



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 NÁSTROJŮ PŘI CNC OBRÁBĚNÍ DISKOVITÝCH SOUČÁSTÍ

WEAR OF CUTTING TOOLS AT CNC PRODUCTION OF THE DISC-SHAPED PARTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Malý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Michal Malý
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Akademický rok:	2018/19

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 nástrojů při CNC obrábění diskovitých součástí**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá inovací výroby CNC obrábění diskovitých součástí, zvláště aplikacemi nových řezných nástrojů a použitím vyšších řezných rychlostí.

Cíle diplomové práce:

- Teoretický rozbor problému.
- Návrh inovovaných technologických řešení.
- Experimentální ověření.
- Analýza dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

- HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o., 2008. ISBN 978-80-254-250-2.
- DAVIS, J. R. Tool Materials. ASM Specialty Handbook. ASM International. 2nd ed. Materials Park. Ohio, 1998. pp. 501. ISBN: 0-8170-545-1.
- DUDZINSKI, D., SCHULTY, H. Metal Cutting and High Speed Machining. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001. pp. 490. ISBN 0-306-46725-9.
- BARÁNEK, I. a ŠANDORA, J. Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky. Trenčín: TnUAD, 2004. ISBN 80-8075-013-0.

TLUSTÝ, J. Manufacturing Process and Equipment. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650.
PTÁČEK, L. Nauka o materiálu I. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 516 s. ISBN 80-7204-193-2.

PTÁČEK, L. Nauka o materiálu II. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 360 s. ISBN 807204-130-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty
---	--

ABSTRAKT

Tato diplomová práce hodnotí dvě konkurenční břitové destičky při obrábění polotovarů diskovitého tvaru. V první části shrnuje teoretické poznatky o problematice soustružení, opotřebování břitových destiček a nákladové analýze řezného procesu. V druhé části je pozorováno opotřebení dvou břitových destiček různého výrobce při obrábění dvěma různými řeznými rychlostmi. Opotřebení je hodnoceno dle snímků z elektronového mikroskopu. V poslední fázi je ekonomické zhodnocení výhodností obou destiček a různých řezných rychlostí pro sériovou produkci.

Klíčová slova

opotřebení nástroje, CNC, optimalizace procesu, pružinová ocel, VBD, nákladová analýza

ABSTRACT

This diploma thesis evaluates two competitive cutting inserts for machining of disk-shaped blanks. The first part summarizes theoretical knowledge of turning, wear of cutting inserts and cost analysis of cutting process. In the second part, the wear of two inserts from a different manufacturer is observed in two different cutting speeds. Wear is evaluated by electron microscope images. In the end, there is an economic evaluation of both VBD in different cutting speeds for serial production.

Key words

tool wear, CNC, process optimization, spring steel, inserts, cost analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MALÝ, Michal. *Analýza opotřebení nástrojů při CNC obrábění diskovitých součástí*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113096>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Analýza opotřebení nástrojů při CNC obrábění diskovitých součástí* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

23. 5. 2019

Datum

Bc. Michal Malý

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení	6
Poděkování	7
Obsah	8
Úvod	10
1 Třískové obrábění	11
1.1 Parametry třískového obrábění	11
1.2 Tvorba třísky	11
1.3 Řezná síla	12
1.4 Tepelná oblast	13
1.5 Druhy třískového obrábění	14
1.6 Soustružnický nůž	15
1.6.1 Geometrie nože	15
1.6.2 Materiál nožů	16
1.7 Vlastnosti materiálu	17
1.8 Proces stanovení řezných podmínek	18
1.9 Návrhy optimalizace	18
1.10 Opotřebení řezného nástroje	19
1.10.1 Mechanismy opotřebení nástroje	20
1.10.2 Metody zjišťování opotřebení nástroje	22
1.10.3 Druhy opotřebení	23
1.11 Řezné kapaliny	25
2 Nákladová analýza	27
2.1 Náklady na jednotkovou práci	27
2.1.1 Náklady na jednotkovou strojní práci	27
2.1.2 Náklady na jednotkovou vedlejší práci	30
2.2 Náklady na nástroj	31
2.2.1 Trvanlivost nástroje	31
2.2.2 Náklady na jednu trvanlivost	32
2.3 Náklady na výměnu nástroje	33
3 Praktická část	34
3.1 Řezný nástroj	34
3.2 Geometrie utvařeče třísky	35
3.3 Povlak nástrojů	38
3.4 Optimalizace řezných podmínek	39

3.5 Optimalizace chlazení.....	39
4 Experimentální zkoušky	40
4.1 Experiment A.....	42
4.2 Experiment B.....	44
4.3 Experiment C.....	47
4.4 Experiment D.....	48
4.5 Shrnutí výsledků pozorování	50
5 Ekonomické zhodnocení	52
5.1 Experiment A.....	53
5.2 Experiment B.....	56
5.3 Experiment C.....	58
5.4 Experiment D.....	60
5.5 Zhodnocení nákladové analýzy	62
Závěr.....	63
Zdroje	64
Seznam použitých symbolů a zkratk	67

ÚVOD

Strojírenský průmysl je jednou z nejrychleji se rozvíjejících oblastí výrobní sféry na světě, a to zejména díky neustálé touze zlepšovat produkty poskytující určitý druh pohodlí a služeb každému z nás. V čele tohoto rozvoje stojí zejména společnosti s vysokou sériovostí výroby, neboť se jim zpravidla náklady i na sebemenší zlepšení mnohonásobně vrátí zpět. Pro strojírenskou výrobu je typická práce s kovem, a to zejména jeho opracování. Procesů vedoucích ke komplexním produktům, jako jsou auta nebo letadla, je nezměrné množství, a právě díky tomuto množství je na denním pořádku snaha zlepšit každý z dílčích procesů. I malým zlepšením v každém takovém dílčím postupu může být dosaženo velkých pokroků v celkovém procesu. Díky tomu jsou kladeny velké nároky na základní procesy zpracovávání ocelí a polotovárů při CNC obrábění. Tyto nároky jsou vždy směřovány ke zvýšení kvality výrobku a zároveň ke snížení nákladů, které jsou velmi často spojeny s časovou náročností výroby dílu.

Polotovary z pružinových ocelí patří do materiálů hojně využívaných při velkosériové výrobě, a to i v automobilovém průmyslu. Z tohoto důvodu je zaměření na daný materiál aktuální a pokrok v procesu jeho obrábění může být přínosný mnoha zpracovatelům.

Většina firem, zabývajících se zpracováváním ocelí, zpravidla nemá nebo není ochotna vynakládat náklady spojené s testováním ideálních podmínek CNC obrábění. Spíše se spokojují s dostatečným efektem, dokud je zákazník ochoten zaplatit cenu z toho vyplývající. Proto používají již ověřené řezné nástroje, řezné podmínky volí na základě zkušeností a obráběcí prostředí nijak neupravují konkrétním požadavkům. V těchto procesech jsou pak skryty velké potenciální zlepšení vedoucí k úsporám jak na čase, tak na nákladech na výrobek. Tato práce by měla porovnat aktuálně významné soupeře na poli obrábění pružinových ocelí a stanovit i řezné podmínky, které by mohly vést ke zlepšení procesu v mnoha praktických aplikacích a mohla by se tak stát podnětem ke změně zaběhlých systémů v mnohých českých firmách zabývajících se zpracováváním těchto materiálů. Věřím, že výsledky z ní vyplývající mohou být i podnětem k inovaci v obrábění jiných materiálů a polotovárů, neboť zastaralost procesů a podmínky řezání nastavené dle zvyklostí nejsou typické pouze pro tuto úzkou skupinu, ale jsou rozšířené napříč celým odvětvím.

1 TŘÍSKOVÉ OBRÁBĚNÍ

Třískové obrábění je procesem, při kterém je přetvářena součást ve stavu polotovaru do požadované podoby pomocí mechanického oddělování částí materiálu. Materiál je odváděn z polotovaru v podobě třísky, která je oddělována břitem řezného nástroje. Finálním produktem třískového obrábění je součást požadovaných tvarů, rozměrů a požadované kvality [1][2].

Třískové obrábění se dělí podle způsobu oddělování materiálu na soustružení, vrtání, frézování, hoblování, obrážení, protahování, protlačování a broušení. Různé způsoby obrábění jsou určeny pracovními pohyby a druhem nástroje. Nejpoužívanějším způsobem k výrobě rotačních dílů, jakými se tato práce zabývá, je soustružení, při kterém je řezný pohyb složen z pohybu hlavního – rotačního pohybu obrobku, a vedlejšího – posuvového pohybu nástroje [2][3].

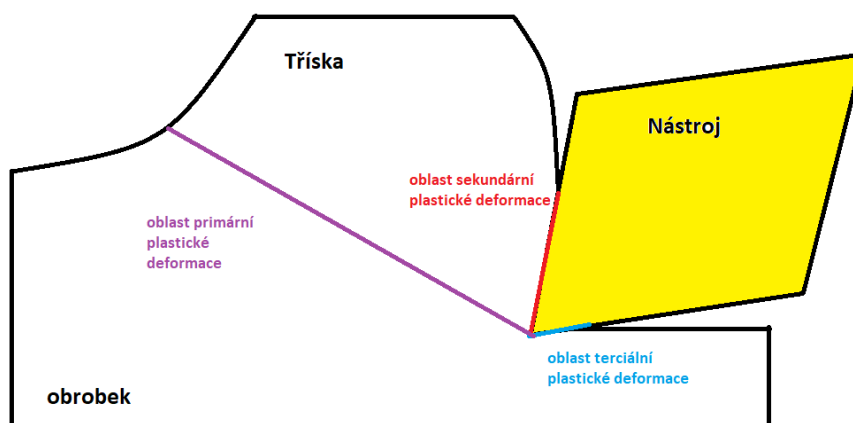
1.1 Parametry třískového obrábění

Jako každý technologický proces i třískové obrábění má parametry, které se mění v závislosti na vstupních požadavcích procesu. Mezi vstupní požadavky patří například materiál, ze kterého je vyroben polotovar, tvar polotovaru, požadovaný tvar a rozměry finálního produktu, výrobní čas, výrobní náklady a jiné. Podle těchto vstupních parametrů jsou následně voleny parametry procesu, jimiž mohou být břitová destička, způsob chlazení, řezná rychlost nebo posuvová rychlost. Výstupy jsou například reálný tvar, reálné rozměry, konečná kvalita obrobku, délka obrábění a trvanlivost nástroje. Tyto výstupy je poté možno porovnat se zadanými vstupy a dojít ke zhodnocení. Na základě zhodnocení lze optimalizovat procesní parametry tak, aby byly jednotlivé výstupy vyrovnané a zároveň aby dodržely požadované vstupní parametry [4][5].

1.2 Tvorba třísky

Jedním z podstatných výstupních parametrů je i jakost obráběného povrchu. Aby bylo dosaženo požadované kvality obrobeného povrchu, je nutné zabývat se fyzikální podstatou tvorby třísky. Tříska vzniká vnikáním nástroje tvaru klínu do materiálu, kde překonává nejprve elastické a poté i plastické deformační síly, a odděluje tak část materiálu, takzvanou třísku, od zbytku obrobku. Při překonávání sil musí vynaložit mechanickou energii, která se z většinové části přemění v energii tepelnou, která ovlivňuje třísku, nástroj i samotnou obrobenou plochu obrobku. Právě velikost a charakter tohoto vlivu vytváří konečnou kvalitu povrchu [1][3].

Zkoumání ovlivňování povrchu při tvorbě třísky dělíme do 3 oblastí viz obr.1.1 [2]:

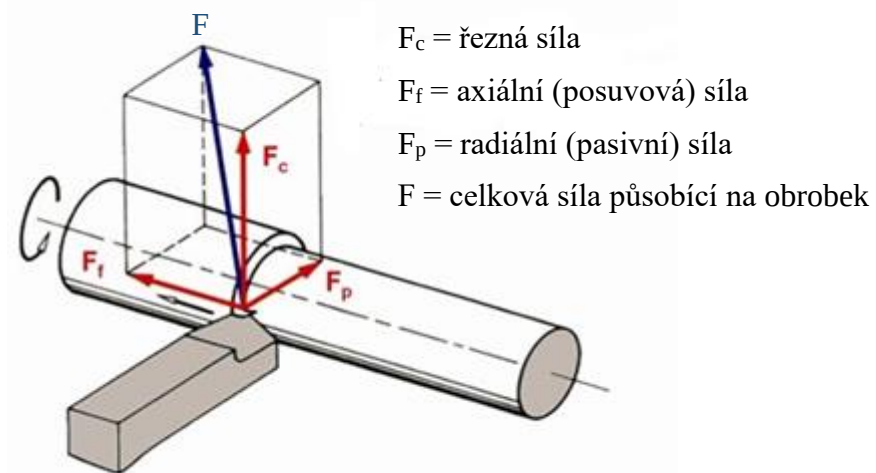


Obr. 1.1 Oblasti plastických deformací při obrábění [6].

- Primární plastická deformace vzniká v rovině maximálních smykových napětí.
- Sekundární plastická deformace vzniká v návaznosti třecích sil, které překonává tříska odváděná po čele nástroje.
- Terciální plastická deformace je dána třecími silami, vznikajícími při posunu nástroje po povrchu materiálu. Právě tato deformace má největší vliv na výslednou jakost povrchu.

1.3 Řezná síla

Řezná síla je síla, kterou musí vynaložit nůž na překonání řezného odporu (jak od elastické, tak zejména od plastické deformace) při oddělování třísky. Celková síla F působící při řezném procesu na obrobek, je často pro účely výzkumů dělena na jednotlivé složky v osách působení viz obr. 1.2 [7][8].



Obr. 1.2 Rozložení řezné síly na jednotlivé složky [9].

V případě soustružení:

- F_c – Složka síly působící tečně ve směru pohybu obrobku. Má největší podíl na celkové síle působící na obrobek (cca 80 %).
- F_f – Složka síly působící proti směru pohybu nástroje.
- F_p – Složka síly je dána odporem proti vniku nástroje do hloubky záběru.

1.4 Tepelná oblast

Jak bylo již uvedeno, tepelně ovlivněná oblast je hlavním problémem při řešení kvality povrchu. Je také důležitým faktorem celého řezného procesu, neboť má podstatný vliv na řezné vlastnosti nástroje, čímž může výrazně zkracovat trvanlivost. Na teplo se přemění 95–98 % mechanické energie potřebné k oddělení třísky. Zbytek energie zůstává zachován v podobě zbytkové napjatosti obrobku. Celkové teplo vzniká ve čtyřech oblastech [1][2][10]:

Q_{sh} – teplo vznikající v rovině smyku způsobené plastickou deformací

Q_{γ} – teplo vznikající třením čela nástroje a třísky

Q_{α} – teplo vznikající třením hřbetu nástroje a obrobekovou plochou

Q_{ch} – teplo vznikající dělením a utvářením třísky

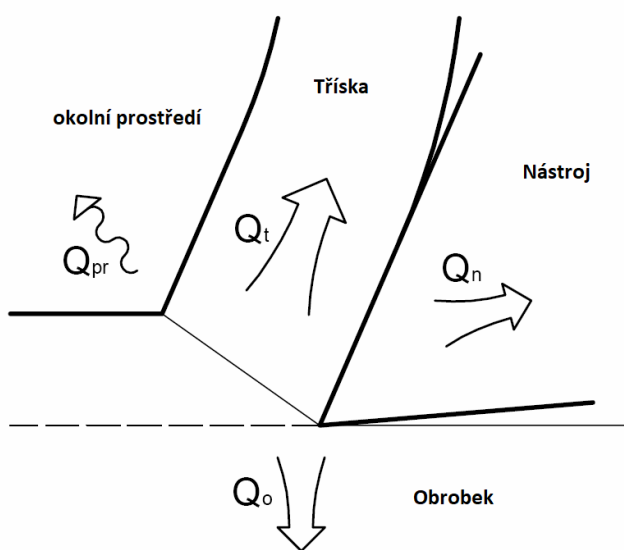
Celkové teplo je poté z procesu obrábění, konkrétněji při soustružení za vyšších řezných rychlostí, odváděno viz. obr. 1.3 [6,7,28]:

Q_t – teplo odvedené třískou (85 %),

Q_o – teplo odvedené obrobkem (5 %),

Q_n – teplo odvedené nástrojem (8 %),

Q_{pr} – teplo odvedené řezným prostředím (2 %).

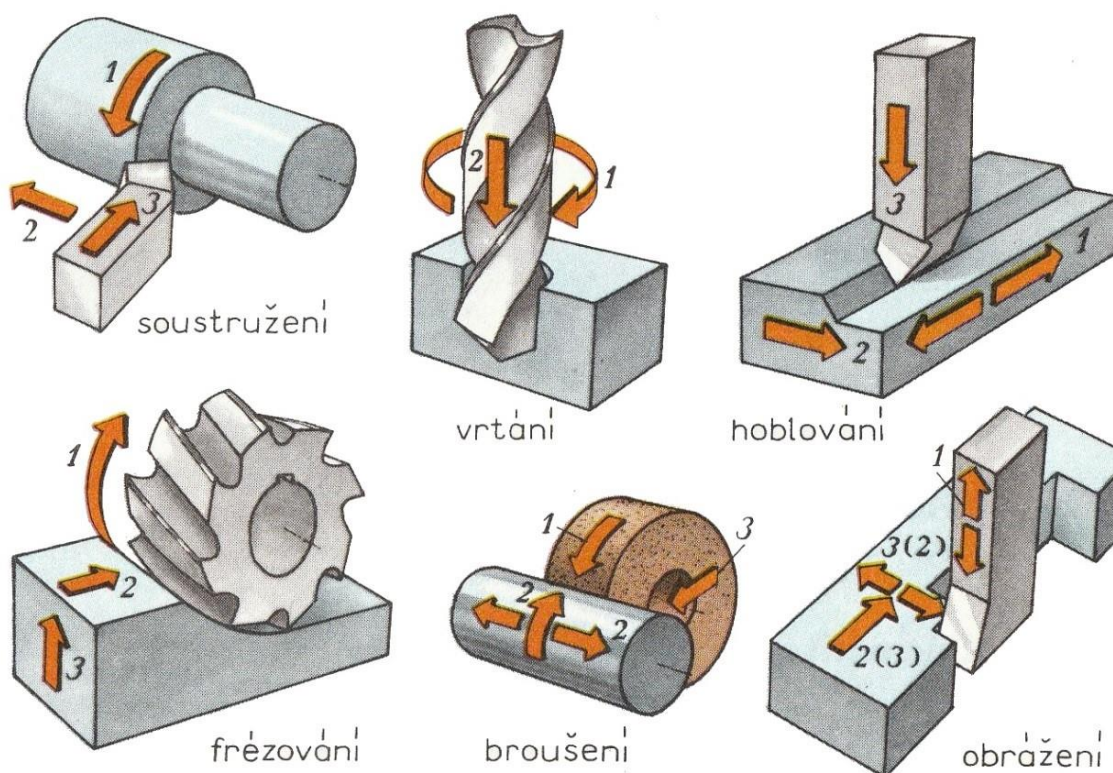


Obr. 1.3 Odvod tepla z řezného procesu [5].

Množství tepla by s klesající řeznou rychlostí bylo odváděno méně třískou a více obrobkem. Tím by však docházelo k většímu ovlivňování kvality povrchu obrobku. To je jedním z důvodů, proč je trendem řezné rychlosti zvyšovat. [8]

1.5 Druhy třískového obrábění

Třískové obrábění v závislosti na pohybech nástroje a obrobku je děleno do několika procesů viz obr. 1.4 [2][4][11].



Obr 1.4. Příklady jednotlivých způsobů třískového obrábění [12].

Soustružení

Při soustružení hlavní řezný pohyb koná obrobek a má rotační charakter. Z toho důvodu jsou primárně soustružením zpracovávány obrobky kruhového průřezu. Vedlejší posuvový pohyb koná nástroj podél osy obrobku. Vedlejší pohyb příčně posuvný koná také nástroj, a určuje tím množství odebraného materiálu. Výsledný řezný pohyb má tedy spirálovitý charakter. Nástrojem je soustružnický nůž.

Frézování

Při frézování je hlavním řezným pohybem také rotační, ale vykonává jej nástroj. Nástrojem je v tomto případě fréza, která má zpravidla více než jeden břit. Vedlejší pohyb koná obrobek, a to posuvný, buď ve směru otáčení frézy, takzvané sousledné frézování, nebo proti směru otáčení frézy, takzvané nesousledné frézování.

Broušení

Nástrojem je zde mnohobřitý brusný kotouč, který koná hlavní řezný pohyb. Principem broušení není odebrání jedné určité třísky, ale odebrání mnoha mikrotřísek pomocí brusného materiálu, který je spojen pojivem na povrchu brusných kotoučů. Tím se dosahuje vyšších přesností a lepší jakosti povrchu než u jiných řezných operací.

Vrtání

U vrtání koná hlavní řezný pohyb nástroj a pohyb je opět rotační. Vedlejší posuvový pohyb koná materiál, který se přibližuje ve směru osy nástroje. Nástrojem je vrták a mívá zpravidla alespoň dva břity.

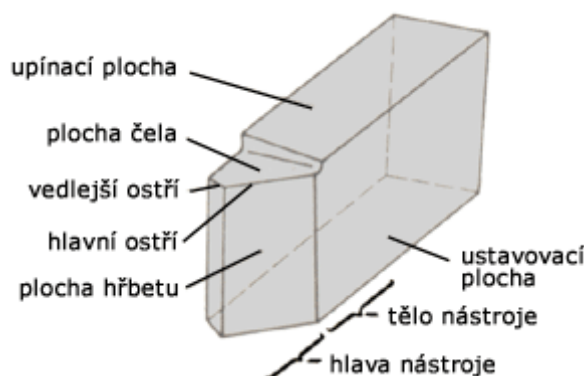
Vyvrtávání

Je velmi podobný proces vrtání, nicméně řezný nástroj neproniká do plného materiálu, ale zvětšuje již zhotovený otvor.

Mezi další druhy třískového obrábění patří vyhrubování, vystružování a zahlubování, kterými jsou dokončovány díry po vrtání a vyvrtávání. Dokončování může zahrnovat zlepšení povrchu, zpřesnění rozměrů nebo úpravu konců otvorů. Dále pak hoblování a obrážení, kde hlavní pohyb koná jednobřitý nástroj v podobě nože, který dlouhým přímočarým pohybem ubírá třísku z rovinné plochy.

1.6 Soustružnický nůž

Soustružnický nůž je jednobřitý nástroj, buď jednolitý, nebo skládající se z držáku a břitové destičky. Je rozeznáváno tělo nástroje, čelo, hřbet hlavní, hřbet vedlejší, hlavní ostří, vedlejší ostří, a špička viz obr. 1.5 [3][6].



Obr. 1.5 Popis soustružnického nože [7].

1.6.1 Geometrie nože

Nože mají podle svého plánovaného použití a materiálu obrobku různé tvary, které jsou definovány nástrojovými úhly viz obr. 1.6 [4][13][6].

Ortogonalní úhel hřbetu

Má podstatný vliv na tření mezi plochou hlavního hřbetu a řeznou plochou. Nárůst tepla vlivem tření je na tomto úhlu nepřímo závislé. Čím je však větší, tím se stává nástroj křehčím.

Úhel nastavení hlavního ostří

Má vliv na výsledný řezný odpor. Při menších úhlech břitů vniká nůž do materiálu snadněji, nicméně tím přibývají i třecí síly a vzniká více tepla. Zároveň má vliv i na trvanlivost nástroje. Čím je úhel menší, tím se trvanlivost zkracuje.

Ortogonalní úhel čela

Má vliv na odvod třísky z místa řezu. Se zvyšujícím se úhlem se tříska lépe odvádí, což snižuje odpor materiálu, ale zároveň má za následek oslabení břitu.

Úhel špičky nástroje

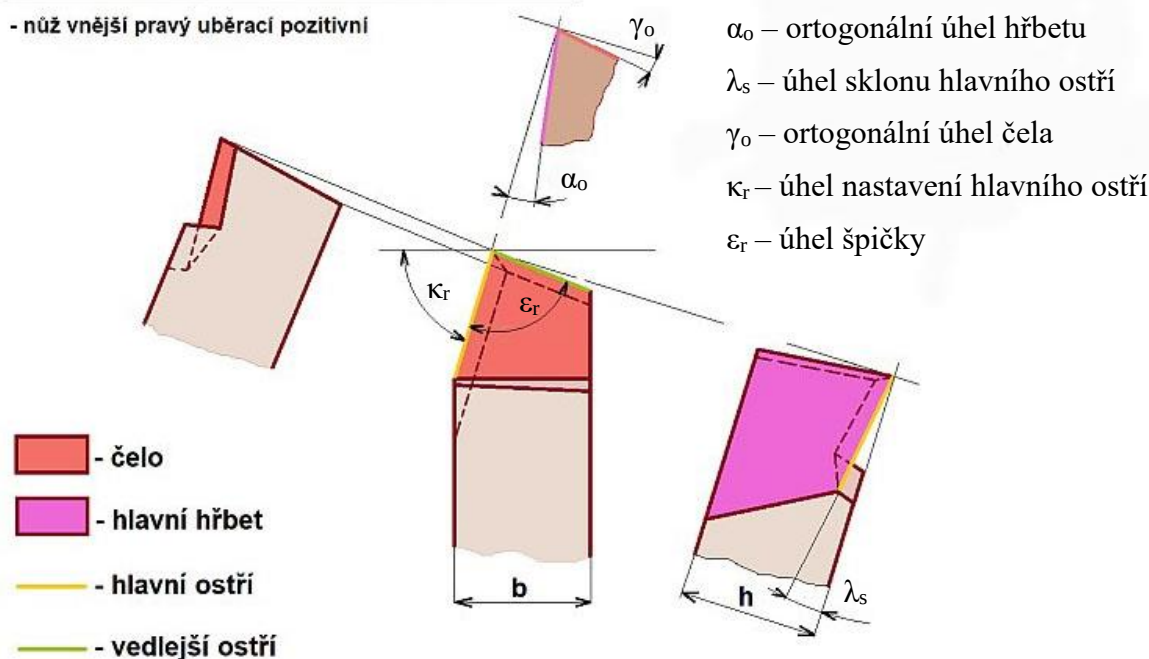
Ovlivňuje trvanlivost nože. S jeho rostoucí hodnotou roste i schopnost lépe odvádět teplo.

Úhel sklonu hlavního ostří

Je důležitý pro směr odvodu třísky, ovlivňuje její tvar a velikost.

Soustružnický nůž - základní geometrie

- nůž vnější pravý uběrací pozitivní



Obr. 1.6 základní geometrie soustružnického nože [7].

1.6.2 Materiál nožů

Soustružnický nůž může být jednolitý, kdy celý nůž je vyroben z rychlořezné oceli. Tyto nože jsou zpravidla levnější a použití naleznou zejména při obrábění klasických materiálů, nebo v zakázkové výrobě, kde nejsou provedeny optimalizace.

Druhou možností je složení nože z držáku a vyměnitelné břitové destičky (dále jen VBD). VBD jsou vyráběny z různých materiálů, které mají své specifické použití. Můžou se používat buď nepovlakované, nebo na ně může být nanесena jedna či více vrstev povlaku pro zlepšení trvanlivosti a řezných vlastností. Různé materiály mají různé použití a jejich výhody jsou zobrazeny na obr. 1.7. Mezi materiály VBD patří [13][14][15][16]:

Slinuté karbidy

Směs karbidů s kovovým pojivem vyrobená práškovou metalurgií.

Cermety

Materiály tvořené karbidickým kovem s pojivem z kobaltu a niklu.

Keramika

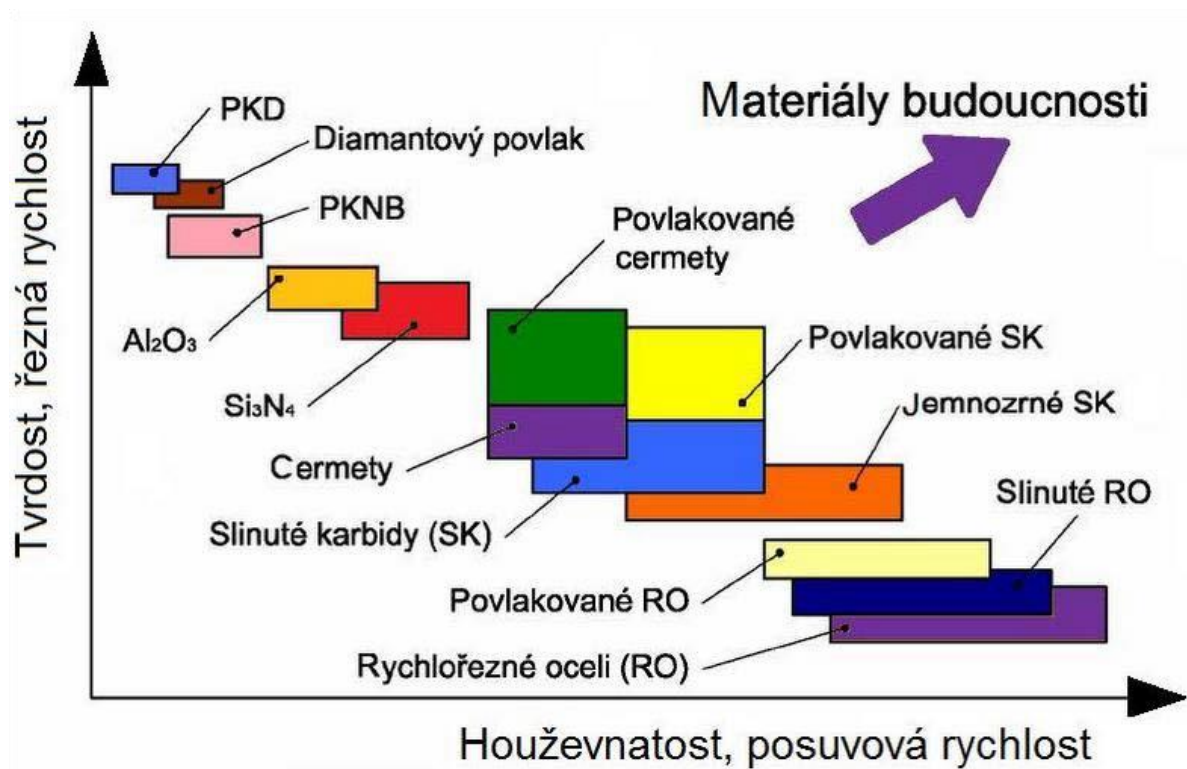
Zde se používají zejména sloučeniny křemíku, dusíku, nitridu křemíku, bóru, oxidu a uhlíku. Tyto materiály se vyznačují velkou křehkostí, ale zároveň velkou tvrdostí a chemickou nereaktivitou s obráběným materiálem.

PKD

Polykrystalický diamant je řazen do skupiny supertvrdých materiálů. Jeho nevýhodou je vysoká cena a nepřiměřená reakce s uhlíkem obsaženým v obráběném materiálu.

PKNB

Polykrystalický kubický nitrid bóru je také řazen mezi supertvrde materiály, který vyniká i přesností a kvalitou obrobeného povrchu. Jeho cena je však těmito vlastnostem úměrná.



Obr. 1.7 Grafické znázornění vlastností vybraných materiálů řezných nástrojů [14].

1.7 Vlastnosti materiálu

Konstrukční oceli jsou děleny do jednotlivých tříd (10-17) podle obsahu a druhu legur, zaručení jakosti, čistoty chemického složení a zaručené meze kluzu a meze porušení. Třída 12 jsou uhlíkové, ušlechtilé, uklidňené oceli, u kterých je zaručeno kompletní chemické složení [2][17].

Jednou ze skupin třídy 12 jsou pružinové oceli, které jsou význačné vysokou mezí únavy a velkým modulem pružnosti. Jsou hojně využívány v automobilovém průmyslu, kde jsou používány jako stabilizátory a závěsné pružiny. Stejně dobrého využití nacházejí i v železniční dopravě, jako varianta upínání kolejí k prahcům. Důvody jejich využití v těchto oblastech jsou zakotveny v jejich mechanických vlastnostech. Mezi pozitivní patří houževnatost, odolnost proti únavovému lomu a tažnost. Významnou výhodou je i jejich dlouhá životnost za podmínek střídání statického a dynamického zatěžování a velmi dobrá obrobitelnost, což značně ulehčuje jejich zpracovávání. Tyto přednosti lze ovlivňovat vhodnou tepelnou úpravou či přidavkem legur [18][17].

Výroba pružinové oceli byla původně prováděna odléváním do ingotů. V dnešní době přichází nové technologie výroby a přechází se na jiné způsoby výroby, jako jsou odlévání blokovým kontilitím, odléváním do ingotů na kyslíkové konvertorové ocelárně nebo na elektroocelárně. Dalším postupem je válcování do sochorů. Sochory mohou být poté převálcovány na dráty a tyče [19][17].

Ocel 51CrV4 je nízkolegovaná ušlechtilá chrom – vanadová ocel k zušlechťování. Její chemické složení zachycuje tabulka 1.1. Vyznačuje se dobrou prokalitelností a velmi dobrým poměrem meze kluzu k pevnosti. Kalení se provádí převážně do oleje nebo roztoku syntetických polymer [20][21].

Tabulka 1.1 Chemické složení 51CrV4. [21]

	Fe [%]	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	V [%]
Min	96,44	0,47	0	0,7	0	0	0,9	–	–	0,1
Max	98,16	0,55	0,4	1,1	0,025	0,035	1,2	–	–	0,25

1.8 Proces stanovení řezných podmínek

Prvním kritériem řezných podmínek obvykle bývá šířka záběru ostří. Nejžádanější by bylo odebrat celý plánovaný úbytek materiálu na jeden záběr. To však většinou v praxi není možné. Šířka záběru je omezena zejména délkou ostří nástroje, neměla by přesahovat dvě třetiny její délky, a také tuhostí stroje, neboť se zvyšující se šířkou záběru se rapidně zvyšuje i řezný odpor, čímž je potřeba také většího výkonu stroje. Rozsah šířky záběru může být od 0,03 po 30 mm, nicméně v praxi se používá spíše užší rozsah od 0,5 po 5 mm. Dalším parametrem je posuvová rychlost, většinou vyjadřovaná spíše jako posuv na otáčku. Na posuvu je závislá výsledná jakost povrchu, a proto bychom při jeho nastavování měli dbát požadavků jakosti. Čím menší posuv, tím lepší kvalita povrchu, nicméně tím pomalejší proces obrábění, což je většinou taktéž nežádoucí. Obvykle se může pohybovat v rozmezí 0,05 až 2 mm. Posledním základním parametrem je řezná rychlost, která se stanoví na základě materiálu obrobku a druhu nástroje. Při obrábění legovaných ocelí se používají nižší řezné rychlosti, pro litiny střední a pro slitiny hliníku přichází na řadu vyšší řezné rychlosti. Rozpětí je zde poměrně veliké, od 10 do 600 m/min [2][22].

1.9 Návrhy optimalizace

Cílem této práce je návrh možné optimalizace procesu obrábění diskovitých pružin. Efektivita obrábění úzce souvisí s obrobiteľností materiálu a řezivostí nástroje. Úkolem optimalizace je tyto dva parametry ideálně zkombinovat, aby byl výsledný proces efektivnější, než proces předchozí. Obrobiteľnost by se dala charakterizovat jako souhrn jednotlivých chemických a fyzikálních vlastností daného materiálu obrobku. Těmi je charakterizována takzvaná absolutní obrobiteľnost. Tu je však poměrně složité přesně stanovit, a v praxi se používá relativní obrobiteľnost, kdy se daný materiál porovnává s etanolem. Jako nejčastější porovnávací kritéria jsou volena podíl řezných rychlostí, které mohou a nemusí být vztažené k jedné trvanlivosti a srovnání jakosti povrchu obrobku. Jelikož materiál je pevně dán a nebude se nijak měnit, optimalizace se bude zabývat druhou půlkou procesu, tedy procesem řezání [2][13][23].

Cíle optimalizace se z pravidla orientují na dvě zaměření. Před začátkem optimalizace je nutné zvážit, čeho má být optimalizací dosaženo. Většinou se pro toto hodnocení používá buď kritérium nejmenších nákladů, nebo kritérium maximální produktivity. Při procesu optimalizace se vždy vyhodnocují obě kritéria, nicméně jelikož zpravidla nejde dosáhnout neustálého zlepšování obou, od určitého okamžiku je optimalizace zacílena na jeden z těchto parametrů, zatímco druhý se zvyšuje buď velmi pomalu, nebo se dokonce může začít i mírně zhoršovat. Vždy je potřeba ujasnit, které kritérium preferujeme. Kritérium je hodnoceno podle charakteru výroby. U zakázkové výroby bude lepší volit kritérium minimalizace nákladů, u velkosériové výroby naopak bude vhodnější kritérium maximální produktivity. Ani v jednom případě to však není pravidlem a záleží to vždy na managementu firmy. Poznatky této práce budou směřovat zejména ke zvýšení trvanlivosti řezného nástroje, zvyšování řezné rychlosti v její závislosti by se měla snížit doba obrábění, a snižování opotřebení nástroje. Primárním kritériem bude minimalizace výrobních nákladů. Mezi faktory, které budou při optimalizaci sledovány a bude vyžadováno minimálně jejich setrvání na stávající úrovni, případně zlepšení,

patří kvalita povrchové vrstvy a utváření přerušované třísky. Mezi faktory, které se mohou při optimalizaci měnit patří materiál nástroje, povlak, geometrie nástroje, chladicí kapalina, řezná rychlost, posuvová rychlost a další [24][25][26].

Dělení optimalizace je možno na základě mnoha faktorů. Častým dělením pro strojírenský průmysl je konvenční a nekonvenční. Konvenční optimalizace se zabývá procesem před jeho uvedením do praxe. Bývá spojena s mnoha složitými výpočty a je založena na teoretických znalostech a zkušenostech z podobných procesů. Nekonvenční optimalizace naopak nejprve sbírá data v průběhu procesu, která následně vyhodnocuje a snaží se drobnými změnami zlepšit proces za běhu [25].

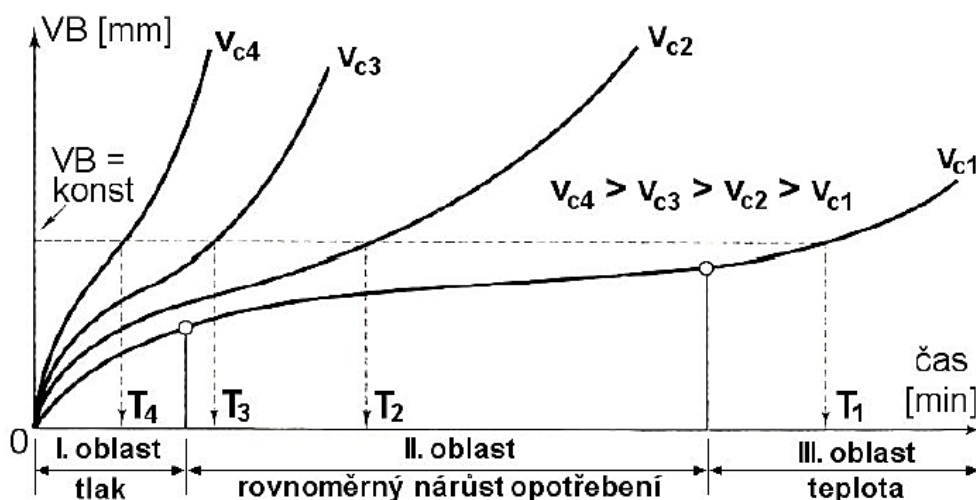
1.10 Opotřebení řezného nástroje

Opotřebení řezného nástroje je proces, při kterém nástroj v závislosti na čase procesu ztrácí své řezné vlastnosti a zvyšují se negativní projevy procesu. V určitém okamžiku tyto negativní projevy dospějí do bodu, kdy jsou již z hlediska kvality nepřijatelné. V praxi se vybere jeden hodnotící faktor, jemuž se přiřadí referenční hodnota, při které, jakmile je překročena, již není požadovaná jakost zaručena. V tomto okamžiku musí dojít k úpravě nástroje (například jeho přebroušení nebo otočení na jinou řeznou hranu). Tomuto bodu říkáme trvanlivost, a je vyjádřen v časových jednotkách [2][27].

Trvanlivost se může v závislosti na parametrech obrábění velmi lišit, v zásadě je ale vyjadřována v minutách. Největší vliv na trvanlivost nástroje má řezná rychlost. Tuto skutečnost zjistil a následně dokázal ve 20. století F.W. Taylor a na základě experimentů stanovil závislost trvanlivosti nástroje na řezné rychlosti. Tento vztah byl podle něj později pojmenován [1][7].

V případě, že nástroj již není možné upravit tak, aby opět splňoval parametry řezného procesu zaručující požadovanou kvalitu, je dosaženo bodu ukončení životnosti nástroje. Životnost je, podobně jako trvanlivost, vyjadřována v jednotkách času a jedná se většinou o celočíselný násobek trvanlivosti v závislosti na úpravě nástroje (například osmibřitá VBD s trvanlivostí pro každý břit dvě minuty bude mít životnost $8 \cdot 2 = 16$ minut) [1][2].

Opotřebení nástroje obecně popisuje závislost $VB=f(t)$. Křivky grafu se liší pro různé řezné rychlosti. Důsledek zvyšování řezné rychlosti lze vidět na obr. 1.8. Průběh křivek je znázorňován ve třech oblastech [3][30]:



Obr. 1.8 Graf závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti [28].

- I. Oblast Oblast zrychleného záběhového opotřebení – k opotřebení dochází rychleji v důsledku tlaku působícího na mikronerovnosti a drobné nepřesnosti po ostřicím nebo výrobním procesu.
- II. Oblast Oblast lineárního opotřebení s konstantní intenzitou – v této oblasti dochází k postupnému plynulému lineárnímu nárůstu opotřebení.
- III. Oblast Oblast zrychleného nadměrného opotřebení – dochází k větším odchylkám v geometrii nástroje, což má za následek zvyšování teploty, pokles tvrdosti, až může nastat lavinový efekt opotřebení.

1.10.1 Mechanismy opotřebení nástroje

Existují čtyři základní mechanismy opotřebení nástroje, které se mohou projevit na různých částech nástroje. Jejich přímé projevy jsou odlišeny jako druhy opotřebení a jsou rozepsány dále v práci. Mechanismy opotřebení jsou [2][14][15]:

Abraze

K abrazivnímu poškozování dochází vlivem mikročástic v povrchu obráběného dílu, které mohou mít vyšší nebo podobnou tvrdost, jako materiál řezného nástroje. Tyto mikročástice jsou nazývány abrazivními částicemi. K abrazi dochází prakticky v každém řezném procesu, nejvíce se však projevuje u nástrojů z RO nebo slinutých karbidů, z důvodu menší tvrdosti, než je například u keramiky nebo polykrystalického diamantu. Rychlost abraze je závislá na počtu a velikosti tvrdých mikročástic v obráběném materiálu.

Adheze

Při procesu obrábění vzniká v místě řezu poměrně vysoká teplota a v rámci překonávání řezného odporu i tlaková síla. V závislosti na těchto dvou faktorech může docházet mezi částicemi povrchu nástroje a (většinou) třísky obrobku k vzniku mikrosvarů. Tím k povrchu nástroje přilnou částice obráběného materiálu, které mohou změnit geometrii břitu a při dalším obrábění se odlupují i s částí původního materiálu řezného nástroje. Tento proces je podporován i chemickou příbuzností obou materiálů.

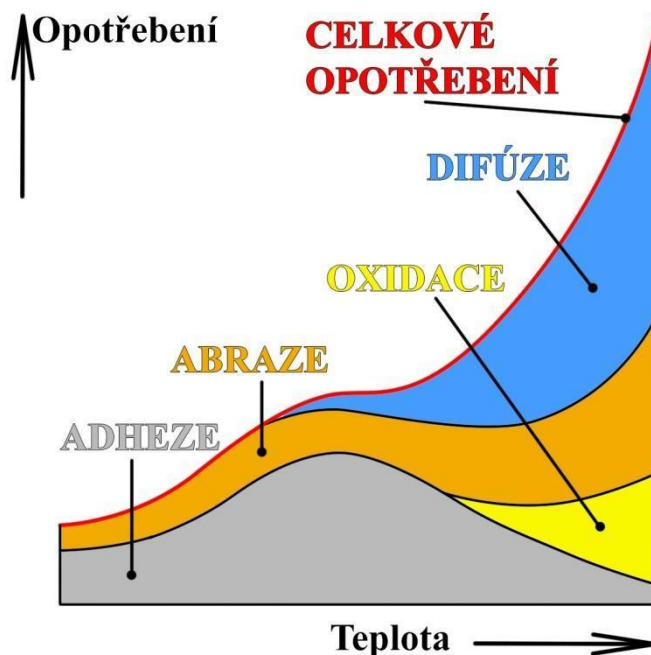
Difuze

Pokud se v průběhu obráběcího procesu dosáhne v místě řezu teploty, která má za následek rozpad struktury materiálu obrobku a nástroje na atomy, začnou některé z těchto volnějších atomů přecházet z nástroje do obrobku a naopak. To má v řezném nástroji následky v podobě vznikajících tuhých roztoků a chemických vazeb, které negativně ovlivňují strukturální pevnost materiálu.

Oxidace

Jelikož prostředí řezu zpravidla nebývá inertním, na povrchu nástroje se vlivem vzdušného kyslíku mají tendenci tvořit oxidy. Ty jednak ovlivňují řezné vlastnosti materiálu a mohou mít vliv na vznikající teplo při procesu.

Celkové opotřebení může být kombinací několika těchto typů. Obecně typ opotřebení závisí na teplotě obrábění. Vztah mezi mechanismy opotřebení a teplotou vyjadřuje obr. 1.9.



Obr. 1.9 Působení mechanismu opotřebení v závislosti na teplotě řezného procesu [7].

K těmto čtyřem základním mechanismům opotřebení mohou být přiřazeny ještě dva doplňující, často pozorované mechanismy [7][15]:

Plastická deformace

Tento mechanismus se projevuje při obrábění měkkých materiálů. Jelikož tyto materiály zpravidla nevedou dobře teplo, v průběhu procesu se teplo hromadí v materiálu nástroje, a to i přes zpravidla menší celkově produkované teplo. Tím dochází v povrchových vrstvách nástroje k plastické deformaci. Tyto plasticky tvárné oblasti se pak mohou i přemísťovat, což může v konečném důsledku vést až k tzv. lavinovému efektu.

Křehký lom

Při tomto opotřebení dojde vlivem velkého mechanického zatížení rázového charakteru ke vzniku jednoho nebo více křehkých lomů na ostří nástroje. To může způsobit buď materiál obrobku – nehomogenní vměstky v materiálu, obrábění přerušovaným řezem, nebo materiál nástroje – například prolomení mikrotrhlin vzniklých při ostření. Náchylnějšími materiály pro křehký lom jsou tvrdé, ale křehké materiály, jako řezná keramika nebo slinuté karbidy.

Všechny mechanismy mají vliv na trvanlivost a životnost nástroje a je potřeba jejich efekty dobře znát při určování řezných podmínek. Zatímco abrazivní a adhezní opotřebení řadíme mezi fyzikálně způsobená opotřebení, difuze a oxidace vzniká spíše na chemické bázi. Všechna tato čtyři opotřebení v časovém průběhu procesu obrábění narůstají a úkolem je stanovit určité meze, kdy je již opotřebení natolik veliké, že není možné v obrábění pokračovat (většinou z důvodu přílišného zhoršení jakosti povrchu a rozměrové přesnosti). Poškození plastickou deformací a křehkým lomem jsou naproti tomu jednorázová a mají za následek okamžité znehodnocení nástroje a ukončení procesu [2][15]:

1.10.2 Metody zjišťování opotřebení nástroje

Míru opotřebení nástroje můžeme zjišťovat metodami přímými a nepřímými [29][10]:

Přímé metody

Jsou zpravidla přesnější, nicméně jejich hlavní nevýhodou je nemožnost jejich provádění při obráběcím procesu. Navíc vyjmutí nástroje z držáku a jeho následného vrácení může zapříčinit změnu podmínek, což může vést k milné predikci trvanlivosti. Mezi tyto metody patří:

Váhová metoda

Je poměrně přesnou metodou měření opotřebení nástroje založenou na úbytku hmotnosti. Tato metoda je ideální pro VBD, které lze jednoduše zvážit před a po obrábění. Rizik u této metody je hned několik. Výsledky může například zásadním způsobem ovlivnit nárůstek, který váhově kompenzuje jiná opotřebení.

Metoda radioaktivních izotopů

Radioaktivní materiál nástroje přechází při procesu obrábění do třísky. Po obrobení části plochy se jiným nástrojem odebere krátká tříska z obrobené i neobrobené plochy a obě se umístí do měřicího boxu. Pomocí indikačního zařízení, skládajícího se ze zdroje napětí a číslicového reduktoru, se změří tzv. aktivita třísek, tedy počet jejich impulsů za minutu, díky níž je možné určit množství nástrojového materiálu ulpívajícího na třísece, ploše řezu a obrobené ploše. Se znalostí specifické aktivity nástroje je následně možné spočítat tíhový úbytek nástroje s přesností v tisícinách mg. Nástroj může být ozářen až po výrobě, nebo může být radioaktivní izotop zaveden přímo při jeho výrobě. V obou případech je však při takové práci nutné znát velká zdravotní rizika a pracovat v adekvátně chráněném prostředí a adekvátními pomůckami.

Mikrometrická metoda

Při této metodě je destička měřena pomocí mikroskopu, úchylkoměru, nebo třeba konturografu. Při použití moderních snímacích technologií lze pomocí této metody získat i 3D virtuální model destičky s opotřebením a vyhodnocovat na ni nezávisle jednotlivé druhy opotřebení. To je výhoda oproti váhovým metodám.

Optická metoda

Je vhodná k použití měření hloubky žlábků na čele. Při umístění ostré hrany nad žlábků a osvětlení pod úhlem 45° , výsledná stínová délka od hrany nástroje po konec stínu bude zároveň i hloubka žlábků.

Elektrický odpor

Pokud nástroj uzpůsobíme například nanesením odporové vrstvy, může změna odporu záviset na opotřebením nástroje. Tato metoda je teoreticky použitelná i za chodu stroje, nicméně v praxi bude ovlivněna odchodem třísky a chladicí kapalinou.

Pneumatická metoda

Založena na měření úbytku ve směru kolmém nebo radiálním k ploše řezu. Metoda je poměrně jednoduchá a spolehlivá.

Nepřímé metody

Nepřímé metody se zaměřují na aspekty řezného procesu, které lze měřit a jsou závislé na opotřebením nástroje. Jejich hlavní výhodou je možnost jejich použití v průběhu řezného procesu.

Optické měřicí metody

Jejich použití bývá poměrně jednoduché, nicméně jejich spolehlivost nemusí být vždy dostačující. Všechny tyto metody využívají paprsků světla, které se při opotřebovaném

povrchu odráží od nástroje jinak, než u nového nástroje. Optické metody jsou založeny buď na prostém odrazu světla, nebo je ke zpracování použita Fourierova transformace, případně pro podrobnější zkoumání je použita vysokofrekvenční kamera, která poskytne kompletní 3D obraz nástroje. Tyto metody se neprovádí za běhu nástroje, nicméně většinou není nutné nástroj vyjmout z držáku

Měření na základě krouticího momentu a řezných sil

Tato metoda předpokládá, že s rostoucím opotřebením narůstá i řezný odpor, což v důsledku vede ke zvyšování řezných sil a krouticího momentu. Metoda využívá měření dynamometrem nebo tenzometrem. Je jednou z nejrozšířenějších metod měření opotřebením.

Měření pomocí mezery mezi nástrojem a bodem dotyku obrobku.

Tato měření jsou prováděna kontaktně nebo bezkontaktně.

Kontaktní měření

Při použití elektrického mikrometru je na držák nástroje umístěna dotyková sonda, která udržuje kontakt s obrobkem. Mikrometr neustále vyhodnocuje vzdálenost bodu dotyku od středu nástroje, která je nepřímo úměrná opotřebením břitů.

Bezkontaktní měření

Kapacitní metoda je založena na různé velikosti kapacity kondenzátorů, které vzniknou vložením kovové destičky mezi nástroj a obrobek. Jelikož je třískou zaručen vodivý kontakt mezi nástrojem a obrobkem, vzniknout tak kondenzátory mezi destičkou a nástrojem a destičkou a obrobkem. Na základě změn kapacit těchto kondenzátorů se vyhodnotí opotřebením nástroje.

Měření pomocí vibrací

Vzhledem ke zvyšujícímu se řeznému odporu při opotřebením nástroje a neideální vyváženosti obrobku dochází při opotřebením nástroje ke zvyšujícím se vibracím. K měření vibrací se používá akcelerometru, kyvadlové kladívko nebo oscilograf, který měří kolísání otáček vřetene. Jelikož v praxi je většinou více obráběcích center vedle sebe, případně další zdroje rušivých vibrací, jsou tyto metody spíše teoretického nebo laboratorního charakteru.

Měření pomocí zvukových vln

Měření se provádí pomocí akcelerometru, který zaznamenává zvukové vibrace způsobené třením třísky o hřbet nástroje. Na základě rozdělení frekvencí na vysoké a nízké a jejich poměrového zastoupení lze definovat opotřebením nástroje. Zvuky mohou být sbírány také pomocí mikrofónu, kdy se vyhodnocují nárůstky amplitud některých frekvencí. Nárůstky lze definovat pomocí spektrální analýzy.

Měření ultrazvukových emisí

Novou a do budoucna slibnou metodou měření opotřebením bez vnějších vlivů a za běhu stroje je zachycování ultrazvukových emisí vznikajících napětím v povrchu obráběného dílu. Snímač může být umístěn například na držáku nástroje a jelikož většina rušivých zvukových vln je ve slyšitelné zvukové hladině, v oblasti ultrazvuku jsou tyto vlny nerušené a čistě snímatelné.

1.10.3 Druhy opotřebením

Opotřebením nástroje je děleno do několika druhů. Pozorování průběhu jednotlivých opotřebením a poměr jejich utváření hodně napovídají o vhodnosti právě prováděného procesu a může být dosaženo prodloužení trvanlivosti nástroje. Všechna opotřebením jsou zobrazena na obr. 1.10 [29][31][32].

Opotřebení hřbetu břitů

Jedná se o abrazivní formu opotřebení. Patří mezi obvyklý typ opotřebení, neboť zde dochází k přímému styku nástroje s plochou obrobku. Většinou bývá vyžadováno rovnoměrné opotřebování. Pokud je nástroj používán vhodně, bývá nejčastější příčinou konce trvanlivosti nástroje.

Žlábek na čele

Opotřebení ve formě utvoření žlábků na čele nástroje je kombinovaného charakteru abrazivního a difuzního. Přes čelo materiálu odchází třísky, která vede největší část tepla z obráběného procesu a tím se tato část nástroje stává velmi tepelně zatíženou. To způsobuje difuzi částic nástroje do třísky. Druhou částí je odstraňování částic materiálu nežádoucím brousícím efektem třísky. Toto opotřebení má za následek zejména špatné utváření třísky a zeslabení břitu, tím může být náchylnější k lomu

Vydrolování ostří

Jedná se o abrazivní formu opotřebení. Na rozdíl od symetrického opotřebení břitů, jehož dosažení je žádoucí, zde dochází k nerovnoměrnému odlupování kousků materiálu břitů. Břit pak může být náchylnější k lomu, případně může být snížena jeho trvanlivost z důvodu špatné kvality výsledného povrchu. Vydrolování může mít příčinu ve špatně zvoleném materiálu nástroje, špatně zvolených rezných podmínkách anebo při obrábění přerušovaným řezem.

Plastická deformace břitů

Vysoké teploty a případné silné tlakové zatížení nástroje mohou mít za následek, že se současně s obrobkem začne plasticky deformovat také břit. Ten se zpravidla vybočí. Tím dochází k zásadní změně geometrie břitů, což má většinou za následek horší odchod třísky a zvýšení náchylnosti k lomu.

Vrub na hřbetě břitů

Vrub na hřbetě břitů vzniká kombinací adhezního a oxidačního opotřebení. Dochází k němu v závislosti na kontaktu s bokem odcházející třísky v místě, kde probíhá přívod vzduchu do obráběné oblasti.

Nárůstek

Důsledkem špatně zvoleného materiálu nástroje vůči materiálu obrobku může být zvýšená afinita břitů, což může mít, v kombinaci s vysokými teplotami, efekt mikrosvarů mezi materiálem třísky a nástroje. V důsledku dochází k vzniku nárůstku na čele nástroje. Nárůstek je škodlivý zejména změnou geometrie nástroje a možnosti odloupení i s původním materiálem. Toto opotřebení se dá prakticky úplně eliminovat vhodným výběrem materiálu nástroje.

Hřbenové trhlinky

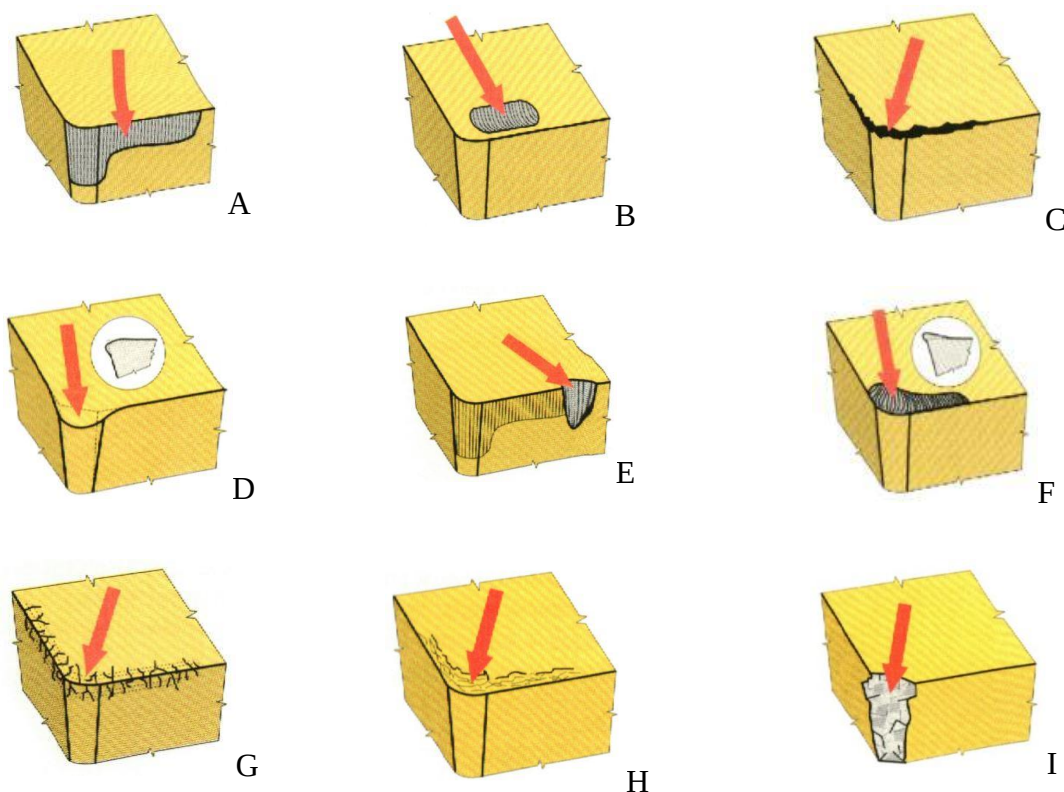
V případě přerušovaného obrábění může na ostří dojít k tepelnému šoku, který má za následek vznik hřbenových trhlinek tvořících se ve směru kolmém k ostří. Následně hrozí riziko postupného odlupování materiálu mezi trhlinkami, což zvyšuje šanci na zlomení břitu.

Únavový lom

K únavovému lomu dochází při častých markantních změnách zatěžujících sil. To je nejčastěji způsobeno měnící se reznou rychlostí. Únavový lom se tvoří paralelně s ostřím.

Lom břitů

K tomuto opotřebení nedochází postupně, ale je nárazové. Vzniká jako důsledek špatně zvolených materiálů nebo i jiných opotřebení zmíněných výše. Vznik lomu je okamžitě doprovázen koncem trvanlivosti nástroje. Tomuto opotřebení je žádoucí se vyhnout, neboť jeho náhlý vznik může mít za následek okamžité poškození právě obráběného dílu.



Obr. 1.10 Druhy opotřebení řezného nástroje [32].

- a) opotřebení hřbetu břitu, b) žlábek na čele, c) vydrolování ostří, d) plastická deformace břitu, e) vrub na hřbetu břitu, f) nárůstek, g) hřebenové trhlinky, h) únavový lom, i) lom břitu.

1.11 Řezné kapaliny

Jedním z důležitých faktorů ovlivňující řezný proces je prostředí, ve kterém je kontakt nástroje s obrobkem prováděn. Toto prostředí bývá uměle upravováno použitím řezných kapalin k dosažení lepší kvality povrchu, delší trvanlivosti nástroje a údržba stroje. Řezné kapaliny v sobě kombinují různé účinky, jsou voleny na základě požadovaného procesu [4][31][33].

Mazací účinek

V rámci mazání kapalina vytváří na povrchu nástroje a obrobku tenkou vrstvu, která zabraňuje přímému styku obou ploch, čímž výrazně snižuje tření. Snižování tření má za následek snížení silových zatížení, zlepšení jakosti povrchu a v neposlední řadě také snížení potřebného výkonu stroje, což se projeví menším odběrem elektrické energie. Tyto účinky jsou závislé především na viskozitě kapaliny, kdy s rostoucí viskozitou zpravidla vzrůstá její mazací účinek, nicméně také vzrůstá její povrchové napětí, což může mít za následek horší průnik do složitějších prvků obrobku a ulpívání na šponách, čímž dochází k úbytku cirkulované kapaliny.

Chladicí účinky

Hlavním účelem řezné kapaliny je odvod tepla z místa styku řezného nástroje s obrobkem. Tuto vlastnost vykazuje každá smáčivá kapalina, jejíž schopnost odvodu tepla roste s rostoucí mírou smáčení, výparným teplem, měrným teplem a tepelnou vodivostí. Zároveň zpravidla klesá s rostoucí viskozitou.

Čistící účinek

Úkolem chladicí kapaliny je i zlepšování odvodu třísky jednak z místa řezu ale i ze stroje samotného, čímž přispívá k jeho udržování ve stálé provozní schopnosti. Tento účinek nabývá

na vyšším významu zejména při řezání závitů a vyvrtávání děr, kdy výrazně podporuje odvod špony z místa řezu.

Ochranný účinek

Chladicí kapalina také do jisté míry může nahrazovat konzervaci výrobků v mezioperačním procesu. Většinou se u ní vyžadují protikorozní vlastnosti, po krátkou dobu nahrazuje antikorozní obaly a zároveň chrání proti korozi i samotný stroj.

Provozní stálost

Tato vlastnost souvisí s ekonomickou stránkou obrábění, neboť vyjadřuje, jak často je nutné provozní kapalinu měnit. Tato doba se odvíjí od doby zachování všech svých účinků na uspokojivé úrovni.

Zdravotní nezávadnost

Provozní kapaliny nesmí být zdravotně závadné ani pro operátora ani pro životní prostředí při jejich likvidaci.

V závislosti na potřebách obráběcího procesu volíme provozní kapalinu s vhodnou kombinací těchto účinků. Jelikož jsou kapaliny určeny svojí viskozitou a s parametrem viskozity jdou proti sobě její dva hlavní účinky, jsou primárně provozní kapaliny děleny na dvě skupiny: [29][33]

- Chladicí kapaliny – Kapaliny převážně na vodní bázi, u nichž převládá chladicí účinek.
- Řezné oleje – Kapaliny na bázi olejů, u nichž převažuje mazací účinek.

V rámci detailnějšího dělení jsou rozeznávány například vodní roztoky, emulzní kapaliny, mastné oleje, zušlechťené řezné oleje nebo syntetické kapaliny.

Volbu řezné kapaliny ovlivňují zejména řezný nástroj a obráběný materiál. Materiál nástroje může mít své požadavky na chladicí médium. Rychlořezné oceli vyžadují bezpodmínečné chlazení. U nástrojů ze slinutých karbidů již chladicí účinek nemusí být vyžadován jako primární. U keramických nástrojů lze někdy chladicí účinky média zanedbat. Pro zvyšující se pevnost materiálu je obvykle volena kapalina s většími mazacími účinky. Je to dáno zvyšujícími se silami pro překonání plastické deformace, což pro snížení třecích sil vyžaduje ulpívání větší vrstvy kapaliny na nástroji a obrobku. Také je potřeba brát zřetel na materiálové reakce, které by mohly nastat nevhodnou kombinací materiálu obrobku a kapaliny [31][34][36].

2 NÁKLADOVÁ ANALÝZA

Při analyzování podmínek řezného procesu a porovnávání výsledků různých metod, nástrojů a parametrů, je potřeba brát ohled i na ekonomické hledisko. Dnešní společnosti se rády zabývají optimalizací obráběcího procesu, avšak primárním účelem pro ně bude vždy ekonomická výhodnost. Občas mohou být při nákladové kalkulaci zohledňovány i jiná než finanční hlediska, například získání konkurenční výhody, lepší propagaci navazující na modernější technologie, nebo mezikrok ve vývoji nebo výzkumu nových metod. Obecně však platí, že snížení nákladů po optimalizaci by mělo být minimálně tak velké, aby pokrylo náklady na samotnou optimalizaci.

Náklady se dělí na fixní a variabilní. Fixní náklady zahrnují položky, které se musí být uhrazeny, i když žádný výrobek není vyráběn. Tedy jejich snižování není přímo závislé na procesu výroby. Variabilní náklady jsou položky, které jsou závislé na počtu vyrobených kusů. Jednou částí variabilních nákladů jsou i náklady na obráběcí proces. Ty můžeme dále rozdělit na náklady na jednotkovou práci, náklady na nástroj a jeho výměnu, náklady na materiál [35].

2.1 Náklady na jednotkovou práci

Náklady na jednotkovou práci jsou náklady spojené s výrobou jednoho kusu výrobku. Při postupu výroby je práce dělena na strojní, tedy přímo proces obrábění, který vykonává stroj, a na práci vedlejší, která zahrnuje úkony prováděné operátorem, jako například výměna kusu, změření rozměrů atd [2][11][34].

2.1.1 Náklady na jednotkovou strojní práci

Tyto náklady vznikají součinem nákladů na minutu strojní práce a strojního času (2.1) [11].

(2.1)

$$N_{sp} = t_{AS} \cdot N_{sm} \text{ [Kč]}$$

N_{sp}	–	náklady na strojní práci [Kč]
t_{AS}	–	jednotkový strojní čas [min]
N_{sm}	–	náklady na minutu strojní práce [Kč]

Strojní čas je závislý na celkové délce obráběné plochy a velikosti posuvové rychlosti (2.2) [2].

(2.2)

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} \text{ [min]}$$

t_{AS}	–	jednotkový strojní čas [min]
L	–	dráha nástroje ve směru posuvu [mm]
v_f	–	posuvová rychlost [mm/min]

Výpočet strojního času se liší pro každou výrobní operaci a různí se podle způsobu obrábění. Jelikož čelní soustružení je prováděno buď za konstantních otáček nebo konstantní řezné rychlosti, i výpočtové vztahy se pro tyto dva způsoby obrábění liší [10].

Výpočet strojního času při konstantních otáčkách obrobku

Při tomto způsobu obrábění se mění řezná rychlost v závislosti na průměru. Pro počet záběrů i je jednotkový strojní čas vyjádřen vztahem (2.3) [11].

$$t_{AS} = \frac{(l_n + l + l_p) \cdot i}{2 \cdot n \cdot f} = \frac{[(D + 2 \cdot l_n) - (d + 2 \cdot l_p)] \cdot i}{2 \cdot n \cdot f} \text{ [min]} \quad (2.3)$$

t_{AS}	–	jednotkový strojní čas [min]
D	–	maximální průměr [mm]
d	–	minimální průměr [mm]
l_n	–	délka náběhu [mm]
l	–	délka obráběné plochy [mm]
l_p	–	délka přeběhu [mm]
n	–	otáčky obrobku [min ⁻¹]
f	–	posuv na otáčku [mm]
i	–	počet záběrů [–]

Výpočet strojního času při konstantní řezné rychlosti

Dráha nástroje při čelním obrábění při konstantní řezné rychlosti má tvar Archimédovy spirály. Její délku, která bude zároveň délkou dráhy nože. Pro vyjádření použijeme nejprve elementární dráhu na čele obráběného povrchu, kterou následně integrujeme, abychom dostali výsledný vztah pro t_{AS} (2.4) [11][35].

$$dt_{AS} = \frac{d\bar{D}}{2 \cdot f \cdot n} = \frac{\bar{D} \cdot d\bar{D}}{2} \cdot \frac{\pi}{10^3 \cdot v_c \cdot f} = \frac{\pi}{2 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f} \cdot \bar{D} \cdot d\bar{D} \text{ [min]} \quad (2.4)$$

$$t_{AS} = \frac{\pi}{2 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f} \int_d^D \bar{D} \cdot d\bar{D} = \frac{\pi}{2 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f} \cdot \left[\frac{\bar{D}^2}{2} \right]_d^D = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f} \text{ [min]}$$

dt_{AS}	–	element jednotkového strojního času [min]
$d\bar{D}$	–	element obráběného průměru [mm]
D	–	maximální průměr [mm]
d	–	minimální průměr [mm]
f	–	posuv na otáčku [mm]
v_c	–	Řezná rychlosti [m.min ⁻¹]

V praxi se často používá porovnávací vzorec (2.5) obou časů, který je podstatně jednodušší [35].

$$\frac{t_{ASn}}{t_{ASv}} = \frac{\frac{\pi \cdot D \cdot (D - d)}{2 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f}}{\frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f}} = \frac{2 \cdot D \cdot (D - d)}{(D - d) \cdot (D + d)} = \frac{2 \cdot D}{D + d} [-] \quad (2.5)$$

t_{ASn}	–	jednotkový strojní čas při konstantní frekvenci otáček [min]
t_{ASv}	–	jednotkový strojní čas při konstantní řezné rychlosti [min]
D	–	maximální průměr [mm]
d	–	minimální průměr [mm]
f	–	posuv na otáčku [mm]
v_c	–	řezná rychlosti [m.min ⁻¹]

Náklady na minutu strojní práce:

Náklady na minutu strojní práce zahrnují všechny výdaje vztažené k samotnému stroji, vztažené na jednu minutu. Tyto hromadné náklady se můžou různit podle aktuálního zatížení stroje, různé výše mzdy zaměstnance a dalších faktorů. Proto se k odhadu používá průměrná hodnota nazývaná režijní paušál (2.6) [36].

$$N_{sm} = k_c \cdot \left(\frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} [Kč] \quad (2.6)$$

N_{sm}	–	náklady na minutu strojní práce [Kč]
k_c	–	přirážka času směnového [%]
M_o	–	hodinové mzdové náklady na operátora [Kč]
HRP_{SP}	–	hodinový režijní paušál (střediskových nákladů) [Kč]
N_{hs}	–	náklady na provoz stroje za hodinu [Kč]

Náklady na strojní zařízení do nákladů vstupují ve formě odpisů, pro tyto výpočty ve formě hodinových odpisů. K nim je potřeba zahrnout náklady na opravy a údržbu (2.7) [37].

$$N_{hs} = O_s \cdot k_{us} + C_E [Kč] \quad (2.7)$$

N_{hs}	–	náklady na provoz stroje za hodinu [Kč]
O_s	–	odpis stroje za hodinu [Kč]
k_{us}	–	koeficient oprav a údržby stroje [-]
C_E	–	cena spotřebovaných energií za hodinu [Kč]

Odpisy stroje jsou závislé na jeho pořizovací ceně, nákladech na instalaci a předpokládané životnosti, na které závisí doba, do kterých se pořizovací cena rozdělí (2.8) [36].

$$O_s = \frac{C_{si}}{Z_s \cdot CFS_{EFPL} \cdot SM \cdot k_{vs}} [Kč] \quad (2.8)$$

O_s	–	odpis stroje za hodinu [Kč]
C_{si}	–	cena stroje plus náklady na instalaci [Kč]
Z_s	–	životnost stroje [let]
CFS_{EFPL}	–	roční časový fond stroje při jedné směně [hod]
SM	–	směnnosti [-]
k_{vs}	–	koeficient časového využití stroje [-]

Koeficient časového využití je závislý na druhu produkce. Pro velkosériovou výrobu je volen zpravidla 0,8, u obráběcích center malosériové výroby 0,65-0,75 a pro konvenční malosériovou výrobu 0,5 až 0,65 [36].

1.2.2 Náklady na jednotkovou vedlejší práci

Náklady na vedlejší práci zahrnují zejména metrickou kontrolu součástí a výměnu obrobku (2.9) [2][37].

$$N_{AVp} = t_{AVp} \cdot N_{vm} [Kč] \quad (2.9)$$

$$t_{AVp} = t_{A111} + t_{A102} [min]$$

N_{AVp}	–	náklady na jednotkovou vedlejší práci [Kč]
t_{AVp}	–	čas jednotkové vedlejší práce [min]
N_{vm}	–	náklady na minutu vedlejší práce [Kč]
t_{A111}	–	čas jednotkové práce za klidu stroje v operaci upínání a odepínání obrobku, měření, obsluha stroje apod. [min]
t_{A102}	–	čas jednotkové práce nepravidelný – tento čas zahrnuje práce, které nejsou potřeba dělat pravidelně s každým kusem. Může se jednat například o seřízení stroje nebo výměnu opotřeбенého nástroje [min]

Náklady na minutu vedlejší práce bývají jen zanedbatelně nižší než náklady na minutu strojní práce. Při praktických výpočtech je lze považovat za sobě rovné.

2.2 Náklady na nástroj

Náklady na nástroj jsou závislé zejména na četnosti jeho výměny za nový, tedy jsou nepřímo úměrné trvanlivost. Jak již bylo zmíněno, na to mají vliv nejrůznější faktory jako řezné podmínky, geometrie nástroje, prostředí, materiál obrobku a nástroje a další. Náklady můžeme obecně vyjádřit vztahem (2.10) [2].

$$N_{nv} = f(N_T, z_v) = N_T \cdot z_v \text{ [Kč]} \quad (2.10)$$

$$z_v = \frac{t_{AS}}{T} \cdot \tau \text{ [-]} \quad (2.11)$$

$$\tau = \frac{l}{L} \leq 1 \text{ [-]} \quad (2.12)$$

N_{vn}	–	náklady na nástroj [Kč]
N_T	–	náklady na břit nástroje a jeho výměnu na jednu trvanlivost [Kč]
z_v	–	počet výměn břitů (ostření nástroje) na obrobení jednoho kusu [-]
T	–	trvanlivost nástroje [min]
τ	–	poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obrobené plochy [-]
l	–	délka obrobené části [mm]
L	–	dráha nástroje ve směru posuvu [mm]

2.2.1 Trvanlivost nástroje

Trvanlivost nástroje lze určit dle charakteru výroby a cílů firmy na základě dvou kritérií.

Trvanlivost na základě kritéria nejmenších nákladů

Trvanlivost na základě kritéria nejmenších lze vyjádřit z nákladů na minutu strojní práce (2.13), anebo v závislosti na nákladech na hodinu strojní práce (2.14) [36].

$$T_{optN} = \frac{(m-1) \cdot \tau \cdot N_T}{N_{sm}} \text{ [min]} \quad (2.13)$$

$$T_{optN} = \frac{60 \cdot N_T}{N_{hs}} \cdot \tau \cdot (m-1) \text{ [min]} \quad (2.14)$$

m	–	exponent z Taylorova vztahu [-]
T_{optN}	–	optimální trvanlivost na základě kritéria nejmenších nákladů [min]
τ	–	poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy [-]
N_T	–	náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost [Kč]
N_{sm}	–	náklady na minutu strojní práce [Kč]
N_{hs}	–	náklady na provoz stroje za hodinu [Kč]

Trvanlivost na základě maximální výrobnosti

Na základě maximální výrobnosti se trvanlivost vypočítá dle vztahu (2.15) [37].

$$T_{optV} = (m - 1) \cdot \tau \cdot t_{AX} \text{ [min]} \quad (2.15)$$

T_{optV}	–	optimální trvanlivost na základě kritéria maximální výrobnosti [min]
m	–	exponent z Taylorova vztahu [-]
τ	–	poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy [-]
t_{AX}	–	čas jednotkové nepravidelné obsluhy [min]

2.2.2 Náklady na jednu trvanlivost

Pro účely porovnávání nástrojů mohou být směrodatnější náklady na jednu trvanlivost. Výpočet těchto nákladů je rozdílný u nástroje z RO, který lze přebušovat a nástroje s VBD, které sice přebušovat nelze, nicméně má zpravidla více než jeden břit. Pro porovnání se pak nevztahují pouze k jednomu břítu ale také na jednu součást [37].

Náklady na nástroj z RO, který lze přestřovat

Náklady se určují postupně z minutového provozu nástroje, následně převedeno na jeden břit a poté vztaženo na jeden obrobek. Náklady na minutu provozu přestřovaného nástroje na jednu trvanlivost (2.18) jsou kombinací vztahů pro nástroj, který se přestřuje (2.16) a náklady celistvého nástroje na jednu trvanlivost (2.15) [36].

$$N_{1pno} = \frac{C_n + z_0 \cdot N_0}{z_0 \cdot T} \text{ [Kč.min}^{-1}\text{]} \quad (2.16)$$

$$N_{Tn} = \frac{C_n - C_{zn}}{z_0 + 1} + t_{os} \cdot k_c \cdot \left(\frac{M_{os}}{60} + \frac{HRP_{os}}{60} \right) \cdot \frac{z_0}{z_0 + 1} \text{ [Kč]} \quad (2.17)$$

$$N_{TN} = \frac{C_n - C_{zn}}{z_0 + 1} \cdot \frac{t_{as}}{T} \cdot \tau + t_{os} \cdot k_c \cdot \left(\frac{M_{os}}{60} + \frac{HRP_{os}}{60} \right) \cdot \frac{z_0}{z_0 + 1} \text{ [Kč]} \quad (2.18)$$

N_{1pno}	–	náklady na jednu minutu provozu nástroje, lze přestřít [Kč.min ⁻¹]
z_0	–	počet možných přestření nástroje [-]
N_0	–	náklady na závislé na počtu ostření nástroje [Kč]
T	–	trvanlivost nástroje [min]
N_{Tn}	–	náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břítu [Kč]
C_n	–	cena nástroje [Kč]
C_{zn}	–	zbytková cena nástroje [Kč]
z_0	–	počet možných přestření nástroje [-]
t_{os}	–	čas ostření nástroje [min]
k_c	–	přirážka času směnového [%]
M_{os}	–	mzdové náklady na ostříče za hodinu [Kč]
HRP_{os}	–	režijní paušál ostřířny za hodinu [Kč]
N_{TN}	–	náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břítu, při obrobění jedné součásti [Kč]
t_{AS}	–	jednotkový strojní čas [min]
T	–	trvanlivost nástroje [min]
t_{os}	–	čas ostření nástroje [min]

Náklady na nástroj s VBD:

Nástroje s VBD se zpravidla nepřeostřují, mají však většinou více břitových hran, které je možné použít před vyměněním celého nástroje. Náklady na takový nástroj vyjadřuje vztah (2.16). Ve velmi výjimečných případech lze i břitovou destičku přeastřovat. V takovém případě je potřeba vztah ještě dodatečně upravit (2.17) [36].

$$N_{TN} = \frac{C_d \cdot z_d}{z_b \cdot s_b} \cdot \frac{t_{AS}}{T} \cdot \tau + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{z_u} \cdot \frac{t_{AS}}{T} [Kč] \quad (2.19)$$

$$N_{TN} = \frac{C_d \cdot z_d \cdot z_o}{z_b \cdot s_b \cdot (z_o + 1)} \cdot \frac{t_{AS}}{T} \cdot \tau + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{z_u} \cdot \frac{t_{AS}}{T} \cdot \tau \cdot k_c \cdot \left(\frac{M_{os}}{60} + \frac{HRP_{os}}{60} \right) \cdot \frac{z_o}{z_o + 1} [Kč] \quad (2.20)$$

N_{Tn}	—	náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitu [Kč]
N_{TN}	—	náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitu, při obrobení jedné součásti [Kč/ks]
z_d	—	počet břitových destiček na nástroji [-]
z_o	—	počet možných přeastření nástroje [-]
z_b	—	počet břitů na destičce [-]
z_u	—	předpokládaný počet upnutí destiček za dobu životnosti nástroje [-]
s_b	—	součinitel využití břitových destiček [-]
τ	—	poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy [-]
k_{ut}	—	koeficient údržby tělesa nástroje [-]
C_d	—	cena břitové destičky [Kč]
C_{tn}	—	cena tělesa nástroje [Kč]
M_{os}	—	mzdové náklady na ostříče za hodinu [Kč]
HRP_{os}	—	režijní paušál ostřířny za hodinu [Kč]
t_{os}	—	čas ostření nástroje [min]
k_c	—	přirážka času směnového [%]
T	—	trvanlivost nástroje [min]
t_{AS}	—	jednotkový strojní čas [min]

2.3 Náklady na výměnu nástroje

Poslední položkou jsou náklady na samotnou výměnu nástroje. Ty se vypočítají jako součin nákladů na výměnu nástroje za minutu, které se vyjadřují opět paušálně, a času potřebného na jeho výměnu (2.21). Náklady na výměnu nástroje za minutu jsou vyjádřeny vztahem (2.22) [11].

$$N_{TV} = t_{vn} \cdot N_{vnm} [Kč] \quad (2.21)$$

$$N_{vnm} = k_c \cdot \left(\frac{M_s}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{O_s}{60} [Kč] \quad (2.22)$$

N_{TV}	—	náklady na jednu výměnu nástroje [Kč]
t_{vn}	—	čas na výměnu nástroje [min]
N_{vnm}	—	náklady na výměnu nástroje za minutu [Kč]
k_c	—	přirážka času směnového [%]
M_s	—	mzdové náklady na seřizovače za hodinu [Kč]
HRP_{SP}	—	hodinový režijní paušál (střediskových nákladů) [Kč]
O_s	—	odpis stroje za hodinu [Kč]

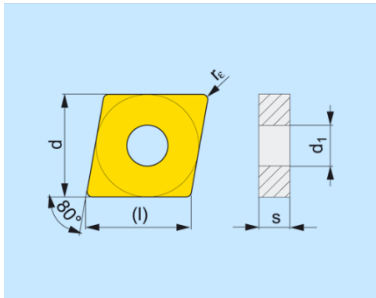
3 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem této práce je analyzovat výsledky testů čelního soustružení diskovité součásti vyráběné z materiálu 51CrV4 za použití různých VBD s různými řeznými podmínkami, a na základě výsledků zhodnotit jejich vhodnost pro výrobní proces a vybrat z hlediska efektivity a ekonomické stránky nejvhodnější kombinaci břitové destičky a řezných podmínek pro sériovou výrobu.

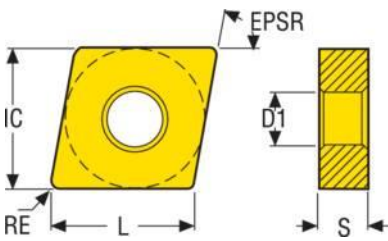
3.1 Řezný nástroj

Jednou ze základních variant optimalizace je volba vhodného nástroje. Na tuto část optimalizace se zaměříme a vyzkoušíme za různých řezných podmínek VBD od dvou různých výrobců. Destičky byly voleny se stejnými rozměry a velmi podobnou povlakovou vrstvou. Jejich rozdíl tedy bude spočívat zejména v utvářeči třísky. Podrobné informace o zvolených destičkách jsou v tabulce 3.1 a 3.2.

Tabulka 3.1 Přehled vlastností VBD od výrobce 1.

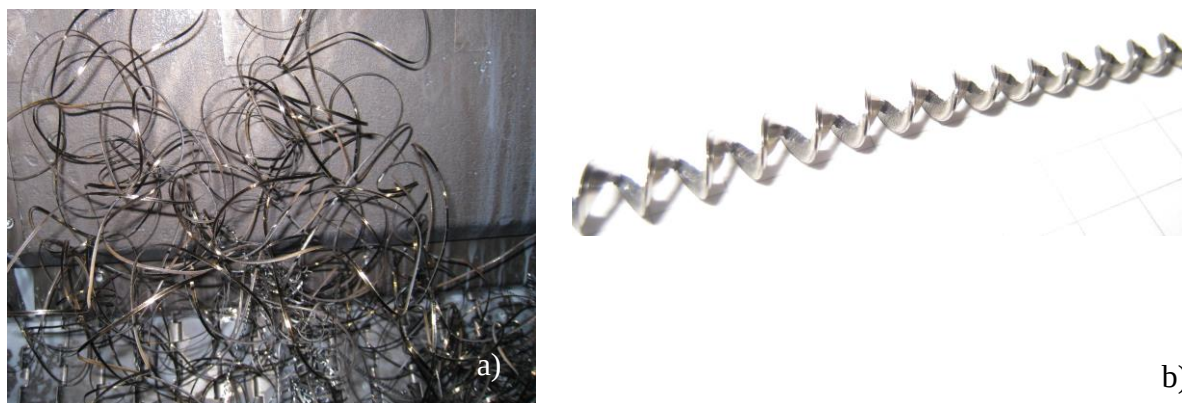
Výrobce 1	Základní geometrie destičky	
Označení destičky: CNMG 120412 E-FM		
Povlak: P1	Rozměr destičky $d=12,7$; $l= 12,9$; $d_1 = 5,16$; $r_e = 0,8$; $s=4,76$	

Tabulka 3.2 Přehled vlastností VBD od výrobce 2.

Výrobce 2	Základní geometrie destičky	
Označení destičky: CNMG 120408		
Povlak: P2	Rozměr destičky: $IC=12,7$; $L= 12,9$; $d_1 = 5,2$; $RE = 0,8$; $EPSR = 80^\circ$; $s=4,76$	

3.2 Geometrie utvařeče třísky

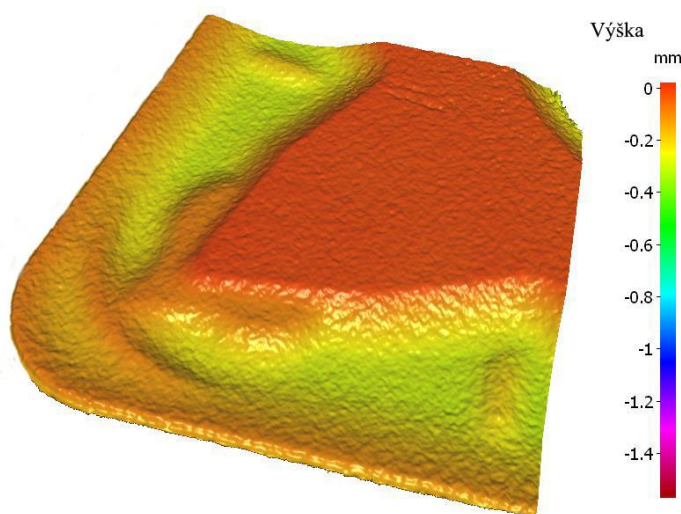
Jak již bylo zmíněno, hlavním rozdílem mezi oběma destičkami je jejich utvařeč třísky. Utvařeč třísky, nebo také lamač třísky, je velmi důležitou částí břitové destičky a má za úkol usnadnit odvod třísky z místa řezu. Pokud je utvařeč nevyhovující, tříska je většinou dlouhá a souvislá, což může mít za následek namotávání na vřeteno stroje, zamezení přístupu chladicí kapaliny, v jistých případech se může i připlést mezi obráběnou plochu a nástroj viz obr. 3.1. Vyhovující utvařeč dělí třísku na menší části, které vypadávají z rezného prostoru do sběrače, kde plynule odcházejí ze stroje. Provedení správného utvařeče je složité zejména z důvodu, že třísku dobře dělí tvarové přechody na čele nástroje, které jsou však zároveň náchylnější k opotřebení. Destičky byly změřeny a hodnoceny softwarem od firmy Alicona.



Obr 3.1 Ukázka třísky. a) při použití nevhodného utvařeče,
b) při použití vhodného utvařeče.

Výrobce 1

Prvním vzorkem je destička CNMG 120412 E-FM, která má vícestupňový utvařeč třísky. Menší utvařeč v přední části a větší a robustnější utvařeč v části blíže ke středu destičky. Mezi oběma utvařeči je vyveden mostek, který má podpůrný účel vůči přednímu utvařeči a také vede třísku k většímu utvařeči bez jejího zapadání do nižších částí čela destičky. Rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším bodem destičky ve směru od špičky ke středu nástroje je 0,35 mm. Celou geometrii vidíme na obr. 3.2.



Obr 3.2 Geometrie čela břitové destičky výrobce 1.

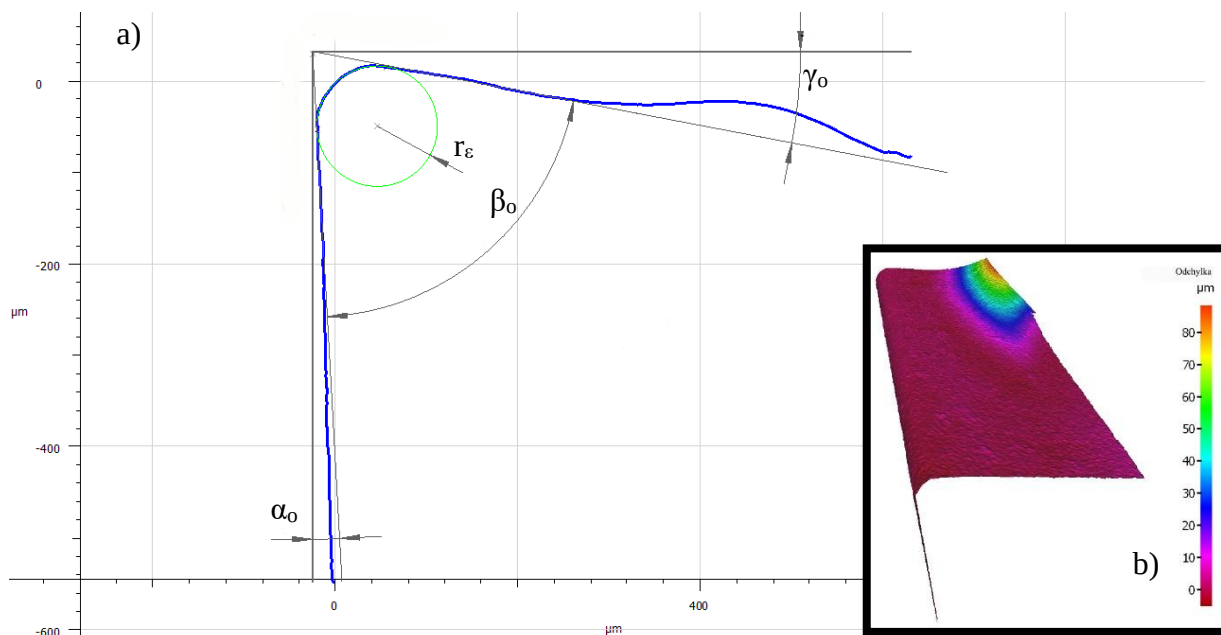
Na obr. 3.3 je vidět průřez destičkou v směru kolmém ke hřbetu nástroje. Naměřené hodnoty byly:

r_ε – poloměr zaoblení špičky = 66,216 μm

β_o – ortogonální úhel břitu = 76,015°

α_o – ortogonální úhel hřbetu = 1,726°

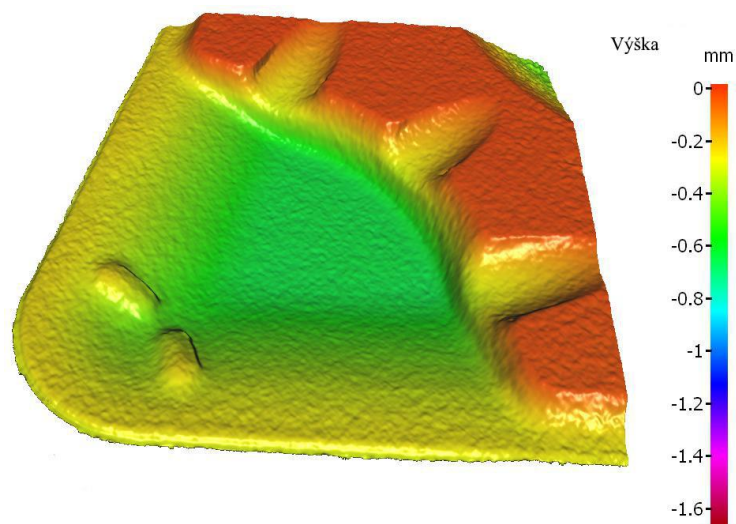
γ_o – úhel čela = 11,663°



Obr 3.3 Průřez VBD 1 ve směru kolmém ke hřbetu nástroje. a) jeden řez, b) 50 řezů.

Výrobce 2

Druhým vzorkem je destička CNMG 120408, která má také vícestupňový utvařec třísky. U této destičky je však první, menší utvařec zcela oddělen od zbývajících částí, a navíc je ještě rozdělen na dva jednotlivé výběžky viz obr. 3.4. Za těmito menšími utvařeci je postupný výrazný pokles výšky čela, a to až k druhé části utvařeče třísky, který má tvar půlkruhové hradby se třemi výběžky. Zde je velký rozdíl oproti vzorku jedna, kdy zde není třísky přiváděna k většímu utvařeci plynule, nicméně se má o něj „rozbít“ při nárazu do téměř kolmé stěny. Výška mezi nejvyšší a nejnižší částí čela je 0,75 mm.



Obr. 3.4 Geometrie čela břitové destičky výrobce 2.

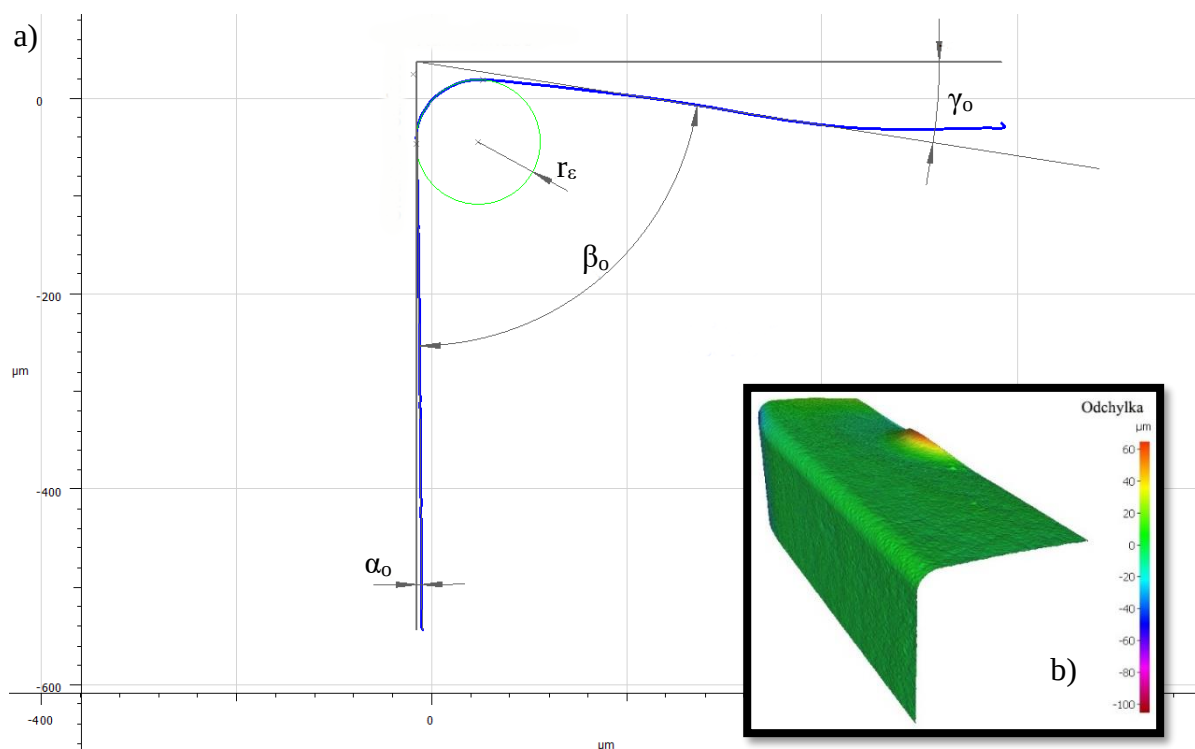
Na obr. 3.5 je vidět průřez destičkou ve směru kolmém ke hřbetu nástroje. Naměřené hodnoty byly:

r_ϵ – poloměr zaoblení špičky = 63,863 μm

β_o – ortogonální úhel břitu = 80,539°

α_o – ortogonální úhel hřbetu = 0,561°

γ_o – úhel čela = 8,9°



Obr 3.5 Průřez VBD 2 ve směru kolmém ke hřbetu nástroje. a) jeden řez, b) 50 řezů.

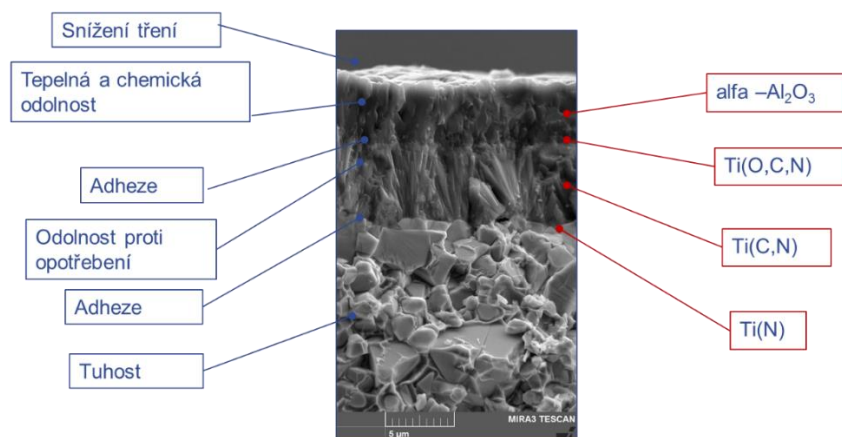
3.3 Povlak nástrojů

Povlakování nástrojů se provádí především za účelem zvýšení trvanlivosti nástroje. Jedná se o tenkou vrstvu nanesenou buď fyzikálním nebo chemickým principem na základní materiál břitové destičky. Tato vrstva je zpravidla oproti základnímu materiálu tvrdší a má vyšší odolnost proti opotřebení. Svým chemickým složením pak omezuje difuzní opotřebení nástroje. Díky těmto vlastnostem slouží povlaky ke snížení tření a spolu s vhodným utvařečem také zabráňují ulpívání třísky na čele nástroje. Při vysokorychlostním obrábění pak oddalují vznik nárůstku.

Povlakování PVD je prováděno za nízkých teplot ve vysokém vakuu. Právě použití nízkých teplot je velkou předností této metody, neboť nebývá dosaženo rekrystalizačních teplot základního materiálu. Povlakovaný kov se přemění na páru a přidáním reakčního plynu dojde k vytváření tenké vrstvy povlaku. Metody PVD se mohou lišit metodou vypařování kovu. Používá se především pro povlakování nástrojů z RO a slinutých karbidů určený pro přerušovaný řez. Výhodou této metody je možnost povlakování ostrých hran a zbytkové tlakové napětí vznikající v povlaku. Nevýhodou oproti CVD jsou vyšší nároky na čistotu povrchu vzorku před povlakováním a nižší dosahované tloušťky vrstev [7][14].

Povlakování CVD je prováděno za teplot okolo 1000 °C, což vyžaduje po samotném povlakování ještě dodatečné procesy kalení a popouštění. Opět zde dochází k vypařování povlakových materiálů, které se poté díky vysokým teplotám postupně mísí a vrství k základnímu materiálu. Při správném zacházení je možné tyto jednotlivé mikrovrstvy korigovat a dosáhnout tak různých segmentů i v rámci samotného povlaku. Výhodou této metody je velmi dobrá přilnavost povlaku k základnímu materiálu, proto se používá často pro povlakování složitějších tvarů. Nevýhodou, kromě tepelného ovlivňování základního materiálu, je zbytkové tahové napětí v povlaku [7][14].

Přestože moderní trendy jdou spíše ve stopách PVD, pro oba testované nástroje byla zvolena metodou chemického napařování – CVD, konkrétněji MT-CVD, což zahrnuje chemické napařování při snížených teplotách – tedy okolo 700 °C. Jejimi výhodami byly zejména možnost vytvoření segmentovaných vrstev povlaku viz obr. 3.6 a vzniklá povrchová struktura, ve které jsou povrchové mikrotrhliny, které uvolňují povrchové pnutí a zpomalují tak šíření prasklin při procesu řezání. Povlak na testovacích destičkách je založen na specifickém uspořádání atomů kyslíku a hliníku. V tomto případě je využito směrového natočení atomů oxidu, který v určitém směru vykazuje křehčí vlastnosti, nicméně ve směru kolmo k řezu se projeví tvrdšími a houževnatějšími vlastnostmi. Jelikož je struktura díky CVD technologii pečlivě řízena, zajišťuje také vysokou kvalitu povrchu povlaku, čímž pomáhá ke snížení tření a odvodu tepla z místa řezu [38].



Obr. 3.6 Vrstvený povlak MT-CVD obou testovaných destiček [39].

3.4 Optimalizace řezných podmínek

Z důvodu zvýšení produktivity jsou moderní tendence tlačeny k dosahování co nejvyšších řezných a posuvových rychlostí, bez snížení životnosti nástroje a zhoršení kvality povrchu. Kromě porovnání dvou různých destiček budou oba dva vzorky porovnávány také pro různé řezné rychlosti, a to konkrétně pro 550 m/min a 650 m/min.

3.5 Optimalizace chlazení

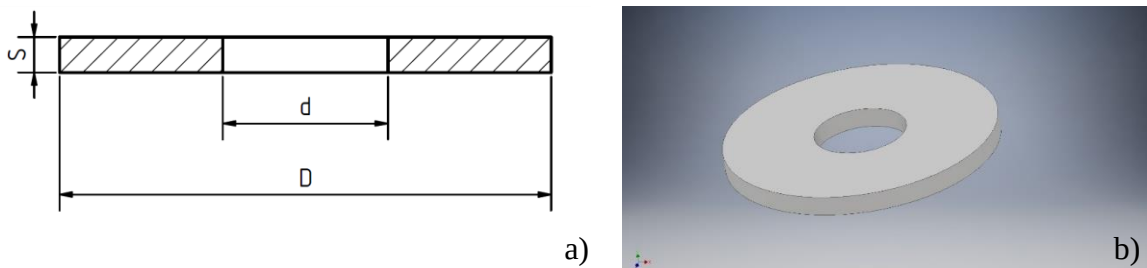
Při procesu obrábění se téměř veškerá mechanická energie přemění na energii tepelnou. Opotřebením materiálu destiček a kvalita povrchu obrobku je silně závislá na množství tohoto tepla přecházejícího do destičky a obrobku. Aby bylo množství tohoto tepla sníženo na minimum, používají se efektivní způsoby chlazení. Prvním základním požadavkem je použití vysokotlakého chlazení, neboť klasické nízkotlaké při vyšších řezných rychlostech vytváří kolem místa řezu bariéru odpařené tekutiny, která brání nové kapalině dostat se do místa řezu. Pro vysokotlaké chlazení je charakteristický tenký proud kapaliny, což klade velký důraz na správnost přívodu kapaliny k místu řezu. Nejlepším způsobem je tzv. vnitřní chlazení, tedy způsob, kdy kapalina je přiváděna skrz držák nástroje přímo pod břit. Tento způsob je však poměrně nákladný a při dodržení základních pravidel se dá i externím přívodem kapaliny dosáhnout dostatečně dobrého chladicího efektu. Proud kapaliny by měl směřovat vždy přímo na ostří nástroje a měl by svírat s plochou destičky úhel 10° .

Množství a tlak chladicí kapaliny jsou velmi důležité jak pro obráběcí proces, tak pro ekonomickou kalkulaci a spotřebu. Obě hodnoty jsou přímo závislé na volbě obráběcího centra a bývají doporučovány od výrobce. Obecně se dají stanovit hodnoty tlaku pro podobné vysokotlaké chlazení kolem sedmdesát barů a průtok chladicí kapaliny okolo 2,3 litrů/kw·min.

Pro kvalitu výsledného procesu je kromě tlaku kapaliny důležitá i čistota chladicí kapaliny a její koncentrace. Jelikož se kapalina používá opakovaně, tyto faktory jsou hodně závislé na filtračním systému. Ten by měl zachycovat nečistoty o průměru alespoň pět mikronů a zároveň i udržovat koncentraci okolo 10 % u vodních i olejových řezných kapalin.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY

Všechny testy vzorků probíhaly v dílnách na VUT FSI v Brně. Obráběcím strojem byl víceúčelový CNC soustruh MAG Hessapp. Zkoušky byly prováděny s polotvary diskového tvaru viz obr. 4.1 s rozměry $d_1=163$ mm, $d_2=485$ mm a šířkou S , která nebyla pro test podstatná, neboť na disku probíhalo pouze čelní obrábění. Materiál polotovaru byla pružinová ocel 51CrV4.



Obr. 4.1 Zkušební vzorek. a) náčrtek, b) 3D model.

Princip zkoušky:

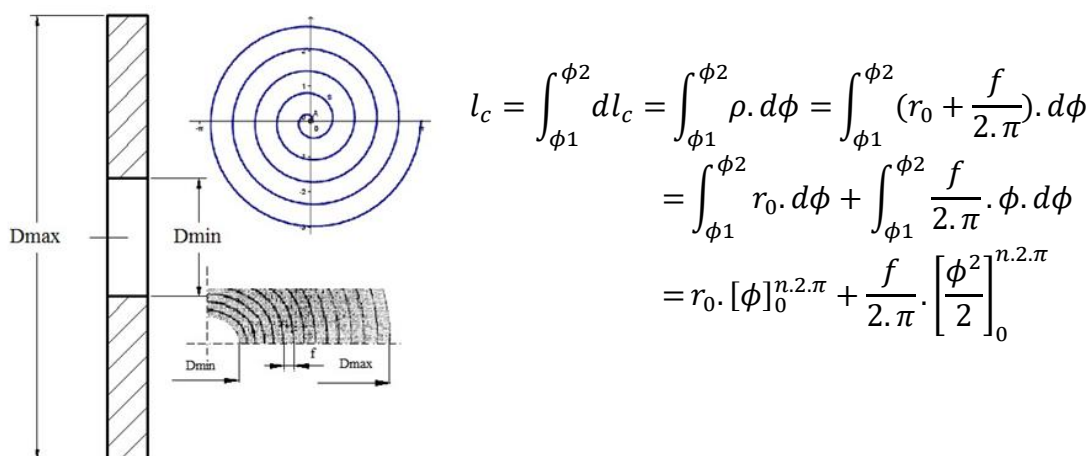
Ke zkoušce bylo použito více kusů břitových destičce, přičemž test byl vždy zastaven po jedné řezné dráze. To umožnilo opakovatelnost dosažených výsledků a zachovalo destičky v náležitém stavu pro pozdější analýzu.

Podmínky obrábění konstantní pro všechny pokusy byly:

- Posuv na otáčku: $f = 0,35$ mm
- Hloubka záběru: $a_p = 1,5$ mm
- Chlazení: vnější, minimálně 80 barů, 23 l/min, 3 trysky o průměru 1 mm, emulze 6 %
- Disk obráběn z průměru 485 na 163 mm
- Nástroj byl dotahován momentovým klíčem dle návodu výrobce na předepsaný moment.
- Pro všechny testy byl použit stejný držák nástroje
- Po upevnění nástroje byly korekce ověřeny mikrometrem (na základě tloušťky stěny)

Délka jedné řezné dráhy

Délka řezné dráhy byla odvozena na základě vztahu délky Archimédovy spirály viz obr.4.2.



4.2 matematické odvození vztahu pro délku Archimédovy spirály [7].

Délka řezné dráhy je pak po úpravě spočtena dle vzorce (4.1).

$$l = \frac{\pi \cdot D^2 - d^2}{4 \cdot f \cdot 1000} [m] \quad (4.1)$$

$$l = \frac{\pi \cdot 485^2 - 163^2}{4 \cdot 0,35 \cdot 1000} = 468,22 \text{ m}$$

l	–	délka obráběné plochy [mm]
D	–	maximální průměr [mm]
d	–	minimální průměr [mm]
f	–	posuv na otáčku [mm]

Objem odebraného materiálu na jednu dráhu se spočítá dle (4.2).

$$V = a_p \cdot s \cdot l [dm^3] \quad (4.2)$$

$$V = 1,5 \cdot 4,76 \cdot 468,22 \cdot 10^{-3} = 3,343 \text{ dm}^3$$

V	–	délka obráběné plochy [mm]
a _p	–	hloubka záběru [mm]
s	–	šířka VBD [mm]
l	–	délka obráběné plochy [mm]

Výsledný vzhled břitové destičky byl vyhodnocen na elektronovém mikroskopu TESCAN MIRA3, a to pomocí metody SEM a BSE.

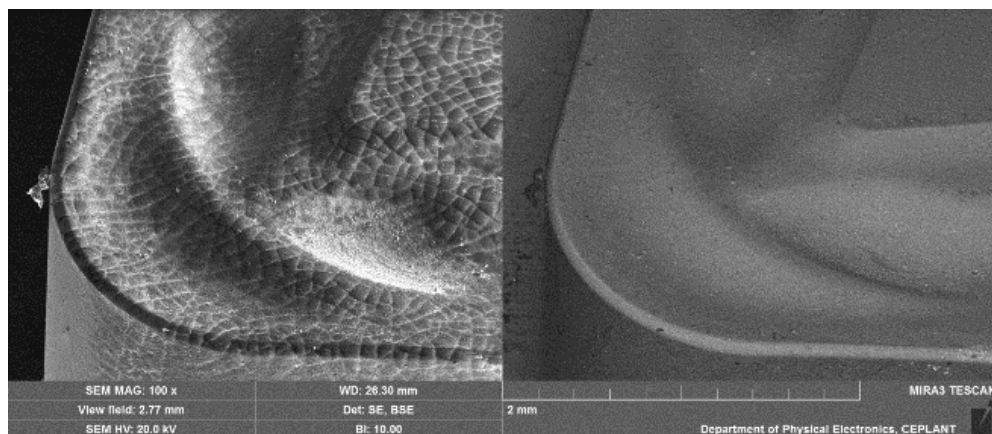
Označení experimentů:

- A – VBD Výrobce 1 – v_c = 550 m/min
- B – VBD Výrobce 2 – v_c = 550 m/min
- C – VBD Výrobce 1 – v_c = 650 m/min
- D – VBD Výrobce 2 – v_c = 650 m/min

Označení vzorků:

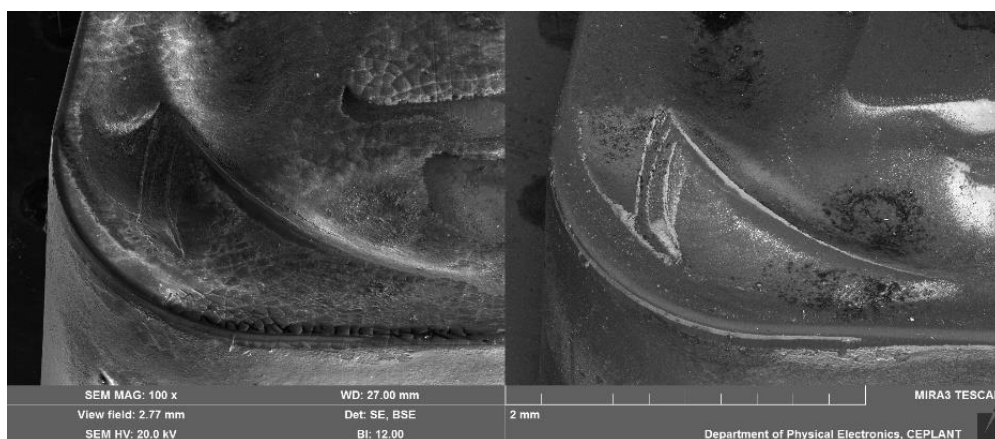
- A0 – nový řezný nástroj
- A1 – stav po jednom řezném procesu

4.1 Experiment A



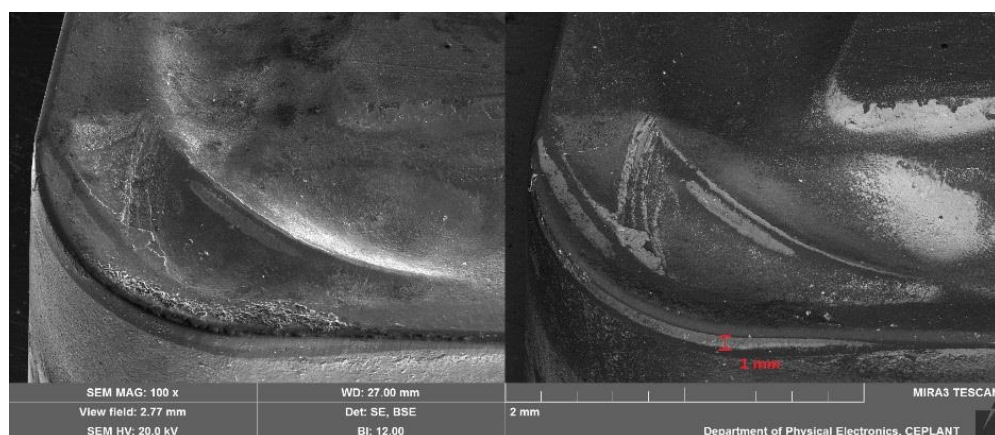
Obr. 4.3 – Vzorek A0 – Nová destička výrobce 1

Je možné vidět struktura povrchu s mikrotrhlinami, která je způsobena CVD metodou povlakování a zlepšuje tak odolnost proti vyštípnutí velkých částí povlaku.



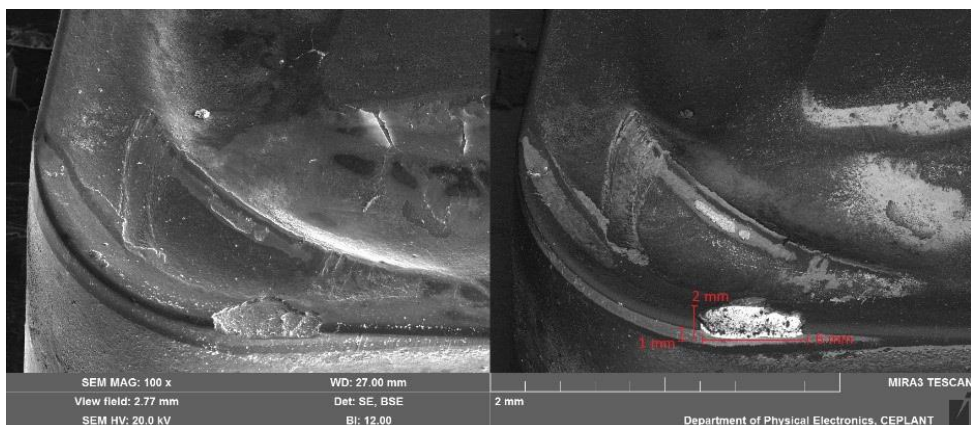
Obr. 4.4 – Vzorek A1

Destička je zobrazena po obrobení jedné plné dráhy. Jsou vidět mírné náznaky začínající abraze na hřbetě nástroje, nicméně žádné zásadní opotřebení zatím není pozorováno.



Obr. 4.5 – Vzorek A2

Na destičce je vidět abrazivní opotřebení na hřbetě ve formě 1 mm vysoké fazety. Také je vidět lehké narušení struktury povlaku těsně za hranou ostří.



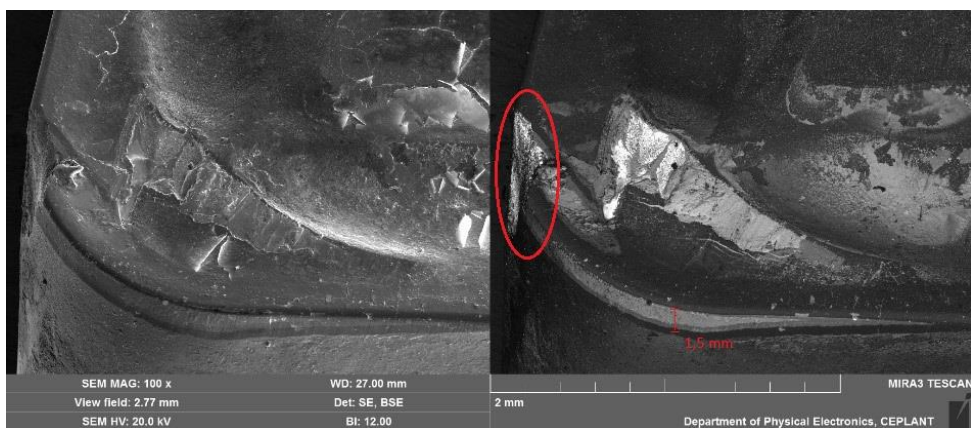
Obr. 4.6 – Vzorek A3

Postup abrazivního opotřebení dál po hřbetě nástroje. Vydrolení části povlaku 2 x 6 mm.



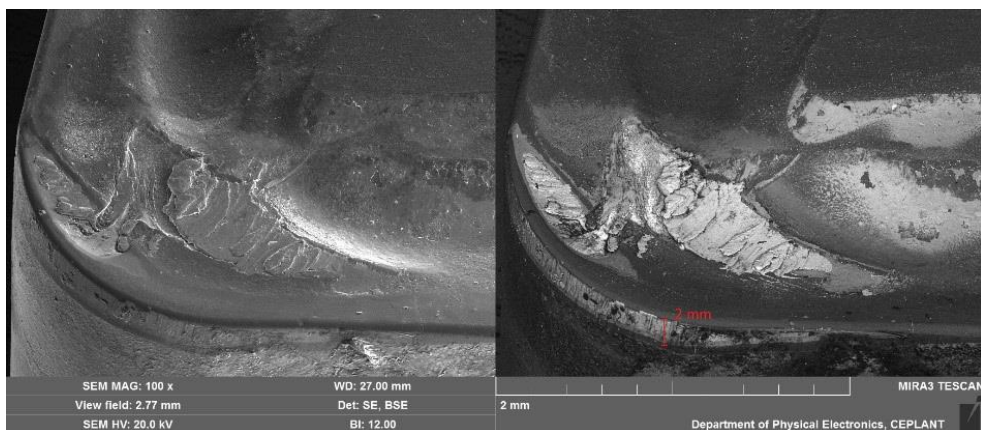
Obr. 4.7 – Vzorek A4

Abrazivní opotřebopotřebení o velikosti 1 mm na hřbetě nástroje. Na čele nástroje je možné pozorovat tvoření žlábků a postupné opotřebení první části utvařeče třísky. Utvařeč však ještě je schopen dostatečně plnit svoji funkci. Postupné vystoupení prasklin v povlaku na čele destičky.



Obr. 4.8 – Vzorek A5

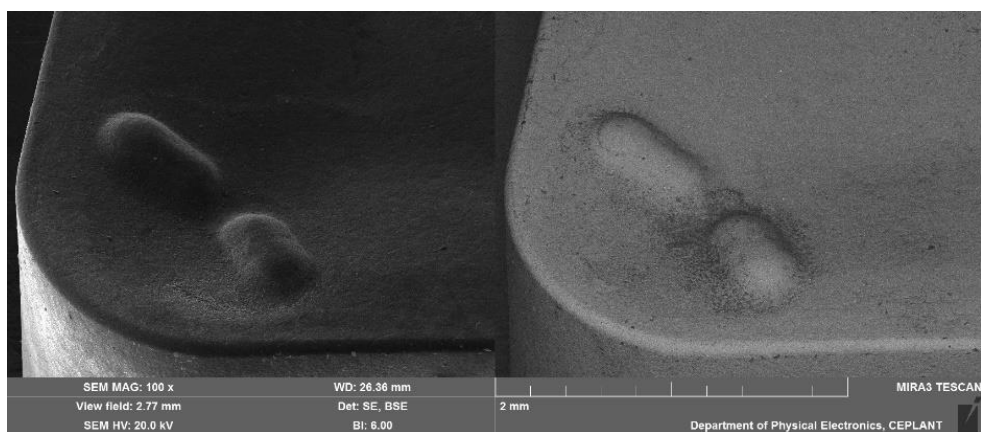
Abrazivní opotřebení formou fazety na čele nástroje o velikosti 1,5 mm. Je vidět výrazné opotřebení první části utvařeče vedoucí k odlupování povlaku a postupné změně geometrie. Podpůrný můstek od druhé části utvařeče však zabraňuje úplnému zhroucení. Utvořila se rýha na vedlejším hřbetě nástroje.



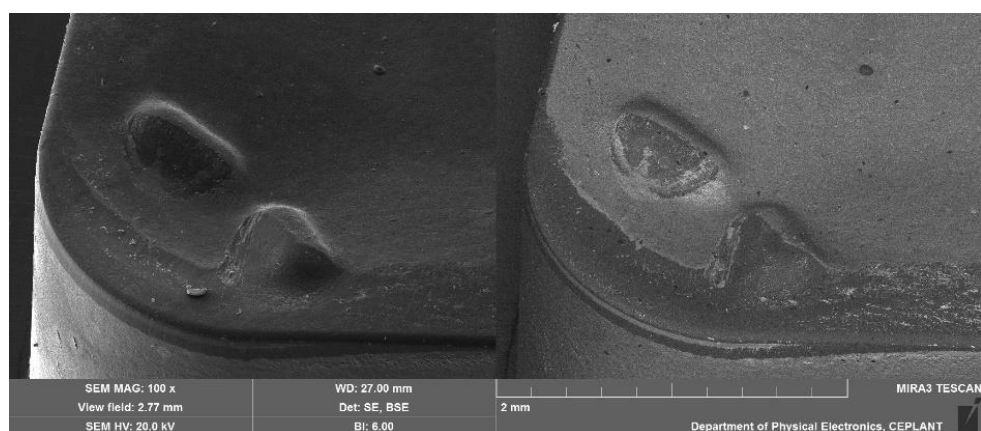
Obr. 4.9 – Vzorek A6

Postupující abrazivní poškození na hřbetě nástroje formou fazety o velikosti 2 mm. Tvorba žlábků na čele nástroje, kde je vidět ztráta povlaku stejně jako na utvařeci třísky. Utvařec již částečně mení geometrii, avšak stále je schopen podpořit lámání třísky díky podpůrnému můstku.

4.2 Experiment B

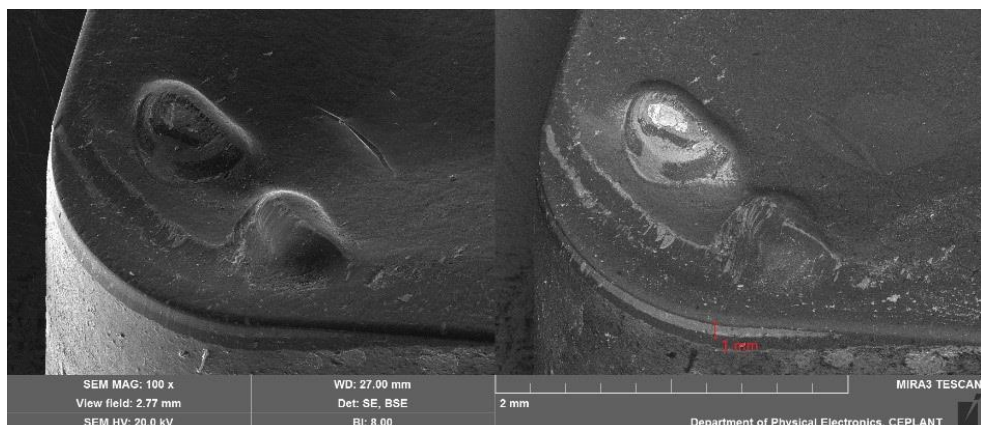


Obr. 4.10 – Vzorek B0 – Nová destička výrobce 2



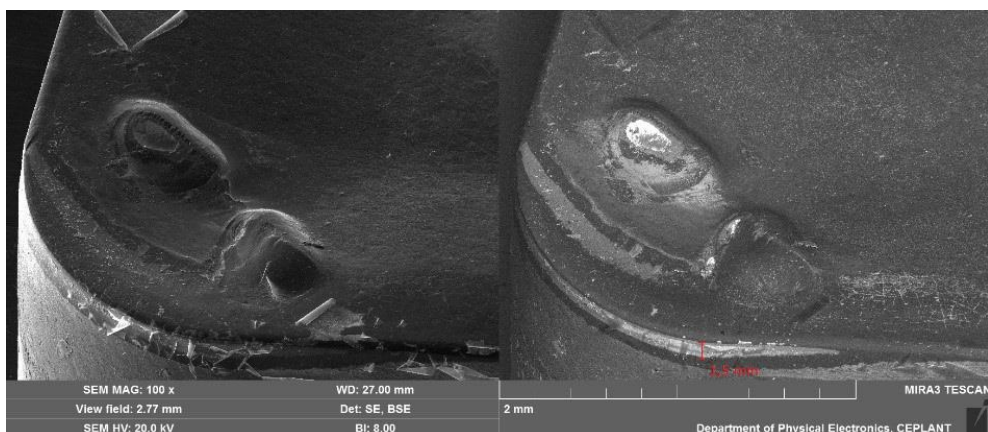
Obr. 4.11 – Vzorek B1

Žádné výraznější známky poškození



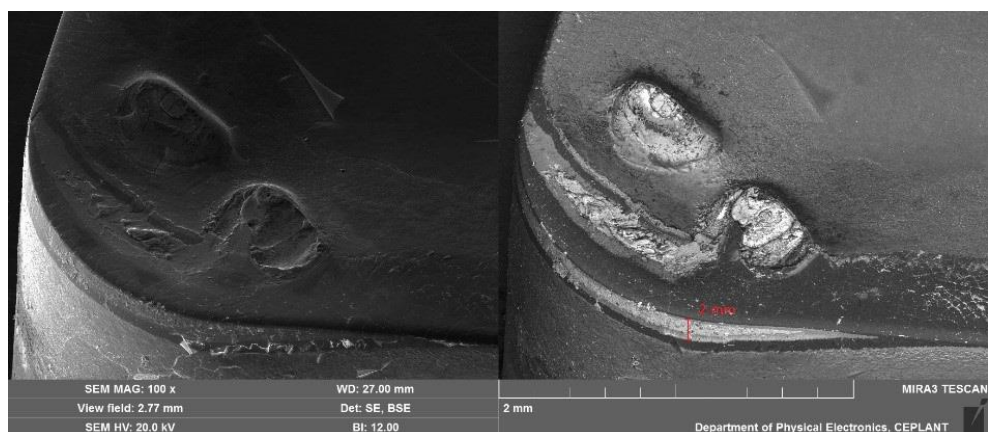
Obr. 4.12 – Vzorek B2

Abrazivní opotřebení na hřbetě nástroje ve formě fazety o velikosti 1 mm. Odloupnutí povlaku a částečná ztráta jednoho z dvou předních utvařečů třísky.



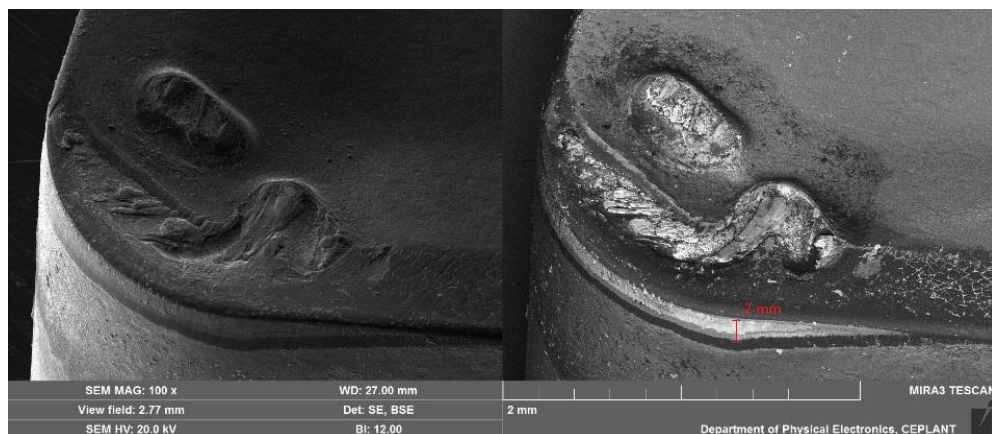
Obr. 4.13 – Vzorek B3

Abrazivní opotřebení na hřbetě nástroje ve formě fazety o velikosti 1,5 mm. Tvorba hřebenových trhlinek na ostří nástroje. Odlupování povlaku na levém a začínající odlupování i na pravém utvařeči třísky. Začínající tvorba žlábků na čele.



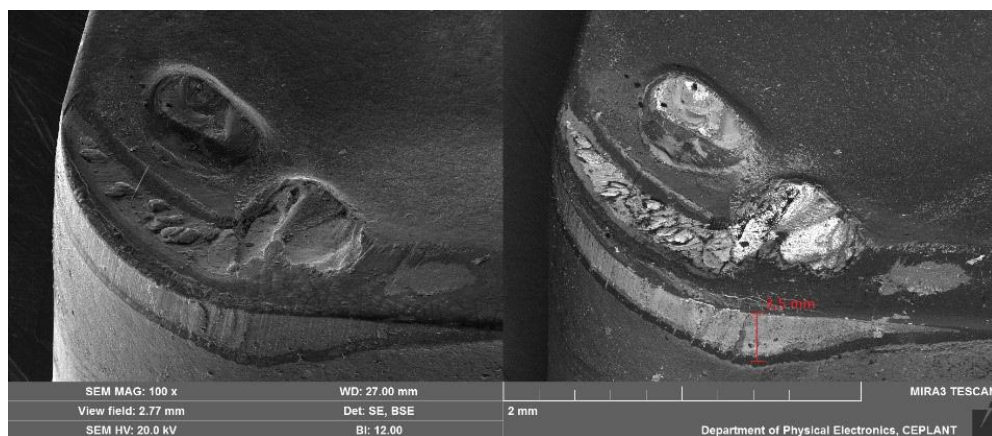
Obr. 4.14 – Vzorek B4

Výrazný postup abraze ve formě žlábků na čele nástroje. Ztráta podstatné části obou předních utvařečů třísky. Poškození formou fazety na hřbetě o velikosti 2 mm.



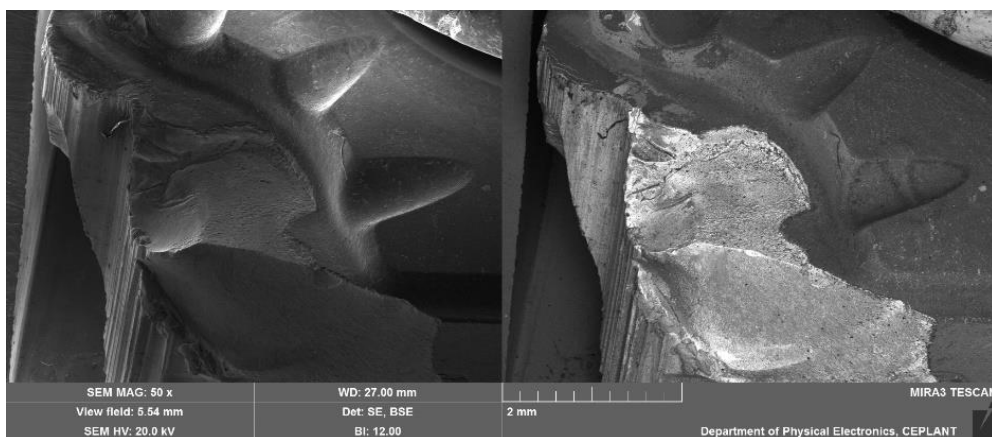
Obr. 4.15 – Vzorek B5

Ztráta obou utvářečů třísky, postup abrazivního opotřebení, zejména prohloubení žlábků na čele nástroje ale i fazeta velikosti 2 mm na hřbetě nástroje. Odlupování povlaku na čele nástroje.



Obr. 4.16 – Vzorek B6

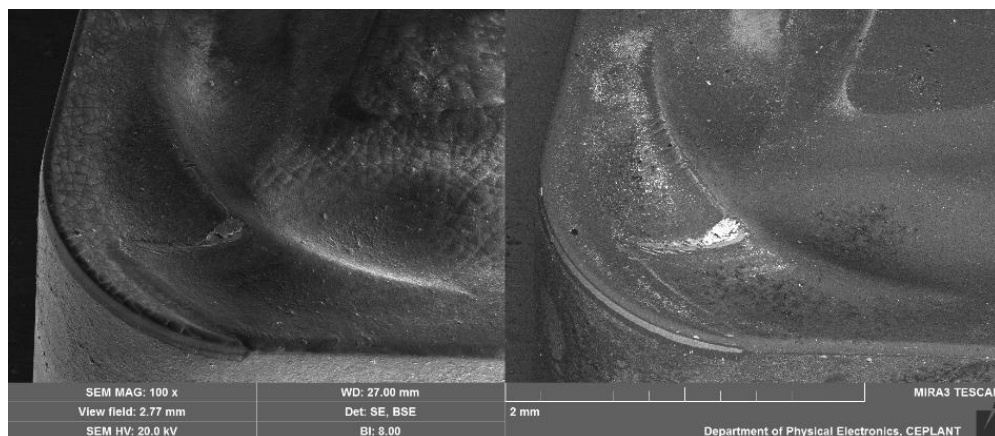
Ztráta obou utvářečů třísky. Výrazný postup abrazivního poškození na hřbetě nástroje o velikosti 2,5 mm. Postupné utváření žlábků na čele nástroje. Odloupení podstatné části povlaku z čela nástroje.



Obr. 4. 17 – Vzorek B7

Dochází ke štěpnému odlomení přední části destičky. Destička je naprosto zničená.

4.3 Experiment C



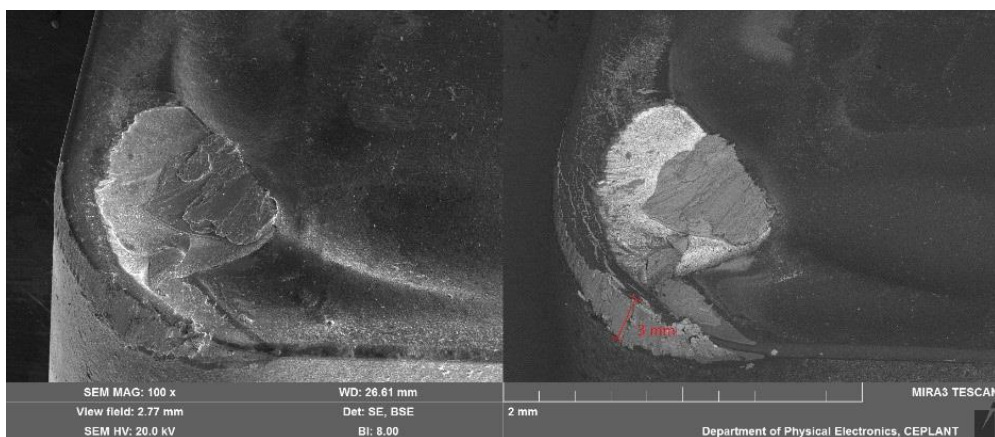
Obr. 4.18 – Vzorek C1

Lehké vyštípnutí malé části povlaku na utvařeči.



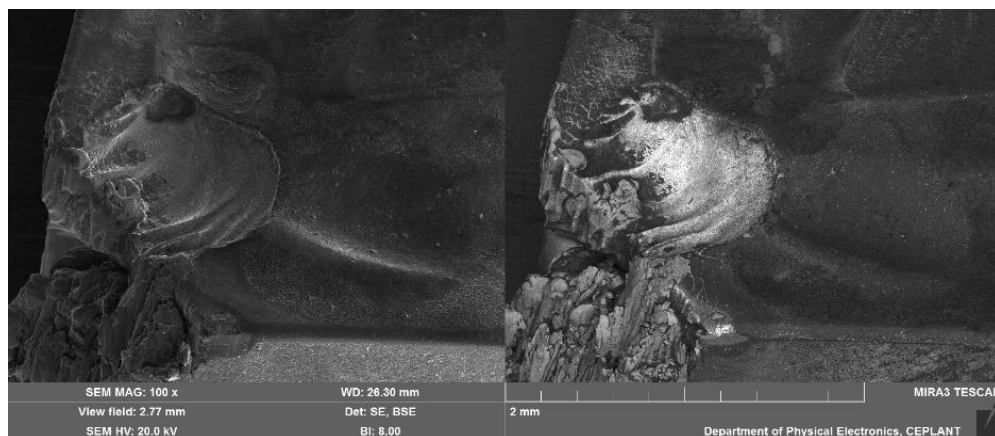
Obr. 4.19 – Vzorek C2

Počátek tvorby žlábků na čele nástroje, odloupenutí povlaku cca 4 mm² na utvařeči třísky. Fazeta na hřbetě nástroje velikosti 1 mm.



Obr. 4.20 – Vzorek C3

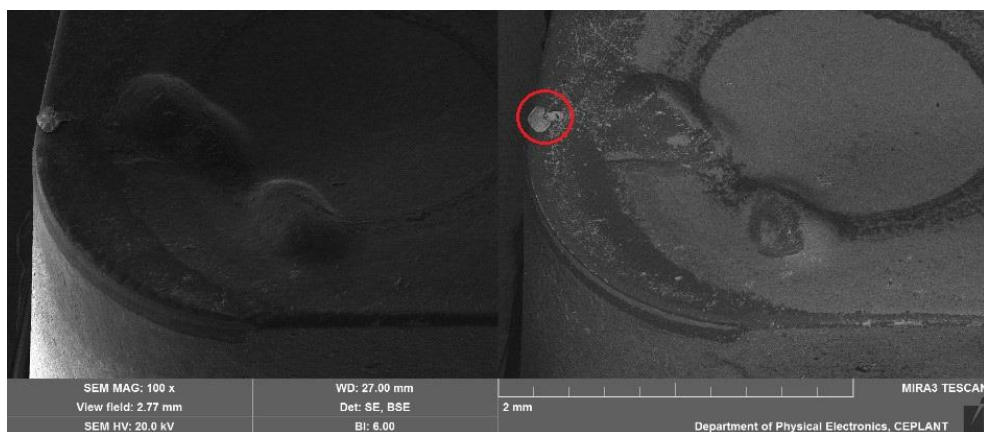
Výrazný postup žlábků na čele nástroje, výrazné abrazivní poškození zejména na špičce nástroje o velikosti 3 mm. Ztráta geometrie destičky.



Obr. 4.21 – Vzorek C4

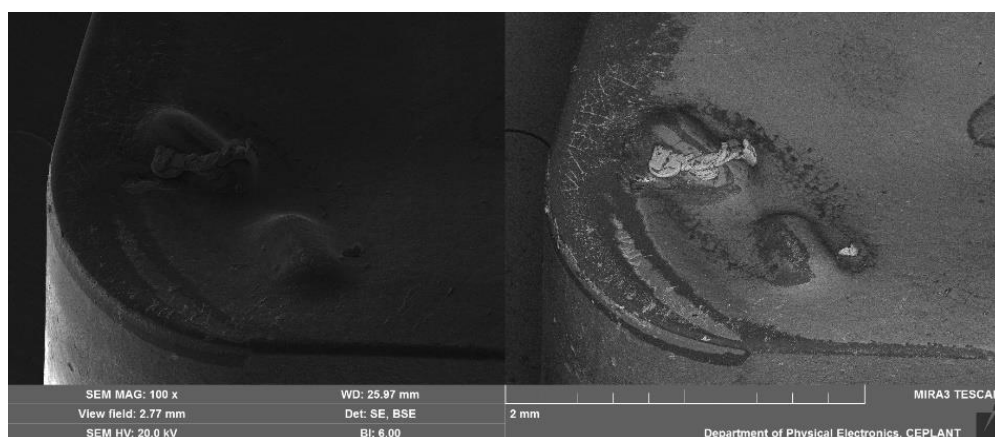
Lom špičky nástroje, destička je zničená.

4.4 Experiment D



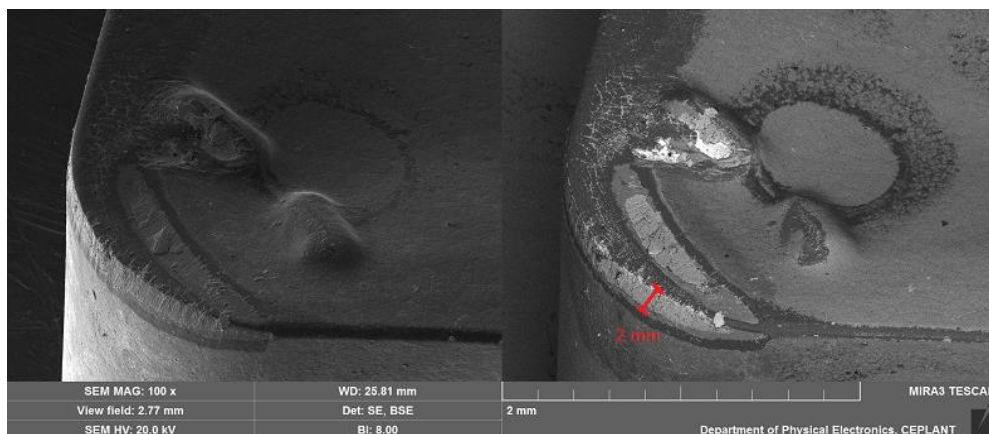
Obr. 4.22 – Vzorek D1

Známky tvorby rýhy na vedlejším hřbetě nástroje.



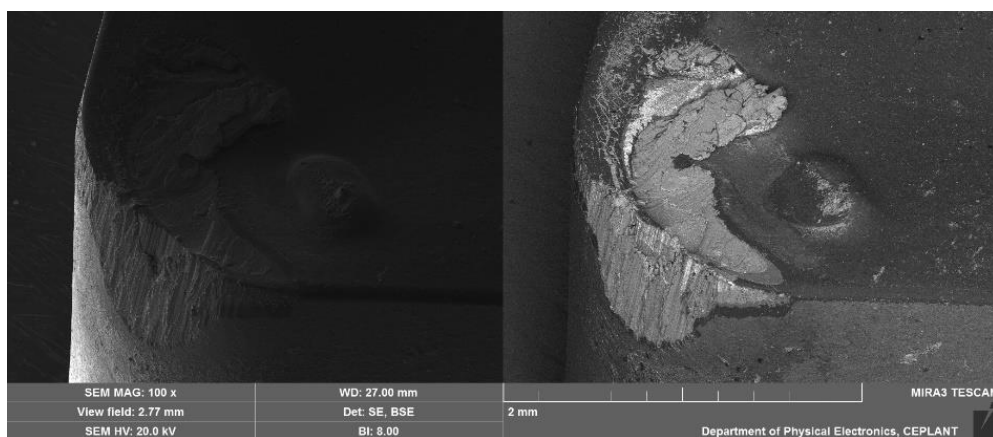
Obr. 4.23 – Vzorek D2

Ztráta části levého utvářeče třísky. Mírné abrazivní poškození na špičce nástroje.



Obr. 4.24 – Vzorek D3

Odlupování povlaku na levém utvařeči třísky, abrazivní poškození jak ve formě žlábků na čele, tak 2 mm na špičce nástroje. Hřebenové trhlínky na vedlejším hřbetě nástroje.



Obr. 4.25 – Vzorek D4

Výrazní abrazivní poškození na čele nástroje, ztráta utvařeče třísky, štěpný lom špičky, výrazná ztráta geometrie nástroje.

4.5 Shrnutí výsledků pozorování

Z testů obou vzorků je patrné, že trvanlivost obou nástrojů je velmi podobná, a to při obou řezných rychlostech. Toto zjištění dopadlo dle očekávání, neboť destičky jsou přibližně stejných rozměrů a stejných materiálů. Co se však velmi projevilo je vhodnost jednotlivých utvařečů třísky. Vzorek od výrobce 1 odolával vlivům odcházející třísky velmi dobře a podpurný můstek plnil svou úlohu po celou dobu testů. Konec trvanlivosti při rychlosti 550 m/min přišel až po abrazivním poškození špičky do takové míry, že byla jakost povrchu již shledána nedostatečnou. I v této chvíli však byl nástroj celistvý, a utvařeč i přes změnu geometrie stále plnil funkci lomu a odvodu třísky uspokojivě.

I přes podobnou trvanlivost byla situace s utvařečem u vzorku od výrobce 2 velmi odlišná. Utvařeč z prvu svoji funkci plnil dobře, nicméně často již při brzkých fázích pokusů docházelo k odštěpu výrazné části, nebo celého jednoho předního utvařeče třísky. Po více obrobených kusech již z pravidla došlo k odštěpu obou předních utvařečů, což přispělo k tomu, že k ukončení životnosti došlo štěpným lomem.

Při pokusech s řeznou rychlostí 650 m/min docházelo k poměrně rychlému opotřebení a životnost obou vzorků končila lomem špičky. Zda je tato varianta vhodná pro sériovou výrobu vyplyne až z nákladové analýzy. Veškeré pozorované výsledky jsou shrnuty v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1 Shrnutí výsledků pozorování

Označení výsledků	V _c [m/min]	t [min]	Poškození
A0	550	0	Nová destička.
A1	550	0,85	Bez významných známek poškození.
A2	550	1,7	Mírné abrazivní poškození na hřbetě – 1 mm.
A3	550	2,55	Odštěpování povlaku, abraze na hřbetě 1 mm.
A4	550	3,4	Abrazivní poškození na hřbetě – 1 mm, tvořící se žlábek na čele, Vystoupenutí prasklin povlaku.
A5	550	4,25	Abrazivní poškození na hřbetě – 1,5 mm, žlábek na čele, zbroušení povlaku z utvařeče, rýha na vedlejším hřbetu nástroje.
A6	550	5,1	Abrazivní poškození na hřbetě – 2 mm, žlábek na čele, zbroušení povlaku z utvařeče.
B0	550	0	Nová destička.
B1	550	0,85	Bez výrazných známek poškození.
B2	550	1,7	Mírné abrazivní poškození na hřbetě – 1 mm, částečné odlomení utvařeče.
B3	550	2,55	Abrazivní poškození na hřbetě – 1,5 mm, začínající tvorba žlábků na čele, zbroušení povlaku z části obou utvařečů, hřebenové trhlinky na ostří.

Označení výsledků	V _c [m/min]	t [min]	Poškození
B4	550	3,4	Abrazivní poškození na hřbetě – 2 mm, progresivní žlábek na čele, ztráta části obou utvařečů.
B5	550	4,25	Abrazivní poškození na hřbetě – 2 mm, progresivní žlábek na čele, ztráta obou utvařečů.
B6	550	5,1	Abrazivní poškození na hřbetě – 2,5 mm, progresivní žlábek na čele, ztráta obou utvařečů.
B7	550	5,95	Štěpný lom bříty.
C0	650	0	Nová destička.
C1	650	0,72	Odštípnutí malé části povlaku z utvařeče.
C2	650	1,43	Počátek žlávků na čele, abrazivní poškození na utvařeči i na špičce – 1 mm.
C3	650	2,15	Silné abrazivní opotřebení na čele i špičce destičky.
C4	650	2,87	Lom špičky nástroje.
D0	650		Nová destička.
D1	650	0,72	Tvorba rýhy a odloupení povlaku na vedlejším hřbetě.
D2	650	1,43	Abrazivní poškození na čele i hřbetu, ztráta části levého utvařeče.
D3	650	2,15	Silné abrazivní poškození na čele i hřbetu – 2 mm, ztráta části levého utvařeče.
D4	650	2,87	Lom špičky.

5 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Pro ekonomické porovnání experimentů A-D jsou vypočteny náklady na jeden kus výrobku, složené z nákladů na strojní práci, nákladů na nástroj, a nákladů na výměnu nástroje. Do výpočtů bychom zahrnuli i náklady na vedlejší práci, ty však budou v případě všech experimentů totožné, proto budou k výsledku připočteny pouze formou konstanty. Jelikož nejsou jasné hodinové náklady na stroj, analýza bude hodnotit různé varianty těchto nákladů.

Zadání ekonomických faktorů

CFS_{EFPL} – roční časový fond stroje při jedné směně = 2 000 hod

SM – směnnost = 2 směny

k_{VS} – koeficient časového využití stroje = 0,75

K_{US} – koeficient oprav a údržby stroje = 1,2

C_E – cena spotřebovaných energií za hodinu = 150 Kč

K_C – přírážka času směnového = 10 %

M_0 – hodinové mzdové náklady na operátora = 210 Kč

HRP_{SP} – hodinový režijní paušál (střediskových nákladů) = 300 Kč

z_d – počet břitových destiček na nástroji = 1 ks

z_b – počet břitů na destičce = 2 břity

C_d – cena břitové destičky = 285 Kč; 378 Kč

S_b – součinitel využití destičky = 0,9

T – trvanlivost nástroje = dle experimentu

l – délka obrobené části = 322 mm

L – dráha nástroje ve směru posuvu = 468,22 mm

t_{as} – jednotkový strojní čas = dle experimentu

t_{vn} – čas na výměnu nástroje = 2 min

N_{hs} – Hodinové náklady na provoz stroje = 1000, 2000, 3000 Kč

z_u – předpokládaný počet upnutí destiček za dobu životnosti nástroje = 500 upnutí

k_{ut} – koeficient údržby tělesa nástroje = 0,025

C_{tn} – cena tělesa nástroje = 2000 Kč

5.1 Experiment A

Náklady na minutu strojní práce při $N_{hs1} = 1000$

Náklady na minutu strojní práce (2.6).

$$N_{smA1} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{1000}{60} = 26,01 \text{ Kč}$$

Náklady na strojní práci na jeden obrobek dle vztahu (5.1).

$$\begin{aligned} N_{so} &= N_{sm} \cdot t_{AS} \text{ [Kč]} \\ N_{soA1} &= 26,01 \cdot 0,85 = 22,11 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (5.1)$$

N_{so}	–	náklady na strojní práci na jeden obrobek [Kč]
N_{sm}	–	náklady na minutu strojní práce [Kč]
t_{AS}	–	jednotkový strojní čas [min]

Náklady na minutu strojní práce při $N_{hs2} = 2000$

Náklady na minutu strojní práce (2.6).

$$N_{smA2} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{2000}{60} = 42,68 \text{ Kč}$$

Náklady na strojní práci na jeden obrobek (5.1).

$$N_{soA2} = 42,68 \cdot 0,85 = 36,28 \text{ Kč}$$

Náklady na minutu strojní práce při $N_{hs3} = 3000$

Náklady na minutu strojní práce (2.6).

$$N_{smA3} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{3000}{60} = 59,35 \text{ Kč}$$

Náklady na strojní práci na jeden obrobek (5.1).

$$N_{soA3} = 59,35 \cdot 0,85 = 50,45 \text{ Kč}$$

Náklady na vedlejší práci:

Jelikož náklady na vedlejší práci jsou stejné pro všechny experimenty, jsou brány jako konstantní.

$$N_{AVp} = \text{konst.}$$

Náklady na nástroj

Poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obrobené plochy (2.10).

$$\tau = \frac{322}{468,22} = 0,6877$$

Náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitů, při obrobení jedné součásti (2.18).

$$N_{TNA} = \frac{285 \cdot 1}{2 \cdot 0,9} \cdot \frac{0,85}{5,1} \cdot 0,6877 + (1 + 0,025) \cdot \frac{2000}{500} \cdot \frac{0,85}{5,1} = 18,83 \text{ Kč}$$

Počet výměn břitů vztažený na obrobení jednoho kusu (2.11).

$$z_{vA} = \frac{0,85}{5,1} \cdot 0,6877 = 0,1146$$

Náklady na nástroj na jeden obrobek (2.10).

$$N_{nvA} = f(N_T, z_v) = 18,83 \cdot 0,1146 = 2,16 \text{ Kč}$$

Náklady na výměnu nástroje

Náklady na výměnu nástroje za minutu (2.22).

$$N_{vnmA} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{150}{60} = 11,85 \text{ Kč}$$

Náklady na jednu výměnu nástroje (2.21).

$$N_{TV A} = 2 \cdot 11,85 = 23,7 \text{ Kč}$$

Náklady na výměnu nástroje vztažené na jeden obrobek dle vztahu (5.2).

$$N_{Tvm} = N_{Tv} \cdot z_v \text{ [kč]} \quad (5.2)$$

$$N_{TvmA} = 23,7 \cdot 0,1146 = 2,71 \text{ Kč}$$

N_{Tvm}	–	náklady na výměnu nástroje vztažené na jeden obrobek [Kč]
N_{Tv}	–	náklady na jednu výměnu nástroje [Kč]
z_v	–	počet výměn břitů (ostření nástroje), na obrobení jednoho kusu [-]

Celkové náklady

Celkové náklady na jeden obrobek jsou náklady na strojní práci + náklady na vedlejší práci + náklady na nástroj + náklady na výměnu nástroje vše vztažené na jeden výrobek (5.3).

$$N_C = N_{so} + N_{AVp} + N_{nv} + N_{Tvm} \text{ [Kč]} \quad (5.3)$$

$$N_{CA1} = 22,11 + N_{AVp} + 2,16 + 2,71 = N_{AVp} + 26,98 \text{ Kč}$$

$$N_{CA2} = 36,28 + N_{AVp} + 2,16 + 2,71 = N_{AVp} + 41,15 \text{ Kč}$$

$$N_{CA3} = 50,45 + N_{AVp} + 2,16 + 2,71 = N_{AVp} + 55,32 \text{ Kč}$$

N_C	–	celkové výrobní náklady na 1 kus [Kč]
N_{so}	–	náklady na strojní práci na jeden obrobek [Kč]
N_{AVp}	–	náklady na jednotkovou vedlejší práci [Kč]
N_{Tvm}	–	náklady na výměnu nástroje vztažené na jeden obrobek [Kč]

5.2 Experiment B

Náklady na minutu strojní práce při $N_{hs1} = 1000$

Náklady na minutu strojní práce (2.6).

$$N_{smB1} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{1000}{60} = 26,01 \text{ Kč}$$

Náklady na strojní práci na jeden obrobek (5.1).

$$N_{soB1} = 26,01 \cdot 0,85 = 22,11 \text{ Kč}$$

Náklady na minutu strojní práce při $N_{hs2} = 2000$

Náklady na minutu strojní práce (2.6).

$$N_{smB2} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{2000}{60} = 42,68 \text{ Kč}$$

Náklady na strojní práci na jeden obrobek (5.2).

$$N_{soB2} = N_{sm} \cdot t_a = 42,68 \cdot 0,85 = 36,28 \text{ Kč}$$

Náklady na minutu strojní práce při $N_{hs3} = 3000$

Náklady na minutu strojní práce (2.6).

$$N_{smB3} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{3000}{60} = 59,35 \text{ Kč}$$

Náklady na strojní práci na jeden obrobek (5.1).

$$N_{soB3} = N_{sm} \cdot t_a = 59,35 \cdot 0,85 = 50,45 \text{ Kč}$$

Náklady na vedlejší práci:

Jelikož náklady na vedlejší práci jsou stejné pro všechny experimenty, jsou brány jako konstantní.

$$N_{AVp} = \text{konst.}$$

Náklady na nástroj

Poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obrobené plochy (2.10).

$$\tau = \frac{322}{468,22} = 0,6877$$

Náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitů, při obrobení jedné součásti (2.18).

$$N_{TNB} = \frac{378 \cdot 1}{2 \cdot 0,9} \cdot \frac{0,85}{5,1} \cdot 0,6877 + (1 + 0,025) \cdot \frac{2000}{500} \cdot \frac{0,85}{5,1} = 24,75 \text{ Kč}$$

Počet výměn břitů vztažený na obrobení jednoho kusu (2.11).

$$z_{vB} = \frac{0,85}{5,1} \cdot 0,6877 = 0,1146$$

Náklady na nástroj na jeden obrobek (2.10).

$$N_{nvB} = f(N_T, z_v) = 24,07 \cdot 0,1146 = 2,84 \text{ Kč}$$

Náklady na výměnu nástroje

Náklady na výměnu nástroje za minutu (2.22).

$$N_{vnmB} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{150}{60} = 11,85 \text{ Kč}$$

Náklady na jednu výměnu nástroje (5.21).

$$N_{TVB} = 2 \cdot 11,85 = 23,7 \text{ Kč}$$

Náklady na výměnu nástroje vztažené na jeden obrobek (5.2).

$$N_{TvmB} = N_{Tv} \cdot z_v = 23,7 \cdot 0,1146 = 2,71 \text{ Kč}$$

Celkové náklady

Celkové náklady na jeden obrobek jsou náklady na strojní práci + náklady na vedlejší práci + náklady na nástroj + náklady na výměnu nástroje vše vztažené na jeden výrobek (5.3).

$$N_{CB1} = 22,11 + N_{AVp} + 2,84 + 2,71 = N_{AVp} + 27,66 \text{ Kč}$$

$$N_{CB2} = 36,28 + N_{AVp} + 2,84 + 2,71 = N_{AVp} + 41,83 \text{ Kč}$$

$$N_{CB3} = 50,45 + N_{AVp} + 2,84 + 2,71 = N_{AVp} + 56,00 \text{ Kč}$$

5.3 Experiment C**Náklady na minutu strojní práce při $N_{hs1} = 1000$**

Náklady na minutu strojní práce (2.6).

$$N_{smc1} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{1000}{60} = 26,01 \text{ Kč}$$

Náklady na strojní práci na jeden obrobek (5.1).

$$N_{soc1} = 26,01 \cdot 0,72 = 18,73 \text{ Kč}$$

Náklady na minutu strojní práce při $N_{hs2} = 2000$

Náklady na minutu strojní práce (2.6).

$$N_{smc2} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{2000}{60} = 42,68 \text{ Kč}$$

Náklady na strojní práci na jeden obrobek (5.1).

$$N_{soc2} = 42,68 \cdot 0,72 = 30,73 \text{ Kč}$$

Náklady na minutu strojní práce při $N_{hs3} = 3000$

Náklady na minutu strojní práce (2.6).

$$N_{smc3} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{3000}{60} = 59,35 \text{ Kč}$$

Náklady na strojní práci na jeden obrobek (5.1).

$$N_{soC3} = 59,35 \cdot 0,72 = 42,73 \text{ Kč}$$

Náklady na vedlejší práci:

Jelikož náklady na vedlejší práci jsou stejné pro všechny experimenty, jsou brány jako konstantní.

$$NAV_p = \text{konst.}$$

Náklady na nástroj

Poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obrobené plochy (2.10).

$$\tau = \frac{322}{468,22} = 0,6877$$

Náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitů, při obrobení jedné součásti (2.18).

$$N_{TNC} = \frac{285 \cdot 1}{2 \cdot 0,9} \cdot \frac{0,85}{2,15} \cdot 0,6877 + (1 + 0,025) \cdot \frac{2000}{500} \cdot \frac{0,85}{5,1} = 43,73 \text{ Kč}$$

Počet výměn břitů vztažený na obrobení jednoho kusu (2.11).

$$z_{vC} = \frac{0,85}{2,15} \cdot 0,6877 = 0,2719$$

Náklady na nástroj na jeden obrobek (2.10).

$$N_{nvc} = f(N_T, z_v) = 43,73 \cdot 0,2719 = 11,9 \text{ Kč}$$

Náklady na výměnu nástroje

Náklady na výměnu nástroje za minutu (2.22).

$$N_{vnmC} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{150}{60} = 11,85 \text{ Kč}$$

Náklady na jednu výměnu nástroje (2.21).

$$N_{TVc} = 2 \cdot 11,85 = 23,7 \text{ Kč}$$

Náklady na výměnu nástroje vztažené na jeden obrobek (5.2).

$$N_{TvmC} = N_{Tv} \cdot z_v = 23,7 \cdot 0,1146 = 2,71 \text{ Kč}$$

Celkové náklady

Celkové náklady na jeden obrobek jsou náklady na strojní práci + náklady na vedlejší práci + náklady na nástroj + náklady na výměnu nástroje vše vztažené na jeden výrobek (5.3).

$$N_{CC1} = 26,01 + N_{AVp} + 11,9 + 2,71 = N_{AVp} + 40,62 \text{ Kč}$$

$$N_{CC2} = 30,73 + N_{AVp} + 11,9 + 2,71 = N_{AVp} + 45,34 \text{ Kč}$$

$$N_{CC3} = 42,73 + N_{AVp} + 11,9 + 2,71 = N_{AVp} + 57,34 \text{ Kč}$$

5.4 Experiment D

Náklady na minutu strojní práce při $N_{hs1} = 1000$

Náklady na minutu strojní práce (2.6).

$$N_{smD1} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{1000}{60} = 26,01 \text{ Kč}$$

Náklady na strojní práci na jeden obrobek (5.1).

$$N_{soD1} = N_{sm} \cdot t_a = 26,01 \cdot 0,72 = 18,73 \text{ Kč}$$

Náklady na minutu strojní práce při $N_{hs2} = 2000$

Náklady na minutu strojní práce (2.6).

$$N_{smD2} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{2000}{60} = 42,68 \text{ Kč}$$

Náklady na strojní práci na jeden obrobek (5.1).

$$N_{soD2} = N_{sm} \cdot t_a = 42,68 \cdot 0,72 = 30,73 \text{ Kč}$$

Náklady na minutu strojní práce při $N_{hs3} = 3000$

Náklady na minutu strojní práce (2.6).

$$N_{smD3} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{3000}{60} = 59,35 \text{ Kč}$$

Náklady na strojní práci na jeden obrobek (5.1).

$$N_{soD3} = N_{sm} \cdot t_a = 59,35 \cdot 0,72 = 42,73 \text{ Kč}$$

Náklady na vedlejší práci:

Jelikož náklady na vedlejší práci jsou stejné pro všechny experimenty, jsou brány jako konstantní.

$$N_{AVp} = \text{konst.}$$

Náklady na nástroj

Poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obrobené plochy (2.10).

$$\tau = \frac{322}{468,22} = 0,6877$$

Náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitů, při obrobení jedné součásti (2.18).

$$N_{TND} = \frac{378 \cdot 1}{2 \cdot 0,9} \cdot \frac{0,85}{2,15} \cdot 0,6877 + (1 + 0,025) \cdot \frac{2000}{500} \cdot \frac{0,85}{5,1} = 57,8 \text{ Kč}$$

Počet výměn břitů vztažený na obrobení jednoho kusu (2.11).

$$z_{vD} = \frac{0,85}{2,15} \cdot 0,6877 = 0,2719$$

Náklady na nástroj na jeden obrobek (2.10).

$$N_{nvD} = f(N_T, z_v) = 57,8 \cdot 0,2719 = 15,7 \text{ Kč}$$

Náklady na výměnu nástroje

Náklady na výměnu nástroje za minutu (2.22).

$$N_{vnmD} = 1,1 \cdot \left(\frac{210}{60} + \frac{300}{60} \right) + \frac{150}{60} = 11,85 \text{ Kč}$$

Náklady na jednu výměnu nástroje (2.21).

$$N_{TV D} = 2 \cdot 11,85 = 23,7 \text{ Kč}$$

Náklady na výměnu nástroje vztažené na jeden obrobek (5.4).

$$N_{TvmD} = 23,7 \cdot 0,1146 = 2,71 \text{ Kč}$$

Celkové náklady

Celkové náklady na jeden obrobek jsou náklady na strojní práci + náklady na vedlejší práci + náklady na nástroj + náklady na výměnu nástroje vše vztažené na jeden výrobek (5.3).

$$N_{CD1} = 26,01 + N_{AVp} + 15,7 + 2,71 = N_{AVp} + 44,42 \text{ Kč}$$

$$N_{CD2} = 30,73 + N_{AVp} + 15,7 + 2,71 = N_{AVp} + 49,14 \text{ Kč}$$

$$N_{CD3} = 42,73 + N_{AVp} + 15,7 + 2,71 = N_{AVp} + 61,14 \text{ Kč}$$

5.5 Zhodnocení nákladové analýzy

Na základě naměřených hodnot a hodnot zadaných pro aplikovatelnost výsledků v reálném prostředí, byly stanoveny celkové náklady na jeden výrobek při použití dvou různých destiček a dvou různých řezných sil. Z analýzy vyplývá, že řezná destička od výrobce 1 je ekonomicky výhodnější při obou řezných rychlostech. Zároveň bylo vyhodnoceno, že ani s hodinovými náklady na provoz stroje 3000 Kč nebude zvýšení řezné rychlosti na 650 m/min ekonomicky vhodné, nicméně při této hodnotě se již náklady na výrobu k sobě blíží, a tak se dá předpokládat, že pokud by náklady na provoz stroje byly ještě vyšší, již by se rychlost 650 m/min ekonomicky mohla vyplatit.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo porovnat dva aktuální výrobce VBD pro aplikaci při obrábění pružinových ocelí. Na základě pozorování vzorků po průběžném opotřebení a jejich analýzy pomocí elektronového mikroskopu byly obě destičky v práci vyhodnoceny a zmíněny jejich přednosti. Následně byly z naměřených výsledků a informací dostupných o destičkách a výrobním procesu od firmy zabývající se touto problematikou, zhotovena nákladová analýza tak, aby bylo možné výsledky porovnat i na základě ekonomického hlediska pro velkosériovou výrobu.

V testech lépe obstála destička CNMG 120412 E-FM s povlakem P1 od výrobce 1. Tato destička, zejména díky tvaru a provedení svého utvařeče třísky, byla vyhodnocena jako vhodnější volba pro sériovou výrobu. Bylo tomu zejména kvůli jistějšímu lámání třísky a menším změnám v geometrii destičky při postupném procesu. Druhým pozitivem této destičky byl konec životnosti abrazivním poškozením a nikoli štěpným lomem. Zejména díky své nižší ceně obstála i v porovnání nákladů. Je dobré poznamenat, že destička CNMG 120408 s povlakem P2 od výrobce 2 je podstatně nověji uvedena na trh, a přesto byla v práci zhodnocena jako méně vyhovující.

Doporučení vyměnitelné břitové destičky pro proces sériové produkce obrábění pružinové oceli platí při rychlosti 550 m/min. Po nákladové analýze byla z ekonomického hlediska připuštěna možnost aplikování vyšší řezné rychlosti při vysokých nákladech na strojní práci, nicméně vzhledem k náchylnosti destičky na štěpný lom při těchto rychlostech není aplikace nakonec doporučena. Důvodem je kvalitní dopracování i posledního obrobeného dílu při rychlosti 550 m/min nebo způsobení pouze minimálních odchylek na povrchu obráběné součásti oproti výraznému poškození v případě, že by ke štěpnému lomu došlo ještě za obrábění posledního dílu.

ZDROJE

1. FOREJT, M. a PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. 220 s. ISBN 80-214-2374-9.
2. KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
3. MÁDL, J., KAFKA, J., VRABEC, M., DVOŘÁK, R. *Technologie obrábění 3.díl*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 81s.
4. HLUCHÝ, M. a kol. *Strojírenská technologie*. SNTL Praha 2000
5. *Obrobitelnost – Bogner Edelstahl* [online]. [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://www.bogner.cz/files/files/Obrobitelnost.pdf>
6. Soustružení: Základní soustružnické nože a jejich popis. *OSU* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/lekce3.htm>
7. HUMÁR, A. *Technologie I – Technologie obrábění – 1. část*. [online]. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. Brno: VUT-FSI. Ústav strojírenské technologie. 2003 [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
8. BISSACCO, G. *Material removal process*. Copenhagen : DTU Mechanical Engineering, 2012
9. Příručka pro technology – Jak je to s řeznými silami? *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/priručka-pro-technology-jak-je-to-s-reznými-silami.html>
10. ŠTÁVA, Radek. *Bezdotykové měření povrchových teplot při obrábění*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2008.
11. ZEMČÍK, O. *Technologická příprava výroby*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.
12. Pohyby při obrábění. *ELUC* [online]. 2014 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://eluc.krolomoucky.cz/verejne/lekce/1185>
13. KVASNIČKA, Ivo, Vladimír SLAVÍK a Lubomír ŠTAJNOCHR. *Obráběcí nástroje* [online] [cit. 2019-01-20]. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 9788001017555;8001017559.
14. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
15. SANDVIK COROMANT AB – SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění – Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha. Scientia, s. r. o., 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6. Překlad z: *Modern Metal Cuttign – A Practical Handbook*.
16. DAVIS, J. R. *Tool Materials*. ASM Specialty Handbook. ASM International. 2nd ed. Materials Park. Ohio, 1998. pp. 501. ISBN: 0-8170-545-1.
17. PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 360 s. ISBN 80-7204-130-4.

18. HTUN, M. S. et al. Effect of Heat Treatment on Microstructures and Mechanical Properties of Spring Steel. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, Vol. 18 No.2 pp.191-197, 2008
19. JECH, Jaroslav. Tepelné zpracování oceli: Metalografická příručka. 4. přeprac. dopl. vyd. Praha: SNTL, 1983, 391 s.
20. ČSN EN 10083-3. *Oceli k zušlechťování: Část 3: Technické dodací podmínky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
21. Přehled vlastností oceli 51CrV4. In: *Bolzano* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_51CrV4.pdf
22. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Výrobní technologie II: [obrábění]. Brno: CERM, 2002, 83 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství). ISBN 80-214-2189-4.
23. TLUSTY, J. Manufacturing Process and Equipment. 1st edition. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650. 2001, 1. vyd., 360 s., ISBN 80-7204-130-4
24. INDRAJIT MUKHERJEE, PRADIP KUMAR RAY. A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers & Industrial Engineering*, 50 (2006) pp.15–34. ISSN 0360-8352.
25. MÁDL, Jan. ČVUT. Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění. 3. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1988. 58 s
26. DUDZINSKI, D., SCHULTY, H. Metal Cutting and High Speed Machining. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2001, 1st. ed., pp. 490, ISBN 0-306-46725-9
27. PÍŠKA, M. a kol. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Akademické nakladatelství CERM s r.o., 2009. 252 s. ISBN 978-80-214.
28. BRYCHTA, J., ČEP, R., NOVÁKOVÁ, J., PETŘKOVSKÁ L. Technologie obrábění II. – 1. díl [cit. dne 4. 11. 18] On-line
http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
29. 5 MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ. *Homel.vsb* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf
30. ŽIŽKA, J.: Použití akustické emise ke sledování stavu řezného nástroje. Liberec: TU Liberec, 2003. 106. s ISBN 80-7083-687-1
31. BRYCHTA, J., ČEP, R., NOVÁKOVÁ, J., PETŘÍKOVSKÁ, L. Technologie II - 1. díl. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8.
32. Opotřebení nástroje. *ELUC* [online]. [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1203>
33. Kapaliny pro obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, 28.06.2011, 22 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kapaliny-pro-obrabeni.html>

-
34. Možnosti zvyšovania efektívnosti technologickej komunikácie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, 09.06.2011, , 84 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moznosti-zvysovania-efektivnosti-technologickej-komunikacie.html>
35. KŘÍŽÍK, R. a VÁVRA, P. *Strojírenská příručka 7. svazek*. 1.vyd. Praha: Scientia, spol. s r.o., 1996. 212 s. ISBN 80-7183-024-0.
36. MÁDL, J. a KVASNIČKA, I. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: ČVUT. 1998. 168 s. ISBN 80-01-01864-6.
37. DRDA, D. *Technologické a ekonomické parametry řezného nástroje. Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 61 s. Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc
38. *MM Průmyslové spektrum: Nástrojové novinky* [online]. [cit. 2017-06-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastrojove-novinky.html>
39. Interní zdroj, prof. Ing. Miroslav Píška, CSc., Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění, 2019

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
BSE	[-]	zobrazení pomocí odražených elektronů
CNC	[-]	číslicové řízení pomocí počítače
CVD	[-]	metoda chemického naprašování
PKD	[-]	polykrystalický diamant
PKNB	[-]	polykrystalický kubický nitrid bóru
PVD	[-]	metoda fyzického naprašování
RO	[-]	rychlořezná ocel
SEM	[-]	zobrazení pomocí sekundárních elektronů
SK	[-]	slinutý karbid
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
C_d	[Kč]	cena břitové destičky
C_E	[Kč]	cena spotřebovaných energií za hodinu
CFS_{EFPL}	[hod]	roční časový fond stroje při jedné směně
C_n	[Kč]	cena pořízení nástroje
C_{si}	[Kč]	cena stroje plus náklady na instalaci
C_{tn}	[Kč]	cena tělesa nástroje
C_{zn}	[Kč]	zbytková cena nástroje
D	[mm]	maximální průměr
F	[N]	celková síla působící na obrobek
F_c	[N]	řezná síla
F_f	[N]	posuvová síla
F_p	[N]	pasivní síla
HRP_{SP}	[Kč]	hodinový režijní paušál (střediskových nákladů)
HRP_{os}	[Kč]	režijní paušál ostřírny za hodinu
L	[mm]	dráha nástroje ve směru posuvu
M_o	[Kč]	hodinové mzdové náklady na operátora
M_{os}	[Kč]	mzdové náklady na ostříče za hodinu
M_s	[Kč]	mzdové náklady na seřizovače za hodinu
N_{1pno}	[Kč.min ⁻¹]	náklady na jednu minutu provozu nástroje, lze přeostrřit
N_{AVp}	[Kč]	náklady na jednotkovou vedlejší práci

N_c	[Kč]	celkové výrobní náklady na 1 kus
N_{hs}	[Kč]	náklady na provoz stroje za hodinu
N_o	[Kč]	náklady na závislé na počtu ostření nástroje
N_{so}	[Kč]	náklady na strojní práci na jeden obrobek
N_{Sp}	[Kč]	náklady na strojní práci
N_{sm}	[Kč]	náklady na minutu strojní práce
N_T	[Kč]	náklady na břit nástroje a jeho výměnu na jednu trvanlivost
N_{Tn}	[Kč]	náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitu
N_{TN}	[Kč]	náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitu, při obrobení jedné součásti
N_{Tv}	[Kč]	náklady na jednu výměnu nástroje
N_{Tvm}	[Kč]	náklady na výměnu nástroje vztažené na jeden obrobek
N_{vm}	[Kč]	náklady na minutu vedlejší práce
N_{vn}	[Kč]	náklady na nástroj
N_{vnm}	[Kč]	náklady na výměnu nástroje za minutu
O_s	[Kč]	odpis stroje za hodinu
Q_{ch}	[J]	teplo způsobené utvářením a dělením třísky
Q_o	[J]	teplo odvedené nástrojem
Q_{pr}	[J]	teplo odvedené rezným prostředím
Q_{sh}	[J]	teplo způsobené plastickou deformací
Q_t	[J]	teplo odvedené třískou
Q_n	[-]	počet obrobených kusů
Q_α	[J]	teplo způsobené třením mezi obrobenou plochou a hřbetem nástroje
Q_γ	[J]	teplo způsobené třením mezi třískou a čelem nástroje
SM	[-]	směnnost
T	[min]	trvanlivost nástroje
T_{optN}	[min]	optimální trvanlivost na základě kritéria nejmenších nákladů
T_{optV}	[min]	optimální trvanlivost na základě kritéria maximální výrobnosti
V	[dm ³]	objem odebraného materiálu
a_p	[mm]	hloubka záběru
d	[mm]	minimální průměr
dt_{AS}	[min]	element jednotkového strojního času
$d\bar{D}$	[mm]	element obráběného průměru
f	[mm]	posuv na otáčku
i	[-]	počet záběrů

k_c	[Kč]	přirážka času směnového
k_{us}	[-]	koeficient oprav a údržby stroje
k_{ut}	[-]	koeficient údržby tělesa nástroje
k_{vs}	[-]	koeficient časového využití stroje [-]
l	[mm]	délka obráběné plochy
l_n	[mm]	délka náběhu
l_p	[mm]	délka přeběhu
m	[-]	exponent z Taylorova vztahu
n	[min ⁻¹]	otáčky
r_ϵ	[mm]	poloměr zaoblení špičky
s	[mm]	šířka VBD
t_{A111}	[min]	čas jednotkové práce za klidu stroje
t_{A102}	[min]	čas jednotkové práce nepravidelný
t_{AS}	[min]	jednotkový strojní čas
t_{AVp}	[min]	čas jednotkové vedlejší práce
t_{ASn}	[min]	jednotkový strojní čas při konstantní frekvenci otáček
t_{ASv}	[min]	jednotkový strojní čas při konstantní řezné rychlosti
t_{A111}	[min]	čas jednotkové práce za klidu stroje
t_{A102}	[min]	čas jednotkové práce nepravidelný
t_{os}	[min]	čas ostření nástroje
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
v_f	[m.min ⁻¹]	posuvová rychlost
z_b	[-]	počet břitů na destičce
z_d	[-]	počet břitových destiček na nástroji
z_o	[-]	počet možných přeastření nástroje
z_u	[-]	předpokládaný počet upnutí destiček za dobu životnosti nástroje
z_v	[-]	počet výměn břitů (ostření nástroje), na obrobení jednoho kusu
α_o	[°]	ortogonální úhel hřbetu
β_o	[°]	ortogonální úhel břitu
γ_o	[°]	ortogonální úhel čela
ϵ_r	[°]	úhel špičky
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního břitu
λ_s	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
τ	[-]	poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obrobené plochy
