 56,6 °C. V průběhu obrábění pozvolna rostla. Na konci obrábění dosahovala hodnoty 65,7 °C. Po ukončení obrábění teplota klesla na teplotu okolí (21 °C).

Teplota obrobku

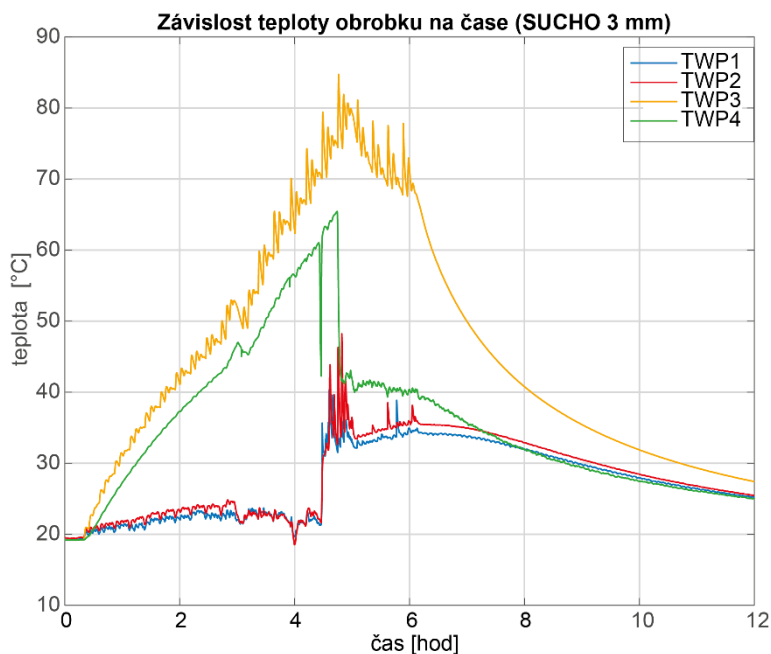
Průběh závislosti teploty obrobku na čase je vidět na Obr. 25. Teplota byla měřena pomocí čidel, která byla umístěna na obrobku (Obr. 17).



Teplotní čidla *TWP1* a *TWP2* naměřila průběh teploty, který byl ovlivněn pouze teplotami okolních částí a minimálně obráběcím procesem. Dále tedy bude popsán průběh teploty pouze čidel *TWP3* a *TWP4*.

Čidlo *TWP3* bylo nejbližší místu, které bylo obráběno. Po spuštění vřetene teplota pozvolna stoupala z teploty okolí (20,2 °C) na teplotu 52,6 °C. V tento okamžik (3 hodiny) byla nutná výměna nástroje. Teplota tedy nepatrně klesla a po výměně dále pozvolna stoupala na teplotu 84 °C. Při této teplotě byl nástroj opět vyměněn. Z důvodu horšího seřízení předchozího nástroje, teplota po výměně začala klesat. Při ukončení obrábění čidlo naměřilo teplotu 69 °C. Po ukončení teplota pozvolna klesala na teplotu okolí.

Čidlo *TWP4* kopírovalo grafem průběh čidla *TWP3* do 4,5 hodiny od začátku měření. V tento okamžik nastal prudký pokles z teploty 60,75 °C na 42,5 °C. Poté se teplota vrátila na předchozí úroveň a dále kopírovala průběh čidla *TWP4*. Po 4,75 hodiny od začátku měření bylo čidlo přesunuto, aby nedošlo k jeho poškození při obrábění. Proto má dále graf čidla podobný průběh jako u čidel *TWP1* a *TWP2*.



Obr. 25: Závislost teploty obrobku na čase pro suché obrábění (3 mm tříska)



Shrnutí experimentu

Důležitá data, která vyplývají z experimentu jsou uvedena v Tab. 5.

Tab. 5: Důležitá data z experimentu pro suché obrábění (úběr 3 mm)

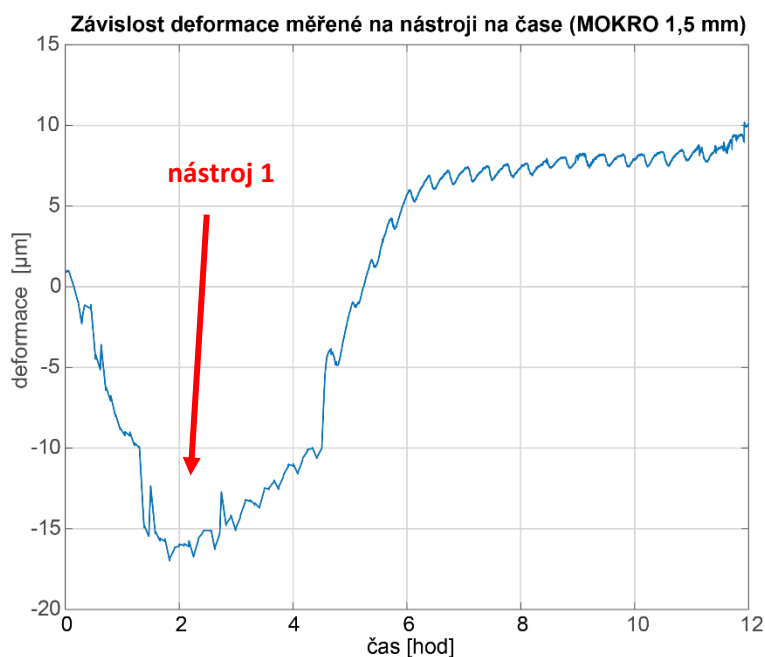
Max. deformace stroj + nástroj	-120 μm
Max. teplota nástroje	105 $^{\circ}\text{C}$
Max. teplota obrobku	84,2 $^{\circ}\text{C}$
Počet potřebných nástrojů	3

5.2.3. Mokrý obrábění – úběr třísky 1,5 mm

Do 0,25 hodiny od začátku měření probíhalo zahřívání vřetene. Z tohoto důvodu otáčky dosahovaly hodnoty až 4500 ot/min. Výkyvy, které se v tomto intervalu objevily na průbězích deformací a teplot, jsou způsobeny právě zahříváním a také instalací experimentu. Poté došlo ke spuštění vřetene a otáčky se ustálily na hodnotě 758 ot/min. Na této hodnotě setrvaly až do konce obrábění, tedy do 4,25 hodin od začátku měření.

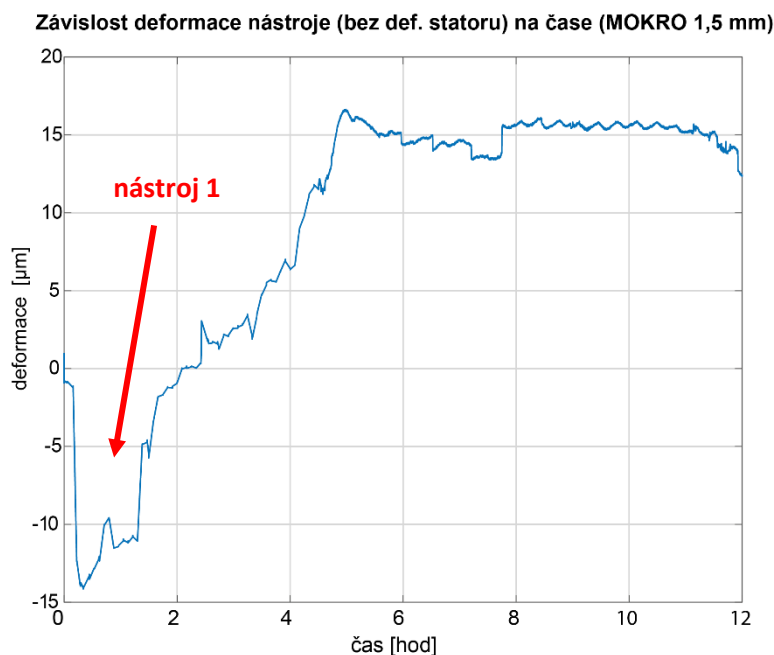
Deformace nástroje

Průběh deformace nástroje v závislosti na čase je vidět na Obr. 26. Po nastavení pracovních otáček 758 ot/min začala deformace narůstat. V průběhu nárůstu se objevily výkyvy, které mohou být způsobeny dočasným pozastavením obrábění. Růst se zastavil až při hodnotě -16,5 μm . Poté došlo k poklesu deformace, který trval až do konce obrábění (-10 μm) (4,25 hodiny). Po ukončení obrábění deformace stále klesala až na hodnotu 7,5 μm v kladném smyslu.



Obr. 26: Závislost deformace měřené na nástroji na čase pro mokré obrábění (1,5 mm tříška)

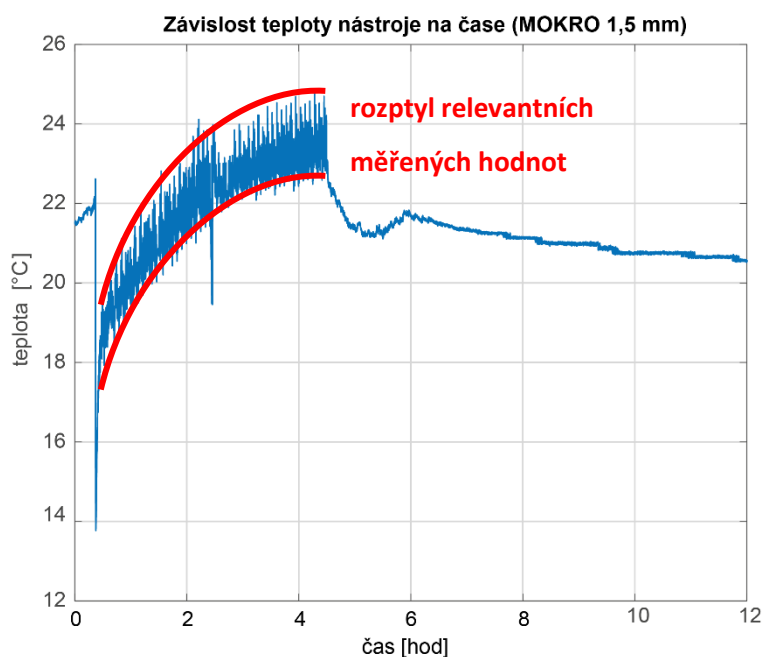
Odečtením deformace statoru získáme skutečnou deformaci nástroje, která je zobrazena na Obr. 27. Před začátkem obrábění deformace nástroje nabývala záporných hodnot (-14 μm). Po najetí nástroje do záběru začala deformace klesat k nule a dále rostla v kladném smyslu. Průběh měl drobné výkyvy, které mohly být způsobeny chlazením nebo krátkodobým přerušением obrábění. Při ukončení obrábění byla deformace na hodnotě 10,1 μm . Po ukončení deformace stále rostla až na hodnotu 16 μm .



Obr. 27: Skutečná deformace nástroje

Teplota nástroje

Průběh teploty nástroje v závislosti na čase je vidět na Obr. 28. Průběh je opět popsán až po nastavení otáček vřetene na hodnotu 758 ot/min a spuštění chlazení (0,25 hodiny). Po spuštění chlazení následoval prudký pokles teploty z 22,6 °C na 13,8 °C. Poté nástroj najel do záběru, a proto teplota prudce stoupla na teplotu 18,2 °C (0,5 hodiny). Během obrábění teplota dále pozvolna stoupala až do 2,5 hodiny od začátku měření, kdy byla na hodnotě 22,3 °C. V tento okamžik bylo obrábění přerušeno a teplota klesala na 19,5 °C. Po opětovném spuštění obrábění se teplota vrátila na 22 °C a pokračovala v pozvolném růstu. Při ukončení obrábění se teplota nacházela na hodnotě 23,3 °C. Během jedné hodiny se teplota vrátila na teplotu okolí (21 °C).



Obr. 28: Závislost teploty nástroje na čase pro mokré obrábění (1,5 mm tříška)

Teplota obrobku

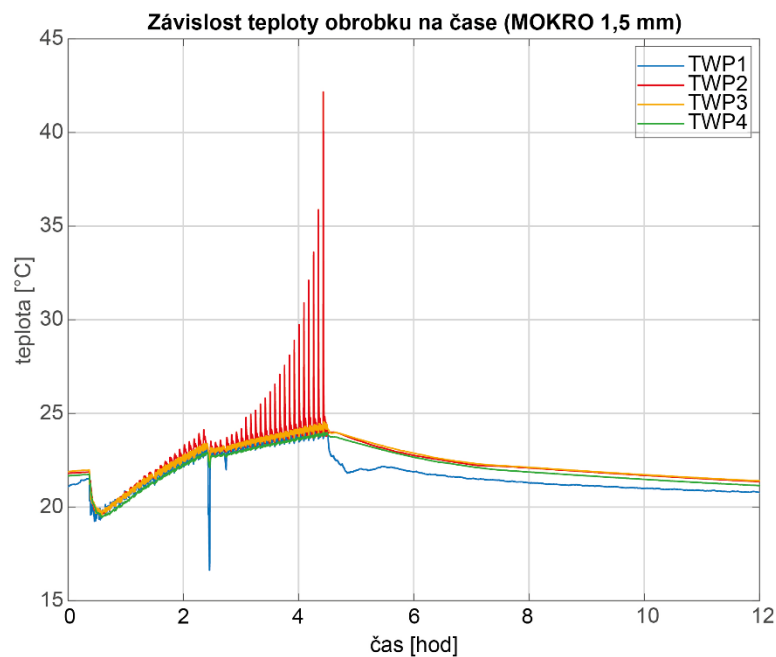
Průběh závislosti teploty obrobku na čase je vidět na Obr. 29. Teplota byla opět měřena pomocí čidel, která byla umístěna na obrobku (Obr. 17).

Všechna čidla mají podobný průběh. Čidlo *TWP2* bylo nejbližší obrábění, a proto bude dále popsán jím naměřený průběh teploty.

Po nastavení pracovních otáček vřetene a spuštění chlazení teplota prudce klesala z teploty okolí 21,8 °C na teplotu 19,6 °C (0,5 hodiny). V důsledku obrábění začala teplota pozvolna stoupat až na 24 °C (2,5 hodiny). Poté bylo obrábění přerušeno a po opětovném spuštění teplota dále stoupala. Před koncem obrábění byla hodnota teploty naměřená čidlem *TWP2* 42,2 °C. Na průběhu teploty *TWP2* je dobře viditelné, že pokud je nástroj velmi blízko čidlu, teplota prudce roste. Po oddálení průběh kopíruje průběhy ostatních čidel.



Z průběhu teploty *TWP1* je patrné, že toto čidlo bylo nejbližší místu, na které byla přiváděna chladicí kapalina. Lze to například vidět v čase 2,5 hodiny od začátku měření, kdy je obrábění pozastaveno ale kapalina je stále přiváděna. Z tohoto důvodu teplota prudce klesla na 16,5 °C.



Obr. 29 :Závislost teploty obrobku na čase pro mokré obrábění (1,5 mm tříska)

Shrnutí experimentu

Důležitá data, která vyplývají z experimentu jsou uvedena v Tab. 6.

Tab. 6: Důležitá data z experimentu pro mokré obrábění (úběr 1,5 mm)

Max. deformace stroj + nástroj	-17 μm
Max. teplota nástroje	24,8 °C
Max. teplota obrobku	42,2 °C
Počet potřebných nástrojů	1



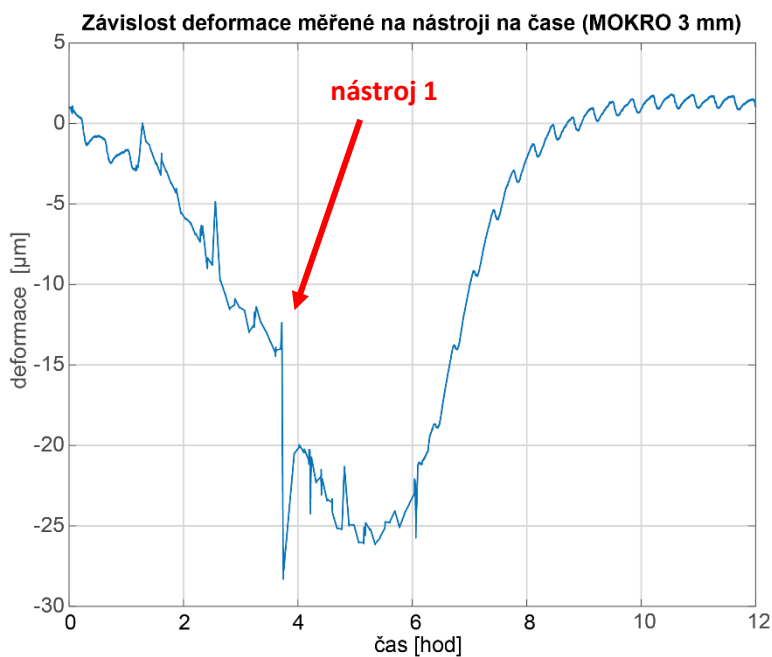
5.2.4. Mokrý obrábění – úběr třísky 3 mm

Do 1,5 hodiny od začátku měření probíhalo zahřívání vřetene. Z tohoto důvodu otáčky dosahovaly hodnoty až 4500 ot/min. Výkyvy, které se v tomto intervalu objevily na průbězích deformací a teplot, jsou způsobeny právě zahříváním a také instalací experimentu. Poté došlo ke spuštění vřetene a otáčky se ustálily na hodnotě 758 ot/min. Na této hodnotě setrvaly až do konce obrábění, tedy do 5,5 hodin od začátku měření.

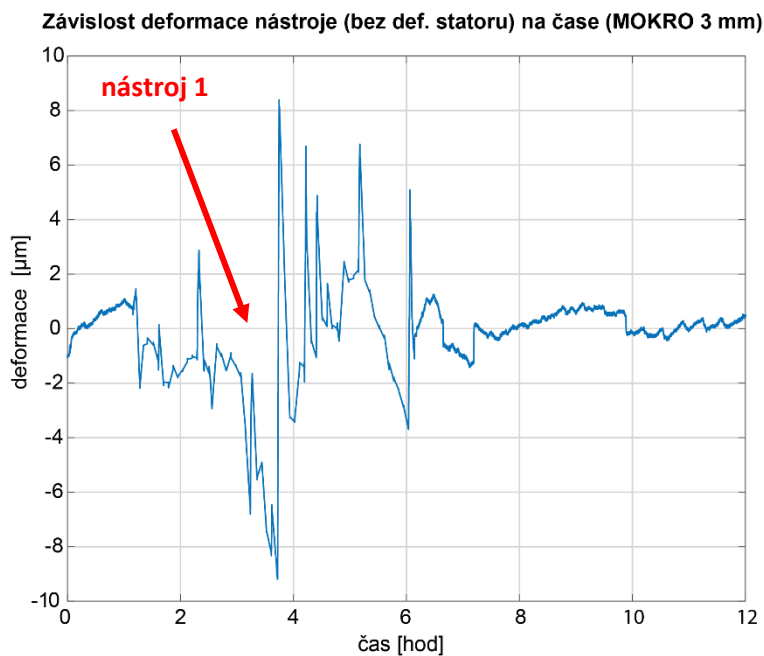
Deformace nástroje

Průběh deformace nástroje je zobrazen na Obr. 30. Po nastavení pracovních otáček 758 ot/min začala deformace narůstat. Postupný nárůst deformace byl narušen 3,75 hodiny od začátku měření, kdy došlo k prudkému nárůstu z $-13 \mu\text{m}$ na $-28,3 \mu\text{m}$ a opět poklesu na $-20,2 \mu\text{m}$. Tento prudký skok může být způsoben momentální chybou měření (namotání třísky, zásah do měření, ...). Dále deformace postupně narůstala. Před ukončením obrábění byla na hodnotě $-25,9 \mu\text{m}$. Po ukončení obrábění deformace prudce klesala k nulové hodnotě. V celém průběhu se vyskytují drobné výkyvy, které jsou způsobeny přerušením obrábění nebo chlazením.

Odečtením deformace statoru získáme skutečnou deformaci nástroje, která je zobrazena na Obr. 31. Průběh této deformace je velmi odlišný od deformace měřené na nástroji (s deformací statoru). Pohybuje se pouze v intervalu od $9 \mu\text{m}$ do $-9 \mu\text{m}$. Po spuštění obrábění až do 2,25 hodiny deformace s mírnými výkyvy stoupala až na $-1,1 \mu\text{m}$ v záporném směru. Po 2,25 hodiny nastala prudká změna do kladného směru na $2,7 \mu\text{m}$ a následoval návrat na původní hodnotu. Dále až do 3,75 hodiny deformace s občasnými výkyvy stoupala až na $-9,1 \mu\text{m}$. Poté následoval prudký skok, který se objevil i u deformace nástroje a statoru. Deformace stoupla v kladném směru na $8,4 \mu\text{m}$ a hned vzrostla na $-3,3 \mu\text{m}$ v záporném smyslu. Následně deformace až do konce obrábění klesala. Celý průběh obsahuje mnoho výkyvů, které jsou způsobeny pozastavením obrábění a také chlazením.



Obr. 30: Závislost deformace měřené na nástroji na čase pro mokré obrábění (3 mm tříška)

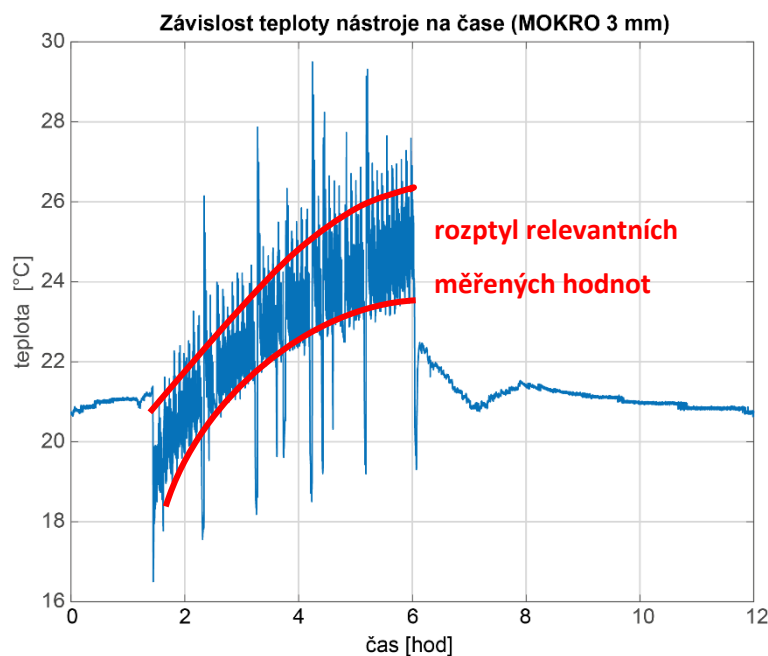


Obr. 31: Skutečná deformace nástroje



Teplota nástroje

Průběh teploty nástroje v závislosti na čase je vidět na Obr. 32. Průběh je opět popsán až po nastavení otáček vřetene na hodnotu 758 ot/min a spuštění chlazení (1,5 hodiny). Po spuštění chlazení následoval prudký pokles teploty z 21,4 °C na 16,5 °C. Poté byl nástroj přesunut do záběru a tím teplota nástroje okamžitě stoupla na 18,5 °C. Během celého obrábění teplota rostla. Maximální hodnoty (25 °C) dosáhla těsně před ukončením obrábění. Celý průběh obsahuje řadu výkyvů, které jsou způsobeny právě přítomností rezné kapaliny. V důsledku pravidelného přerušování obrábění a odečtu dat vznikly největší poklesy teploty. Po ukončení obrábění byl nástroj stále chlazen, proto teplota klesla na 19,5 °C. Poté bylo chlazení vypnuto a teplota nástroje stoupla na 22,5 °C, ze které postupně klesala na teplotu okolí.



Obr. 32: Závislost teploty nástroje na čase pro mokré obrábění (3 mm tříska)

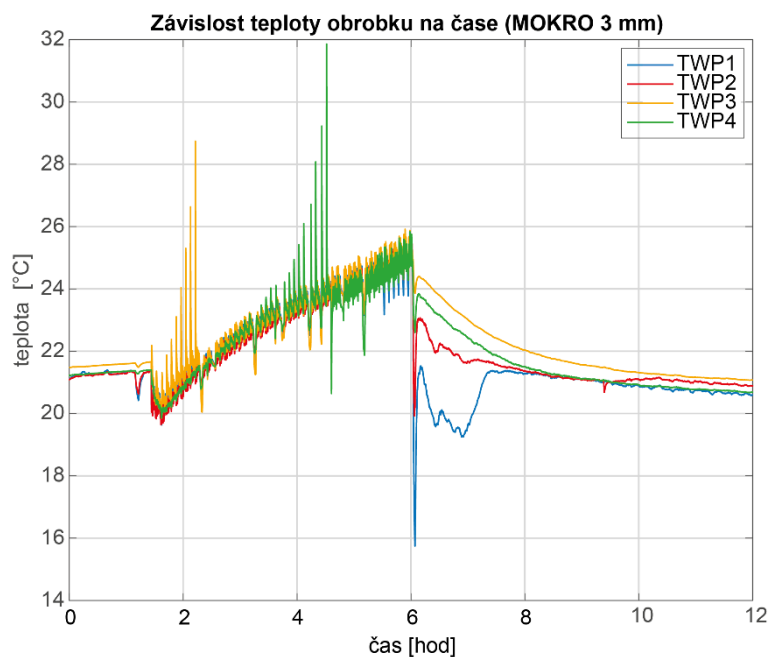


Teplota obrobku

Průběh závislosti teploty obrobku na čase je vidět na Obr. 33. Teplota byla opět měřena pomocí čidel, která byla umístěna na obrobku (Obr. 17).

Grafy všech čidel mají podobný průběh. Nejdříve se obrábělo blízko čidla *TWP3*, poté se obrábění přesunulo k čidlu *TWP4*. Dále tedy bude popsán jejich průběh.

Po nastavení pracovních otáček vřetene a spuštění chlazení teplota lehce klesala z teploty okolí (21,3 °C) na 20,3 °C. Najetím nástroje do záběru teplota stoupla. Do 2,25 hodiny se obrábělo v blízkosti čidla *TWP3*, proto jeho teplota prudce stoupala až na 28,75°C. Poté se obrábění pozvolna přesouvalo k čidlu *TWP4*. Na průběhu se to projevilo okolo 3,5 hodiny od začátku měření. V jeho blízkosti se obrábělo až do 4,5 hodiny kdy teplota dosahovala 31,86 °C. Poté se zřejmě neobrábělo v blízkosti žádného z umístěných čidel, a proto je až do konce obrábění průběh teploty všech čidel totožný. Teplota čidel těsně před ukončením obrábění dosahovala hodnoty 25 °C.



Obr. 33: Závislost teploty obrobku na čase pro mokré obrábění (3 mm tříška)



Během celého obrábění je výborně vidět účinek chlazení. Teplota stoupala pouze pokud byl nástroj v bezprostřední blízkosti čidla a po oddálení ihned klesala zpět na úroveň ostatních čidel. Po ukončení obrábění je také dobře vidět, že přívod chladící kapaliny byl v blízkosti čidla *TWP1*. Proto teplota čidla *TWP1* klesla až na 15,8 °C a teplota čidla *TWP3* jen na 23,95 °C.

Shrnutí experimentu

Důležitá data, která vyplývají z experimentu jsou uvedena v Tab. 7.

Tab. 7: Důležitá data z experimentu pro mokré obrábění (úběr 3 mm)

Max. deformace stroj + nástroj	-28 μm
Max. teplota nástroje	25,2 °C (výkyv 29,5 °C)
Max. teplota obrobku	31,9 °C
Počet potřebných nástrojů	1

5.2.5. Air Cutting

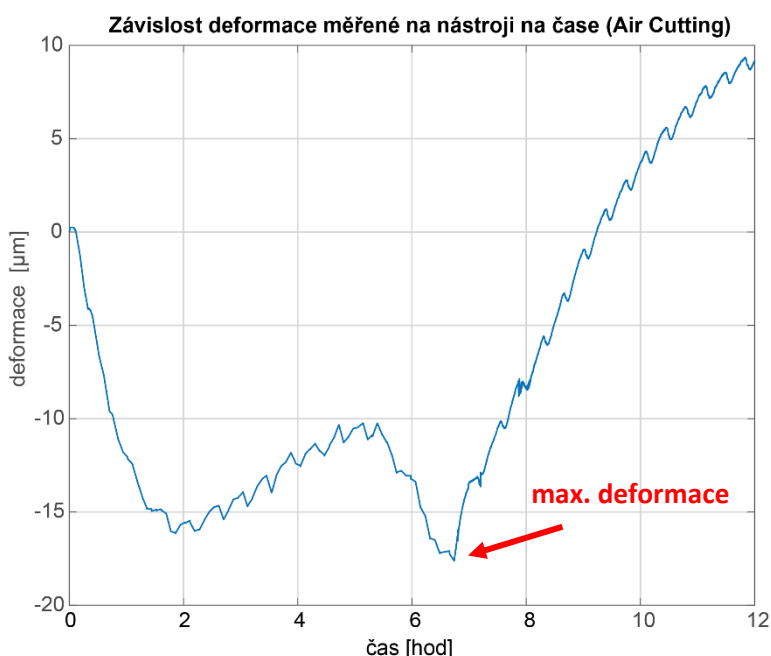
Do 0,5 hodiny od začátku měření probíhalo zahřívání vřetene. Z tohoto důvodu otáčky dosahovaly hodnoty až 2250 ot/min. Výkyvy, které se v tomto intervalu objevily na průběžích deformací a teplot, byly způsobeny právě zahříváním a také instalací experimentu. Poté došlo ke spuštění vřetene a otáčky se ustálily na hodnotě 758 ot/min. Na této hodnotě setrvaly až do konce obrábění, tedy do 6,75 hodin od začátku měření. Z důvodu nepřítomnosti obrobku, čidla *TWP1* – *TWP4* nebyla v provozu.



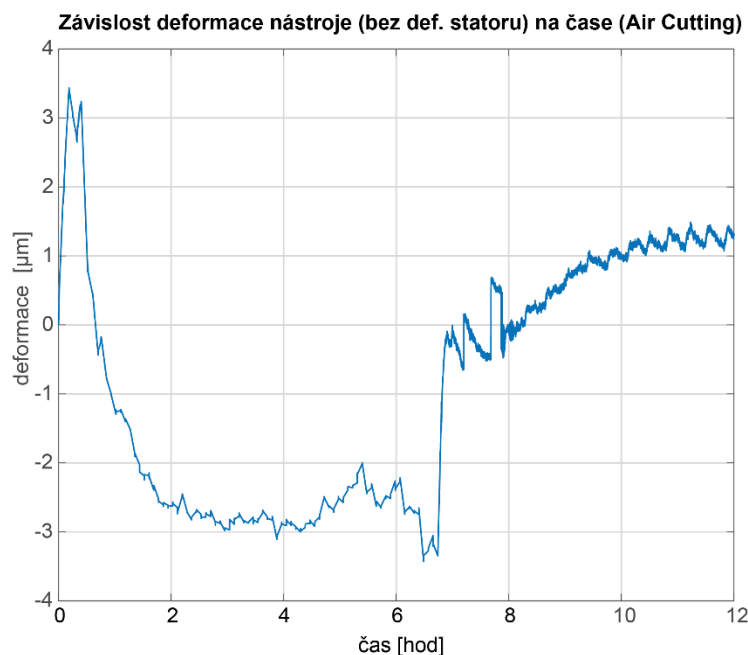
Deformace nástroje

Průběh deformace nástroje je zobrazen na Obr. 34. Po nastavení pracovních otáček 758 ot/min deformace začala narůstat. Do 1,75 hodiny deformace prudce stoupla až na hodnotu $-16,02 \mu\text{m}$. Poté deformace kolísavě klesala až na $-10,3 \mu\text{m}$. To může být způsobeno přeladěním stroje ve smyslu přenosu tepelných buzení soustavy. Po 5,5 hodinách deformace opět prudce rostla. Těsně před koncem obrábění byla deformace na hodnotě $-17,62 \mu\text{m}$. Po ukončení deformace prudce klesla k nulové hodnotě a dále rostla v kladném směru až na hodnotu $12,5 \mu\text{m}$.

Odečtením deformace statoru získáme skutečnou deformaci nástroje, která je zobrazena na Obr. 35. Po spuštění obrábění deformace s mírnými výkyvy stoupla až na hodnotu $-2,8 \mu\text{m}$. Na této hodnotě se deformace ustálila a až do 4,5 hodiny od začátku měření na ní setrvala. Poté mírně klesla a před koncem obrábění opět rostla až na $-3,4 \mu\text{m}$. Po ukončení obrábění deformace prudce klesla k nulové hodnotě.



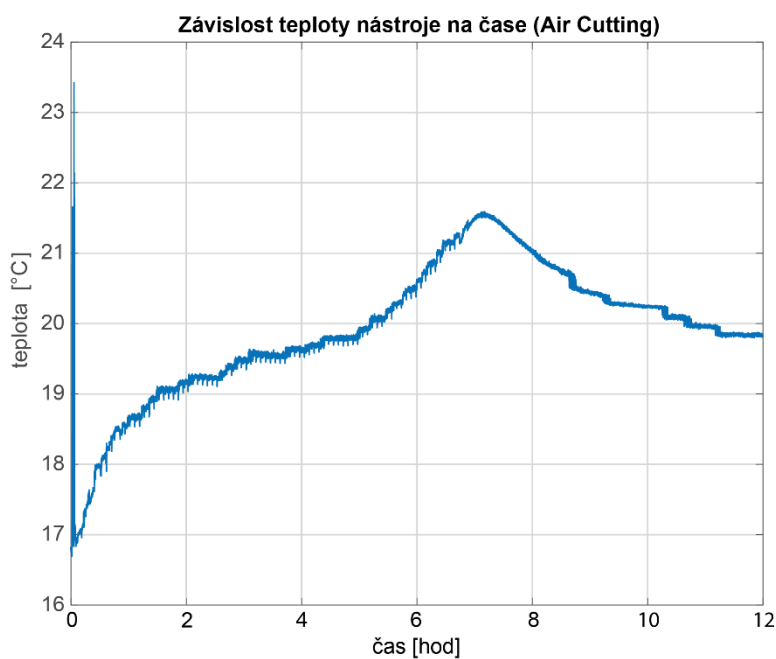
Obr. 34: Závislost deformace měřené na nástroji na čase pro obrábění Air Cutting



Obr. 35: Skutečná deformace nástroje

Teplota nástroje

Průběh teploty nástroje v závislosti na čase je vidět na Obr. 36. Průběh je opět popsán až po nastavení otáček vřetene na hodnotu 758 ot/min. Po spuštění obrábění teplota stoupla z teploty okolí 17 °C. Ustálení na teplotě 19,8 °C bylo po 5 hodinách od začátku měření narušeno a teplota opět začala stoupat. Jak je již uvedeno u deformace nástroje, v tomto okamžiku došlo k přeladění stroje. Těsně před ukončením obrábění byla teplota na hodnotě 21,6°C. Po ukončení teplota pozvolna klesla na teplotu okolí.



Obr. 36: Závislost teploty nástroje na čase pro obrábění Air Cutting

Shrnutí experimentu

Důležitá data, která vyplývají z experimentu jsou uvedena v Tab. 8.

Tab. 8: Důležitá data z experimentu pro obrábění Air Cutting

Max. deformace stroj + nástroj	-18 μm
Max. teplota nástroje	21,6 °C
Max. teplota obrobku	-
Počet potřebných nástrojů	1



5.3. Shrnutí experimentů (resumé)

Tab. 9: Shrnutí experimentů

	AIR CUTTING	SUCHO 1,5mm	SUCHO 3mm	MOKRO 1,5mm	MOKRO 3mm
Max. deformace stroj + nástroj	-18 μm	-40 μm	-120 μm	-17 μm	-28 μm
Max. teplota nástroje	21,6 °C	43,8 °C	105 °C	24,8 °C	25,2 °C (29,5 °C)
Max. teplota obrobku	-	44,5 °C	84,2 °C	42,2 °C	31,9 °C
Počet potřebných nástrojů	1	2	3	1	1

Shrnutí je uvedeno v Tab. 9 a Tab. 10. Z provedených experimentů vyplývá, že veškeré zjišťované veličiny jsou u suchého obrábění větší. Přítomnost chladicí kapaliny u mokrého obrábění eliminovala část deformace nástroje, snížila teplotu obrobku i nástroje. Bylo také zapotřebí méně nástrojů. Veškeré experimenty budou nyní porovnány s obráběním Air Cutting, při kterém chybí obrobek, a proto jsou eliminovány veškeré vlivy vzniklé kontaktem nože a obrobku. Na přesnost stroje působí pouze deformace vzniklé chodem stroje. U teploty obrobku bude jako výchozí použita teplota u suchého obrábění při úběru 1,5 mm třísky.

Při suchém obrábění při úběru 1,5 mm byla deformace oproti Air Cuttingu o 128 % větší. Také teplota nástroje se zvýšila o 103 %. Během obrábění bylo nutné jednou vyměnit nástroj.

U mokrého obrábění při úběru třísky 1,5 mm byla oproti Air Cuttingu eliminována 4 % deformace nástroje. Během obrábění nebylo nutné měnit nástroj. V důsledku obráběcího procesu teplota nástroje stoupla o 15 %. U teploty obrobku ke změně téměř nedošlo. Eliminováno bylo pouze 5 % oproti suchému obrábění.

Při úběru třísky 3 mm byla deformace nástroje při suchém obrábění o téměř 600 % větší oproti Air Cuttingu. Teplota nástroje vzrostla na téměř pětinasobek (491 %).



V průběhu obrábění bylo nutné použít 3 nástroje. Obrobek byl téměř dvojnásobně teplejší oproti úběru 1,5 mm.

Chladicí kapalina při mokrém obrábění s 3 mm třískou eliminovala část deformace nástroje, ale i tak byla o 62 % vyšší oproti Air Cuttingu. Teplota nástroje byla o necelých 20 % vyšší. Během obrábění nebylo nutné provádět výměnu nástroje. Obrobek byl oproti suchému obrábění (1,5 mm tříška) o 28 % chladnější.

Tab. 10: Srovnání nárůstu deformace

	AIR CUTTING	SUCHO 1,5mm	SUCHO 3mm	MOKRO 1,5mm	MOKRO 3mm
Max. deformace stroj + nástroj	-18 μm	-40 μm	-120 μm	-17 μm	-28 μm
Procentní srovnání deformace	100 %	228 %	691 %	96 %	162 %



6. Zhodnocení nákladů na eliminaci teplotních deformací

U mokrého obrábění je důležité, zda se pouhým použitím řezné kapaliny dostaneme na požadovanou přesnost či nikoliv. Pokud by deformace přesáhla limit, bylo by nutné ji eliminovat kombinací obou principů. Porovnání vychází z provedených experimentů a dat získaných od zkušeného technologa. Při hodnocení nákladů je nutné počítat s rezervou pro případ, že by se vyskytly problémy. Jedná se o modelový zjednodušený příklad, protože náklady závisí na mnoha podmínkách.

Pro zhodnocení tedy platí tyto podmínky:

- suché obrábění
 - zhodnocení pro minimální úběr třísky (dokončovací operace)
 - tvorba a implementace proběhne ve známém terénu bez problémů
- mokré obrábění
 - deformace jsou eliminovány pouhým oplachem
 - nebyla provedena kompletní výměna kapaliny
- náklady na mokré obrábění jsou záměrně tlačeny nahoru a na suché dolů, aby došlo k porovnání limitních stavů



6.1. Náklady na suché obrábění

Při suchém obrábění jsou teplotní deformace řešeny pomocí softwarové kompenzace. Časová náročnost tvorby systému teplotních kompenzací se liší pro různé typy obrábění. Nejdříve provedeme analýzu časové náročnosti pro dokončovací proces. První fází je vytvoření základního modelu a provedení primární verifikace. Časová náročnost je uvedena v Tab. 11. Veškeré časové údaje jsou uvedeny v člověkohodinách (čas odpovídající práci jednoho průměrného pracovníka po dobu jedné hodiny) a bez jakýkoliv komplikací.

Tab. 11: Časové rozložení první fáze tvorby kompenzace

Činnost	Časová náročnost [č-h]
příprava měření	5 – 10
příprava měření na stroji	16
provedení měření pro 1 konfiguraci ve 3 různých režimech	27
zpracování a analýza naměřených dat, vytvoření modelu a primární verifikace	16 - 24

Během přípravy měření na stroji dochází k umístění jednotlivých čidel v prostoru stroje. Po provedení měření dochází k analýze naměřených dat a z ní vychází identifikace potřebných vstupů kompenzačního algoritmu. Z naměřených dat se vytvoří numerický model a dojde k primární verifikaci.

Vytvořený kompenzační algoritmus musí být implementován do řídicího systému stroje. Časová náročnost je uvedena v Tab. 12. Nejdříve proběhne příprava řídicího systému na implementaci Python – skriptu, ve kterém bude vložena kompenzace. Ta se však píše v systému Matlab Simulink, proto je nutné ji do systému Python převést. Po vložení skriptu do řídicího systému je zajištěna odolnost kompenzačního systému proti chybám z teplotních čidel, datového toku ale také proti nestandardním provozním stavům stroje. To je hlavně restart řídicího systému, výpadek elektrického proudu,



vypnutí stroje atd. Na závěr proběhne finální testování systému přímo při výrobním procesu.

Tab. 12: Časové rozložení implementace kompenzace do řídicího systému stroje

Činnost		Časová náročnost [č-h]
příprava ŘS		16 - 32
implementace a základní testování funkce kompenzace, zajištění odolnosti proti chybám	známý terén	16 – 32
	neznámý terén	60 - 100
testování systému		10 - 16

Při hrubších řezných operacích (tříska 1,5 mm a více) se na robustnost systému kompenzací zatím nelze spolehnout. Tyto kompenzace musí být vázány na určitý nástroj, polotovar a nastavení řezných podmínek. Jistou funkčnost lze zajistit pouze pro proměnnou hloubku třísky s tím, že ostatní parametry jsou konstantní. Celková tvorba kompenzace je tedy náročnější, proto je nutné počítat s 32 až 52 č-h navíc oproti dokončovacím operacím.

Celkové náklady na výrobu 100 ks obrobku se známým terénem jsou uvedeny v Tab. 13.

Tab. 13: Rozpis nákladů na suché obrábění (známý terén)

celkem č-h na tvorbu kompenzace	132
plat za 1 č-h [Kč]	300
CELKEM ZA KOMPENZACI [Kč]	39 600
cena za břit [Kč]	124,1
počet kusů	200
CELKEM ZA NÁSTROJ [Kč]	24 820
CELKEM [Kč]	64 420



6.2. Náklady na mokré obrábění

U mokrého obrábění jsou teplotní deformace eliminovány pomocí řezné kapaliny. Pro určení nákladů použijeme modelovou situaci. Na výrobu daného obrobku byla použita řezná emulze bez aditiv. Touto řeznou emulzí byla naplněna nádoba obráběcího stroje o objemu 500 litrů. Z důvodu omezené série na 100 ks obrobků nebylo nutné provádět výměnu kapaliny. Ta má trvanlivost 3 – 6 týdnů. Bylo ale třeba kapalinu dolévat, protože po 3 směnách byla ztráta 10 litrů. Tato ztráta byla způsobena odchodem s třískami. Na každý obrobek byl použit 1 břit na břitové destičce. Výroba jednoho výrobku trvala jednu směnu.

Náklady na výrobu 100 ks daného obrobku jsou uvedeny v Tab.14.

Tab. 14: Rozpis nákladů na mokré obrábění

objem kapaliny [l]	500 + 330 (dolití)
cena za 1 l hotové kapaliny [Kč]	3
CELKEM ZA KAPALINU [Kč]	2 499
cena za břit [Kč]	124,1
počet kusů	100
CELKEM ZA NÁSTROJ [Kč]	12 410
CELKEM [Kč]	14 909



7. Závěr

První část bakalářské práce je věnována obecnému úvodu do problematiky teplotního chování obráběcího stroje a způsoby jeho eliminace. Nejdříve jsou popsány základní fyzikální jevy, které způsobují tepelné deformace (teplo, roztažnost, ...). Dále práce pokračuje rozdělením zdrojů tepla na vnitřní a vnější.

Následuje popis mokrého a suchého obrábění. U mokrého obrábění jsou uvedeny vlastnosti a druhy řezných kapalin. Také je zde rozebrán vliv řezné kapaliny na obráběcí proces.

V druhé části je popsán experiment, ze kterého práce vychází. Data, naměřená při experimentu, byla zpracována. V bakalářské práci jsou popsány průběhy jednotlivých veličin během obrábění. Z porovnání vyplývá, že veškeré měřené veličiny jsou při suchém obrábění větší. Dále byly zjišťovány náklady na eliminaci teplotních deformací. Potřebné informace byly čerpány z katalogů řezných kapalin a od zkušeného technologa. Následně proběhlo porovnání nákladů na eliminaci teplotních deformací oplachem řeznou kapalinou nebo pomocí softwarové kompenzace. Toto zhodnocení se vztahuje pouze k modelovému příkladu, protože ho lze použít jen na určité podmínky v závislosti na mnoha parametrech.

Z porovnání vyplývá, že náklady na eliminaci pomocí řezné kapaliny jsou mnohonásobně menší. Rozdíl by ovšem mohl být i větší. Při porovnání byly záměrně náklady na eliminaci řeznou kapalinou tlačeny nahoru a náklady na eliminaci softwarovou kompenzací dolů. Tento postup byl zvolen, aby došlo k porovnání limitních stavů.

Závěrem lze tedy konstatovat, že náklady na eliminaci teplotních deformací řeznou kapalinou jsou v případě řešeného experimentu menší než minimální náklady na eliminaci softwarovou kompenzací. Obecně lze říct, že tvorba softwarové kompenzace se zahrnutím vlivu řezného procesu se vyplatí při výrobě většího počtu stejného



výrobku. Proto je pro menší výrobu výhodnější použít řeznou kapalinu. Také je důležitá volba velikosti úběru třísky během obrábění. Pro dokončovací operace nebo operace s úběrem do 1 mm lze při tvorbě softwarové kompenzace vycházet z relativně robustního modelu Air Cutting. Pokud však zvolíme větší úběr třísky, kompenzace bude záležet na mnoha parametrech a bude obtížné ji vytvořit.



Seznamy

Seznam obrázků

Obr. 1: Odvod tepla z místa řezu při soustružení ([2] a upraveno)	17
Obr. 2: Teplotní pole v místě řezu [20]	17
Obr. 3: Teplotní pole v případě usazování třísek mimo místo řezu [20]	17
Obr. 4: Ejektorový vrták [7].....	20
Obr. 5: Vliv řezné kapaliny [11].....	28
Obr. 6: Vliv řezné kapaliny na hloubku ztvrdnutí [11]	28
Obr. 7: Vliv řezné kapaliny na pěchování třísky [11]	29
Obr. 8: Vliv řezné kapaliny na řezný odpor [11]	30
Obr. 9: Vliv řezné kapaliny na teplotu řezání [11]	30
Obr. 10: Vliv řezné kapaliny na průběh opotřebení [11]	31
Obr. 11: Výsledky experimentu firmy SKF [12].....	33
Obr. 12: Uspořádání experimentu ([3] a upraveno).....	34
Obr. 13: Fréza Sandvik CoroMill® 245 [3]	35
Obr. 14: Celkové schéma experimentu	36
Obr. 15: IR čidlo Optris CT (vlevo), box s elektronikou (vpravo) [3]	37
Obr. 16: Porovnání teplotních polí při suchém (vlevo) a mokřém (vpravo) obrábění [20]	38



Obr. 17: Umístění odporových teplotních čidel v obrobku [3].....	38
Obr. 18: Závislost deformace měřené na nástroji na čase pro suché obrábění (1,5 mm tříška)	40
Obr. 19: Skutečná deformace nástroje.....	41
Obr. 20: Závislost teploty nástroje na čase pro suché obrábění (1,5 mm tříška).....	42
Obr. 21: Závislost teploty obrobku na čase pro suché obrábění (1,5 mm tříška)	43
Obr. 22: Závislost deformace měřené na nástroji na čase pro suché obrábění (3 mm tříška)	45
Obr. 23: Skutečná deformace nástroje.....	46
Obr. 24: Závislost teploty nástroje na čase pro suché obrábění (3 mm tříška).....	47
Obr. 25: Závislost teploty obrobku na čase pro suché obrábění (3 mm tříška)	48
Obr. 26: Závislost deformace měřené na nástroji na čase pro mokré obrábění (1,5 mm tříška)	50
Obr. 27: Skutečná deformace nástroje.....	51
Obr. 28: Závislost teploty nástroje na čase pro mokré obrábění (1,5 mm tříška).....	52
Obr. 29 :Závislost teploty obrobku na čase pro mokré obrábění (1,5 mm tříška)	53
Obr. 30: Závislost deformace měřené na nástroji na čase pro mokré obrábění (3 mm tříška)	55
Obr. 31: Skutečná deformace nástroje.....	55
Obr. 32: Závislost teploty nástroje na čase pro mokré obrábění (3 mm tříška).....	56
Obr. 33: Závislost teploty obrobku na čase pro mokré obrábění (3 mm tříška)	57



Obr. 34: Závislost deformace měřené na nástroji na čase pro obrábění Air Cutting	59
Obr. 35: Skutečná deformace nástroje	60
Obr. 36: Závislost teploty nástroje na čase pro obrábění Air Cutting	61

Seznam tabulek

Tab. 1: Přehled typů řezných kapalin	27
Tab. 2: Parametry nástroje	35
Tab. 3: Parametry experimentu	36
Tab. 4: Důležitá data z experimentu pro suché obrábění (úběr 1,5 mm)	44
Tab. 5: Důležitá data z experimentu pro suché obrábění (úběr 3 mm)	49
Tab. 6: Důležitá data z experimentu pro mokré obrábění (úběr 1,5 mm)	53
Tab. 7: Důležitá data z experimentu pro mokré obrábění (úběr 3 mm)	58
Tab. 8: Důležitá data z experimentu pro obrábění Air Cutting	61
Tab. 9: Shrnutí experimentů	62
Tab. 10: Srovnání nárůstu deformace	63
Tab. 11: Časové rozložení první fáze tvorby kompenzace	65
Tab. 12: Časové rozložení implementace kompenzace do řídicího systému stroje	66
Tab. 13: Rozpis nákladů na suché obrábění (známý terén)	66
Tab. 14: Rozpis nákladů na mokré obrábění	67



Seznam použitého softwaru

Microsoft Word 2016

MATLAB R2018a

Adobe ILLUSTRATOR 2019

Seznam příloh

Elektronické přílohy

bakalarska_prace_Divisek.pdf

grafy.rar



Seznam použité literatury

- [1] HANZAL, Jiří. *Metody kompenzace teplotní chyby obráběcího stroje* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-03-26]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Minář.
- [2] Odvod tepla z místa řezu při soustružení. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2011 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kapaliny-pro-obrabeni.html>
- [3] HOREJŠ, Otakar, Jan HORNYCH, Martin MAREŠ, Štěpán FIALA, Lukáš HAVLÍK a Jan NOVOTNÝ. *Výsledek na stroji-KOVOSVIT MAS-2017: využití software pro zpracování a posouzení vlivu technologického procesu na teplotní chyby obráběcího stroje*. Praha, 2017.
- [4] NOVÁČEK, Pavel. *Moderní chladící kapaliny pro obrábění* [online]. Brno, 2012 [cit. 2019-03-26]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
- [5] STŘELCOVÁ, Radka. *Řezné kapaliny a jejich uplatnění v moderní výrobě* [online]. Brno, 2008 [cit. 2019-03-26]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.
- [6] ANDRONOV, Vladislav. *Sjednocení řezných kapalin ve ŠKODA AUTO a. s.* [online]. Praha, 2016 [cit. 2019-03-26]. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
- [7] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I - TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 2. část* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf
- [8] KRÁL, Petr. *Vliv koncentrace řezné kapaliny na trvanlivosti nástroje* [online]. Zlín, 2012 [cit. 2019-03-26]. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.
- [9] *ZÁKLADY BEZPEČNOSTI PRÁCE U OBRÁBĚCÍCH STROJŮ NA KOV.* In: Státní úřad inspekce práce [online]. 2014, 2014 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: http://www.suip.cz/_files/suip-04d4568d05e3603ee76dff7c74e17895/obrabeci_stroje.pdf



- [10] *Měření koncentrace řezných emulzí*. In: Refraktometry pro profesionály a hobby [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://www.refraktometreshop.cz/mereni-reznych-emulzi-u-stroju.html>
- [11] LIEMERT, Gaston, František DRÁBEK, Josef ONDRA a Ivan VAVŘÍK. *Obrábění*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1974.
- [12] LI, Yongrong, Ralf DOMRÖS a Santos RODRIGUEZ. *Dost, a stačí*. Evolution. 2017, 2017(4), 2.
- [13] SKÁLA, Kamil. *Vliv řezného procesu na změnu součinitele přestupu tepla na povrchu stroje v pracovním prostoru*. Praha, 2015. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Otakar Horejš, Ph.D.
- [14] BRYAN, James B. *International Status of Thermal Error Research*. CIRP Annals [online]. 1990, 1990(Volume 39, 2), 645-656 [cit. 2019-04-05].
- [15] POLANECKÝ, Lukáš. *Řízení zásob podle základního EOQ modelu*. Mladá Věda[online]. 2018, vol. 6, no. 2, s. 133-138.
- [16] STŘEDA, Ivo, Miroslav SAZIMA, Jan DOUBRAVA. *Termomechanika*, Vydavatelství ČVUT v Praze, Praha 1992
- [17] NOŽIČKA, Jiří. *Sdílení tepla*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-010-1599-8.
- [18] NOŽIČKA, Jiří. *Základy termomechaniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2409-1.
- [19] HORNYCH, Jan. *Tepelné chování a adaptivně řízené chlazení obráběcích strojů* [online]. Praha, 2011 [cit. 2019-05-06]. Disertace. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [20] HORNYCH, Jan. *Učební materiály*
- [21] *Metaflux 70-27 HG Řezný sprej*. Metaflux [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: http://www.metaflux-ts.cz/produkt/70-2700_hg-rezny-sprej.html
- [22] *Vrtací a řezný olej CUT+COOL PERFECT*. Würth [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://eshop.wuerth.cz/Kategorie-produktu/Vrtaci-a-rezny-olej-CUT-COOL-Perfect/31463008010301.cyid/3146.cgid/cs/CZ/CZK/>
- [23] *Ekolube Ero SB*. Ekolube [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.ekolube.cz/p/ekolube-ero-sb-1-l-nalevany--19247>



- [24] *Quakercool 3530 FF*. OLEJE.CZ [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/p/quakercool-3530-ff-25-kg--16748>
- [25] *Řezný olej Total Valona MS 7023 (HC) - 20 L*. OLEJE MPA [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://oleje-mpa.cz/rezny-olej-total-valona-ms-7023-hc-20-l>
- [26] *Morris Supercut 1000*. Prima dílna [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.primadilna.cz/Morris-Supercut-1000-univerzalni-vodou-reditelna-rezna-chladici-kapalina-10l-d4223.htm>
- [27] *PARAMO ERO 1070*. Prima dílna [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.primadilna.cz/PARAMO-ERO-1070-rezna-chladici-kapalina-10l-d901.htm>
- [28] *Vrtací a řezná pasta CUT AND COOL PERFECT*. Würth [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://eshop.wuerth.cz/Kategorie-produktu/Vrtaci-a-rezna-pasta-CUT-COOL/31463008010401.cyd/3146.cgid/cs/CZ/CZK/>
- [29] *TOTAL LACTUCA WBA 5400*. AZOleje.cz [online]. [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <http://www.azoleje.cz/prumyslove-oleje/556-total-lactuca-wba-5400-20-l.html>