



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ZVYŠOVÁNÍ ŘEZIVOSTI MATICOVÝCH ZÁVITNÍKŮ POMOCÍ POVLAKŮ

ON THE INCREASE OF CUTTING PERFORMANCE OF THREAD CUTTING
TAPS WITH COATINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Martin Krejska

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Martin Krejska
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Akademický rok:	2015/16

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:

Zvyšování řezivosti maticových závitníků pomocí povlaků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zvyšování řezivosti maticových závitníků pomocí povlaků - vliv geometrie nástroje, předúprav povrchu a druhu povlaku na řezné vlastnosti závitníku.

Cíle diplomové práce:

Úvod.

Teoretický rozbor problému.

Návrh experimentálních zkoušek maticových závitníků.

Realizace experimentů, jejich statistické vyhodnocení.

Diskuze.

Závěry.

Seznam literatury:

Schrader, G.F., Elshennawy A.K., Doyle, L.E. Manufacturing processes and materials. [cit. 20. listopadu 2011]. Dostupné na World WideWeb: <http://books.google.cz/books?id=Nz2wXvmtAF0C&pg=PT214&dq=metal+casting+materials+isbn&hl=cs&ei=bnLjTsD1Mlr1sgptoejqBg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=3&ved=0CEgQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false>

Humár, A. (2008): Materiály pro řezné nástroje. MM publishing s. r.o., Praha.

Kocman, K. a Prokop, J. (2005): Technologie obrábění. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno.

Forejt, M., Piška, M. (2006): Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o.

AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. (1997): Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. Praha. Scientia, s. r. o. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook.

Shaw, M. C. (2005): Metal Cutting Principles. Oxford University Press.

Baránek, I. (2004): Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. TU Alexandra Dubčeka v Trenčíne, Slovensko, Trenčín.

Baránek, I., Šandora, J. (2004): Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky. TrnUAD, Trenčín.

Marinescu, I.D. et al. (2004): Tribology of abrasive machining processes. William Andrew, Norwich.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

V první části této práce jsou definovány základní parametry závitů a typy závitů. Dále jsou popsány druhy nástrojů, nástrojových materiálů a řezných sil. Závěrečná část práce se zabývá analýzou průběhu řezných sil, analýzou průběhu opotřebení a analýzou povrchu závitu.

Klíčová slova

Povlak, maticový závitník, řezivost, analýza, řezné síly

ABSTRACT

The first part of work provides definition of basic parameters of threads, type of threads. Further work includes description of tools, material of tools and cutting forces. The final part of work deals with analysis course of cutting forces, analysis course wear and analysis surface structure of threads.

Key words

Coating, nut taps, cutting performance, analysis, cutting forces

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREJSKA, Martin. *Zvyšování řezivosti maticových závitníků pomocí povlaků*. Brno 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 69 s. 8 příloh. prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Zvyšování řezivosti maticových závitníků pomocí povlaků** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25.5.2016

Datum

Bc. Martin Krejska

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné rady a připomínky při vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Intemac Solutions, s.r.o., Kuřim za technickou podporu. Nakonec děkuji svým rodičům za podporu po dobu mého studia.

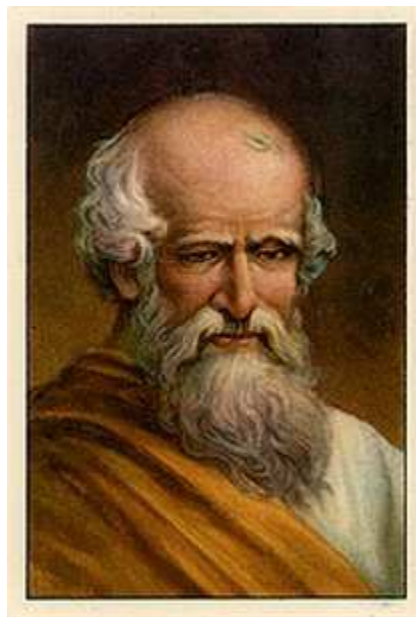
OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 TEORETICKÝ ROZBOR ÚLOHY	10
1.1 Základní rozdělení závitů.....	10
1.1.1 Druhy závitů	10
1.1.2 Metrický závit	10
1.1.3 Whitworthův závit	11
1.1.4 Lícování a kontrola závitů	11
1.2 Metody výroby závitů	12
1.2.1 Rozdíl mezi tvářenými a obráběnými závity	12
1.2.2 Výroba závitů řezáním závitníkem	12
1.2.3 Výroba závitu soustružením	13
1.2.4 Výroba závitu frézováním	14
1.2.5 Výroba závitů řezáním závitovými čelistmi	15
1.2.7 Výroba závitu tvářením	16
1.2.8 Výroba závitu lisováním.....	17
1.3 Proces řezání	17
1.3.1 Princip tvorby třísky	18
1.3.2 Silové zatížení při řezání.....	20
1.3.3 Vznik tepla a velikost teploty při procesu řezání.....	22
1.3.4 Obrobitelnost materiálu a řezivost nástroje	24
1.3.5 Opotřebení a trvanlivost nástroje	25
1.4 Nástrojové materiály	28
1.4.1 Nástrojové oceli	29
1.4.2 Slinuté karbidy	30
1.4.3 Cermety.....	33
1.4.4 Keramické řezné materiály	34
1.4.5 Polykrystalický kubický nitrid boru	36
1.4.6 Polykrystalický diamant	37
1.5 Metody povlakování nástrojů.....	38
1.5.1 Metoda CVD.....	40

1.5.2	Metoda PVD	40
1.5.2.1	Metoda PVD – napařování povlaku	41
1.5.2.2	Metoda PVD – naprašování povlaku	42
1.5.2.3	Metoda PVD – iontová implementace povlaku	43
1.5.3	Vlastnosti povlaků	44
1.6	Ekonomika řezného procesu	46
1.7	Způsob výroby maticového závitníku	47
1.8	Maticový závitník	47
2	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	48
2.1	Návrh experimentu	48
2.2	Použitý nástroj	48
2.3	Zkušební vzorek a materiál vzorku	48
2.4	Řezné podmínky	49
2.5	Použitý obráběcí stroj a jeho parametry	50
2.6	Měření krouticího momentu	51
2.7	Měření struktury povrchu	53
3	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	54
3.1	První série závitů	54
3.2	Druhá série závitů	55
3.3	Třetí série závitů	57
3.4	Čtvrtá série závitů	58
3.5	Pátá série závitů	60
3.6	Průměrný řezný moment a průměrná potřebná energie	61
4	DISKUZE	63
	ZÁVĚR	64
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	65
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	68

ÚVOD

Kdysi dávno ve starověkém Řecku žil učenec jménem Archimédes. Z dnešního pohledu tento člověk, spolu ještě s několika osobnostmi té doby, vyčníval nad ostatní svou genialitou. Na tehdejší poměry vymyslel či vybádal několik zásadních věcí, myšlenek, které platí a zároveň se využívají i dnes. Což je pro mě neuvěřitelné, aby téměř 2000 let platily myšlenky nějakého člověka a zároveň je to důkaz geniality a výjimečnosti tohoto jedince. Asi nejznámější je, když Archimédes položil základy hydrostatiky v podobě Archimédova zákona. Pro účel této práce je důležitá myšlenka Archimédovy spirály. Neboť bez této myšlenky, která je základem dnešní šroubovice, by nevznikly dnešní závity. Ani by nebylo možné řešit řezivost maticových závitníků, protože by žádné maticové závitníky nebyly. Závity jsou definovány jako rozebíratelné spojení dvou a více součástí. Troufnu si říci, že se závity vyskytují v různých variantách a provedeních na téměř všech vyrobených strojích a zařízeních. Z tohoto pohledu se závit jeví jako velice důležitý konstrukční prvek. Tato práce pojednává právě o výrobě závitů. Přesněji řečeno pojednává o zvyšování řezivosti maticových závitníků pomocí povlaků. Řezivost se dá zvýšit několika způsoby. V tomto případě je aplikován na maticovém závitníku povlak, který zajišťuje lepší řezivost a trvanlivost nástroje. V této práci se zaměřím na chování takto upraveného nástroje z hlediska analýzy sil vznikajících při řezném procesu.



Obr.1 Archimédes.

1 TEORETICKÝ ROZBOR ÚLOHY

1.1 Základní rozdělení závitů

Závity se dají rozdělit podle umístění na vnější a vnitřní závity. Dále je můžeme rozdělit dle způsobu použití na spojovací, upevňovací a na pohybové. Tyto závity se od sebe liší použitou geometrií a stoupáním šroubovice. Podle tvaru profilu jsou závity trojúhelníkové, lichoběžníkové a oblé. Podle směru otáčení šroubovice jsou pravé a levé. Posledním způsobem rozdělení je podle počtu požitých závitů na jednochodé a vícechodé [1].

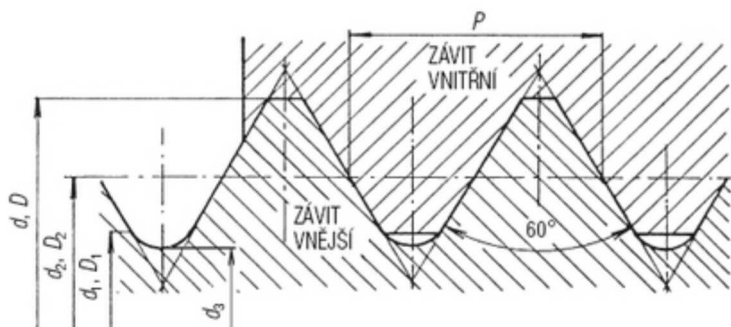
1.1.1 Druhy závitů

Závitů existuje více druhů. Odlišují se od sebe použitým profilem, různým vrcholovým úhlem i použitým profilem. Dále se odlišují použitou jednotkou měření, některé využívají mm jiné palce dle země vzniku závitu. Druhy závitů jsou [1]:

- metrický závit,
- Whitworthův závit,
- unifikovaný palcový závit,
- oblý závit,
- trubkový závit kuželový,
- trubkový závit,
- Edisonův závit,
- pancéřový závit,
- lichoběžníkový závit rovnoramenný,
- lichoběžníkový závit nerovnoramenný.

1.1.2 Metrický závit

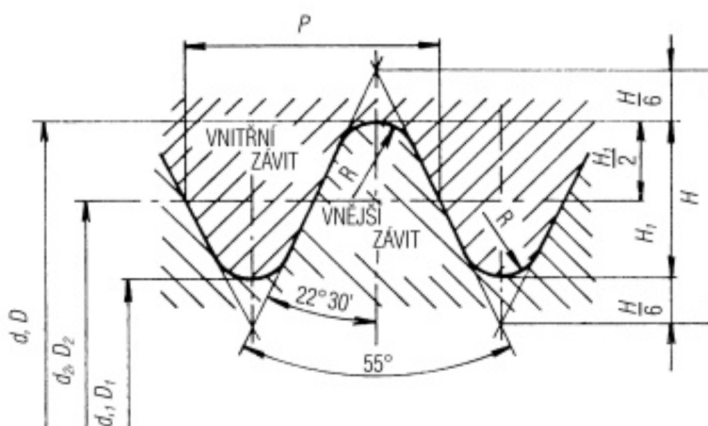
Metrický závit je u nás nejpoužívanějším závitem. Využívá trojúhelníkový profil s vrcholovým úhlem 60° , všechny rozměry jsou udávány v mm (viz obr. 1.1). Metrické závity mohou být pravé nebo levé s tím, že se nejčastěji používá pravý, levý závit je spíše pro speciální použití. Dále se používají s jemným, normálním nebo hrubým stoupáním. V technické dokumentaci se označují písmenem M, např. M 10x1,25 LH [2].



Obr. 1.1 Profil metrického závitu [2].

1.1.3 Whitworthův závit

Whitworthův závit (viz obr. 1.2) byl prvním průmyslově používaným závitem, vznikl ve Velké Británii v roce 1841. Využívá také jako metrický závit trojúhelníkový profil ale má vrcholový úhel jen 55° a dalším rozdílem od metrického závitu je, že Whitworthův závit se měří v palcích a stoupání se udává počet závitů na palec. U nás se tento závit nepoužívá, ale můžeme se přesto s tímto závitem setkat např. u oprav starých strojů [3].



Obr. 1.2 Profil Whitworthova závitu [3].

1.1.4 Lícování a kontrola závitů

Šrouby a matice musejí být vyrobeny tak, aby se závit šroubu celou plochou dotýkal celé plochy vnitřního závitu matice. V případě, že se tak nestane, může dojít ke stržení závitu. Někdy je ovšem zapotřebí klást zvláštní požadavky na jejich zaručený vzájemný přesah či vůli. V takovém případě se závity takzvaně lícují. Lícování je tolerování, neboli stanovení přesné odchylky určitých rozměrů. V případě závitů je jedná o tolerování těchto jmenovitých rozměrů (viz obr 1.1) [4,5]:

- velký průměr závitu šroubu – d ,
- malý průměr závitu matice – D_1 ,
- střední průměr závitu matice – D_2 ,
- střední průměr závitu šroubu – d_2 .

Závity se kontrolují různými způsoby v závislosti na tom, jakou požadujeme přesnost. Např. v hromadné výrobě se se určuje, jestli je závit správně vyrobený nebo se jedná zmetek, pomocí kalibrů. Rozlišujeme, jestli se jedná o vnitřní závit, neboli matici, nebo vnější závit - šroub. Matici kontrolujeme závitovým kalibrem na vnitřní závity a výsledkem je, že je závit dobrý nebo špatný. Šroub kontrolujeme buď závitovými kroužky, nebo třmenovým kalibrem. V tomto případě je výsledkem opět buď dobrý, nebo špatný závit. Jedná se tedy v obou případech o kvalitativní měření, kde nezískáme číselný údaj[5].

Naopak, když potřebujeme vyhodnocovat přesné číselné hodnoty, tak použijeme kvantitativní metody. V tomto případě dostaneme měřením číselný údaj rozměru. Závitů můžeme měřit např. třmenovým mikrometrem s vyměnitelnými dotyky pro měření vnějších závitů. Dále můžeme měřit střední průměr závitu šroubu přes tří drátkovou metodu, pomocí drátků a třmenového mikrometru, nebo můžeme použít pro přesnější měření mikroskop [5].

1.2 Metody výroby závitů

Výrobu závitu rozlišujeme z hlediska, jestli vyrábíme závit třískovou nebo beztrískovou metodou. Třískovou metodou rozumíme obrábění materiálu jako např. soustružením, frézováním, broušením a řezáním závitů závitníkem a závitovými čelistmi. Beztrískovou metodou rozumíme tváření závitů a lisování závitů. Dále musíme přihlížet k tomu, jestli vyrábíme vnější nebo vnitřní závit nebo v jakém místě se nachází, protože ne vždy lze všechny metody výroby závitů použít v dané situaci.

1.2.1 Rozdíl mezi tvářenými a obráběnými závitů

Rozdíl mezi tvářenými a řezanými závitů spočívá v mechanické pevnosti závitu. U závitů vyrobené řezáním dochází k porušení vláken vzniklých při výrobě polotovaru. Ale u závitů vyrobené tvářením nedochází k porušení vláken, tyto vlákna jsou zhuštěny (viz obr. 1.3). Tedy při tváření závitu dochází ke zpevnění, závit je tedy pevnější. Dále má kvalitnější povrch a je přesnější [6].



Obr. 1.3 Závit vzniklý tvářením a řezáním [7].

1.2.2 Výroba závitů řezáním závitníkem

Výroba závitů metodou řezání závitníkem je proces, při kterém vzniká odpad v podobě třísky. Používá se k výrobě vnitřního závitu. Před výrobou závitu je nutné vyrobít otvor o požadovaném rozměru, který bývá udáván v tabulkách. Výrobu závitníkem můžeme rozdělit na strojní nebo ruční. U ruční metody se používají sadové závitníky (viz obr. 1.4). Sada většinou obsahuje tři závitníky pro výrobu jednoho závitu. Ruční závitník bývá upnut do vratidla, pomocí něhož vykonává pohyb. Tento způsob se používá pro kusovou výrobu, opravy nebo tam, kde nelze použít strojní závitník. Tento způsob není příliš efektivní. Strojní závitník (viz obr. 1.5) se oproti ručnímu nepoužívá v sadách. Jeho geometrie je přizpůsobena tak, že pro výrobu jednoho závitu je zapotřebí pouze jeden závitník příslušného rozměru. Použití jen jednoho závitníku ovšem znamená vyšší silové zatížení oproti ručnímu závitníku, je ale efektivnější. Pro strojní výrobu strojním závitníkem se používají: vrtačky, soustruhy, frézky...



Obr. 1.4 Sada ručních závitníků
od firmy Narex [8].



Obr. 1.5 Strojní závitník od firmy Narex [8].

1.2.3 Výroba závitu soustružením

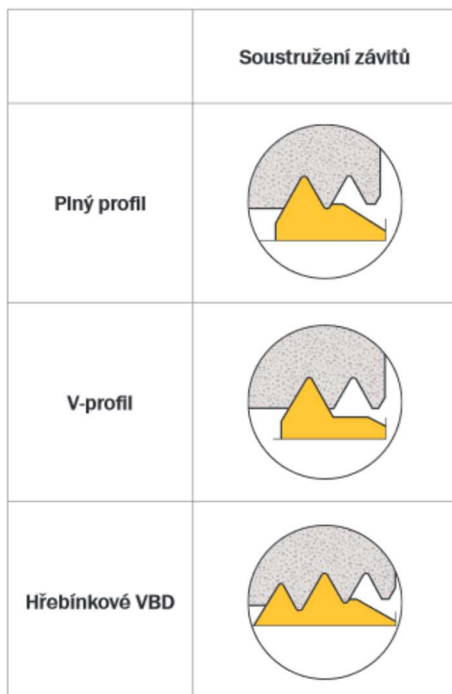
Jedná se opět o metodu obrábění, při níž vzniká odpad v podobě třísky. Udává se, že soustružení je neproduktivnější metodou pro výrobu závitů, využívá se pro vnitřní i venkovní závity (viz obr. 1.6).



Obr. 1.6 Výroba závitu soustružením [10].

Pro výrobu závitů se používají vyměnitelné břitové destičky, které mají tvar profilu požadovaného závitu s odpovídajícím úhlem stoupání šroubovice závitu. Průměr a stoupání závitu je dán nastavením stroje, stoupání závitu odpovídá posuvu nástroje na otáčku. Používají se tři typy vyměnitelných břitových destiček (viz obr. 1.7) VBD s plným profilem, VBD s V-profilem a VBD Hřebínková. VBD s plným profilem je nejčastěji používaná VBD, vytváří kompletní tvar závitu i s vrcholem. Není nutné obrobit obrobek na přesný rozměr závitu, protože vrchol je seříznut na požadovaný rozměr. Pro každý profil a stoupání je nutno použít jinou destičku. VBD s V-profilem neseřezávají vrchol závitu, proto je nutné před řezáním závitu obrobit obrobek na požadovaný průměr závitu. Výhodou je, že jednu VBD můžeme použít pro určitý rozsah stoupání závitu pro daný profil. VBD Hřebínkové jsou to vysoce produktivní destičky. Podobají se destičkám s plným profilem, ale mají více hrotů, tím zajišťují vyšší produktivitu. Nevýhodou je potřeba delší průchozí plochy nástroje. Pro výrobu závitů soustružením s VBD je důležité zvolit vhodný způsob přísuvu (viz obr. 1.8).

Zvolený způsob přísuvu má přímý vliv na kvalitu závitu, opotřebení a následnou životnost nástroje [9,10].



Obr. 1.7 Tvar používaných VBD [10].



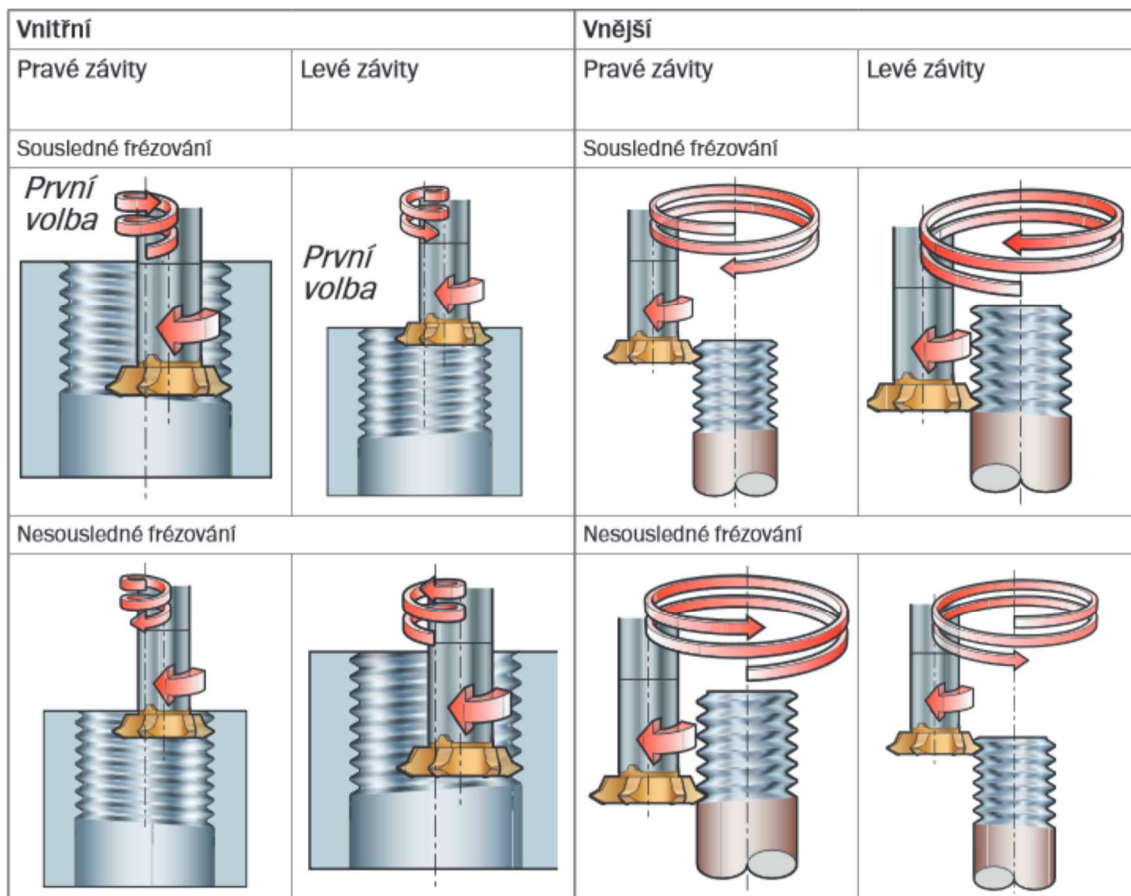
Obr. 1.8 Používané způsoby přísuvu VBD [10].

Pro výrobu závitu soustružením se využívá stroj, jak napovídá název, soustruh. Soustruhy mohou být univerzální, čelní, svislé a revolverové.

1.2.4 Výroba závitu frézováním

Jedná se opět o řezný proces, při kterém vzniká odpad v podobě třísky. Výroba závitu frézováním (viz obr. 1.9) se provádí rotačním nástrojem (závitovou frézou), který sestupuje po kruhové dráze. Frézování závitu není používáno, tak často jako soustružení, ale v některých případech je dosahováno vysoké produktivity a frézování závitu bývá používáno jako druhá možnost řezání závitu pomocí závitníků. Výhodou oproti řezání závitníkem je, že jedna závitová fréza může vyrábět různé velikosti závitu se stejným stoupáním a profilem. Dále jednu závitovou frézu lze použít pro různé rozteče, stejné VBD pro frézování pravého i levého závitu. V případě lomu nástroje je odstranění jednodušší než u závitníku. Je vhodnější pro materiály, které tvoří dlouho třísku. Je vhodný pro řezání závitu do slepé díry a ke dnu, nepotřebuje přeběh. Závitové frézy nepotřebují chlazení pomocí kapaliny. Velikou výhodou je zmenšení řezných sil, to znamená, že i velké závity se mohou vyrábět na menších strojích oproti závitníku [9,10].

Pro výrobu závitu frézováním se používají frézy. Frézy můžeme rozdělit podle osy vřetene na horizontální, vertikální a univerzální. Dále se rozdělují podle konstrukce na portálovou, konzolovou, na závity, odvalovací a nástrojářskou...[9,10].



Obr. 1.9 Výroba závitu frézováním [10].

1.2.5 Výroba závitů řezáním závitovými čelistmi

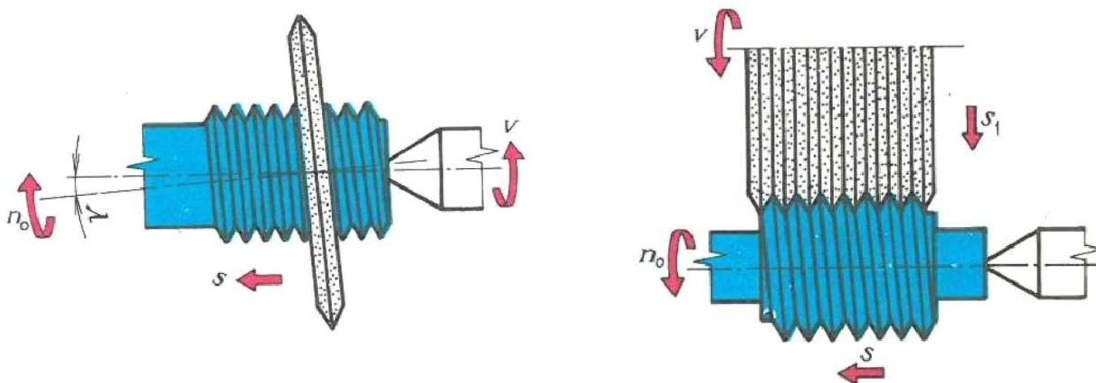
Výroba závitů metodou řezání závitovými čelistmi (viz obr. 1.10) je opět proces, při které vzniká odpad v podobě třísky. Používá se k výrobě vnějšího závitu. Před výrobou závitu je nutné obrobit polotovar na rozměr požadovaného závitu. Výrobu závitovými čelistmi můžeme rozdělit na strojní nebo ruční. Při použití závitových čelistí potřebujeme mít na obrobku přeběh. U ruční metody se používá závitová čelist a vratidlo, pomocí něho vykonáváme práci. Tento případ je používán na opravy, nebo kusovou výrobu. Je málo efektivní, ale výhodou je, že není zapotřebí elektrická energie. U strojní metody používá soustruh a upínací přípravek [9].



Obr. 1.10 Závitová čelist [8].

1.2.6 Výroba závitů broušením

Výroba závitu broušením je třísková metoda obrábění. Používá se na výrobu vnějšího závitu tam, kde se požaduje vysoká přesnost jak rozměru, tvaru i stoupání závitu. Dále se používá tam, kde nejde vyrobit běžným způsobem např. u těžce obrobitelných materiálů. Nástrojem jsou speciální profilové brusné kotouče (viz obr. 1.11) buď jedno profilové, nebo více profilové hřebenové kotouče. Tvar profilu závitu na nástroji se získává pomocí diamantového orovnávače, který má tvar profilu závitu. Strojem bývá speciální závitová bruska [9].

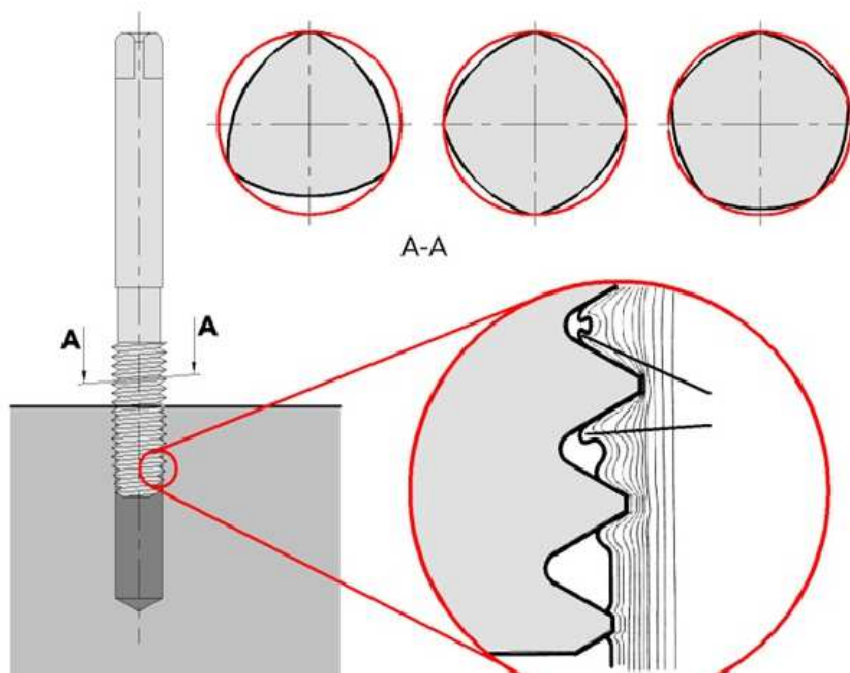


Obr. 1.11 Výroba závitu broušením jedno profilovým a hřebenovým kotoučem [11].

1.2.7 Výroba závitu tvářením

Výroba závitu tvářením (viz obr. 1.12) je beztržsková metoda, u které nevzniká žádný odpad. Tvářením můžeme vyrábět závity jak vnější, tak i vnitřní. U výroby vnějších závitů používáme tvářecí závitové hlavy a u výroby vnitřních závitů používáme tvářecí závitníky. Tvářecí závitníky se výhodně používají pro výrobu závitů ve slepých otvorech a tam kde bývá problematický odvod třísky. Nebo u materiálů, u kterých vzniká problematická tříska. Velikou výhodou tvářecích závitníků je lepší jakost a pevnost výsledného závitu. Proces samotného tvářením požaduje vysoké tvářecí rychlosti, což vede k vyšší produktivitě výroby. Nevýhodou je, že je zapotřebí tažnost tvářeného materiálu za studena nejméně 10%. Proto tato metoda není vhodná pro křehké a tvrdé materiály. Naopak je vhodná pro slitiny mědi, hliníku a dalších tvárných materiálů. Další nevýhodou je třikrát vyšší krouticí moment oproti

řezným závitníkům. To nese vyšší nároky na pevnost konstrukce. Před použitím tvářecího závitníku je nutno předpřipravit otvor. Jelikož nedochází k odběru materiálu, jen k přemísťování pomocí tlaku a teploty. Proto musíme volit rozměr otvoru s přihlédnutím k zákonu zachování objemu tak, aby vznikl ideální tvar závitu. Příliš velké díra znamená málo materiálu a výsledný špatný tvar závitu. Naopak příliš mnoho materiálu vede k poškození nástroje. Pro optimální volbu rozměru otvoru vycházíme z doporučení výrobce, nebo z pokusů [6].



Obr. 1.12 Princip tvorby závitu tvářením pomocí tvářecího závitníku [12].

1.2.8 Výroba závitu lisováním

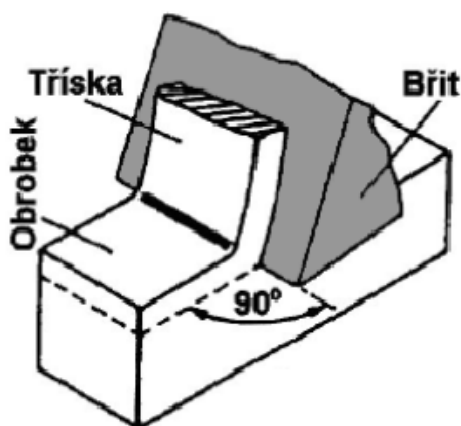
Výroba závitu lisováním je beztržková metoda výroby závitu. Uplatňuje při lisování plastových výrobků. V dnešní době se nejčastěji setkáme s lisovaným závitem na plastových lahvích. Jedná se o rychlý a levný způsob výroby závitu.

1.3 Proces řezání

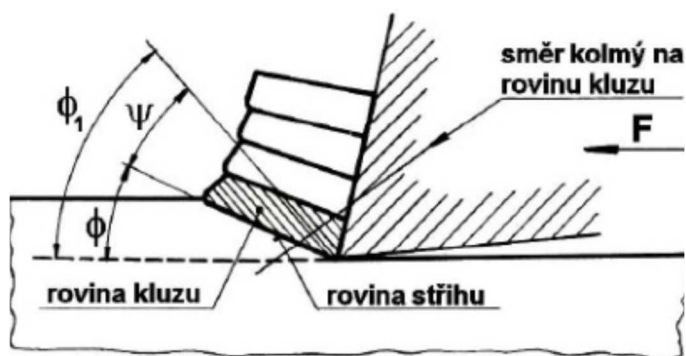
Proces řezání je základem všech třískových obráběcích metod. Při tomto procesu se vytváří tříska a vzniká přebytečné teplo. Na tvorbu třísky má vliv geometrie nástroje. S geometrií nástroje je přímo spojené silové zatížení soustavy obrobek, nástroj a stroj. Dále má vliv na tvorbu třísky druh obráběného materiálu, tím se zabývá obrobitelnost materiálu. Druh obráběného materiálu spolu s geometrií nástroje, silovým a tepelným zatížením a s řeznými podmínkami přímo ovlivňuje opotřebení a následnou životnost nástroje.

1.3.1 Princip tvorby třísky

Princip tvorby třísky je základem řezného procesu. Tříska vzniká pomocí obráběcího nástroje, který působí na obráběný materiál. Pro zjednodušenou představu o řezném procesu a tvorbě třísky se používá ortogonální řezání (kolmé řezání) (viz obr. 1.13). Kde obráběcí nástroj pomocí řezné části – břitu zajíždí do materiálu a odděluje třísku, která odchází po ploše nástroje nazývané čelo. Materiál je nejprve elasticky a pak plasticky deformován pomocí síly F , která tlačí břit do materiálu (viz obr. 1.14). V obrobku roste smykové napětí, které vedou k plastické deformaci tedy posunu vrstvy materiálu po kluzné rovině pod úhlem Φ_1 . Další posun nástroje znamená posun dalších vrstev a následné přechování materiálu ve směru kolmém ke kluzným rovinám. Segmenty třísky jsou oddělovány pod úhlem stříhu Φ . Tříska je tedy odříznutá a deformovaná vnější vrstva materiálu. Druh třísky závisí na řezných podmínkách, jako je posuv, řezná rychlost a hloubka řezu. Dále závisí na druhu obráběného materiálu, geometrii nástroje, použité řezné kapaliny a dalších pracovních podmínkách [13,14].



Obr. 1.13 Ortogonální
(kolmé řezání) [14].



Obr. 1.14 Tvorba třísky, posuv vrstev[14].

Rozlišujeme dva druhy třísek tvářenou a netvářenou. Tvářená tříska vzniká při obrábění takových materiálů, u kterých předchází jejímu vytvoření plastická deformace v místě primární plastické deformace. Tvářená tříska bývá plynulá nebo dělená. Tento druh třísky se vyskytuje u většiny obráběných materiálů ve strojírenství. Netvářná tříska se vytváří při obrábění materiálů jako skla, dřeva, plastů... U těchto materiálů má tříska podobu malých částic [13,14].

Třísky mohou mít vícero tvarů. Tvar třísky závisí na druhu obráběného materiálu, geometrii nástroje, jestli jsou použity lamače a utvařeče třísky a řezných podmínkách. Tvar třísky je důležitý z hlediska manipulace s odpadem, plynulá tříska zabírá více místa než drobná tříska. Dále je důležitý z hlediska automatizace. U plynulé třísky dochází ke špatnému odvodu třísky, proto materiály tvořící plynulou třísku jsou nevhodné pro automatický provoz. Z hlediska tepelného zatížení nástroje je opět vhodnější drobná tříska než plynulá. Protože část tepla vytvořeného při řezání je odvedena do třísky a je výhodnější, když se dotýká nástroje co nejméně. Z těchto důvodů se pokoušíme ve výrobě volit takové materiály,

nástroje a řezné podmínky, které nám pomohou vytvořit menší kousky třísky. Třísky rozdělujeme dle tvaru na více skupin (viz tab. 1.1) [13,14].

Tab. 1.1 Tvary třísek [13].

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

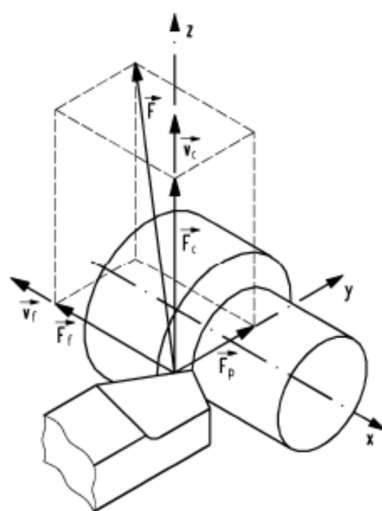
Pro výpočet předpokládané potřebné skladové plochy pro třísky se využívá objemový součinitel třísek W , který se vypočítá podle vztahu (1.1).

$$W = \frac{V_t}{V_m} \quad (1.1) [13]$$

Kde: $W [-]$ - objemový součinitel vzniklých třísek,
 $V_t [\text{dm}^3]$ - objem volně ložených třísek,
 $V_m [\text{dm}^3]$ - objem odebraného materiálu.

1.3.2 Silové zatížení při řezání

Při řezném procesu dochází k vzájemné interakci obrobku, nástroje a vzniká silové zatížení, které působí na celou soustavu nástroje, obrobku a stroje. Pro vysvětlení se opět používá jednodušší ortogonální (kolmé) silové zatížení (viz obr. 1.15), v tomto případě se jedná o operaci soustružení. Na obrobek v místě řezu působí celková řezná síla F , tato celková řezná síla se rozkládá v ortogonální soustavě do tří směrů os x, y, z . První a zároveň největší síla je řezná síla F_c , která působí ve směru vektoru řezné rychlosti v_c a zároveň ve směru osy z . Další a zároveň druhá největší ze složek je posuvová síla F_f , která působí ve směru posuvu nástroje a ve směru osy x . V tomto směru je největší tuhost obráběcí soustavy. Poslední a zároveň nejmenší síla je pasivní síla F_p , tato síla působí vždy do obrobku ve směru osy y . V tomto směru je nejmenší tuhost obráběcí soustavy [13,15].



Obr. 1.15 Jednotlivé složky ortogonálního silového zatížení [16].

Na velikost složek silového zatížení mají vliv řezné podmínky, jako řezná rychlost, hloubka záběru ostří, posuv na otáčku. Dále je ovlivňuje obráběný materiál. Dobře obrobitelný materiál bude způsobovat menší silové zatížení než špatně obrobitelný materiál. Jednotlivé složky silového zatížení můžeme určit buď experimentální metodou (tedy měřením pomocí dynamometru), nebo výpočtem pomocí empirických vzorců. Každý druh výroby má své vlastní výpočtové vzorce pro jednotlivé silové složky [13,15].

Celková řezná síla F závisí na jednotlivých složkách sil a můžeme ji vypočítat dle vztahu (1.2).

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \text{ [N]} \quad (1.2) [13]$$

Kde: F [N] - celková řezná síla,
 F_c [N] - složka řezné síly,
 F_f [N] - složka posuvové síly,
 F_p [N] - složka pasivní síly.

Pro určení potřebného výkonu stroje se využívá řezný výkon. Pro výpočet tohoto řezného výkonu používáme vztah (1.3). Nesmíme však zapomenout, že pro určení reálného příkonu stroje tento řezný výkon musíme podělit účinností daného stroje.

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} \text{ [N]} \quad (1.3) [13]$$

Kde: P_c [W] - řezný výkon,
 F_c [N] - složka řezné síly,
 v_c [m.min⁻¹] - řezná rychlost.

Velikost řezné rychlosti v_c při soustružení vypočítáváme ze vztahu (1.4).

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m. min}^{-1}\text{]} \quad (1.4) [13]$$

Kde: π [-] - Ludolfovo číslo 3,14,
 D [mm] - obráběný průměr obrobku,
 n [min⁻¹] - otáčky obrobku.

Řeznou sílu F_c při soustružení můžeme vypočítat dvěma způsoby. První způsob je výpočet pomocí empirického vztahu (1.5). Druhý způsob je výpočet pomocí měrné řezné síly dle vztahu (1.6).

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \text{ [N]} \quad (1.5) [13]$$

Kde: C_{Fc} [-] - empirická konstanta vlivu řezné síly,
 a_p [mm] - šířka záběru ostří,
 f [mm] - posuv na otáčku,
 x_{Fc}, y_{Fc} [-] - empirické exponenty vlivu řezné síly.

$$F_c = k_c \cdot A_D \text{ [N]} \quad (1.6) [13]$$

Kde: k_c [N.mm⁻²] - měrná řezná síla,

A_D [mm²] - plocha řezu.

Posuvovou sílu F_f při soustružení vypočítáváme dle empirického vztahu (1.7).

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \text{ [N]} \quad (1.7) [13]$$

Kde: C_{Ff} [-] - empirická konstanta vlivu posuvové síly,
 a_p [mm] - šířka záběru ostří,
 f [mm] - posuv na otáčku,
 x_{Ff}, y_{Ff} [-] - empirické exponenty vlivu posuvové síly.

Pasivní sílu při soustružení vypočítáváme dle empirického vztahu (1.8).

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \text{ [N]} \quad (1.8) [13]$$

Kde: C_{Fp} [-] - empirická konstanta vlivu pasivní síly,
 a_p [mm] - šířka záběru ostří,
 f [mm] - posuv na otáčku,
 x_{Fp}, y_{Fp} [-] - empirické exponenty vlivu pasivní síly.

1.3.3 Vznik tepla a velikost teploty při procesu řezání

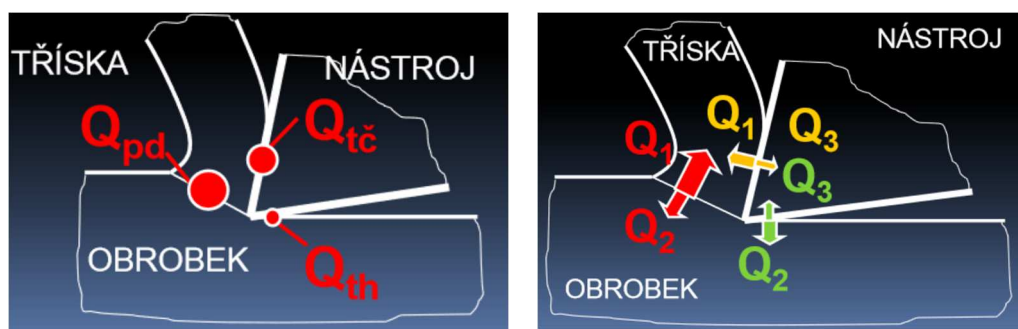
Pro proces řezání musíme dodat energii. Většina této dodané energie se přemění z mechanické práce v teplo. Udává se, že se přemění až 98% z mechanické práce. Máme tři oblasti vzniku tepla (viz obr. 1.16). Nejvíce tepla Q_{pd} vzniká v oblasti primární plastické deformace při vytváření třísky, neboli ve střižné rovině. Druhá oblast ve velikosti vzniku tepla $Q_{tč}$ je oblast sekundární plastické deformace. V této oblasti dochází ke tření mezi třískou a čelem nástroje. Třetí oblastí vzniku tepla Q_{th} je místo, kde dochází ke styku obrobené plochy se hřbetem nástroje. Samotný vznik tepla při řezném procesu je negativní jev. V jeho důsledku dochází k tepelnému ovlivňování nástroje a obrobku. U nástroje dochází vlivem tepla k nežádoucímu vlivu na řezné vlastnosti nástroje, dochází k předčasnému opotřebení. U obráběného materiálu negativně dochází jeho vlivem ke změně jeho mechanických vlastností a tím ovlivňuje řezné podmínky. Množství vzniklého tepla závisí na zvolené technologii obrábění, na vlastnostech obráběného materiálu, materiálu a geometrii nástroje a na řezných podmínkách. Řeznými podmínkami se rozumí zejména velikost řezné rychlosti v_c a následná velikost řezné síly F_c . Toto množství vzniklého tepla lze spočítat dle vztahu (1.9) [15,17].

$$Q = F_c \cdot v_c \cdot t \text{ [J]} \quad (1.9) [13]$$

Kde: F_c [N] - řezná síla,
 v_c [mm.min⁻¹] - řezná rychlost,
 t [min] - doba řezného procesu.

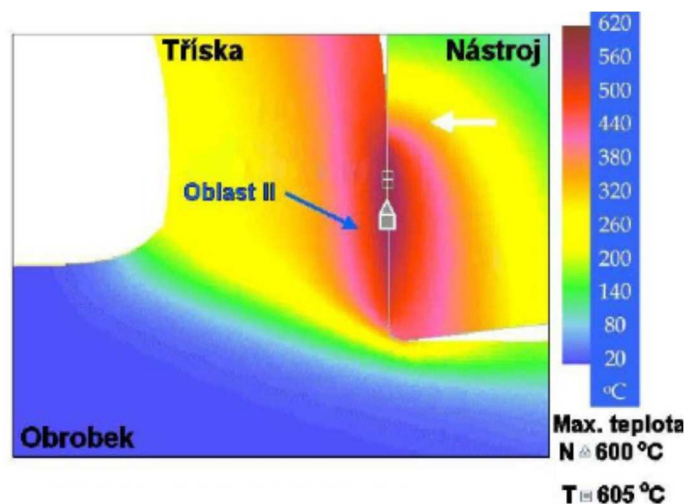
Vzniklé teplo se z fyzikálního principu může šířit vedením a konvekcí. Při řezném procesu se z oblastí vzniku šíří těmito způsoby do obrobku, nástroje, třísky a prostředí (viz obr. 1.16). Je nesmírně důležité, aby se vzniklé teplo odvedlo co nejrychleji z míst vzniku, aniž by nepříznivě ovlivňovalo obrobek a nástroj. Proto nejlepší způsob odvodu tepla je třískou. Odvod tepla nástrojem a třískou negativně ovlivňuje jejich vlastnosti, proto se mu chceme vyhnout. Tato tříska by měla být drobivá, aby se co nejméně dotýkala nástroje a tím mu co nejméně předala tepla. Dále se teplo šíří do prostředí, jedná-li se o vzduch je tento přenos tepla nedostatečný. Proto se využívá k odvodu tepla přídatné chlazení obráběcího procesu použitím chladicích kapalin. Tyto chladicí kapaliny pomáhají odvádět teplo z oblasti vzniku. Dále snižují řezný odpor, pomáhají odvádět třísku. Tím zvyšují trvanlivost nástrojů a následně jakost obráběného povrchu. Chladicí kapaliny pomáhají i svými ochrannými a konzervačními vlastnostmi uchovat obrobený povrch mezi operacemi. Je několik základních druhů chladicích kapalin [15,17,18,19]:

- vodné roztoky,
- řezné oleje,
- emulzní kapaliny,
- syntetické, polysyntetické kapaliny.



Obr. 1.16 Vznik a šíření tepla [19].

Vzniklé teplo při procesu řezání zvyšuje v místech jeho vzniku a okolí teplotu. Tato teplota nesmí v daných místech překročit určitou mez, kdy dojde ke změně vlastností obrobku a nástroje. Nebo může vést až k nevratnému poškození. Tato mezní teplota v oblasti vzniku tepla Q_{th} závisí na druhu obráběného materiálu, jestli obrábíme například hliník, měď ocel... V oblasti vzniku tepla $Q_{tč}$ závisí tato teplotní mez na druhu použitého nástrojového materiálu. Jestli použijeme například nástrojovou ocel, která snese nejmenší teplotu, nebo keramické nástrojové materiály například cermet, který sám nevede teplo a snese daleko vyšší teploty při obrábění. Teplota při řezném procesu závisí na řezných podmínkách a zejména na řezné rychlosti v_c . Při zvýšení této rychlosti dojde ke zvýšení teploty. Zvláště citlivá na velikost teploty je špička nástroje (viz obr. 1.17), kdy při překročení teplotní meze dojde ke změně vlastností materiálu v oblasti špičky a k následnému poškození [15,17,18,19,20].



Obr. 1.17 Teplotní zatížení nástroje [19].

Velikost teploty nebo tepla můžeme zjistit pomocí měření pomocí několika metod. Velikost tepla můžeme zjistit pomocí kalorimetrů. Kalorimetr je tepelně izolovaná nádoba, která je naplněná určitým množstvím kapaliny a má zabudovaný přesný teploměr. Kde měříme počáteční a konečnou teplotu. Velikost teploty můžeme měřit pomocí termočlánků, jak poloumělých, umělých nebo přirozených. Dále můžeme měřit teplotu pomocí termistorů, pyrometrů nebo teplotních indikátorů [17].

1.3.4 Obrobitelnost materiálu a řezivost nástroje

Obrobitelnost materiálu je vlastnost obráběného materiálu, která udává jeho schopnost být obráběn za přesně definovaných řezných podmínek. Tuto vlastnost posuzujeme z různých kritérií. Nejdůležitějším kritériem při hodnocení obrobitelnosti je velikost opotřebení bříty viz Taylorův vztah v další kapitole. Abychom mohly rozlišovat různé materiály, jestli jsou lépe či hůře obrobitelné. Proto byl zaveden takzvaný index obrobitelnosti, který lze získat po dosažení do vztahu (1.10). Pomocí tohoto indexu dělíme obráběné materiály do tříd obrobitelnosti. Těchto tříd obrobitelnosti je celkem 20 a jsou označeny číslem. Při čemž materiál zařazený ve třídě s nižším číslem má lepší obrobitelnost než materiál ve třídě s vyšším číslem. Tyto třídy obrobitelnosti nám říkají vždy obrobitelnost materiálu pro danou technologii obrábění. To znamená, že udávané hodnoty obrobitelnosti materiálu pro soustružení nemusejí platit při vrtání toho samého materiálu. Dále jsou materiály děleny do skupin. Těchto skupin je celkem 9. Tyto skupiny jsou značeny písmenem a oznamují nám, o jaký druh materiálu se jedná (například a jsou litiny, b jsou oceli ...) [13,17].

$$i = \frac{v_{cT}}{v_{cTet}} [-] \quad (1.10) [13]$$

Kde: i [-] - index obrobitelnosti,
 v_{cT} [mm.min⁻¹] - řezná rychlost, která odpovídá určité trvanlivosti bříty zkoumaného materiálu,

V_{cTet} [mm.min⁻¹] - řezná rychlost, která odpovídá stejné trvanlivosti břitu etalonového materiálu.

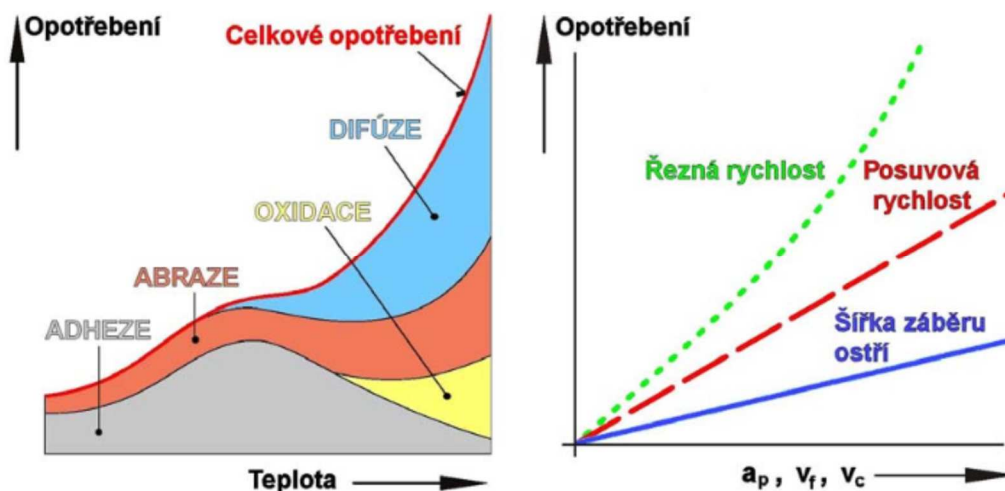
Řezivost nástroje je vlastností nástroje obrábět efektivně materiál při určitých řezných podmínkách. Tato řezivost je závislá na fyzikálních a mechanických vlastnostech daného nástrojového materiálu. Dále závisí na geometrii nástroje, řezných podmínkách, metody obrábění, řezném prostředí a hlavně závisí na obrobitelnosti obráběného materiálu. Řezivost nástroje můžeme hodnotit dle $T - v_c$ závislosti. Jedná se o závislost trvanlivosti nástroje na řezné rychlosti [21].

1.3.5 Opotřebení a trvanlivost nástroje

Při řezném procesu vzniká opotřebení nástroje. Dochází k němu důsledkem kontaktu nástroje s obrobkem a v důsledku styku nástroje se třískou. Dále zde dochází k tepelnému ovlivnění nástroje, což urychluje samotné opotřebení. Tedy k opotřebení nástroje dochází vždy během řezného procesu. Je, však důležité jakou rychlostí opotřebení vzniká a jaké velikosti může dosáhnout, aniž by podstatně ovlivnilo samotný řezný proces. Proto hodnotíme samotné opotřebení podle jistých kritérií. Velikost tohoto kritéria opotřebení závisí na druhu technologické operace. Jestli obrábíme hrubováním, nebo jestli obrábíme na čisto, kde jsou vyšší požadavky na jakost povrchu, a proto si nemůžeme dovolit vysoké opotřebení. Při hrubování zase požadujeme co nejvyšší životnost nástroje a na kvalitě povrchu nám moc nezáleží. V praxi se používá pojem trvanlivost břitu. Tato trvanlivost je doba, jakou může pracovat nástroj, než dosáhne již nepřijatelné meze opotřebení během určitého technologického procesu, která vede k výměně tohoto nástroje. Samotné opotřebení nástroje v důsledku styku s obrobkem a se třískou má více důvodů:

- abraze,
- adheze,
- difúze,
- křehký lom,
- oxidace,
- plastická deformace.

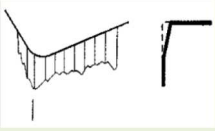
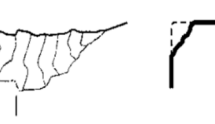
Podíl jednotlivých mechanismů opotřebení a vliv jednotlivých řezných parametrů na opotřebení (viz obr. 1.18) [13,21].



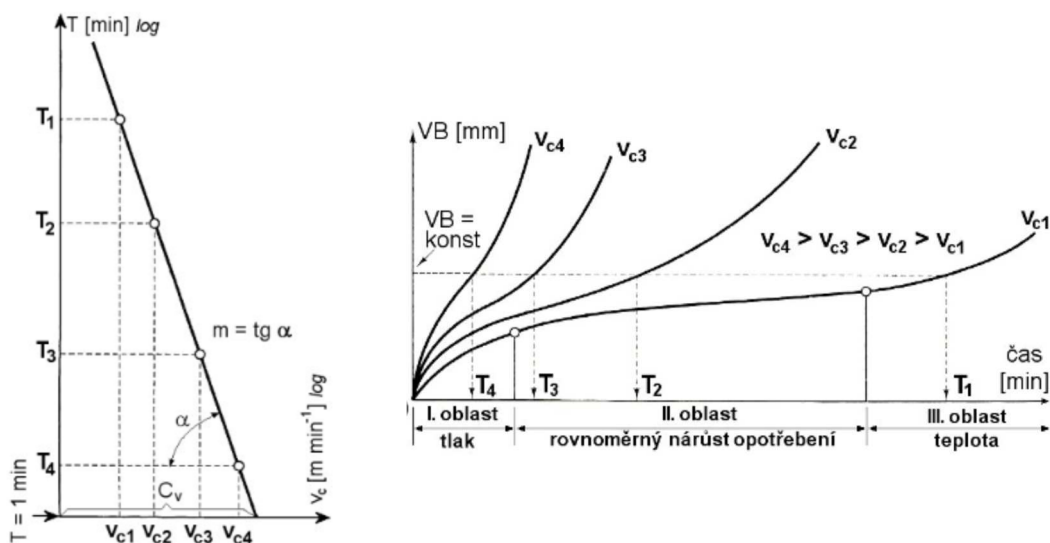
Obr. 1.18 Vliv teploty na mechanismy tvorby opotřebení a vliv jednotlivých řezných parametrů na opotřebení [21].

Abráze vzniká vlivem tvrdých částic obráběného materiálu, kdy dochází k brusnému otěru ploch nástroje. Na nástroji vzniká na hřbetu a na čele. Na hřbetu vzniká abrazivní opotřebení pohybem hřbetu nástroje po obrobku a na čele vzniká v důsledku pohybu třísky. Adhezivní opotřebení vzniká vytrháváním částic z povrchu materiálu nástroje. Toto vytrhávání probíhá v důsledku vzniklých spojů v podobě mikro svarů, které vznikají u materiálu si podobných chemickým složením působením vysoké teploty a tlaku. K adhezivnímu otěru dochází většinou při malých hodnotách řezných rychlostí a většinou u nástrojových ocelí. Difuzní opotřebení je opět opotřebení otěrem. K difuznímu opotřebení dochází při dosažení určité vysoké teploty ve stykových místech nástroje a obrobku, kdy přestupují částice hmoty nástroje do materiálu obrobku, kde tvoří nežádoucí sloučeniny. Jelikož k tomuto opotřebení dochází při vysokých teplotách tak se sním, nesetkáme při obrábění materiálu nástrojovými oceli. K difuznímu otěru dochází u nástrojů vyrobených z řezné keramiky, diamantu, slinutého karbidu... Opotřebení pomocí křehkého lomu vzniká následkem vysokého mechanického zatížení nástroje, kdy dojde k vylomení části nástroje. Opotřebení vzniklé oxidací je vlastně chemická reakce prvků na povrchu nástroje se vzdušným kyslíkem, kdy vzájemnou chemickou reakcí vznikají oxidy. Posledním druhem opotřebení je opotřebení vlivem plastické deformace. K tomuto opotřebení dochází při dosažení vysoké teploty ve stykových plochách, která vede ke snížení pevnosti nástroje a následně k plastické deformaci, tedy ke změně tvaru nástroje. Nejvíce jsou na opotřebení vlivem plastické deformace citlivé nástrojové a rychlořezné oceli. U nich dochází vlivem vysoké teploty k prudkému poklesu pevnosti nástroje. V praxi se nesetkáme pouze s jedním druhem opotřebení, vždy najdeme kombinaci více druhů. Rozlišujeme několik forem opotřebení. Tyto formy rozlišujeme v závislosti, na jakém místě na nástroji se nacházejí a jaký mají tvar (viz Tab. 1.2) [13,21,22].

Tab. 1.2 Formy opotřebení břitů nástrojů [22].

Formy opotřebení břitů nástrojů		
Opotřebení hřbetu břitu		Jedná se o představitele abrazivní formy opotřebení. Velké opotřebení hřbetu břitu zhoršuje jakost povrchu.
Opotřebení ve tvaru žlábků na čele břitu		Jedná se o opotřebení vzniklé působením difuze a abraze. Velké opotřebení ve formě žlábků vede ke změně tvaru třísky a ke změně působení řezných sil.
Plastická deformace břitu		Vniká působením vysokých teplot a řezných sil na nástroj. Vede k ovlivnění obráběného rozměru a mění odchod třísek.
Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitu		Jedná se o adhezní opotřebení a někdy je spojeno i s oxidačním opotřebením. Toto opotřebení ovlivňuje utváření třísky a může vést i k lomu břitu.
Hřbenové trhliny na ostří		Jedná se o druh únavového opotřebení. Bývá způsobeno častou změnou teplot. Tyto trhliny mohou vést k lomu břitu.
Únavový lom		Jedná se o opotřebení vzniklé neustálou změnou silového zatížení. Toto opotřebení vede k ovlivnění obráběného rozměru a ke zhoršení jakosti obráběné plochy.
Vydrolování ostří		Jedná se o opotřebení způsobované ve většině případů přerušovaným řezem, kdy dochází k vydrolování ostří.
Lom břitu nástroje		Jedná se o nejhorší druh opotřebení. Je velice nebezpečné a vede k ukončení obrábění tímto nástrojem.
Tvoření nárůstku		Toto opotřebení vzniká při určitých teplotách a řezných rychlostech. Tomuto opotřebení se dá zabránit vhodnou volbou řezných podmínek.

Trvanlivost nástroje je doba práce jednoho břitu nástroje, než dojde u tohoto břitu k opotřebení, které je přesně specifikováno. Toto mezní opotřebení je stanoveno kritériem opotřebení. Toto kritérium většinou bývá stanoveno hodnotou VB. VB je šířka fazetky opotřebení na hřbetě. To znamená, že v tomto případě je trvanlivost nástroje doba práce břitu, než dojde k opotřebení stanovené velikostí VB. Další kritérium může být například KT. KT je hloubka výmolu na čele. Trvanlivost bývá dána závislostí $T-v_c$ (viz obr. 1.19), což je závislost trvanlivosti nástroje na různých řezných rychlostech. Při malé řezné rychlosti bývá vysoká trvanlivost nástroje a naopak při velké řezné rychlosti je malá trvanlivost nástroje. V praxi mají nástroje doporučenou řeznou rychlost pro dodržení určité trvanlivosti [21,22].

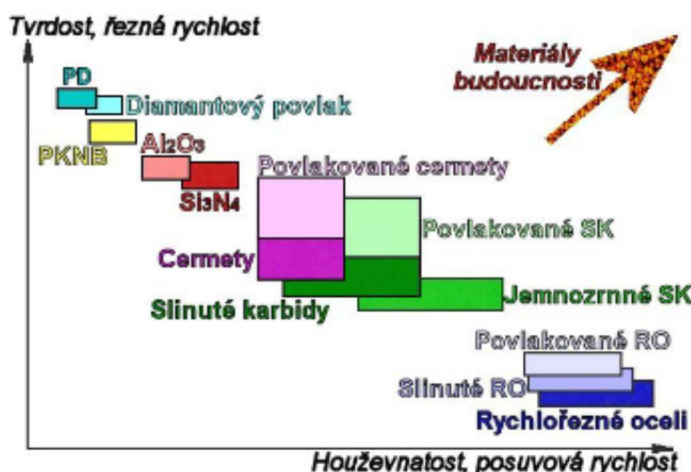


Obr. 1.19 Závislost $T-v_c$ a závislost VB na T pro rychlosti v_c [21].

1.4 Nástrojové materiály

Již uplynula řada let, kdy poprvé pračlověk začal opracovávat nástroje, zbraně. Tehdy k tomu opracování využíval pouhý kousek kamene. Z dnešního pohledu můžeme říci, že využíval primitivní nástroj z primitivního nástrojového materiálu s nepříliš efektivní geometrií. Postupem času člověk objevil kovy, nejprve neželezné, které byli lepší než kousek kamene, ale ještě nebyli to pravé. Později objevil jejich slitiny jako například bronz, který z tehdejšího pohledu poskytoval dostatečnou pevnost pro výrobu nejrůznějších nástrojů. Od použití bronzu na výrobu nástrojů vznikl termín doba bronzová. Postupem času objevil člověk slitinu železa s uhlíkem a vznikla ocel. Ocel poskytovala vyšší pevnost a tvrdost a postupně nahradila bronz pro výrobu zbraní a nožů. Postupnými pokusy a zkoumáním se objevily různé druhy ocelí. Z těchto druhů se nejlépe pro obrábění ocelí osvědčily takzvané nástrojové oceli. Podle starého značení ocelí patřily do třídy 19. Z této skupiny nástrojových ocelí byli nejlepší pro obrábění takzvané rychlořezné oceli, které se značily 19 8xx. S těmito rychlořeznými oceli se experimentovalo a hledal se způsob zefektivnění obráběcího procesu, až se došlo na hranici jejich možností z hlediska řezné rychlosti, pomocí níž se dá zefektivnit řezný proces. Rychlořezné oceli totiž naráželi na hranici svých fyzikálních vlastností, snášeli totiž jen omezenou teplotu, a čím vyšší je řezná rychlost, tím vyšší je

teplota v místě řezu. Na tento problém odpověděla v roce 1926 německá firma Krupp, která vynalezla a prodávala produkt WIDIA. Jednalo se o převratný způsob výroby nástrojového materiálu slinutím karbidů a pojiva. Odtud tuto skupinu nazýváme slinuté karbidy. Zpočátku se slinuté karbidy moc nepoužívaly, z důvodu vysoké ceny. Zlom přišel, až během druhé světové války kdy německá třetí říše měla nedostatek výrobních kapacit pro výrobu zbraní na frontu. Proto se zavádělo více a více obráběcích nástrojů ze slinutých karbidů, které umožňovaly obrábět vyššími řeznými rychlostmi. Tudiž se při stejné kapacitě strojů, dodalo více zbraní. Později se začaly využívat nástroje vyrobené z cermetů. Cermety jsou materiály vyrobené z části kovu a z části keramiky. Dále byly vyvinuty nástroje vyrobené pouze z keramiky. Používal se například oxid hlinitý Al_2O_3 a nitrid křemičitý Si_3N_4 . Posledními nástrojovými materiály jsou polykrystalický nitrid boru PKNB a polykrystalický diamant PD, které jsou ještě tvrdší než ostatní materiály a dovolují obrábět nejvyššími řeznými rychlostmi, ale jsou nejméně houževnaté a nedovolují obrábět vysokou posuvovou rychlostí. Nejlepší řezné materiály by byli takové, které by byli tvrdé, ale zároveň houževnaté což se v principu vylučuje (viz obr. 1.20) [21].



Obr. 1.20 Oblasti použití a vývoje řezných materiálů [21].

1.4.1 Nástrojové oceli

Nástrojové oceli byli první používané nástrojové materiály. Podle starého značení dle ČSN 41 9861 patřily do třídy 19. Dnes jsou podle nové normy ISO EN značeny HS. Nástrojové oceli jsou ve srovnání s ostatními nástrojovými materiály nejlevnější. Dají se využít tam, kde není zapotřebí vysoká produktivita, nízký výkon za nízkou cenu. Nástrojové oceli dělíme dle obsahu legujících prvků na:

- nelegované,
- legované,
- vysokolegované.

Nelegované nástrojové oceli obsahují malé množství legujících prvků a to maximálně 1% všech legujících prvků dohromady. Legujícími prvky jsou v tomto případě Mn, Si a Cr. Obsah uhlíku se pohybuje kolem (0,5-1,5) %.

Legované nástrojové oceli obsahují střední množství legujících prvků a to (10-15) % všech legujících prvků dohromady. V tomto případě jsou přítomné legující prvky zastoupeny v jednotkách procent. Legujícími prvky jsou W, Mo, V, Si, Mn, Ni a Cr. Obsah uhlíku se pohybuje kolem (0,8-1,2) %.

Vysokolegované nástrojové oceli obsahují velké množství legujících prvků a to nejméně 30 % všech legujících prvků dohromady. V tomto případě jsou přítomné legující prvky zastoupeny v až desítkách procent. Legujícími prvky jsou W, Mo, V, Si, Co a Cr. Obsah uhlíku se pohybuje kolem (0,7-1,3) % [21,23].

Nejvíce používanými nástrojovými ocelmi jsou rychlořezné oceli. Rychlořezné oceli jsou vysokolegované nástrojové oceli dříve značeny 19 8xx dnes HSS. Rychlořezné oceli mají ve srovnání s ostatními nástrojovými materiály nejvyšší houževnatost ale nejmenší tvrdost. To dovoluje vyšší posuvovou rychlost ale menší řeznou rychlost. Tvrdost vysokolegovaných ocelí je dána zakalením na martenzit a přítomností karbidů legujících prvků (chromu, wolframu molybdenu a vanadu), které se slučují s přítomným uhlíkem. Dále vysoký počet legujících prvků zaručuje vysokou prokalitelnost. Rychlořezné oceli mohou být použity při obrábění do teploty 600 °C. Existuje několik druhů rychlořezných nástrojových ocelí jako například běžná rychlořezná ocel, kobaltová rychlořezná ocel a spékaná kobaltová rychlořezná ocel [21,23,24].

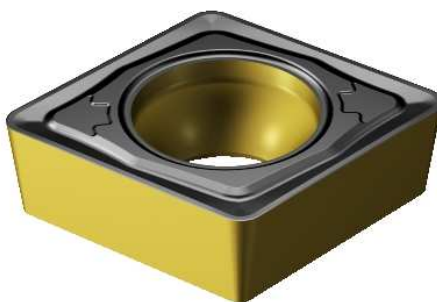
Pro lepší mechanické vlastnosti se nástrojové oceli ještě tepelně zpracovávají. Toto tepelné zpracování spočívá v žíhání na odstranění vnitřního pnutí, dále v kalení a následném popouštění. Výsledkem je nástroj s tvrdým povrchem, který odolává lépe opotřebení a zároveň má houževnaté jádro což pomáhá pevnosti nástroje [25].

1.4.2 Slinuté karbidy

První slinuté karbidy by vůbec nevznikly, kdyby se vědci na konci 19. století nepokusili vyrobit umělý diamant pomocí dalšího nového vynálezu – obloukové pece. Náhodou při pokusech objevili nový materiál, takzvaný karbidu wolframu WC, který se vyznačoval vysokou tvrdostí. S těmito nově vytvořenými karbidy se experimentovalo až roku 1925 vědec pan Karl Schröter se svými spolupracovníky vynalezl první slinutý karbid. První průmyslové slinuté karbidy byly vyvinuté a uvedené na trh německou firmou KRUPP v roce 1926 tehdy pod názvem WIDIA. Slovo WIDIA znamenalo sloučeninu slov Wie Diamant, mělo znázorňovat vlastnost slinutého karbidu, že je tvrdý jako diamant. Jednalo se o spojení materiálů karbidu wolframu a kobaltu WC+Co. Slinuté karbidy jsou nástrojové materiály vyrobené slinováním kovů. Slinování kovů je lisování tvrdých karbidů s měkkým pojivem za vysokého tlaku a teploty. Nejprve se vyrobí polotovár ve formě prášku karbidu. Používají se karbidy wolframu WC, titanu TiC, tantalu TaC, niobu NbC, vanadu VC a dalších. Dále se vyrobí prášek z měkkého materiálu například z kobaltu, který bude sloužit jako pojivo. Poté se smíchá prášek nějakého karbidu, podle toho jaké požadujeme vlastnosti, s práškem pojiva. Tato směs je takzvaně formována, tedy lisována, nebo vytlačována do tvaru válečku. Poté následuje před slinování. Před slinování je tepelná úprava na teplotu (700-850) °C.

V případě potřeby dochází k úpravě tvaru tohoto polotovaru. Pak následuje samotné slinování. Slinování se provádí (1350-1650) °C [21,22,23,26].

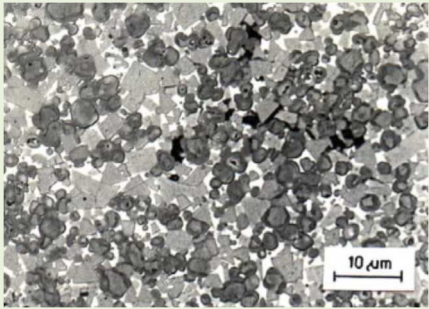
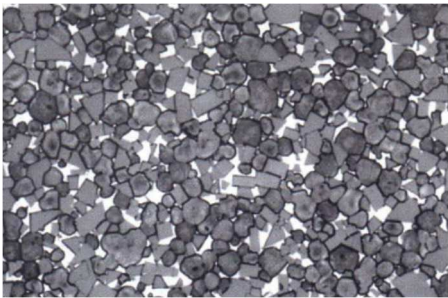
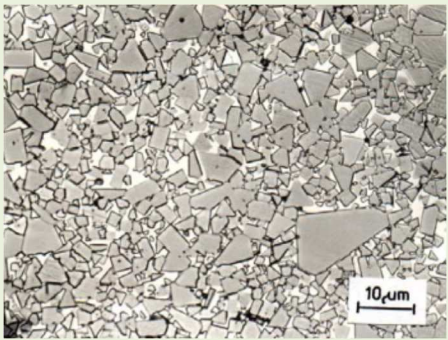
Slinuté karbidy s pro své vlastnosti patří v dnešní době k nejpoužívanějším nástrojovým materiálům, tedy ještě ve spojení s povlakem (povlakované slinuté karbidy). Slinuté karbidy jsou méně houževnaté ale více tvrdé a také odolnější proti opotřebení než rychlořezné oceli. Déle odolávají vyšším teplotám při obrábění, vydrží teploty do 900 °C oproti teplotám do 600 °C u rychlořezných ocelí. Proto slinuté karbidy mají vyšší trvanlivost a zároveň umožňují obrábět vyšší řeznou rychlostí. To vede při použití slinutých karbidů k vyšší produktivitě výroby. V praxi jsou nejčastěji použity slinuté karbidy ve formě vyměnitelných břitových destiček VBD (viz obr. 1.21) ale mohou být použity i v podobě pájených břitových destiček nebo i v podobě celého nástroje ze slinutého karbidu. Ale tato třetí možnost se moc nepoužívá z důvodu ekonomické nevhodnosti konstrukce, jen v případech kdy je to technologicky či konstrukčně výhodnější. Je mnohem výhodnější použít drahý slinutý karbid jen v řezné části nástroje a zbytek konstrukce vyrobít z obyčejné a zároveň levnější konstrukční oceli. Tuto výhodu představuje použití VBD, kdy je tato destička vyrobena ze slinutého karbidu a držák VBD je vyroben z levné konstrukční oceli. Navíc VBD má většinou i více břitů což ještě více ekonomicky výhodnější [21,23,26].



Obr. 1.21 VBD od firmy SANDVIK Coromant [27].

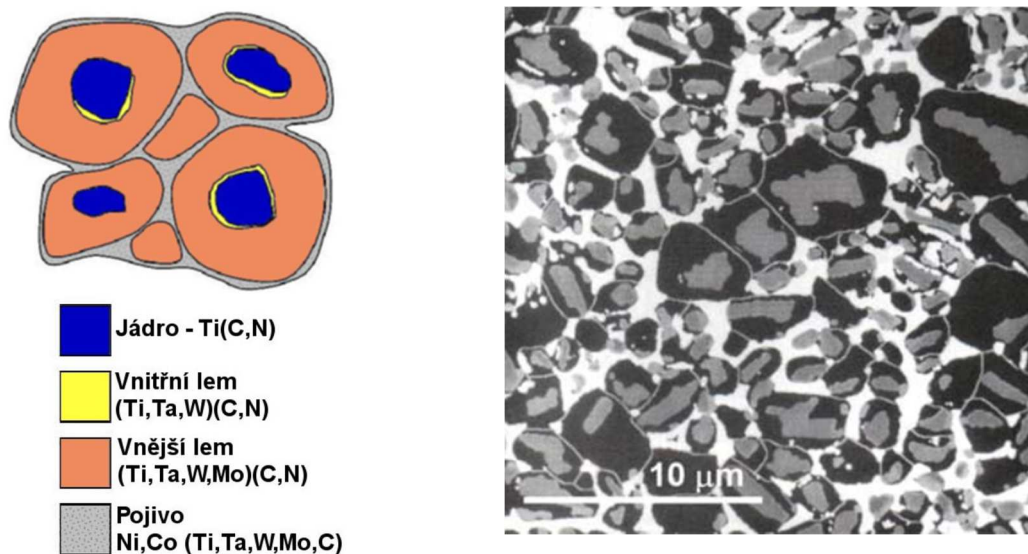
Slinuté karbidy bývají značeny dle mezinárodní normy ISO 513 (viz Tab. 1.3). Toto značení rozděluje slinuté karbidy dle mechanismu opotřebení, způsobu zatížení, tvaru vznikající třísky a druhu obráběného materiálu během řezného procesu do několika skupin. Skupiny slinutých karbidů jsou značeny písmenem a dvěma doplňkovými čísly. Použitá písmena jsou: P, M, K, N, S a H. Doplňková čísla vyjadřují houževnatost a odolnost vůči otěru. Nejmenší číslo značí velkou odolnost vůči otěru, malou houževnatost a vysoké číslo naopak malou odolnost vůči otěru a vysokou houževnatost. Používají se čísla 1 až 50 [21,22,23,26].

Tab. 1.3 Dělení slinutých karbidů do skupin ISO 513 [21,22,27].

Skupina	Příklad makroskopické struktury slinutého karbidu	Příklady použití
P		P je skupina slinutých karbidů, která se používá se u obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku. Jsou to například oceli, ocelolitiny, temperované litiny a korozivzdorné oceli.
M		M je skupina slinutých karbidů, která se používá se u obrábění materiálů, které tvoří středně dlouhou až dlouhou třísku. Jsou to například austenitické korozivzdorné oceli, legované druhy litin, manganové oceli, žárovzdorné materiály a další.
K		K je skupina slinutých karbidů, která se používá se u obrábění materiálů, které tvoří krátkou třísku. Jsou to například šedé litiny, kalené oceli a některé neželezné materiály jako například plasty, hliník a další.
N	N je skupina slinutých karbidů, která se používá pro obrábění neželezných materiálů. Jedná se o hliník a měď a jejich slitiny jako například bronz. Dále se používá pro obrábění plastů a kompozitních materiálů.	
S	S je skupina slinutých karbidů, která se používá pro obrábění speciálních druhů slitin, jako například slitin titanu, niklu nebo kobaltu.	
H	S je skupina slinutých karbidů, která se používá pro obrábění ocelí s vysokou pevností a tvrdostí.	

1.4.3 Cermety

Cermety jsou materiály vyrobené z části z kovu a části keramiky. Jejich struktura se skládá z tvrdého jádra, které je obaleno opět tvrdým materiálem a spojeno s dalšími podobně obalenými jádry měkkým pojivem (viz obr. 1.22). Svůj název získaly z anglických slov CERAMIC označující keramiku a METAL označující kov. První cermety vznikly roku 1929, tedy čtyři roky po vynalezení slinutých karbidů, jenomže nebyly v praxi použitelné. První cermety byly křehké a na tehdejší poměry těžce vyrobitelné. Postupem času se zapracovalo na jejich složení, velikosti částic a technologii výroby. Výsledkem byl materiál, který má vysokou odolnost vůči opotřebení na hřbetu, dále vůči tvoření opotřebení ve tvaru žlábků na čele. Cermety mají minimální sklon ke tvorbě nárůstku, jsou vysoce chemicky stabilní. Odolávají vysoké teplotě, ještě vyšší než při použití slinutých karbidů. Dále mají minimální sklon k opotřebení vzniklému oxidací. Cermety jsou tvrdší, ale méně houževnaté oproti slinutým karbidům. Jejich vyšší tvrdost a odolnost dovoluje obrábět materiál ještě vyšší řeznou rychlostí ale menší posuvovou rychlostí. Další výhodou je, že cermety jsou levnější oproti slinutým karbidům. Postupným vývojem se stávají stále odolnější a výsledkem je, že už se nepoužívají pouze k dokončovacím obráběním, ale mohou být použity i při hrubovací operaci, ale musíme volit menší posuvy s ohledem na jejich křehkost. Přesto jejich výhody se používají většinou u dokončovacích operací. Cermety by se neměly používat u nestabilního obrábění, jedná se hlavně o obrábění s přerušovaným řezem [21,22].



Obr. 1.22 Schéma struktury cermetu a skutečná makroskopická struktura [21].

Cermety jsou stejně jako slinuté karbidy vyráběny metodou práškové metalurgie, proto se vedly spory o tom, jestli cermety také nejsou slinutými karbidy. Podstatný rozdíl spočívá v použití karbidu titanu, nitridu titanu a karbonitridu titanu u vytvoření jádra cermetu oproti použití karbidu titanu u slinutých karbidů. Základní sloužení cermetů bývá $\text{TiC} + \text{TiN} + \text{Ni}$ a někdy Mo [21,22].

1.4.4 Keramické řezné materiály

První keramické řezné materiály vycházely z použití oxidu hlinitého Al_2O_3 . Jedná se o bílý krystalický prášek, který se v přírodě vyskytuje podobě nerostu známého jako korund. Korund je z mechanického hlediska velmi tvrdým nerostem. O použití Al_2O_3 , jako řezného materiálu se začalo diskutovat již na počátku 20. století. Mezi prvními kdo začali používat keramické materiály, jako nástrojové byli Britové následováni Němci. V dnešní době jsou keramickými řeznými materiály označovány velké počty různých materiálů. Už se nepoužívají řezné keramiky jen na bázi Al_2O_3 ale i na bázi nitridu křemičitého Si_3N_4 . Řezné nástroje vyrobené jen z Al_2O_3 nebo Si_3N_4 se vyznačují vysokou tvrdostí ale bohužel i vysokou křehkostí. Usilovalo se o snížení této křehkosti a přišlo se na to, že přidáním určitých prvků jako například chromu, niklu a molybdenu nebo pomocí vláken karbidů titanu a křemíku, dochází ke zvýšení houževnatosti a tím ke snížení křehkosti [21,22,26].

Keramické řezné materiály se vyznačují vysokou tvrdostí a teplotní odolností. To umožňuje obrábět těmito materiály vysokou řeznou rychlostí i za vysokých teplot. Udává se, že tyto materiály jsou schopné obrábět do teploty až $1200\text{ }^\circ\text{C}$, což je pro předešlé nástrojové materiály nedosažitelná mez. Díky své tvrdosti má řezná keramika vysokou odolnost vůči opotřebení. Ale protože je velice křehká, umožňuje obrábět jen malými posuvovými rychlostmi a je náchylná na opotřebení ve formě křehkého lomu [21,22,26].

Řeznou keramiku můžeme rozdělit na dvě základní skupiny podle chemického složení základní báze na [21,22,26]:

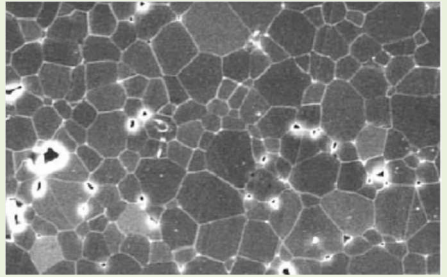
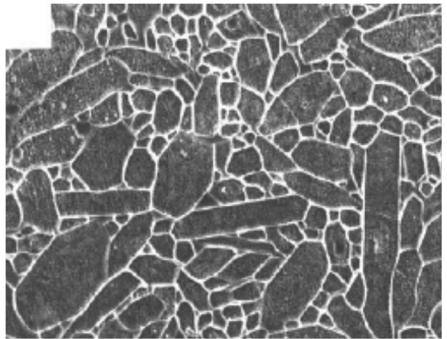
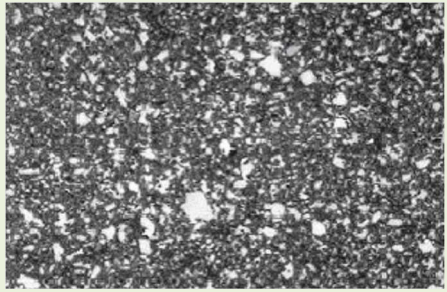
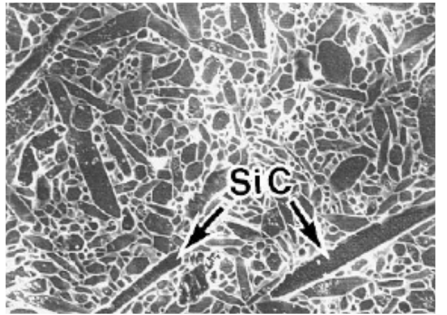
- řeznou keramika na bázi oxidu hlinitého Al_2O_3 ,
- řeznou keramika na bázi nitridu křemičitého Si_3N_4 .

Dále rozlišujeme řeznou keramika na bázi oxidu hlinitého Al_2O_3 na tři skupiny podle čistoty základního složení. Rozlišujeme na [21,22,26]:

- čistou - pouze báze Al_2O_3 ,
- polo směsnou - přidáním dalších oxidů
- směsnou – přidáním dalších oxidů a karbidů.

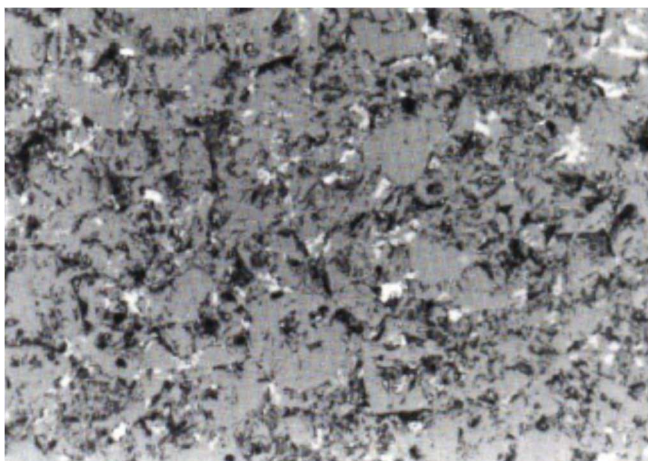
Řezné keramické materiály se opět používají ve většině případů v podobě vyměnitelných břitových destiček. Vlastnosti vybraných keramických řezných materiálů a jejich makrostruktura (viz Tab. 1.4).

Tab. 1.4 Vybrané řezné keramické materiály [21,22,26].

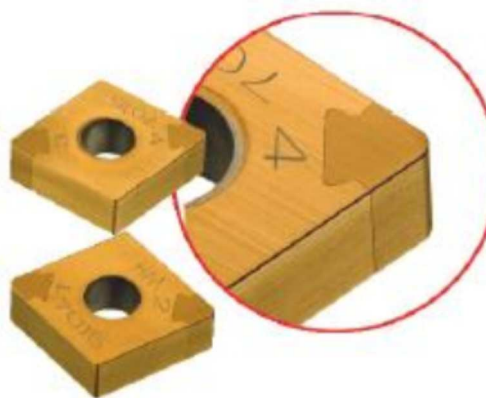
Materiál	Makroskopická struktura keramického řezného materiálu	Vlastnosti
Čistá keramika Al_2O_3		S přihlédnutím k ostatním keramickým materiálům má poměrně malou pevnost, houževnatost a malou tepelnou vodivost. V případě že nastanou nepříznivé řezné podmínky, hrozí vylomení břitu.
Nitridová keramik Si_3N_4		Nitridová řezná keramika má oproti keramice na bázi Al_2O_3 lepší houževnatost a snáší lépe teplotní šoky. Dále má vysokou pevnost za vysoké teploty ale menší chemickou stabilitu oproti keramice na bázi Al_2O_3 . Využívá se jí při obrábění šedé litiny, kdy je zapotřebí odebrat velké množství materiálu.
Směsná keramika $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$		Směsná keramika na bázi Al_2O_3 lépe snáší teplotní šoky než čistá keramika na stejné bázi. Dále má lepší tepelnou vodivost a je více odolná vůči opotřebení lomem, má i vyšší houževnatost. Tyto vlastnosti získává směsná keramika v důsledku přidání kovové fáze, v tomto případě TiC.
Keramika Si_3N_4 vyztužená SiC		Jedná se nitridovou řeznou keramiku, která je vytvrzená takzvaným viskerem. Jedná se vlákna karbidu křemíku, která razantně mění vlastnosti materiálu. Tento materiál je houževnatější a zároveň pevnější v tahu. Dále je odolnější vůči opotřebení a tepelnému šoku. Má i vyšší pevnost za vysokých teplot než nevyztužené keramické materiály

1.4.5 Polykrystalický kubický nitrid boru

Polykrystalický kubický nitrid boru bývá značen PKNB (viz obr. 1.23). Jedná se o uměle vyrobený řezný materiál vyznačující se vysokou tvrdostí, je dokonce druhou největší po polykrystalickém diamantu. Základními stavebními prvky PKNB jsou atomy boru a dusíku. PKNB díky své vysoké tvrdosti a teplotní odolnosti se používá pro obrábění při vysokých řezných rychlostech, ještě vyšších než u keramických řezných materiálů. Dále má vysokou odolnost vůči opotřebení a odolnost vůči tepelným rázům. Jeho nevýhodou je jeho nízká houževnatost a vysoká křehkost. Proto se musí volit ještě menší posuvové rychlosti oproti řezné keramice. Pro zvýšení houževnatosti se využívají PKNB jako kompozity. Jedná se o spojení PKNB s kovovým pojivem. Rozlišujeme dvě třídy kompozitu. První třída kompozitu má obsah PKNB (40-65)%. Druhá třída kompozitu má obsah PKNB (40 - 100)% [21,22,26, 28].



Obr. 1.23 Makroskopická struktura PKNB [21].



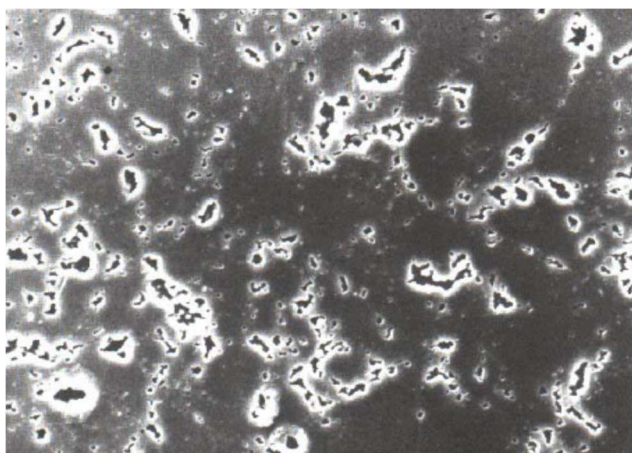
Obr. 1.24 VBD z kompozitu PKNB [28].

Polotovarem pro výrobu PKNB jsou monokrystaly kubického nitridu boru KNB. Nejprve je tedy nutné vyrobit tyto monokrystaly KNB. Tyto vyrobené monokrystaly jsou narovnány do formy, kde probíhá následné slinování za vysokého tlaku a teploty. Výsledkem slinování jsou polotovary PKNB, které jsou následně rozřezány na požadovaný tvar. Nakonec probíhá broušení břitu. Buď se vyrábějí celé VBD, nebo jen roubíky které jsou pájeny na špičku VBD (viz obr. 1.24). Výroba roubíku, který se následně napájí na konec VBD má svůj ekonomický význam. Protože výroba PKNB je ekonomicky nákladná, je mnohem výhodnější používat PKNB jen tam, kde skutečně probíhá řezný proces [21,22,26].

VBD a jiné další nástroje vyrobené z PKNB se používají pro obrábění u materiálů tvrdších 48 HRC. Důvodem je, že u měkkých materiálů paradoxně dochází k velkému opotřebení břitu. Dá se říci, že čím je tvrdší obráběný materiál, tím dochází k menšímu opotřebení břitu nástroje. Samozřejmě platí, že obráběný materiál nesmí být tvrdší, jak materiál nástroje. Dále je výhodou, když břit nástroje vyrobený z PKNB je opatřený fazetkou a je vhodně zvolena nástroje vzhledem k obrobku. Dále je důležitý veliký rádius špičky a tuhost soustavy stroj, obrobek a nástroj. Při použití nástroje se břitem z PKNB bývá dosažena dobrá kvalita obrobené plochy. To znamená, že v některých případech může být vynecháno broušení, místo něho postačí soustružení s nástrojem se břitem z PKNB [21,22,26].

1.4.6 Polykrystalický diamant

Polykrystalický diamant bývá značen PKD. Jedná se o uměle vyrobený řezný materiál vyznačující se největší tvrdostí ze všech uměle vyrobených nástrojových materiálů. Tvrdší než PKD je jen přírodní diamant, který pro svou vysokou cenu je takřka nepoužitelný. Struktura PKD (viz obr. 1.25) se skládá z diamantových částic, jejichž základním stavebním prvkem je atom uhlíku, a z kovového pojiva držících tyto diamantové částice pohromadě. PKD umožňuje díky své nejvyšší tvrdosti obrábět materiály nejvyššími řeznými rychlostmi ze všech nástrojových materiálů. Ovšem PKD má nejnižší houževnatost a velmi vysokou křehkost. To znamená, že se musí volit ještě menší posuvové rychlosti. Vysoká tvrdost zaručuje vysokou odolnost vůči opotřebení otěrem. Nepravidelný tvar zrn monokrystalu diamantu a jejich nahodilé uspořádání v PKD zaručuje odolnost vůči iniciaci lomu. Proto má PKD ve všech směrech stejnou odolnost vůči opotřebení. Nevýhodou PKD je ovšem chemická nestálost za vysokých teplot. Udává se, že při obrábění nástrojem z PKD nesmí teplota překročit 600 °C [21,22,26,29].



Obr. 1.25 Makroskopická struktura PKD [21].



Obr. 1.26 VBD se břitem z PKD [29].

Polotovarem pro výrobu PKD jsou monokrystaly diamantu. Tyto monokrystaly se vyrábějí takzvanou diamantovou syntézou uhlíku z kovových slitin za vysokého tlaku a teploty. Tyto monokrystaly diamantu jsou smíchány s částicemi kovu, který slouží jako pojivo. Takto vyrobená směs je narovnána do formy podobně jako u výroby PKNB. Následně probíhá slinování za vysoké teploty a tlaku. Výsledkem slinování je požadovaný tvar polotovaru PKD. Ve většině případů se používá PKD u výroby VBD. Opět se z ekonomických ale i technologických důvodů nevyrábí celá VBD z PKD. Z PKD je vyráběna jen funkční část v podobě břitu VBD (viz obr. 1.25), který je na pevně připájen ke zbytku VBD vyrobeného ze slinutého karbidu. Tato kombinace PKD a slinutého karbidu zvyšuje houževnatost a odolnost VBD vůči tepelným a rázovým šokům [21,22,26].

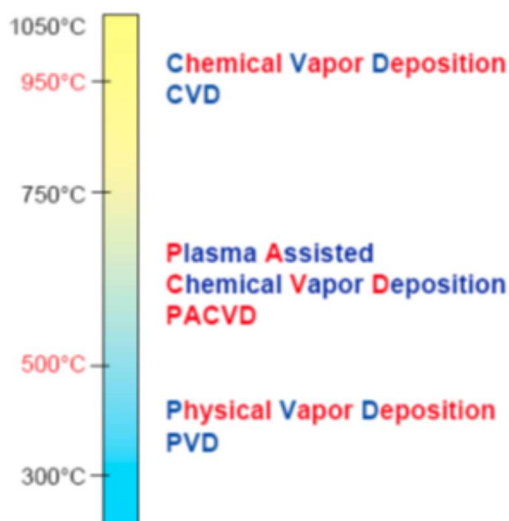
PKD se využívá pro jemné obrábění nebo pro dokončovací obrábění. Nástroje z PKD vyžadují stabilní obráběcí podmínky a tuhé stroje a nástroje. Nedoporučuje se použití pro obrábění ocelí z důvodu, že PKD je složen z atomu uhlíku a ten má vysokou afinitu k železu. Tedy nástroj se opotřebuje, protože atomy uhlíku z nástroje vyrobeného z PKD přestupují do obráběné oceli, kde ve tříse nebo v povrchu obrobku zvyšují obsah uhlíku. Proto se nástroje vyrobené z PKD využívají pro obrábění neželezných kovů a slitin jako například

hliníku a mědi. Dále by se nástroje z PKD neměli používat pro obrábění pro houževnaté a velmi pevné materiály [21,22,26].

1.5 Metody povlakování nástrojů

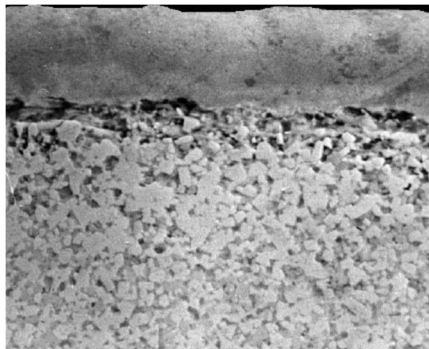
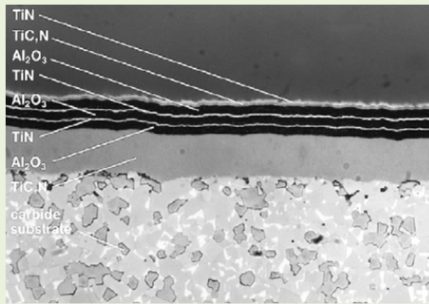
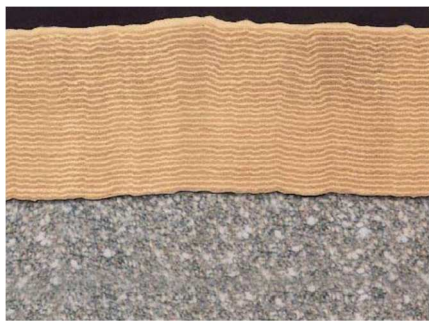
Každý nástrojový materiál je předurčen svým chemickým složením a mechanickými vlastnostmi k určitému použití. Tedy jestli je tento nástrojový materiál tvrdý, křehký nebo houževnatý. Toto použití se u každého nástrojového materiálu liší velikostí přípustné maximální teploty, maximální řezné a posuvové rychlosti při řezném procesu. Tedy větší jak maximální hodnoty nesmíme dosáhnout, jinak hrozí nevratné poškození nástroje. Jinak řečeno každý nástrojový materiál je použitelný do určité meze. Byla snaha tuto limitní mez překročit a s dosavadními nástrojovými materiály dosáhnout lepších výsledků. Tedy dosažení vyšších řezných, posuvových rychlostí bez porušení nástroje. Tato snaha se vyplatila vědcům z firmy Sandvik Coromant, kteří v roce 1969 přišli na způsob zlepšit jejich vlastnosti. Princip spočíval v nanesení povlaku z tvrdšího materiálu na základní nástrojový materiál, jako první byl povlak nanesen na slinutý karbid. Tímto bylo dosaženo tvrdého povrchu nástroje, který odolával lépe opotřebení a zároveň umožňoval dosažení vyšších řezných, posuvových rychlostí za vyšších teplot. Tímto se zvýšila efektivita řezného procesu. Povlaky se nanášejí na všechny druhy nástrojových materiálů. Nanesený povlak od svého objevení až po současnost prošel několika fázemi vývoje. Tyto fáze vývoje rozdělujeme na 4 generace povlaku (viz Tab. 1.5) [21,22,26].

Z pohledu způsobu nanášení povlaku rozlišujeme dvě základní metody CVD a PVD. První byla vyvinuta metoda CVD na konci 60. let. Jako druhá byla vyvinuta metoda PVD počátkem 80. let. Rozdíl těchto metod spočívá jak v principu nanášení povlaku, tak i ve velikosti pracovní teploty (viz obr. 1.27), která energeticky ovlivňuje ekonomiku procesu.



Obr. 1.27 Teplotní diagram pracovních teplot povlakovacích metod [30].

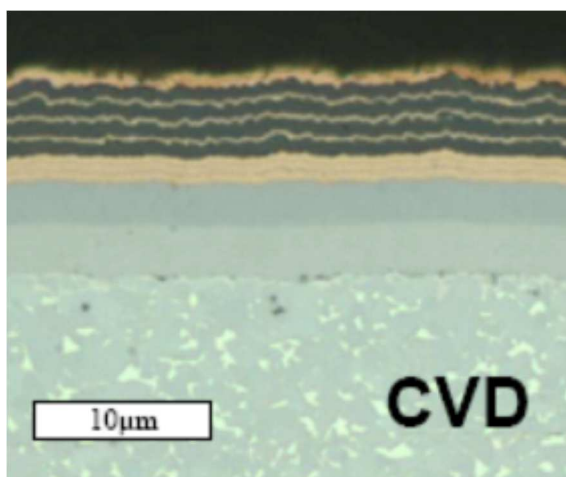
Tab. 1.5 Generace povlaků a jejich vlastnosti [21].

Generace povlaku	Makroskopická struktura povlaku	Vlastnosti
1.		Jedna vrstva povlaku se špatnou soudržností, tloušťka okolo 7 μm používal se většinou karbid titanu TiC.
2.		Stále se jednalo o jednovrstvý povlak ovšem o větší tloušťce tentokrát až 13 μm . Dále vlivem pokroku v technologii nanášení povlaku nehrozilo na rozdíl od první generace k odlupování tohoto povlaku. V druhé generaci povlaků se využívaly povlaky typu TiC, TiCN a TiN.
3.		U třetí generace se již jednalo o vícevrstvý povlak, ovšem jen několik. Nejprve byly nanášeny vrstvy materiálu s dobrou přilnavostí ale malou odolností vůči opotřebení. Jako poslední byly nanášeny vrstvy vysoce tvrdého materiálu, u kterého nevadila horší přilnavost. U povlaků třetí generace se používaly vrstvy povlaků typu, TiC-TiCN-TiN, TiC-Al ₂ O ₃ -TiN, TiC-TiN, TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN, TiC-Al ₂ O ₃ .
4.		U povlaků čtvrté generace se opět používalo více vrstev povlaků, ovšem tentokrát se jich používalo více než 10. Díky ve vývoji technologie nanášení povlaků byly tyto vrstvy povlaků tenčí a neměly tak výrazné přechody mezi jednotlivými vrstvami. U čtvrté generace se používaly vrstvy povlaku typu TiC-TiCN-TiN, TiC-Al ₂ O ₃ -TiN, TiC-TiN, TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN, TiC-Al ₂ O ₃ .

1.5.1 Metoda CVD

Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition) je vlastně chemické napařování z plynné fáze, které probíhá za vysokých teplot v rozmezí (900 – 1200)°C. Výhoda této metody spočívá v dobré adhezi mezi základním materiálem a povlakem. Dále je možno nanést větší vrstvu povlaku a to o tloušťce 10 - 15 μm i na součástky složitějších tvarů. Při této metodě lze využít různé typy povlaků. Dále je možno metodou CVD nanášet vícevrstvé povlaky (viz obr. 1.28). Nevýhodou je, že dochází k ovlivnění podkladové vrstvy a to snížením ohybové pevnosti. Dále se v povlaku nacházejí zbytková tahová napětí. Velikou nevýhodou metody CVD je neschopnost nanášení povlaků na ostré hrany. Důvodem je vysoká teplota, při níž dochází k nanesení povlaku. Tato teplota vede k deformaci ostré hrany [21,22,26].

Od konce 80. let se postupně od této metody z důvodu nedostatků a nevýhod ustupuje. Do této doby to byla nejpoužívanější metoda pro povlakování slinutých karbidů. Vývojem technologií se hledal způsob odstranění nedostatků této metody. Výsledkem byl vývoj metody PCVD nebo také PACVD. Jedná se o plasmaticky aktivované napařování z plynné fáze. Metoda PCVD snížila vliv hlavní nevýhody metody CVD a to vliv vysoké teploty. Tato metoda PCVD pracuje při rozsahu teplot (400 – 600)°C [21,26].

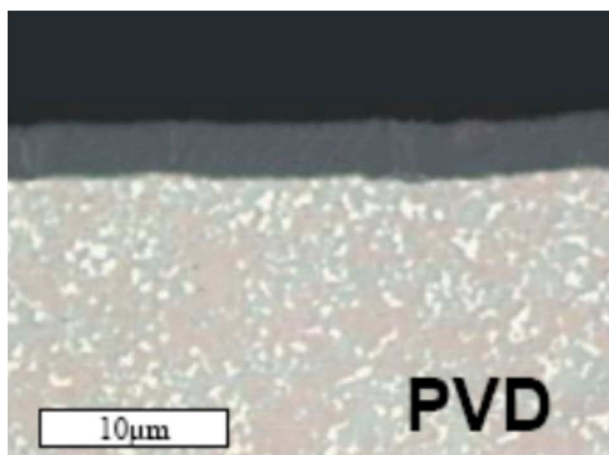


Obr. 1.28 Vícevrstvý povlak nanesený CVD metodou [30].

1.5.2 Metoda PVD

Metoda PVD (Physical Vapour Deposition) je vlastně fyzikální napařování z plynné fáze, které u této metody probíhá za nízkých pracovních teplot v rozmezí (180 – 600)°C oproti vysoké teploty u CVD a za středního až vysokého vakua. Vlivem nízkých pracovních teplot nedochází k nežádoucímu tepelnému ovlivnění základního materiálu. V naneseném povlaku metodou PVD na rozdíl od metody CVD vzniká zbytkové tlakové napětí, které nemá špatný vliv na zbytkové namáhání povlaku. Další výhodou je schopnost povlakovat i ostré hrany. Mezi nevýhody patří větší náročnost na přípravu povrchu pro povlakování, povrch je nutné odmastit a očistit od nečistot. Touto metodou se nanáší povlaková vrstva o menší tloušťce oproti metodě CVD a to okolo 5 μm . Další nevýhodou je složitost celého výrobního zařízení. Důvodem je dosažení vakua při povlakování metodou PVD. Déle je nutné povlakovaným

tělesem pohybovat, aby došlo k rovnoměrnému nanesení povlaku. Nanesený povlak metodou PVD (viz obr. 1.29) [21,26].



Obr. 1.29 Povlak nanesený PVD metodou [30].

Existuje několik způsobů nanášení povlaků PVD metodou. Jedná se o nanášení povlaku buď napařováním, nebo naprašováním anebo způsobem iontové implementace. Každý z těchto způsobů nanášení povlaků má své výhody a nevýhody.

1.5.2.1 Metoda PVD – napařování povlaku

U PVD metody nanášení povlaku napařováním se využívá vypařování nanášeného materiálu z terčů. Samotné odpařování nanášeného materiálu probíhá pomocí ohřevu. Ohřev může probíhat pomocí odporového zdroje, indukčního zdroje, laseru, elektrického oblouku nebo paprsku elektronů. Není jedno, jaký druh ohřevu použijeme, každý z těchto způsobů ohřevu má své výhody a nevýhody (viz Tab. 1.6). Takto odpařený materiál kondenzuje na námi požadované ploše tělesa, které se pohybuje pro lepší nanesení povlaku. Vše jak je běžné u metody PVD probíhá z vakua [26].

Tab. 1.6 Výhody a nevýhody různých způsobů ohřevů u metody napařování povlaku - PVD [26].

Způsob ohřevu	Výhody +	Nevýhody -
Odporový	+ velická výhoda je cena, jedná se o spolu s elektronovým ohřevem o nejlevnější metodu PVD + nevadí, když zdrojem odpařovaného materiálu je tuhé těleso, jakéhokoliv tvaru + deponování velmi čistých povlaků z velmi čistého zdrojového materiálu	- nehodí se pro depozici více druhů slitin a sloučenin - velice malé využití zdrojového materiálu - jsou zapotřebí velké vakuové komory

Laser	+ velická výhoda laseru je, že produkuje složky s vysokou energií, které následně zlepšují kvalitu povrchu	- velmi nízká energetická účinnost - může dojít ke snížení kvality povrchu v důsledku rozstřikovacího efektu - obtížné hledání správné vlnové délky
Elektrický oblouk	+ výhodou je možnost odpařovat všechny elektricky vodivé materiály + velice malé ovlivnění tepelnou radiací u katodické obl. depozice + nízké znečištění terče	- nemůžeme odpařit elektricky nevodivé materiály - vysoké ovlivnění tepelnou radiací u anodické obl. depozice - znečištění povlaku kapénkami vyvrženými z katody
Svazek elektronů	+ velická výhoda je cena, jedná se o spolu s odporovým ohřevem o nejlevnější metodu PVD + nevádí, když zdrojem odpařovaného materiálu je tuhé těleso, jakéhokoliv tvaru + deponování velmi čistých povlaků z velmi čistého zdrojového materiálu	- nehodí se pro depozici více druhů slitin a sloučenin - velice malé využití zdrojového materiálu - jsou zapotřebí velké vakuové komory

1.5.2.2 Metoda PVD – naprašování povlaku

Naprašování povlaku je další ze způsobu nanášení povlaku PVD metodou. Jedná se o fyzikální metodu získání částic z povrchu nanášeného materiálu takzvaným odprašováním, opět tento proces probíhá z vakua. Tyto částice se přesouvají na námi požadovaný povrch, aniž by kolidovaly s okolními částicemi plynu. Tento proces naprašování umožňuje vyrábět tenké vrstvy povlaku i z velmi špatně tavitelných materiálů, což je velická výhoda oproti metodě napařování. Existují tři způsoby nanášení povlaku naprašováním. První je naprašování pomocí doutňákového výboje rovinné diody, jedná se o nejjednodušší způsob nanášení povlaků naprašováním. Další způsob je použití magnetického pole. V tomto případě se hovoří o magnetronovém naprašování. Využívá se magnetického pole o intenzitě stovek gaussů. Existují dva druhy magnetronů: válcový a rovinný. Dalším způsobem naprašování je takzvaný radiofrekvenční způsob. Zde se využívá radiofrekvenční generátor, který generuje vysoké frekvence. Udává se velikost této frekvence (5 – 30) MHz. Poslední způsobem PVD naprašování je naprašování iontovým paprskem. Každý z těchto způsobů naprašování má své výhody a nevýhody při použití. Celkové výhody a nevýhody této

metody nanášení povlaků naprašováním, bez ohledu na to jakým způsobem došlo k tomuto naprašení, jde shrnout takto (viz Tab. 1.7) [26].

Tab. 1.7 Výhody a nevýhody u metody naprašování povlaku - PVD [26].

Výhody +	Nevýhody -
+ lze odprašovat i těžce tavitelné materiály + lze všechny slitiny a sloučeniny + velice nízké ovlivnění tepelnou radiací + vzhledem k tomu, že terč i substrát nemusí být daleko od sebe, má depoziční komora malou velikost + terč z nanášeného materiálu má vysokou životnost	- intenzita samotného naprašování je malá v porovnání s intenzitou u odpařování - nerovnoměrné nanášení povlaku na požadovanou plochu, je nutné pohybovat s tělesem - velká část energie, která dopadá na terč, se přemění na teplo, které je nežádoucí a musí se odvést - velmi drahé terč odprašovaného materiálu

1.5.2.3 Metoda PVD – iontová implementace povlaku

Iontová implementace je dalším způsobem nanesení povlaku metodou PVD. Tento způsob nanesení povlaku využívá svazek vysokoenergetických částic, které dopadají na povrch povlakového materiálu a na povrch povlakované plochy. Iontová implementace využívá předešlé metody pro získání složek povlaku, buď je získává odpařováním, nebo je získává odprašováním. Dále je nutné připojit na povlakované těleso záporný pól napětí a na materiál povlaku kladný pól napětí, tím mezi nimi vzniká elektrické pole. Následkem působení elektrického pole s atmosférou plynu dochází k elektrickým výbojům, které ionizují odpařené částice povlakového materiálu a zároveň dochází k ionizaci částic plynu. Následně dochází k vzájemné reakci iontů, které na požadované ploše vytvářejí vrstvu povlaku. Výhody a nevýhody této metody jsou uvedeny (viz Tab. 1.8) [26].

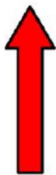
Tab. 1.8 Výhody a nevýhody u metody iontové implementace povlaku - PVD [26].

Výhody +	Nevýhody -
+ vytvoření povlaku o požadovaném přesném chemickém složení + dokonalý a rovnoměrný růst povlaku + vynikající přilnavost vrstvy povlaku k povlakovanému povrchu + proces probíhá při velmi nízké teplotě asi 160°C	- někdy dochází k zachycení nosných plynů v povrchu povlaku - někdy dochází v povrchu povlaku k vytvoření velkých tahových napětí - složitost celého procesu

1.5.3 Vlastnosti povlaků

Smysl povlakování spočívá v tom, že se snažíme zlepšit vlastnosti nástrojových materiálů, které již dosáhly hranice svých možností. Tedy samotné povlakování by nemělo smysl, pokud by nanášené povlaky nezlepšovaly jejich řezné vlastnosti. Těmito vlastnostmi se rozumí zlepšení odolnosti vůči opotřebení, jak adheznímu, abrazivnímu, difuznímu a dalších. Dále je zapotřebí vyšší chemická stabilita a tepelná odolnost. Neuškodí ani mešní koeficient tření, který by snižoval energetickou náročnost procesu. Proto hledáme takové materiály, které nám při jejich nanesení dovedou zlepšit tyto vlastnosti. Každý druh povlaku má své charakteristické vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou horší nebo lepší v závislosti na tom podle jakého kritéria je hodnotíme. Například z hlediska tvrdosti je lepší povlak typu Al_2O_3 než povlak typu TiC. Porovnání základních druhů povlaků je uvedeno (viz Tab. 1.9) [21].

Tab. 1.9 Základní vlastnosti vybraných povlaků [21].

Vlastnosti	Tvrdost	Tvrdost za tepla	Odolnost vůči oxidaci	Chemická stabilita
Lepší	Al_2O_3	Al_2O_3	TiC	Al_2O_3
	TiAlN	TiAlN	TiCN	TiAlN
	TiN	TiN	Al_2O_3	TiN
	TiCN	TiCN	TiAlN	TiCN
Horší	TiC	TiC	TiN	TiC

Požadované vlastnosti povlaků jsou [21,26]:

- povlak by měl být dostatečně tvrdý,
- povlak by měl být odolný vůči adhezi,
- povlak by měl být odolný vůči oxidaci,
- povlak by měl být chemicky stabilní,
- povlak by měl být tepelně stabilní,
- povlak by měl být odolný vůči otěru,
- povlak by měl být nanesen kvalitně a v dostatečné tloušťce,
- povrch povlaku by měl být co nejméně drsný.

Základní charakteristika vybraných povlaků [31]:

- **TiN** je univerzální a nejpoužívanější typ povlaku. Využívá se pro méně náročné podmínky. Ve strojírenství se používá při obrábění uhlíkových ocelí nebo pro

dekorativní využití. Tento povlak má šedou barvu, vrstva povlaku je (1-4) μm , koeficient tření 0,5 a při použití odolává teplotě do 600 °C.

- **TiCN** je povlak který dobře odolává opotřebení způsobené abrazí při nízkých teplotách. Další jeho výhodou je nízký koeficient tření 0,2. Tento povlak se využívá na tvářecí nástroje, které jsou určeny pro tváření středně pevných materiálů. Dále se používá pro nástroje určené k obrábění neželezných kovů a k povlakování nástrojů určených k výrobě závitů. Tento povlak má šedou barvu, jeho tloušťka je (1-4) μm a používá se do teploty 400 °C.
- **TiCN MP** je vylepšený povlak typu TiCN, který má vyrovnanou kombinaci tvrdosti a houževnatosti a opět nízký koeficient tření 0,2. Tento povlak se používá opět pro lisovací nástroje a dále pro kalibrovací nástroje. Na rozdíl od TiCN se používá i pro obrábění méně pevných ocelí. Tento povlak má bronzově šedou barvu, jeho tloušťka je (1-4) μm a používá se do teploty opět 400 °C.
- **ZrN** je povlak s vysokou odolností vůči oxidaci, dále má vysokou odolnost vůči adhezi neželezných kovů. Tento povlak se používá na nástroje určené k obrábění a tváření neželezných kovů. Dále se používá na nástroje určené k obrábění plastů a ve zdravotnictví. Tento povlak má zlato bílou barvu, jeho tloušťka je (1-4) μm , koeficient tření je 0,4 a používá se do teploty 550 °C.
- **CrN** je povlak s vysokou otěruvzdorností, jeho použitím se snižuje riziko vzniku studených svárů. Používá se na nástroje určené k obrábění měkkých materiálů. Dále se používá na formy určené pro lisování lepivých plastů. Tento povlak má kovově stříbrnou barvu, jeho tloušťka je (1-7) μm , koeficient tření je 0,3 a používá se do teploty 700 °C.
- **AlTiCrN** je povlak s vysokou teplotní odolností. Tento povlak se využívá při náročných podmínkách obrábění. Využívá se na nástroje pro vrtání, frézování a soustružení ocelí a litin. Dále aplikace tohoto povlaku má dobré výsledky na nástrojích při obrábění na sucho a na nástrojích pro obrábění houževnatých materiálů, korozi odolných ocelí a titanu. Tento povlak má šedo modrou barvu, jeho tloušťka je (2-4) μm , koeficient tření je 0,55 a používá se do teploty 900 °C.
- **TiAlN** je univerzální povlak pro náročné a produktivní obrábění. Využívá se na nástroje pro frézování, vrtání středně pevných materiálů vyššími řeznými rychlostmi. Tento povlak má fialově černou barvu, jeho tloušťka je (1-4) μm , koeficient tření je 0,6 a používá se do teploty 700 °C.
- **AlTiN** je povlak pro obrábění vysoko pevnostních materiálů. Výhodou je, že mu nevádí nedostatečné chlazení. Používá se pro nástroje určené k frézování, vrtání a k výrobě ozubení. Tento povlak má černou barvu, jeho tloušťka je (1-4) μm , koeficient tření je poměrně vysoký 0,7 a používá se do teploty 850 °C.
- **AlTiN G** jedná se o vylepšený povlak AlTiN, který se opět používá pro obrábění vysoko pevnostních materiálů. Dále je jeho výhodou, že mu opět nevádí nedostatečné chlazení. Používá se pro nástroje určené k frézování, vrtání a na formy pro vstřikování plastů s vysokým obsahem skla nebo minerálů. Tento povlak má stejně jako AlTiN černou barvu, jeho tloušťka je (1-4) μm , koeficient tření je taky poměrně vysoký 0,7 ale dá se použít až do teploty 900 °C.

- **nACo** jedná se o nanokompozitní povlak AlTiN a Si₃N₄. Jeho výhodou je vysoká teplotní odolnost a vysoká tvrdost. Používá se na nástroje určené pro frézování litin, ocelí s vysokou pevností, kalených ocelí a pro obrábění za sucha. Dále se používá jako povlak nástroj určených pro stříhání vysoce pevných materiálů. Tento povlak má fialově modrou barvu, jeho tloušťka je (1-4) μm, koeficient tření je 0,45 a používá se do teploty 1200 °C.
- **nACRo** opět se jedná o nanokompozitní povlak tentokrát AlCrN a Si₃N₄. Tento povlak se vyznačuje vysokou pevností, vysokou teplotní odolností a vysokou odolností vůči abrazivnímu opotřebení, používá se na nástroje určené pro obrábění houževnatých a těžce obrobitelných materiálů. Tento povlak má fialově modrou barvu, jeho tloušťka je (1-4) μm, koeficient tření je 0,35 a používá se do teploty 1100 °C.
- **nACo³** jedná se o nanokompozitní povlak, který se skládá ze tří vrstev TiN a AlTiN a nACo. Výhodou je povlak s vysokou teplotní odolností a s vysokou tvrdostí. Používá se na nástroje pro obrábění tvrdých, abrazivních a kalených materiálů. Dále se používá na nástroje pro obrábění za sucha a pro vysokorychlostní obrábění. Tento povlak má fialově modrou nebo šedou barvu, jeho tloušťka je (1-4) μm, koeficient tření je 0,45 a používá se do teploty 1200 °C.
- **Duplex TiCN** jedná se o speciální druh povlaku, který vzniká kombinací typu povlaku TiC a plazmové nitridace. Používá se na nástroje pro tváření za vysokého namáhání a pro střížné nástroje opět používané při vysokém namáhání. Aplikace tohoto povlaku zvyšuje podstatně životnost nástroje a zabraňuje zadírání při vysoce náročném použití. Tento povlak má šedou barvu, jeho tloušťka je (1-4) μm, koeficient tření je nízký jeho hodnota je jen 0,2 a používá se do teploty jen 400 °C.
- **AlXN³** jedná se o povlak AlCrN³. Je to houževnatý povlak, který odolává abrazi při vysokých teplotách. Používá se na nástroje určené pro výrobu ozubení a na střížné nástroje pro stříhání vysoce pevných materiálů. Tento povlak má černo šedou barvu, jeho tloušťka je (1-4) μm, koeficient tření je 0,4 a používá se do teploty 900 °C.
- **TiXCo** jedná se o povlak, který je určený na nástroje pro obrábění materiálů tvrdších než 60 HRC. Využívá se na nástroje určené pro frézování, soustružení, výrobu závitů a vrtání. Tento povlak má tmavě měděnou barvu, jeho tloušťka je (1-4) μm, koeficient tření je 0,55 a používá se do teploty 1200 °C.

1.6 Ekonomika řezného procesu

Z ekonomického pohledu se dá stručně shrnout, že řezný proces by měl být co nejlevnější, tedy poměr výkonu a ceny nástroje by měl být co nejlepší. Jenomže co to znamená, nebo na čem závisí výsledná cena řezného procesu? Dá se říci, že výsledná cena závisí na řezném prostředí. Do řezného prostředí můžeme brát typ nástroje. Je rozdíl v tom, když použijeme nástroj pro ruční obrábění, kde bude nízká produktivita, nebo nástroj určený pro stojní obrábění, kde je naopak očekávaná vysoká produktivita. Dále záleží na zvoleném materiálu nástroje, pro ruční nástroj bude nejspíše požita rychlořezná ocel. Tento nástroj bude podstatně levnější, ale vykoná mnohem méně výkonu za mnohem delší dobu než nástroj například z povlakovaného slinutého karbidu, který bude několikanásobně dražší, ale dokáže

obrábět mnohem rychleji a tím šetří hodinové náklady na pracovníka a výsledkem je vyšší produktivita za menší náklady. Dále do řezného prostředí nesmíme zapomenout zahrnout obráběný materiál. Tento materiál dokáže velmi ovlivnit výslednou cenu obrábění. Představte si, že bude použit dobře obrobitelný materiál. To znamená, že obrábění půjde lehce, nástroj vydrží delší dobu, obrobíme větší plochy. Ted' si představte, že použijeme špatně obrobitelný materiál. V tomto okamžiku bude všechno jinak, obrábění jde velice špatně, nástroj se musí každou chvíli měnit, obrobíme menší plochy a výsledkem je vysoká cena obrábění. Dále výslednou cenu obrábění ovlivňuje použití vhodné chladicí kapaliny, která nám šetří nástroj a tím i peníze. Jenomže každá chladicí kapalina není vhodná pro všechny nástroje a obráběné materiály. Další podstatnou položku tvoří vhodně zvolený stroj a tím zvolená hodinová sazba a nakonec obzvláště v dnešní době nesmíme zapomínat na ceny energií, které dokáží ovlivnit výslednou cenu.

1.7 Způsob výroby maticového závitníku

Způsob výroby maticového závitníku je dán vlastnostmi základního materiálu a geometrickým tvarem. Jelikož na nástroje jsou použity materiály tvrdší jak materiály jimi obráběné a geometrický tvar je poměrně složitý. Tak se nabízí jen jediná volba výroby maticového závitníku a to broušením výsledného tvaru. Tato metoda zaručuje vyrobení závitníku i z vysoce tvrdého materiálu. Samotná výroba se realizuje na speciálních, dá se říci, bruskách. Při tomto obrábění má brusný kotouč tvar budoucího závitu.

1.8 Maticový závitník

Je speciální druh závitníku, který je především určen pro výrobu krátkých závitů a to přibližně do jedna a půl násobku jeho vlastního průměru. Pro tento účel je i přizpůsobena samotná geometrie, kdy je nepatrnější rozdíl v délce řezné a utvářecí závitů, která je oproti ostatním závitníkům kratší.

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Návrh experimentu

Pro hodnocení procesu při vytváření závitu jsem zvolil vyhodnocení průběhu krouticího momentu. Tento moment se bude vyhodnocovat při výrobě prvních pěti závitů. Poté se vyrobí série 180 závitů, které opotřebí závitník. Následovat bude další měření momentu u pěti závitů. Dále bude vyráběna další série 180 závitů, která bude následována pěti měřeními. Takto se bude postupovat, než dojde ke koci životnosti závitníku. Dále experiment bude zahrnovat vyhodnocení struktury povrchu na mikroskopu.

2.2 Použitý nástroj

Pro tento experiment byl použit řezací strojní maticový závitník M10x1,5 (viz obr. 2.1). Na tomto závitníku byl nanesen povlak AlTiN o tloušťce 2 μm .



Obr. 2.1 Maticový závitník.

2.3 Zkušební vzorek a materiál vzorku

Tento experiment zahrnuje výrobu závitů M10x1,5 povlakovaným strojním závitníkem. Vyrábělo se tolik závitů, až došlo k opotřebení závitníku. Závity se vyráběli do desky o rozměrech 202x125x26 mm (viz obr. 2.2), která byla vyrobena z materiálu dle starého značení ČSN 41 2050 a nového EN značení C45E nebo 1.0503. Vlastnosti a chemické složení tohoto materiálu jsou uvedeny (viz Tab. 2.1). Na desce byly vyráběny otvory v osové vzdálenosti otvoru 11 mm od sebe. Na desku se vejde celkem 180 závitů. Před výrobou závitů byl předvrtán průchozí otvor o průměru 8,5 mm.



Obr. 2.2 Zkušební deska se závity.

Tab. 2.1 Vlastnosti a chemické složení materiálu ČSN 41 2050.

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
Dle ČSN v % hmot	0,42	0,50	0,17	Max	Max	Max	Max	Max
	0,50	0,80	0,37	0,25	0,30	0,30	0,040	0,040
Mez pevnosti v tahu Rm je (640-780) Mpa								
Mez kluzu Re je 390 Mpa								

2.4 Řezné podmínky

Velikost řezných podmínek při obráběcím procesu je důležitá z hlediska produktivity procesu i z hlediska životnosti nástroje a kvality obráběného povrchu. Zvolené řezné podmínky pro výrobu závitu jsou uvedeny (viz Tab. 2.2).

Tab. 2.2 Řezné podmínky při výrobě závitů.

Hodnota/ druh	
Řezná rychlost závitníku v_c	20 m.min ⁻¹
Otáčky závitníku n	634 min ⁻¹
Posuv závitníku f (je dán stoupáním závitníku)	1,5 mm
Chladicí kapalina	CIMSTAR 597 v koncentraci (11-11,5) %

2.5 Použitý obráběcí stroj a jeho parametry

Výroba otvorů a závitů probíhala na portálovém obráběcím centru MCV 1210 od firmy Tajmac- ZPS (viz obr. 2.3). Toto obráběcí centrum je řízeno systémem SINUMERIC 840D. Jedná o vysoce produktivní obráběcí stroj, který je možné využít k obrábění prostorově složitých tvarů. Může obrábět ve třech i v pěti osách. V mém případě byly využity pouze tři osy **x**, **y** a **z**. Základní parametry stroje jsou uvedeny (viz Tab. 2.3).



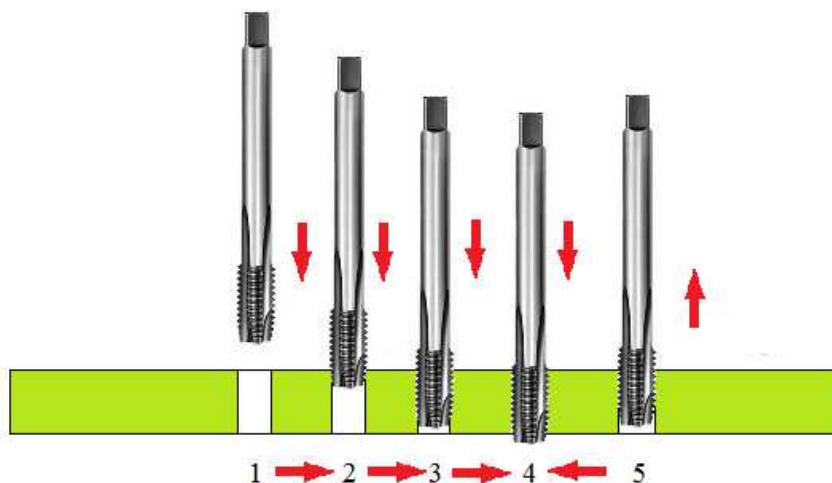
Obr. 2.3 Portálové obráběcí centrum MCV 1210.

Tab. 2.3 Základní parametry stroje.

Parametr	Hodnota
Výkon stroje - trvale	30 kw
Výkon stroje - krátkodobě	32 kw
Rozsah otáček	(0 – 18000) min ⁻¹
Pracovní plocha	1200x1000 mm
Maximální krouticí moment	90 N.m
Počet nástrojů v zásobníku	30

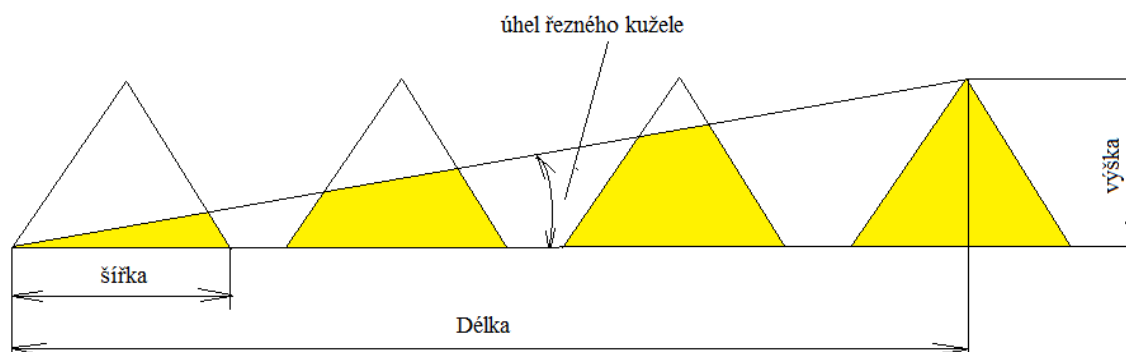
2.6 Měření krouticího momentu

Proces výroby závitu jsem rozdělil do pěti fází (viz obr. 2.4). První fáze je, když se maticový závitník otáčí a směřuje ke zkušebnímu vzorku. Druhá fáze je, když maticový závitník začíná před-řezávat závit s řezným kuželem. Třetí fáze je, když maticový závitník již vytváří celý profil závitu. Čtvrtá fáze je, když řezný kužel maticového závitníku začíná vyjíždět z druhé strany otvoru. Pátá fáze je, když se maticový závitník zastaví a změní chod otáček z pravotočivých na levotočivé. Maticový závitník začíná opouštět vyrobený závit.



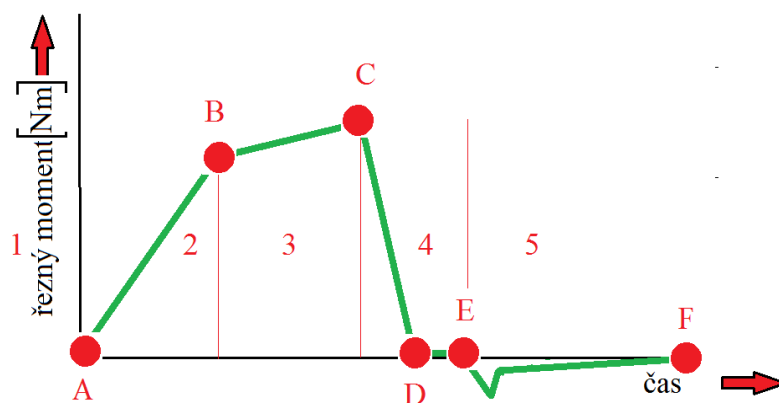
Obr. 2.4 Fáze výroby závitu.

Tyto fáze přímo souvisí s momentovým zatížením maticového závitníku. Před samotným měřením můžeme stanovit teoretický průběh řezného momentu, aby bylo možné naměřené hodnoty s něčím porovnat. Případně abych věděl, zda naměřené výsledné hodnoty jsou relevantní. Teoretický řezný moment lze stanovit z průřezu třísky a měrné řezné síly. Průřez třísky (viz obr. 2.5) závisí na tvaru řezného kužele maticového závitníku. Tedy na úhlu řezného kužele, délce řezného kužele a na profilu a rozměrech obráběného závitu.



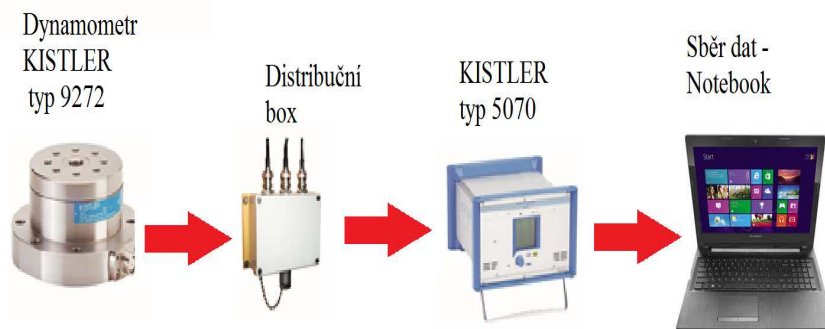
Obr. 2.5 Průřez třísky při výrobě závitu.

Průběh teoretického řezného momentu při řezání závitu (viz obr. 2.6) mohou také rozdělit na pět fází. Toto rozdělení na fáze koresponduje s předešlým rozdělením. V první fázi nástroj není najetý v materiálu, není zatížen řezným momentem. Druhá fáze začíná v bodě A. V tomto místě řezný kužel zajíždí do materiálu a začíná před-řezávat závit. S přibývajícím časem se stále více zařezává řezný kužel do materiálu a tím roste průřez odebírané třísky i řezný moment. Druhá fáze končí v bodě B, kde již je řezný kužel plně zajetý do materiálu. Ve třetí fázi je již vytvořen celý profil závitu, ale dochází zde k mírnému nárůstu řezného momentu vlivem tření a částečné kalibrace závitu. Čtvrtá fáze začíná v bodě C, kdy začíná vyjíždět řezný kužel maticového závitníku z druhé strany otvoru. Tím se začíná zmenšovat odebíraný průřez třísky. Následkem je i zmenšení řezného momentu. Řezný moment se zmenšuje až do bodu D, kdy nastává nulová velikost řezného momentu. Důvodem je vyjetí řezného kužele z otvoru. V úseku od bodu D do bodu E nedochází k odběru materiálu, dochází zde pouze k vyjetí a postupnému zastavení maticového závitníku. V bodě E začíná pátá fáze, zde se zastaví otáčky závitníku a začíná obrácený chod otáček. Vlivem opačných otáček dochází k vysovování maticového závitníku ze závitu.



Obr. 2.6 Očekávaný průběh řezného momentu, který závisí na průřezu třísky a měrné řezné síle.

Pro měření skutečného řezného momentu byl použit piezoelektrický křemíkový dynamometr značky KISTLER 9272 (viz obr. 2.7). Dynamometr byl připevněn na pracovní stůl stroje. Na horní stranu dynamometru by připevněn strojní svěrák.

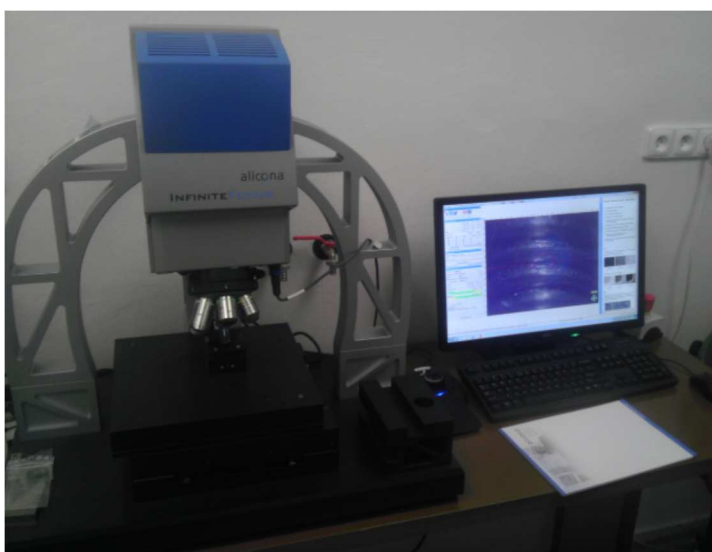


Obr. 2.7 Schematicky znázorněná měřící soustava KISTLER.

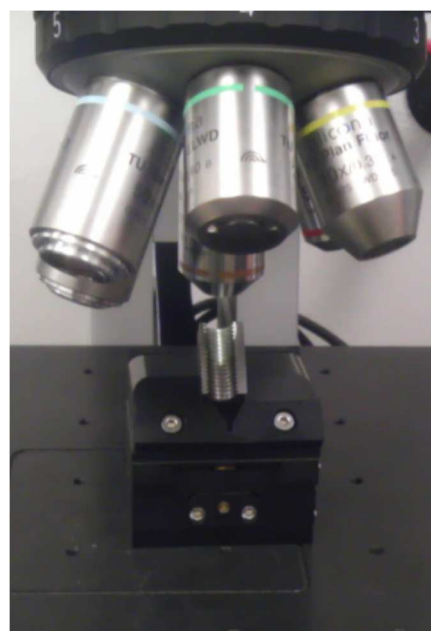
Strojní svěrák byl připevněn k dynamometru použitím speciálního přípravku, šroubů a upínek. Do tohoto svěráku byl upnut zkušební vzorek. Do vzorku bylo vyvrtáno 180 otvorů a poté bylo vyřezáno 180 závitů. Řezný moment byl měřen u prvních pěti závitů. Poté bylo vyřezáno 180 závitů pro opotřebení maticového závitníku a následně se měřilo dalších pět řezných momentů. Celkem bylo vyřezáno 740 závitů do čtyř desek pro opotřebení a 25 závitů pro měření.

2.7 Měření struktury povrchu

Měření struktury povrchu probíhalo na mikroskopu Alicona (viz obr. 2.8a a 2.8b).



Obr. 2.8a Mikroskop Alicona.

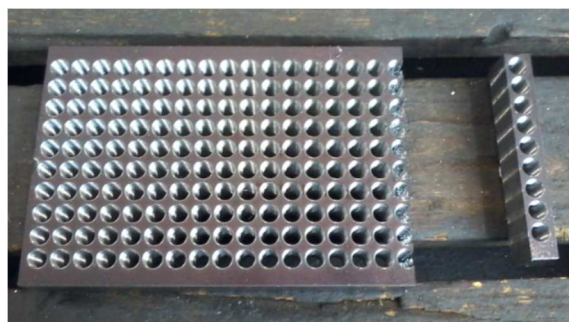


Obr. 2.8b Detail umístěného vzorku.

Pro měření na mikroskopu byly připraveny čtyři vzorky závitů. Z každé série měření řezného momentu byl vybrán jeden referenční závit. Tento závit byl vyříznut ze zkušební vzorku, aby bylo možné měřit strukturu povrchu tohoto závitu. Vzorek pro mikroskop má podobu půlky závitu (viz obr. 2.9a a obr. 2.9b).



Obr. 2.9a Zkušební vzorek na Mikroskop Alicona.

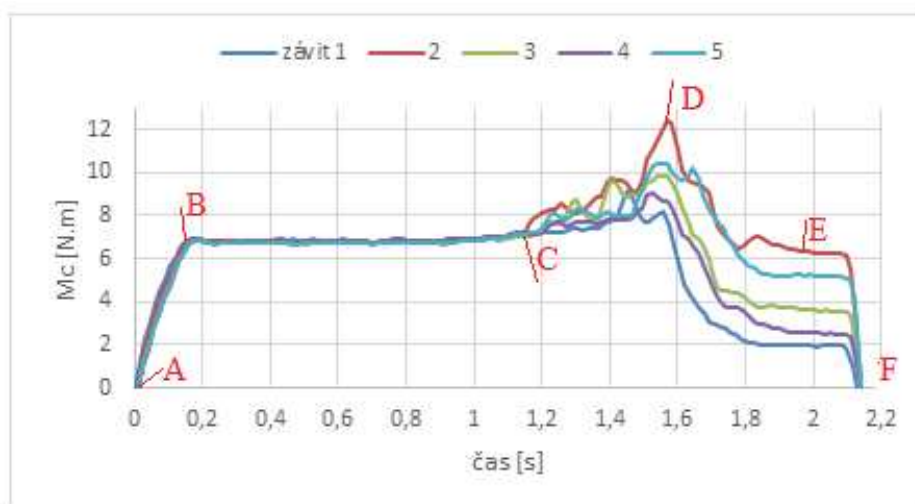


Obr. 2.9b Příprava zkušebních vzorků.

3 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

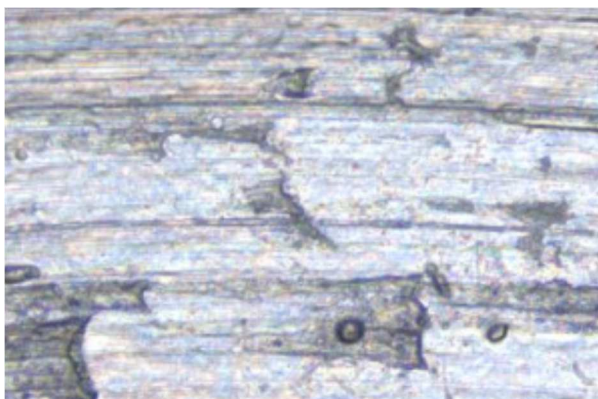
3.1 První série závitů

Při výrobě prvních pěti závitů byla naměřena první série pěti řezných momentů (viz obr. 3.1). Zde byl použit zcela nový maticový závitník, který ještě nebyl opotřeбен. Dle obrázku 3.1 v bodě A, kdy je řezný moment nulový, začínal řezný kužel maticového závitníku řezat závit. Dle očekávání rostl řezný moment až do bodu B, kdy již byl vytvořen celý profil závitů. Až do bodu C je vidět, že se drží takřka konstantní řezný moment přibližně na hodnotě 6,8 N.m. Do této chvíle byl průběh všech pěti řezných momentů téměř stejný. Problém nastal až v bodě C, kdy se maticový závitník začal chovat nepředvídatelně. V tomto bodě se průběh u všech měřených řezných momentů rozdělil. Tento bod odpovídá přibližně 10. otočce závitů. Nejhorší byla situace u druhého závitů, která odpovídá bodu D, kdy byl řezný moment nejvyšší, přibližně 12,5 N.m. Další kritické místo je v bodě E, kdy již byl vyjetý řezný kužel z druhé strany otvoru a kdy zároveň dle předpokladů měl být řezný moment minimální. Ale tomu tak ve skutečnosti není v bodě E je v nejhorším případě a to u druhého závitů se řezný moment držel na hodnotě přes 6 N.m a to je jen o necelý 1 N.m menší než mezi body B a C. V bodě F se zastavily otáčky závitníku a začal reverzní chod.

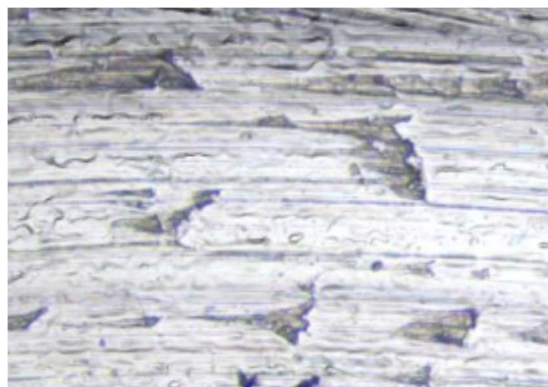


Obr. 3.1 První série naměřených řezných momentů.

Následně probíhalo vyhodnocení jednoho vzorku z první série závitů na mikroskopu Alicoma. Pro toto měření jsem zvolil první celou otočku závitů pro porovnání a 10. otočku závitů, kde podle krouticího momentu nastal problém. V první otočce závitů (viz obr. 3.2a) jsou vidět na povrchu závitů plošné kazy. Tyto kazy vznikly pravděpodobně vlivem tvorby nárůstků, kdy se materiál obrobku přivaňuje na materiál nástroje a pak se náhle utrhne. Na tvorbu nárůstku mají vliv řezné podmínky. Mohla být zvolena malá, nebo velká řezná rychlost, dále mohla být zvolena špatná chladicí kapalina. Další měření probíhalo na 10. otočce závitů (viz obr. 3.2b). Jelikož se dle průběhu krouticího momentu jednalo o problémové místo, tak jsem přepokládal větší výskyt plošných kazů od nárůstků oproti 1. otočce, protože nárůstky zapříčiňují vyšší silové zatížení. Ovšem ve skutečnosti se nějaké plošné kazy objevily ale ne více jak v první otočce.



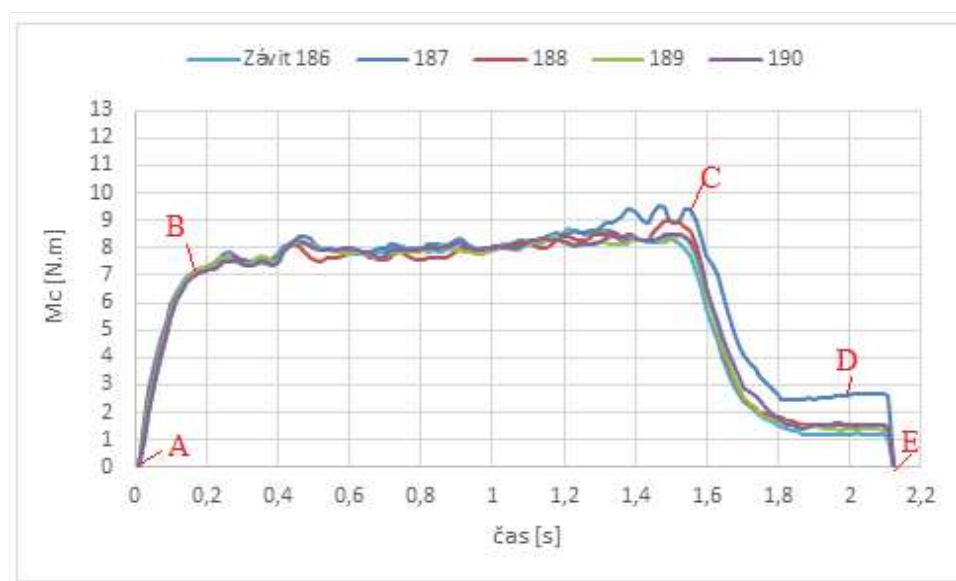
Obr. 3.2a Povrch 1. otočky závitu.



Obr. 3.2b Povrch 10. otočky závitu.

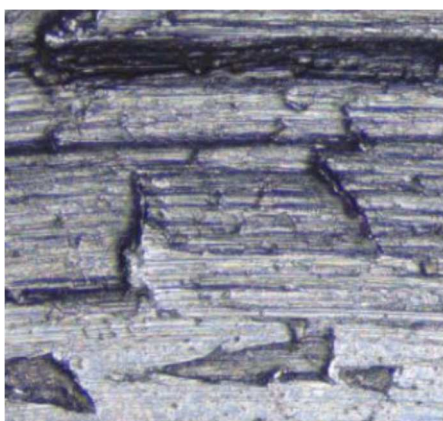
3.2 Druhá série závutů

Druhá série měření závutů probíhala po vyrobení prvních pěti měřených závitech a po dalších 180-ti vyrobených závitech pro opotřebení nástroje. Tedy měřil se závit č. 186 až 190 (viz obr. 3.3). V bodě A opět začíná řezný kužel řezat závit do materiálu. Řezný moment rostl dle předpokladů až do B, kdy se začal vytvářet celý profil závitu. Do této chvíle byl průběh řezných momentů v této sérii takřka stejný. Od bodu B se začal průběh řezných momentů od sebe lišit ale ne tak výrazně jak v 1. sérii. Ale oproti 1. sérii došlo mezi body B a C k nárůstu řezného momentu. Pravděpodobně byl tento nárůst řezného momentu způsoben opotřebením maticového závitníku. V bodě D byla opět zvýšena hodnota řezného momentu u druhého závitu v sérii, kdy opět měl být minimální. V bodě E došlo k zastavení závitníku a zahájení reverzního chodu.

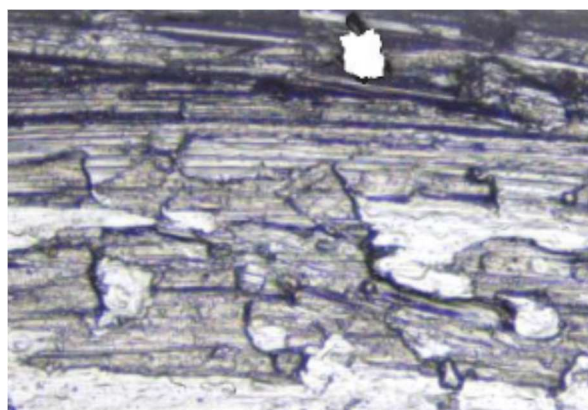


Obr. 3.3 Druhá série naměřených řezných momentů.

Na mikroskopu Alicona byla opět měřena 1. celá otočka závitu pro porovnání a 10. otočka závitu stejně jako v minulém případě u první série. Na povrchu 1. otočky závitu (viz obr. 3.4a) jsou vidět opět plošné kazy způsobené pravděpodobně opět tvorbou nárůstků. Jejich četnost je vyšší než v 1. sérii. Důvodem může být vyšší opotřebení nástroje. Totéž se objevilo na ploše 10. otočky závitu (viz obr. 3.4b). Opět plošné kazy způsobené pravděpodobně vznikem nárůstu v podobné četnosti jako u 1. otočky. Když se vrátím k obr. 3.3, tak kolísání hodnot řezných momentů mezi body B a C může být pravděpodobně způsobené vlivem nárůstků.

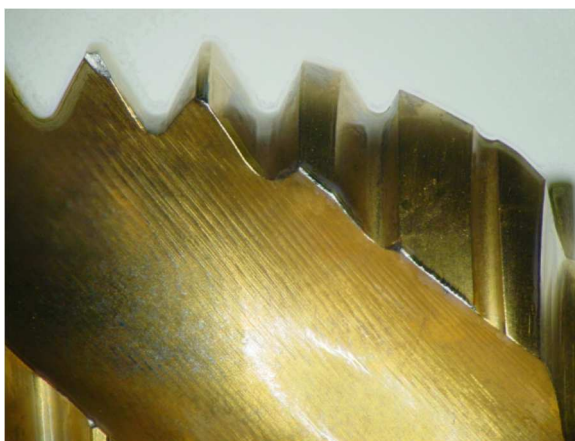


Obr. 3.4a Povrch 1. otočky závitu.

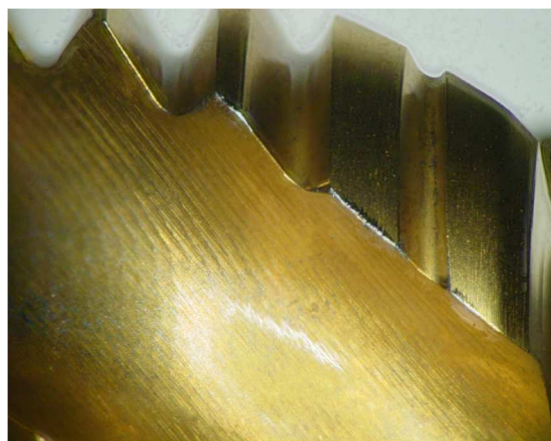


Obr. 3.4b Povrch 10. otočky závitu.

Dále zvýšení řezného momentu mezi body B a C je pravděpodobně způsobeno opotřebením. Řezný moment se zvýšil zhruba z necelých 7 N.m na zhruba 8 N.m. Opotřebení maticového závitníku (viz obr. 3.5a a obr. 3.5b) je vidět na všech břitech řezného kužele jedná se pravděpodobně o abrazivní opotřebení a opotřebení vlivem nárůstků. Dále je částečně vylomený kousek břitu na dalším břitu.



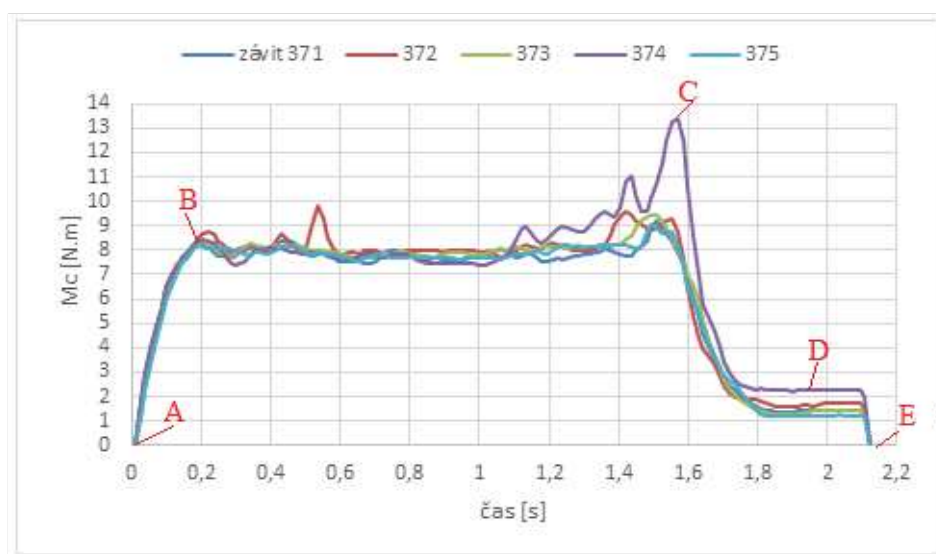
Obr. 3.5a Opotřebení břitu po
190-ti závitech – 1. pohled.



Obr. 3.5b Opotřebení břitu po
190-ti závitech – 2. pohled.

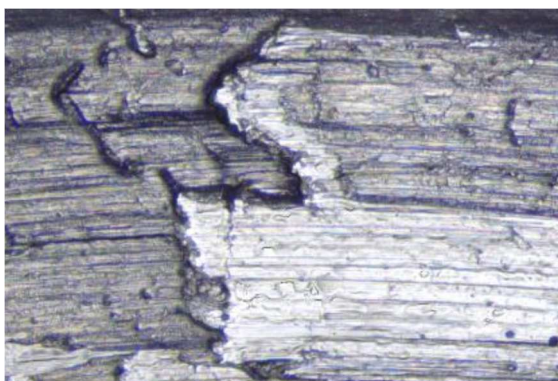
3.3 Třetí série závitů

Třetí série měření probíhala po 10-ti závitech 1. a 2. série a 360-ti závitech zhotovených pro opotřebení nástroje. Třetí série se měřila na 371. až 375. závitu (viz obr. 3.6). V bodě A opět začal řezný kužel zajíždět do materiálu. Do bodu B opět postupně stoupal řezný moment. Od bodu B do bodu C opět docházelo k rozdílnému průběhu řezných momentů. Maximální hodnota nastala v bodě C, kdy byla u čtvrtého závitu série přibližně 13,4 N.m. V bodě D na rozdíl od předešlých sérií došlo k poklesu řezného momentu na hodnotu něco přes 2 N.m a to v nejhorším případě u čtvrtého závitu, u ostatních závitů je ještě menší. V bodě E došlo opět k zastavení otáček a zahájení reverzního chodu.

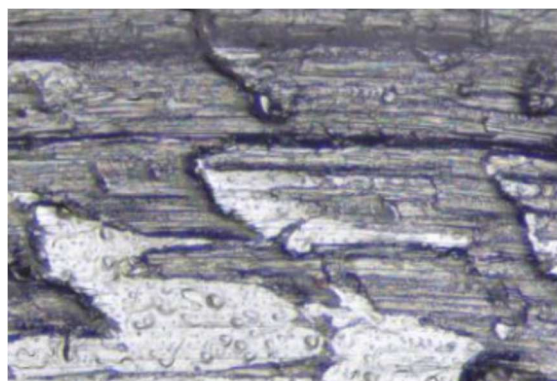


Obr. 3.6 Třetí série naměřených řezných momentů.

Na mikroskopu byla opět měřena 1. celá otočka a 10. otočka závitu jako u minulých sérií. Na povrchu 1. otočky závitu (viz obr. 3.7a) jsou vidět opět plošné kazy způsobené vznikem nárůstu. Což má opět vliv na průběh řezného momentu a je nejvíce vidět na úseku mezi body B a C (viz obr. 3.6). V tomto úseku opět dochází ke kolísání řezného momentu. Na povrchu 10. otočky závitu (viz obr. 3.7b) jsou vidět též plošné kazy, kde četnost jejich výskytu je o něco vyšší než na povrchu 1. otočky závitu.

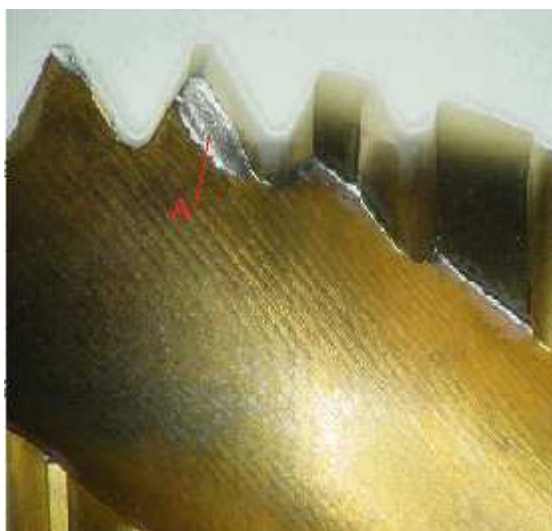


Obr. 3.7a Povrch 1. otočky závitu.

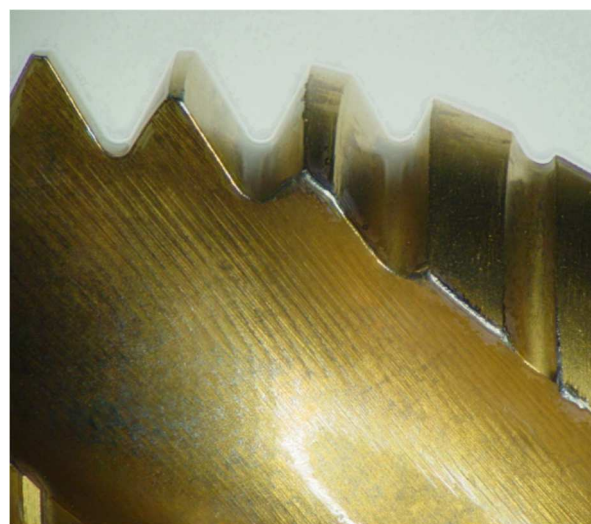


Obr. 3.7b Povrch 10. otočky závitu.

Dále můžeme vidět zvyšující se opotřebení břitů maticového závitníku (viz obr. 3.8a a 3.8b). Zejména můžeme vidět na obrázku u bodu A ještě větší vylomení části břitu než u minulé série a o něco větší opotřebení na břitech řezného kužele pravděpodobně způsobené abrazí a vznikem nárůstků. Zajímavé je že i přes vyšší opotřebení se průběh a velikost řezného momentu u třetí série o moc nezměnil.



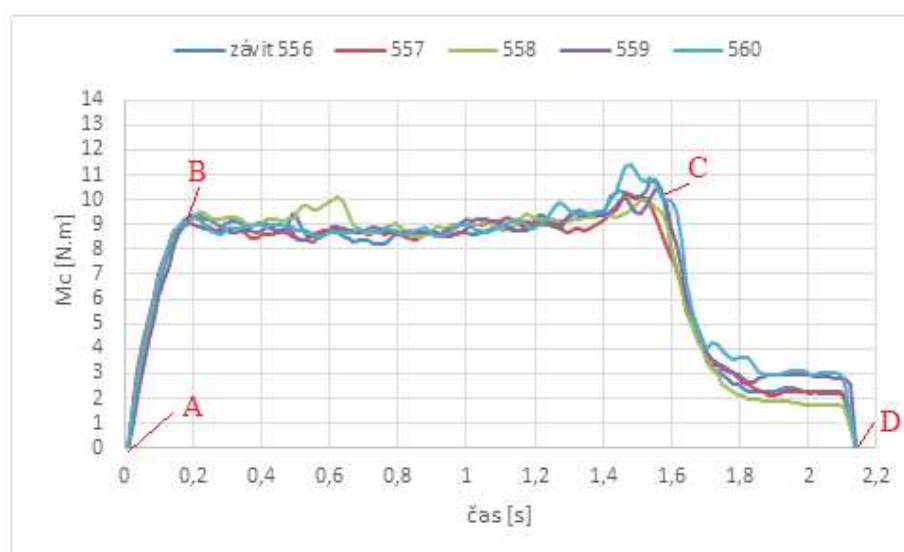
Obr. 3.8a Opotřebení břitu po 375-ti závitech – 1. pohled.



Obr. 3.8b Opotřebení břitu po 375-ti závitech – 2. pohled.

3.4 Čtvrtá série závitů

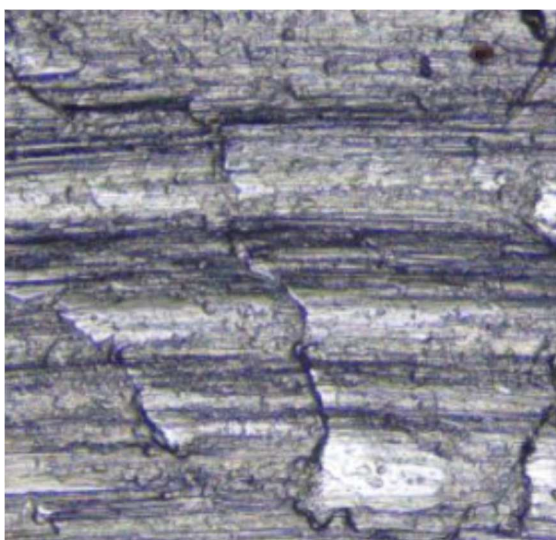
Čtvrtá série měření se uskutečnila po 15-ti měřeních závitů předešlých sérií a 540-ti vyrobených závitech pro opotřebení nástroje. U čtvrté série se měřil řezný moment u závitů č. 556 až 560 (viz obr. 3.9). V bodě A opět se začal zařezávat řezný kužel maticového závitníku do materiálu.



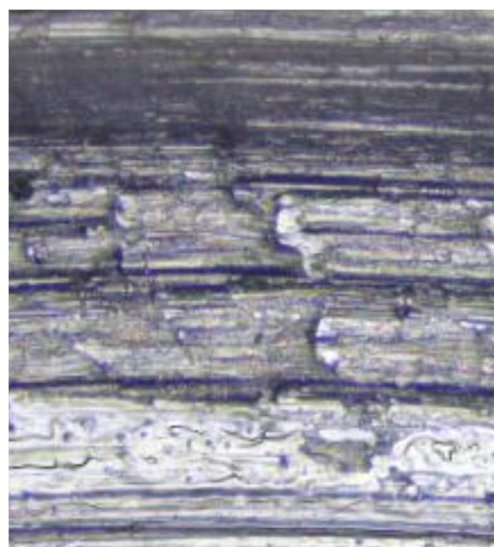
Obr. 3.9 Čtvrtá série naměřených řezných momentů.

Do bodu B opět rostl řezný moment dle teoretických předpokladů. Od bodu B se začíná opět rozdělovat průběh řezného momentu do bodu C, kde je vidět opět i kolísání řezného momentu i zvýšení hodnoty o zhruba 1 N.m oproti předešlé sérii. Od bodu C do bodu D se průběh řezného momentu opět částečně překrývá a v bodě D se zastavuje

Na mikroskopu byla opět měřena 1. celá a 10. otočka závitu jako u minulých sérií. Na povrchu 1. otočky závitu (viz obr. 3.10a) je vidět zatím nejhorší povrch. Na tomto povrchu jsou vidět opět plošné kazy způsobené tvorbou nárůstku i podélné rýhy, které jsou lépe vidět v příloze 7. Podobně jsou vidět plošné vady a podélné rýhy i na povrchu 10. otočky závitu (viz obr. 3.10b). Tyto podélné rýhy jsou pravděpodobně způsobeny poškozeným tvarem břitu nástroje.

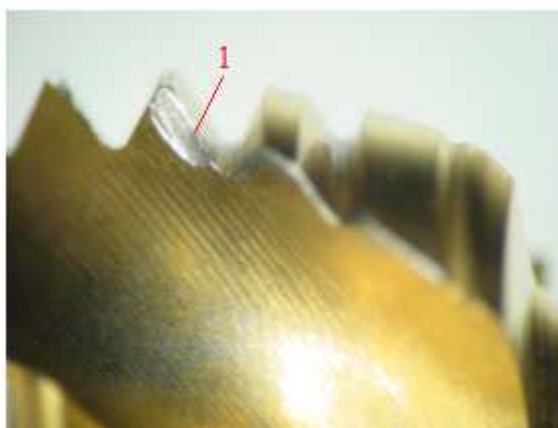


Obr. 3.10a Povrch 1. otočky závitu.

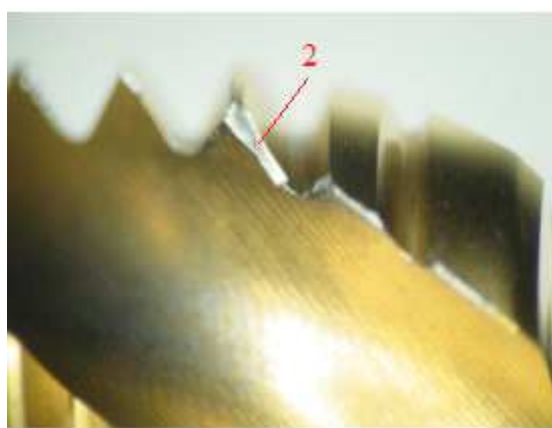


Obr. 3.10b Povrch 10. otočky závitu.

Dále můžeme vidět zvětšující se opotřebení nástroje na dvou pohledech po výrobě 560-ti závitu (viz obr. 3.11a a obr. 3.11b). Číslo 1 odkazuje na vyštípnutí části břitu na prvním ohledu a číslo 2 na vyštípnutí části břitu na druhém pohledu.



Obr. 3.11a Opotřebení břitu po 560-ti závitech – 1. pohled.

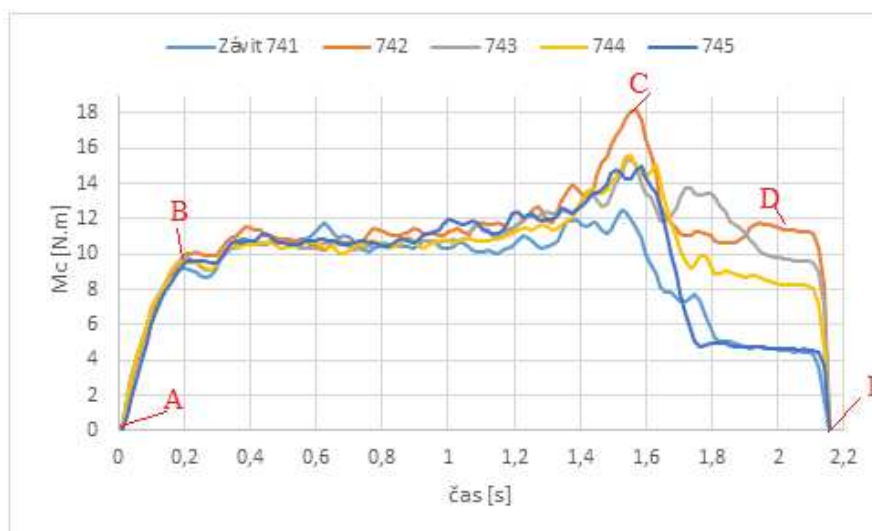


Obr. 3.11b Opotřebení břitu po 560-ti závitech – 2. pohled.

I toto opotřebení má za následek zvýšení silového zatížení nástroje a vyšší energetickou náročnost procesu.

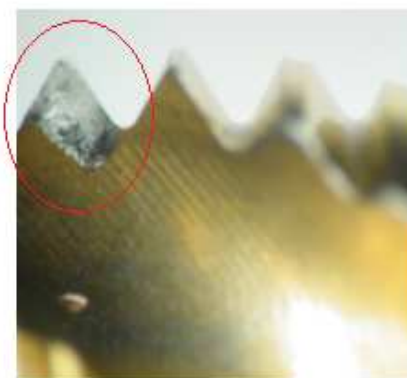
3.5 Pátá série závitů

Pátá série měření závitu je poslední, která je měřena. Tato série začíná měření na závitu č. 741 a končí na závitu č. 745 (viz obr. 3.12). V bodě A opět začal proces výroby závitu, kdy řezný kužel maticového závitníku začal řezat závit. Řezný moment se opět zvedal dle předpokladů do bodu B, kdy se pět začal vytvářet celý profil závitu. Od bodu B do bodu C došlo opět k rozdělení průběhu a kolísání velikosti řezných momentů. Dále od bodu B došlo k postupnému nárůstu řezného momentu, až na nejvyšší hodnotu v bodu C. Tato hodnota dosahovala až 18 N.m, což je největší naměřená hodnota řezného momentu během měření a zároveň asi třikrát větší než konstantní hodnota mezi body B a C v první sérii. V bodě D v nejhorší variantě u čtvrtého závitu se velikost řezného momentu vyrovnala hodnotě kolísání mezi bodem B a C a to zhruba 11 N.m, což je nevhodné a zbytečně energeticky zatěžuje celý proces. V bodě E se zastavují otáčky a začíná reverzní chod.



Obr. 3.12 Pátá série naměřených řezných momentů.

Na břitu závitníku (viz obr. 3.13) je vidět po vyrobení 745-ti závitů těžké poškození a to

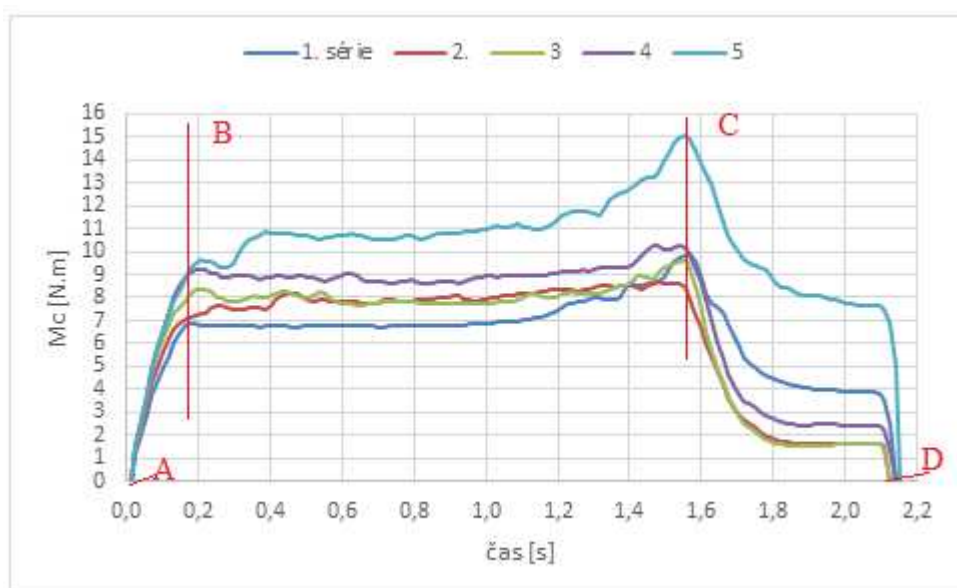


Obr. 3.13 Opotřebení břitu po 745-ti závitech.

velké vylomení břitů. Toto vylomení břitů zapříčinilo konec experimentu, protože závitník již byl dále nepoužitelný. Dále je pravděpodobné že toto poškození zapříčinilo nepříznivý průběh řezných momentů (viz obr. 3.12) a to v bodě C a D.

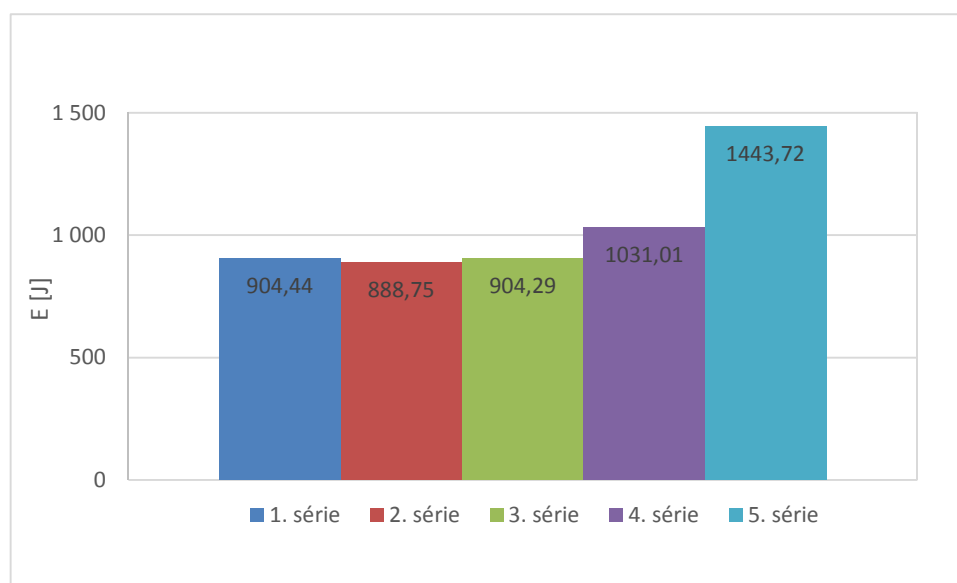
3.6 Průměrný řezný moment a průměrná potřebná energie

Ke zpracování výsledků z první až páté série měření jsem dále použil průměrnou hodnotu, pomocí níž jsem určil představitele z každé série, aby bylo možné si lépe představit rozdíl mezi jednotlivými sériemi (viz obr. 3.14). Nejprve v bodě A začíná řezný kužel zajíždět do materiálu. Následně v průběhu času roste velikost řezného momentu až do bodu B, což je místo jak bylo popsáno již dříve, dochází již k výrobě celého profilu závitu. Zde je vidět rozdíl mezi body A a B kdy se řezné momenty nepřekrývají jak na dřívějších obrázcích jednotlivých sérií. Tento rozdíl spočívá ve strmosti zvyšování řezného momentu, kdy první série má nejméně strmý nárůst řezného momentu, druhá o něco větší a poslední pátá největší. Tato strmost je dána opotřebením nástroje, kdy opotřebení zvyšuje silové zatížení nástroje. V úseku mezi body B a C již probíhá výroba celého profilu závitu. U první série je hodnota řezného momentu v tomto úseku logicky nejnižší, protože používáme nový neopotřeбенý nástroj. Ale všimneme druhé a třetí série kde tyto série dělí 180 závitů, a přesto jsou hodnoty řezných momentů takřka stejné. Dokonce je i někdy hodnota řezného momentu u třetí série nižší jak u druhé. Dále následuje čtvrtá a nejhorší pátá série. Dále stojí za povšimnutí, že u druhé, třetí a čtvrté série se v tomto úseku řezný moment pohybuje jen v malých odchylkách. Oproti tomu u první a páté série začíná růst řezný moment okolo 10. otočky závitu. Nakonec stojí za povšimnutí úsek mezi body C a D. V tomto úseku, jak již bylo popsáno, dochází k postupnému vyjíždění řezného kuželu z druhé strany otvoru. Dále dochází k postupnému poklesu řezného momentu. Zajímavé je, že opět dosahuje dobrého výsledku série 2. a 3. měření a to stejné hodnoty následována třetí, poté první a nejhorší je pátá. Přitom bych předpokládal, že nejlepší bude první série, protože je použit ještě neopotřebovaný závitník.



Obr. 3.14 Průměrné hodnoty řezných momentů určené z jednotlivých sérií.

Dále na zpracovaném grafu průměrných spotřebovaných energií na jeden závit pro jednotlivé série (viz obr. 3.15) je vidět, že závity v první sérii potřebují zhruba 904 J na jeden závit. Dále je zajímavé, že při výrobě závitů v druhé sérii je potřeba méně energie než v první sérii a to jen 889 J na závit, to si vysvětlují postupným takzvaným zaběhnutím závitníku. Ve třetí sérii je energetická potřeba takřka rovná první sérii. U čtvrté série je již vidět podstatný nárůst potřebné energie a to 1031 J na závit. Nakonec u páté série je zapotřebí zhruba 1444 J což je téměř o 60% více potřebné energie jak v první sérii, což značí už značné opotřebení závitníku.



Obr. 3.15 Průměrná spotřebovaná energie na jeden závit pro jednotlivé série

4 DISKUZE

Před zahájením samotného experimentu jsem prostudoval tematiku týkající se závitů, typů nástrojů, používaných nástrojových materiálů a tematiku řezného procesu. Z těchto informací jsem očekával nějaký průběh zatížení s postupnou zvyšující se tendencí nárůstu tohoto zatížení se stále se zvětšujícím opotřebením. Samozřejmě jsem nemohl předpokládat, co všechno se může během experimentu vyskytnout. O to více mě překvapila druhá série měření, při níž se snížila zatěžující síla působící na závitník a tím i výsledná energetická zátěž. Což bylo v přímém rozporu s mým prvotním předpokladem, kdy jsem přepokládal stále se zvyšující zatížení. Proto by stálo za to se na tento jev a jeho příčiny podívat podrobněji. Mohu se jen domnívat, co tento jev zapříčinilo.

Za prvé mohlo dojít k chybě měření? V každé sérii bylo pět měření a zrovna ve druhé sérii vycházely relativně stejné výsledky. I vzhledem k tomu, že nastavení přístroje bylo stejné, měření prováděl stejný člověk, tak se se nedomnívám, že by chyba měření či odchylka přístroje měla takový vliv.

Za druhé mohla zapůsobit nehomogenita materiálu, kde první série mohla být prováděna do hůře obrobitelného materiálu oproti druhé sérii. Jakost materiálu byla sice stejná, ale desky pro experiment mohly být odebrány z plechů o jiných tavbách. Nebo mohla být přítomná jen místní odchylka vlastností materiálu?

Za třetí mohlo dojít k nestejnorodému dodávání chladicí emulze, která zároveň zajišťuje mazání závitu.

Za čtvrté a mým favoritem je to, že se domnívám, že došlo k částečnému opotřebení maticového závitníku, které je v začátku obrábění přívětivé a z hlediska energetické náročnosti žádané. Toto opotřebení odstraní nedostatky vzniklé z výroby, závitník se takzvaně „zaběhne“.

Mohly zde sehrát roly i další faktory, které jsem nezmínil. Tak či onak by stálo za další experiment provést měření v rozmezí mezi první a druhou sérií s mnohem více měřeními a sledovat zda dojde k podobnému jevu a určit jeho přesnou příčinu.

Dále by nebylo špatné zopakovat toto měření pro více závitníku pro rozsah od začátku až po poškození závitníku a sledovat jestli bude průběh sil pro stejnou jakost obráběného materiálu stejný, podobný nebo diametrálně odlišný.

Toto měření by se mělo provést i pro různé rychlosti řezání, a různé chladicí kapaliny. Výsledkem by byly vhodné parametry pro použití daného maticového závitníku pro danou jakost materiálu z hlediska efektivnosti použití a minimalizaci nákladů.

ZÁVĚR

Jak bylo uvedeno v úvodu, tato práce řešila vliv vzniklého opotřebení na silové zatížení povlakovaného maticového závitníku, při aplikaci na konkrétní jakosti materiálu EN C45E, při stanovených řezných podmínkách. Pro analýzu procesu a stanovení určitého předpokladu výsledků bylo zapotřebí se důkladně seznámit s tímto tématem a proto tato práce obsahuje teoretický rozbor dané problematiky. Pro samotné ověření předpokládaných dějů při procesu vytváření závitu bylo zapotřebí navrhnout experiment. Tento experiment spočíval v zatížení maticového závitníku v rozsahu, až vznikne takové opotřebení, při kterém již nedokáže vytvářet závity požadované jakosti. V průběhu zatěžování byly prováděny měření průběhu zatížení v předem určených místech. Počet a umístění těchto míst pro měření byl určen z předpokládané životnosti maticového závitníku. Při experimentu bylo dosaženo pro dané řezné podmínky celkem 745 závitů. Při tomto počtu bylo rozhodnuto s ohledem na opotřebení závitníku, že již v experimentu nebude pokračováno. Byly tedy získány data z pěti měřících sérií o to pro každou sérii po pěti měřeních. Z následně zpracovaných naměřených hodnot, které se zpracovaly, vyplynul téměř předpokládaný průběh silového zatížení až na nějaké výjimky. Tento průběh korespondoval s předpokladem postupného zvyšování silového zatížení s narůstajícím opotřebením závitníku při dalším a dalším řezání nového závitu. Výjimkou byla druhá série měření kde, naopak došlo k poklesu řezných sil, což bylo nepředpokládané. Tento pokles mohl být zapříčiněn mnoha faktory. Já se domnívám, že byl způsoben opotřebením nástroje, při kterém došlo k takzvanému „zaběhnutí závitníku“, kde toto opotřebení můžeme brát jako žádoucí, protože při něm dochází k odstranění nedokonalostí z výroby.

Dále byl v této práci dokumentován postupný průběh opotřebení na maticovém závitníku, kde bylo možné sledovat pro každou sérii měření postupné zvyšování opotřebení nástroje až po deformaci břitu. Z tohoto opotřebení byl patrný důvod zvyšování silového zatížení, ale nebylo jasné, co se děje na povrchu vniklého závitu a jaký tento děj může mít vliv na výsledné silové zatížení. Proto proběhla analýza tohoto povrchu a to na mikroskopu Alicona. Na povrchu závitu byl pozorován poškozený povrch, který se domnívám vznikl vytvářením a odpadáváním nárůstků na nástroji. Toto zjištění vysvětlovalo výkyvy v průběhu silového zatížení. Vznik nárůstků byl zapříčiněn zvolením nevhodných řezných podmínek. Obecně se předpokládá, že navýšení řezné rychlosti odstraňuje vznik nárůstků. Bylo by zajímavé zapakovat tento experiment pro vyšší řeznou rychlost a sledovat jestli skutečně dojde k odstranění těchto nárůstků, nebo byl problém i jinde a to například nevhodně zvoleným povlakem k jakosti obráběného materiálu nebo i z jiných příčin.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Závit. *Wikipedia* [online]. [cit. 2015-1-10]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1vit>
2. Metrický závit. *Wikipedia* [online]. [cit. 2015-01-10]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Metric%C3%BD_z%C3%A1vit3.
3. Whitworthův závit. *Wikipedia* [online]. [cit. 2015-01-10]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Whitworth%C5%AFv_z%C3%A1vit
4. LEINVEBER, Jan. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. Úvaly: ALBRA, 2003, 865 s. ISBN 80-864-9074-2
5. *Měření a kontrola závitu* [online]. [cit. 2015-01-21]. Dostupné z: http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/mereni_a_kontrola_zavitu.pdf
6. *Výroba vnitřního závitu tvářením* [online]. [cit. 2015-01-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-vnitrnich-zavitu-tvarenim>.
7. *Tvářecí závitník* [online]. [cit. 2015-01-22]. Dostupné z: <http://www.thermdrill.cz/produkty/tvareci-zavitnik/>
8. *Kovoobráběcí nástroje* [online]. [cit. 2015-01-30]. Dostupné z: <http://www.kovoobrabeci-nastroje.cz>
9. KOCMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. Druhé vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., prosinec 2005. 271 s. ISBN 80-214-3068-0
10. *Technická příručka* [online]. [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical_guides/cs-cz/c-2920-031.pdf
11. KUBÍČEK, Jaroslav. *Obrábění: Výroba závitů - shrnutí* [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: http://web.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_19-18.pdf
12. *Tváření závitu* [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://www.zavitovani.cz/vyroba-vnitrnich-zavitu/tvareni-zavitu>
13. HUMÁR, A. *Strojírenská technologie I: Technologie obrábění – 1. část*. Studijní opory. VUTFSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění [online]. 2006 [cit. 2015-03-30], s. 1-138. Dostupný z http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
14. *Tvorba a tvarování třísky* [online]. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_02.pdf
15. KOCMAN, Karel; PROKOP, Karel. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2
16. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

17. ČEP, Robert a Jana PETRŮ. Experimentální metody v obrábění [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, 1 CD-ROM [cit. 2015-03-15]. ISBN 978-80-248-2533-5.
18. KREJČÍK, Luboš a Jiří PSCHERA. *Kapaliny pro obrábění* [online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kapaliny-pro-obrabeni.html>
19. *Teorie obrábění: Teplo a teplota vznikající při třískovém obrábění* [online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: Http://www.moodle-trebesin.cz/pluginfile.php/645/mod_resource/content/0/Teplo%20a%20teplota%20p%C5%99%C5%A9
20. *Příručka pro technology: Není teplota příliš vysoká nebo nízká* [online]. [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-neni-teplota-prilis-vysoka-nebo-nizka.html>
21. HUMÁR, A. Strojírenská technologie II: Technologie obrábění . *Studijní opory. VUTFSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění* [online]. 2006 [cit. 2015-03-30], s. 84. Dostupný z http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobníTechnologie_II.pdf
22. AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cutting - A Practical Handbook*. ISBN 91-97 22 99-4-6.
23. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
24. *Technická příručka 2013* [online]. [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: www.mav.cz/dormer/Technicka_prirucka_2013.pdf
25. BOHDAN BOLZANO. *Zpracování nástrojových ocelí*. [online].[cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <http://prirucka.bolzano.cz/cz/technickapodpora/technickaprirucka/nastrojovky/zpracovaniNO/>
26. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. [online]. 2006 [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf
27. *CoroKey 2010* [online]. [cit. 2015-1-10]. Dostupné z <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/downloads/pages/search.aspx?q=Catalogues&rootsite=^cscz%24>
28. *Polycrystalline cubic boron nitride*[online]. [cit. 2015-1-10]. Dostupné z http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/polycrystalline_cubic_boron_nitride/pages/default.aspx
29. *Polycrystalline diamond* [online]. [cit. 2015-1-10]. Dostupné z http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/polycrystalline_diamond/pages/default.aspx

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCE	List 67
---------	-----------------	---------

30. *Mikrotechnologie* [online]. [cit. 2015-1-10]. Dostupné z http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCUQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.umel.feec.vutbr.cz%2Fnanoteam%2Fdata%2Fsoubory%2FMikrotechnologiestudijn%25C3%25AD%2520materi%25C3%25A1ly_Mikrotechnologie.docx&ei=D5MiVYGDEMmsswHS_IDYBw&usg=AFQjCNFhr7DoQ32gZDKUX9eWo4ICxC6Rww&bvm=bv.89947451,d.bGg&cad=rja
31. *Katalog povlaků* [online]. [cit. 2015-1-10]. Dostupné z: http://www.liss.cz/files/KatalogPovlaku2015CZ_WEB.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

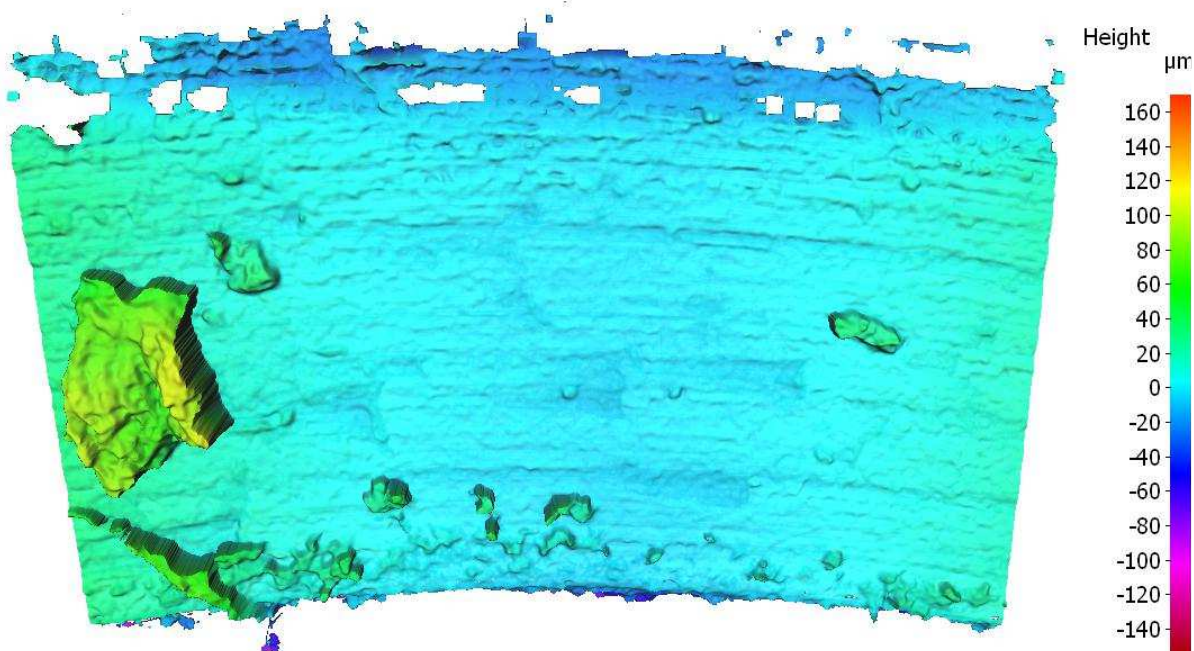
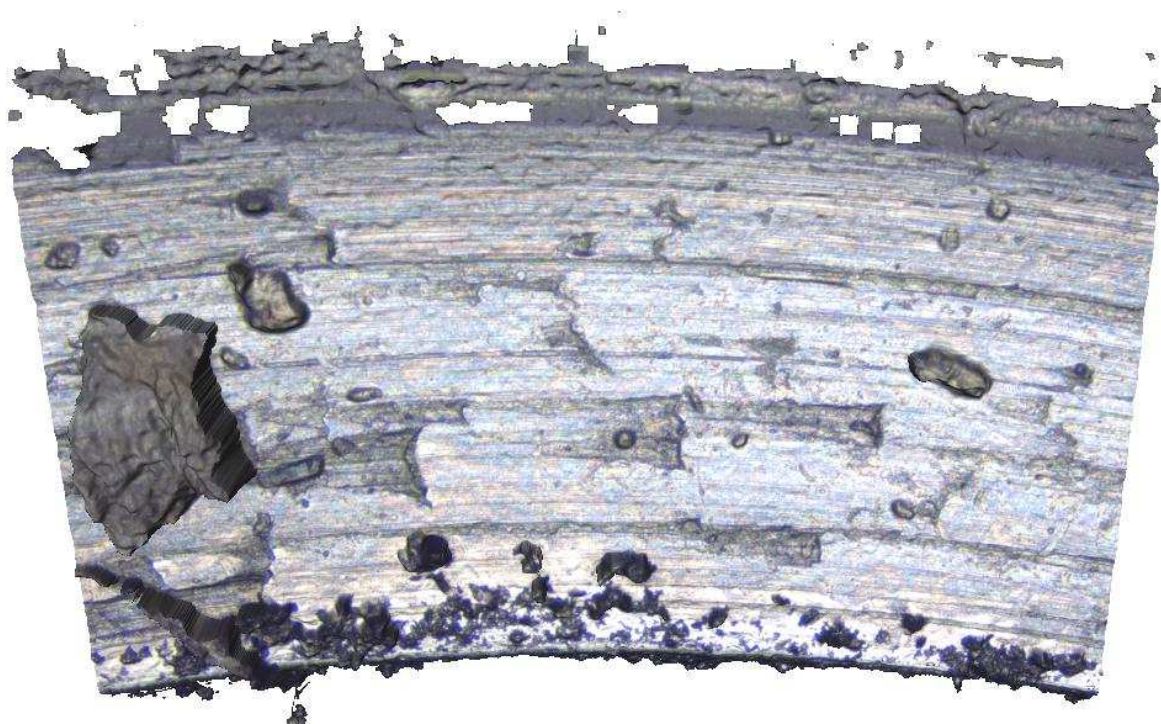
Zkratka	Jednotka	Popis
Al₂O₃	[-]	oxid hlinitý
Co	[-]	kobalt
Cr	[-]	chrom
CVD	[-]	Chemical Vapour Deposition
ČSN	[-]	Česká státní norma
EN	[-]	Evropská norma
HRC	[HRC]	tvrdost podle Rockwella
KNB	[-]	kubický nitrid boru
Mn	[-]	mangan
Mo	[-]	molybden
NbC	[-]	karbid niobu
Ni	[-]	nikl
PKD	[-]	polykrystalický diamant
PKNB	[-]	polykrystalický nitrid boru
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition
Si	[-]	křemík
Si₃N₄	[-]	nitrid křemičitý
SK	[-]	slinutý karbid
TaC	[-]	karbid tantalu
TiC	[-]	karbid titanu
TiN	[-]	nitrid titanu
V	[-]	vanad
VB	[-]	šířka fazetky opotřebení na hřbetě
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
VC	[-]	karbid vanadu
W	[-]	wolfram
WC	[-]	karbid wolframu

Symbol	Jednotka	Popis
A_d	$[mm^2]$	plocha řezu
C_{Fc}	$[-]$	empirická konstanta vlivu řezné síly
C_{Ff}	$[-]$	empirická konstanta vlivu posuvové síly
C_{Fp}	$[-]$	empirická konstanta vlivu pasivní síly
F	$[N]$	celková řezná síla
F_c	$[N]$	řezná síla
F_f	$[N]$	posuvová síla
F_p	$[N]$	pasivní síla
P_c	$[W]$	řezný výkon
Q	$[J]$	teplo
Re	$[Mpa]$	mez kluzu
R_m	$[Mpa]$	mez pevnosti v tahu
T	$[min]$	trvanlivost nástroje
v_c	$[m.min^{-1}]$	řezná rychlost
V_m	$[dm^3]$	objem odebraného materiálu
V_t	$[dm^3]$	objem volně ložených třísek
W	$[-]$	objemový součinitel vzniklých třísek
a_p	$[min^{-1}]$	otáčky
d	$[mm]$	průměr
f	$[-]$	empirické exponenty vlivu řezné síly
i	$[-]$	empirické exponenty vlivu posuvové síly
k_c	$[-]$	empirické exponenty vlivu pasivní síly
n	$[mm]$	hloubka záběru ostří
t	$[mm]$	posuv
v_c	$[m.min^{-1}]$	řezná rychlost
v_{cT}	$[m.min^{-1}]$	řezná rychlost, která odpovídá určité trvanlivosti bříty zkoumaného materiálu
v_{cTet}	$[m.min^{-1}]$	řezná rychlost, která odpovídá stejné trvanlivosti bříty etalonového materiálu
x_{Fc}, y_{Fc}	$[N.mm^{-2}]$	měrná řezná síla
x_{Ff}, y_{Ff}	$[min]$	doba řezného procesu
x_{Fp}, y_{Fp}	$[-]$	index obrobitelnosti
Φ	$[^\circ]$	úhel roviny stříhu
Φ_1	$[^\circ]$	úhel kluzné roviny

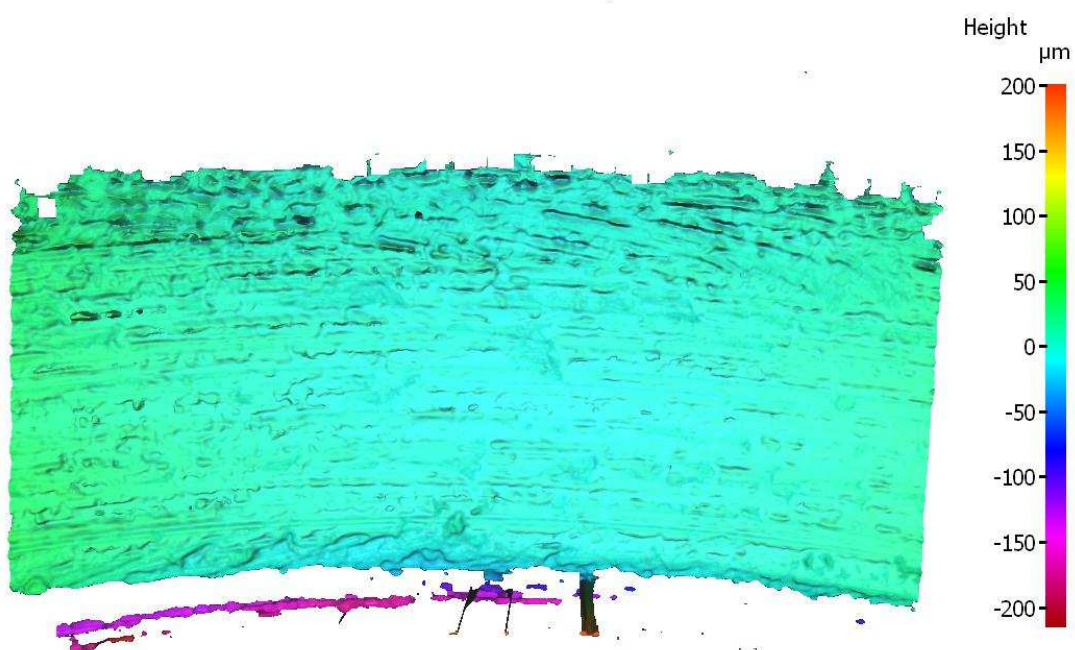
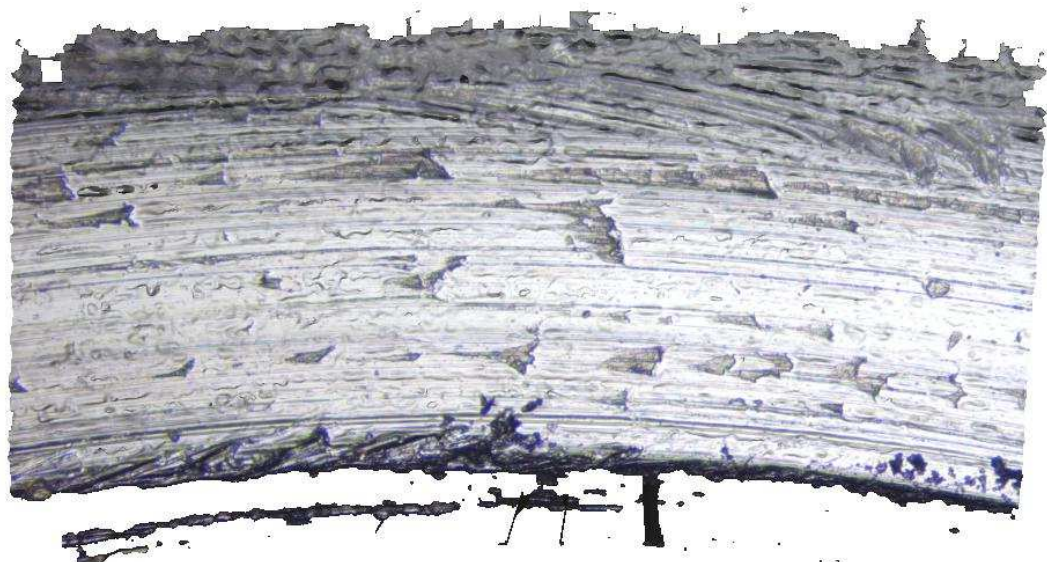
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Povrch 1. otočky závitu 1. série.
Příloha 2	Povrch 10. otočky závitu 1. série
Příloha 3	Povrch 1. otočky závitu 2. série.
Příloha 4	Povrch 10. otočky závitu 2. série
Příloha 5	Povrch 1. otočky závitu 3. série.
Příloha 6	Povrch 10. otočky závitu 3. série
Příloha 7	Povrch 1. otočky závitu 4. série.
Příloha 8	Povrch 10. otočky závitu 4. série

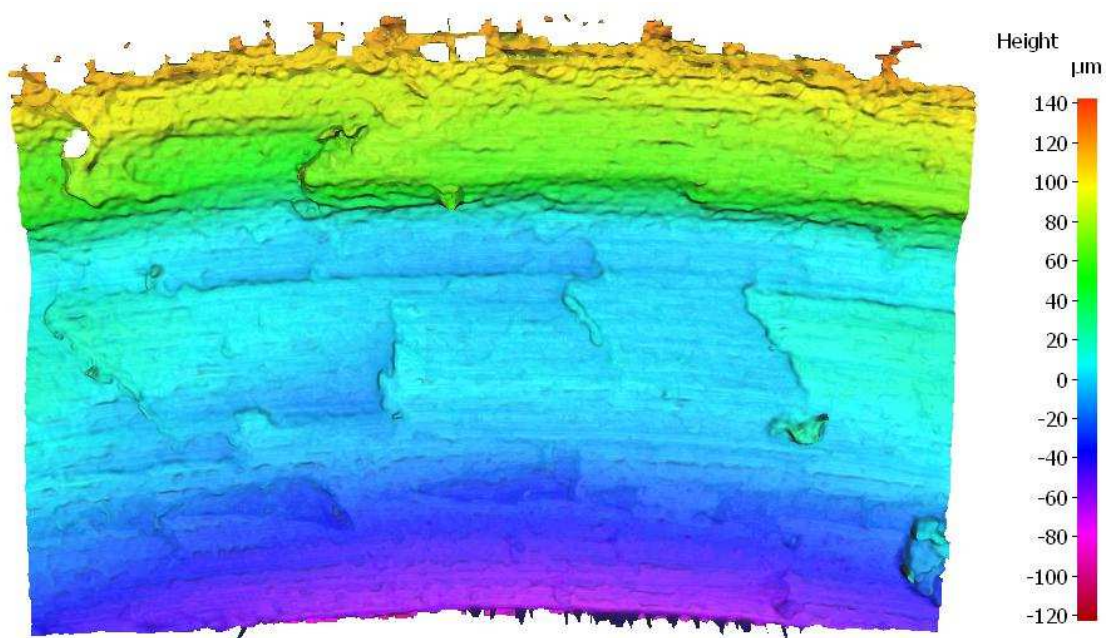
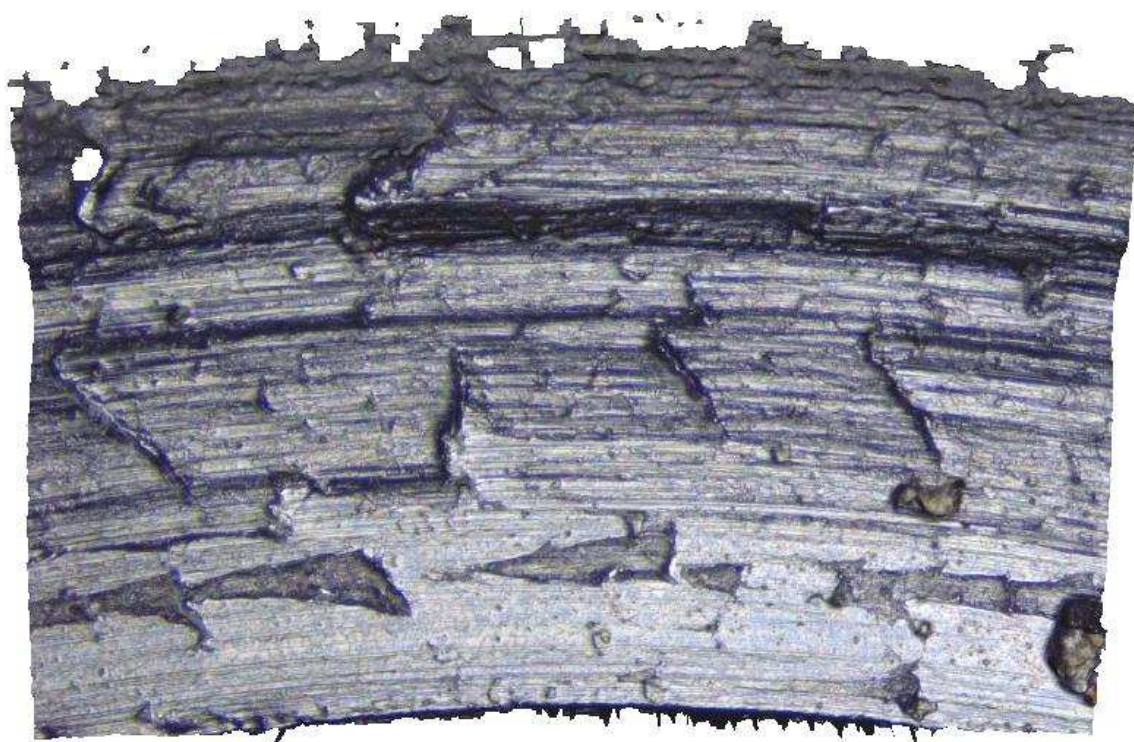
PŘÍLOHA 1 – POVRCH 1. OTOČKY ZÁVITU 1. SÉRIE



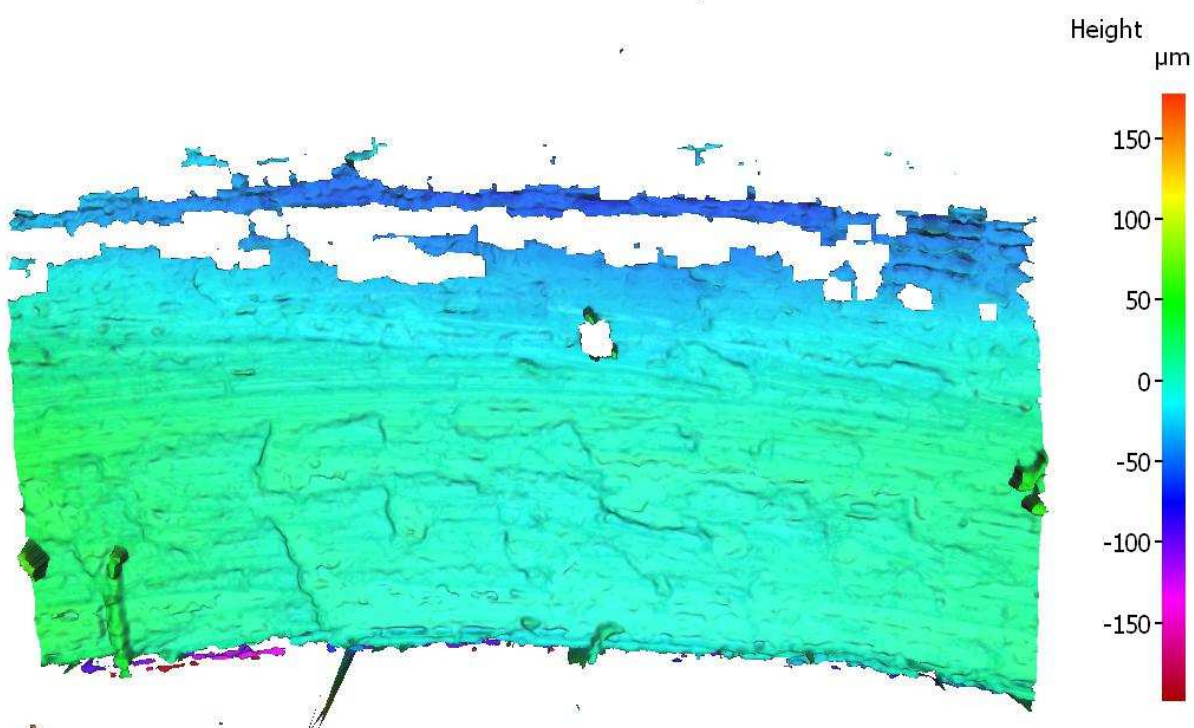
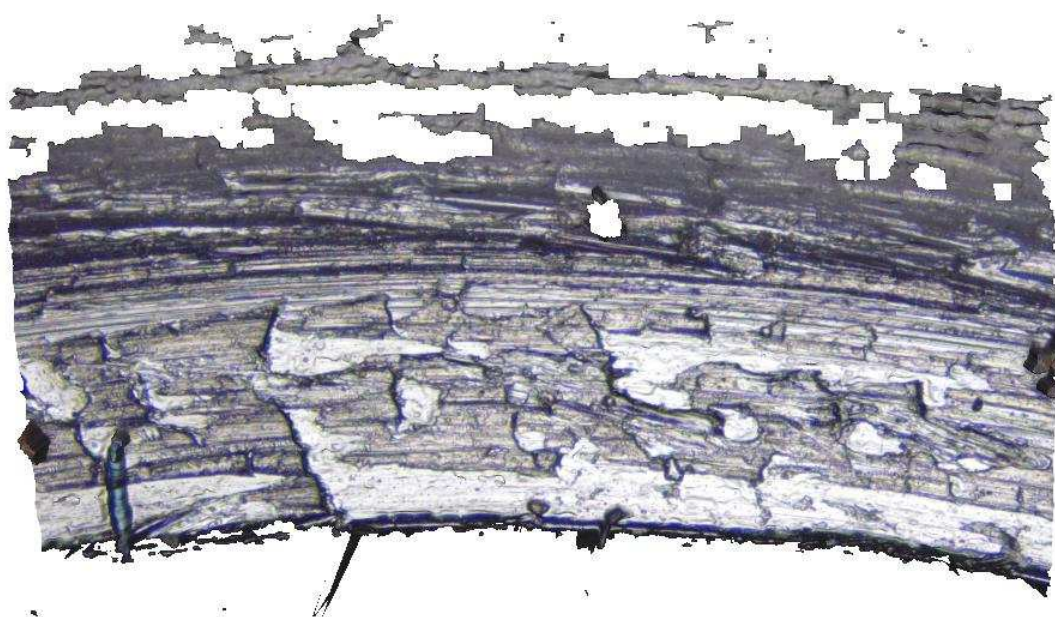
PŘÍLOHA 2 – POVRCH 10. OTOČKY ZÁVITU 1. SÉRIE



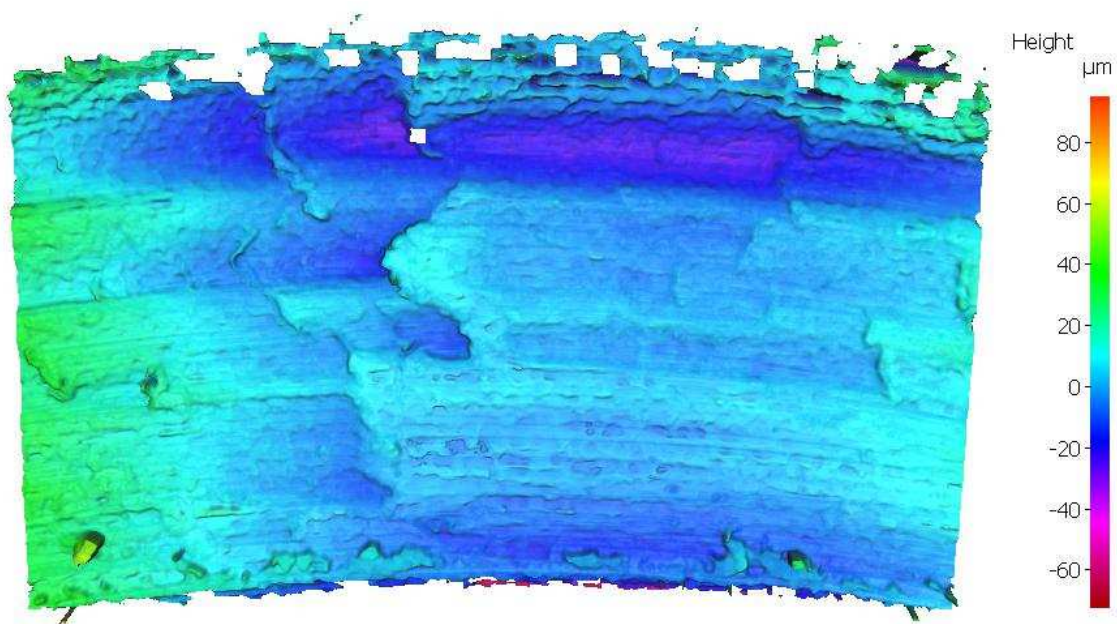
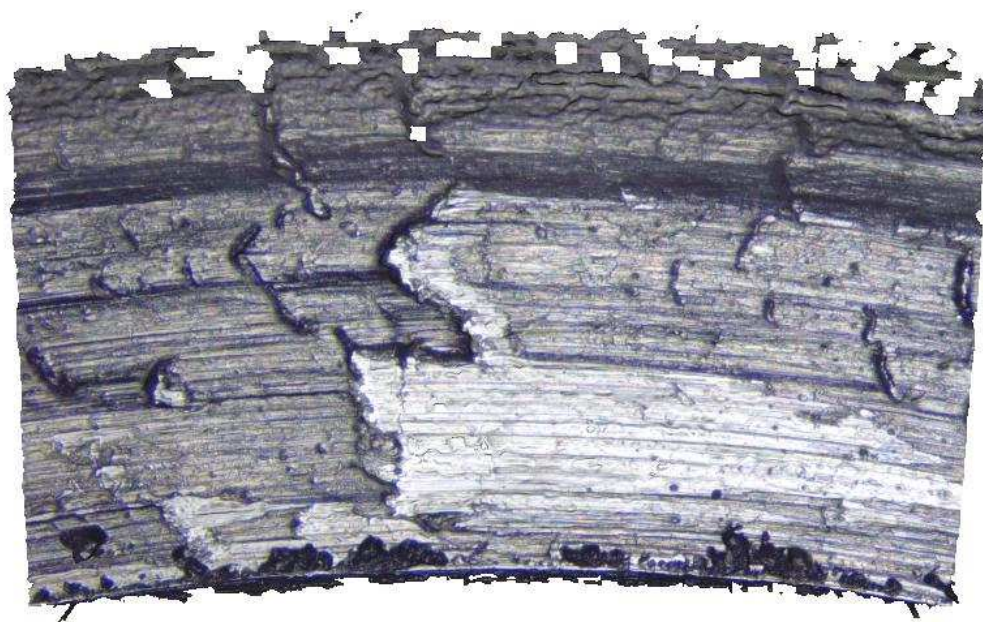
PŘÍLOHA 3 – POVRCH 1. OTOČKY ZÁVITU 2. SÉRIE



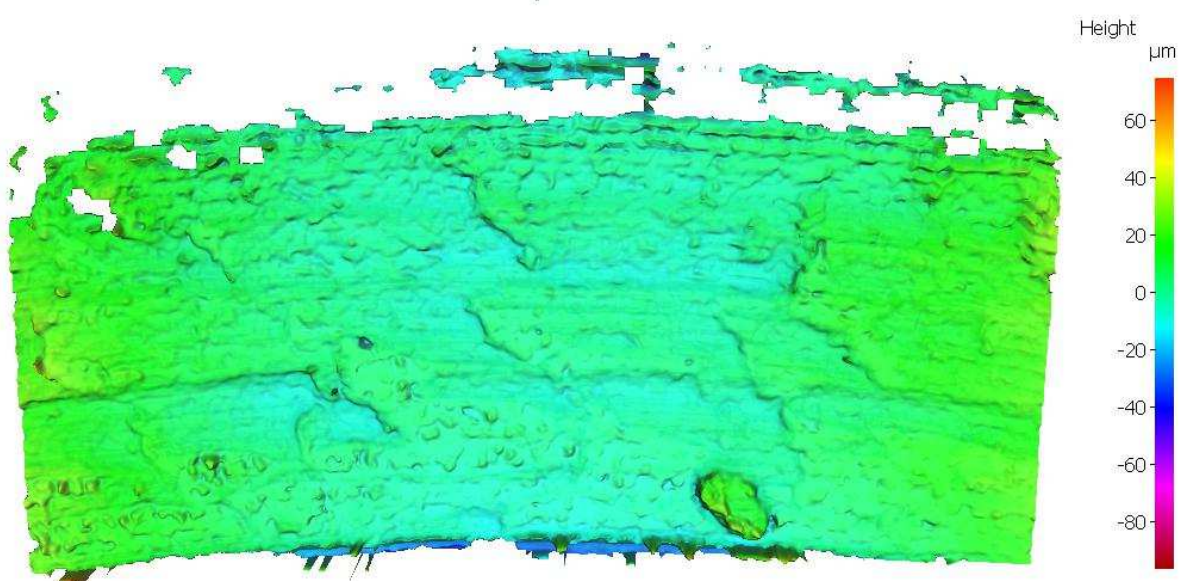
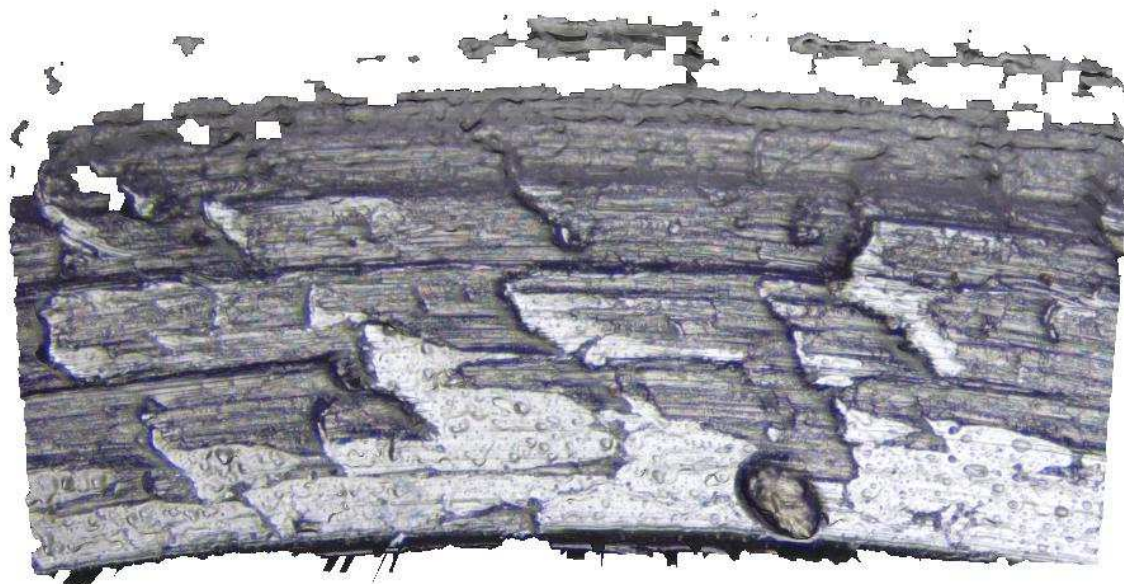
PŘÍLOHA 4 – POVRCH 10. OTOČKY ZÁVITU 2. SÉRIE



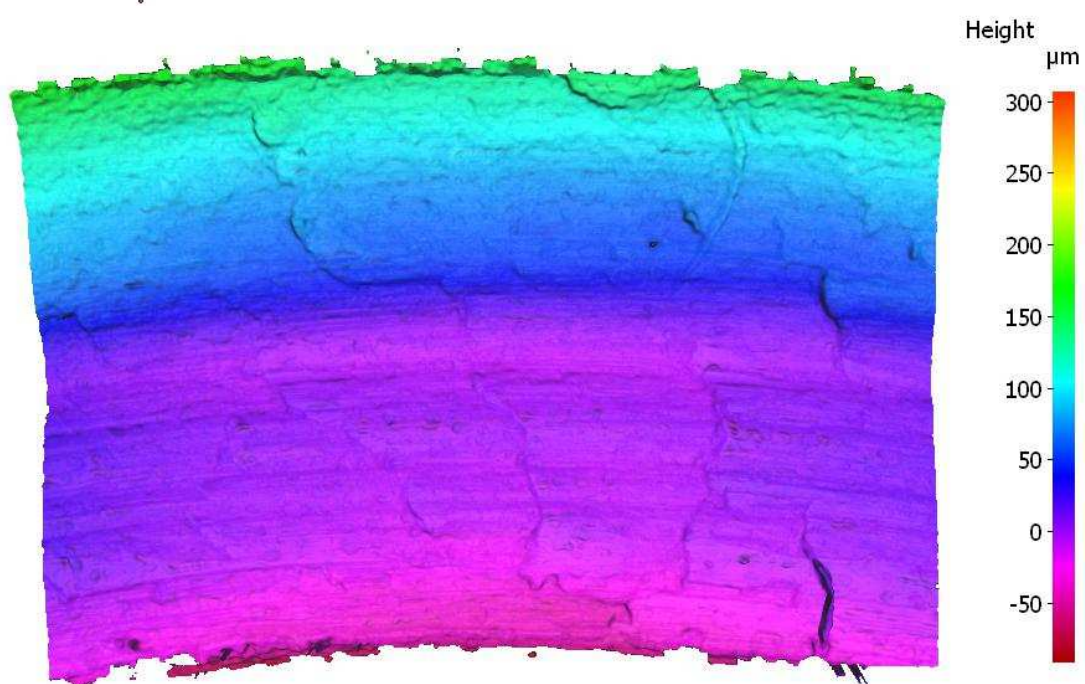
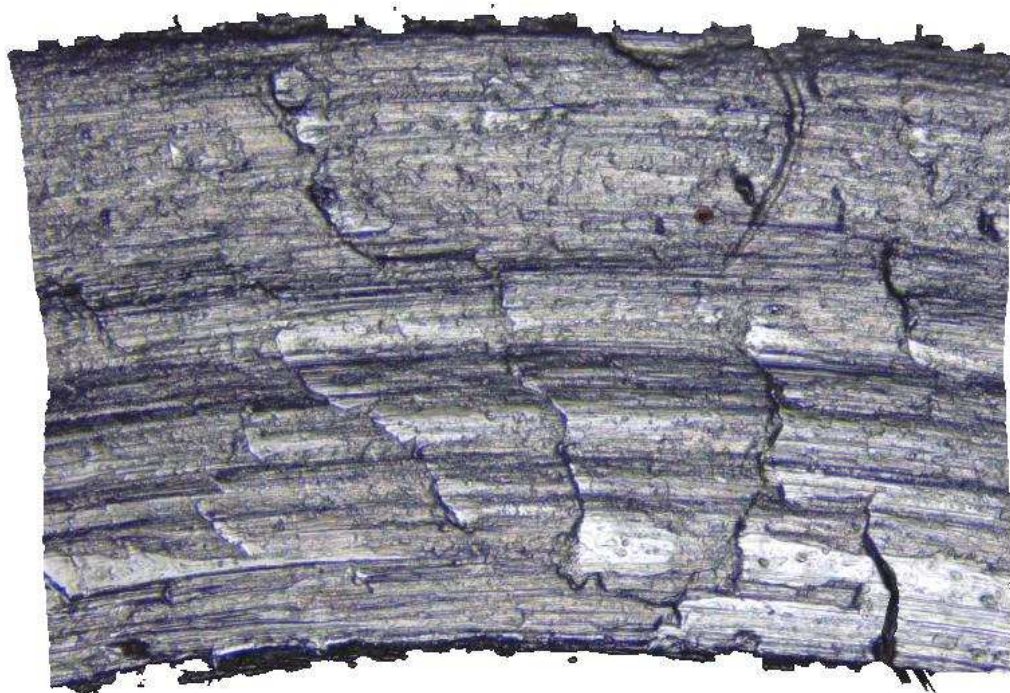
PŘÍLOHA 5 – POVRCH 1. OTOČKY ZÁVITU 3. SÉRIE



PŘÍLOHA 6 – POVRCH 10. OTOČKY ZÁVITU 3. SÉRIE



PŘÍLOHA 7 – POVRCH 1. OTOČKY ZÁVITU 4. SÉRIE



PŘÍLOHA 8 – POVRCH 10. OTOČKY ZÁVITU 4. SÉRIE

