



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# ANALÝZA OPOTŘEBENÍ VYMĚNITELNÝCH BŘITOVÝCH DESTIČEK PŘI UPICHOVÁNÍ KONSTRUKČNÍCH OCELÍ

WEAR ANALYSIS OF REPLACEABLE INSERTS IN PARTING OF STRUCTURAL STEELS

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Drbal

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2023

## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Martin Drbal</b>
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2022/23

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:

### **Analýza opotřebení vyměnitelných břitových destiček při upichování konstrukčních ocelí**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Diplomová práce bude zaměřena na analýzu opotřebení vyměnitelných břitových destiček (VBD) vyrobených ze slinutých karbidů při upichování konstrukčních ocelí. Součástí práce bude analýza procesu obrábění spojená s provedenými řeznými zkouškami, které budou zaměřeny na analýzu obrobeného povrchu. V práci bude proveden rovněž rozbor obráběných materiálů. Práce bude ukončena zpracováním naměřených dat, ze kterých bude patrná trvanlivost testovaných VBD.

#### **Cíle diplomové práce:**

Teoretický a technický rozbor řešené problematiky.  
Provedení řezných zkoušek (měření opotřebení břitů VBD).  
Rozbor obráběných materiálů, analýza obrobeného povrchu.  
Rozbor opotřebení břitů VBD.  
Zpracování naměřených dat (vyhodnocení experimentů).

#### **Seznam doporučené literatury:**

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

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

Příručka obrábění-kniha pro praktiky. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.



HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Vyd. 1. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá analýzou opotřebení vyměnitelných břitových destiček při technologii soustružení. Pro experiment byly použity tři varianty vyměnitelných břitových destiček, všechny od výrobce Dormer Pramet s.r.o. Těmito břitovými destičkami byly postupně upichovány dva různé materiály. Jednalo se o ložiskovou ocel ČSN 14 109 a korozivzdornou ocel ČSN 17 349. Práce obsahuje teoretickou část, která je věnovaná technologii soustružení a teorii opotřebení. Experimentální část popisuje postup řezných zkoušek, měření a analýzu získaných dat. V závěru této práce jsou provedeny dodatečné analýzy, které mají za cíl odhalit příčiny proměnlivosti některých dosažených výsledků.

### **Klíčová slova**

soustružení, upichování, opotřebení, vyměnitelná břitová destička

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the analysis of wear of replaceable cutting inserts in turning technology. For the experiment three variants of replaceable cutting inserts were used, all from the manufacturer Dormer Pramet s.r.o. These cutting inserts were used for the successive lapping of two different materials. These were bearing steel ČSN 14 109 and stainless steel ČSN 17 349. The thesis contains a theoretical part which is devoted to turning technology and wear theory. The experimental part describes the cutting test procedure, measurements and analysis of the data obtained. At the end of this thesis, additional analyses are performed to reveal the reasons for the variability of some results.

### **Key words**

turning, cutting off, wear, replaceable cutting insert

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

DRBAL, Martin. *Analýza opotřebení vyměnitelných břitových destiček při upichování konstrukčních ocelí* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149652>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

---

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Analýza opotřebení vyměnitelných břitových destiček při upichování konstrukčních ocelí vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

.....  
místo, datum

.....  
Martin Drbal

---

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za jeho čas, dále za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování této diplomové práce. Také děkuji společnosti Dormer Pramet s.r.o., která zajistila uskutečnění tohoto testu tím, že poskytla nástroje a polotovary potřebné pro experimentální část této práce. Také bych rád poděkoval pracovníkům materiálové laboratoře z Univerzity obrany, jmenovitě panu mjr. Ing. Zdeňku Joskovi, Ph.D a paní Mgr. Michaele Krchové. Dále bych rád poděkoval panu Janu Pokornému, Ing. Štěpánovi Kolomnému, a všem, kteří se na této práci podíleli.

---

**OBSAH**

ÚVOD .....	10
1 ROZBOR TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ .....	11
1.1 Kinematika procesu .....	11
1.2 Silové parametry .....	11
1.3 Charakteristika třísky .....	12
1.3.1 Součinitel pěchování třísky .....	12
1.3.2 Tvar a typ třísky .....	13
1.4 Nástrojové materiály .....	14
2 TECHNOLOGIE UPICHOVÁNÍ .....	15
2.1 Charakteristika a použití .....	15
2.2 Nástroje pro upichování .....	15
2.2.1 Geometrie bříty .....	16
3 OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE .....	17
3.1 Základní mechanismy opotřebení .....	17
3.2 Formy opotřebení .....	17
3.3 Měření opotřebení .....	18
3.3.1 Přímé metody .....	18
3.3.2 Nepřímé metody .....	18
3.4 Trvanlivost nástroje .....	19
3.5 Životnost nástroje .....	19
4 SPOLEČNOST DORMER PRAMET S.R.O. ....	20
4.1 Historie společnosti .....	20
4.2 Sortiment produktů .....	20
5 CÍLE PROJEKTU A PŘÍPRAVA ŘEZNÉHO PROCESU .....	22
5.1 Popis projektu .....	22
5.2 Řezný nástroj .....	22
5.3 Obráběné materiály .....	23
5.3.1 Ložisková ocel ČSN 14 109 .....	23
5.3.2 Korozivzdorná ocel ČSN 17 349 .....	23
5.3.3 Polotovary a jeho příprava .....	24
5.3.4 Produkty řezného procesu .....	24
5.4 Obráběcí stroj .....	25
5.5 Řezné podmínky .....	26
5.6 Měření tvrdosti .....	27
6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	29
6.1 Příprava experimentu .....	29
6.1.1 Ustavení VBD pod mikroskopem .....	30
6.1.2 3D tisk přípravku .....	30
6.2 Průběh řezných procesů .....	32
6.2.1 Úprava držáku .....	32
6.2.2 Úprava řezných podmínek .....	33
6.3 Analýza třísky .....	34

---

6.4	Analýza opotřebenění břitových destiček pod mikroskopem .....	36
6.4.1	Analýza destiček „A“ při obrábění materiálu ČSN 14 109 .....	36
6.4.2	Analýza destiček „B“ při obrábění materiálu ČSN 14 109 .....	38
6.4.3	Analýza destiček „C“ při obrábění materiálu ČSN 14 109 .....	40
6.4.4	Analýza destiček „A“ při obrábění materiálu ČSN 17 349 .....	43
6.4.5	Analýza destiček „B“ při obrábění materiálu ČSN 17 349 .....	44
6.4.6	Analýza destiček „C“ při obrábění materiálu ČSN 17 349 .....	46
6.5	Zhodnocení trvanlivosti vyměnitelných břitových destiček .....	48
6.6	Materiálová analýza obráběných materiálů .....	50
6.6.1	Příprava a popis jednotlivých analýz .....	50
6.6.2	Výsledky materiálu ČSN 14 109 .....	52
6.6.3	Výsledky materiálu ČSN 17 349 .....	53
6.6.4	Zhodnocení .....	54
6.7	Analýza geometrie nástroje .....	54
6.8	Analýza povlaku .....	55
6.9	Analýza obrobeného povrchu .....	58
7	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....	60
7.1	Inovační proces .....	60
7.2	Porovnání nákladů na břit .....	60
	ZÁVĚR .....	63
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	64
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	66
	SEZNAM PŘÍLOH .....	67

---

## ÚVOD

Vyměnitelné břitové destičky s povlaky ze slinutých karbidů jsou hojně využívané nástroje u většiny obráběcích procesů. Tím je ovlivněn jejich vývoj, na který je, i díky vysokému procentu a možnostem jejich využití, kladen vysoký důraz. Konkurenceschopní výrobci nástrojů musí investovat nemalé prostředky do vývoje, jelikož nynější zákazník vyžaduje co nejvyšší trvanlivost nástroje při současných vysokých hodnotách řezných podmínek. To znamená, že nástroj je pak schopen obrábět rychleji a samozřejmě delší dobu. Čím delší je trvanlivost, popřípadě životnost daného nástroje, tím více jsou sníženy náklady spojené s výměnou, respektive s ostřením daných nástrojů. Vývoj je spojen s hledáním nových nástrojových materiálů, technologickou úpravou stávajících materiálů, nebo vhodnou změnou geometrie nástroje.

Po každém vývojovém procesu následuje ověření, zda byl daný vývoj úspěšný, tedy zda má výrobek ty parametry, které vývojář zamýšlel. V tomto případě se jedná o testování samotných řezných nástrojů při obrábění určitého druhu materiálu a zjištění hodnot trvanlivosti řezného nástroje. Vývoj znamená posun vpřed, tudíž jsou od nových řezných nástrojů očekávané vyšší hodnoty trvanlivosti. V experimentální části této práce je přesně takový proces ověření proveden. Původní břitové destičky, které jsou aktuálně k dostání, jsou označeny písmenem A. Destičky označené písmeny B a C zastupují řezné nástroje po vývoji, které nyní ještě nejsou v prodeji. Jediné, co lze o jejich odlišnosti od destiček A říci, je použití odlišného materiálu a jiných povrchových úprav. Geometrie břitu je u všech destiček shodná. Další detaily není možné v této práci publikovat.



## 1 ROZBOR TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ

Soustružení je jednou z nejvyužívanějších metod třískového obrábění. Jedná se o nejjednodušší způsob, jak vyrábět rotačně symetrické součásti. Při soustružení se používají většinou jednobřité nástroje, kterými lze obrábět plochy vnější, vnitřní, tvarové i obecné.

Jakýkoliv řezný proces je charakterizován celou řadou technologických veličin. Mezi ty zásadní lze zařadit geometrické a silové veličiny, práce a výkon řezání, teplo a teplota řezání a kmitání obráběcího systému [1].

Důležité geometrické veličiny, které charakterizují samotný řezný proces, jsou kinematické veličiny, posuv, ostří nástroje, záběr, průřez třísky, úběr a výkonnost obrábění [1].

### 1.1 Kinematika procesu

Kinematika řezného procesu je charakterizována základními veličinami, jako je řezná rychlost  $v_c$ , posuvová rychlost  $v_f$ , dále hlavní pohyb, posuvový pohyb, řezný pohyb, nebo rychlost řezného pohybu  $v_e$  [1].

Hlavní pohyb, který je vykonáván obrobkem, je obvykle rotační. Obrobek je upnut do sklíčidla. Rychlost hlavního pohybu je zároveň řeznou rychlostí, která je definována vztahem:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.1)$$

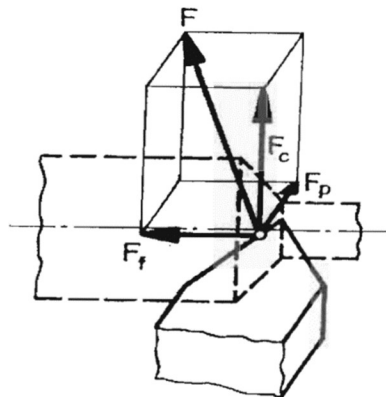
Řezná rychlost  $v_c$  je vyjádřena jako okamžitá rychlost hlavního pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku a je dána otáčkami  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] a průměrem obrobku  $D$  [mm]. Vedlejší pohyb je posuv, který obvykle vykonává nástroj. Může být přímočarý i obecný. Posuvový pohyb je relativním pohybem mezi nástrojem a obrobkem a společně s hlavním pohybem umožňuje plynulé odřezávání třísky z obráběného povrchu. [2, 3]

Řezný pohyb je pohyb, který vychází ze společného hlavního a posuvového pohybu. Rychlost řezného pohybu  $v_e$  je okamžitá rychlost řezného pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku. [2, 3] Její hodnota se stanoví dle vztahu:

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.2)$$

### 1.2 Silové parametry

Řezný proces je realizován působením silové soustavy mezi nástrojem a obrobkem. Výsledná řezná síla vyvolaná působením řezné části nástroje na obrobek se značí symbolem  $F$ . Skládá se z řezné síly  $F_c$ , posuvové síly  $F_f$  a síly pasivní  $F_p$  (viz obr. 1). Velikost výsledné síly  $F$  se zjišťuje měřením jejich jednotlivých složek pomocí dynamometrů. Poměr, s jakým jsou jednotlivé složky rozloženy, se odvíjí od geometrie nástroje. [4, 5]



Obr. 1 Silové působení při technologii soustružení [4].

Řezná síla  $F_C$  působí ve směru vektoru řezné rychlosti. Ze všech tří složek má zpravidla nejvyšší hodnotu a je základem při optimalizaci řezných parametrů [5]. Je dána vztahem:

$$F_C = C_{FC} \cdot a_p^{x_{FC}} \cdot f^{y_{FC}} \quad [N] \quad (1.3)$$

Posuvová síla  $F_f$  je dána vztahem:

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad [N] \quad (1.4)$$

Posuvová síla  $F_p$  ovlivňuje přesnost obrobenej plochy a také chvění při obrábění. Její velikost je dána vztahem:

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad [N] \quad (1.5)$$

Výsledná síla při soustružení  $F$  se pak vyjádří vztahem:

$$F = \sqrt{F_C^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad [N] \quad (1.6)$$

Konstanty  $C_{FC}$ ,  $C_{Ff}$  a  $C_{Fp}$  jsou konstanty materiálové, exponenty  $x_{FC}$ ,  $x_{Ff}$  a  $x_{Fp}$  jsou exponenty vlivu šířky záběru  $a_p$ . Exponenty  $y_{FC}$ ,  $y_{Ff}$  a  $y_{Fp}$  jsou exponenty vlivu posuvu  $f$ . Pro dané podmínky řezného procesu jsou všechny tyto konstanty empiricky stanovené.

### 1.3 Charakteristika třísky

Třísky představují vedlejší produkt řezného procesu. Vznikají relativním pohybem nástroje vůči obrobku. Řeznou část nástroje tvoří dvě plochy. Čelo, po kterém při vysokých teplotách a vysokém tlaku odchází tříska, a hřbet. Průsečnicí těchto ploch je ostří nástroje. Síla mezi čelem nástroje a obrobkem má za následek deformaci obráběného materiálu na spodní straně třísky. Tato deformace se nazývá sekundární plastická deformace. Sekundární plastické deformaci předchází primární plastická deformace, během které se obráběný materiál zpevňuje. Po tom, co dojde k vyčerpání plasticity obráběného materiálu, dochází ke kluzu uvnitř materiálu. [1, 4]

#### 1.3.1 Součinitel pěchování třísky

Z důvodu uvedených plastických deformací materiálu v oblasti primární plastické deformace dochází k pěchování třísky. Řešení problému vychází ze zákona zachování objemu, tedy že objem materiálu, který vchází do řezu, se musí rovnat objemu třísek vzniklých při řezném procesu. V případě použití úvahy o konstantní šířce třísky ( $b_D = b_{DC}$ ), je koeficient příčného pěchování vyjádřen vztahem:

$$K_a = \frac{h_{DC}}{h_D} \quad [-] \quad (1.7)$$

Koeficient podélného pěchování je roven:

$$K_l = \frac{l_D}{l_{DC}} \quad [-] \quad (1.8)$$

Koeficient příčného pěchování je roven koeficientu podélného pěchování

$$K_a = K_l \quad (1.9)$$

Součinitel pěchování charakterizuje energetickou náročnost obráběcího procesu. Čím vyšší je jeho hodnota, tím více je proces energeticky náročnější. V ideálním případě je hodnota součinitele pěchování co nejbližší rovna 1. [1]

### 1.3.2 Tvar a typ třísky

Tvar třísek se odvíjí od průběhu řezného procesu a od obráběného materiálu. Závisí např. na geometrii nástroje a tvaru břitu, řezných podmínkách, vlastnostech materiálu nástroje a vlastnostech obráběných materiálů [2].

Tvářená tříška vzniká u drtivé většiny obráběných materiálů. Tříška může být také netvářená. Netvářené třísky vznikají např. při obrábění skla, kdy malé částice obráběného materiálu odletují z místa řezu. [2, 4]

Tvářená tříška může být dělená, nebo plynulá. Požadavkem je, aby dobře odcházela z místa řezu a celkový objem třísek byl co nejmenší [4]. Plynulá tříška se vykytuje při obrábění měkkých a houževnatých materiálů. Plynulost třísky nevýhodná z hlediska možnosti poškození nástroje, nebo poškození obrobeného povrchu. Může způsobit i pracovní úrazy. Článekovitá tříška je ze všech nejpříznivější. Tvoří se při obrábění tvrdých a tvárných materiálů. Tříška může být i drobná, typická je pro tvrdé a křehké materiály. Drobná tříška je výhodná z hlediska objemu odpadu.

Tvary třísek jsou hodnoceny dle tabulky (viz obr. 2), ve které se nachází také tzv. objemový součinitel třísek  $W$ . Objemový součinitel třísek vyjadřuje, jaký objem zaujímají třísky v měrném prostoru, respektive kolik % objemu v prostoru jsou samotné třísky. Objemový součinitel třísek je dán vztahem:

$$W = \frac{V_t}{V_m} [-] \quad (1.10)$$

TVAR TŘÍSEK		w	TVAR TŘÍSEK		w
	STUŽKOVÉ DLOUHÉ	400 a více		SPIRÁLOVÉ PLOCHÉ	10 až 20
	STUŽKOVÉ SMOTANÉ	300 až 400		OBLOUKOVITÉ SPOJENÉ	8 až 10
	VINUTÉ DLOUHÉ	80 až 150		ELEMENTÁRNÍ	4 až 6
	VINUTÉ KRÁTKÉ	40 až 60			

Obr. 2 Hodnoty objemového součinitele  $W$  pro vybrané typy třísek [1].

Pro zlepšení dělení třísek se na čelech řezných nástrojů nachází utvařeče třísek. Nejčastěji je lze najít u vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů. Rozlišovány jsou tři druhy utvařečů, a to utvařeče pro hrubování, střední hrubost práce a obrábění na čisto. [4]

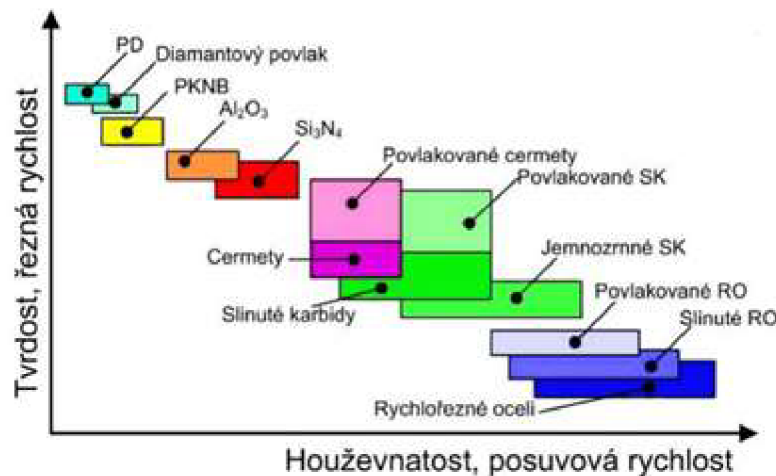
Třísky jsou nicméně užitečným ukazatelem, který vypovídá o průběhu daných řezných procesů. V závislosti na průběhu řezných procesů třísky získávají specifický tvar, rozměr, nebo zabarvení. Na základě třísek lze částečně analyzovat proces řezání. Díky analýze lze provádět kroky pro úpravu pracovních podmínek, což vede ke snížení pravděpodobnosti poškození nástroje.

## 1.4 Nástrojové materiály

Výsledky řezného procesu jsou významně ovlivněny vlastnostmi řezné části nástroje. Řezné části nástrojů se zhotovují z různých nástrojových materiálů, které musí mít požadované vlastnosti. Mezi tyto vlastnosti lze zařadit vysokou tvrdost a pevnost i při zvýšených teplotách, což zajišťuje odolnost proti opotřebení a deformaci břitu. Dále je u nástrojových materiálů důležitá vysoká houževnatost, která eliminuje křehké porušení řezné části, nebo chemická odolnost. [1, 4]

Výše zmíněné vlastnosti ovšem nedokáže jeden jediný materiál dokonale zajistit (viz obr. 3). Z tohoto důvodu se u povrchů řezných nástrojů často využívá technologie povrchových úprav. Povrchovou úpravou lze dosáhnout tvrdého, chemicky stálého a otěruvzdorného povlaku, při zachování houževnatého a pevného jádra. Typickým příkladem jsou povlakované slinuté karbidy, respektive vyměnitelné břitové destičky ze slinutých karbidů, které jsou nejčastěji mechanicky upnuty k řezné části nástroje. Povlakované břitové destičky jsou používány pro obrábění většiny strojírenských materiálů. Jsou vhodné pro soustružení, frézování, nebo vrtání. Povlaky mohou být jednovrstvé, nebo vícevrstvé. Pro povlakování se využívají dvě technologie, a to chemické povlakování (CVD), a fyzikální povlakování (PVD). [1, 4]

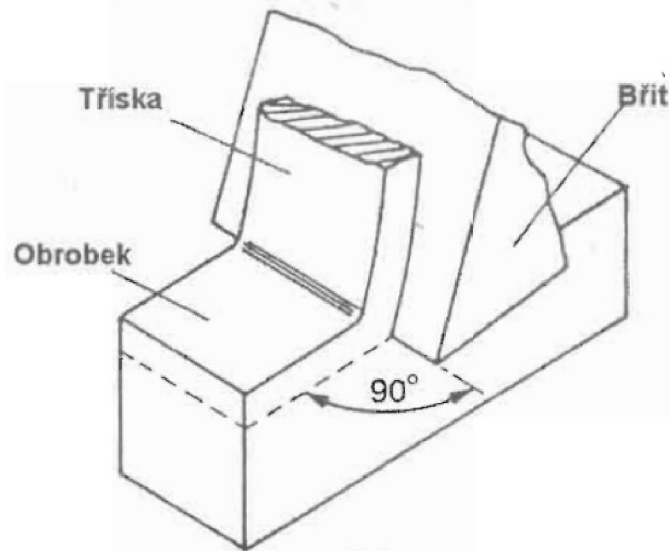
Mezi nástrojové materiály dále patří nástrojové oceli, cermety, řezná keramika, supertvrdé řezné materiály a brousící materiály. Ani jeden z uvedených nástrojových materiálů ovšem není používán tak, jako povlakované slinuté karbidy. Procentuálně až 75 % všech soustružnických operací je realizováno právě pomocí vyměnitelné břitové destičky ze slinutých karbidů. [1]



Obr. 3 Vliv nástrojového materiálu na pracovní podmínky [6].

## 2 TECHNOLOGIE UPICHOVÁNÍ

Podstata upichování spočívá v oddělování obráběného materiálu při technologii soustružení. Upichováním lze dělit tyčové polotovary na potřebný rozměr, nebo může být oddělován již předtím osoustružený materiál. Upichování se řadí mezi tzv. ortogonální – volné řezání (viz obr. 4), tedy že ostří je kolmé na směr řezného pohybu. [4]



Obr. 4 Nákres ortogonálního řezání [4].

### 2.1 Charakteristika a použití

Hlavní pohyb, jak je u soustružení běžné, vykonává obrobek. Obrobek je standardně upnut ve sklíčidle. Řezný nástroj se při upichování posouvá v radiálním směru do středu obrobku. Tím vykovává vedlejší pohyb. Tento pohyb je zastaven ve chvíli, kdy je řezná část nástroje na hodnotě, která odpovídá poloměru upichované součásti. Pokud je zapotřebí upichovat obrobky s větším průměrem, je doporučeno podepření obrobku otočným hrotem.

Technologie upichování se využívá zejména v hromadné výrobě. Upichovací operací zpravidla daný obráběcí proces začíná, nebo končí. Po upichovacím cyklu však mohou následovat další tvarové prvky, proto je důležité, aby byla tříška spolehlivě odváděna z místa řezu. Důraz je kladen na adekvátní chlazení. Správný přívod řezné kapaliny do místa řezu zajišťuje odvod třísek, snížení teploty a snížení opotřebení břitu. Správné chlazení má také pozitivní vliv na kvalitu obrobeného povrchu. Tříška, která se nedostane z místa řezu, se může snadno namotat na rotující součást. Tím může dojít k poškození již obrobených ploch a znehodnocení celého obráběcího cyklu. Přestože upichovací operace představují často jen zlomek z celkové doby obrábění součásti, je neméně důležité dbát na správný průběh. Pokud dojde při upichování k lomu samotného nástroje, součást je obvykle nevratně znehodnocena. Vyplatí se řídit vhodnými řeznými podmínkami a nepřekračovat trvanlivost břitu, kterou výrobce stanovil. [7]

### 2.2 Nástroje pro upichování

Nože určené pro upichování jsou do jisté míry podobné nožům pro zapichování. Rozeznávacím znakem může být delší řezná část, která je jednak delší, zároveň i užší, to z důvodu úspory obráběného materiálu. Pokud by nástroj pro upichování měl široké ostří, vznikalo by více třísek a spotřeba materiálu by bezdůvodně vzrostla. Vyšších hodnot by nabývaly i řezné síly. Pro upichování se používají nože celistvé, nože s pájenými břitovými destičkami a nože s vyměnitelnými břitovými destičkami.



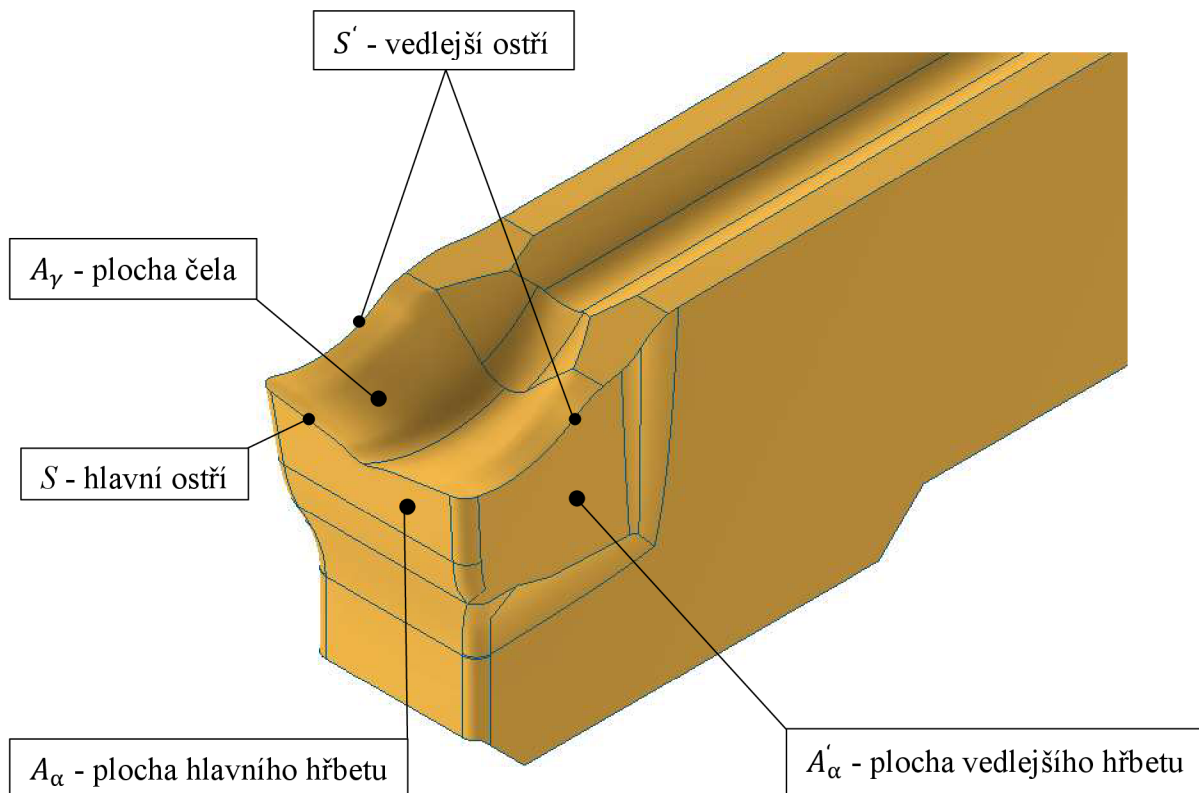
Vyměnitelné břitové destičky bývají mechanicky upínány do nožového držáku tak, aby řezné odpory směřovaly do stěn pro ně vytvořených a nezatěžovaly upínací mechanismus [1]. Způsob upnutí je patrný z obr. 5. Nožové držáky jsou vyráběny z běžných konstrukčních ocelí.



Obr. 5 Upnutí VBD v nožovém držáku.

### 2.2.1 Geometrie břitu

Geometrie břitu řezného nástroje ovlivňuje hned několik parametrů. Je definována pomocí úhlů a ploch. Hlavní prvky geometrie nástroje pro upichování jsou znázorněny na obr. 6. Destička vyobrazena na obr. 6 byla použita pro experimentální část této práce.



Obr. 6 Základní geometrie břitu VBD pro upichování.

### 3 OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE

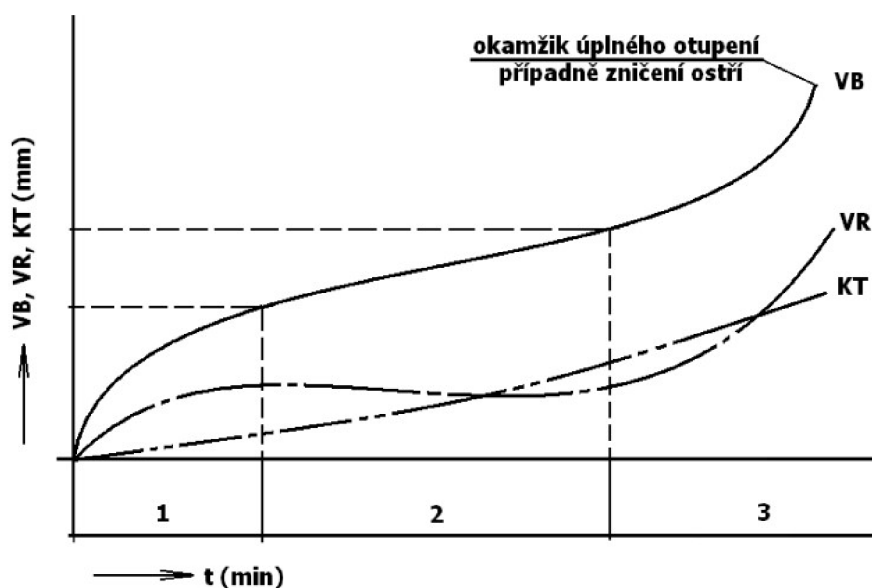
Opotřebení řezných nástrojů je doprovodným prvkem všech obráběcích procesů. Projevuje se úbytkem materiálu na ploše čela, hlavního i vedlejšího hřbetu a špičce nástroje. Při řezném procesu dochází ke vzniku velkého množství tepla. Dochází také k vlivu mechanických, fyzikálních a chemických vlastností obou materiálů, které do procesu vstupují. Svou roli hraje i geometrie nástroje, hodnoty řezných podmínek, nebo vlastnosti řezného prostředí. Kombinací všech těchto vlivů dochází k opotřebování břitu řezného nástroje. Proces opotřebení je tudíž značně komplikovaným dějem. Pro jeho stanovení se v praxi často používá experimentálních metod (viz kap. 3.3). [1, 8, 10]

#### 3.1 Základní mechanismy opotřebení

Základní mechanismy opotřebení lze rozdělit na fyzikální a chemické. Mezi fyzikální se řadí abraze a adheze. Abrasivní otěr je velmi častý, neboť vzniká působením tvrdých částic v materiálu obrobku. Jeho výskyt závisí na tvrdosti břitu. Pro adhezní otěr je typická tvorba nárůstku na břitu, zejména při nižších řezných rychlostech. Mezi chemické mechanismy opotřebení je řazena difúze a oxidace. Difúzní a oxidační otěr je z největší části závislý na chemickém složení nástrojového a obráběného materiálu. O podílu na celkovém opotřebení břitu rozhodují i chemické vlastnosti obou materiálů. [1]

#### 3.2 Formy opotřebení

Na základě faktorů, které byly popsány v úvodu této kapitoly, dochází k opotřebení nástroje různými způsoby. Vyvíjí se po celou dobu řezného procesu, kdy je řezný nástroj v kontaktu s obráběným materiálem. Typický průběh opotřebení břitu je na obr. 7. K opotřebení hřbetu nástroje a špičky dochází při kontaktu řezného nástroje s obráběným materiálem. Opotřebení hřbetu je typickým abrasivním opotřebením, jehož výskyt je obvyklý. Opotřebení čela vzniká, když je v kontaktu řezný nástroj s odcházející třískou. Nárůst těchto opotřebení znamená změnu geometrie břitu nástroje, negativně také ovlivňuje jakost obrobeného povrchu. Ovlivňuje tvar třísky a způsobuje zvýšení nepřesností a teploty. Lom břitu znamená okamžité ukončení řezných procesů. Poukazuje na to, že daný břit překročil hodnotu své trvanlivosti. Je to nežádoucí jev, kterému je lepší vždy předejít. Lomu břitu může předcházet vydrolování ostří, nebo různé formy únavového opotřebení a trhlin. [1]



Obr. 7 Typický průběh opotřebení břitu v závislosti na čase řezání [9].

### 3.3 Měření opotřebení

Kvalita výrobku je ovlivněna stavem řezného nástroje, který byl použit pro jeho zhotovení. Analýza opotřebení nástroje je proto velmi důležitá. Na základě dat získaných při těchto analýzách lze optimalizovat řezné parametry, nebo trvanlivost bříty.

Metody zjišťování hodnot opotřebení se dělí na metody přímé a nepřímé.

#### 3.3.1 Přímé metody

Analýza opotřebení pomocí přímých metod probíhá na samotném řezném nástroji. Řezný proces tedy musí být u některých metod přerušen a nástroj vyjmut z nožového držáku, neboť zkoumané plochy nejsou pro měřicí přístroje dostupné [9].

Vysoce používanou metodou je metoda mikrometrická, při které se měří hodnota daného kritéria opotřebení. Před každým řezným procesem je určena maximální hodnota opotřebení, při které ještě bude nástroj obrábět v požadované kvalitě. Měření se provádí pomocí dílenského mikroskopu. [8, 9]

Váhová metoda je velmi přesnou metodou. Mírou opotřebení je úbytek hmotnosti řezného bříty. Nevýhodou je tvorba nárůstku na nástroji, která zkreslí hmotnostní úbytek a naměřená data.

Nejpřesnější a nejcitlivější metodou, kterou lze použít i při řezném procesu, je metoda radioaktivních izotopů. Opět využívá principu váhových úbytků na nástroji, a to v řádech až  $10^{-3}$  mg. Radioaktivním článkem je materiál nástroje. Toho lze dosáhnout zavedením radioizotopu již v hutnickém procesu, nebo ozáření hotového nástroje proudem neutronů v reaktoru. S touto metodou je však spojeno riziko zdravotního charakteru a nutnost dodržovat přísná bezpečnostní opatření při práci. [8, 9]

Elektrické metody jsou indukční, nebo odporové. Pomocí odporové metody jsou vyhodnocovány změny odporu v místě kontaktu nástroje s obrobkem. Elektrické metody jsou kontinuální. Mezi kontinuální přímé metody se dále řadí metody ultrazvukové a pneumatické. [8, 9]

#### 3.3.2 Nepřímé metody

U nepřímých metod se pro analýzu opotřebení používá veličin, které mají jistý vztah se zjišťovanou veličinou. Všechny nepřímé metody se řadí mezi kontinuální. Hodnoty získané pomocí těchto metod nejsou exaktně přesné, nýbrž jen přibližné [9].

Měření řezných sil patří k nejpoužívanějším metodám určování opotřebení bříty nástroje. Jak se v průběhu řezných procesů mění geometrie nástroje, dochází i ke změně velikostí řezných sil. Pro měření sil se používají dynamometry.

Měření struktury obrobeného povrchu (parametry Ra, Rz apod.) je nepřímou metodou, která pracuje s předpokladem, že kvalita obrobené plochy se s rostoucí hodnotou opotřebení bříty zhoršuje [9].

Měření teploty řezání probíhá pomocí termokamery, která snímá místo řezu. Data jsou analyzována a v případě nečekaného zvýšení teploty je řezný proces zastaven. [9]



### 3.4 Trvanlivost nástroje

Trvanlivost řezného nástroje se značí  $T$  a je obecně závislá na řezných podmínkách. Jedná se o dobu, po kterou je daný nástroj schopen pracovat. Trvanlivost je určena časovým intervalem mezi nasazením nástroje do řezného procesu a vznikem poruchy. Tyto poruchy mohou být postupné, nebo náhlé. Postupnou poruchou, která ještě nemusí nutně znamenat konec trvanlivosti nástroje, je postupné opotřebení nástroje na čele nebo hřbetě. Dokud tato hodnota nedosáhne kritéria opotřebení, tak je nástroj schopen dále obrábět. Náhlá porucha ovšem znamená okamžitý konec trvanlivosti řezného nástroje, neboť se sem řadí částečné, nebo úplné vylomení břitu. Výskyt náhlé poruchy je téměř nemožné předvídat. [1]

Závislost trvanlivosti  $T$  na řezné rychlosti  $v_c$  se pak popisuje Taylorovým vztahem:

$$T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m} [\text{min}] \quad (3.1)$$

### 3.5 Životnost nástroje

Životnost nástroje  $Z$  lze definovat jako součet všech trvanlivostí tohoto nástroje, nebo také jako celkovou dobu funkce nástroje od prvního uvedení do řezného procesu až do jeho vyřazení. Nástroje se rozlišují na obnovované a neobnovované. U neobnovovaných nástrojů, mezi které patří např. vyměnitelné břitové destičky, se po vzniku poruchy neobnovuje jejich provozuschopný stav. Životnost je tedy rovna jejich trvanlivosti. V případě, že se jedná o vícebřité či oboustranné břitové destičky, je životnost rovna součtu trvanlivostí jednotlivých břitů. U obnovovaných nástrojů se provozuschopný stav nástroje obnovuje. Typickým příkladem je opakované ostření opotřebovaného šroubovitého vrtáku. Výsledná životnost je pak rovna součtu všech trvanlivostí nástroje. [1, 10]

## 4 SPOLEČNOST DORMER PRAMET S.R.O.

Společnost Dormer Pramet s.r.o. je předním světovým dodavatelem nástrojů pro obrábění kovů a s tím spojených služeb. Jeden z hlavních světových závodů je ten v Šumperku (viz obr. 8). Zde se vyrábí vyměnitelné břitové destičky, tělesa nástrojů, nebo nástroje na zakázku. Další důležité závody sídlí kupříkladu v Brazílii (Sao Paolo), Spojených Státech Amerických (Chino), nebo Indii (Ankleshwar). Fyzické zastoupení má ve více než 40 světových zemích. [11]



Obr. 8 Závod společnosti Dormer Pramet s.r.o. v Šumperku [11].

### 4.1 Historie společnosti

Historie společnosti sahá až do roku 1913, kdy byla založena společnost Dormer Tools se sídlem v Sheffieldu v Anglii. Společnost Pramet Tools byla založena roku 1936 v tehdejší Československu. V roce 1951 začala v Šumperku výroba součástí a řezných nástrojů ze slinutého karbidu. V průběhu let se společnost Pramet Tools, s.r.o. dokázala přizpůsobit změnám v hospodářském prostředí, a i díky kvalitnímu výzkumu a vývoji získala jednu z hlavních pozic na domácím i světovém trhu. K 1. září 2018 došlo k integraci společností Pramet Tools, s.r.o. se společností Dormer Tools. Cílem projektu, který trval téměř 4 roky, bylo vytvořit uskupení Dormer Pramet s.r.o. Toto spojení znamenalo pro šumperský závod nové možnosti. Téměř okamžitě se výrobky ze šumperského závodu dostaly na nové trhy, zejména na ty v Severní Americe a Indii. Také se rozšířil dodávaný sortiment, což mělo za následek rozšíření technických odvětví, ve kterých společnost řeší technické problémy, např. všeobecné strojírenství, problémy týkající se železnic, metalurgie, oprav, nebo renovací. [12, 13]

### 4.2 Sortiment produktů

Dormer Pramet s.r.o. disponuje mnohaletými zkušenostmi v oblasti výroby otvorů, soustružení, frézování, nebo závitování. Díky tomu je schopna svým zákazníkům nabídnout velké množství monolitních a destičkových nástrojů. Celkem je k dostání přibližně 40 000 standardních položek, které pokrývají drtivou většinu požadovaných obráběcích operací. Monolitní nástroje jsou dodávány pod značkou Dormer. Nástroje s VBD ze slinutých karbidů jsou dodávány pod značkou Pramet. Produkty společnosti jsou v současné době dodávány do více než 50 světových zemí. V dalších 23 zemích působí zahraniční prodejci značky. [13]

Společnost Dormer Pramet s.r.o. se specializuje na 3 hlavní produktové skupiny, a to na soustružení, frézování a vrtání. V sortimentu pro soustružení se nachází široká nabídka soustružnických nožů a vyměnitelných břitových destiček, nástroje pro upichování a zapichování, nebo nástroje pro soustružení závitů. Součástí nabídky jsou také speciální nástroje určené pro těžké soustružení, nebo železniční průmysl. K dostání jsou břitové destičky s povlaky MT-CVD, PVD, keramiky, cermetů, CBN a diamant. Sortiment pro frézování zahrnuje frézy rovinné, stopkové, válcové, či kotoučové. Vyměnitelné břitové destičky jsou nejčastěji s povlakem MT-CVD, nebo PVD. K dostání jsou destičky pro hrubování, dokončování a pro univerzální aplikace. V sortimentu nástrojů určených pro vrtání lze najít jak monolitní vrtáky, tak i vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami, nebo řezné oleje pro závitování. Sortiment vrtání je také jedním z nejvíce se rozvíjejících v nynější době. Nabídka vrtáků je široká, od mikrovrtáků o průměru 0,15 mm, až po vyvrtávací tyče o průměru 500 mm. [11, 13]

## 5 CÍLE PROJEKTU A PŘÍPRAVA ŘEZNÉHO PROCESU

V této kapitole jsou charakterizovány stroje, nástroje, materiály a řezné podmínky, které byly použity v experimentální části této práce.

### 5.1 Popis projektu

Cílem projektu bylo provést analýzu opotřebení a stanovit hodnotu trvanlivosti vyměnitelných břitových destiček při upichování. Projekt zadala společnost Dormer Pramet s.r.o., která doručila vše potřebné pro provedení testování, včetně obráběných polotovarů, nožového držáku a vyměnitelných břitových destiček. Břítové destičky byly ze tří různých materiálů. Z důvodu toho, že dvě ze tří použitých destiček jsou ještě stále ve vývoji a nejsou k dostání na trhu, bude jejich název a označení materiálu v celé práci nahrazeno pouze názorným označením destička „B“ a destička „C“. Pouze u destičky „A“ bude uveden celý název a označení materiálu, ze kterého je vyrobena. Zmíněné břitové destičky byly použity pro upichování dvou materiálů, a to pro materiál ČSN 14 109 a materiál ČSN 17 349. Tyto materiály a jejich vlastnosti jsou podrobněji popsány v kapitole 5.3.

### 5.2 Řezný nástroj

Pro řezné procesy byl použit levý vnější upichovací nůž od společnosti Dormer Pramet s.r.o. Jednalo se o nůž s katalogovým označením GL3-S2525MFL-24-80 (viz obr. 9). Tento nůž disponuje vrchní upínací V-drážkou pro oboustranné destičky GL 2, 3, 4, 5 nebo 6. Nůž disponuje vyztuženým tělesem a je navržen pro upichování či zapichování do hloubky až 32 mm. [14]



Obr. 9 Upichovací nůž [14].



Obr. 10 Vyměnitelná břitová destička [15].

Pro experimentální část práce byly použity celkem tři materiály břitových destiček. Geometrie destiček však byly identické. Oboustranná břitová destička společnosti Dormer Pramet s.r.o. (destička „A“) má katalogové označení GL3-D300M02-PM:G8330 (viz obr. 10).

Tato destička je díky délce 25 mm ideální pro upichování či zapichování do hloubky. Díky zvýšené odolnosti proti nárůstku na břitu je zajištěna delší životnost destičky. Geometrie PM je vhodná pro upichování austenitické korozivzdorné oceli a upichování trubek [15]. Malá šířka destičky znamená méně třískového odpadu a snížení velikosti řezných sil [7].

Oboustranná břitová destička „A“ byla použita jako etalon pro stanovení pracovních podmínek. Stěžejní výsledky experimentu se vztahovaly k destičkám „B“ a „C“.

### 5.3 Obráběné materiály

Pro testování vyměnitelných břitových destiček byly zvoleny dva různé obráběné materiály. Prvním materiálem byla ložisková ocel ČSN 14 109, druhým obráběným materiálem byla korozivzdorná ocel s označením ČSN 17 349.

#### 5.3.1 Ložisková ocel ČSN 14 109

Ocel ČSN 14 109 se řadí mezi nízkolegované konstrukční oceli a je hojně využívána díky svým vlastnostem. Mezi výhodné vlastnosti oceli ČSN 14 109 lze zařadit obrobiteľnosť, nebo tvárnosť za tepla. Ocel vykazuje normálnu odolnosť proti korozi. Hodnota meze kluzu  $R_e$  je rovná 441 MPa. Mez pevnosti  $R_m$  se pohybuje mezi 608 a 726 MPa. Obecně jsou chromové oceli vhodné pro výrobu součástí s velmi tvrdým povrchem odolným proti opotřebení. Je hojně využívána pro výrobu ložisek, proto se v praxi často nazývá jako ložisková ocel. Používá se pro výrobu kuliček, válečků, kuželíků a kroužků valivých ložisek. V oceli ČSN 14 109 se obsah chromu pohybuje kolem 1,5 %. Přesné chemické složení oceli ČSN 14 109 dle materiálového listu je uvedeno v tab. 1. [16]

Tab. 1 Chemické složení oceli ČSN 14 109 [hm. %].

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Ni+Cu	P	S
0,90-1,10	0,30-0,50	0,15-0,35	1,30-1,65	max 0,30	max 0,25	max 0,50	max 0,03	max 0,03

#### 5.3.2 Korozivzdorná ocel ČSN 17 349

Jedná se o korozivzdornou austenitickou ocel s širokým využitím a spolehlivostí. Tato chrom niklová molybdenová ocel je běžně používána pro konstrukční díly, které jsou v kontaktu s vodou a vlhkostí, a to díky své vysoké odolnosti proti korozi a kyselinám. Tato vysoká chemická odolnost je zajištěna díky zvýšenému obsahu molybdenu. Přesné chemické složení oceli ČSN 17 349 je uvedeno v tab. 2. Ocel je dobře obrobiteľná, mimořádně dobře tvárná i svařitelná. Tento materiál lze zároveň používat při teplotách až 550 °C. [17]

Tab. 2 Chemické složení oceli ČSN 17 349 [hm. %].

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni
max 0,03	max 1,00	max 2,00	max 0,05	max 0,30	max 0,10	16,50 - 18,50	2,00-2,50	10,00-13,00



### 5.3.3 Polotovar a jeho příprava

Samotnému testování vyměnitelných břitových destiček předcházela proces přípravy polotovaru. Oba tyto procesy byly zahrnuty v jednom programu. Polotovarem pro řezný proces byl přířez  $\varnothing 80$  mm a délce 420 mm (viz obr. 11). Ten se rozměry shoduje jak pro materiál ČSN 14 109, tak i pro materiál ČSN 17 349. Tento přířez byl zkrácen na pile na délku 140 mm.

První operací na CNC soustruhu bylo obrobení polotovaru  $\varnothing 80$ -140 mm na  $\varnothing 76$  mm. Důvodem bylo jednak získání lepšího povrchu, dále také částečná eliminace házení. Vyšší kvalita obrobeného povrchu měla za následek lepší nájezd upichovacího nože do materiálu. Další operací bylo vrtání, respektive vyvrtání díry  $\varnothing 32$  mm. Díra byla vyvrtána z důvodu toho, aby byl upichovací nůž schopen materiál upíchnout. Poté následovalo samotné upichování.



Obr. 11 Polotovary (níže ocel ČSN 14 109, výše ocel ČSN 17 349).

### 5.3.4 Produkty řezného procesu

Produktem obrábění byl disk o tloušťce 2 mm (viz obr. 12). Z polotovaru  $\varnothing 80$ -140 mm bylo upíchnuto 19 ks takových výrobků. Celkem bylo za dobu testování zhotoveno přes 1 300 ks výrobků. Takto obrobený materiál byl následně zpracován na slévárně, kde byly tyto disky roztaveny. Vzhledem k tloušťce vyměnitelných břitových destiček a tloušťce vyrobených disků je zřejmé, že objem třísek byl o pětinu větší než objem skutečných výrobků. V tomto případě je to ale nepodstatné, cílem testování bylo zjistit trvanlivosti vyměnitelných břitových destiček.



Obr. 12 Produkty řezného procesu.

## 5.4 Obráběcí stroj

Řezný proces byl uskutečňován na soustruhu KONOSVIT MAS SP 280 SY (viz obr. 13). Jedná se o CNC soustružnické centrum, které je určeno pro kompletní obrábění. Stroj je vybaven nástrojovou hlavou, kde je možné upnout až 12 nástrojů. Do hlavního vřetena je možné upnout rotační polotovary o max. průměru 280 mm a délce 450 mm. Maximální možná váha upnutého obrobku je 350 kg. Stroj je dále vybaven chladicím zařízením, které chladí nástroje pod tlakem 7 bar, tedy 0,7 MPa. Stroj může pracovat s rychlostí až 5 000 ot/min. Hmotnost stroje je přibližně 8 tun. Stroj je možné ovládat skrz řídicí jednotku SIEMENS SINUMERIK, respektive řídicím systémem 840D, který zahrnuje i dílenské programování. [18]

Tuhost stroje je důležitým parametrem, který má vliv na dosažené výsledky. Výskyt vibrací má za následek nestabilitu obrábění, což se projeví např. na drsnosti obrobeného povrchu. Tato nestabilita by se také mohla projevit tak, že destička nedosáhne očekávané trvanlivosti a břit se vyломí, s čímž bude třeba počítat.



Obr. 13 MAS SP 280 SY.



Obr. 14 MAS SP 280 SY – detail.

## 5.5 Řezné podmínky

Pro oba obráběné materiály byly zvoleny výchozí řezné podmínky, které byly doporučeny společností Dormer Pramet s.r.o. (viz tab. 3, tab. 4). Tyto podmínky bylo třeba vyzkoušet, neboť do procesu vstupuje hned několik faktorů. Před zahájením obrábění každého z materiálů byla provedena testovací série, která sloužila právě k případné úpravě řezných podmínek. Břítová destička použita pro tuto sérii nebyla brána do úvahy v souvislosti s protokolem.

Po celou dobu upichovacího procesu byla řezná rychlost konstantní. Z důvodu toho, že polotovár byl již předvrtán, nebylo nutné měnit ani rychlost posuvu. Pokud by polotovár předvrtán nebyl, tak by řezná rychlost konstantní nebyla. Při upichování plného materiálu je pro doříznutí doporučeno rychlost posuvu snížit. Při dořezávání je totiž vyměnitelná břítová destička vystavena otěru, čímž rostou nároky na houževnatost a je pravděpodobnější vylomení břitu destičky. Pokud je snížena rychlost posuvu před doříznutím, dochází ke zmenšení řezných sil, což má za následek nárůst životnosti řezného nástroje. [7] S rostoucí hodnotou řezné rychlosti a posuvu samozřejmě klesá trvanlivost destičky.

Tab. 3 Hodnoty řezných podmínek pro mat. ČSN 14 109.

$v_c$ [m/min]	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$f$ [mm]
180	1081	0,12

Tab. 4 Hodnoty řezných podmínek pro mat. ČSN 17 349.

$v_c$ [m/min]	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$f$ [mm]
125	751	0,12

Na základě řezných podmínek byl určen i čas upichovací operace. Pro ocel ČSN 14 109 byla délka jednoho řezného cyklu 3,1 minut. Pro korozivzdornou ocel ČSN 17 349 byla doba jednoho řezného cyklu delší, a to 5,1 minut, jelikož byly pro obrábění korozivzdorné oceli nižší hodnoty otáček a posuvu. Za každý zmíněný cyklus každá destička upichla 19, respektive 20 výrobků.

Tab. 5 Parametry zapichovací operace pro mat. ČSN 14 109.

$D_{\max}$ [mm]	Hl. [mm]	$a_p$ [mm]	Krok <sup>1</sup> [mm]	Čas <sup>2</sup> [s]	Počet záběrů	Čas cyklu [min]
76,0	23,0	3,0	5,0	9,8	19	3,1

Tab. 6 Parametry zapichovací operace pro mat. ČSN 17 349.

$D_{\max}$ [mm]	Hl. [mm]	$a_p$ [mm]	Krok [mm]	Čas [s]	Počet záběrů	Čas cyklu [min]
76,0	23,0	3,0	5,0	15,3	20	5,1

<sup>1</sup> Součet tloušťky budoucího výrobku a šířky vyměnitelné břítové destičky

<sup>2</sup> Čas upichovací operace pro vyrobení 1 ks



## 5.6 Měření tvrdosti

Ještě před zahájením experimentu bylo provedeno měření tvrdosti obrobené plochy zkušební destičkou. Pro měření byl použit tvrdoměr s označením ZHR 4150AK (viz obr. 15). Tvrdost obrobeného povrchu byla měřena za pomoci metody Rockwell (HRB). Tato metoda se řadí mezi statické zkoušky tvrdosti. Princip je založen na vtlačování indentoru do zkoumaného materiálu při určitém zatížení. Hodnota zatížení byla 100 kg, tedy 1000 N. Indentorem byla v tomto případě kalená kulička v nylonovém pouzdře. Průměr kuličky je roven 1/16 palce, tedy přibližně 0,16 mm. Zatížení předchází ještě předzatížení o velikosti 100 N. Předzatížení má za úkol eliminovat nepřesnosti povrchu a zpřesnit tak naměřenou hodnotu. Hodnota tvrdosti se stanovuje na základě rozdílu hloubky vtisku.



Obr. 15 Zařízení pro měření tvrdosti.

Společnost Dormer Pramet s.r.o. zadala předpokládané hodnoty tvrdostí. Pro ocel ČSN 14 109 byla požadovaná hodnota tvrdosti cca 200 HB, pro korozivzdornou ocel ČSN 17 349 to bylo 180 HB. Po převodu z HB na HRB by se naměřené hodnoty pro materiál ČSN 14 109 měly v ideálním případě pohybovat kolem 95 až 100 HRB. Pro materiál ČSN 17 349 by hodnota HRB měla být blízko hodnotě 89 HRB. [19]

Tvrdost byla měřena u obou obráběných materiálů. Její hodnota byla stanovena pro několik různých průměrů, a to vždy 3x.

Tab. 7 Hodnoty tvrdosti materiálu ČSN 14 109.

ČSN 14 109	∅ 36	∅ 44	∅ 52	∅ 60	∅ 68	∅ 76
HRB (1. měření)	87,6	90,0	89,6	91,1	91,2	93,5
HRB (2. měření)	87,3	89,6	91,2	91,0	92,4	93,0
HRB (3. měření)	89,0	89,4	90,5	92,4	92,9	95,2

Tab. 8 Hodnoty tvrdosti materiálu ČSN 17 349.

ČSN 17 349	∅ 36	∅ 44	∅ 52	∅ 60	∅ 68	∅ 76
HRB (1. měření)	79,7	84,7	84,3	83,9	84,3	85,6
HRB (2. měření)	82,0	84,4	85,6	86,3	86,3	87,0
HRB (3. měření)	82,8	84,6	85,3	84,8	84,7	86,6

Naměřené hodnoty tvrdosti (viz tab. 7, tab. 8) byly v očekávaném intervalu. Ukázalo se, že tvrdost dosahuje nejvyšší hodnoty na vnějších průměrech a směrem ke středu její hodnota klesá.

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části této práce je popsána příprava, průběh a výsledky experimentu. Kapitola obsahuje analýzy, které byly navrženy na základě získaných výsledků.

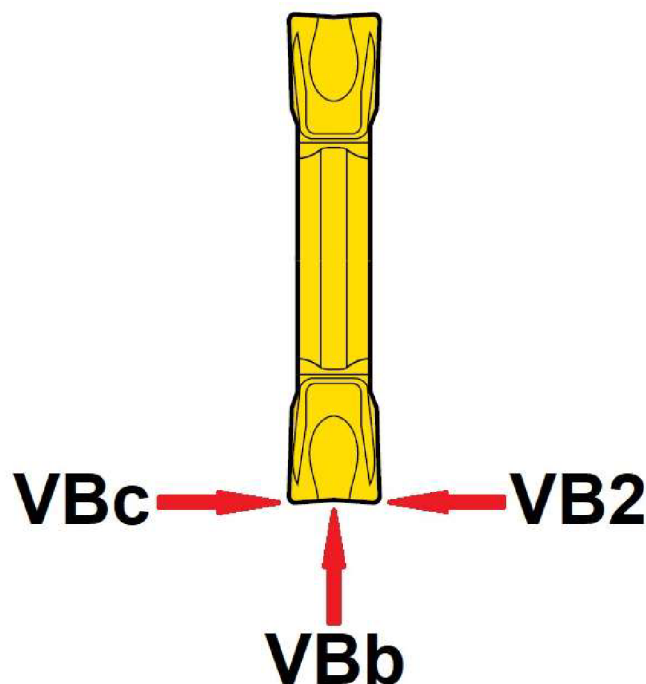
### 6.1 Příprava experimentu

Cílem experimentu bylo zkoumat opotřebení břitové destičky v průběhu řezného procesu. Opotřebení bylo po předem stanovených časových úsecích kontrolováno pomocí mikroskopu. Pro vyhodnocení byly použity čtyři pohledy. Pohled na hlavní hřbet (HH), pohled na oba vedlejší hřbety (VH a VH2) a pohled na čelo nástroje (CC). Na těchto pohledech byla měřena jednotlivá opotřebení (VBb pro pohled HH, VBc pro pohled VH a VB2 pro pohled VH2, dle obr. 16). Hodnoty naměřených opotřebení se následně porovnávaly s kritériální hodnotou (viz tab. 9). V případě, že opotřebení destičky nedosahovalo hodnoty kritéria, byla destička vrácena zpět a byl s ní proveden další řezný cyklus. Pokud se ale část břitu destičky v průběhu cyklu odlomila, nebo hodnota jednoho z měřených opotřebení dosáhla hodnoty kritéria, byla destička vyřazena.

Tab. 9 Hodnoty kritérií opotřebení.

Opotřebení	Značení	Kritérium [mm]
Opotřebení hlavního hřbetu	VBb	0,2
Opotřebení vedlejšího hřbetu	VBc	0,4
Opotřebení vedlejšího hřbetu 2	VB2	0,4

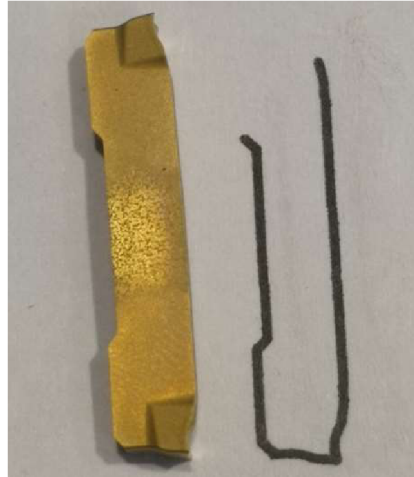
V průběhu experimentální části byl vyplňován protokol, který sloužil k záznamu důležitých dat a vyhodnocení výsledků. Tento protokol byl poskytnut společností Dormer Pramet s.r.o. Dalším požadavkem bylo po každém zmíněném cyklu pořídit skrze mikroskop 4 fotografie pro všechny zkoumané pohledy. Tyto fotografie slouží společnosti Dormer Pramet s.r.o. jako podklady pro další analýzy.



Obr. 16 Schéma pohledů a jednotlivých opotřebení [20].

### 6.1.1 Ustavení VBD pod mikroskopem

Pro rychlé a přesné ustavení destiček do jednotlivých poloh, ze kterých bylo třeba pořídit snímky, bylo nutné vymyslet přípravek. Pro pohledy CC, VH a VH2 bylo zvoleno jednoduché ustavení na papíře, který obsahoval obrys poloviny destičky (viz obr. 17). Papíry byly připevněny ke stolu, díky čemuž byly destičky v jednotlivých pohledech vždy ve stejné pozici a snímky z mikroskopu byly v daných pohledech co nejvíce podobné, což byl jeden z požadavků. Tyto snímky budou po ukončení testování zkoumány i společností Dormer Pramet s.r.o.

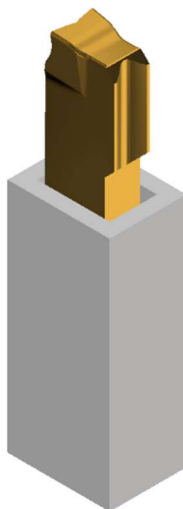


Obr. 17 Umístění VBD na papírovém přípravku.

Problémem byl pohled HH, tedy pohled na hlavní hřbet destičky. Bylo nutné, aby byla břitová destička kolmo k pracovnímu stolu. Proto bylo zvoleno uchycení do plastového přípravku, který bylo nutné vytisknout na 3D tiskárně.

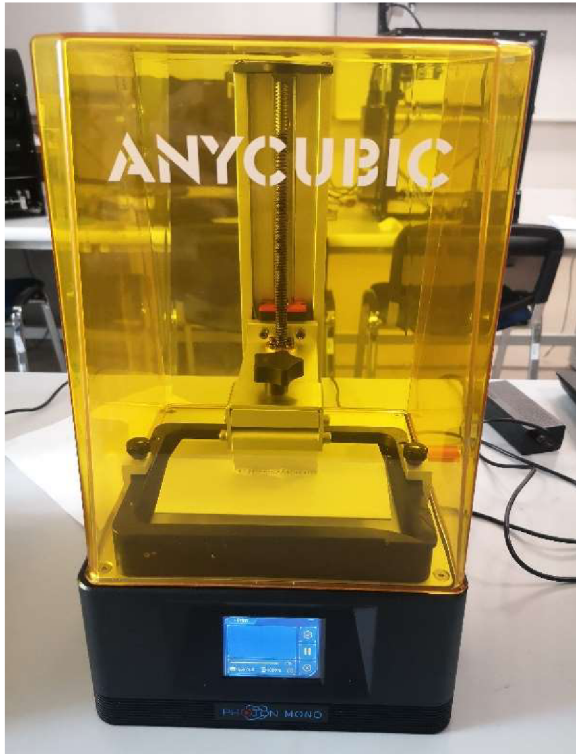
### 6.1.2 3D tisk přípravku

Díky tomu, že společnost Dormer Pramet s.r.o. poskytla 3D model vyměnitelné břitové destičky, bylo navržení přípravku jednoduché. Pro jistotu byly vytisknuty 4 přípravky, každý s jinou hodnotou vůle pro usazení břitové destičky. Tento přípravek (viz obr. 18) byl znovu umístěn stejně jako u ostatních pohledů, tedy na papíře, který obsahoval jeho půdorys.

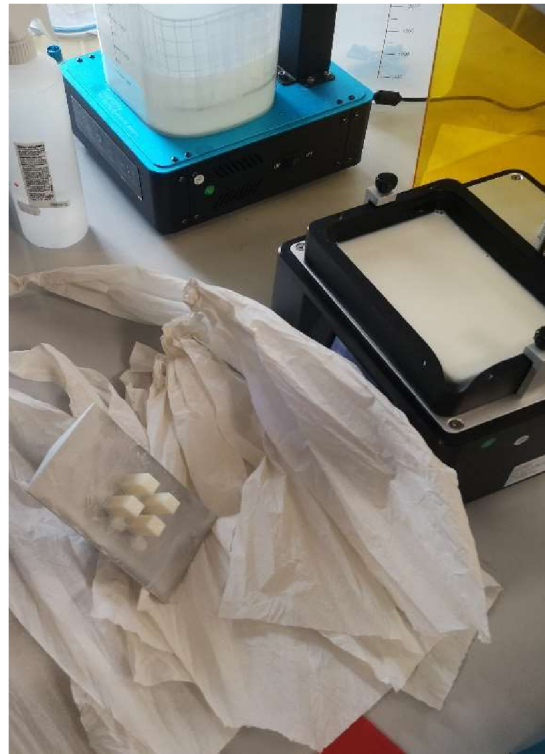


Obr. 18 Návrh přípravku pro pohled HH.

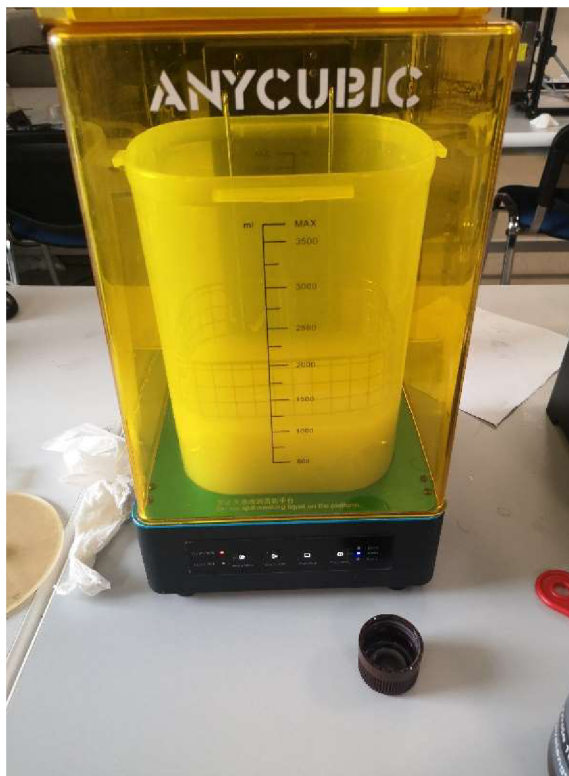
Přípravky byly vytisknuty na 3D tiskárně z materiálu resin, tedy ze syntetické pryskyřice. Poté byly opláchnuty v lázni (viz obr. 21), a nakonec následovalo sušení a vytvrzení (viz obr. 22). Celkový čas tisku včetně dokončovacích operací přesáhl 3 hodiny. Přípravek s břitovou destičkou, který je již ustaven na pracovní ploše pod mikroskopem, je na obr. 23.



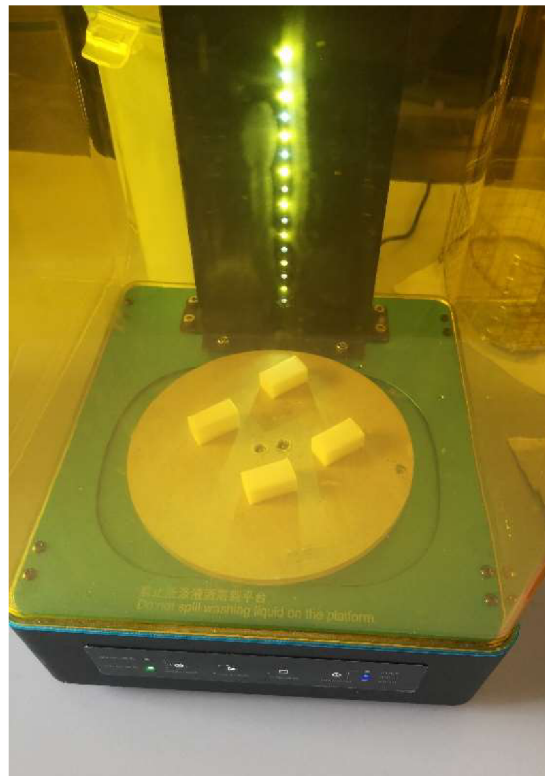
Obr. 19 Tisk přípravku.



Obr. 20 Hotové 3D výtisky.



Obr. 21 Čištění modelů v lázni.



Obr. 22 Vytvrzení pomocí UV záření.



Všechny operace byly provedeny na jedné 3D tiskárně, a to tiskárně Anycubic Photon Mono 4K (viz obr. 19). Pracovní plocha této tiskárny je 132x80x165 mm, čímž jsou určeny také maximální rozměry možných výtisků. Výtisky jsou zhotovovány z fotocitlivé pryskyřice technologií SLA. Po samotném tisku je nutné provést dokončovací operace, mezi něž patří praní a sušení daných výtisků. Výtisky jsou pomocí čistící kapaliny zbaveny zbytků nevytvrzené pryskyřice. Model je nakonec vytvrzen rovnoměrným vystavením UV světlu o vlnové délce 405 nm. Speciální žlutý kryt slouží jako ochrana před UV zářením. V případě, že dojde k otevření tohoto krytu, proces vytvrzování se automaticky pozastaví. [21]

Resin, nebo též syntetická pryskyřice, je plast v tekutém stavu, který je možné vytvrzovat právě UV zářením. Tekutý resin je pomocí 3D tiskárny exponován na požadovaných místech, čímž je vytvrzen. Technologie 3D tisku umožňuje při použití syntetických pryskyřic vyrábět komponenty s velmi přesnými detaily a s vysokou kvalitou výsledného povrchu. Velkou výhodou resinu je hned několik materiálových vlastností. Výtisky se vyznačují vysokou rovnováhou mezi tvrdostí a tažností. Hodnota hustoty výtisků je rovna  $1,184 \text{ g / cm}^3$ , jejich pevnost v tahu je pak 23,4 MPa. [22, 23]



Obr. 23 Hotový přípravek s VBD pod mikroskopem.

## 6.2 Průběh řezných procesů

Před zahájením experimentu bylo třeba daný proces vyzkoušet. Kontrola zahrnovala ověření funkčnosti stroje a programu. Zároveň byly pro zkušební sérii použity doporučené řezné podmínky, které se, v případě výkyvů ve výsledcích, daly upravit.

### 6.2.1 Úprava držáku

Přestože nožový držák disponuje vyztuženým tělesem pro lepší životnost a eliminaci vibrací, bylo třeba zkrátit jeho celkovou délku. Vysoké vyložení totiž také negativně ovlivňuje chvění a vibrace. Nízká hodnota vyložení nástroje znamená nárůst stability, která je při upichování s úzkými břitovými destičkami zvláště důležitá. Zpočátku bylo velkým problémem hlavně chlazení. Při upichování je odvod tepla z místa řezu stěžejní, zejména pokud je zkoumáno opotřebení a životnost destiček. Při testovací sérii, která sloužila pro naladění řezných podmínek, docházelo z důvodu nedostatečného chlazení k vysokému tepelnému namáhání destičky, což bylo doprovázeno také zvukovými projevy.

Přívod řezné kapaliny do místa řezu významně ovlivňuje parametry řezného procesu. Mezi tyto parametry lze zařadit jakost obrobené plochy, trvanlivost bříty nástroje, nebo správný odvod třísek z místa řezu. Chlazení bylo třeba zlepšit, respektive usměrnit proud co nejvíce do místa řezu. Toho bylo docíleno profrézováním drážky v nožovém držáku. Následovalo přivaření kousku plechu. Tím byl usměrněn proud řezné kapaliny přímo do místa řezu. Detail úpravy nožového držáku je na obr. 24.



Obr. 24 Úprava nožového držáku.

### 6.2.2 Úprava řezných podmínek

Před zahájením testování bylo třeba najít vhodné řezné podmínky. Z toho důvodu byla provedena testovací série s výchozími podmínkami, které stanovila společnost Dormer Pramet s.r.o., při použití destiček s označením A. Tyto destičky sloužily jako etalon pro naladění řezných podmínek pro oba obráběné materiály. První série byla provedena s výchozími řeznými podmínkami. V průběhu řezného procesu se však ozývaly neuspokojivé zvuky, dále obrobený povrch nebyl příliš dobrý. Na povrchu byly patrné rýhy (viz obr. 25), které mohly být mimo jiné způsobeny jemným házením. Posuv byl zvýšen na hodnotu  $f = 0,13$  mm. Tato změna měla větší efekt, než se čekalo. Tříška byla lépe odváděna utvařečem, obrobený povrch byl znatelně hladší a nežádoucí zvuky také vymizely.



Obr. 25 Výrobek z testovací série.

### 6.3 Analýza třísky

Správné utváření třísky zajišťuje správný odvod třísky z místa řezu, dobrou životnost nástroje, stabilní řezný proces a dobrou kvalitu obrobku. Proces utváření třísky je však ovlivňován hned několika faktory. Tyto faktory se váží k obráběcím nástrojům, obráběným materiálům, řezným podmínkám a způsobu chlazení. Zatímco některé faktory, jako jsou třeba řezné podmínky, lze snadno změnit, materiálové faktory nástroje nikoliv. Právě změna řezných podmínek je nejvýhodnějším způsobem, jak dosáhnout lepšího utváření třísek.

Každá tříška má dva povrchy, a to vnější a vnitřní. Vnější povrch, který klouže po čele nástroje a způsobuje jeho opotřebení, je většinou čistý a lesklý. Vnitřní povrch, který vznikl z původního povrchu obrobku, má hrubý vzhled a od vnitřního povrchu ho lze poměrně snadno rozeznat (viz obr. 27). Třísky vzniklé při experimentu (viz obr. 26) jsou typické tvášené, soudržné, ploché, spirálové třísky.



Obr. 26 Spektrum třísek získaných obráběním.

Při jednom z řezných procesů došlo k neočekávané destrukci břitu vyměnitelné břitové destičky. Konkrétně se jednalo o destičku A. Její trvanlivost dosáhla pouhých 7 minut, což byl důvod k analýze třísky. Po okamžitém zastavení obráběcího cyklu bylo vybráno několik třísek, které následně podstoupily analýzu pod mikroskopem. Na základě snímků z mikroskopu bylo určeno pořadí jejich předpokládaného vývoje. U třísky na obr. 27 není viditelné žádné zvláštní zbarvení. Na dalších obrázcích má již tříška viditelné zbarvení, které směrem ke středu nabírá na intenzitě a přechází do sytě modré barvy. Takové zbarvení způsobil vysoký nárůst teploty v místě řezu, teplo vzniklé z práce řezného procesu bylo nedostatečně odváděno z místa řezu. Tříška na obr. 30 je již celá zbarvená a přechází z hnědé do modré barvy, její tvar je nepravidelný a zdeformovaný. Právě tato tříška dle předpokladů způsobila přetížení břitu nástroje a předcházela jeho vylomení ještě před dosažením obvyklé hodnoty trvanlivosti.





Obr. 27 Tříska č. 1.



Obr. 28 Tříska č. 2.



Obr. 29 Tříska č. 3.



Obr. 30 Tříska č. 4.

## 6.4 Analýza opotřebení břitových destiček pod mikroskopem

Opotřebení vyměnitelných břitových destiček bylo analyzováno pomocí mikroskopu. Jednalo se o mikroskop ZEISS, který byl nastaven na hodnotu zvětšení 2,5. Skrze počítač byly v programu po určitém časovém cyklu pořízeny snímky daných pohledů. Jednou z důležitých funkcí tohoto programu je odměřování daného opotřebení vyměnitelné břitové destičky. Pracoviště, které sloužilo pro výše zmíněné účely, je vyobrazeno na obr. 31.



Obr. 31 Měřicí pracoviště.

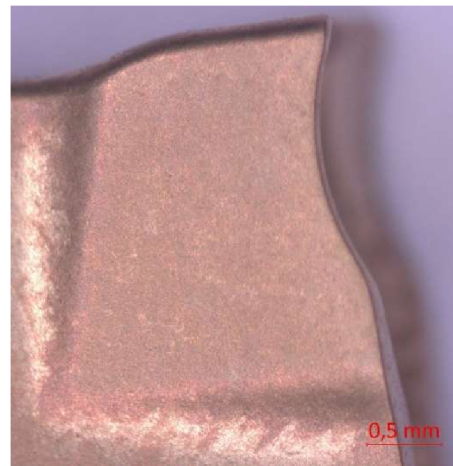
Ještě před zahájením řezného procesu byly pořízeny snímky nových břitových destiček. Poté byly snímky pořizovány každých 3,1 minut u oceli ČSN 14 109, respektive každých 5,1 minut u oceli ČSN 17 349. V následujících kapitolách (6.4.1 až 6.4.6) jsou stručně popsána naměřená data. Přiloženy jsou vybrané snímky z mikroskopu a také graf vývoje jednotlivých opotřebení v čase. S postupem času destičky přicházely o své povlaky a zvyšovalo se jejich opotřebení. Pokud břitová destička přijde v průběhu řezného procesu o svůj povlak, tedy je viditelný substrát, snadno se poté její břit vyštípně.

### 6.4.1 Analýza destiček „A“ při obrábění materiálu ČSN 14 109

Na obr. 32 a obr. 33 je vyobrazena destička s označením A1 ještě před zahájením řezného procesu. Po prvních dvou řezných cyklech destička částečně přišla o svůj povlak. Na konci čtvrtého cyklu opotřebení destičky stále nedosahovalo hodnoty kritéria opotřebení (viz obr. 34 a obr. 35). Během pátého cyklu však došlo k destrukci břítu této destičky. Destička A1 dosáhla konečné hodnoty trvanlivosti 13,4 minut. Očekávaná hodnota trvanlivosti přitom byla minimálně 15 minut.



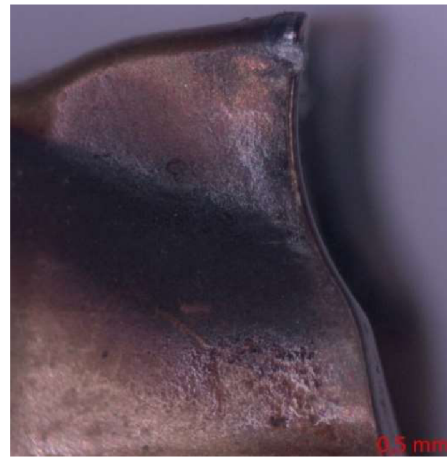
Obr. 32 Nová destička A1 (HH).



Obr. 33 Nová destička A1 (VH2).



Obr. 34 Destička A1 po 12 minutách (HH).

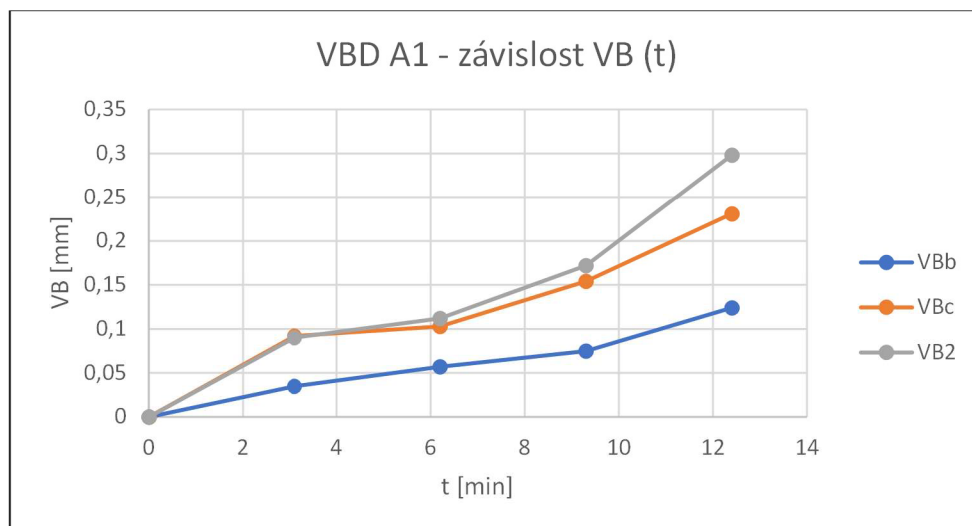


Obr. 35 Destička A1 po 12 minutách (VH2).

Průběh opotřebení destičky A1 je patrný z obr. 36. Nejvyšší hodnoty dosáhlo opotřebení jednoho z hřbetů, hodnotu kritéria však nepřesáhlo. Konečné hodnoty opotřebení nebylo možné naměřit, neboť došlo k vylomení břitu.

Začátek čtvrtého upichovacího cyklu u destičky A2 doprovázely silné zvukové projevy. Proces byl tedy pro jistotu zastaven a destička analyzována pod mikroskopem (viz obr. 37 a obr. 38). Bylo zjištěno, že došlo k několikanásobnému nárůstu opotřebení hlavního hřbetu (VBb). Tato hodnota dosáhla hodnoty  $VBb = 0,416$  mm, tudíž překročila hodnotu kritéria  $VBb = 0,2$  mm. Překročena byla i hodnota kritéria VBc, tedy opotřebení hřbetu, a to o  $0,029$  mm. Vývoj opotřebení destičky A2 v čase je na obr. 39. Hodnota trvanlivosti destičky A2 byla tedy pouhých 10,3 minut.

Rozhodujícím faktorem byl rozptyl. V případě, že rozptyl hodnot trvanlivosti destiček se stejným označením (např. A) a při obrábění téhož materiálu nepřekračuje 15 %, není třeba proces opakovat s novou destičkou. V tomto případě byl rozptyl trvanlivostí mezi destičkou A1 a A2 roven 13,1 %, testování se tedy nemuselo opakovat.

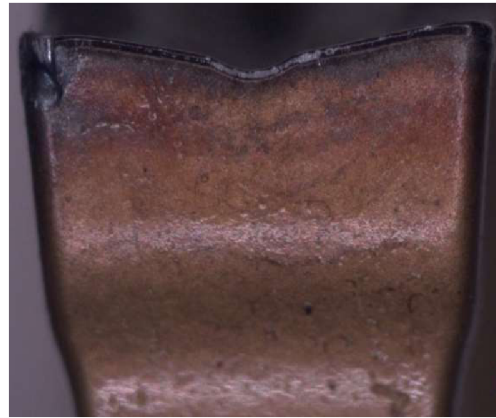


Obr. 36 Vývoj opotřebení v čase – destička A1.

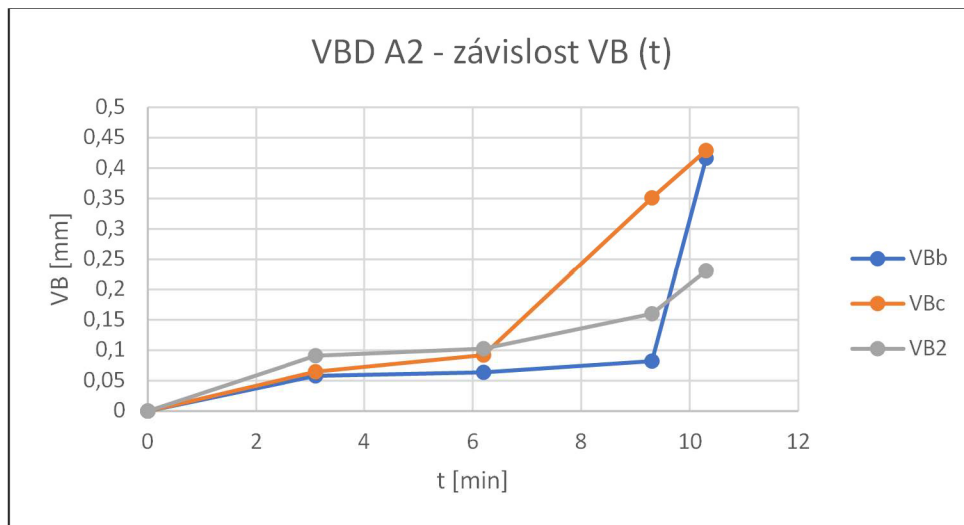




Obr. 37 Destička A2 po 10 minutách (VH).



Obr. 38 Destička A2 po 10 minutách (HH).



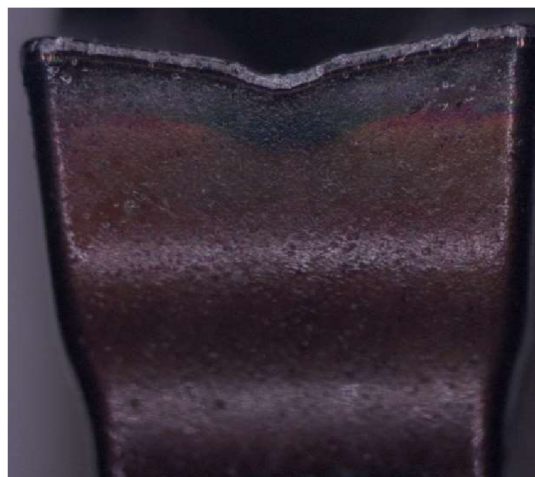
Obr. 39 Vývoj opotřebení v čase – destička A2.

#### 6.4.2 Analýza destiček „B“ při obrábění materiálu ČSN 14 109

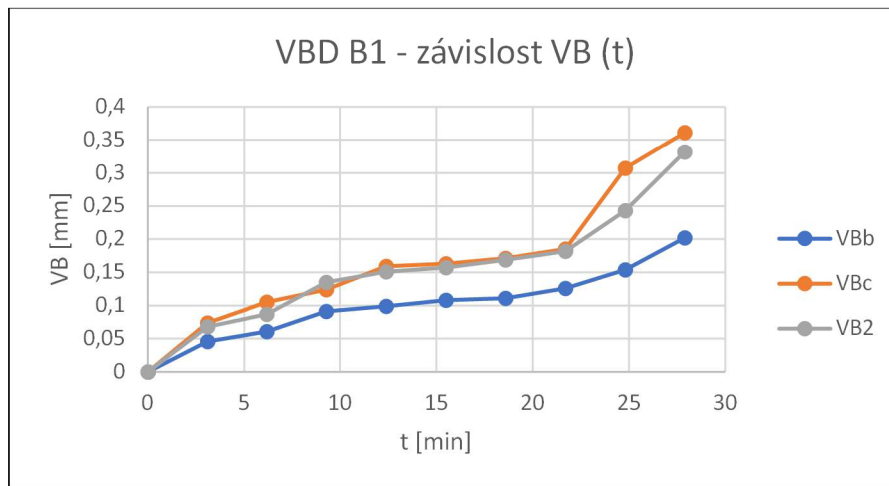
Opotřebení destiček s označením B nenarůstalo tolik, jako u destiček A. Hodnota trvanlivosti, které dosáhla destička B1, byla 27,9 minut. Až po této době bylo nepatrně překročeno kritérium opotřebení hlavního břitu, tedy VBb (viz obr. 41). Pohled na čelo nástroje (viz obr. 40) byl i po více než 27 minutách bez větších známek degradace destičky. Vývoj opotřebení v čase je patrný z obr. 42.



Obr. 40 Destička B1 po 28 minutách (CC).



Obr. 41 Destička B1 po 28 minutách (HH).



Obr. 42 Vývoj opotřebení v čase – destička B1.

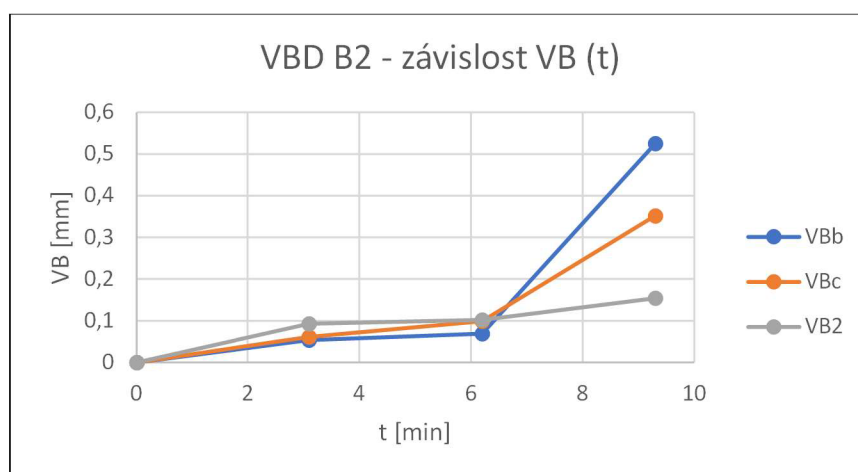
U destičky B2 bylo již po 3. řezném cyklu překročeno kritérium opotřebení. Nárůst hodnoty opotřebení hlavního břitu VBb byl za 3,1 minuty téměř 800 % (viz obr. 45). Pohled na zničený hlavní hřbet nástroje je na obr. 44. Překročeno bylo téměř i kritérium opotřebení špičky nástroje (viz obr. 43). Destička B2 tedy dosáhla trvanlivosti pouhých 9,3 minut. Výsledek, kterého bylo dosaženo, se neočekával. V porovnání s destičkou B1 šlo o naprosto odlišnou hodnotu trvanlivosti a rozptyl hodnot byl větší než 15 %. Proces se tak musel zopakovat s další destičkou. Tato destička byla označena B3.



Obr. 43 Destička B2 po 9 minutách (VH).



Obr. 44 Destička B2 po 9 minutách (HH).

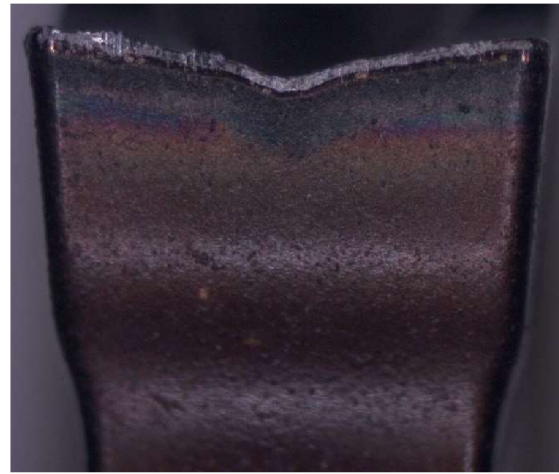


Obr. 45 Vývoj opotřebení v čase – destička B2.

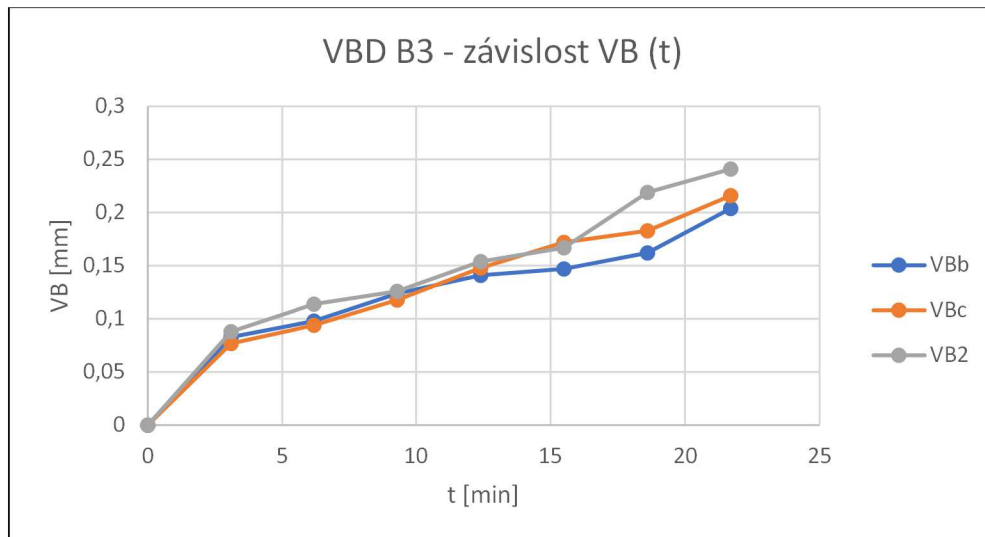
Vývoj opotřebení destičky s označením B3 byl již bez anomálií (viz obr. 48). Konečná hodnota trvanlivosti destičky B3 dosáhla 21,7 minut. Po této době byla v pohledu na hlavní i vedlejší hřbet nástroje jasně viditelná vyštíplá hrana ostří (viz obr. 46 a obr. 47). Překročeno bylo tudíž i kritérium opotřebení hlavního břitu VBb.



Obr. 46 Destička B3 po 22 minutách (VH).



Obr. 47 Destička B3 po 22 minutách (HH).



Obr. 48 Vývoj opotřebení v čase – destička B3.

Hodnota rozptylu trvanlivostí destiček B1 a B3 byla 12,5 %, tedy v normě. Tím bylo testování destiček s označením B na materiálu ČSN 14 109 ukončené.

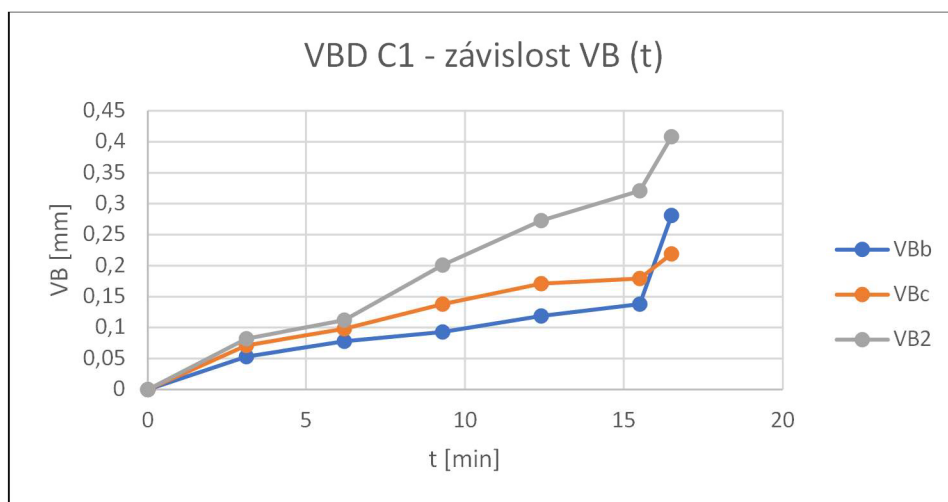
### 6.4.3 Analýza destiček „C“ při obrábění materiálu ČSN 14 109

Destička C1 vykazovala v celém průběhu obrábění vyšší opotřebení na jednom z vedlejších hřbetů (viz obr. 51). Průběh šestého řezného cyklu u destičky C1 byl po minutě zastaven, to z důvodu nezvyklých zvukových projevů. Za tuto dobu došlo ke skokovému nárůstu opotřebení hlavního břitu VBb (viz obr. 49), zároveň bylo i překročeno kritérium na již zmiňovaném hřbetu VB2 (viz obr. 50). Hodnota trvanlivosti destičky C1 dosáhla konečné hodnoty 16,5 minut.





Obr. 49 Destička C1 po 16 minutách (HH). Obr. 50 Destička C1 po 16 minutách (VH2).



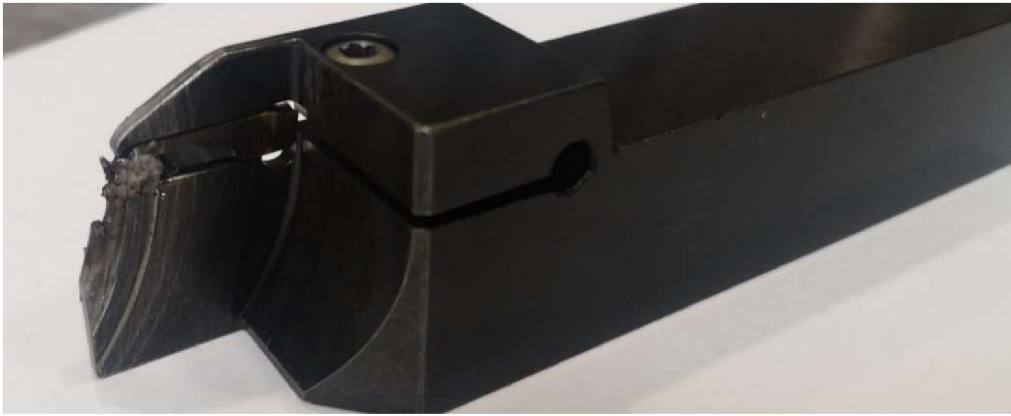
Obr. 51 Vývoj opotřebení v čase – destička C1.

Při řezném procesu došlo u břitové destičky s označením C2, stejně jako u destičky B2 (viz kap. 7.4.2), k nečekané destrukci, což mělo za následek i zničení samotného upichovacího nože (viz obr. 54). Na obr. 52 a obr. 53 lze vidět snímky destičky C2 těsně před vylomením břitu. Nejsou zde patrné žádné velké stopy opotřebení, které by naznačovaly blízkou destrukci břitu destičky. Vzhledem k tomu, že destička dosáhla trvanlivosti pouhých 8 minut, bylo nutné ji nahradit jinou břitovou destičkou C3 a experiment zopakovat.



Obr. 52 Destička C2 po 6 minutách (HH).

Obr. 53 Destička C2 po 6 minutách (VH2).

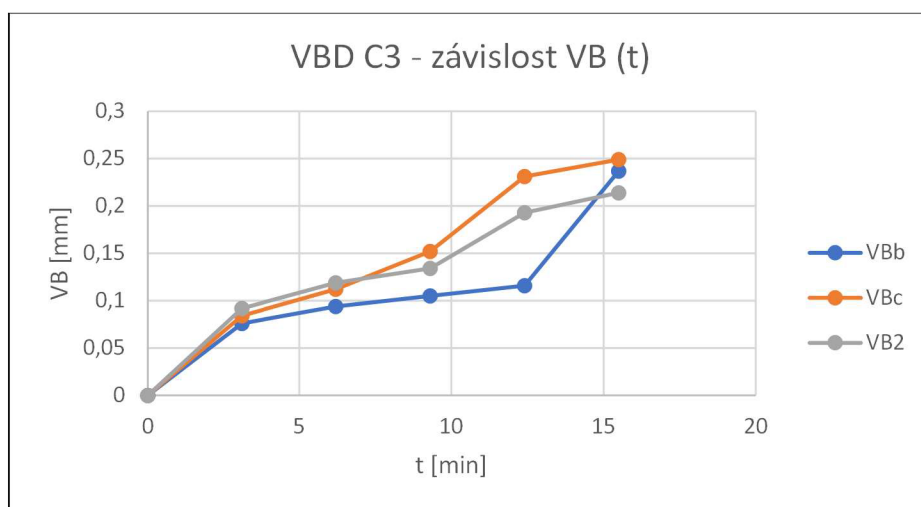


Obr. 54 Upichovací nůž po vylomení břitu VBD.

Destička C3 se chovala podobně jako destička C1, opotřebení na hlavním hřbetu však bylo vyšší (viz obr. 57). Během pátého cyklu došlo k nárůstu opotřebení hlavního břitu VBb na hodnotu 0,237 mm (viz obr. 56), což překročilo hodnotu kritéria 0,2 mm. U vedlejšího hřbetu destičky C3 (viz obr. 55) nedocházelo k tak rychlé degradaci. Hodnota opotřebení na tomto vedlejším hřbetu dosáhla konečné hodnoty 0,214 mm, hodnota kritéria přitom byla 0,4 mm. Destička C3 tak dosáhla trvanlivosti 15,5 minut. Rozptyl mezi trvanlivostmi destiček C1 a C3 činil 3,1 %.



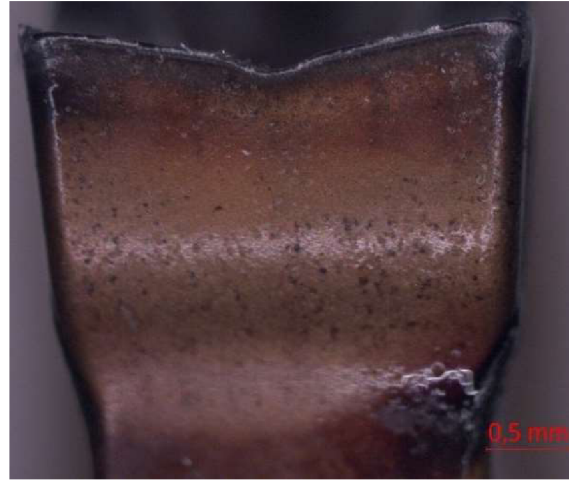
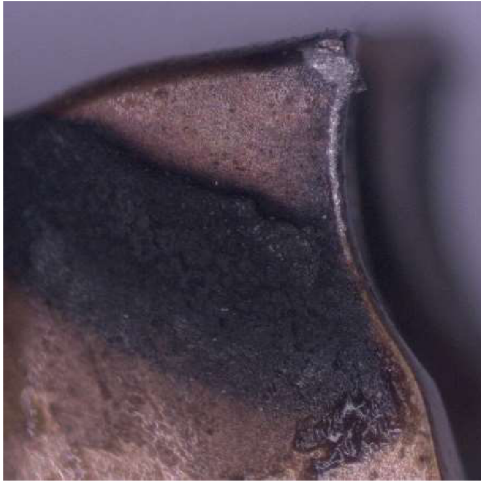
Obr. 55 Destička C1 po 15,5 minutách (VH2). Obr. 56 Destička C1 po 15,5 minutách (HH).



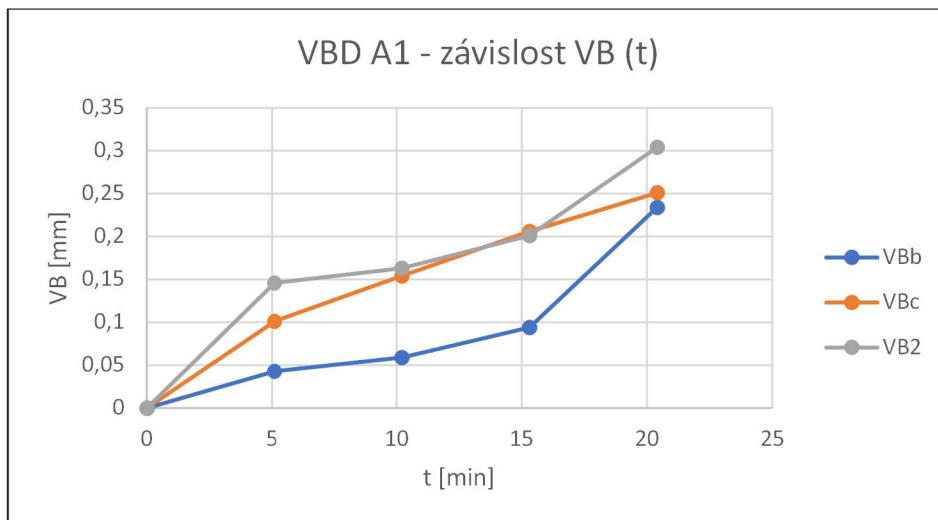
Obr. 57 Vývoj opotřebení v čase – destička C3.

#### 6.4.4 Analýza destiček „A“ při obrábění materiálu ČSN 17 349

Během čtvrtého řezného cyklu došlo u destičky A1 k nárůstu opotřebení hlavního břitu VBb na dvojnásobek (viz obr. 60). Hodnota trvanlivosti destičky A1 tak dosáhla konečné hodnoty 20,4 minut. Důvodem ukončení řezného procesu bylo právě překročení kritéria opotřebení hlavního břitu VBb (viz obr. 59). Pohled na vedlejší hřbet destičky A1 (viz obr. 58) poukazuje na pokročilé opotřebení hlavního i vedlejšího břitu.



Obr. 58 Destička A1 po 20,4 minutách (VH2). Obr. 59 Destička A1 po 20,4 minutách (HH).

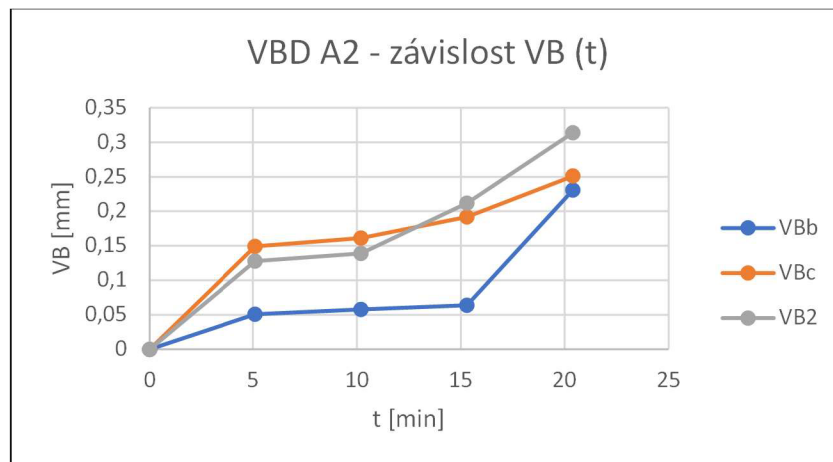


Obr. 60 Vývoj opotřebení v čase – destička A1.

Obě destičky s označením A měly při obrábění oceli ČSN 17 349 podobný vývoj opotřebení. Mezi třetím a čtvrtým upichovacím cyklem, tedy mezi patnáctou a dvacátou minutou, došlo u obou destiček k téměř identickému nárůstu opotřebení hlavního břitu VBb (viz obr. 60 a obr. 63). Toto opotřebení překročilo hodnotu dovoleného kritéria. Pohled na vedlejší a hlavní hřbet destičky A2, těsně po ukončení její trvanlivosti, je na obr. 61, respektive obr. 62. Konečná hodnota trvanlivosti destičky A2 byla, shodně jako u břitové destičky A1, 20,4 minut.



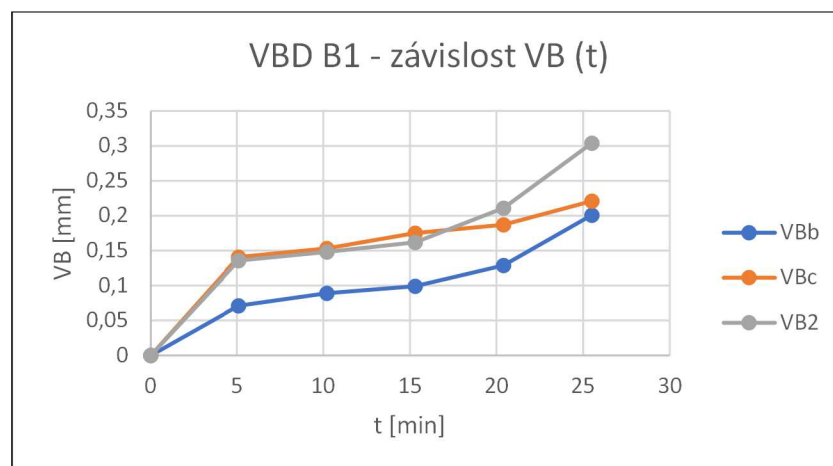
Obr. 61 Destička A2 po 20,4 minutách (HH). Obr. 62 Destička A2 po 20,4 minutách (HH).



Obr. 63 Vývoj opotřebení v čase – destička A2.

#### 6.4.5 Analýza destiček „B“ při obrábění materiálu ČSN 17 349

Po pátém upichovacím cyklu, tedy po 25,5 minutách, bylo u destičky B1 zjištěno hraniční překročení kritéria opotřebení hlavního břitu VBb (viz obr. 65). Jednalo se o hodnotu 0,201 mm. Hlavním důvodem vyřazení destičky B1 z experimentu byla hrozba vylomení břitu destičky v dalším řezném cyklu a s tím spojené zničení držáku. Přestože hodnoty opotřebení na vedlejším hřbetu ještě zdaleka nedosahovaly kritériální hodnoty 0,4 mm (viz obr. 64), hodnota trvanlivosti destičky B1 již byla dána překročením kritéria VBb.



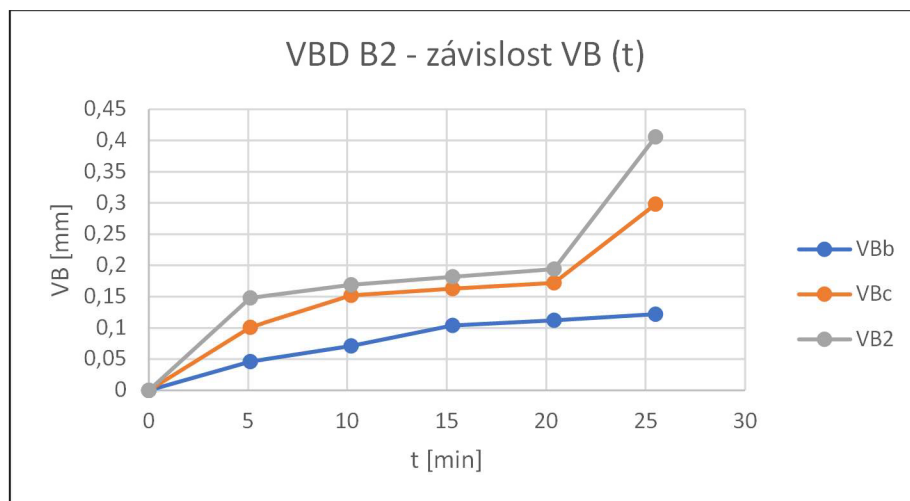
Obr. 64 Vývoj opotřebení v čase – destička B1.



Destička B2 měla hodně podobný vývoj opotřebení jako destička B1 (viz obr. 67). V průběhu pátého upichovacího cyklu došlo k nárůstu opotřebení na vedlejším hřbetě (viz obr. 66), a to více než dvojnásobně. Tato hodnota VB2 tak přesáhla hodnotu daného kritéria, která byla 0,4 mm. V řezném procesu se tak nemohlo dále pokračovat. Hodnota trvanlivosti destičky B2 tedy dosáhla hodnoty 25,5 minut. Destičky s označením B však i po 25,5 minutách nejevily tak vysoké známky opotřebení, a pokud by opotřebení při pátém cyklu nevzrostlo o tolik procent, téměř s jistotou by tyto destičky byly schopny provést další upichovací cyklus.



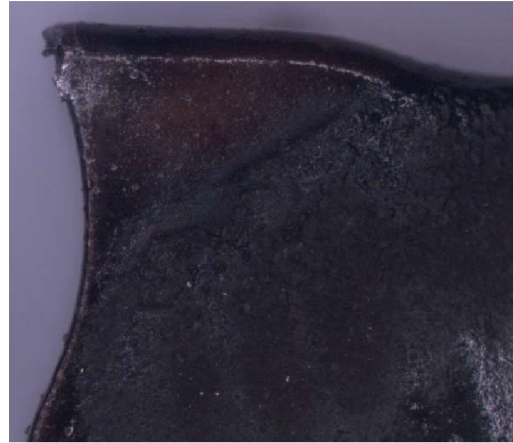
Obr. 65 Destička B1 po 25,5 minutách (HH). Obr. 66 Destička B2 po 25,5 minutách (VH2).



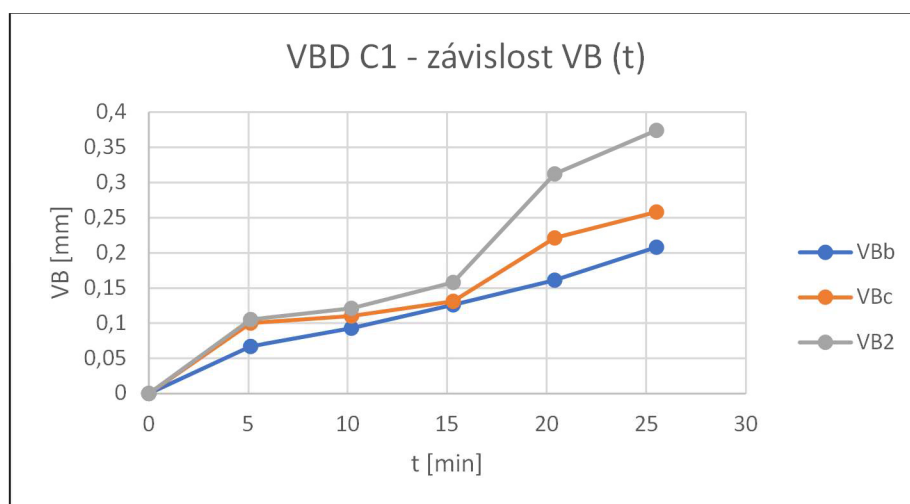
Obr. 67 Vývoj opotřebení v čase – destička B2.

#### 6.4.6 Analýza destiček „C“ při obrábění materiálu ČSN 17 349

Důvodem pro ukončení upichovacího procesu u destičky C1 bylo vyštípnutí hrany ostří, ke kterému došlo v průběhu pátého upichovacího cyklu. Toto vyštípnutí řezné hrany je nejlépe viditelné z obr. 69. Zároveň došlo k překročení kritéria opotřebení hlavního břitu VBb (viz obr. 68). Vývoj měřených opotřebení v čase u destičky C1 je na obr. 70. Konečná hodnota trvanlivosti břitové destičky C1 byla 25,5 minut.



Obr. 68 Destička C1 po 25,5 minutách (HH). Obr. 69 Destička C1 po 25,5 minutách (VH).

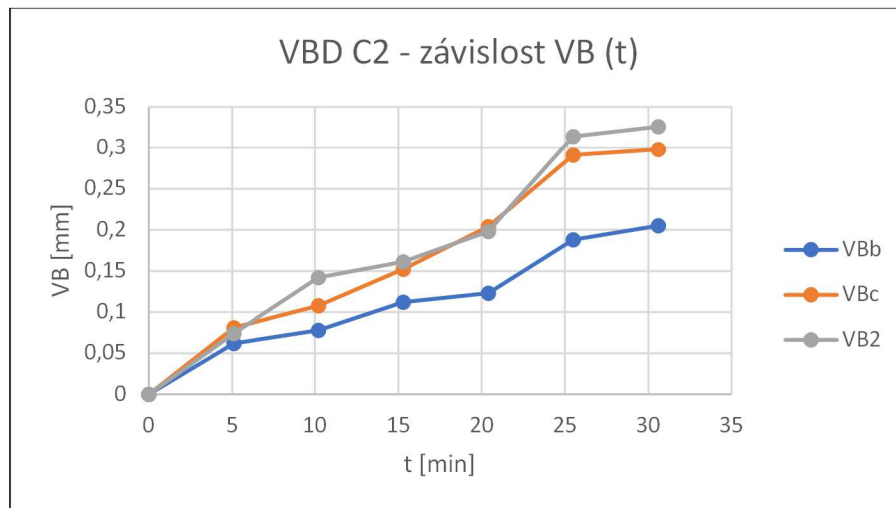


Obr. 70 Vývoj opotřebení v čase – destička C1.



Obr. 71 Destička C2 po 15,3 minutách (HH). Obr. 72 Destička C2 po 30,6 minutách (HH).



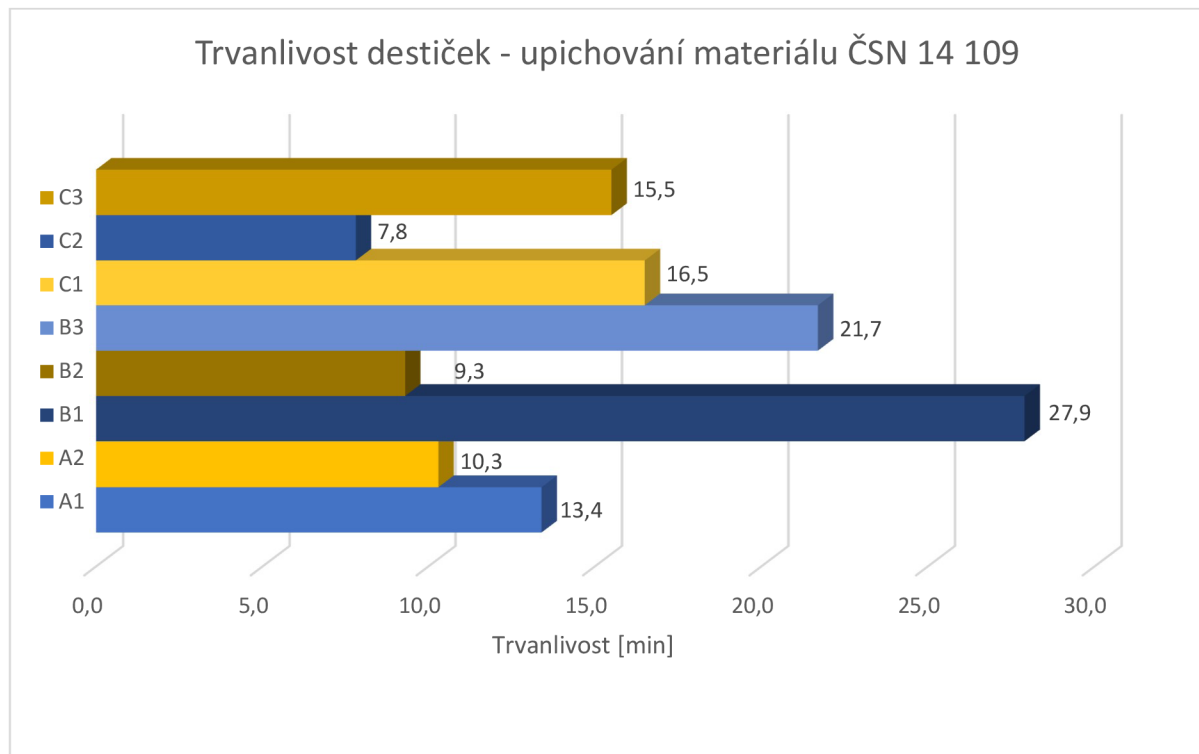


Obr. 73 Vývoj opotřebení v čase – destička C2.

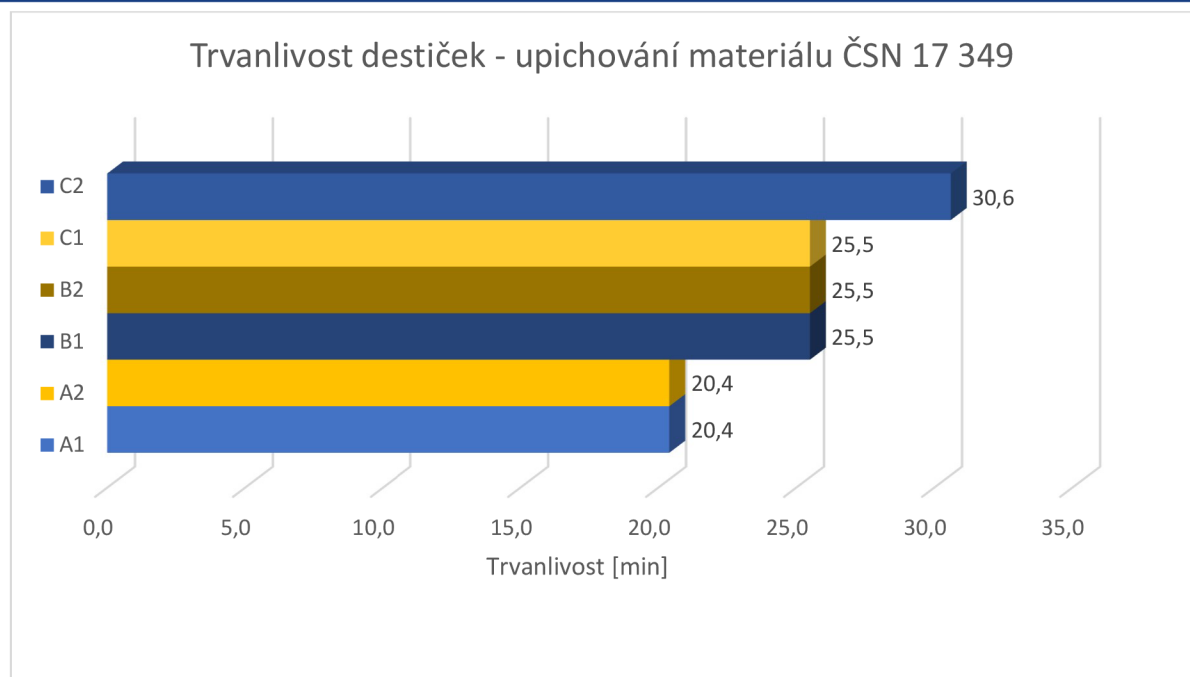
Vývoj opotřebení v čase byl u břitových destiček C1 a C2 zpočátku v mnoha směrech podobný, ne-li téměř stejný. Znatelný rozdíl byl zpozorován až při pátém upichovacím cyklu, kdy u destičky C1 došlo k vyštípnutí řezné hrany. U destičky C2 se nic takového nestalo a kritérium opotřebení hlavního břitu (VBb) bylo překročeno až po následujícím řezném cyklu (viz obr. 73). Vývoj opotřebení hlavního břitu v čase je částečně znázorněn na snímcích z mikroskopu (viz obr. 71 a obr. 72). Břítová destička C2 tak dosáhla konečné hodnoty trvanlivosti 30,6 minut. Rozptyl trvanlivostí destiček C1 a C2 byl roven 9,1 %, tedy v normě.

## 6.5 Zhodnocení trvanlivosti výměnitelných břitových destiček

Při upichování ocelí ČSN 14 109 a ČSN 17 349 se u destiček B a C očekávaly vyšší hodnoty trvanlivosti, než u destiček s označením A. Vzhledem k tomu, že trvanlivosti obou testovaných destiček B a C přesáhly hodnotu 20, respektive 15 minut, byly výsledky testování zhodnoceny jako uspokojivé a test byl ukončen. Dosažené trvanlivosti všech destiček, použitých pro obrábění oceli ČSN 14 109, jsou vyneseny v grafu (viz obr. 74). Ještě před zahájením testování se očekávalo, že se ocel ČSN 17 349 bude obrábět hůře, než ocel ČSN 14 109. Důvodem byla vyšší hodnota houževnatosti materiálu ČSN 17 349. Čím vyšší je hodnota houževnatosti obráběného materiálu, tím snadněji může dojít právě k vylomení břitu nástroje. Tento předpoklad byl nicméně vyvrácen, při obrábění oceli ČSN 17 349 nedošlo ani k jedné destrukci břitu. Na obr. 75 jsou znázorněny trvanlivosti břitových destiček použitých pro obrábění oceli ČSN 17 349. Všechny destičky dosáhly očekávaných hodnot trvanlivostí. Naopak, při upichování oceli ČSN 14 109, destičky C překročily hodnotu trvanlivosti 15 minut jen nepatrně. To byl jeden z důvodů, proč byly obráběné materiály i nástroje podrobeny dodatečným analýzám.

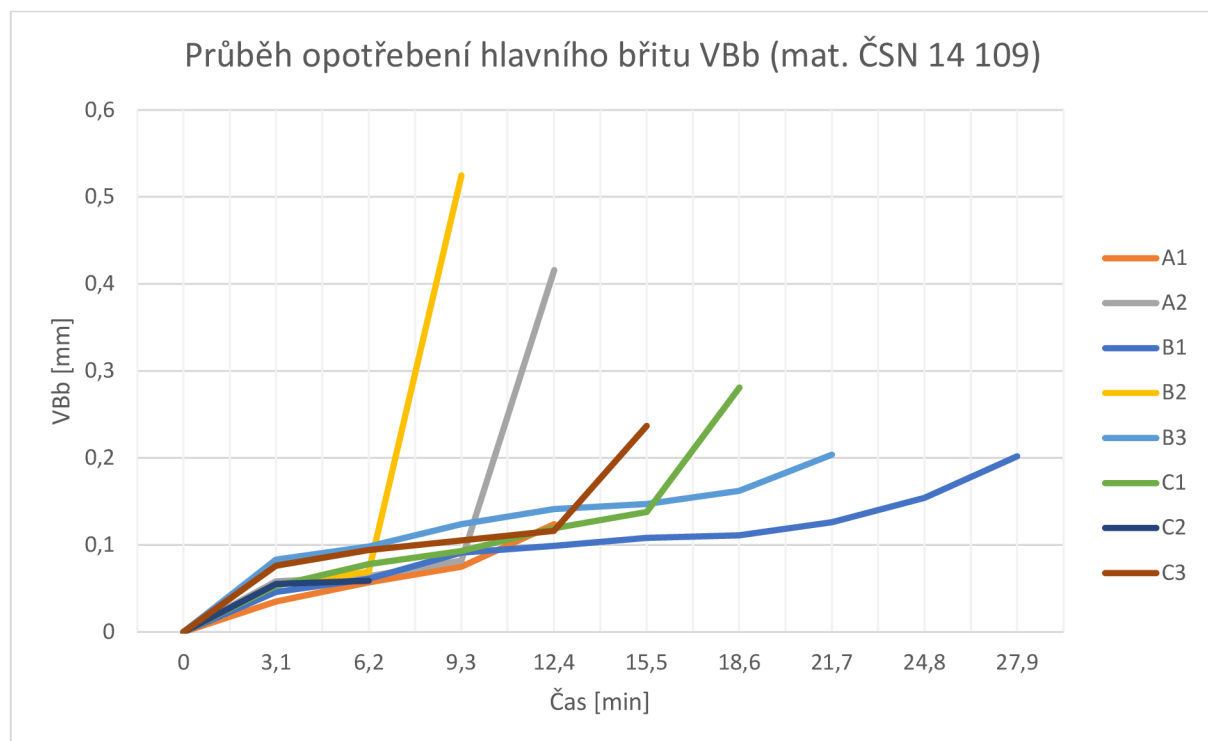


Obr. 74 Hodnoty trvanlivostí všech testovaných destiček – mat. ČSN 14 109.



Obr. 75 Hodnoty trvanlivostí všech testovaných destiček – mat. ČSN 17 349.

Na základě získaných dat byly sestrojeny i grafy vývoje jednotlivých opotřebení všech destiček při upichování určitého materiálu (viz příloha 3). Na ilustračním grafu (viz obr. 76) je zobrazen vývoj opotřebení hlavního břitu (VBb) všech testovaných destiček při upichování materiálu ČSN 14 109.



Obr. 76 Vývoj hodnoty VBb v čase (mat. ČSN 14 109).

## 6.6 Materiálová analýza obráběných materiálů

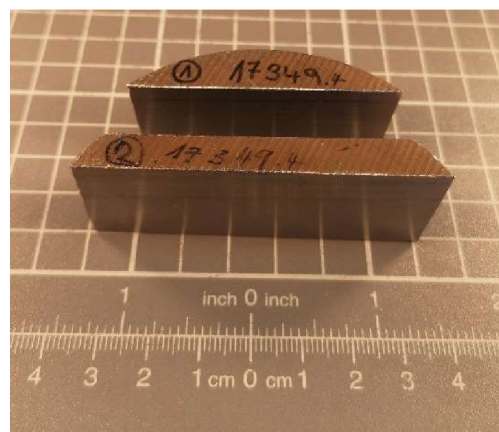
Z důvodu odchylek od očekávaných trvanlivostí vyměnitelných břitových destiček byly obráběné polotovary podrobeny zkouškám, které se týkaly jejich mechanických vlastností a analýze mikrostruktury.

### 6.6.1 Příprava a popis jednotlivých analýz

Z obou materiálů byly uříznuty vzorky menších rozměrů (viz obr. 77 a 78), které byly následně dopraveny do laboratoře Univerzity obrany. Vzorky č. 1 jsou vzorky na vnějším obvodu polotovaru, vzorky č. 2 jsou vzorky blíže středu polotovaru. Vzhledem k vybavenosti a široké škále moderních přístrojů bylo možné podrobit dané vzorky potřebným analýzám. Jednalo se o analýzu mikrotvrdomosti a zhotovení snímků mikrostruktury.



Obr. 77 Vzorek mat. ČSN 14 109.



Obr. 78 Vzorek mat. ČSN 17 349.

Prvním krokem byla dodatečná úprava vzorků. Jelikož je vzorek lisován do speciálního přípravku (viz obr. 79), je nutné dodržet rozměry 20x20 mm. V případě, že je vzorek větší, jsou jeho rozměry upraveny na metalografické pile (viz obr. 80). Lisování probíhá při teplotě 180° C. Zalisovaný vzorek je následně zbroušen za účelem dosažení co nejhladší plochy. Takový povrch je poté nutné naleptat. Takto připravené vzorky je možné podrobit příslušným analýzám. [24]



Obr. 79 Zalisované vzorky.



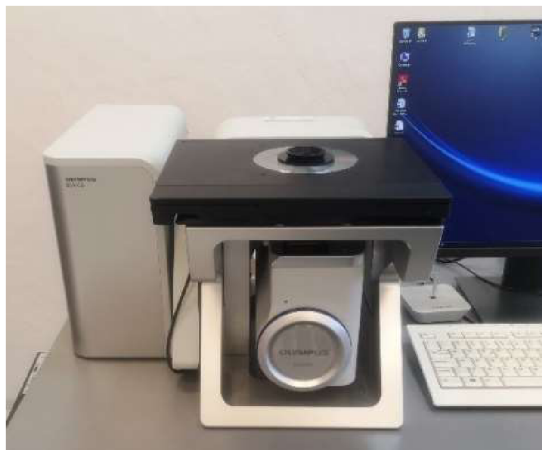
Obr. 80 Pila pro rozměrovou úpravu vzorků.

První provedenou analýzou bylo měření tvrdosti. Problémové vzorky budou podrobeny také měření mikrotvrdomosti, což je jedna z metod sloužících pro stanovení tvrdosti daného materiálu. Slouží pro zjištění lokálních změn v materiálu, pro analýzu cementovaných vrstev, nitridovaných vrstev, nebo analýzu povrchového zpevnění po obrábění. Přístroj pro měření hodnot mikrotvrdomosti je na obr. 81. Indentorem je diamantové tělíčko, které je vtlačeno do materiálu předem definovanou silou. Pro měření mikrotvrdomosti nesmí zatížení překročit hodnotu 1 kg. Obvykle se hodnoty zatížení pohybují v řádech gramů. Zhotoveno je mnoho malých vpichů, které jsou následně analyzovány pomocí světelného mikroskopu. Čím menší je vpich při dané síle zatížení, tím vyšší hodnotou tvrdosti zkoumaný materiál disponuje. [24]



Obr. 81 Zařízení pro měření mikrotvrdomosti.

Další provedenou analýzou bylo pozorování a nafocení mikrostruktury obou materiálů pomocí přístroje Olympus DSX 100 (viz obr. 82). Jedná se o optodigitální metalografický mikroskop, který se používá pro sledování mikrostruktury. [25]



Obr. 82 Zařízení pro pozorování mikrostruktury.



### 6.6.2 Výsledky materiálu ČSN 14 109

Struktura je jak u vzorku 1 (viz obr. 83), tak u vzorku 2 (obr. 84) krásně vyžíhaná. Ze snímků struktury jsou patrná zrna globulárního perlitu. Téměř identická struktura na všech snímcích poukazuje na dobrou homogenitu materiálu.



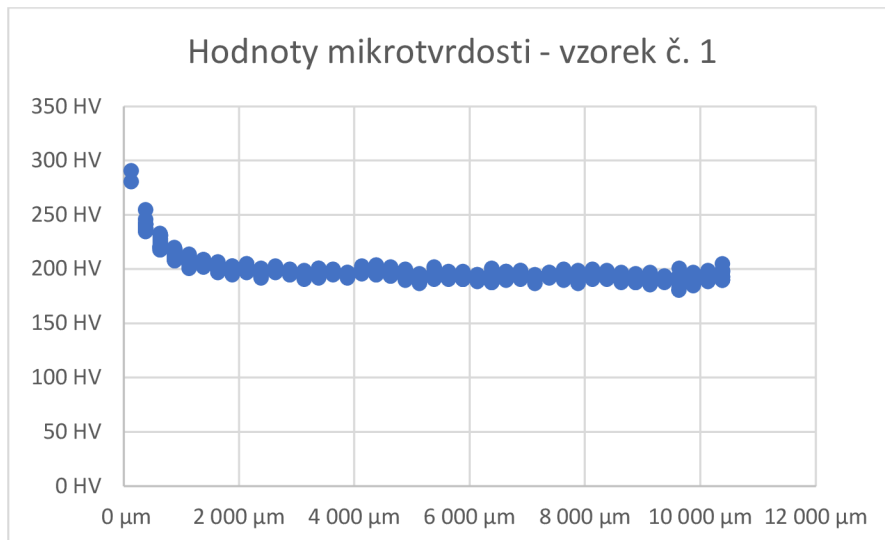
Obr. 83 Snímek mikrostruktury (mat. ČSN 14 109, vzorek 1).



Obr. 84 Snímek mikrostruktury (mat. ČSN 14 109, vzorek 2).

Vzorky byly dále podrobeny analýze mikrotvrdomosti. Bylo provedeno několik stovek vpichů při pracovním zatížení 500 gramů. U vzorku č. 2 se hodnoty mikrotvrdomosti pohybovaly mezi 173 a 217 HV. Průměrná hodnota mikrotvrdomosti byla 190 HV, což po převodu z HV do HRB přibližně odpovídá hodnotě 89 HRB. U vzorku č. 1 byla zkouškou mikrotvrdomosti objevena zpevněná vrstva v hloubce přibližně 2 mm pod povrchem (viz obr. 85). Hodnoty mikrotvrdomosti se pohybovaly mezi 181 a 291 HV. Průměrná hodnota mikrotvrdomosti vzorku č. 1 pak byla 198 HV, což odpovídá hodnotě 91 HRB. [19]. Získané hodnoty mikrotvrdomosti jsou shodné s hodnotami, které byly stanoveny zkouškou tvrdosti (viz kap. 5.6), samozřejmě s výjimkou hodnot naměřených v místě zpevnění.

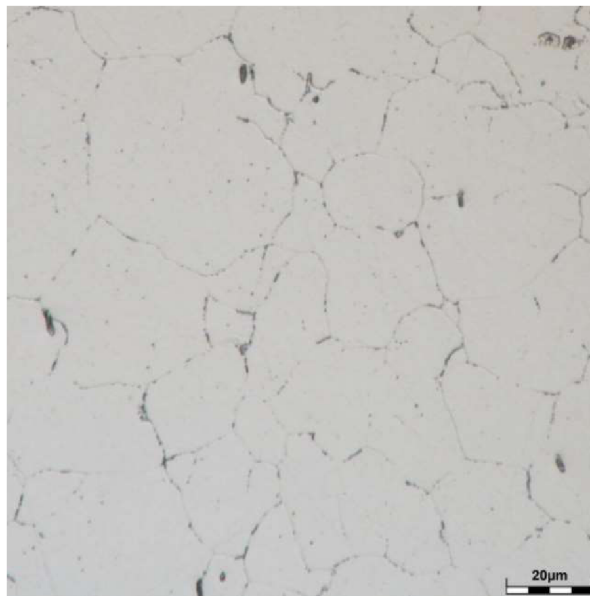




Obr. 85 Graf hodnot mikrotvrdostí (mat. ČSN 14 109).

### 6.6.3 Výsledky materiálu ČSN 17 349

Austenitická struktura odpovídá, nicméně je přítomno velké množství vměstků (viz obr. 86). Takto vysoký výskyt vměstků není standardní a poukazuje na chybu materiálu. Jedná se o vměstky sulfidické a oxidické. Měkké sulfidické vměstky, které v dané struktuře převládají, nemají na proces obrábění značný vliv. I proto při obrábění této korozivzdorné oceli nedošlo v průběhu experimentu ani jednou k destrukci břitu řezného nástroje. [24]



Obr. 86 Snímek mikrostruktury (mat. ČSN 17 349, vzorek 1).

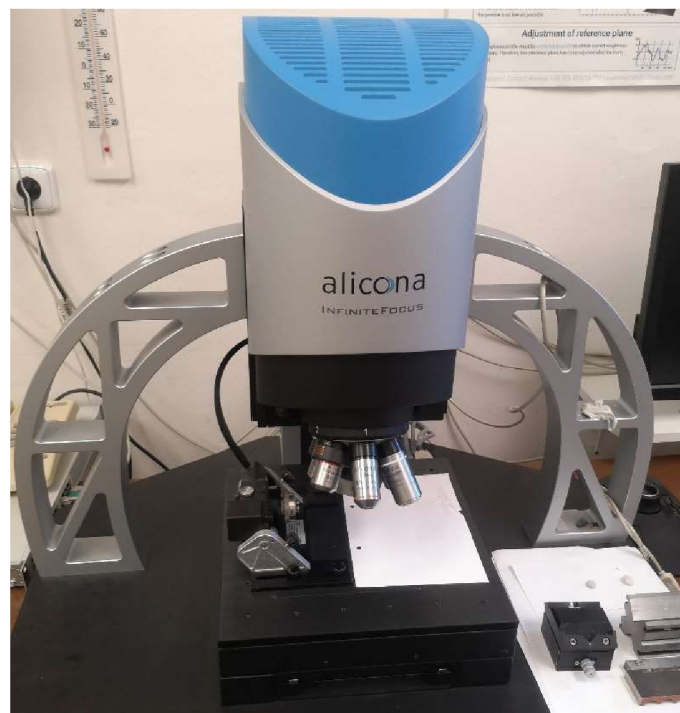
U vrchního vzorku se hodnoty mikrotvrdosti pohybovaly mezi 182 a 228 HV. Průměrná hodnota mikrotvrdosti byla 200 HV. Hodnoty mikrotvrdosti vzorku č. 2 se pohybovaly mezi 184 a 231 HV. Průměrná hodnota mikrotvrdosti vzorku č. 2 pak byla 205 HV. Rozptyl naměřených hodnot při měření mikrotvrdosti není považován za chybu, i odchylky blíží se k 20 % jsou při zkoumání mikrotvrdosti v normě. Při měření mikrotvrdosti platí, že čím více vměstků daná struktura obsahuje, tím složitější je dosáhnout přesných výsledků. Průměrné hodnoty získané zkouškou mikrotvrdosti odpovídají po převodu hodnotě 92 HRB. Hodnoty tvrdosti se však při měření tvrdosti (viz kap. 5.6) pohybovaly mezi 84 a 87 HRB. Tato nepřesnost je pravděpodobně způsobena právě vysokým výskytem vměstků ve struktuře. [19]

#### 6.6.4 Zhodnocení

Analýzy provedené na obráběných materiálech neprokázaly jasný vliv na různé trvanlivosti břitových destiček. Objevení zpevněné vrstvy poukazuje na fakt, že materiál ČSN 14 109, který byl použit pro experiment, mohl částečně ovlivnit výsledky testů. Avšak za předpokladu, že má daný materiál po celé své délce stejné vlastnosti, jako byly při analýzách zjištěny, lze při technologii upichování očekávat stejné řezné podmínky pro všechny břitové destičky. Pro jednoznačnost tohoto vyjádření by bylo zapotřebí provést více analýz ve více místech polotovaru.

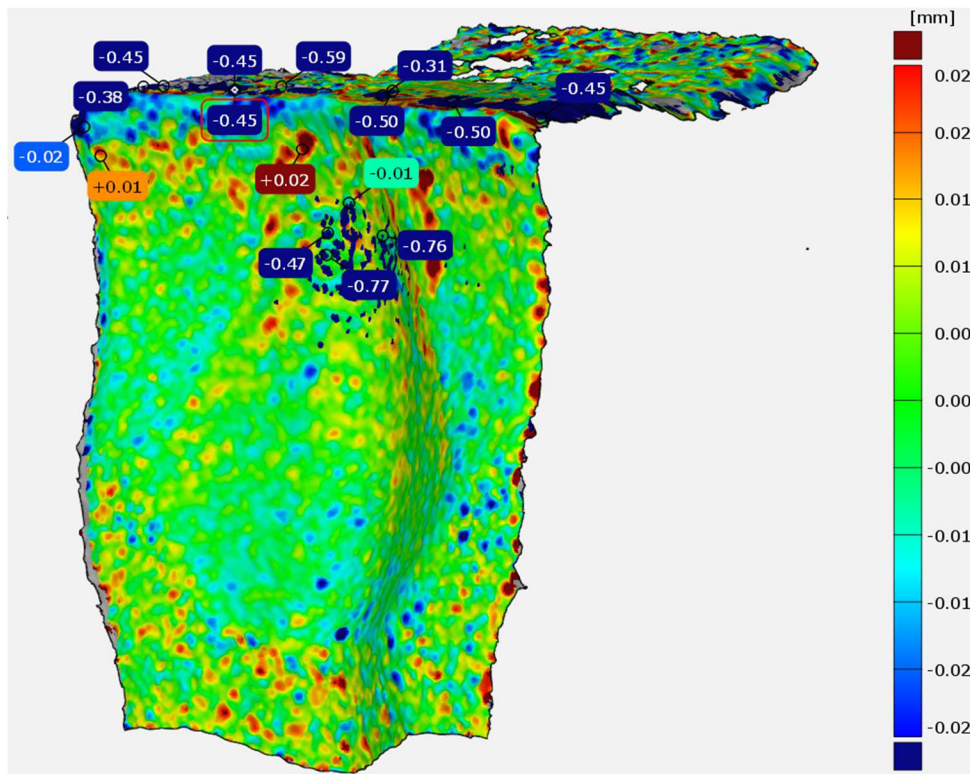
### 6.7 Analýza geometrie nástroje

Alicona InfiniteFocus G4 (viz obr. 87) je měřicí přístroj, který se používá k měření tvaru, opotřebení a drsnosti povrchů řezných nástrojů. Zařízení Alicona se využívá při vývoji řezných nástrojů a stanovení optimálních parametrů pro náročné aplikace. Mezi projekty, které využívají zařízení Alicona, lze zařadit vývoj nové generace ochranných povlaků řezných nástrojů. Přístroj využívá metody Focus-Variation, jež kombinuje malou hloubku ostrosti optického systému s vertikálním skenováním a poskytuje topografické informace na základě změny ostrosti. Kromě topografických informací umožňují snímače barevné snímání. Přístrojem Alicona lze bez problémů měřit většinu technických povrchů, je dobrý pro neprůhledné a průsvitné materiály. Problémem jsou materiály průhledné a vzorky s vysoce leštěnými povrchy. [26, 27]



Obr. 87 Alicona InfiniteFocus G4

Pomocí výše popsaného přístroje byl zhotoven sken vyměnitelných břitových destiček A1, B1 a C1 použitých při experimentu, a to pro oba obráběné materiály. Naskenován byl také původní povrch destiček bez opotřebení. V programu GOM Inspect byla následně provedena analýza odchylek naskenovaného tvaru pro každou destičku. Na obr. 88 je mapa odchylek destičky C1 po obrábění materiálu ČSN 17 349. Mapy odchylek ostatních destiček jsou k nahlédnutí v příloze 2.

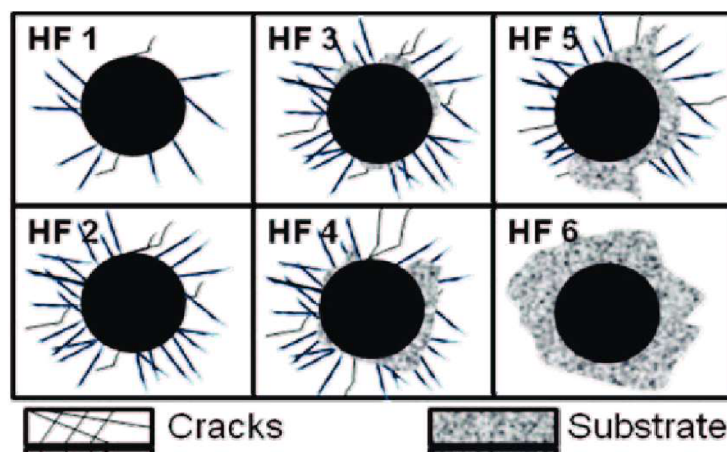


Obr. 88 Mapa odchylek destičky C1 (mat. ČSN 17 349)

### 6.8 Analýza povlaku

Jedním z možných důvodů, proč u některých destiček docházelo k nečekanému vylamování bříty, může být nedostatečná kvalita povlaku, která má na hodnotu trvanlivosti značný vliv. Kvalitu, respektive přilnavost povlaku lze zjistit pomocí indentační zkoušky.

Jedná se o Daimler-Benz adhezní zkoušku, která úzce souvisí s metodou Rockwell. Po jejím provedení je pomocí mikroskopu analyzován daný vtisk. Na základě toho, jak se povlak chová v místě vtisku, je možné vyhodnotit jeho kvalitu. Pro posouzení přilnavosti povlaků slouží 6 standardizovaných variant vzhledu vtisku (viz obr. 89). Pokud je v okolí vtisku pouze menší množství prasklin, je kvalita provedení povlaku vyhovující. Za vyhovující lze označit vtisky shodné s HF1 a HF2 (viz obr. 89). V případě, že je prasklin v okolí vtisku mnoho, nebo je dokonce viditelný substrát, lze takový povlak označit za nekvalitní. Výsledky této metody jsou však zatíženy hned několika vlivy, mezi které lze zařadit materiál substrátu a jeho tvrdost, dále pak materiál a tloušťku povlaku. [24, 28]



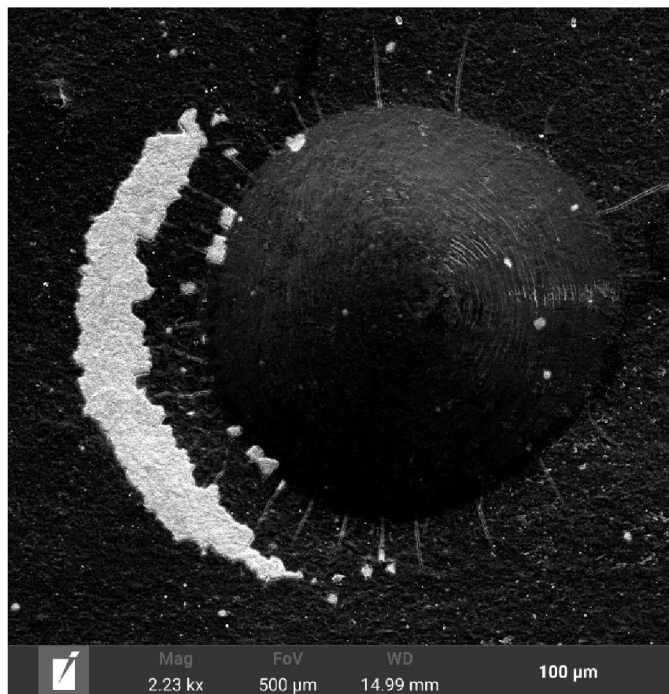
Obr. 89 Vzhled vtisku pro porovnání a vyhodnocení [28].

Daimler-Benz adhezní zkouška povlaku byla provedena na tvrdoměru ZHR 4150AK (viz obr. 90), a to u destiček s označením A, B i C. Snímky z elektronového mikroskopu, které zachycující okolí vtisku, jsou na obr. 91 až 93. Následně bylo provedeno porovnání se standardem a zařazení do skupiny (dle obr. 89).



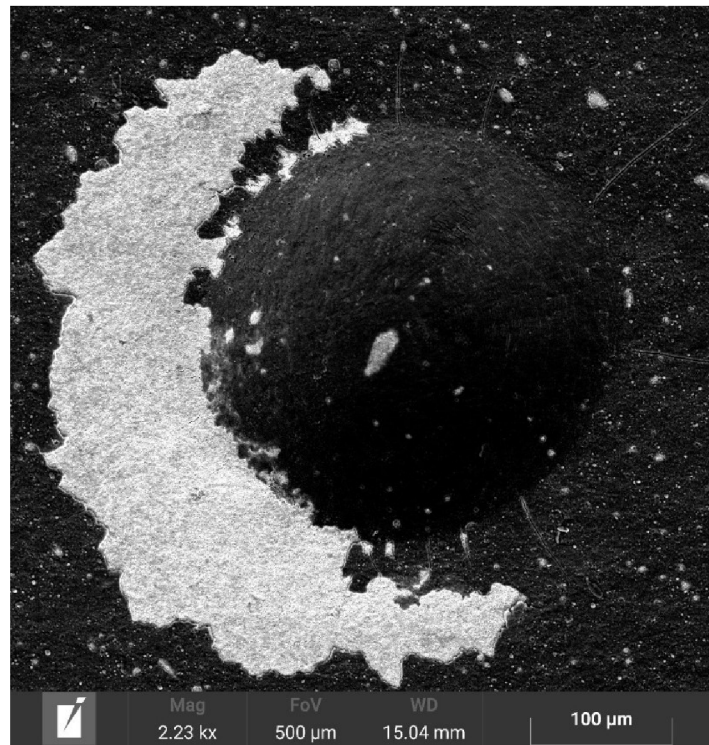
Obr. 90 Vyhotovení vtisku na tvrdoměru ZHR 4150AK.

Povlak destiček s označením A byl na základě snímku z mikroskopu (viz obr. 91) zařazen do skupiny HF4. To znamená, že se povlak při vnikání cizího tělesa nechová tak, jak by měl. V okolí vtisku jsou viditelné praskliny, zároveň je viditelný i substrát. Povlak destiček s označením B byl na základě snímků z mikroskopu (viz obr. 92) zařazen do třídy HF5. Výskyt prasklin byl nižší, avšak v okolí vtisku byl ve větší míře viditelný povlak. Povlak destiček s označením C byl na základě snímků z mikroskopu zařazen do třídy HF4, tedy stejně jako povlak destiček A. Výskyt prasklin v okolí vtisku byl ze všech tří povlaků nejvýraznější, zároveň byl ve větší míře viditelný povlak (viz obr. 93).

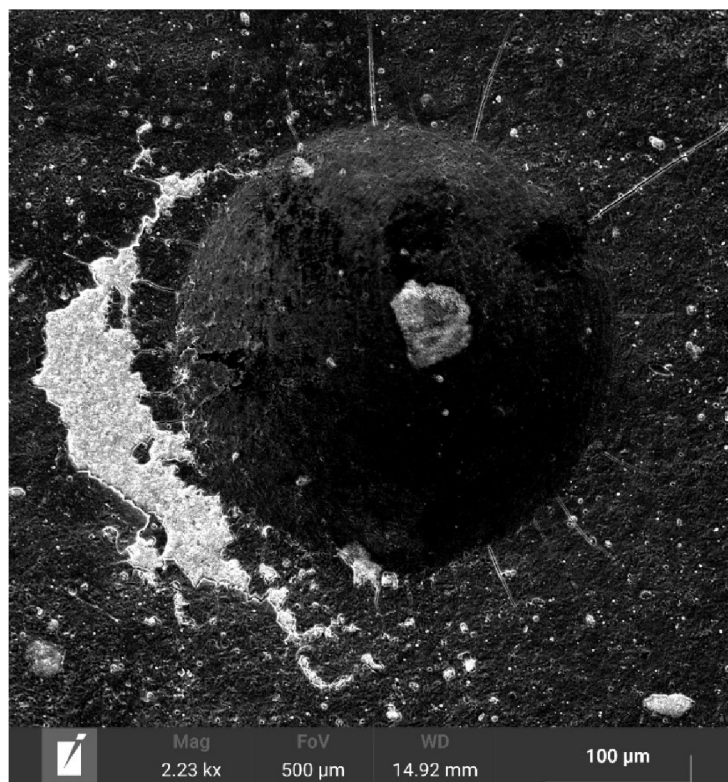


Obr. 91 Vzhled vtisku pro porovnání a vyhodnocení (destička A).





Obr. 92 Vzhled vtisku pro porovnání a vyhodnocení (destička B).

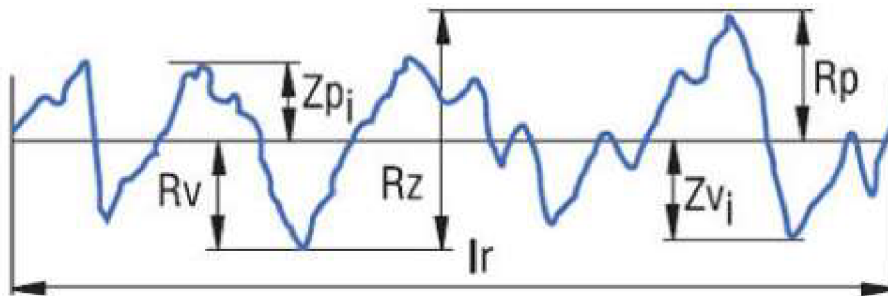


Obr. 93 Vzhled vtisku pro porovnání a vyhodnocení (destička C).

U všech tří vyměnitelných břitových destiček bylo pomocí Daimler-Benz adhezni zkoušky povlaku zjištěno, že povlaky destiček vykazují při vnikání cizího tělesa špatné vlastnosti. V okolí vtisku byl u všech tří typů destiček znatelně viditelný substrát, tudíž povlaky nemohly být zařazeny do vyhovujících kategorií HF1 nebo HF2. Tato skutečnost poukazuje na možnou chybu při povlakování břitových destiček, která mohla být způsobena např. nedostatečně očištěným substrátem před samotným nanášením povlaku.

## 6.9 Analýza obrobeného povrchu

Produkty řezného procesu byly podrobeny měření drsnosti povrchu. Měřeny byly hodnoty  $R_a$  a  $R_z$ . Hodnota  $R_a$  je střední aritmetická úchylka profilu. Jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot v rozsahu základní délky  $l_r$ . Jedná se o velmi používaný údaj drsnosti, nicméně není zcela přesně vypovídající, jelikož dostatečně nezohledňuje extrémní změny výšek a hloubek daného měřeného profilu. Hodnota  $R_z$  je hodnota největší výšky profilu. Je to součet největší výšky a největší hloubky profilu v rozsahu základní délky  $l_r$  (viz obr. 94). Hodnoty  $R_p$  a  $R_v$  značí největší výšku výstupku, respektive největší hloubku prohlubně daného profilu. [29]



Obr. 94 Parametry drsnosti [29].

Přístrojem pro měření byl ruční přenosný drsnoměr TR-100 (viz obr. 95). Ten se běžně používá pro rychlé a jednoduché měření drsnosti vnějších povrchů. Tyto povrchy mohou být jak kovové, tak i nekovové. Pomocí diamantového hrotu, který pojíždí po celkové délce 6 mm, jsou měřeny parametry  $R_a$  a  $R_z$  s nejistotou měření do 6 % naměřené hodnoty. Rychlost posuvu je 1 mm/s. Rozsah možných naměřených hodnot se pro hodnotu  $R_a$  pohybuje od 0,05 do 15,0  $\mu\text{m}$ , pro hodnotu  $R_z$  pak od 0,1 do 50  $\mu\text{m}$ . [30]

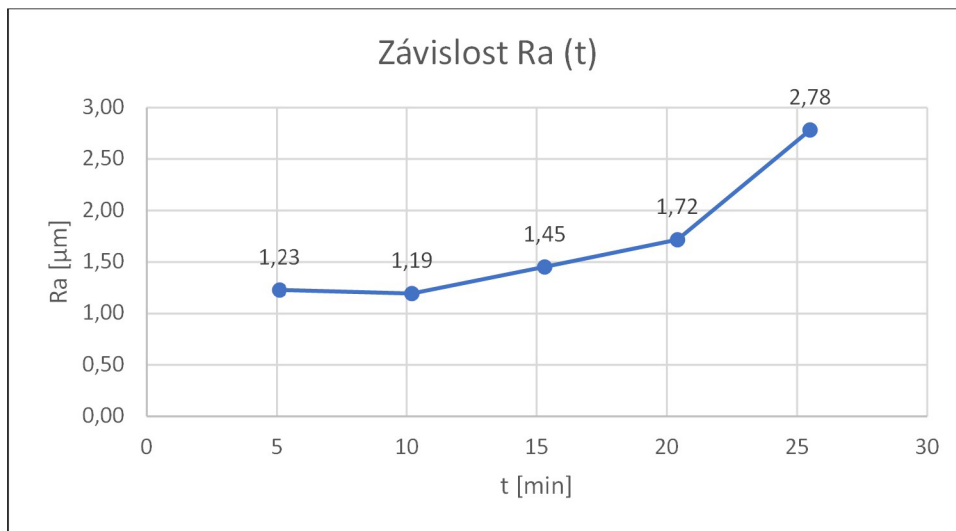


Obr. 95 Drsnoměr TR-100.

Po daném měřeném úseku byl u každé destičky zastaven řezný proces (u oceli ČSN 14 109 po 3,1 minutách, u oceli ČSN 17 349 po 5,1 minutách). Měření drsnosti bylo provedeno vždy na 10 vzorcích, které byly po každém z měřených úseků odebrány z prostoru stroje. Vzorky byly náležitě označeny. Tento postup byl aplikován u destiček A1, B1 a C1, a to pro oba obráběné materiály. Pro snížení nepřesnosti měření byla nejvyšší a nejnižší naměřená hodnota vyřazena. Ze zbývajících hodnot byl vypočítán průměr. Na základě těchto dat byly vytvořeny grafy, které znázorňují vývoj hodnot  $R_a$  a  $R_z$  v čase (viz příloha 1).



Na ilustračním grafu (viz obr. 96) je patrný vývoj hodnoty Ra v čase, a to při použití destičky C1 a obrábění korozivzdorné oceli ČSN 17 349. S postupným opotřebováním břitu nástroje by se hodnoty střední aritmetické úchylky Ra a hodnoty největší výšky profilu Rz měly zvyšovat.



Obr. 96 Vývoj hodnoty Ra v čase – destička C1, mat. ČSN 17 349.

K teoretickému východisku, že se s rostoucí hodnotou opotřebování břitu zhoršuje kvalita obrobeneho povrchu, se nejvíce přiblížily povrchy obrobene destičkami C1. U destiček A1 a B1 byl průběh více proměnlivý. Odchylka od zmíněného předpokladu může být způsobena nepřesnostmi měření.

## 7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Tato kapitola se zaměřuje na technicko-ekonomické zhodnocení inovačního procesu analyzovaných řezných nástrojů. V kapitole jsou zmíněny přínosy, které daný inovační proces přinesl. Důraz je kladen na důležitý ekonomický aspekt pro potenciální zákazníky, tedy na náklady na břit.

### 7.1 Inovační proces

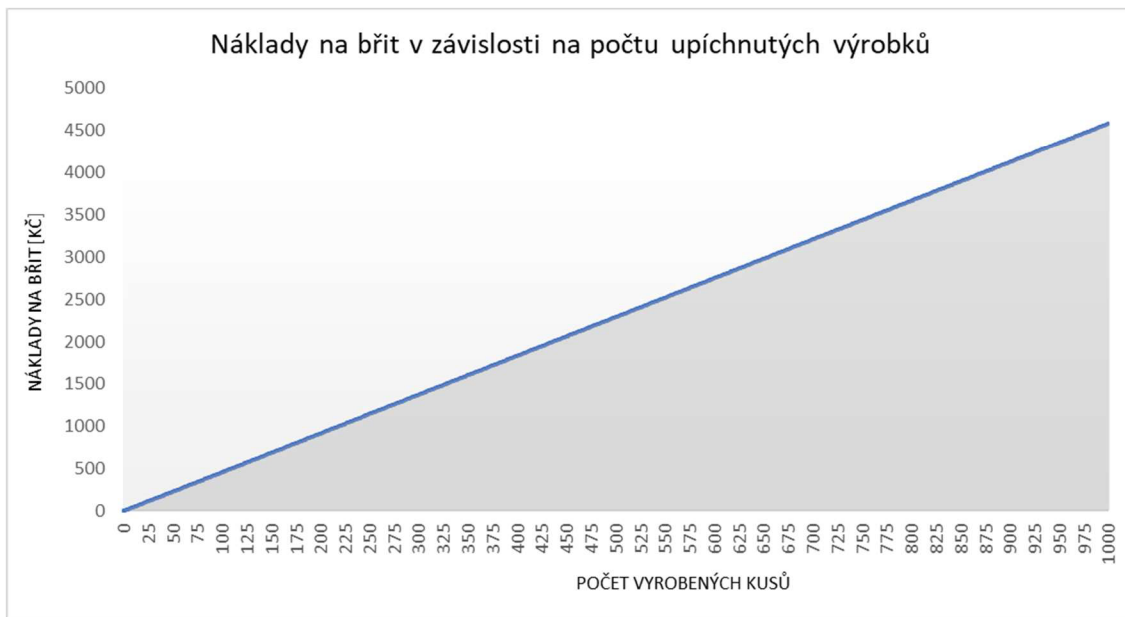
Jak je patrné z experimentální části této práce, inovované břitové destičky dosáhly při experimentu vyšších hodnot trvanlivostí, než destičky ze stávající produktové řady (viz obr. 74 a obr. 75). O zvyšování trvanlivosti řezných nástrojů se snaží každý výrobce, tento faktor je tak jedním z nejdůležitějších při konkurenčním srovnání. Všechny inovační procesy totiž směřují k dosažení co nejvyšší produktivity a minimálních nákladů. Trh s řeznými nástroji lze z hlediska podnikatelského prostředí označit za dynamický, neboť nelze s jistotou určit platnost dlouhodobých prognóz. Pro udržení silné pozice na trhu musí výrobci řezných nástrojů dodržovat stále měnící se trendy v dané oblasti. Mezi trendy se řadí univerzálnost daného nástroje, možnost provádět jak hrubovací, tak i dokončovací operace stejným nástrojem při zachování dostatečně kvalitní obrobene plochy, popřípadě dokončovací operace úplně vynechat. Tato univerzálnost souvisí i s počtem materiálů, které lze daným řezným nástrojem obrábět, to vše při maximálním možném úběru materiálu.

### 7.2 Porovnání nákladů na břit

Etalonem pro ekonomické zhodnocení je vyměnitelná břitová destička GL3-D300M02-PM (destička A). Cena této destičky je 733 Kč. Tato oboustranná destička disponuje katalogovou hodnotou trvanlivosti 15 minut, její životnost je pak v součtu s druhým břitem 30 minut. V experimentální části bylo dokázáno, že je tato hodnota vysoce ovlivněna pracovními podmínkami a obráběným materiálem. Na základě ceny břitové destičky a průměrného počtu vyrobených ks byly sestaveny závislosti. Z grafu lze vyčíst náklady na břit pro určitý objem výrobků. Tyto závislosti byly sestaveny pro destičky A, pro materiály ČSN 14 109 (viz obr. 97) a ČSN 17 349 (viz obr. 98).



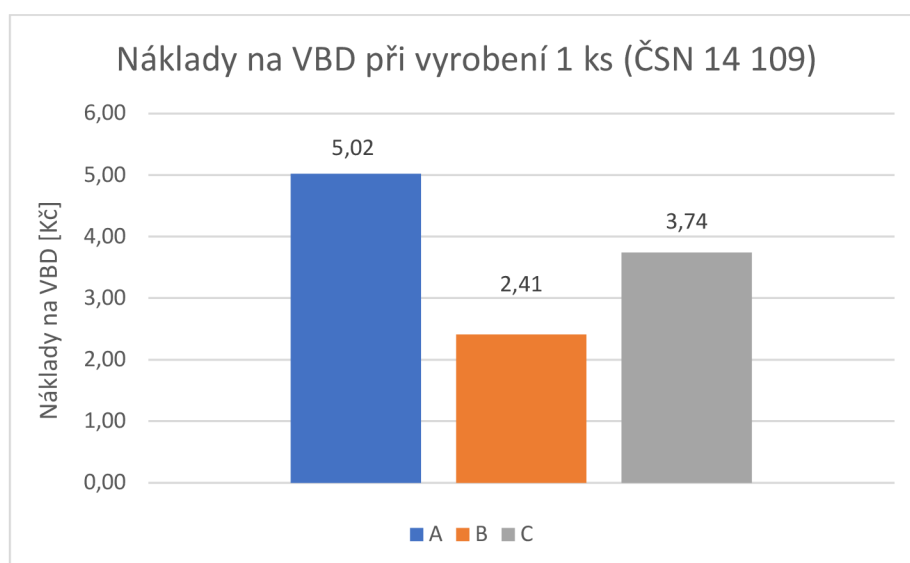
Obr. 97 Náklady na břit v závislosti na počtu upíchnutých výrobků (destička A, mat. ČSN 14 109).



Obr. 98 Náklady na břit v závislosti na počtu upíchnutých výrobků (destička A, mat. ČSN 17 349).

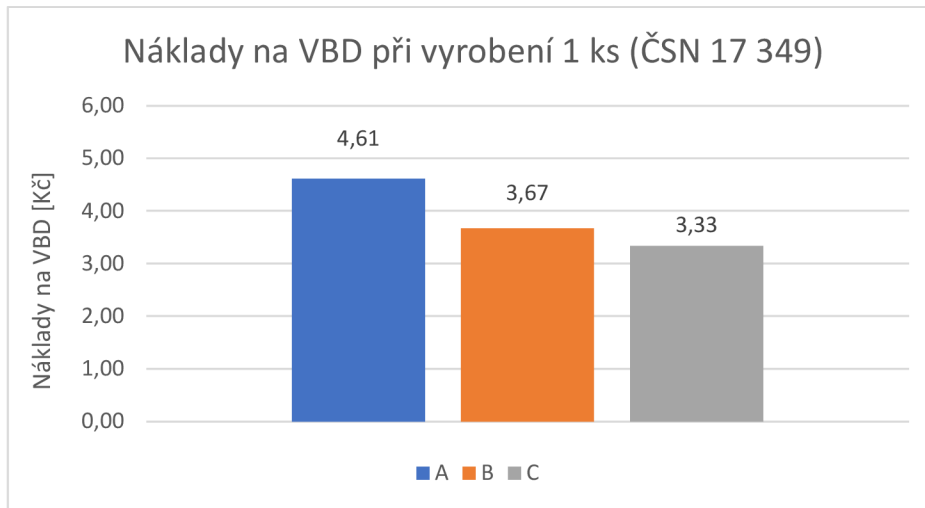
Při použití daných pracovních podmínek a obráběného materiálu ČSN 14 109 byly destičky s označením A schopny upíchnout v průměru 73 ks výrobků předtím, než došlo k destrukci daného břitu, či k překročení hodnoty kritéria opotřebení. Přepokládaný počet výrobků zhotovených destičkou A, před koncem její životnosti, by byl 146 ks. Při upichování materiálu ČSN 17 349 byly destičky s označením A schopny upíchnout za daných pracovních podmínek v průměru 159 výrobků před skončením jejich životnosti. Náklady na břit jsou tedy pro obě destičky při obrábění těchto materiálů podobné, a činí 5 021 Kč pro upíchnutí 1 000 ks výrobků z materiálu ČSN 14 109. Při upichování materiálu ČSN 17 349 jsou náklady na břit pro 1 000 upíchnutých ks rovny 4 610 Kč.

Jak je patrné z výsledků experimentální části, destičky B a C dosahovaly vyšších hodnot trvanlivosti, tudíž i vyššího počtu vyrobených ks. Tato skutečnost znamená úsporu nákladů na nástroje a na výměnu nástrojů. Při upichování materiálu ČSN 14 109 byly destičky B schopné upíchnout, před koncem své životnosti, v průměru 304 ks výrobků, destičky s označením C potom v průměru 196 ks. U materiálu ČSN 17 349 bylo pomocí destiček B upíchnuto v průměru 200 ks výrobků, pomocí destiček C potom v průměru 220 ks.



Obr. 99 Porovnání nákladů na břit pro vyrobení 1 ks (mat. ČSN 14 109).

Na základě hodnot, které byly získány při experimentu, bylo možné porovnat náklady na břit pro 1 vyrobený ks a posoudit úsporu těchto nákladů, to vše při uvažování stejné ceny vyměnitelné břitové destičky A, B i C. Porovnání nákladů na břit pro výrobu 1 ks z mat. ČSN 14 109 je patrné z obr. 99. Při upichování mat. ČSN 14 109 destičkou A byly náklady na břit pro výrobu 1 ks 5,02 Kč. Nejvyšší úspory dosáhly destičky s označením B, a to více než 50% v porovnání s destičkami s označením A. Úspora na 1 vyrobený ks při použití destiček s označením C byla v porovnání s destičkami A rovna 1,28 Kč.



Obr. 100 Porovnání nákladů na břit pro vyrobění 1 ks (mat. ČSN 17 349).

Porovnání nákladů na břit pro vyrobění 1 ks z mat. ČSN 17 349 je na obr. 100. Úspora nákladů při použití destiček s označením B byla v porovnání s destičkami s označením A rovna 0,94 Kč. Úspora na 1 vyrobený ks při použití destiček C byla v porovnání s destičkami A ještě o něco vyšší, její hodnota činila 1,28 Kč.

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo provést analýzu opotřebení vyměnitelných břitových destiček při upichování ocelí ČSN 14 109 a ČSN 17 349. Teoretická část práce popisuje technologii upichování, rozebírá použité nástroje a obráběné materiály. Experimentální část popisuje přípravu a průběh řezných procesů. Byly stanoveny hodnoty trvanlivostí a vývoj opotřebení v čase. Z naměřených dat byly stanoveny průběhy dosažené přesnosti obrobeného povrchu v závislosti na čase. Experimentální část dále zahrnuje analýzy, které byly provedeny z důvodu proměnlivosti některých výsledků. Tím jsou myšleny hlavně výkyvy výsledných hodnot trvanlivostí vyměnitelných břitových destiček, kterých bylo dosaženo při upichování ložiskové oceli ČSN 14 109. Při tomto řezném procesu docházelo k neočekávaným destrukcím břitu a nezvyklým zvukovým projevům. Z toho důvodu byla provedena analýza obráběných materiálů z hlediska mikrostruktury a stanoveny byly také hodnoty mikrotvrdosti. Dále byla provedena analýza přilnavosti povlaku a také analýza geometrie nástroje. Žádná z provedených analýz však zcela jistě neprokázala přímý vliv na dosažené výsledky daného řezného procesu.

Testování i vývojový proces lze prohlásit za úspěšný, neboť bylo dokázáno, že destičky s označením B a C dosahují vyšších hodnot trvanlivosti, než destičky s označením A. Při upichování materiálu ČSN 14 109 dosáhly destičky s označením B průměrné trvanlivosti 20,2 minuty, což je téměř 70 % nárůst trvanlivosti ve srovnání s destičkami A, které dosáhly průměrné trvanlivosti 11,9 minuty. Průměrná trvanlivost destiček s označením C byla při obrábění téhož materiálu 16,0 minut, při srovnání s destičkami A došlo k nárůstu trvanlivosti o 34,5 %. Při upichování materiálu ČSN 17 349 byly průměrné hodnoty dosažených trvanlivostí u destiček B i C stejné, a to 25,5 minuty. Průměrná hodnota trvanlivosti destiček A byla 20,4 minuty. V tomto testu vykazovaly destičky s označením B a C průměrně o 25 % vyšší trvanlivost. Rozptyl hodnot trvanlivostí jednotlivých druhů vyměnitelných břitových destiček nepřekročil hodnotu 15 %, tedy až na výjimky při obrábění materiálu ČSN 14 109. U materiálu ČSN 17 349 dokonce k žádnému rozptylu testovaných břitů nedošlo. Tím byla ověřena skutečnost, že dané břity disponují dostatečnou kvalitou a zajišťují opakovatelnost při zachování stejných řezných podmínek.

V diplomové práci bylo dosaženo následujících cílů:

- byl proveden teoretický rozbor technologie upichování, nástrojů a jejich opotřebení,
- byl proveden rozbor přípravy a průběhu řezného procesu se zaměřením na nenáročnost a možnou opakovatelnost daného testování,
- byla provedena analýza opotřebení, která zahrnovala zhotovení snímků na mikroskopu, měření hodnot opotřebení, vyplnění testovacího protokolu a následné zpracování naměřených dat,
- byla provedena analýza obrobeného povrchu, která ověřila předpoklad, že při nárůstu opotřebení řezného nástroje dochází ke zhoršení drsnosti obrobeného povrchu,
- byly provedeny analýzy pro zjištění možných vlivů, kterými mohly být zatíženy výsledky z experimentální části:
  - analýza obráběných materiálů odhalila výskyt zpevněné vrstvy, avšak při technologii upichování lze očekávat stejné podmínky pro všechny břitové destičky – pro ověření tohoto tvrzení by bylo nutné detailně analyzovat polotovary podél průřezu,
  - analýza povlaku poukázala na nevhodné chování povlaku při vnikání cizího tělesa u destiček B a C, kdy pravděpodobnou příčinou je chybný postup při finální povrchové úpravě břitů.

Závěrem lze konstatovat, že všechny stanovené cíle této diplomové práce byly splněny.



---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
  2. HUMÁR A. Technologie I. Technologie obrábění – 1. část 138 s. 2003 [cit. 2022-9-25]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf)
  3. KOCMAN K., PROKOP J. Technologie výroby II. 2002, 64 s. [online] [cit. 2022-9-27]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TechnVyroby\\_II.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TechnVyroby_II.pdf)
  4. MÁDL, J., VRABEC M., KAFKA J. a DVOŘÁK J. Technologie obrábění 1., 2. a 3. díl. Druhé přepracované. Thákurova 1, 160 41 Praha 6: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
  5. Měření složek sil při řezání [online] [cit. 2022-10-6]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_08.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_08.pdf)
  6. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
  7. Sandvik Coromant. Upichování [online] [cit. 2022-9-21]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/parting-grooving/pages/parting-off.aspx>
  8. FOREJT M., HUMÁR A., PÍŠKA M., Janiček L. Experimentální metody: Syllabus 83 s. [online]. Brno, 2003 [cit. 2022-09-29]. Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/Exp\\_metody\\_he2.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/Exp_metody_he2.pdf)
  9. ČEP R., PETRŮ J. Úvod do teorie obrábění, Ostrava 2013 ISBN 978-80-248-3013-1 29 s. [online]. [cit. 2022-10-3] Dostupné z: [https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_002/%C3%A1vod%20do%20terioie%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.pdf](https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_002/%C3%A1vod%20do%20terioie%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.pdf)
  10. FOREJT, M., PÍŠKA M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
  11. Dormer Pramet. Dormer Pramet [online]. Dostupné z: <https://dormerpramet.com/cz/cs/>
  12. Pramet Tools se mění na Dormer Pramet. Technickýtýdeník.cz 2019 [online] [cit. 2022-9-2]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/pramet-tools-se-meni-na-dormer-pramet\\_45983.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/pramet-tools-se-meni-na-dormer-pramet_45983.html)
  13. Historie a současnost Pramet Tools. Prosperita.cz. 2012 [online] [cit. 2022-8-27]. Dostupné z: <https://www.iprosperita.cz/firmy/2145-historie-a-soucasnost-pramet-tools>
  14. Dormer Pramet, Držák nástrojů pro soustružení – upichování a zapichování. GL3-S2525MFL-24-80 [online] [cit. 2022-9-4]. Dostupné z: <https://dormerpramet.com/cz/cs/p/7983496>
  15. Dormer Pramet, Destičky pro soustružení – upichování a zapichování. GL3-D300M02-PM:G8330 [online] [cit. 2022-9-4]. Dostupné z: <https://dormerpramet.com/cz/cs/p/7802917>
  16. Chromová ocel pro valivá ložiska – ocel 14 109. Ocelové kuličky ČSN ISO 3290 [online]. [cit.2022-9-20]. Dostupné z: [http://kulicky.wbs.cz/14\\_109.pdf](http://kulicky.wbs.cz/14_109.pdf)
  17. Datový list DIN EN 10088-3, Číslo materiálu 1.4404. AGST Draht & Biegetechnik GmbH [online] [cit.2022-9-20]. Dostupné z: [https://www.agst-steel.de/cs/AISI\\_316L\\_1.4404.pdf](https://www.agst-steel.de/cs/AISI_316L_1.4404.pdf)
  18. Gindumac, KONOSVIT MAS SP 280 SY [online] [cit.2022-9-16]. Dostupné z: [https://www.gindumac.cz/produkt/kovosvit-mas-sp-280-sy\\_SK-TUR-KOV-2016-00001](https://www.gindumac.cz/produkt/kovosvit-mas-sp-280-sy_SK-TUR-KOV-2016-00001)
-

- 
19. KRATINA J. Tvrdost – převodní tabulka. Portál pro strojní konstruktéry 2013 [online] [cit. 2022-10-27]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/tvrdost-prevodni-tabulka>
  20. Dormer Pramet s.r.o. Interní firemní dokumenty 2022 [cit. 2023-08-12].
  21. Anycubic Photon Mono | 3D FOX Shop 2022 | 3D tisk a vše kolem něj [online] [cit.2022-10-22]. Dostupné z: <https://www.3dfoxshop.cz/anycubic-photon-mono/>
  22. Resin pro 3D tiskárny-3DJake Česká republika. Přední internetový obchod pro 3D tisk-3DJake Česká republika 2010 [online]. [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/resin-pro-3d-tiskarny>
  23. Pryskyřice pro 3D tiskárnu-Anycubic 3D Printing UV Sensitive Resin Basic 1kg-bílá Botland – online obchod s elektronikou a robotikou [online] [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://botland.cz/pryskyrice-pro-3d-tiskarny/21893-pryskyrice-pro-3d-tiskarnu-anycubic-3d-printing-uv-sensitive-resin-basic-1kg-bila-5905071001169.html>
  24. JOSKA, Z., akademický pracovník [ústní sdělení]. Brno, 17.1.2023.
  25. OLYMPUS: Opto-digital Microscope DSX100 [online] [cit. 2022-2-13]. Dostupné z: [https://www.lri.se/pdf/olympus/DSX100\\_en\\_3.pdf](https://www.lri.se/pdf/olympus/DSX100_en_3.pdf)
  26. Hi-Tech Metrology : Alicona InfiniteFocus G4. *Hi-Tech Metrology : Home* [online]. Dostupné z: <https://hitech.netlify.app/newsevent/issue212/aliconainfinitefocusg4.html>
  27. Alicona G4 InfiniteFocus | Engineering | University of Southampton. *Homepage | University of Southampton* [online]. University of Southampton [cit. 27.03.2023]. Dostupné z: [https://www.southampton.ac.uk/engineering/research/facilities/360/nCATS\\_facility/aliconapage#overview](https://www.southampton.ac.uk/engineering/research/facilities/360/nCATS_facility/aliconapage#overview)
  28. Broitman E., Hultman L. Adhesion Improvement of Carbon-based Coatings through a High Ionization Deposition Technique. ResearchGate | Find and share research [online] 2012 [cit. 2023-2-1]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/233893913\\_Adhesion\\_Improvement\\_of\\_Carbon-based\\_Coatings\\_through\\_a\\_High\\_Ionization\\_Deposition\\_Technique](https://www.researchgate.net/publication/233893913_Adhesion_Improvement_of_Carbon-based_Coatings_through_a_High_Ionization_Deposition_Technique)
  29. Parametry drsnosti. HOMMEL CS s.r.o. [online] [cit. 2023-10-26]. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
  30. BERÁNKOVÁ J. Drsnoměry a vzorkovnice drsnosti-Přenosný drsnoměr TR-100 7 s. ADOC.PUB [online] [cit. 2022-10-26]. Dostupné z: <https://adoc.pub/drsnomiry-a-vzorkovnice-drsnostife850eb627eebdee477589fb546ea7d086393.html>
-

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Symbols

Označení	Legenda	Jednotka
$C_{Fc}$	materiálová konstanta	[-]
$C_{Ff}$	materiálová konstanta	[-]
$C_{Fp}$	materiálová konstanta	[-]
$D$	průměr	[mm]
$F$	celková řezná síla	[N]
$F_c$	řezná síla	[N]
$F_f$	posuvová síla	[N]
$F_p$	pasivní síla	[N]
$a_p$	Šířka záběru ostří	[mm]
$f$	posuv	[mm]
$v_c$	řezná rychlost	[m · min <sup>-1</sup> ]
$v_f$	posuvová rychlost	[mm · min <sup>-1</sup> ]
$v_e$	rychlost řezného pohybu	[m · min <sup>-1</sup> ]
$x_{Fc}$	exponent vlivu šířky záběru	[-]
$x_{Ff}$	exponent vlivu šířky záběru	[-]
$x_{Fp}$	exponent vlivu šířky záběru	[-]
$y_{Fc}$	exponent vlivu posuvu	[-]
$y_{Ff}$	exponent vlivu posuvu	[-]
$y_{Fp}$	exponent vlivu posuvu	[-]

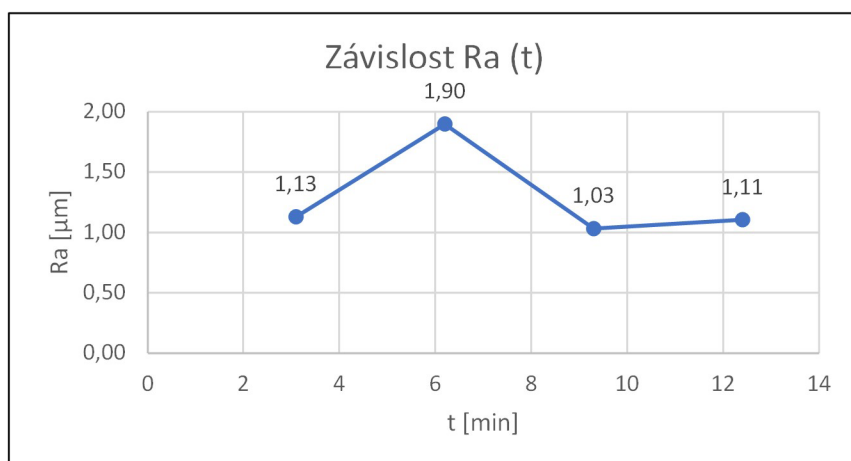
## Zkratky

Označení	Legenda
CBN	kubický nitrid bóru
CC	pohled na čelo nástroje
CVD	Chemical Vapor Deposition
HH	pohled na hlavní hřbet nástroje
HRB	tvrdost dle Brinella
HV	tvrdost dle Vickerse
PVD	Physical Vapor Deposition
Ra	střední aritmetická odchylka profilu drsnosti
Rz	největší výška profilu drsnosti
SLA	stereolitografie
VBb	opotřebení hlavního břitu
VBc	opotřebení vedlejšího břitu
VBD	vyměnitelná břitová destička
VB2	opotřebení druhého vedlejšího břitu
VH	pohled na vedlejší hřbet nástroje
VH2	pohled na druhý vedlejší hřbet nástroje

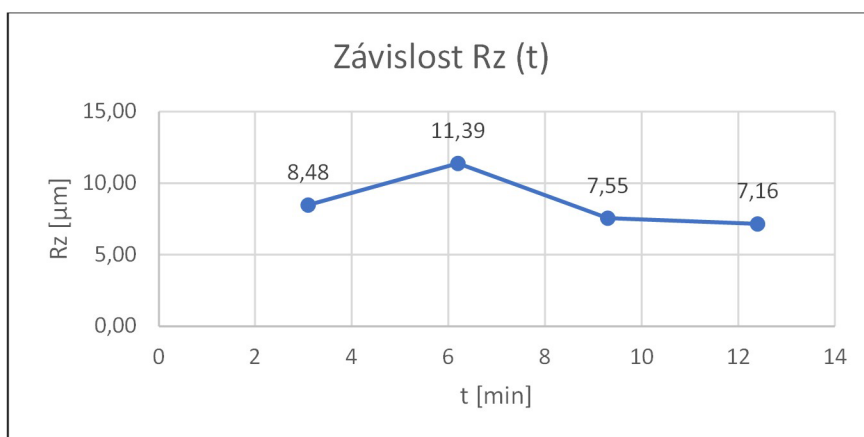
## **SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Vývoj drsnosti obrobeného povrchu
- Příloha 2 Mapa odchylek naskenovaného tvaru VBD (Alicona InfiniteFocus G4)
- Příloha 3 Porovnání vývoje opotřebení destiček v čase

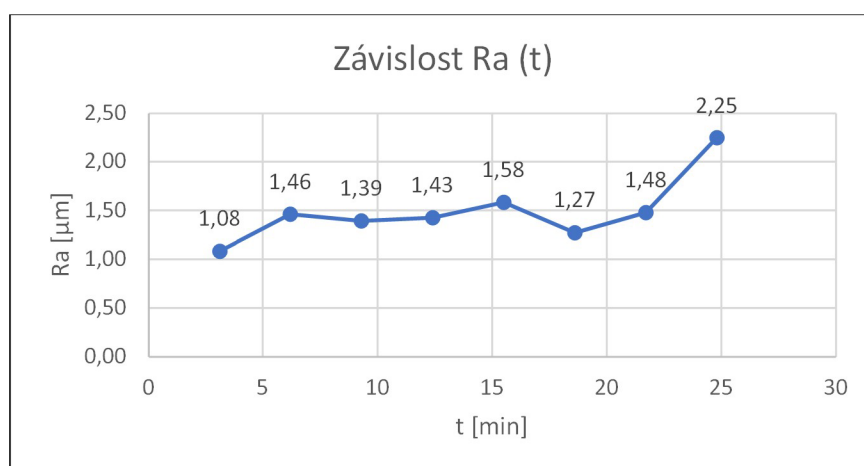
## Vývoj drsnosti obrobeneho povrchu



Vývoj hodnoty Ra v čase – destička A1, mat. ČSN 14 109.



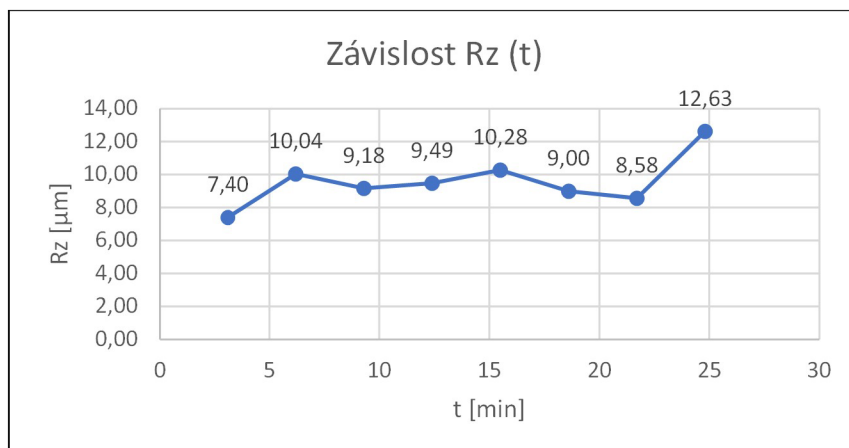
Vývoj hodnoty Rz v čase – destička A1, mat. ČSN 14 109.



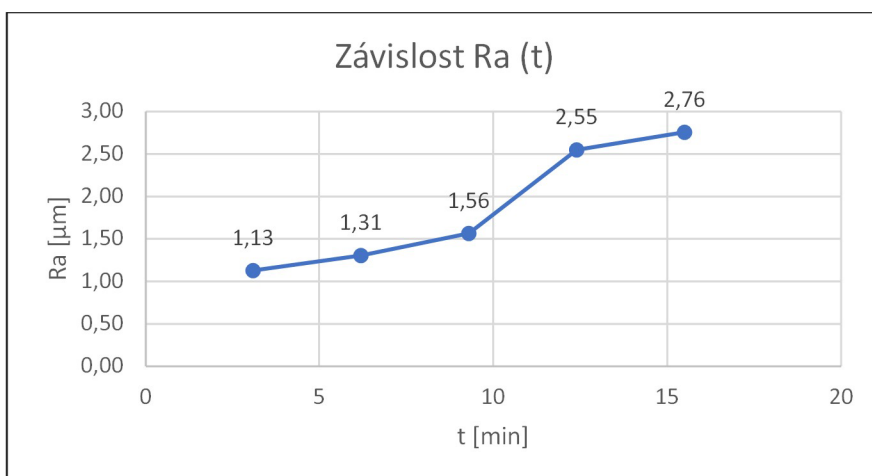
Vývoj hodnoty Ra v čase – destička B1, mat. ČSN 14 109.



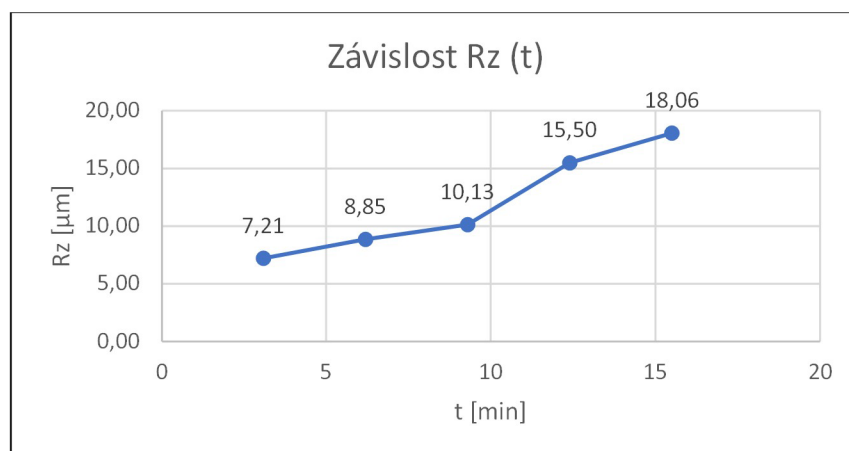
## Vývoj drsnosti obrobeneho povrchu



Vývoj hodnoty Rz v čase – destička B1, mat. ČSN 14 109.

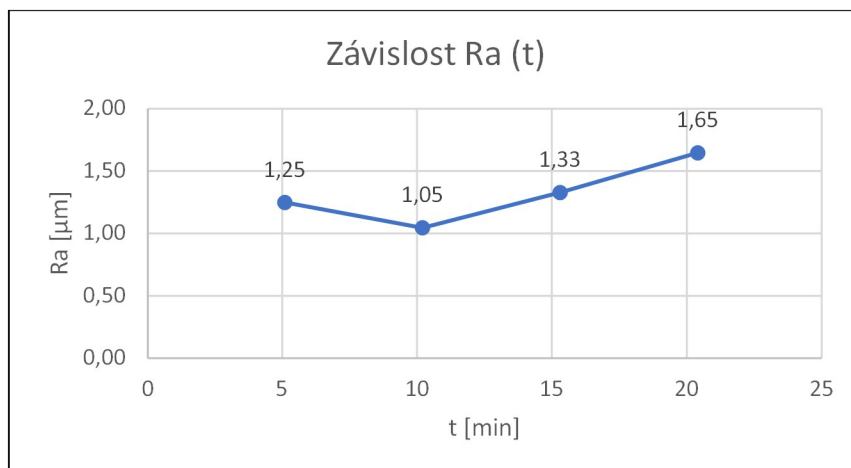


Vývoj hodnoty Ra v čase – destička C1, mat. ČSN 14 109.

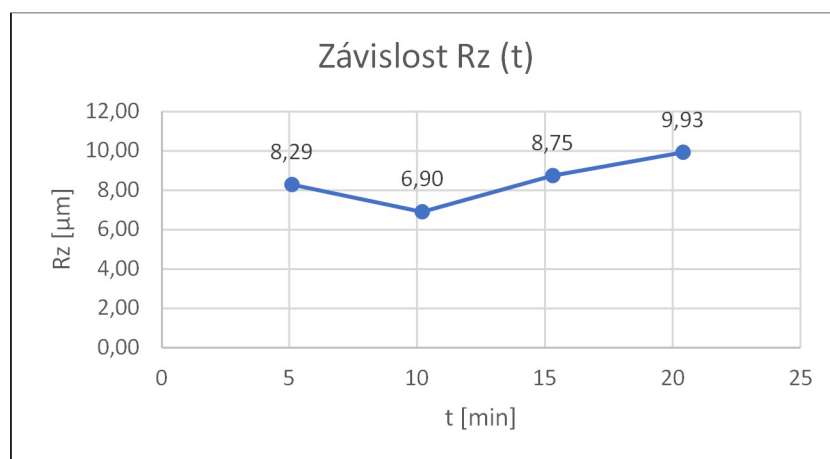


Vývoj hodnoty Rz v čase – destička C1, mat. ČSN 14 109.

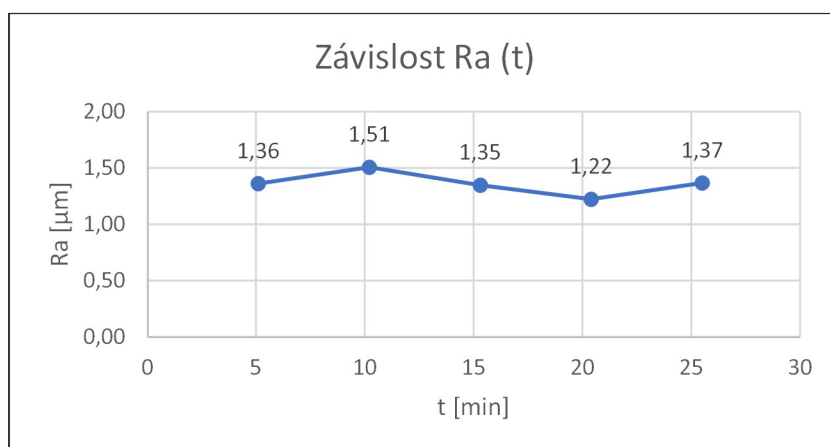
## Vývoj drsnosti obrobeneho povrchu



Vývoj hodnoty Ra v čase – destička A1, mat. ČSN 17 349.

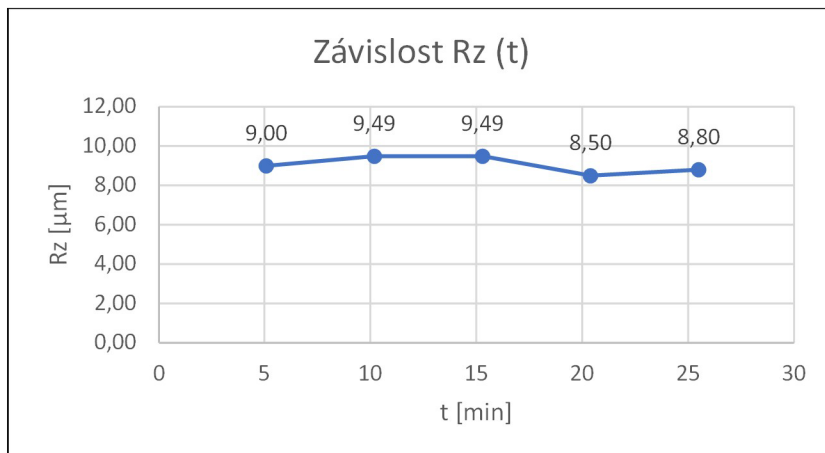


Vývoj hodnoty Rz v čase – destička A1, mat. ČSN 17 349.

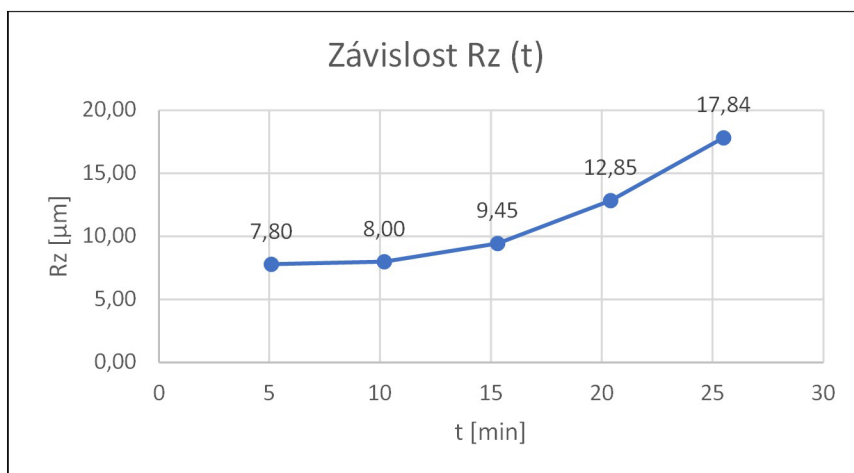


Vývoj hodnoty Ra v čase – destička B1, mat. ČSN 17 349.

## Vývoj drsnosti obrobeneho povrchu

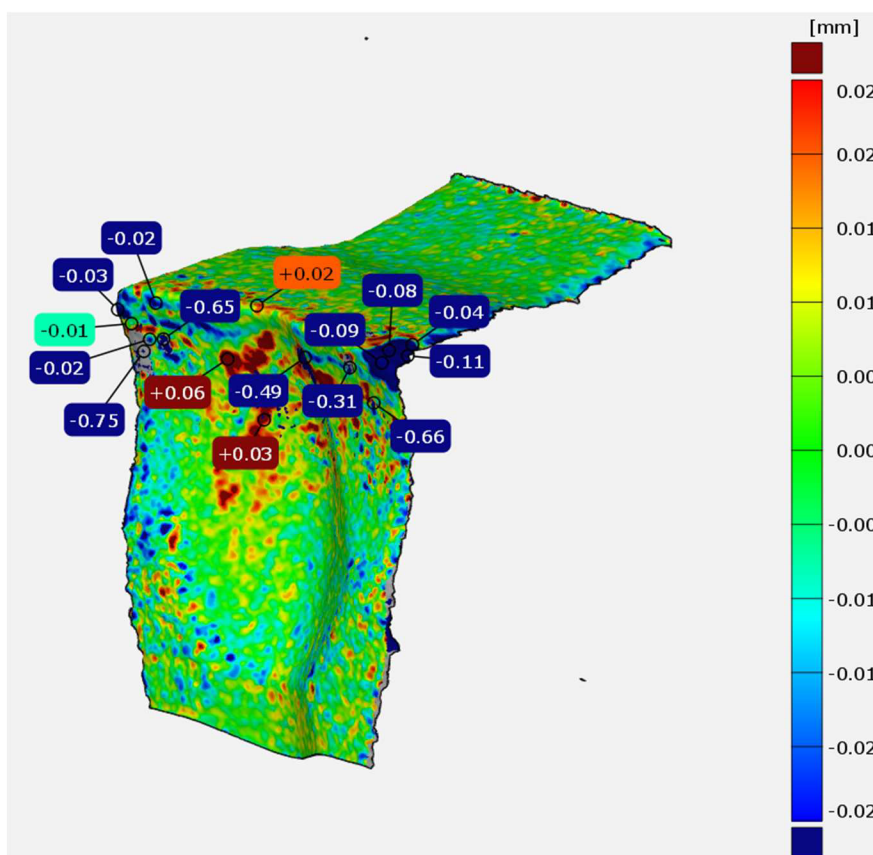


Vývoj hodnoty Rz v čase – destička B1, mat. ČSN 17 349.

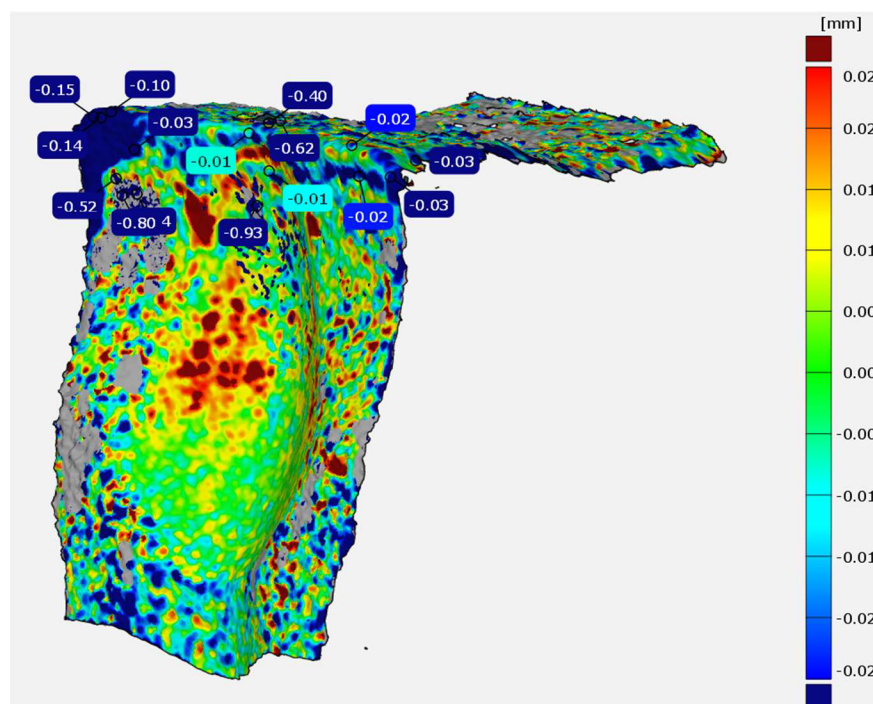


Vývoj hodnoty Rz v čase – destička C1, mat. ČSN 17 349.

Mapa odchylek naskenovaného tvaru VBD (Alicona InfiniteFocus G4)

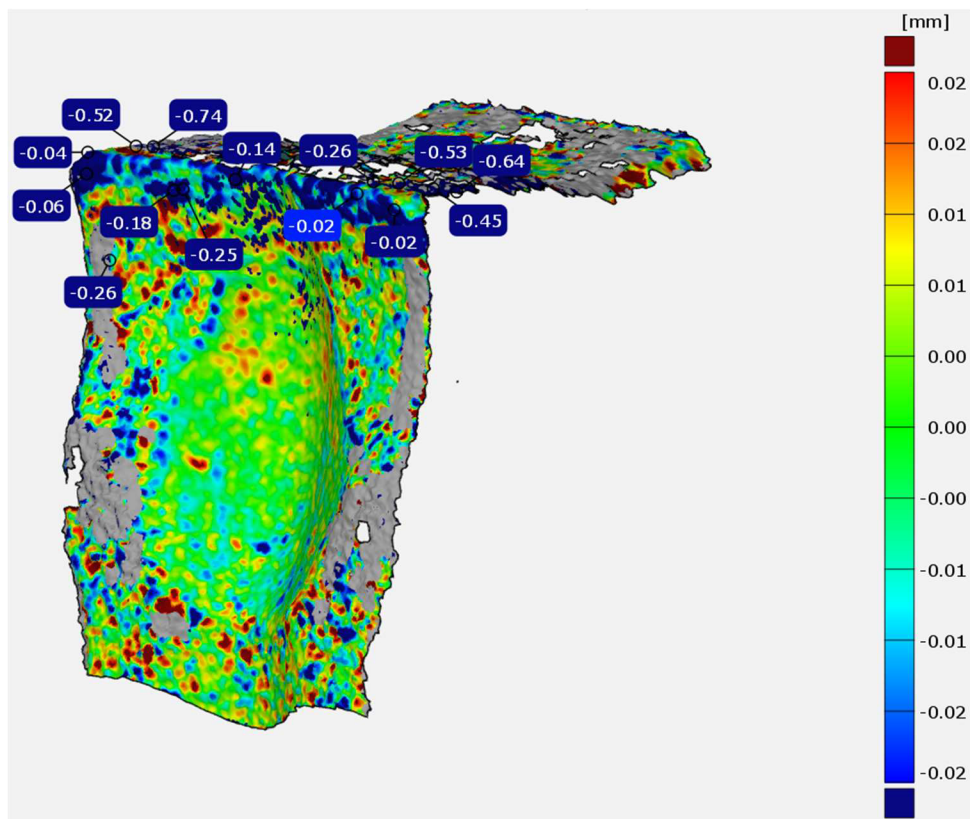


Mapa odchylek destičky A1 (mat. ČSN 14 109)

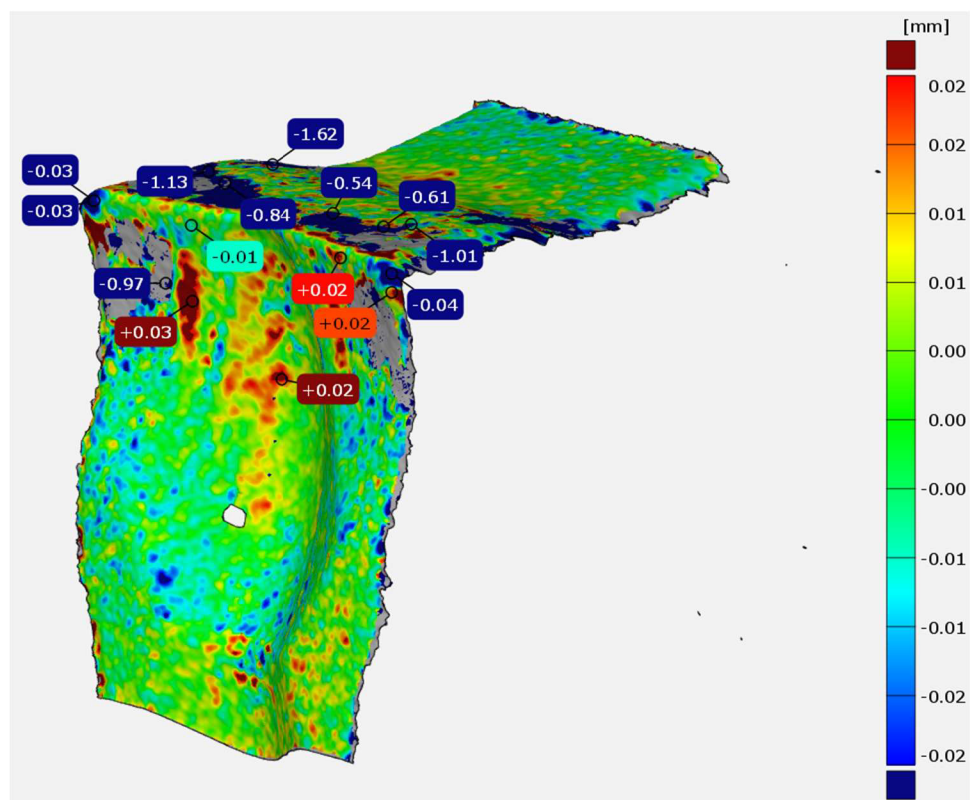


Mapa odchylek destičky B1 (mat. ČSN 14 109)

Mapa odchylek naskenovaného tvaru VBD (Alicona InfiniteFocus G4)



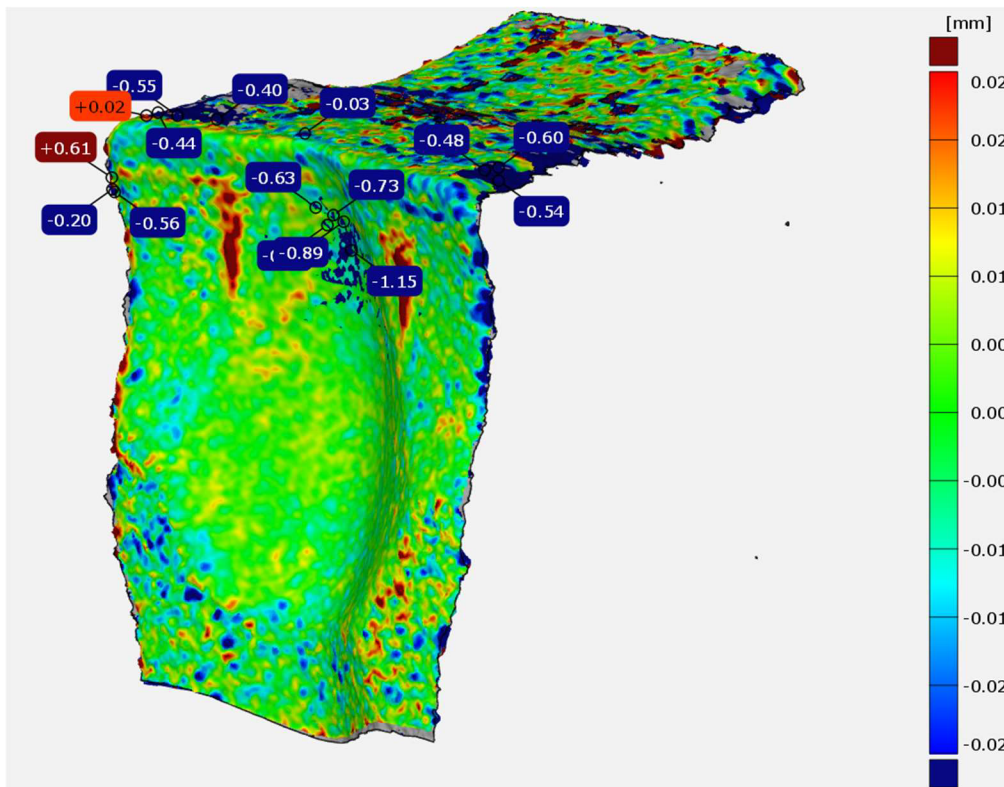
Mapa odchylek destičky C1 (mat. ČSN 14 109)



Mapa odchylek destičky A1 (mat. ČSN 17 349)

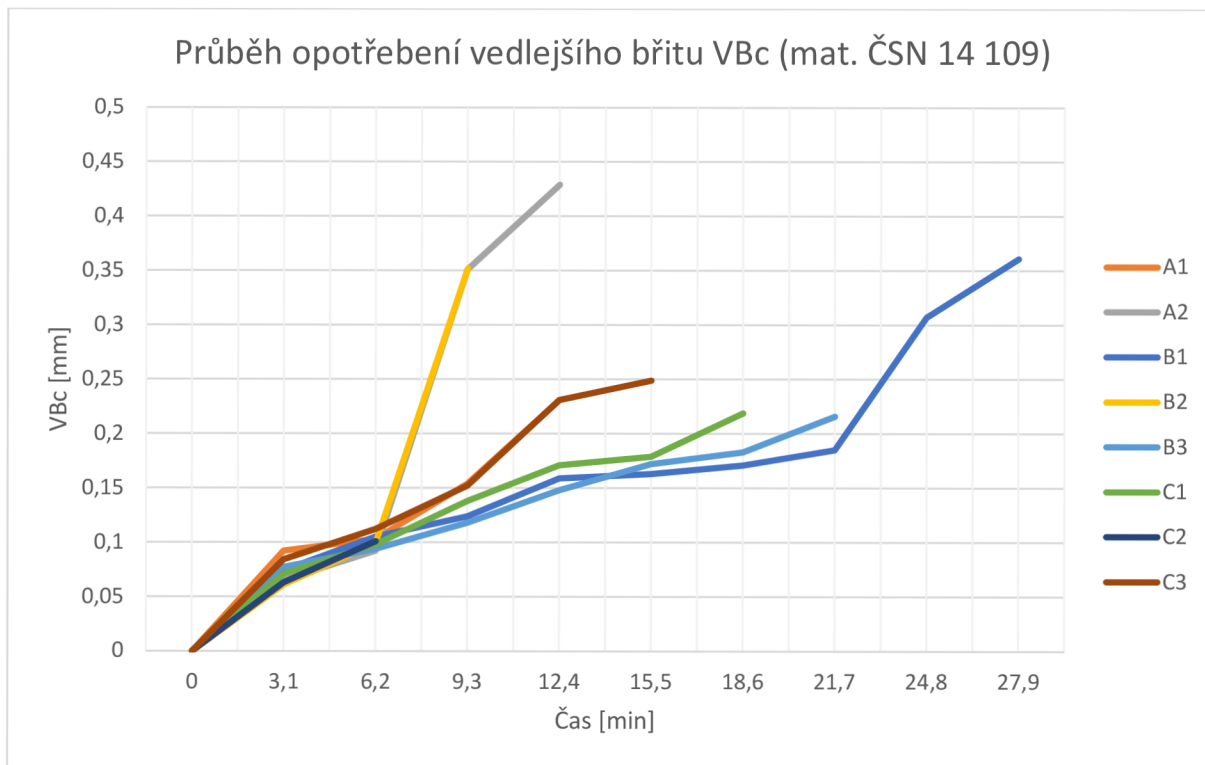


Mapa odchylek naskenovaného tvaru VBD (Alicona InfiniteFocus G4)

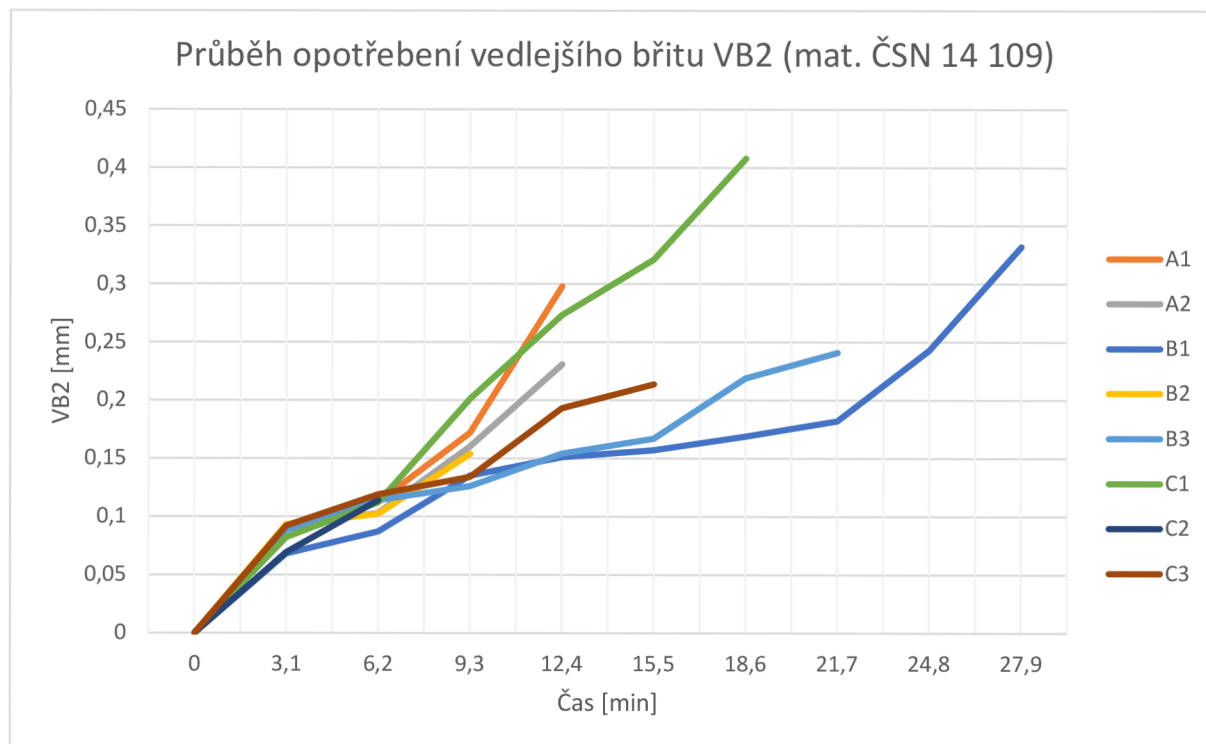


Mapa odchylek destičky B1 (mat. ČSN 17 349)

Porovnání vývoje opotřebení destiček v čase

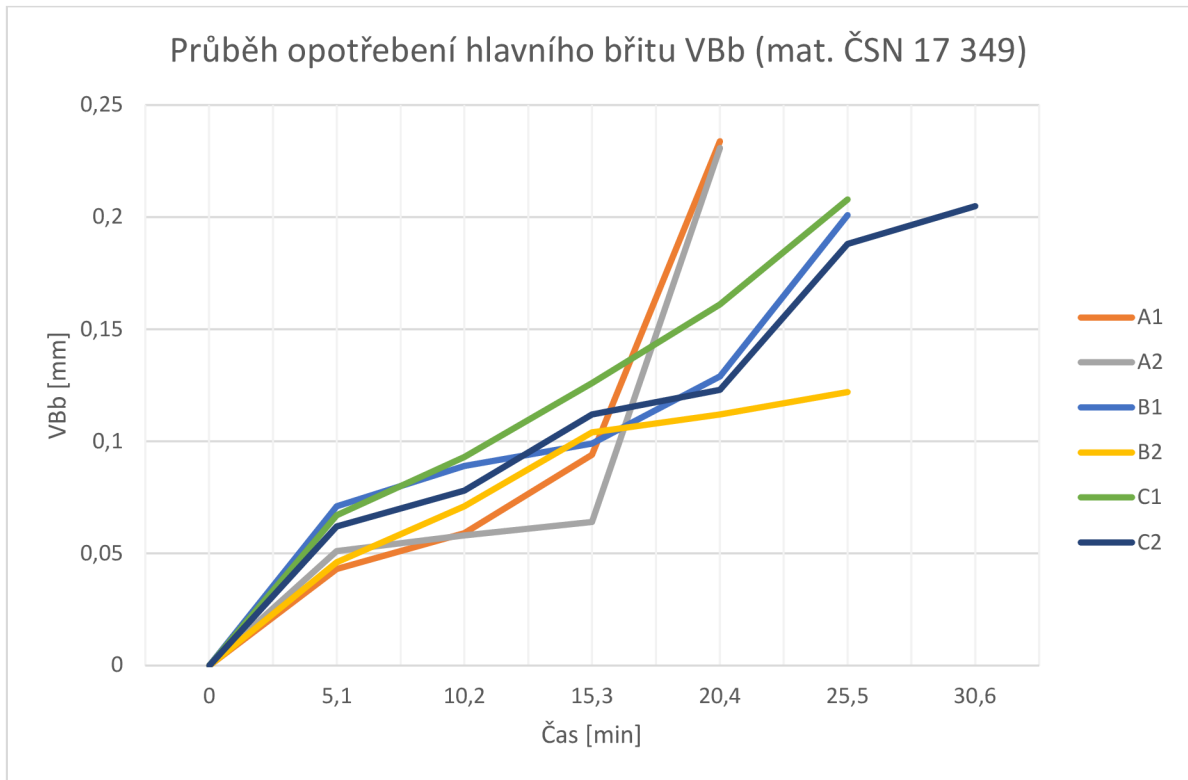


Vývoj hodnoty VBc v čase (mat. 14 109).

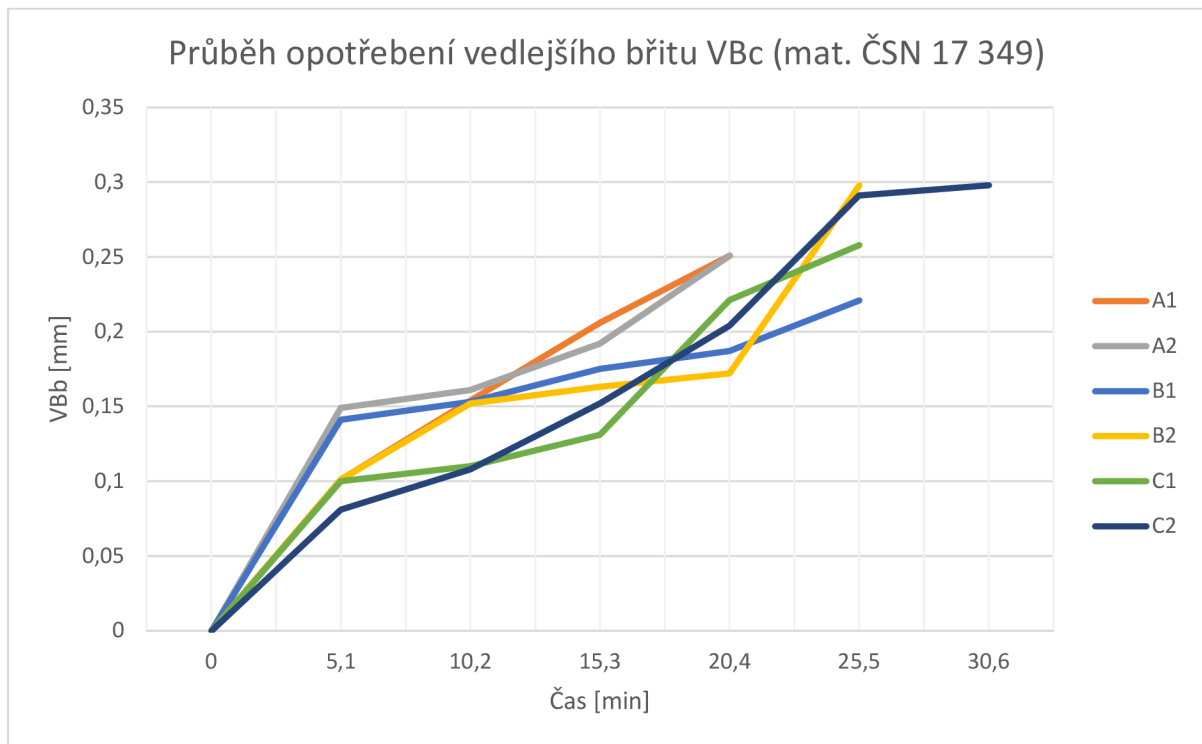


Vývoj hodnoty VB2 v čase (mat. ČSN 14 109).

Porovnání vývoje opotřebení destiček v čase

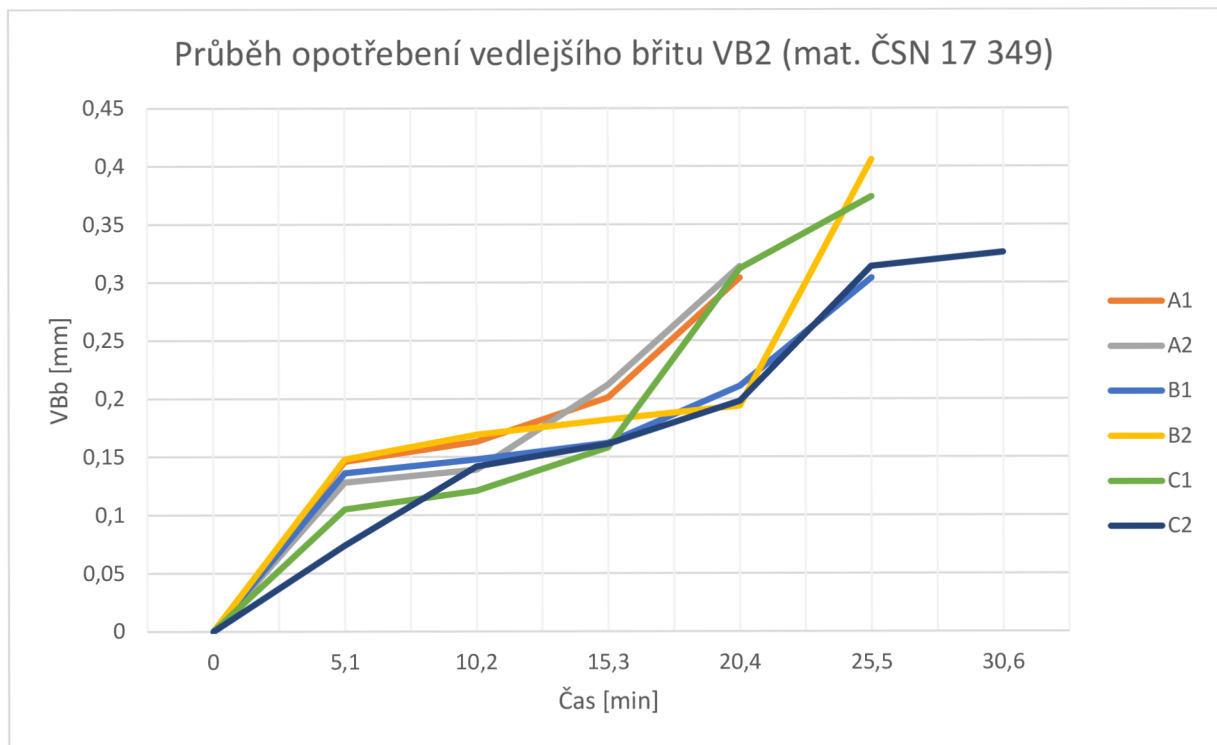


Vývoj hodnoty VBb v čase (mat. ČSN 17 349).



Vývoj hodnoty VBc v čase (mat. ČSN 17 349).

## Porovnání vývoje opotřebení destiček v čase



Vývoj hodnoty VB2 v čase (mat. ČSN 17 349).