



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

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. Tomáš Vondra

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Tomáš Vondra**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Akademický rok: 2017/18

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:

Práce se zabývá zvyšováním řezivosti maticových závitníků v zušlechtnuté oceli pomocí PVD povlaků.

Cíle diplomové práce:

- Teoretický rozbor problému.
- Návrh experimentálních zkoušek maticových závitníků.
- Realizace experimentů, jejich statistické vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

SCHRADER, G. F., ELSHENNAWY A. K., DOYLE, L. E. Manufacturing processes and materials. [cit. 20. listopadu 2017]. Dostupné na World WideWeb.

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o., 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. ISBN 80-214-3068-0.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.

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

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed., 2005, pp. 651. ISBN 0-19-514206-3.

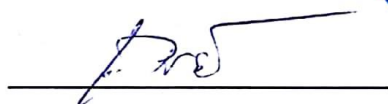
BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. TU Alexandra Dubčeka v Trenčíne. Slovensko, Trenčin, s. 112. ISBN 80-8075-013-0.

BARÁNEK, I., ŠANDORA, J. Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky. TnUAD, Trenčín, 2004, s. 212. ISBN 80-8075-013-0.

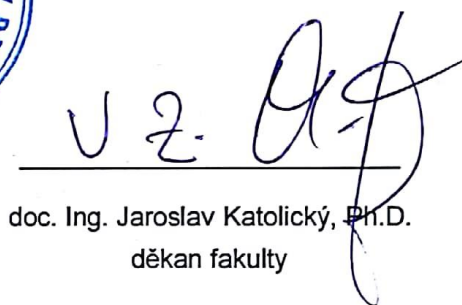
MARINESCU, I. D. et al. Tribology of abrasive machining processes. William Andrew, Norwich, 2004, pp. 724. ISBN 0-8155-1490-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 14. 12. 2017



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu



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

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je popsat hlavní metody výroby závitů a studium vlivu používaných povlaků na řezivost u závitníků. Za použití stejných řezných podmínek byly provedeny testy závitníků z rychlořezné oceli, které měly různé PVD povlaky (Physical Vapour Deposition). Z naměřených hodnot řezných momentů byla provedena analýza, která spolu s vyhodnocením opotřebení nástrojů vedla k závěru.

Klíčová slova

řezivost, závitník, povlakování, PVD

ABSTRACT

The aim of this master's thesis is to deal with main thread production methods and to study the influence of coatings on tap cutting performance. The high-speed steel cutting taps with different PVD coatings (Physical Vapour Deposition) were tested, while the same cutting conditions were set. Cutting torques were measured and analysed, which together with the results of evaluation of tool wear led to conclusion.

Key words

cutting performance, cutting tap, coating, PVD

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VONDRA, Tomáš. *Zvyšování řezivosti maticových závitníků pomocí povlaků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2018. 78 s. 6 příloh. Vedoucí diplomové práce: 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.

.....
Datum

.....
Bc. Tomáš Vondra

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce prof. Ing. Miroslavovi Piškovi, CSc. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1. TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU.....	10
1.1 Závít a jeho rozdělení.....	10
1.2 Výroba závitů.....	11
1.2.1 Obrábění závitů.....	11
1.2.1.1 Soustružení	12
1.2.1.2 Frézování	14
1.2.1.3 Řezání závitovými čelistmi a závitníky.....	16
1.2.2 Tváření závitů	25
1.2.2.1 Válcování.....	25
1.2.2.2 Tvářecí závitníky	26
1.3 Materiály nástrojů	36
1.3.1 Nástrojové oceli	37
1.3.2 Slinuté karbidy	40
1.3.3 Řezná keramika.....	41
1.3.4 Cermety.....	42
1.3.5 Polykrystalický kubický nitrid bóru.....	42
1.3.6 Polykrystalický diamant.....	42
1.4 Povlakování.....	43
1.4.1 Technologie CVD	45
1.4.2 Technologie PVD.....	46
1.4.3 Vybrané povrchové úpravy a povlaky pro závitníky	50
1.4.4 Úpravy nástrojů.....	52
2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK MATICOVÝCH ZÁVITNÍKŮ	54
2.1 Obráběný materiál.....	54
2.2 Volba nástrojů	54
2.3 Řezné podmínky	55
2.4 Obráběcí stroj.....	56

2.5	Způsob snímání potřebných veličin	56
2.6	Teoretický rozbor průřezu třísky	57
3	REALIZACE EXPERIMENTŮ, JEJICH STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ	60
3.1	Trvanlivost nástroje	60
3.2	Skutečný průběh řezného momentu	61
3.3	Oblast zařezání náběhové části	62
3.4	Analýza naměřených hodnot	63
3.5	Vyhodnocení řezivosti	66
ZÁVĚR		68
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ		70
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		76
SEZNAM PŘÍLOH		78

ÚVOD

Výroba závitů patří ve strojírenské praxi k základním kamenům, neboť v mnoha produktech jsou závity nepostradatelnými prvky. Ať už jde o rozebíratelné spoje, kde je potřeba pomocí šroubu a matice spojit dva plechy k sobě, nebo o pohybové šrouby, které nám pomohou při zvedání auta u nůžkového zvedáku. V případě výroby vnitřních závitů menších průměrů se hojně využívají závitníky, které mohou být buď řezací (obr. 1), nebo tvářecí. Obecně se dá říci, že výroba závitů bývá jedna z posledních technologických operací, které se na výrobku provádějí. O to horší má dopad, pokud dojde k selhání např. zalomením nástroje, neboť veškerá přidaná hodnota, která byla materiálu dána v předchozích operacích, přijde nazmar. V některých případech je ale možné závity opravit tak, že se původní převrtá vrtákem o větším průměru a vytvoří se závit nový, větší. Následně se do něj našroubuje závitová vložka, která má již vyroben závit o správném rozměru. Je proto nezbytné, aby byl proces závitování stabilní a nedocházelo ke zbytečným chybám, které by se daly vyřešit změnou řezných parametrů, geometrií nástroje nebo jeho materiálu či povlaku. A právě i správná volba povlaku má zásadní vliv na opotřebení a s tím přímo související trvanlivost. Neexistuje závitník, jehož povlak by byl univerzální a vhodný pro všechny druhy materiálů. Každý výrobce udává, pro jaké materiály jsou určité závitníky vhodné, jaký mají mít průměr předvrtané díry apod. Nelze ale říci, že se závitník bude chovat v nízkolegované a středně legované oceli stejně, neboť každý materiál se více či méně liší. Proto má praktická zkouška pořád svou nenahraditelnou úlohu.

Při výběru nástroje se dá mnohdy u výrobců setkat s tím, že pro jednu konkrétní aplikaci nabízí několik závitníků s různými povlaky. Ty se odlišují zejména použitou technologií povlakování a právě materiálem, který je na povrch nástroje nanášen. Povlak závitníků zlepšuje jejich vlastnosti, zejména zvyšuje jejich tvrdost a odolnost proti opotřebení a kluzné vlastnosti. Z toho plyne, že díky povlakům lze dosáhnout lepší kvality vyrobených závitů a nižší energetické náročnosti, a tedy i k finanční úspoře. Vývoj povlaků jde neustále kupředu, zejména v oblasti vícevrstvého povlakování, kde jsou jednotlivé vrstvy tvořeny různými materiály.



Obr. 1 Maticové závitníky [1].

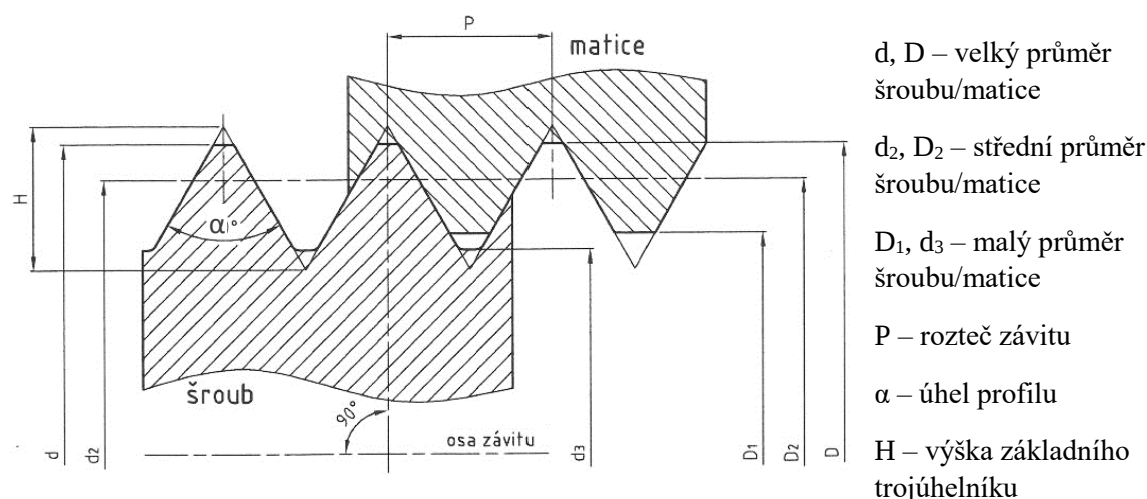
1. TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU

Důležitými a mnohdy kritickými prvky spousty výrobků a strojů jsou závity. Díky nim může šroub sloužit jako spojovací prvek, vodící šroub u soustruhu může vykonávat přenos rotačního pohybu na přímočarý anebo lze díky šroubu upevnit obrobek do čelistí svěráku.

Výroba těchto strojních prvků ale znamená použít specializované nástroje. Je několik způsobů, jak závit vyrobit a je nepřehledné množství materiálů nástrojů, které to dokážou. Závity lze vyrobit soustružením, frézováním, pomocí závitníků, závitových hlav a čelistí ale také válcováním nebo tvářecími závitníky. Velmi často se jedná o jednu z posledních operací, která je použita při výrobě součástí. Je proto nesmírně důležité, aby byla zvolena vhodná technologie a nástroje, neboť v případě chyby může dojít k znehodnocení celého výrobku.

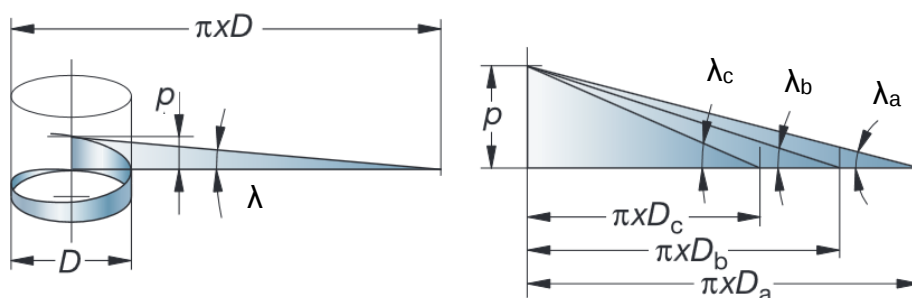
1.1 Závit a jeho rozdělení

Z hlediska umístění profilu vzhledem k základnímu tělesu lze závity rozdělit na vnější a vnitřní. Dále dle směru stoupání šroubovice na levé a pravé, podle počtu závitů na jednochodé a vícechodé. Závit se také může nacházet nejen na válcové ploše, ale také na kuželové ploše, tedy závity válcové a kuželové. Dle funkce jsou dále rozděleny na spojovací a pohybové. Profil závitů a jeho nejdůležitější parametry jsou zobrazeny na obr. 1.1. a přehled různých druhů a jejich použití je v tabulce 1.1. Kvalita vyrobeného závitů se odvíjí od technologie, která je použita. Kvalitou je myšlena hlavně rozměrová a geometrická přesnost a drsnost povrchu.



Obr. 1.1 Základní profil závitů [2].

Závit je charakterizován hlavně jeho středním průměrem d_2 (v případě matice D_2) a roztečí. V případě jednochodého závitů je rozteč P rovna stoupání P_h . U několikachodých závitů je stoupání rovno násobku rozteče a počtem chodů. Dále úhel stoupání, který vznikne rozvinem šroubovice do roviny, jak je tomu znázorněno na obr. 1.2, která se změní v přímku a svírá s rovinou kolmou k ose válcové plochy úhel stoupání λ [3]. Z obrázku je též patrné, že při stejné rozteči a různém průměru závitů se úhel stoupání mění.



Obr. 1.2 Úhel stoupání šroubovice [3].

Tab. 1.1 Přehled základních spojovacích a pohybových závitů [4, 5].

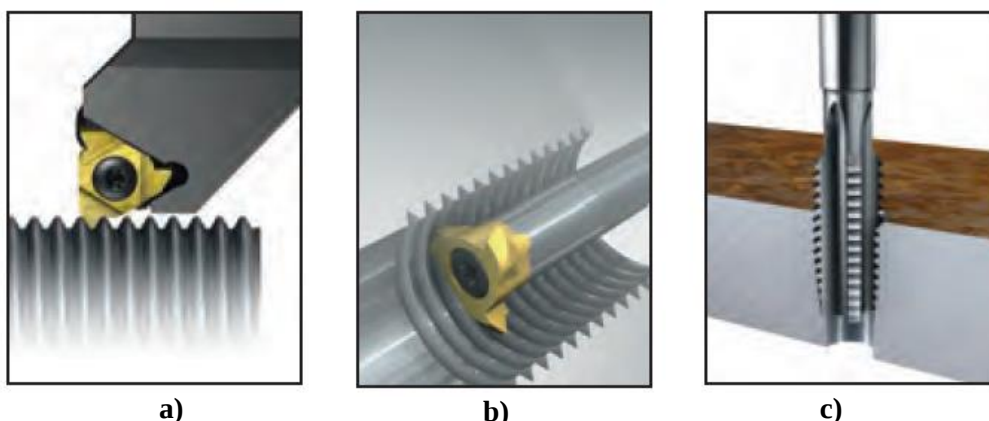
Název	Příklad označení	Rozměr označuje	Úhel profilu závitu	Použití
Metrický	M 10	velký průměr závitu v mm	60°	šrouby, matice, běžná spojení
Whitworthův	W 7/16	velký průměr závitu v palcích	55°	starší stroje, u nás se moc nepoužívá
Trubkový válcový	G 3/4	světlost trubky v palcích	55°	spojování trubek, armatur a tvarovek
Trubkový kuželový	R 1/8 – vnější Rc 1/8 – vnitřní	světlost trubky v palcích	55°	spojování trubek, armatur a tvarovek
Oblý	Rd 10	velký průměr závitu v mm	30°	závit litinových šroubů
Lichoběžníkový rovnoramenný	Tr 20×4	velký průměr závitu a stoupání	30°	pohybové šrouby a matice
Lichoběžníkový nerovnoramenný	S 20×4	velký průměr závitu a rozteč	nejčastěji 30° + 3°	pohybové šrouby a matice
Edisonův	E 14	velký průměr závitu v mm	-	žárovky
Pancéřový	P 11	velký průměr závitu v mm	80°	elektrotechnika

1.2 Výroba závitů

Závity mohou být vyrobeny pomocí třískového obrábění nebo tváření. Nástroj bývá jednoúčelový a může být jednobřitý, jako např. soustružnický nůž z rychlořezné oceli, nebo vícebřitý, kde je nástroj fréza, závitník nebo závitová čelist. Závity lze také spatřit na výrobcích, kde byly vyrobeny odléváním nebo vstřikováním plastů [6].

1.2.1 Obrábění závitů

Technologie, které se nejčastěji používají při výrobě závitu třískovým obráběním, jsou soustružení, frézování a řezání závitů závitníkem (obr. 1.3). Dnes je již běžnou praxí používat nástroje ze slinutých karbidů. O tom, jakou technologií se daný závit bude obrábět, rozhoduje technolog, který vyhodnotí faktory jako např. konstrukce součásti, možnosti strojů atd., aby došlo k co nejlepšímu výsledku.



Obr. 1.3 Některé technologie výroby závitů třískovým obráběním: a) soustružení, b) frézování, c) řezání závitů závitníkem [3].

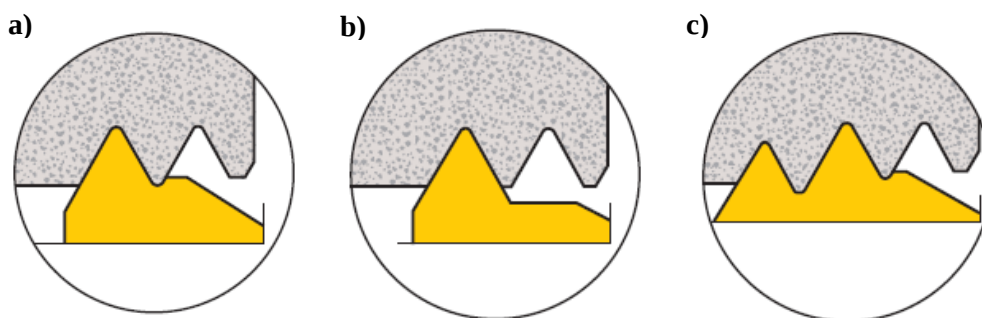
1.2.1.1 Soustružení

Soustružení závitů patří obvykle k nejproduktivnějším metodám obrábění. Provádí se na soustruzích, které mohou být univerzální, revolverové, poloautomatické, automatické nebo se může jednat o soustružnická centra. Nástrojem je soustružnický závitový nůž, přičemž v dnešní době se používají zejména nástroje s VBD (vyměnitelná břitová destička), které mají profil odvozen od profilu závitů a mohou být jednodílné nebo hřebíkové (obr. 1.4). Starší typy nástrojů z rychlořezné oceli jsou celistvé [7].



Obr. 1.4 Soustružení vnitřního a vnějšího závitů [8].

Nástroj s VBD s plným profilem (obr. 1.5a) se používá nejčastěji. Výhodou je, že po obrábění není nutné odstraňovat otřepy, neboť dochází k obrobení kompletního tvaru závitů včetně vrcholu. Proto je nutné zanechat na obrobku patřičný přídavek. Jiné je to u V-profilu (obr. 1.5b), kde nedochází k seříznutí vrcholu. Je nezbytné, aby měl obráběný prvek pro vnitřní nebo vnější závit správný rozměr. Výhodou je, že lze tímto profilem vyrábět závitů s určitým rozsahem stoupání, a tedy není potřeba skladovat velké množství různých typů VBD. Zvýšit produktivitu několikanásobně dokáží hřebíkové destičky (obr. 1.5c), které mají více než jeden hrot. U tohoto typu však vznikají větší řezné síly, neboť ostří je delší [7].



Obr. 1.5 Profily závitových VBD: a) plný profil, b) V-profil, c) hřebínkový [3].

Použitím jednodílného nože se závit obrábí na několik záběrů, tzn. při prvním průchodu se obrobí jenom určitá část závitu, kde na konci nůž vyjede ze záběru a vrátí se do výchozího bodu. Provede se přísuv a následuje další záběr, kde dochází k odběru materiálu z již předobrobené drážky. Důvodem, proč se závit neobrábí celý na jeden průchod je ten, že při soustružení se používají vysoké řezné a posuvové rychlosti a relativně malý úhel špičky, který u metrického závitu činí 60° , činí břit velmi zranitelným vůči silám, které vznikají. Každý další záběr ale ubírá více materiálu než ten předchozí, pokud by šířka záběru ostří (a_p) byla pořád stejná. Z tohoto důvodu se šířka záběru ostří s každým záběrem postupně snižuje. Je třeba najít kompromis, na kolik záběrů se bude závit obrábět. Příliš malý počet (velké a_p) by vedl k přetěžování nástroje kvůli vzniku velkých řezných sil, a naopak příliš velký počet by měl za následek brzké opotřebení břitu [7].

Přísuv může být prováděn několika způsoby, které jsou znázorněny na obr. 1.6. U všech těchto metod se však doporučuje použít radiální přísuv při posledním dokončovacím řezu, a to kvůli kvalitě obráběného povrchu. Druhy přísuvů jsou [7, 9]:

a) Radiální přísuv

Přísuv směřuje kolmo na osu rotace obrobku. U tohoto způsobu dochází k rovnoměrnému opotřebení nástroje, avšak nevýhodou je větší náchylnost ke kmitání, které se objevuje u obrábění závitů s větším stoupáním.

b) Boční přísuv

Závit je obráběn z boku a tříška má tak lepší možnost uniknout z místa řezu. Nevýhodou je však nepravidelné opotřebení břitu nástroje a díky neustálému tření břitu VBD, který není v záběru, je zhoršena kvalita povrchu na jednom boku profilu závitu.

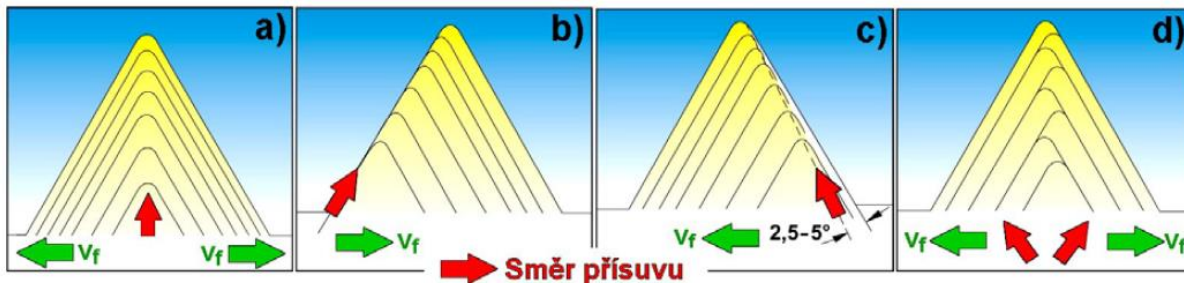
c) Boční přísuv modifikovaný

Doporučené použití úhlu je 3° až 5° a díky němu nedochází ke tření nástroje s již obrobenou plochou a kvalita povrchu je tedy lepší, zejména u měkkých materiálů. Boční přísuv (i s odklonem) se doporučuje zvláště u závitu s velkým stoupáním. Tento způsob by se však neměl používat u materiálů jako korozivzdorné oceli nebo oceli s velmi nízkým obsahem uhlíku.

d) Střídavý přísuv

Používá se převážně při soustružení závitů s velkým stoupáním. Výhodou je, že se břit nástroje se opotřebovává rovnoměrněji. Jsou zde však vyšší nároky na programování.

Principiálně nejdůležitějšími parametry při obrábění závitů jsou posuv (f) a otáčky (n), neboť stoupání závitu (P_h) je rovno posuvu nástroje na otáčku. V porovnání s obráběním válcové plochy se používají výrazně vyšší posuvové rychlosti. Podle typu stroje se o správný poměr posuvové rychlosti a otáček stará vodící šroub, vačka nebo CNC řízení (Computer Numerical Control – počítačem řízené stroje) [7].



Obr. 1.6 Druhy přísuvu u soustružení závitu: a) radiální, b) boční, c) boční přísuv modifikovaný, d) střídavý [9].

Řezné parametry se volí podle toho, o jaký typ a velikost závitu se jedná. Dále podle materiálu nástroje a zda má povlak a také podle materiálu polotovaru. Všechny tyto informace by měly být k dispozici u každého výrobce těchto nástrojů.

1.2.1.2 Frézování

Výroba závitů frézováním je často používaná technologie, kdy k tvorbě závitu dochází pomocí rotačního nástroje, který koná hlavní pohyb. Existuje několik typů nástrojů, jejichž odlišnosti jsou znázorněny na obr. 1.7 až 1.10.

a) Závitové kotoučové frézy

Nástroj je obvykle vyroben z HSS (z anglického High Speed Steel, rychlořezná ocel) nebo se používají kotoučové frézy s VBD. Frézují se zejména dlouhé lichoběžníkové závity. Fréza je natočena vůči obrobku o úhel stoupání závitu [9].

b) Hřebenové válcové závitové frézy

Jsou vyráběny jako nástrčné nebo stopkové frézy. Jejich závitový profil na válcové ploše může mít šroubové nebo přerušované přímé drážky [9].

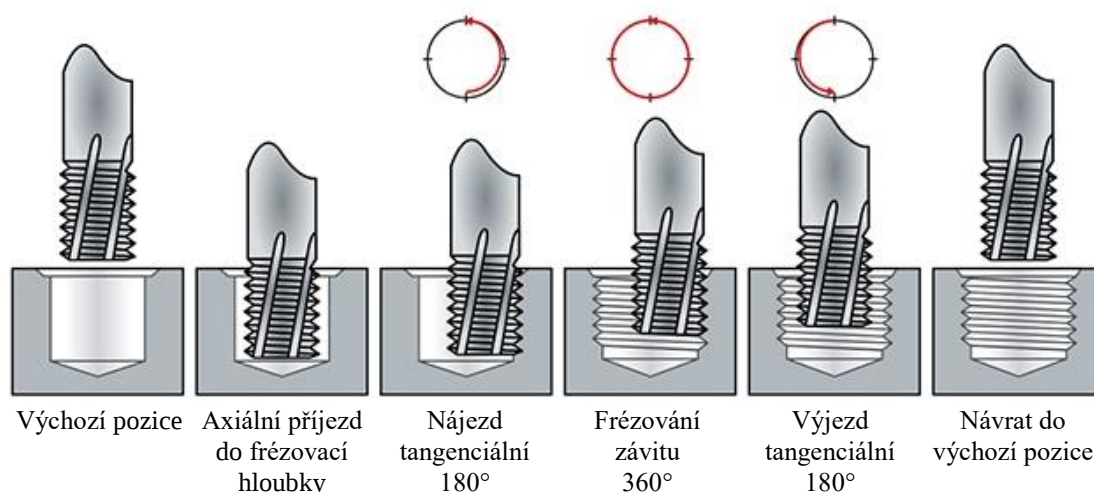


Obr. 1.7 Frézovací nástroj: a) závitová kotoučová fréza s VBD, b) hřebenová válcová závitová fréza s VBD [10, 11].

c) Stopkové závitové frézy

Jedná se o velmi produktivní způsob výroby závitů, zvláště dlouhých vnějších i vnitřních. Nástroj koná rotační pohyb a zároveň také koná pohyb po spirálovité trajektorii kolem osy obráběného závitu. Není to vždy pravidlem, neboť vždy záleží na typu konkrétního stroje. Spirálový pohyb může konat i obrobek, který je upnut ke stolu, který je schopen tohoto pohybu a nástroj koná pouze rotační pohyb. Výhodou je, že lze závit rezat blízko dna slepých děr. Výrobu dokáží zajistit pouze CNC frézky a obráběcí centra, neboť je třeba programovat nástroj (nebo obrobek) pomocí kruhové interpolace [9].

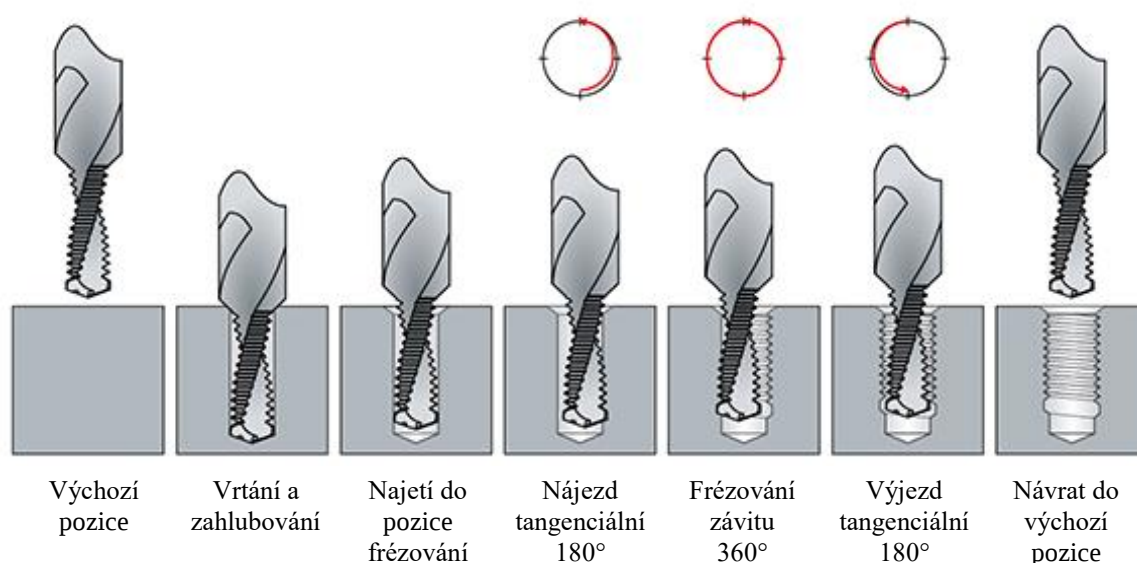
Mechanicky upnutá destička bývá nejčastěji ze slinutého karbidu a její hřebenový profil odpovídá danému závit. Jeden nástroj dokáže obrobit závit na různých průměrech válcové plochy, výrobce by měl uvádět v jakém rozsahu je destička schopna řezat [3].



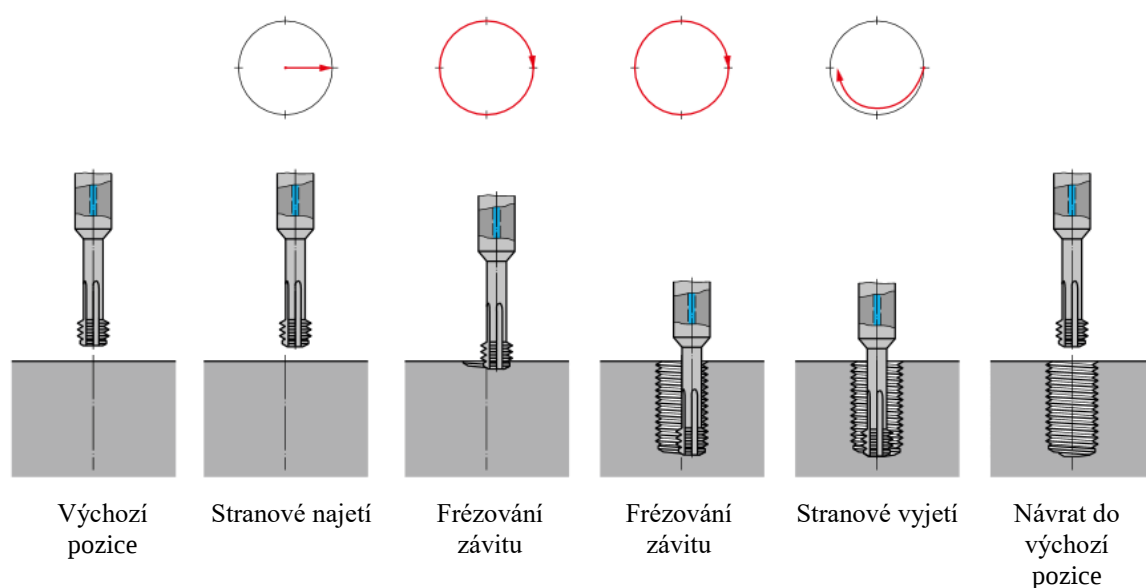
Obr. 1.8 Princip frézování závitu pomocí stopkové frézy [12].

d) Vrtací závitové frézy

Monolitní závitová vrtací fréza je speciálním příkladem nástroje pro výrobu vnitřního závitu. Nástroj je vyroben z nepovlakovaných nebo povlakovaných slinutých karbidů. Tato fréza kombinuje 3 nástroje jedním, a to vrták, závitovou frézu a záhlubník. Frézy mají nejčastěji přívod řezné kapaliny vnitřkem nástroje a jsou v provedení s přímými nebo šroubovitými závitovými drážkami. Velkou výhodou je, že není potřeba více nástrojů a šetří se tedy čas na výměnu nástroje ale také náklady na vrtáky a záhlubníky. Existuje několik typů nástrojů a dva z nich jsou BGF a ZBGF. Rozdíl mezi nimi je v zásadě ten, že fréza BGF nejprve předvrtá díru a následně závit vyfrézuje, zatímco ZBGF nástroj frézuje závit přímo do plného materiálu [9].



Obr. 1.9 Princip frézování vrtací závitovou frézou BGF [12].



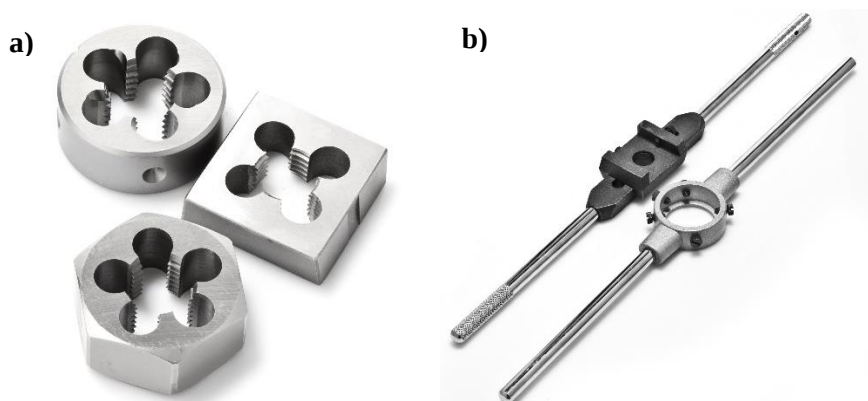
Obr. 1.10 Princip frézování vrtací závitovou frézou ZBGF [13].

1.2.1.3 Řezání závitovými čelistmi a závitníky

Pro řezání vnitřních závitů se používají závitníky a pro vnější závitové čelisti. Tyto nástroje mohou být strojní nebo ruční. Sortiment je velmi široký a lze si vybrat mezi širokou škálou rozměrů.

a) Závitové čelisti

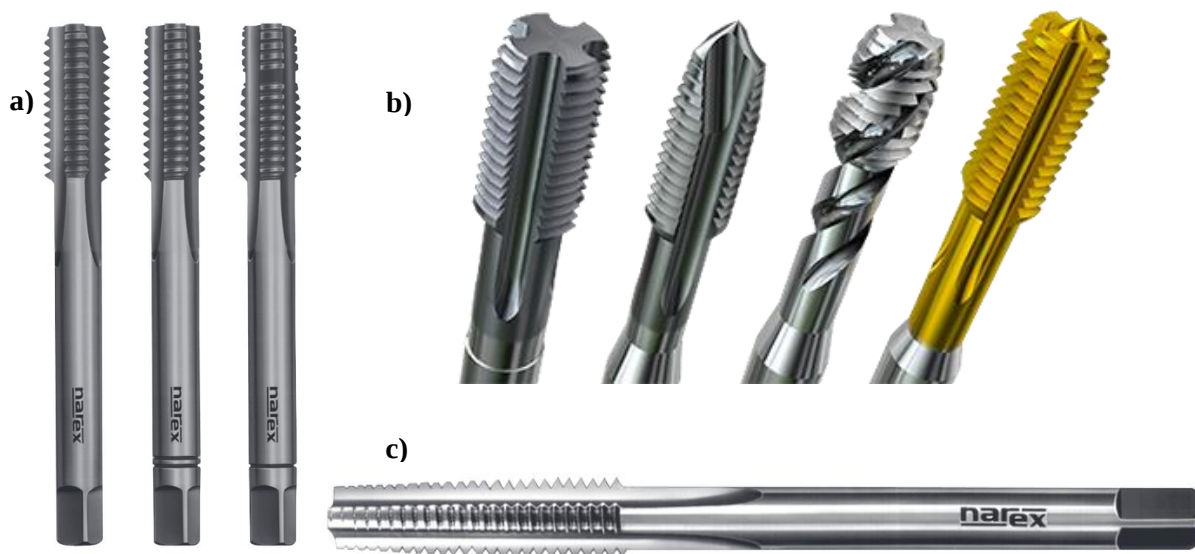
Pro řezání vnějších závitů slouží závitové čelisti. Ty se svým tvarem podobají maticím. Mohou být kruhové, šestihranné nebo i čtvercové (obr. 1.11). Upínají se do vratidla pro závitové čelisti. Řezný kužel je na obou čelních plochách a je doporučeno, aby se závit řezal nejprve jednou stranou čelisti až do otupení a teprve poté čelist obrátit a používat ji z druhé strany. Závitové čelisti se používají jak pro ruční, tak i pro strojní řezání na soustruhu. Bývají vyráběny z nástrojové nebo rychlořezné oceli. Pro strojní řezání se používají nejčastěji automatové závitové čelisti [9]. Je potřeba, aby hřídel nebo jiná válcovitá součást měla na konci, kde se má začít závit řezat, sražení.



Obr. 1.11 Řezání vnějších závitů: a) závitové čelisti různých tvarů, b) vratidla [14, 15].

b) Závítníky

Závítník je mnohobřitý nástroj, který má po obvodu břity, které odpovídají tvaru řezaného profilu závitu. Jsou vhodné pro řezání do průchozích ale i slepých děr. Na konci závítníku je náběhový kužel a díky němu je materiál odebírán postupně. Závítníky pracují v těžkých podmínkách, neboť jsou zařezány do materiálu, kde je těžší odvod třísek, o které se starají podélné nebo šroubovitě drážky, jak je tomu vidět na obr. 1.12. Závítníky jsou nejčastěji vyrobeny ze slinutého karbidu a dále pak z rychlořezné oceli. Používají se i typy povlakované materiály, které lépe odolávají abrazi a mohli pracovat při větších řezných rychlostech. Jsou vyrobeny v nejrůznějších tvarech a velikostech, aby dokázaly splnit nejrůznější požadavky.

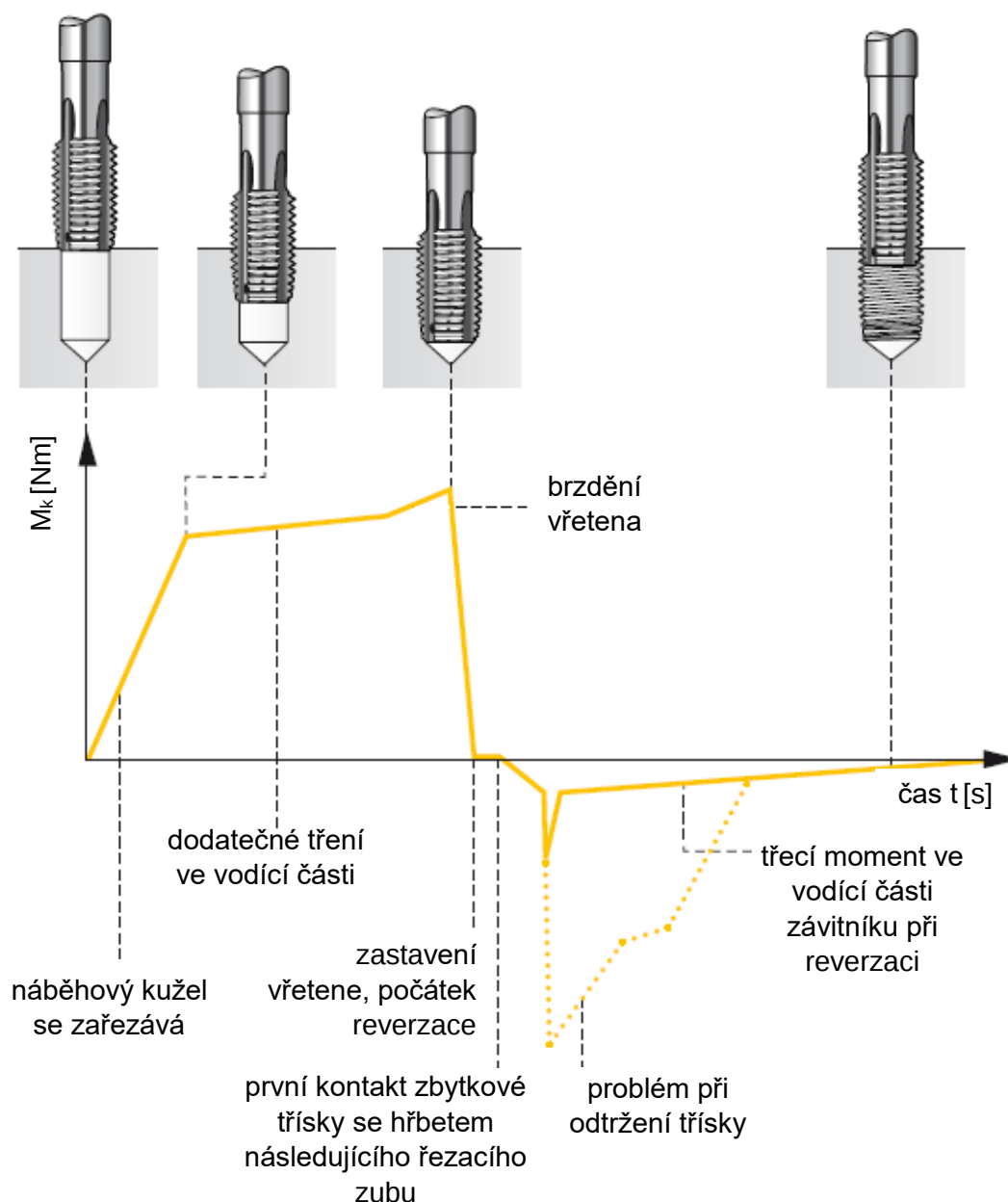


Obr. 1.12 Různé typy závítníků: a) sadové, b) strojní, c) maticový [16, 17].

Při ručním řezání závitů se často používají sadové závítníky, které mají kratší stopku se čtvercovým koncem, ke kterému se upevňuje vratidlo. Ty se skládají ze sady dvou až tří závítníků. Předřezávací závítník má delší kuželovou část, dalším je řezací závítník a pro dokončení se používá kalibrovací. Během ručního řezání se periodicky používá reverzace otáček kvůli zlomení třísek. I ruční závítníky mohou být použity pro řezání na strojích, ale v každém případě musí být zajištěna poloha nástroje v ose díry. Čím jsou závítníky menšího průměru, tím jsou více náchylné ke zlomení. Ke zlomení závítníku dojde v případě, kdy je krouticí moment moc velký nebo náhle dojde k určitému odporu v materiálu, který může být způsoben nehomogenitou, tedy např. vměstkem. Stroje jsou ale běžně vybaveny zařízením pro kontrolu krouticího momentu (obr. 1.13) [6].

Maticové závítníky mají dlouhou stopku a oproti běžnému strojnímu závítníku má dlouhý náběhový kužel a závitová část je poměrně krátká. Mohou být opět jak strojní, tak i ruční a slouží zejména pro výrobu matic. Dlouhá stopka slouží jako určitý zásobník hotových matic, a proto není třeba reverzace pro vyjetí nástroje ze závitu. U automatických strojů na výrobu matic existují závítníky se zahnutou stopkou [9].

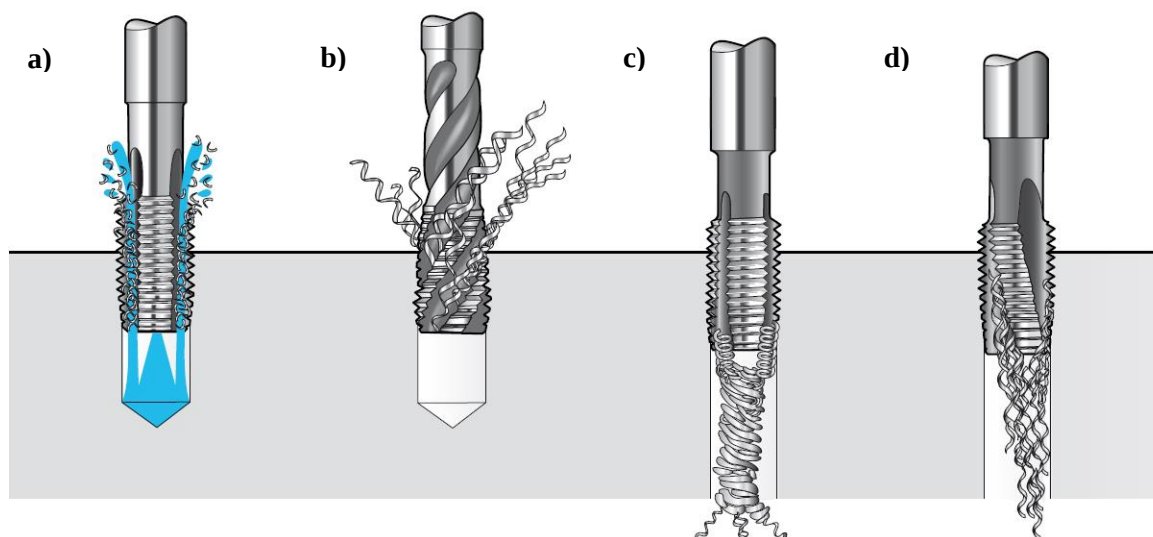
K správnému řezání je většinou potřeba, aby u strojních a maticových závítníků byla použita řezná kapalina, která je vhodná pro daný typ materiálu. Některé závítníky jsou konstruované s vnitřním přívodem řezné kapaliny kvůli zlepšení přívodu kapaliny k místu řezu a k lepšímu odstranění třísek [6].



Obr. 1.13 Průběh krouticího momentu při řezání závitu závitníkem ve slepé díře [18].

Volba závitníků patří mezi nejdůležitější krok, které je třeba správně provést, neboť úspěch každé operace je dán volbou vhodného nástroje a zvolení řezných podmínek. Nejvhodnější závitník je schopen dosáhnout požadované kvality a výkonnosti a aby tomu tak bylo, je potřeba vzít v úvahu několik aspektů [19]:

- materiál obrobku a jeho vlastnosti (tvrdost atd.),
- typ díry (slepá nebo průchozí),
- výrobní dávka,
- délka závitu.



Obr. 1.14 Základní typy závitníků a doprava třísky z místa řezu [18].

Možností, jak odvádět třísky z místa řezu, je celá řada. Pro odvod třísek slouží drážky, díky kterým jsou odváděny buď ve směru anebo proti směru posuvu, a to s pomocí samotné geometrie závitníku a řezné kapaliny.

Základní typy závitníků podle způsobu odvodu třísky jsou [18]:

a) Přímé drážky

Jsou vhodné zejména pro slepé díry (obr. 1.14a). Jsou určeny pro materiály s krátkou drobnou třískou, jako např. litina nebo pro krátké závity. V případě, že je nástroj opatřen vnitřním axiálním chlazením, lze ho použít i pro hlubší díry, protože jsou třísky vyplachovány proti směru posuvu. Tříska se však pořád musí lámat krátce. Tyto závitníky mají oproti závitníkům se šroubovitými drážkami, větší životnost.

b) Pravotočivá šroubovice

Pro slepé díry a materiály s dlouhou třískou jsou vhodné závitníky s pravotočivou šroubovicí (obr. 1.14b). Tříska je odváděna proti směru posuvu. Čím delší třísku obráběný materiál tvoří a čím hlubší je závit, tím je třeba větší úhel šroubovice pro jejich lepší odchod.

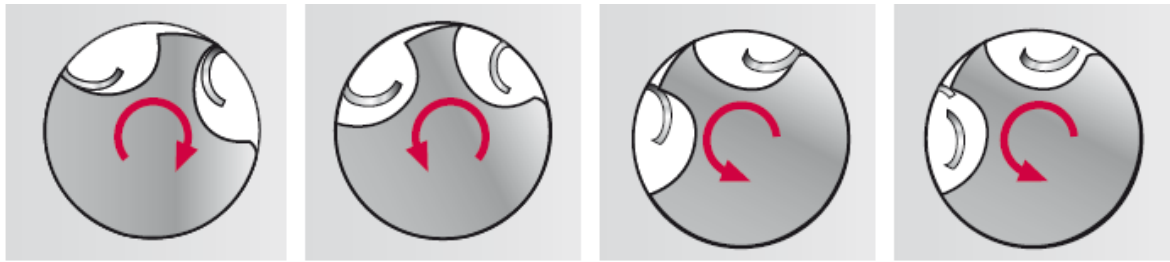
c) Přímé drážky s lamačem

Lamač s náběhem je nejvýhodnější použít u děr, které jsou průchozí (obr. 1.14c). U obráběných materiálů, které tvoří dlouhou třísku, jsou závitníky s lamačem první volbou.

d) Levotočivá šroubovice

Určený pro průchozí díry a materiály tvořící dlouhou třísku (obr. 1.14d), avšak používají se tam, kde je problém zajistit spolehlivý odvod třísek pomocí závitníku s lamačem.

Závitníky do průchozích děr nejsou vhodné do děr slepých, protože u slepých děr je nutné při reverzaci odstříhnout kořen třísky (viz obr. 1.15). Do slepých děr se používají závitníky s kratším náběhem, díky kterému má tříska větší průřez. Příliš tenká tříska by se totiž nemusela zlomit, ale došlo by pouze k ohybu a následně ke zmáčknutí mezi součástí a hřbetem nástroje. V takovém případě by mohlo dojít i ke zlomení závitníku. Závitníky pro slepé díry mají proto vždy menší úhel hřbetu než ty pro průchozí díry [18].



Závitník je v řezu až do okamžiku zastavení.

Po reverzaci zůstane tříska chvíli stát. Kroucí moment je přibližně nulový.

Hřbet nástroje se dotkne třísky a dojde k jejímu odstrižení a k nárůstu kroucího momentu (zápornému).

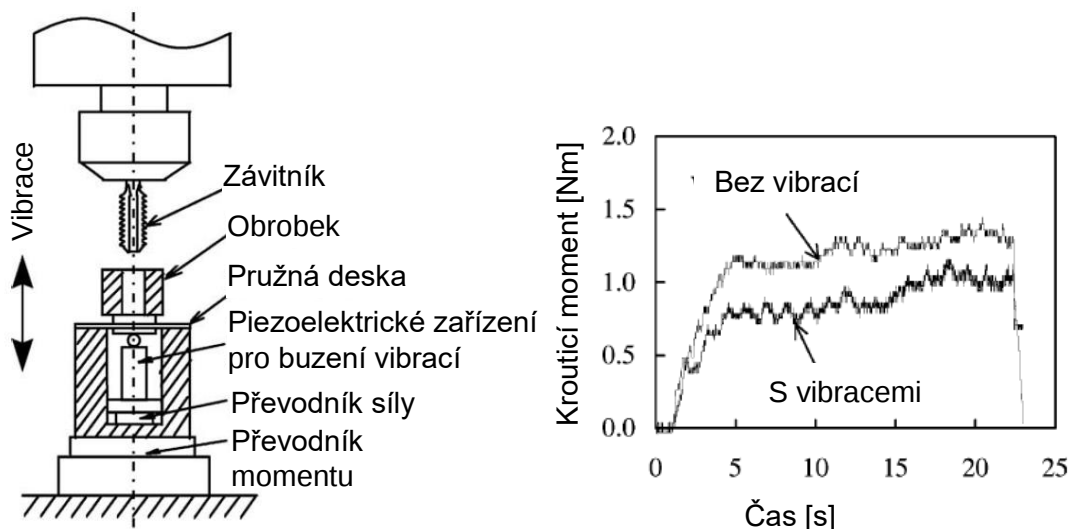
Tříska je již odstrižena a kroucí moment je závislý pouze na tření mezi vodící částí závitníku a řezaným závitem.

Obr. 1.15 Odstrižení třísky u slepých děr [18].

Prvek, který je velmi důležitý, neboť spojuje nástroj a vřeteno, je upínač. Jeho úkolem je přenos kroucího momentu a axiální a/nebo radiální vyrovnání. Zároveň slouží k předávání řezné kapaliny do závitníku. Možností, který upínač použít je několik. Nabízí se závitorezné reverzační hlavy, tepelná pouzdra, kleštiny případně upínače s kompenzací

Zejména závitníky malých průměrů (M6 a menší) jsou náchylné ke zlomení. To může být důsledkem velkého napětí vlivem elastické deformace v materiálu. To způsobí větší tření a následkem toho může dojít k zalomení závitníku. Jedna z možností, jak prodloužit jejich životnost a jak snížit náchylnost proti zlomení je použití vibrací během řezání závitů [20].

Příčinu takového jevu objasnili právě Zhang, Yang a Wang ve studii [20]. Snížením kroucího momentu může být dosaženo snížením tření a/nebo změnou průběhu vratného děje elastické deformace obrobených závitů. Byl vytvořen teoretický model, jakým způsobem se mění třecí síla během buzení vibrací, který byl následně ověřen experimentem (schéma na obr. 1.16). Pro každou frekvenci existuje optimální amplituda, při které lze docílit získání nejnižšího kroucího momentu a zároveň pro každou amplitudu existuje frekvence, při které lze dosáhnout téže cíle. Poměrně většího snížení kroucího momentu je dosaženo u menších průměrů. Čtvercové průběhy vlnění zajistily větší pokles kroucího momentu oproti sinusovým vlnám, bez ohledu na typ použitého řezného oleje [20].



Obr. 1.16 Schéma zařízení a dosažený výsledek, kde došlo k 35% poklesu kroucího momentu při obrábění do mosazi. Frekvence byla 50 Hz a amplituda 5 μm se čtvercovým průběhem velikosti závitů W 1/4" [20].

Asistované řezání závitů vibracemi nejenže snižuje krouticí moment, ale také zvyšuje životnost nástrojů. Zdrojem vibrací může být např. ultrazvuk. Článek [21] se v návaznosti na problematiku zabývá použitím vibrací při řezání závitů do titanu. Zajímavý je fakt, že asistované řezání závitů vibracemi mělo větší účinek na snížení krouticího momentu, než v porovnání při použití řezné kapaliny a obrábění na sucho. Profil vyrobeného závitu není tímto způsobem negativně ovlivněn a použití je vhodné tedy zejména pro menší průměry [21].

Během procesu řezání závitů se závitník pohybuje posuvovou rychlostí v ose předvrtané díry synchronizované s otáčkami vřetene podle rovnice (1). Každý zub odstraní pouze určitou část materiálu. Základní parametry závitníku jsou úhel náběhu κ_c , úhel profilu α , střední průměr závitu D_s , rozteč P a počet zubů N_t (stejný jako počet drážek) [22].

$$v_f = n \cdot P \quad (1)$$

kde: v_f [mm·min⁻¹]- posuvová rychlost,
 n [min⁻¹] - otáčky,
 P [mm] - rozteč závitu.

Vzhledem ke známé geometrii nástroje a jejího vlivu na proces řezání lze v čase t určit velikost řezné síly F_c pro případ závitníku s rovnými drážkami. Použitím diskretizace lze závitník rozdělit na konečný počet diskových elementů o tloušťce dz . Složky sil (tečná, radiální a axiální), vznikající během procesu řezání, ve vztahu k j -tému diskovému elementu i -tého zubu lze určit podle vztahů [23]:

$$F_{T,ij}(t) = \frac{K_T \cdot h_{ij}(t) \cdot dz}{\cos(\kappa_{ij})} \quad (2)$$

$$F_{R,ij}(t) = \frac{K_R \cdot h_{ij}(t) \cdot dz}{\cos(\kappa_{ij})} \quad (3)$$

$$F_{A,ij}(t) = \frac{K_A \cdot h_{ij}(t) \cdot dz}{\cos(\kappa_{ij})} \quad (4)$$

kde: $F_{T,ij}(t)$ [N] - tečná složka síly,
 $F_{R,ij}(t)$ [N] - radiální složka síly,
 $F_{A,ij}(t)$ [N] - axiální složka síly,
 K_T, K_R, K_A [MPa] - řezné koeficienty (odpory),
 $h_{ij}(t)$ [mm] - tloušťka nedeformované třísky,
 dz [mm] - tloušťka diskového elementu,
 κ_{ij} [rad] - úhel nastavení ostří j -tého disku i -tého zubu.

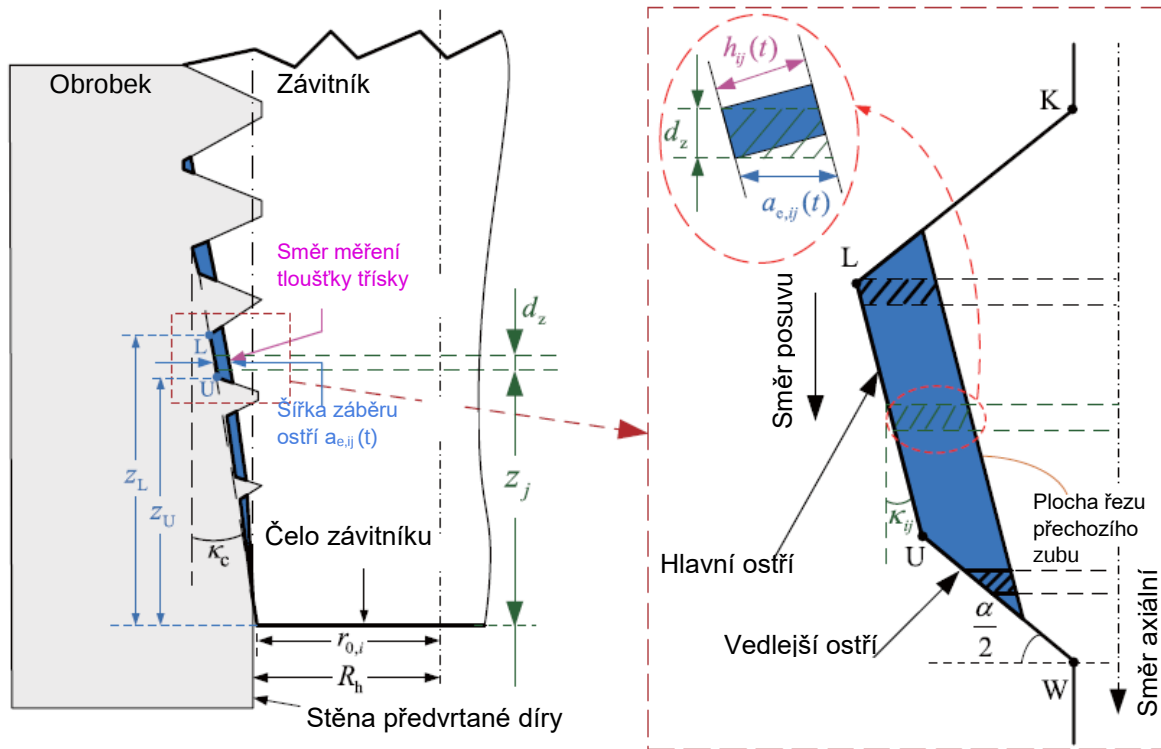
Tloušťka nedeformované třísky $h_{ij}(t)$, vázaná na j -tý diskový element a i -té ostří zubu, lze být spočítána podle [23]:

$$h_{ij}(t) = a_{e,ij}(t) \cdot \cos(\kappa_{ij}) \quad (5)$$

kde: $a_{e,ij}(t)$ [mm] - šířka záběru ostří, definována jako radiální vzdálenost mezi ostřím aktuálním a předchozím.

Úhel κ_{ij} se liší v rámci toho, jaké ostří i-tý disk protíná. Na obr. 1.17 je zubový profil tvaru lichoběžníku, který je zde označen body KLUW. Vztah (6) udává podmínky, za kterých se mění hodnota tohoto úhlu [23].

$$\kappa_{ij} = \begin{cases} \kappa_c, & \text{pokud hlavní ostří UL je na náběhové části} \\ 0, & \text{pokud hlavní ostří UL je na kalibrační části} \\ \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}, & \text{pro vedlejší ostří WU} \\ \frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2}, & \text{pro vedlejší ostří LK} \end{cases} \quad (6)$$



Obr. 1.17 Geometrie nedeformované třísky během procesu řezání závitu [23].

Vzdálenost sledovaného bodu ostří od osy otáčení neboli jeho radius $r_{ij}(t)$ lze spočítat pro j-tý diskový element i-tého zubu. Radius nezávisí na čase t a lze ho zapsat jako R_{ij} , který je možno popsat pomocí funkce radiální a axiální polohy vzhledem ke geometrii jako [23]:

$$r_{ij} = R_{ij} = \begin{cases} r_{0,i} + z_j \cdot \tan(\kappa_{ij}), & \text{pro hlavní ostří UL} \\ r_{0,i} + z_U \cdot \tan(\kappa_{ij}) - \frac{z_U - z_j}{\tan(\frac{\alpha}{2})}, & \text{pro vedlejší ostří WU} \\ r_{0,i} + z_L \cdot \tan(\kappa_{ij}) + \frac{z_L - z_j}{\tan(\frac{\alpha}{2})}, & \text{pro vedlejší ostří LK} \end{cases} \quad (7)$$

kde:

z_u	[mm]	- axiální vzdálenost bodu U a čelem závitníku,
z_L	[mm]	- axiální vzdálenost bodu L a čelem závitníku,
$r_{0,i}$	[mm]	- poloměr čela závitníku.

Z toho vyplývá, že $a_{e,ij}(t)$ lze vyjádřit jako r_{ij} při odečtení hodnoty předchozího zubu [23]:

$$a_{e,ij}(t) = \begin{cases} r_{ij}(t) - r_{(i-1)(j-n)}\left(t - \frac{T}{N_t}\right), & 2 \leq i \leq N_t \\ r_{ij}(t) - r_{(N_t)(j-n)}\left(t - \frac{T}{N_t}\right), & i = 1 \end{cases} \quad (8)$$

kde: T [s] - perioda jedné otáčky,
 N_t [-] - počet zubů na každém elementárním disku.

$$n_p = \text{int}\left(\frac{P}{N_t \cdot dz}\right) \quad (9)$$

Funkce $\text{int}(\ast)$ zaokrouhluje hodnotu na nejbližší nižší celé číslo, kde n_p znamená počet diskových elementů mezi aktuálním a předchozím zubem. Výpočet tloušťky třísky $h_{ij}(t)$ lze pomocí substituce vztahu (8) do vztahu (5). Tloušťku třísky lze dále dosadit do složek sil u vztahů (2-4), přičemž tyto síly jsou v souřadném systému T-R-A (směr tečný, radiální a axiální). Na základě geometrických vztahů lze tyto síly transformovat do globálního souřadnicového systému X-Y-Z (souřadný systém a síly jsou na obr. 1.18). Nejprve se provede transformace souřadnicového systému z T-R-A do X1-Y1-Z1 pomocí matice rotace $\mathbf{T}_1$. Následně se provede pomocí matice rotace $\mathbf{T}_2$ transformace z X1-Y1-Z1 do požadovaného souřadného systému X-Y-Z [23].

$$\begin{bmatrix} F_{X1,ij}(t) \\ F_{Y1,ij}(t) \\ F_{Z1,ij}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{T}_1 \cdot \begin{bmatrix} F_{T,ij}(t) \\ F_{R,ij}(t) \\ F_{A,ij}(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} F_{X,ij}(t) \\ F_{Y,ij}(t) \\ F_{Z,ij}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{T}_2 \cdot \begin{bmatrix} F_{X1,ij}(t) \\ F_{Y1,ij}(t) \\ F_{Z1,ij}(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} \cos(\lambda) & -\sin(\lambda) & 0 \\ \sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{ij}(t)) & -\cos(\kappa_{ij}) \cdot \sin(\theta_{ij}(t)) & -\sin(\kappa_{ij}) \cdot \sin(\theta_{ij}(t)) \\ \sin(\theta_{ij}(t)) & \cos(\kappa_{ij}) \cdot \cos(\theta_{ij}(t)) & \sin(\kappa_{ij}) \cdot \cos(\theta_{ij}(t)) \\ 0 & \sin(\kappa_{ij}) & \cos(\kappa_{ij}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

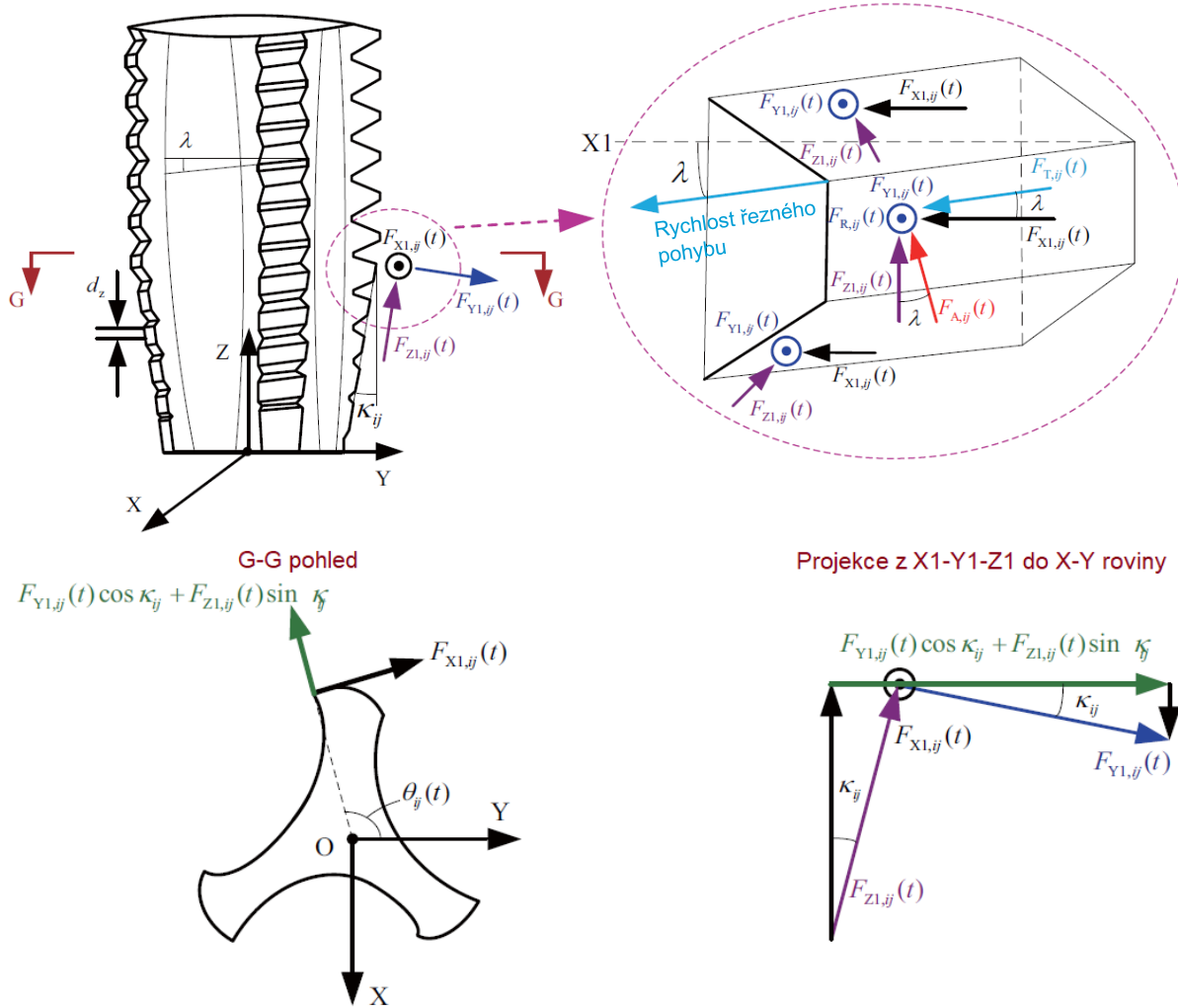
Úhel stoupání závitu λ lze spočítat jako:

$$\lambda = \arctg\left(\frac{P}{\pi \cdot D_s}\right) \quad (14)$$

Výsledná celková síla F je složena ze tří složek, a to řezné síly, pasivní a posuvové.

$$\mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} F_X(t) \\ F_Y(t) \\ F_Z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{ij} F_c(t) \\ \sum_{ij} F_p(t) \\ \sum_{ij} F_f(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

kde: $F_c(t)$ [N] - řezná síla,
 $F_p(t)$ [N] - pasivní síla,
 $F_f(t)$ [N] - posuvová síla.



Obr. 1.18 Schematické znázornění sil při řezání závitů závitníky [23].

Pro výpočet řezného momentu a posuvové síly platí:

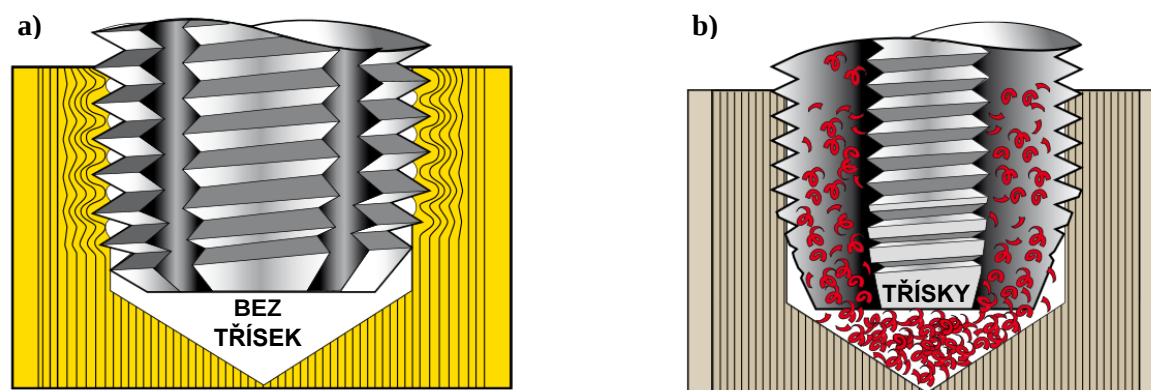
$$M_c = \frac{D_2}{2000} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{N_t} F_c(t) \quad (16)$$

$$F_f = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{N_t} F_f(t) \quad (17)$$

kde:	M_c	[Nm]	- řezný moment,
	D_2	[mm]	- střední průměr závitu,
	N	[-]	- počet elementárních disků,
	N_t	[-]	- počet zubů na každém elementárním disku.

1.2.2 Tváření závitů

Oproti obrábění se jedná o technologii, u které dochází k výrobě závitu bez odpadního materiálu. K výrobě vnějších závitů se používá válcování a pro vnitřní tvářecí závitníky. Během tvářecí operace dochází k plastické deformaci materiálu, který je vytvarován do podoby závitu. Tento závit má lepší mechanické vlastnosti oproti obráběným, neboť průběh vláken není porušen a materiál je zpevněn. Tvářený závit zvládne větší zatížení, ale jeho nevýhodou je jistá nepřesnost na vrcholcích a prohlubních profilu. Na obr. 1.19 je zobrazený rozdíl v průběhu vláken u obráběného a u tvářeného závitu ale je zde také vidět, že u řezaného závitu může docházet k interferenci třísek a obrobeného povrchu a tím může dojít ke zhoršení kvality povrchu.



Obr. 1.19 Rozdíl mezi průběhy vláken: a) u tvářecího závitníku, b) u řezacího závitníku [24].

1.2.2.1 Válcování

Tato technologie využívá k tváření ploché, kotoučové čelisti nebo segmentové čelisti, které mají negativ tvaru vyráběného závitu. Hlavní rozdíly mezi těmito typy čelistí jsou znázorněny na obr. 1.20. Z důvodu přetvoření materiálu musí být průměr polotovaru, kde se má závit tvářet, menší, než je vnější průměr výsledného závitu. Přesnost tohoto rozměru nejenže velmi ovlivňuje kvalitu výsledného závitu, ale má významný vliv i na trvanlivost nástroje [6, 9].

a) Ploché čelisti

Mezi dvěma čelistmi, které jsou většinou kalené, bývá polotovar, který je těmito čelistmi podáván. Jedna čelist je vždy pohyblivá a svým zdvihem zajistí, aby polotovar vykonal přibližně dvě otáčky, při kterých dojde ke tváření. Plochými čelistmi se vyrábí běžné spojovací šrouby, u kterých se dají akceptovat větší rozměrové odchylky [9].

b) Kotoučové čelisti

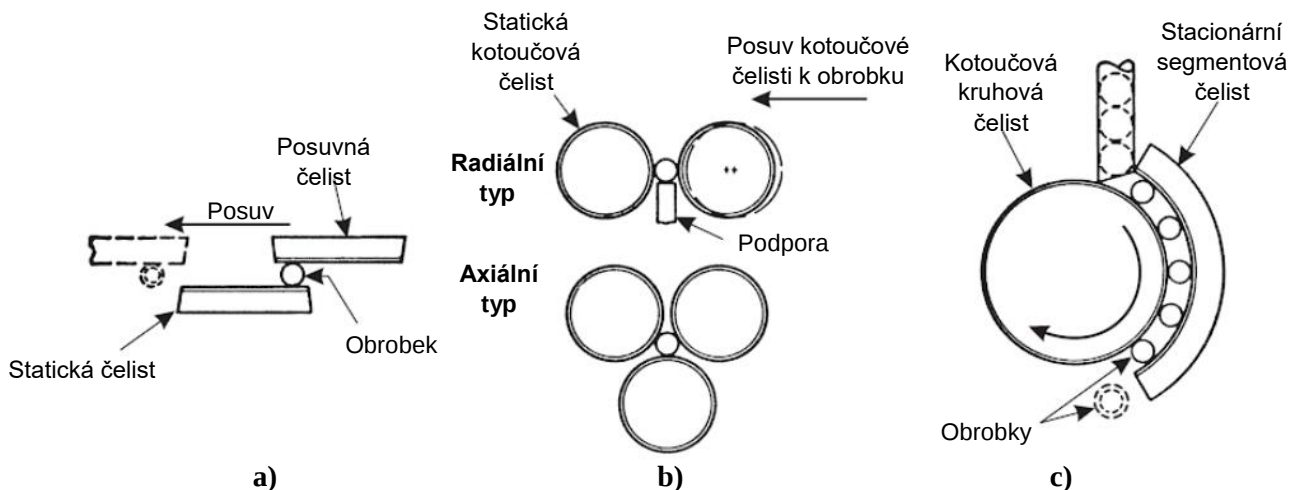
Velmi produktivní je způsob výroby vnějších závitů pomocí kotoučových čelistí. Zde se rozlišují dva typy, a to radiální a axiální. Radiální metoda využívá dva kotouče, jejichž smysl otáčení je stejný. Polotovar je mezi nimi a kotouče se radiálně přibližují k sobě posuvem jednoho z nich, druhý je nepohyblivý. Tím dojde k přetvoření materiálu a vzniku závitu, který je hotov během několika otáček. Dochází ale pouze k vytvoření závitu, jehož délka je rovna šířce kotoučové čelisti. V případě, že je potřeba vyrobit závit s větší délkou,

využije se axiálního způsobu. Jsou používány speciální stroje, které jsou schopny vyrábět šrouby různých typů, jako např. metrické, lichoběžníkové atd. [9].

Trochu odlišný je způsob axiální, kde jsou kotouče tři, a ty jsou umístěny ve válcovací hlavě. Kotouče jsou rozmístěny kolem osy otáčení polotovaru po 120° , jsou přesazeny o $\frac{1}{3}$ stoupání závitu a jejich otáčky jsou vůči sobě synchronní. Po svém obvodu mají uzavřený okruh profilu závitu a mohou být vůči ose otáčení obrobku rovnoběžné, mimoběžné nebo mohou být k ní skloněné o úhel stoupání závitu. Materiál je během svého otáčení vtahován mezi kotouče a povrch je tak přetvořen do podoby závitu. Závité hlavy je možné upnout např. do automatických nebo revolverových soustruhů [9].

c) Segmentové čelisti

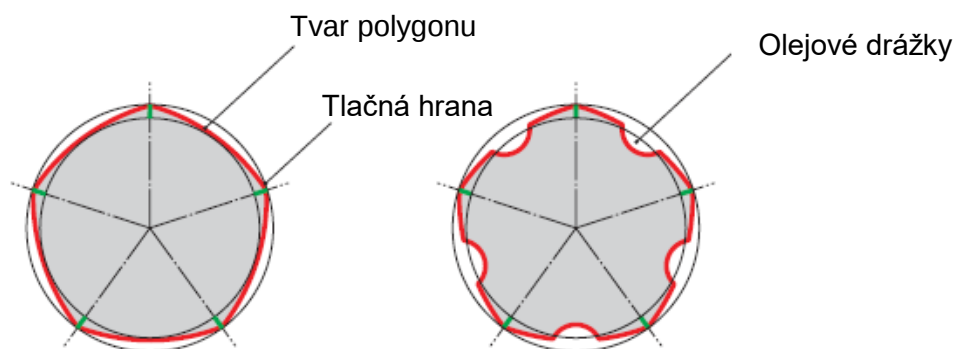
Používají se pro kontinuální výrobu šroubů a výroba probíhá na válcovačkách. Kotoučová čelist koná rotační pohyb a podává tak i polotovar, který je mezi touto čelistí a stacionární segmentovou čelistí tvářen. Jedná se o velmi produktivní způsob, při kterém se např. vyrábí 400-1200 šroubů M6 během 1 minuty [6].



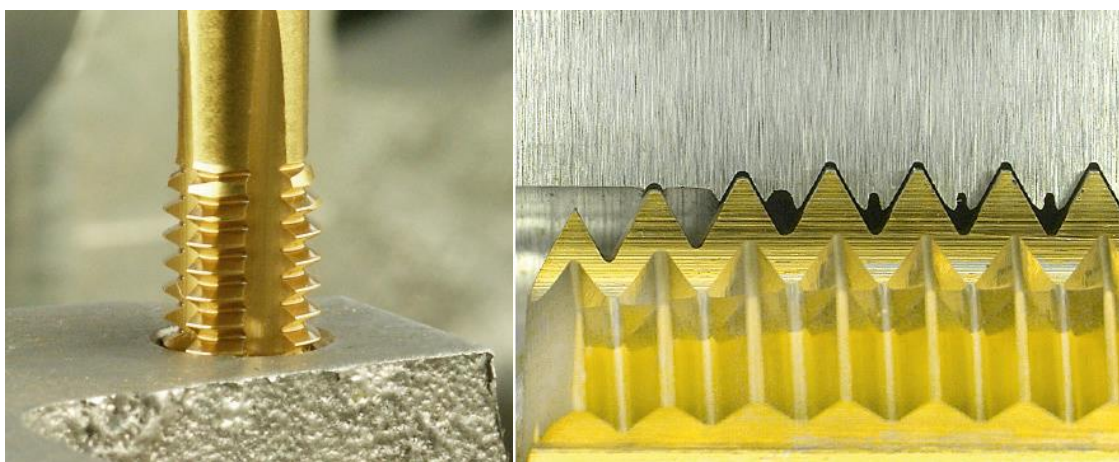
Obr. 1.20 Různé druhy čelistí u válcování: a) ploché, b) rotační, c) segmentové [6].

1.2.2.2 Tvářecí závitníky

Jsou to nástroje, které slouží ke tváření vnitřních závitů. Na první pohled vypadají jako závitníky pro řezání, ale liší se zejména podélnými drážkami, které u řezacích závitníků tvoří čela břitů. Úzké drážky zde často bývají, avšak slouží pouze pro přívod mazacího média. U některých typů, jako např. u tváření závitů v krátkých průchozích dírách, jako tomu bývá u plechů, olejové drážky být nemusí. Závit je vytvářen v předvrtaných dírách, což má zejména velký význam u neprůchozích děr v materiálech, kde by byl problém s odvodem třísek z místa řezu. Stejně jako řezné závitníky mají i ty tvářecí náběhový kužel, kde v této části dochází k největšímu přetvoření. Následuje část kalibrovací. V příčném řezu má nástroj tvar polygonu (viz obr. 1.21), jehož vrcholy (nejčastěji 3, 4 nebo 5) slouží k přemísťování materiálu, který zatéká do závitových drážek na závitníku a tvoří tak závit. Jedná se tedy o tváření za studena. Takto tvářený závit lze na první pohled rozeznat od závitu obráběného, neboť jak je vidět na obr. 1.22, má na hřebenu typickou drážku, tzv. cípatost. Tato cípatost však nemá vliv na správnou funkci, pevnost a přesnost závitu. Tvářecí závitníky jsou vyráběny z rychlořezné oceli nebo ze slinutých karbidů. Mohou být samozřejmě povlakovány nebo mohou být ve variantě bez povlaku [25, 26].



Obr. 1.21 Tvar závitníku v příčném řezu [26].

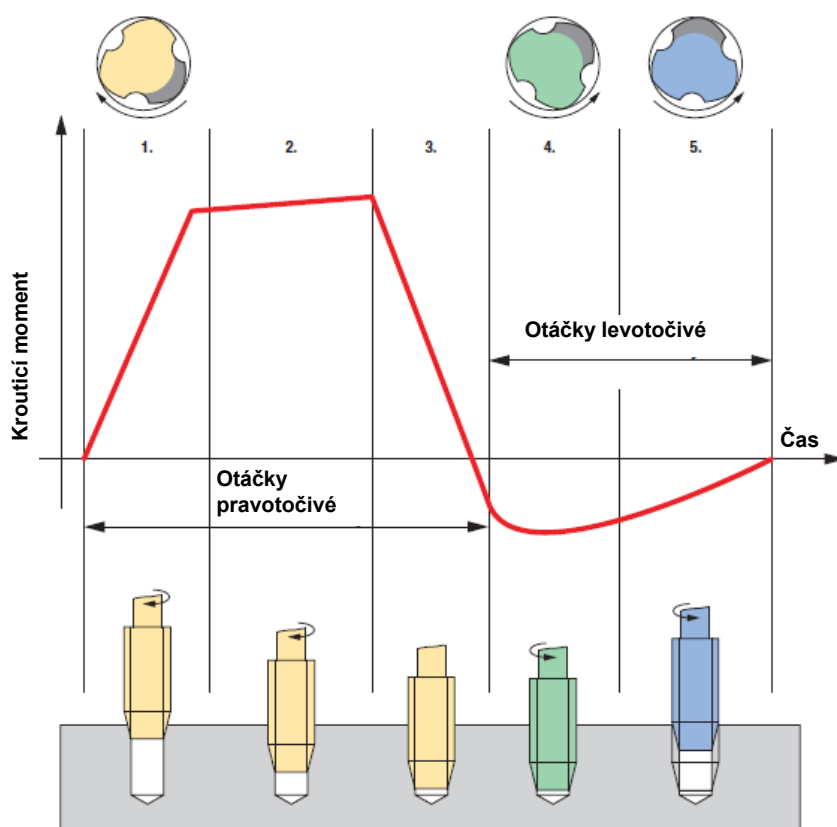


Obr. 1.22 Princip tváření závitu a vznik typické cípatosti na hřebenu [26].

Tvářecí závitníky pracují při větších krouticích momentech (jeho průběh je na obr. 1.23) a odpor materiálu je výrazně vyšší, než je tomu u obrábění. Na velikost krouticího momentu má vliv obráběný materiál, průměr předvrtané díry, mazání, geometrie pracovní části závitníku a jeho povlak. Proto je nezbytné, aby výrobní zařízení bylo této technologické operace schopné a aby byla zajištěna bezpečnosti při upnutí nástroje i obrobku. Proto se i často používají momentové závitorezné hlavy, kde je nástroj upnut. Z důvodu velkého tření mezi obrobkem a nástrojem je doporučeno použít kvalitní chladicí, ale zejména mazací olej. Používají se různé emulze, závitorezné oleje a pasty ale i MQL (z anglického Minimal Quantity Lubrication – tedy mazání minimálním množstvím), kde je jako mazací médium použit olej rozptýlený ve vzduchu [25, 26].

Průměr předvrtané díry musí být větší, než je malý průměr D_1 . Velikost tolerančního pole je však oproti díram pro řezané závity menší, neboť je požadovaná vyšší přesnost. V případě, že by průměr díry neležel v tolerančním poli a průměr by byl větší, nebylo by dostatek materiálu, který by mohl zatéci do závitových drážek a závit by byl nedotvářený a výška profilu by mohla být příliš malá. Naopak u menšího průměru díry by byl materiál silně stlačován v oblasti kořene (velkého průměru závitu) a závitník by byl silně namáhán. To by vedlo k poškození nástroje. Každý výrobce v katalogu uvádí, jaký je doporučený rozměr předvrtané díry, jejíž poloha tolerančního pole leží vždy v kladné části od nulové čáry (obě mezní úchytky jsou kladné). Tím je zajištěno, že nedojde k zadření nebo případnému zlomení závitníku. V některých případech ale z důvodu použití materiálu, který má trochu jiné mechanické vlastnosti, nemusí doporučený průměr vyhovovat a je tedy vhodné pomocí zkoušek a testů

nalézt ten optimální rozměr. Na obr. 1.24 je vidět rozdíl ve tvaru závitu, pokud by byla díra příliš velká nebo naopak malá. Dále je vidět i rozdíl v potřebném krouticím momentu a v trvanlivosti závitníku. Tvářené závity bývají tolerovány na střední a malý průměr. Pro třídu N je toleranční pole pro střední průměr závitu 6H nebo 6G, pro malý průměr se používá 7H nebo 7G. Kontrola závitu probíhá nejčastěji klasickým mezním závitovým kalibrem. Je také potřeba, aby ještě před samotnou výrobou závitů měli díry sražení, u průchozích děr s obou stran. Důvodem je tok materiálu, který se částečně v axiálním směru vytlačí jak u náběhu závitníku, tak i u výběhu [25, 26].

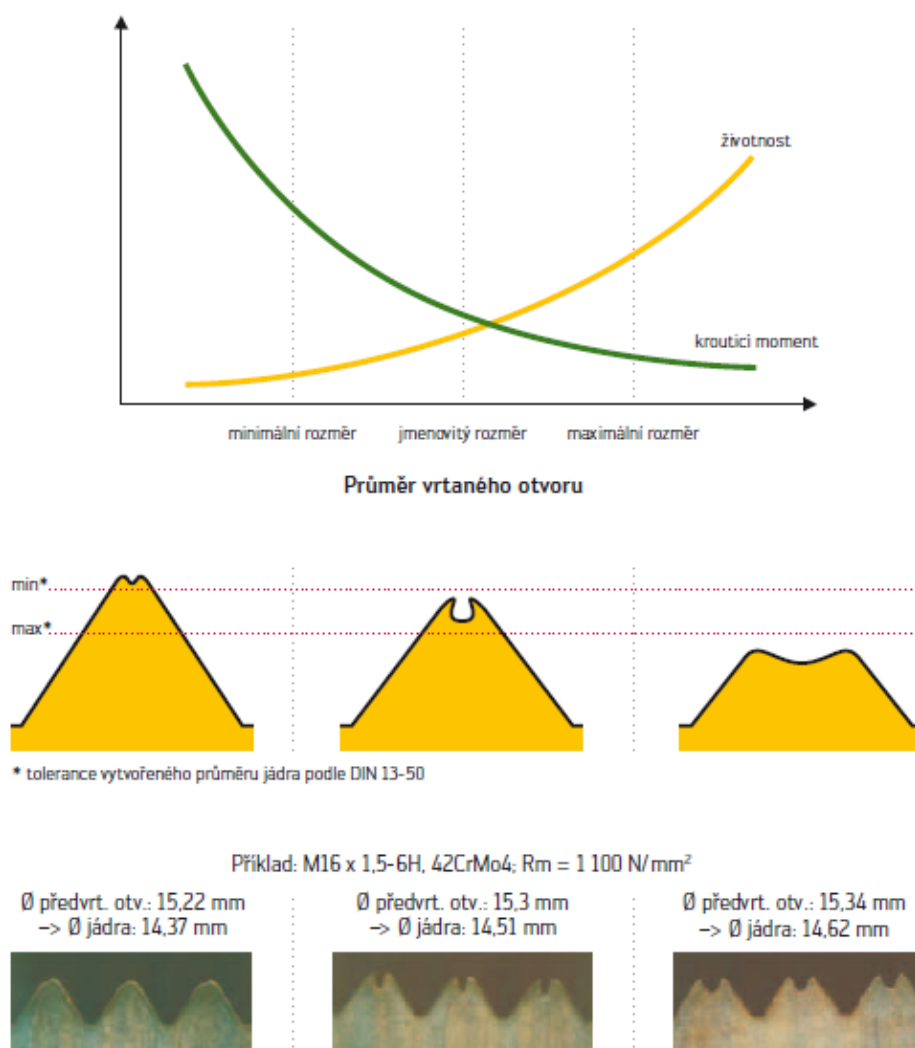


1 – Počátek tvářenání závitu (až do zanoření celé náběhové části do materiálu), 2 – tvářenání závitu, 3 – brzdění stroje až do úplného zastavení, 4 – reverzace otáček, 5 – výjezd nástroje ze závitu.

Obr. 1.23 Průběh krouticího momentu během tvářenání závitu [26].

Materiály, které je možné takto tvářet, musí mít dobrou tvařitelnost za studena a minimální tažnost 7 % [18]. Zejména se nabízí neželezné materiály jako je např. měď nebo hliník ale také nízkouhlíkové oceli. Naopak nevhodné materiály jsou hlavně ty, které jsou křehké. Příkladem může být litina nebo chromniklové a martenzitické oceli s mezí pevnosti nad 1000 MPa [25].

I hluboké závity je možno tvářet, a to s délkou přesahující i pětinasobek jejich průměru. Problém bývá u dopravování mazacího média, které by se bez patřičné úpravy nástroje nedostalo rovnoměrně k místě tvářenání. Kapalina může být naplněna u slepých děr, které jsou orientovány vertikálně. V ostatních případech je vhodné použít závitníky s vnitřními kanálky pro přívod kapaliny. Většinou bývají se slepým axiálním kanálkem s radiálními vývody [27].



Obr. 1.24 Vliv průměru předvrtané díry na tvar závitu, životnost nástroje a potřebný krouticí moment [18].

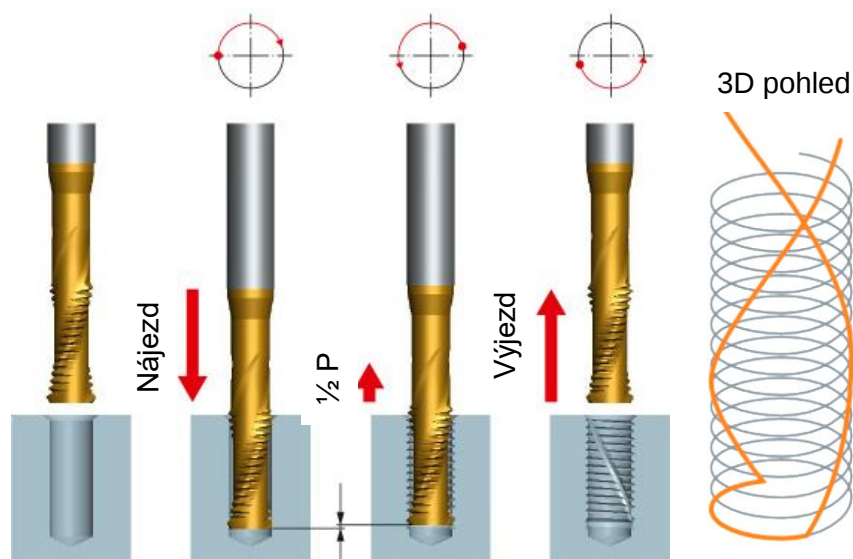
Se zcela novým typem tvářecího závitníku přišla firma Emuge-Franken ve spolupráci s Audi AG, který v roce 2014 představili veřejnosti. Jedná se o typ s označením Punch Tap, který se od klasických tvářecích závitníků liší geometrií (obr. 1.25) a zejména kinematikou řezného procesu (obr. 1.26). A právě kinematika dokáže zajistit až 75% úsporu času během tváření oproti konvenčním nástrojům (u závitu M6) [28].



Obr. 1.25 Závitník Punch Tap od firmy Emuge-Franken [28].

Nástroj má pouze dvě řady zubů po šroubovici, které jsou od sebe odsazeny kolem osy o 180° . Pomocí čelních zubů obou řad jsou nejprve ve stěně předvrtané díry vytvořeny 2 spirálové drážky, které vzniknou během nájezdu nástroje během jedné půlotáčky. Poté dojde k reverzaci otáček a během půlotáčky a se vytvoří závit všemi zuby najednou. Následuje výjezd nástroje, přičemž pracovní části zubů se pohybují v již vyrobené drážce (stejně jako při nájezdu) a nejsou tak v kontaktu s materiálem.

Vyrobený závit není plynulý, neboť je rozdělen dvěma drážkami, avšak sérií testů bylo zjištěno, že na výslednou funkci nemají vliv. Studie Technické univerzity v Dortmundu došla k závěru, že závity vyráběné touto metodou jsou plně srovnatelné s běžně vyrobenými závity, a to jak pevnostně, tak odolností proti vytrhávání [29].



Obr. 1.26 Kinematika řezného procesu tvářecím závitníkem Punch Tap [30, 31].

Nástroje Punch Tap jsou vyráběny z materiálu HSS-E-PM s různými druhy povlaků ve velikostech M4 až M8, a to v provedení s vnitřním kanálkem pro mazání řezným olejem, emulzí nebo MQL. Použití je vhodné zejména pro hliníkové slitiny [28].

Vliv mazání a chlazení se zabývá studie [32], která poukazuje na rozdíly v použití různých druhů řezných olejů a emulzí při tváření vnitřních závitů do tvrzené oceli běžným nástrojem.

Vzorky se skládaly z 9 olejů a 2 emulzí na vodní bázi vhodných pro tvářecí závitníky a byly od 6 různých výrobců. Pomocí energo disperzního spektrometru (EDS) byly zjištěny aditiva, a to na bázi chloru nebo síry. V tab. 1.2 je přehled vzorků, společně s jejich kinematickou viskozitou, aditivu a jejich výrobci, kteří jsou anonymní [32].

Tab. 1.2 Kinematická viskozita, aditiva a výrobci testovaných médií [32].

Procesní kapalina	Kinematická viskozita při 40 °C [mm ² /s]	Chemické složení aditiv	Výrobce
Olej č. 1	15,0	S + Ca	M1
Olej č. 2	20,0	S + Na	M2
Olej č. 3	11,0	S + Ca + P + Zn	M2
Olej č. 4	21,0	Cl	M3
Olej č. 5	12,0	Cl	M2
Olej č. 6	9,9	S + Ca + P + Zn	M4
Olej č. 7	11,7	Cl + S + P + Na	M4
Olej č. 8	22,0	S	M4
Olej č. 9	17,0	S + P + Ca	M5
Emulze 5 % oleje č. 1	2,0	S + P + Na + K	M6
Emulze 20 % oleje č. 2	2,0	S + Na + P + K	M2

Nástroj byl použit HSS-E závitník s TiN povlakem a velikosti M12 × 1,5 6HX. Závitník měl 5 tlačných hran a náběhová část měla délku 3 rozteče závitu. Polotovár byl z uhlíkové oceli C70 (EN značení dle chemického složení), která má mez pevnosti v tahu 900 MPa. Podmínky během tváření byly pro všechny řezné kapaliny stejné. Otáčky vřetene byly 370 min^{-1} a tvářecí rychlost je spočítána dle vztahu (1). Průměr předvrtané slepé díry byl roven 11.31 mm. Bylo použito několik závitníků, které byly vyčištěny ve stejné lázni a použity pro všechny druhy olejů a emulzí, a to několikrát. Slepá díra byla vždy vyplněna procesní kapalinou a těsně před výrobou závitu byly i nástroje též kapalinou pokryty. Měření spočívalo v zaznamenání krouticího momentu a síly během tváření pomocí piezo-elektrického dynamometru Kistler 9273 [32].

Jako ekvivalent řezné rychlosti u řezacích závitníků je zaveden pro tvářecí závitníky pojem tvářecí rychlost, kterou lze spočítat jako:

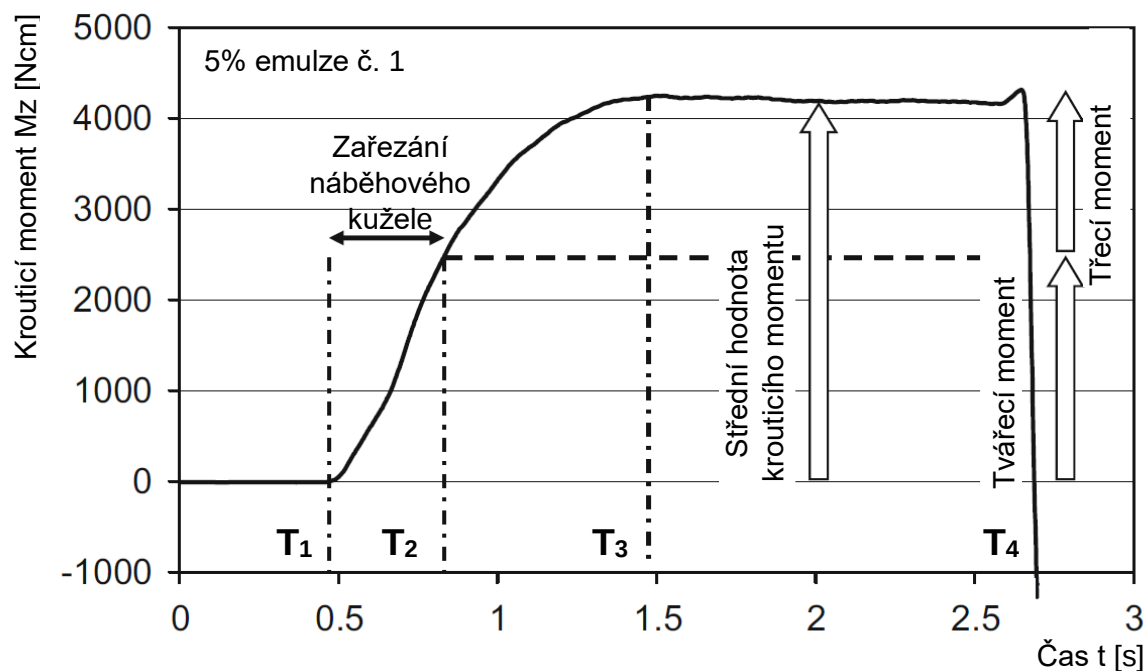
$$v_t = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 12 \cdot 370}{1000} = 13,9 \cong 14 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \quad (18)$$

kde: v_t [m·min⁻¹] - tvářecí rychlost,
 D [mm] - průměr nástroje,
 n [min⁻¹] - otáčky nástroje.

Příklad průběhu krouticího momentu až do času reverzace otáček je na obr. 1.27, a to konkrétně pro emulzi č. 1. Od času T_1 až do T_2 dochází k téměř lineárnímu nárůstu krouticího momentu, což je důsledek postupného zapojování více závitových profilů do záběru. V čase T_2 je už náběhová část celá zanořená v materiálu a část závitu je již zhotovena. Hodnota momentu v tomto čase se nazývá *tvářecí moment* (z anglického *the formation torque*). Zvětšování kontaktní plochy závitníku a zhotoveného závitu má za následek, že neustále dochází k nárůstu krouticího momentu [32]. Tomu napomáhá i fakt, že během tváření dochází k plastické i elastické deformaci, a právě elastická deformace má velký vliv na třecí sílu působící proti pohybu nástroje. Elastická deformace dále zapříčiní, že po vyjetí nástroje má vyrobený závit tendenci se rozpínat a dochází tak k nepatrnému zmenšení jeho průměrů. To lze dokázat tak, že nástroj již znovu nelze do již vytvořeného závitu ručně našroubovat [33]. V konstrukci nástrojů se s tímto smrštěním počítá.

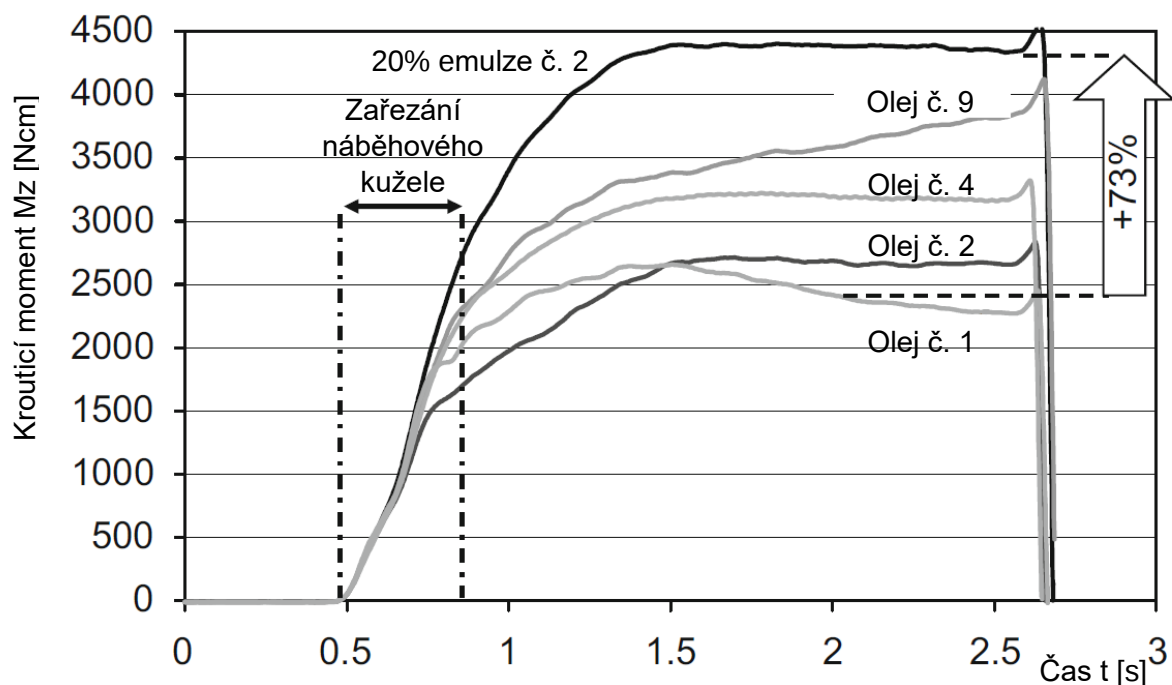
Zbytková napětí v deformované vrstvě jsou tlakového charakteru, a tím mají tvářené závity vyšší odolnost proti únavové pevnosti [34].

V momentě, kdy je celý náběhový kužel a částečně kalibrační část zanořeny do materiálu a kontaktní plocha se tak nemění (v kalibrační části se postupně zmenšuje průměr, bývá několik setin milimetrů na 10 mm délky), může dojít k 3 možným případům průběhu krouticího momentu – konstantní, rostoucí nebo klesající. Krouticí moment zůstane téměř neměnný mezi časy T_3 a T_4 a to pouze za předpokladu, že řezná kapalina je stále stejně účinná. Rozdíl hodnot momentu mezi T_2 a T_3 se nazývá *třecí moment* (z anglického *the friction torque*). Příčina rostoucího krouticího momentu může být způsobena ztrátou řezné kapaliny, a to např. z důvodu zvýšení její teploty, a tedy snížením její kinematické viskozity. Klesající charakter by naopak mohl být zapříčiněn olejem, u kterého aby aditiva mohla efektivně plnit svou funkci, potřebují více času nebo vyšší teplotu. Z toho vyplývá, že vyšší teplota automaticky neznamená klesající průběh a vždy záleží na konkrétní řezné kapalině [32].



Obr. 1.27 Skutečný průběh krouticího momentu během tváření závitu [32].

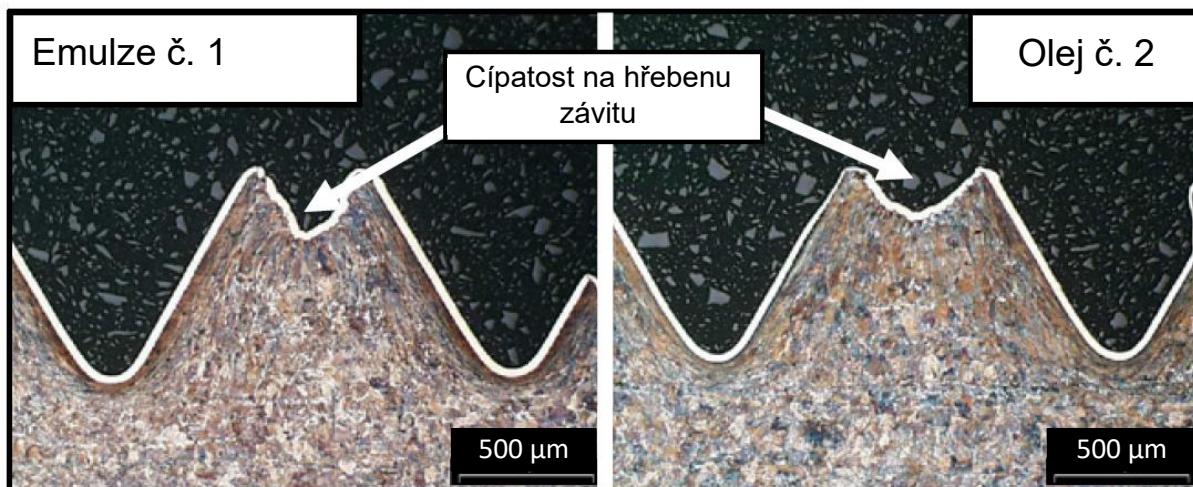
Rozdíly mezi průběhy krouticích momentů některých použitých řezných olejů a emulze jsou znázorněny na obr. 1.28. Dobře jsou tak vidět rostoucí, klesající nebo konstantní průběhy mezi časy T_3 a T_4 (z důvodu přehlednosti nejsou tyto časy pro jednotlivé křivky již zobrazeny).



Obr. 1.28 Průběhy krouticích momentů různých olejů a emulze [32].

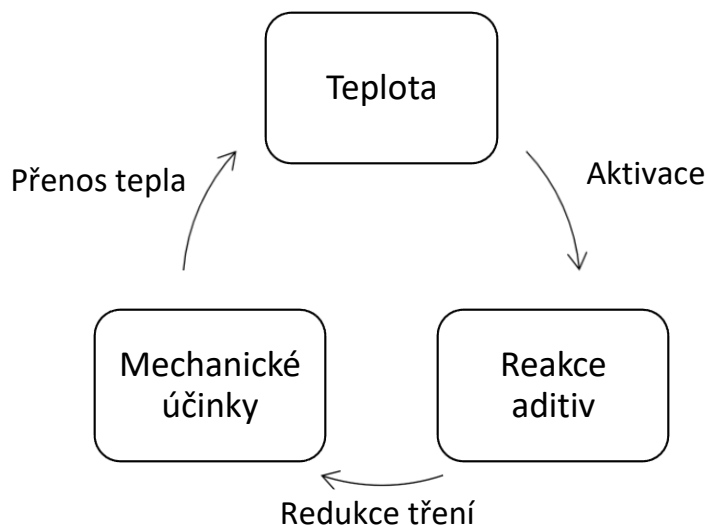
Z metalurgické analýzy bylo dále zjištěno, že kapalina má dopad i na tvar drážky na hřebenu výsledného závitu (obr. 1.29). Na efektivitu řezné kapaliny má největší vliv její chemické složení, tedy přidaná aditiva a velmi malý vliv má viskozita. U ocelí s vysokou mezí

pevnosti je správná účinnost mazání dosažena chemickou cestou. Analýza povrchu potvrdila reakci aditiv s povrchem hotových závitů. Kvalitu mazání nejvíce ovlivňuje přítomnost síry, respektive její sloučeniny, a její chování za různých teplot [32].



Obr. 1.29 Viditelný rozdíl mezi tvářenými závitů vyrobenými stejným nástrojem ale s použitím různé řezné kapaliny [32].

Diagram, zobrazující vzájemný vliv různých faktorů, mající dopad na proces tváření nebo na kvalitu obrobku, je zobrazen na obr. 1.30.



Obr. 1.30 Vzájemný vliv teploty, chemie a mechanických účinků [32].

Opotřebení patří neodmyslitelně ke každému nástroji, k závitníkům nevyjímaje. Opotřebení závitníků bývá nejčastěji typ adhezivní a abrazivní [35]. Adhezivní opotřebení je způsobeno přilnavostí částic z jednoho povrchu na druhý. V případě, že je materiál z nástroje narušován pomocí tvrdých částic, které mohou být obsaženy v materiálu obrobku nebo v řezné kapalině, tak se jedná o abrazivní opotřebení.

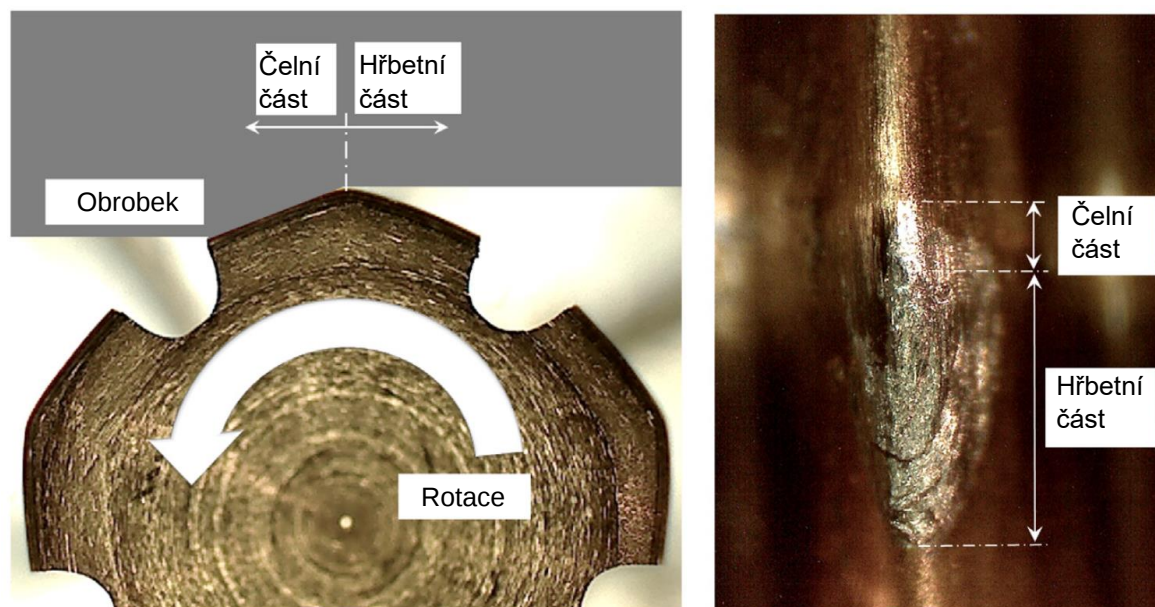
Studie [35], jejichž část výsledků je zveřejněna v článku [33], se zabývá různými tvary závitníků, opotřebením a jejich vlivy na výslednou kvalitu závitu v materiálu HR45, což je mikrolegovaná ocel s feritoperlitickou strukturou. Počet tlačných hran, délka náběhového

kužele (počet roztečí závitu) a jeho úhel jsou prvky, které byly předmětem výzkumu. Byly zkoumány 3 typy závitníků a od každého jich bylo testováno 6 (dohromady 18). Společné prvky jsou velikost $M10 \times 1,5$, jejich výrobce a materiál HSS s TiN povlakem. Bylo použito mazání emulzí ale i tváření bez mazání. Tolerance byla u všech 6GX, kde X znamená, že poloha tolerančního pole se liší od normy a bývají tak často označeny závitníky, které jsou určené pro obrábění tvrzených materiálů nebo litiny. Velikost tolerančního pole je ale stále stejná, jako u 6G. Rozdílné prvky jsou v tab. 1.3 zřehledněny. Každý nástroj vyrobil 5000 závitů a vždy po 1000 závitěch bylo pravidelně sledováno opotřebení u tlačných hran v náběhové i kalibrační části [35].

Tab. 1.3 Rozdílné parametry testovaných vzorků [35].

Označení	A	B	C
typ polygonu	hexagon	pentagon	pentagon
počet chodů v náběhu	5 chodů náběhu	3 chody náběhu	3 chody náběhu
drážka pro mazání	bez drážky	s drážkou	bez drážky

Vznik opotřebení znázorňuje obr. 1.31. Nejprve dochází ke kontaktu nástroje s materiálem na čelní straně a na této části vzniká opotřebení způsobené abrazí. Do kontaktu se přidává hřbetní část, kde vlivem abraze a adheze vzniká „vlna“. U závitníků, jejichž příčný řez měl tvar hexagonu, bylo zjištěno menší opotřebení, než tomu bylo u těch, jejichž tvar byl pentagon. Opotřebení vedlo k nárůstu axiální síly a krouticího momentu a samozřejmě ke zhoršení kvality vytvořených závitů [33, 35]. V případě slepých děr bývá kratší náběhový kužel nutností, neboť u dna díry dochází k nedotváření.

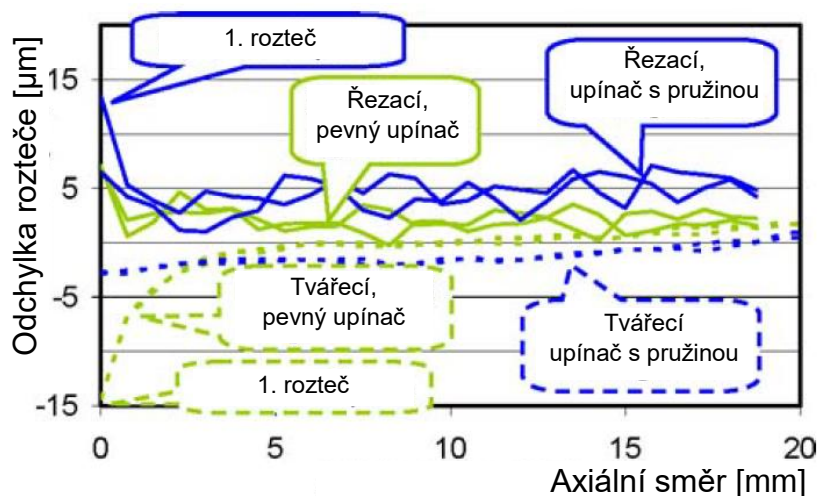


Obr. 1.31 Vznik opotřebení a) rotace závitníku, b) opotřebení na čele a na hřbetu nástroje [35].

Opotřebení nástroje není jediný negativní faktor, na který je nutné brát zřetel. Zhotovený závit musí splňovat určité geometrické přesnosti, které jsou nejdůležitější pro smontovatelnost. I u správně vyrobeného závitu dochází během samotného procesu k různým geometrickým nepřesnostem. Jednou z nich je odchylka rozteče závitu.

Na první pohled může k odchylce rozteče dojít během reverzace a výjezdu nástroje z materiálu. Pokud je použito upínání, které je tuhé (kleština), synchronizace otáček a lineárního

pohybu společně s již zhotovenými profily závitu způsobí vznik tahové síly, působící v axiálním směru na nástroj i obrobek. V případě použití závitové hlavy, která obsahuje pružinu malé tuhosti, je vznikající síla touto pružinou částečně pohlcena. Největší odchylku má vždy první rozteč, a to i u řezacích závitníků. Tato výrazná odchylka je nevyhnutelnou součástí.

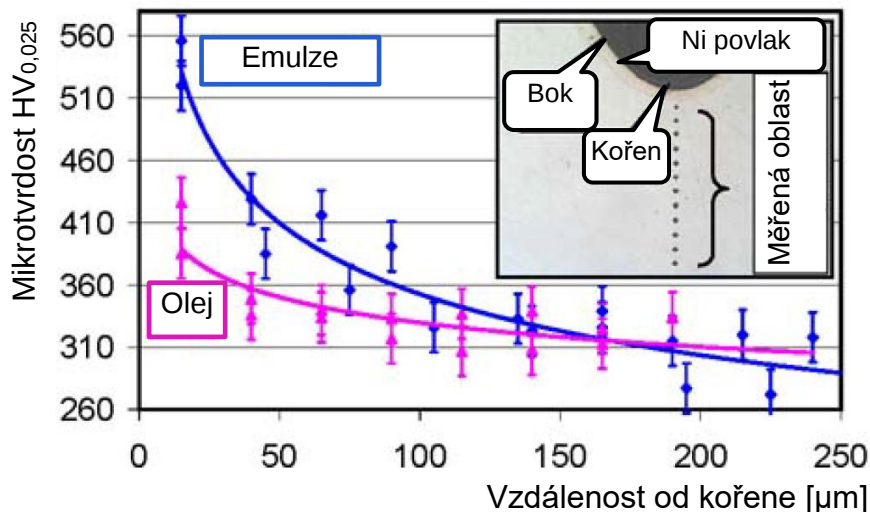


Obr. 1.32 Odchylka u rozteče u tvářeného a řezaného závitu M12 $\times$ 1,5 v oceli C70 závitníky z HSS-E s TiN povlakem [34].

Odchylka u řezaných závitů nástrojem s pravou šroubovicí je kladná a u tvářených záporná. To je způsobeno výslednou axiální silou při nájezdu, která u řezání s pravou šroubovicí působí ve směru posuvu, zatímco u řezání s lamačem třísek nebo u levé šroubovice a u tváření působí ve směru opačném [18, 34]. Velikost odchylek je při tváření menší než při řezání a jejich průběh je lineárnější (obr. 1.32).

Dalším důležitým geometrickým prvkem je rovinnost boků profilu závitu. Stejně jako u odchylky ve velikosti u první rozteče, tak na prvním profilu vzniká větší odchylka rovinnosti, než je tomu u následujících profilů. Boky, které jsou orientovány proti směru posuvu, mají horší rovinnost, což je důsledek reverzace otáček a tažné axiální síly, která na tyto boky působí během výjezdu. V článku [34] bylo rovinnost změřeno na tvářených i řezaných závitech o velikosti M12 $\times$ 1,5 vyrobených nástrojem z HSS-E s TiN povlakem v oceli C70. Úchylka u tvářených závitů se pohybovala od 1 μ m do 4 μ m a u řezaných od 5 μ m do 20 μ m. Viditelné rozdíly mezi použitými upínači tvářecích závitníků nebyly zaznamenány [34].

Zpevnění, ke kterému u tvářených závitů dochází, lze dokázat pomocí zkoušky mikrotvrlosti, která je také obsahem článku [34]. Na obr. 1.33 je zobrazen průběh tvrdosti v oblasti kořene, což je místo, kde došlo k největší deformaci. Původní tvrdost materiálu C70 je 280 HV. V případě použití emulze došlo k nárůstu tvrdosti o 90 % v místě 15 μ m od kořene. Při měření tvrdosti přímo na boku profilu byla zjištěna hodnota 770 ± 30 HV, která se dá srovnat s tvrdostí HSS-E závitníku (bez povlaku). V případě použití oleje, který je oproti emulzi lepší mazací médium (nižší hodnoty krouticího momentu), byly hodnoty mikrotvrlosti v blízkosti kořene značně nižší [34].



Obr. 1.33 Zpevnění materiálu v oblasti kořene [34].

Výhody oproti řezacím závitníkům jsou následující [16, 25, 36]:

- žádné třísky, neboť odpadá nebezpečí vzpříčení, a tedy poškození závitu nebo nástroje,
- lepší drsnost povrchu na bocích profilu,
- vyšší statická i dynamická pevnost díky zpevnění,
- několikanásobně vyšší životnost nástroje, a to až 10krát,
- vyšší produktivita, neboť tvářecí rychlost je podstatně vyšší než řezná rychlost u řezacích závitníků, pohybuje se mezi 20 až 50 m·min⁻¹,
- odpadají náklady na přestření.

Mezi nevýhody patří [16, 25]:

- vyšší nároky na předvrtanou díru,
- u slepé díry není závit dotvářen u dna,
- nelze tvářet všechny materiály,
- vyšší pořizovací cena závitníků.

Použití závitníků je omezeno i jejich velikostí. Vzhledem k tomu, že během tváření je třeba vyšší krouticí moment oproti řezání závitu stejného rozměru závitníkem, tak je omezení ve výkonu stroje. Většinou se používají, v případě metrického závitu, do rozměru M20 [36].

Kvůli tomu, že na vrcholcích profilu vzniká cípatost, tak existuje omezení u odvětví průmyslu, kde se tvářené závity nesmí používat. Jedná se konkrétně o [18]:

- potravinářství a technika pro zdravotnictví (kvůli tvorbě zárodků),
- automatické šroubování součástí.

1.3 Materiály nástrojů

V průběhu času procházejí materiály neustálým vývojem. V dnešní době se však už nejedná o hledání úplně nových materiálů, ale spíše o zlepšení určitých vlastností těch stávajících. Neexistuje nástrojový materiál, který by byl univerzální pro všechny řezné operace a dokázal tak obrobit vše [37]. Při výběru vhodného nástroje vždy závisí na konkrétní situaci, tj. technologii výroby, řezných podmínkách, obráběném materiálu, možnostech stroje a samozřejmě důležitou roli hraje i cena. Cílem je zhotovit výrobek v co nejkratším čase a za minimální náklady. Výrobek má předepsány určité kvalitativní nároky, které nástroj musí

být schopen splnit. Patří mezi ně rozměrová a tvarová přesnost a drsnost povrchu. Nástroje se vyrábějí z kovových, nekovových nebo kompozitních materiálů a mohou být i různě povlakovány.

Ve strojírenské praxi se nejčastěji používají tyto řezné materiály:

- a) nástrojová ocel, kde je hlavním zástupcem rychlořezná ocel,
- b) slinuté karbidy,
- c) řezná keramika,
- d) cermety,
- e) supertvrdé syntetické materiály jako polykrystalický diamant a polykrystalický kubický nitrid bóru.

Řezná část nebo případně celý nástroj je vyroben z nástrojového materiálu, který musí splňovat nejrůznější požadavky. Různou kombinací vlastností lze získat optimální nástrojový materiál vhodný pro danou technologii. Některé jsou si protichůdné, jako např. tvrdost a houževnatost, a je třeba najít kompromis.

Nejběžnější požadavky, které obecně platí pro nástrojové materiály jsou [38]:

- vysoká tvrdost a s tím související odolnost proti opotřebení,
- zejména ohybová pevnost,
- stálost vlastností za pracovních teplot,
- tepelná únava,
- dostatečná houževnatost,
- rozměrová stálost,
- obrusitelnost,
- odolnost proti korozi,
- chemická netečnost.

1.3.1 Nástrojové oceli

Nástrojové oceli jsou ušlechtilé, mají tedy vysokou čistotu (nižší obsah fosforu a síry), mají přesně definovaný interval chemického složení a jsou dezoxidované. Jejich struktura bývá s nízkou heterogenitou a ve struktuře nesmí být karbidická řádkovitost. Vždycky prochází tepelným zpracováním, a to konkrétně zušlechťováním (kalení s následným popouštěním) [38].

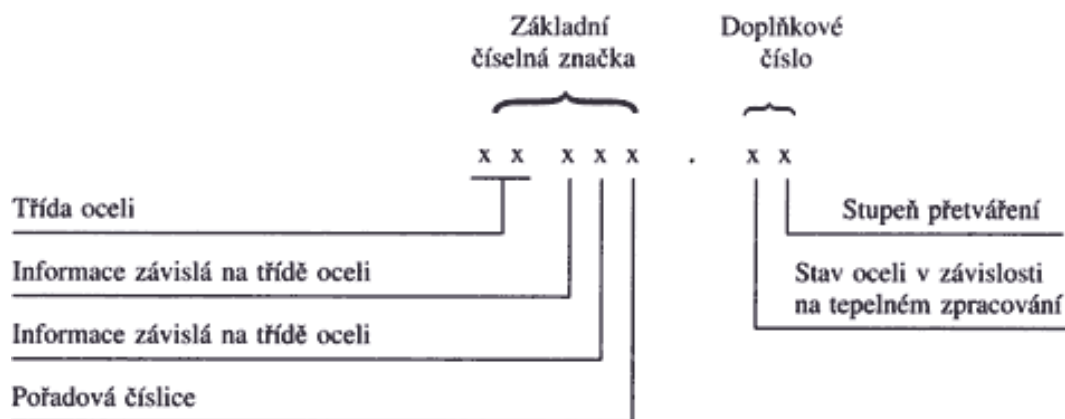
Je možno rozdělit podle několika druhů kritérií (dle chemického složení, druh ochlazovacího prostředí při kalení, použití). Nejběžnější je dělení podle chemického složení na [39]:

- a) nelegované neboli uhlíkové oceli,
- b) nízkolegované (součet legujících prvků do 5 %),
- c) střednělegované (součet legujících prvků je mezi 5 % a 10 %),
- d) vysokolegované nebo také rychlořezné (více než 10 %).

Dle české normy se oceli dělí do tříd 10-19 (kromě 18) a značí se 5 číslicemi, za kterými mohou být 2 doplňkové (obr. 1.34). Určují, do jaké třídy ocel patří, její mechanické vlastnosti nebo chemické složení a tepelné zpracování. Nástrojová ocel se značí 19 xxx, kde za x patří číslo, které odpovídá určitému druhu nástrojové oceli a tyto druhy jsou znázorněny v tab. 1.4. V tabulce chybí označení 19 9xx, jedná o speciální druhy oceli, jako např. vytvrzované [4].

Tab. 1.4 Nástrojové oceli [37, 39].

Nástrojové oceli	Nelegované	Legované	Rychlořezné
Označení a co znamená	19 0xx 0,05-0,50 % C 19 1xx 0,55-1,00 % C 19 2xx 1,05-1,50 % C	19 3xx Mn 19 4xx Cr 19 5xx Cr-Mo 19 6xx Ni 19 7xx W	19 8xx
Obsah uhlíku	0,40-1,35 % C	0,80-1,20 % C	0,70-1,30 % C
Obsah legujících prvků	do 5 %	10-15 %	více než 30 %
Pracovní teploty	do 200 °C	250-600 °C	až 600 °C, krátkodobě i více
Kalící prostředí	voda	olej, vzduch	vzduch, solná lázeň, vakuum
Tvrdost po kalení	62-64 HRC	66 HRC	64-68 HRC
Použití	ruční nářadí	strojní nástroje pro nízké řezné rychlosti (do 25 m/min)	strojní nářadí pro vyšší řezné rychlosti (do 40 m/min)



Obr. 1.34 Schéma číselného značení ocelí [40].

Další možnost značení podle chemického složení je dle normy ČSN EN 10027-1 [38, 41]:

a) Nelegované oceli se středním obsahem manganu pod 1 %:

C a U

- C – uhlíková ocel,
- a – značí % C · 100,
- U – na nástroje,
- př. C 70 U (obsah uhlíku 0,7 %), v ČSN značí 19 132.

b) Legované oceli se středním obsahem legujících prvků menším než 5 %:

a NN x-x

- a – % C · 100,
- N – značky prvků,
- x – čísla, která odpovídají střednímu obsahu příslušného prvku, v daném pořadí, vynásobenému příslušným koeficientem z tab. 1.5.
- př. 35CrMo8 (0,35 % uhlíku, 2 % chromu), v ČSN značí 19 520.

Tab. 1.5 Koeficienty pro přepočet obsahu jednotlivých prvků [41].

Prvky	Koeficient
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S	100
B	1000

c) Legované oceli s obsahem alespoň jednoho legujícího prvku nad 5 %:

X a NN x-x

- X – střední obsah nejméně jednoho legujícího prvku ≥ 5 %,
- a – % C · 100,
- N – značky prvků,
- x – % prvků,
- př. X210Cr12 (2,1 % uhlíku a 12 % chromu), v ČSN značí 19 436.

d) Rychlořezné oceli:

HS W-Mo-V-Co

- W-Mo-V-Co je pořadí jednotlivých prvků v %,
- př. HS 10-4-3-10 (10 % wolframu, 4 % molybdenu, 3 % vanadu a 10 % kobaltu), v ČSN značí 19 861.

Vzhledem k tomu, že i v nízkelegovaných ocelích se nachází určité množství prvků, které obecně slouží jako legury, tak je stanovena hranice jednotlivých prvků, pod níž ocel nazývána jako nelegovaná. Jednotlivé prvky a jejich procentuální zastoupení je v tab. 1.6.

Tab. 1.6 Hraniční množství jednotlivých legujících prvků pro uhlíkovou ocel [39].

Mn	Si	Cr	W	Mo	V	Ni	Co	Al	Ti
0,9 %	0,5 %	0,3 %	0,2 %	0,1 %	0,1 %	0,5 %	0,2 %	0,1 %	0,1 %

Během procesu řezání (nebo tváření) by měla být zachována určitá úroveň rezných vlastností co nejdelší dobu. Nástroj vždy musí mít větší tvrdost a pevnost než obráběný materiál. Pro dobrou životnost se doporučuje, aby poměr tvrdosti obráběného materiálu ku tvrdosti nástroje byl maximálně 0,75 [38].

1.3.2 Slinuté karbidy

Vývoj řezného materiálu, který by obsahoval karbidické částice, byl krok, který byl dán zjištěním příčiny výborných řezných vlastností rychlořezných ocelí. S velkými obtížemi byl připraven materiál z čistého karbidu wolframu za teplot přesahujících 2000 °C. V praxi se ale ukázal jako nepoužitelný, protože byl velmi křehký. Počátkem 20. století započal rozvoj práškové metalurgie a v roce 1923 byl vyroben práškový karbid wolframu, jehož zrnitost byla v řádech několika mikrometrů. Bylo zjištěno, že pokud se smíchá s kovem z podskupiny Fe-Co-Ni, rovněž ve formě prášku, a je vylišován a ohřát na vysokou teplotu (slinován), je vytvořen materiál, který má velmi dobrou pevnost, vysokou tvrdost a nízkou pórovitost. Je tomu tak proto, že tvrdé karbidy wolframu byly rovnoměrně rozptýleny v poměrně houževnatém kovu. Nejříve se pro obrábění používaly destičky ze slinutých karbidů (SK), které byly připájeny k nástroji. Později se destičky začaly mechanicky upínat a vznikly tak vyměnitelné břitové destičky ze SK [42].

Dnes používané nepovlakované i povlakované nástroje ze SK bývají i nadále složeny ze dvou základních typů materiálu, a to karbidu a pojiva. Základní je karbid wolframu a funkci pojiva obstarává kobalt. Do práškové směsi se mohou přidat i přísady kovů (V, Nb, Ta, Ti, Hf) a karbidů, a tím se zajistí, aby růst WC byl pomalejší a výsledná struktura tak byla jemnozrnější. Takto se v SK mohou vyskytovat další karbidy, a to chromu, titanu, tantalu nebo niobu (Cr₃C₂, TiC, TaC, NbC). Z toho vyplývá, že SK mohou být jednokarbidové, dvojkarbidové nebo vícekarbidové [42].

Obecně se SK označují značkou HW a povlakované se značí HC. Oblast použití SK udává norma ČSN ISO 513, kde jsou rozděleny do 6 skupin (P, M, K, N, S, H) a každá skupina se dále dělí na podskupiny (P10, P20, P30 apod.). Jejich přehled je v tab. 1.7. Čísla podskupin vymezují užší oblast použití. Vyšší číslo znamená větší množství pojiva, a tedy větší houževnatost, pevnost v ohybu, nižší tvrdost a otěruvzdornost. SK je tak vhodný pro obrábění nižší řeznou rychlostí, a naopak vyšší posuvovou. Norma ale neudává chemické složení ani konkrétní mechanické vlastnosti, a proto přiřazení do skupin určuje pouze výrobce [4, 42].

Tab. 1.7 Rozdělení nepovlakovaných slinutých karbidů [37, 43].

Skupina	Podskupina	Vhodné materiály pro obrábění
P	P01, P05, P10, P15, P20, P25, P30, P35, P40, P45, P50	Slitiny na bázi železa s dlouhou plynulou třískou – oceli nelegované, legované a vysoce legované oceli, nástrojové oceli, ocel na odlitky, feritické a martenzitické korozivzdorné oceli
M	M01, M05, M10, M15, M20, M25, M30, M35, M40	Slitiny kovů s dlouhou a krátkou třískou – korozivzdorné oceli austenitické, martenzitické, feritické a austeniticko-feritické (duplexní) korozivzdorné oceli
K	K01, K05, K10, K15, K20, K25, K30, K35, K40	Slitiny na bázi železa s krátkou třískou – litiny litina s kuličkovým grafitem, litina s lupínkovým grafitem, temperovaná litina, litina s červíkovitým grafitem, izotermicky kalená tvárná litina

N	N01, N05, N10, N15, N20, N25, N30	Neželezné kovy a jejich slitiny slitiny hliníku a mědi, dále kompozitní materiály
S	S01, S05, S10, S15, S20, S25, S30	Speciální žáruvzdorné slitiny titan a speciální žáruvzdorné slitiny na bázi železa, niklu a kobaltu
H	H01, H05, H10, H15, H20, H25, H30	Tvrzené materiály oceli zušlechtěné na HRC 48-60, tvrzené kokilové litiny HSh 55-85

1.3.3 Řezná keramika

Řezná keramika (ŘK) je materiál který vyniká zejména svou tvrdostí, odolností proti opotřebení a mechanickému a tepelnému namáhání. Hlavní složkou řezné keramiky, ale i keramiky obecně, jsou převážně anorganické sloučeniny nekovového charakteru, které tvoří krystalický materiál. Výchozí materiály, které se pro výrobu používají, jsou hlavně oxidy Al_2O_3 , dále Y_2O_3 , ZrO_2 , karbidy TiC , TiN a nitrid Si_3N_4 . Obecně se dělí na oxidovou a nitridovou. V tab. 1.8 je přehled označení, včetně použití [42].

Pro zvýšení lomové houževnatosti, odolnosti proti vydrolování a vylamování ostří se používají kompozity Al_2O_3 i Si_3N_4 , které jsou vyztuženy vlákny SiC , známé jako whiskery. Tyto kompozitní materiály jsou zvláště vhodné při obrábění superslitin, kde by běžná ŘK neuspěla. Další typy, které se běžně používají jsou sialonové řezné keramiky (název vznikl z chemických prvků, ze kterých je složen – SiAlON). Vyznačují se vysokou lomovou houževnatostí a jsou vhodné pro vyšší posuvové rychlosti a obrábění žáruvzdorných slitin [42, 43]. Řezná keramika je vhodná jak pro dokončování, tak pro těžké hrubovací operace s přerušovanými řezy. Hodí se pro obrábění litiny i pro ocel s nízkým obsahem uhlíku a některé typy se používají i pro obrábění kalené oceli a niklových slitin [42].

Tab. 1.8 Označení a použití řezné keramiky [4, 42].

Označení	Skupina	Složení	Použití pro obrábění materiálů
CA	Oxidová čistá	99,5 % Al_2O_3	konstrukční oceli a litina s lupínkovým grafitem nepřerušovaným řezem
CM	Oxidová směsná	$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiCN}$, $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2+\text{TiC}$	kalené oceli s plynulým i přerušovaným řezem
CN	Nitridová	Si_3N_4	všechny druhy litin, frézování ocelí
CC	Povlakovaná	$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$	litina s kuličkovým i lupínkovým grafitem, temperovaná litina, zušlechtěné konstrukční oceli, rychlořezná ocel

1.3.4 Cermety

Cermety původně vznikly jako materiály, které by měly kombinovat kladné vlastnosti keramiky a kovu. Jejich název vznikl jako složenina ze dvou anglických slov CER – ceramics (keramika) a MET – metal (kov). Patří mezi slinuté materiály, které jsou na bázi TiC, TiN a TiCN. Obecně lze říci, že jsou cermety schopny obrábět při vyšších řezných rychlostech v porovnání se SK, neboť TiC je termochemicky stabilnější než WC. Houževnatost a odolnost proti vydrolování je však u cermetů nižší. Při obrábění se cermety vyznačují schopností vytvořit povrch s velmi dobrou drsností povrchu, a proto jsou vhodné zejména pro dokončovací operace [42].

Nepovlakované cermety mají označení HT a cermety s povlakem se označují stejně jako povlakované SK, tedy HC. Obdobně jako u SK, tak i u cermetů probíhá výroba slinováním prášků, a to tvrdých TiC, TiN, Mo₂C, WC a (Ta, Nb)C, společně s pojivovým kovem, kterým bývá nejčastěji Ni a/nebo Co, který je často přidáván kvůli snížení rozpustnosti Ti v Ni a kvůli stabilizaci karbonitridů. Jako pojivo se i místo Co přidává Cr, kterého bývá značné množství a to 5-30 hm. %. Ten zlepšuje smáčivost, odolnost proti oxidaci a pevnost při vysokých teplotách [42].

Pro výrobu cermetů se používají různé metody [42]:

- vysokoteplotní lisování,
- HIP – vysokoteplotní izostatické lisování (z anglického High Isostatic Pressing),
- slinování,
- slinování společně s HIP.

1.3.5 Polykrystalický kubický nitrid bóru

Nitrid bóru (NB), který má běžně hexagonální mřížku, je v určitých směrech podobný grafitu. Liší se pouze barvou (NB je bílý, grafit černý) a elektrickou vodivostí (grafit je vodivý, NB nikoli). Oba jsou měkké a mají dobré mazací schopnosti, hexagonální mřížku, dobrou termickou stálost a jsou chemicky málo reaktivní [42].

Kubický nitrid bóru (KBN) byl objeven v 50. letech minulého století, kdy bylo zjištěno, že za vysokých teplot a tlaku může být hexagonální struktura přeměněna na kubickou. KBN se vyznačuje velmi vysokou stabilitou na vzduchu, ve vakuu i v dusíkové atmosféře, a to až do teploty 1400-1550 °C. Jelikož má za tepla stále mimořádnou tvrdost, používá se u obrábění velmi vysokými řeznými rychlostmi. Zároveň má také dobrou houževnatost [42].

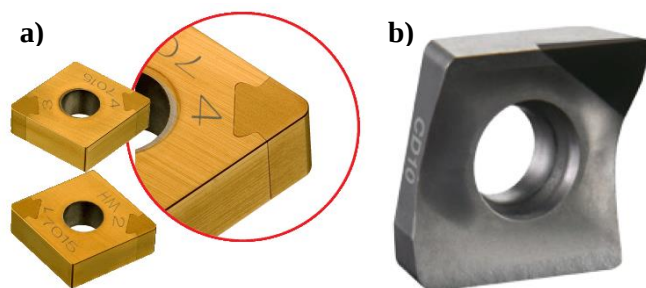
KBN se používá jako kompozit, kdy 40-65 % materiálu je KBN a zbytek je keramické pojivo, které zvyšuje odolnost proti opotřebení. Dále se používá s vyšším obsahem KBN až do téměř 100 %, kde se používá kovové pojivo kvůli houževnatosti. Vyrábí se především jako hrot (obr. 1.35a), který je připájen na destičku ze SK [43].

1.3.6 Polykrystalický diamant

Diamant je jedna z alotropických forem čistého uhlíku a jeho další nejvýznamnější forma je grafit. Uhlík se vyskytuje ve formě anorganických a organických sloučenin a spolu s vodíkem je základní složkou všech živých organismů na naší planetě. Přírodní diamant byl považován za nejtvrdší přírodní látku s teplotou tavení vyšší než 4000 °C. Dle Mohsovy stupnice tvrdosti má diamant nejvyšší hodnotu 10, avšak existují i materiály, jejichž tvrdost je vyšší (také na bázi uhlíku ale s jinou krystalickou strukturou). Diamant krystalizuje v kubické soustavě, zatímco grafit v hexagonální [42].

Syntetické i přírodní diamanty obsahují nečistoty, které ovlivňují jeho mechanické, optické, elektrické a teplotní vlastnosti. Nejběžnější nečistotou je dusík, jehož atomy mají podobnou velikost a mohou v mřížce uhlík nahradit (substitucí). Dalšími jsou železo, hliník, nikl a bór. Diamanty se podle množství dusíku a bóru dělí na 4 typy: Ia, Ib, IIa a IIb. Většina přírodních diamantů jsou nejnižší kategorie Ia. Naopak diamanty s velkou čistotou, které jsou v přírodní formě velmi vzácné, patří do skupiny IIb [42].

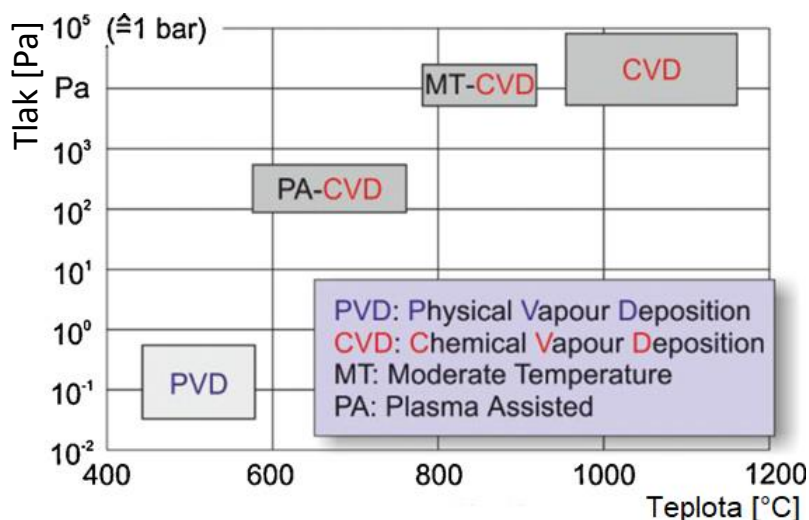
Princip výroby syntetického diamantu, který se od toho přírodního liší rozdílnými fyzikálními vlastnostmi, spočívá v transformaci hexagonální mřížky grafitu na kubickou. Ta probíhá za vysoké teploty (nad 1500 °C) a tlaku (asi 5-8 GPa). Polykrystalický diamant je vhodný zejména k obrábění nekovových materiálů jako jsou slitiny hliníku, plasty, keramiky a kompozitních materiálů. Opatření je za vyšší teploty dost rychlé, a proto se nepoužívá u obrábění ocelí velkou řeznou rychlostí. Důvodem je i jeho vysoká afinita k železu, a proto se u obrábění železných materiálů nedoporučuje. Jako řezný materiál se používají diamantové částice slinuté dohromady pomocí kovového pojiva. Břity z tohoto materiálu (obr. 1.35b) jsou většinou uchyceny na VBD ze slinutých karbidů [37, 42, 43].



Obr. 1.35 Syntetické řezné materiály: a) kubický nitrid bóru, b) syntetický diamant [43].

1.4 Povlakování

Nástrojové materiály, jako např. v dnešní době velmi často používané slinuté karbidy, bývají mnohdy povlakovány. Je to způsob úpravy povrchu, který má za následek změnu určitých vlastností, které pomáhají ke zlepšení odolnosti proti opotřebení, teplotnímu namáhání, provoznímu tření a také korozní odolnosti. Z hlediska technologie povlakování se používá dělení na chemické (CVD – Chemical Vapour Deposition) a fyzikální (PVD – Physical Vapour Deposition). Odlišné jsou zejména teploty a tlaky (obr. 1.36), při kterých povlakování u zmiňovaných technologií probíhá.



Obr. 1.36 Teploty u různých technologií povlakování [44].

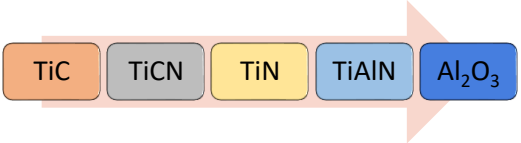
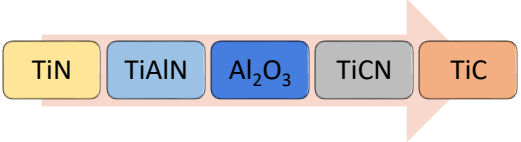
Historicky se povlakování začalo používat v 50. letech 20. století, kdy německý podnik Metallgesellschaft AG začal používat otěruvzdorné povlaky na oceli, jehož vývoj započal ale o mnoho let dříve. Koncem 50. let byl též firmou přihlášena patent na povlakování slinutých karbidů nanášením vrstvy TiC. Docházelo k rozvíjení technologie a vzniku generací povlaků, jejichž přehled je v tab. 1.10. Jednou z důležitých vlastností povlaků je jejich tvrdost, která se pohybuje v různých hodnotách, přičemž se dělí do dvou skupin: tvrdé (do 40 GPa) a supertvrdé (tvrdost více než 40 GPa) [42].

Tab. 1.10 Generační vývoj povlaků [42].

Generace	Počet vrstev	Typ povlaku	Popis
1. generace	1	TiC	tloušťka kolem 6 μm , špatná koheze podkladu a povlaku /mezi nimi vznikl křehký eta-karbid), docházelo k odlupování povlaku během obrábění
2. generace	1	TiC, TiCN, TiN	tloušťka 7-10 μm , bez eta-karbidu, nedocházelo k nebezpečí odlupování povlaku
3. generace	2,3 i více	vícevrstvý (od podkladu k povrchu) TiC-Al ₂ O ₃ , TiC-TiCN-TiN, TiC-TiN, TiC-Al ₂ O ₃ -TiN, TiN-TiCN-TiN-Al ₂ O ₃ -TiN	vrstvy s ostře ohraničenými přechody, první vrstva bývá s lepší adhezí vůči podkladu, poslední s vyšší tvrdostí a odolností proti opotřebení
4. generace	často i více než 10 (multivrstvy)	TiC-Al ₂ O ₃ , TiC-TiCN-TiN, TiC-TiN, TiC-Al ₂ O ₃ -TiN, TiN-TiCN-TiN-Al ₂ O ₃ -TiN	speciální vícevrstvý povlak (multivrstvy) mají schopnost odklánět a zpomalovat šíření trhlin od povrchu povlaku k substrátu (stejně jako povlaky s nanokrystalickou strukturou), do 4. generace se řadí následující povlaky: e) diamantové f) nanokompozitní g) gradientní h) supermřížkové i) inteligentní j) z KBN

V porovnání s dnešními povlaky je vidět velký pokrok, neboť se používají vícevrstvé povlaky, tzv. multivrstvy, DLC vrstvy (Diamond-Like-Carbon) nebo např. nanovrstvy. Pro různé řezné nebo tvářecí aplikace se povlaky liší svým druhem, kombinací vrstev, jejich tloušťkou, metodou povlakování a správnou kombinací těchto faktorů vznikne povlak, který je pro danou aplikaci nejefektivnější. Povlaky dokáží zachovat původní geometrii nástroje, neboť jejich tloušťka se běžně pohybuje od několika mikrometrů až po několik nanometrů. Porovnání jejich vlastností je v tab. 11. Povlakovací metody jsou detailně popsány v [42], kde jsou též výhody a nevýhody jednotlivých technologií.

Tab. 1.11 Porovnání vlastností materiálů pro povlaky [42].

Vlastnosti	Porovnání vlastností od nejhorších po nejlepší
Chemická stabilita Odolnost proti oxidaci Tvrdost za vysokých teplot	
Tvrdost	

1.4.1 Technologie CVD

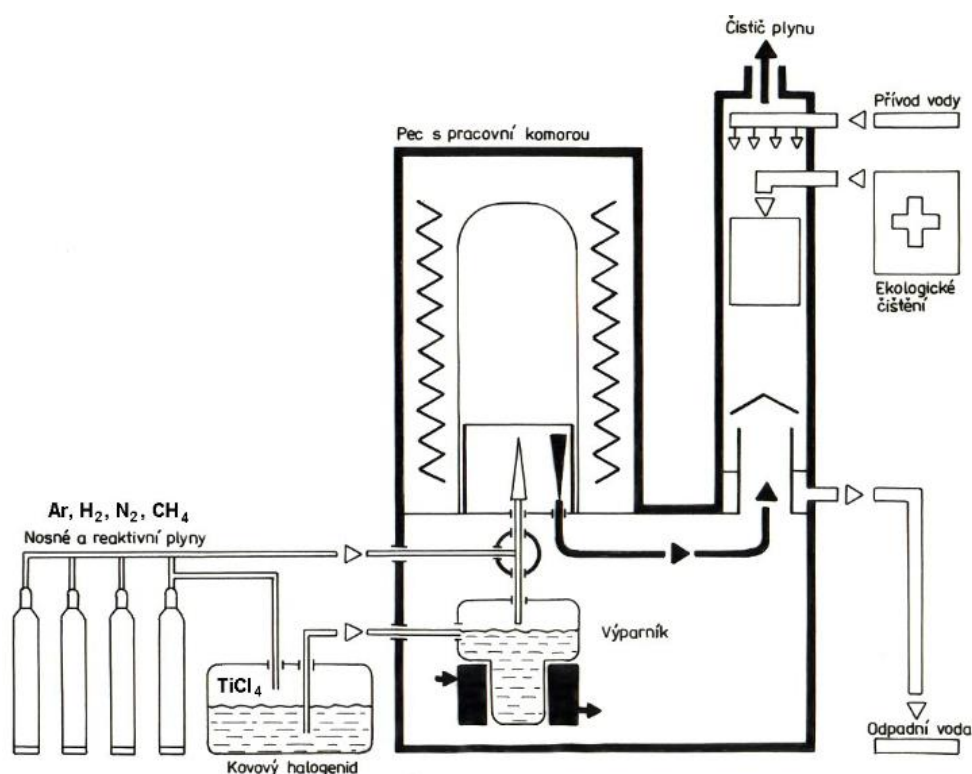
Jedná se o metodu, používající chemický proces povlakování. Tato technologie byla první, která se začala používat pro tvorbu tvrdých povlaků TiC a TiN. Tvorba povlaku probíhá za vysokých teplot (700-1500 °C), které jsou nezbytné k disociaci plynů. Používá se stabilní a zároveň prchavá sloučenina, která se při přivedení energie (ohřev, laser, elektronový paprsek nebo plasmový oblouk) rozkládá a produkty tohoto rozkladu jsou ukládány na nahřátý povrch povlakovaného materiálu a fungují jako katalyzátor. V plynu je dále přítomný určitý reaktivní plyn (N_2 , NH_4 , CH_4), díky němu dochází k vytvoření vrstvy na povrchu materiálu, přičemž k této reakci dochází v jeho těsné blízkosti. Zdrojem titanu bývá chlorid titaničitý ($TiCl_4$). K dopravení směsi plynů k nástroji, určenému k povlakování, slouží tzv. nosný plyn (Ar , H_2), který zároveň řídí rychlost procesu. Řízením složení směsi plynu během procesu (jednotlivé druhy plynů, jejich poměr a množství) lze docílit vytvoření různých vrstev – multivrstvy 4. generace. Zařízení pro technologii CVD je zobrazeno na obr. 1.37. Po povlakování probíhá nejčastěji v reaktoru s horkou nebo se studenou stěnou [42, 45, 46].

Reaktor s horkou stěnou zajišťuje, aby nástroj a stěny reaktoru měly stejnou teplotu. Stěny jsou proto vyhřívány, ale nevýhoda je nežádoucí vznik povlaku na stěně reaktoru. Je možný vznik chemické reakce par se stěnami reaktoru a s tím související kontaminace povlaku na nástroji. Z těchto důvodů se tento reaktor používá u reakcí, které jsou exotermické. U reaktoru se studenou stěnou je vyhříván pouze držák s nástrojem. Vyšší teplota držáku oproti stěnám (často chlazený vodou) zajišťuje, že se bude povlak vytvářet přednostně na povrchu s vyšší teplotou. Nedochází zde k nebezpečí kontaminace, jako je tomu u reaktoru s horkou stěnou. Používá se primárně u endotermických reakcí [42].

Samozřejmě se metoda CVD v průběhu let vyvíjela a dnes existují různé modifikace. Mezi ně patří [42, 45]:

- CVD se žhavicím vláknem HFCVD (Hot Filament CVD):
 - wolframové vlákno o teplotě až 2400 °C,
 - rychlost depozice je o jeden řád vyšší,
 - např. pro diamantové povlaky.
- CVD indukované laserem LICVD nebo LCVD (Laser Induced CVD):
 - používají se 2 typy, a to pyrolytická a fotolytická:
 - pyrolytická metoda funguje na principu štěpení molekul plynu na rozhraní plyn-substrát pomocí laseru, který lokálně substrát ohřívá,
 - u fotolytické metody jde o fotochemickou reakci plynu poblíž substrátu.

- CVD ze středních teplot MTCVD (Middle Temperature CVD):
 - nižší teploty 700-850 °C,
 - reaktivní plyn bývá acetonitril (CH_3CN).
- Plasmatické CVD metody PACVD (Plasma Assisted CVD) a PECVD (Plasma Enhanced CVD):
 - molekuly jsou ionizovány plazmovým výbojem (jsou rozloženy pomocí energetických elektronů, a ne tepelnou energií),
 - tlak během výboje je 100-300 MPa,
 - nižší teplota 400-600 °C.
- Mikrovlnná plasmatická CVD metoda MWPCVD (MicroWave Plasma CVD)



Obr. 1.37 Princip povlakování metodou CVD [46].

1.4.2 Technologie PVD

Zahrnuje širokou škálu vakuových povlakovacích technologií, u kterých jsou částice materiálu fyzikálně odejmuty ze zdroje, tzv. terčů nebo také targetů, a pomocí odpařování nebo rozprašování následně kondenzují a tvoří film na povrchu substrátu. Částice (atomy, shluky atomů) jsou z terčů uvolňovány a dále jsou ionizovány v atmosféře komory, která je tvořena inertním a reaktivním plynem (např. inertní Ar a reaktivní N_2). Právě s reaktivním plynem částice reagují a jsou pomocí záporného předpětí urychlovány k povrchu substrátu, kde se usazují a tvoří tenkou vrstvu povlaku. Jednotlivé částice, dopadající na povrch, jsou zachyceny, pohybují se po něm a jsou nadále zpět uvolněny anebo jsou pevnou vazbou trvale ukotveny. Další dopadající částice se zachycují a postupně tvoří vazby s již zachycenými částicemi. Jejich spojením vzniká souvislá vrstva, jejíž tloušťka se neustále zvětšuje [42, 44].

První povlak, který byl technologií PVD komerčně používán, byl TiN. Další generace povlaků, které byly široce používány v průmyslových aplikacích, byly složeny z CrN a TiCN.

Evoluce povlaku TiAlN, který vznikl přidáním hliníku do základního TiN, přispěla nejen ke zvýšení tvrdosti, ale také k pozoruhodnému zvýšení pevnosti při vysokých teplotách a také k chemické inertnosti. Dalším evolučním krokem povlaku TiAlN byl povlak s vysokým obsahem hliníku znám jako AlTiN, který měl mnohem lepší teplotní odolnost. Tvrdost povlaků AlCrN a TiAlN je velmi podobná, ale to, co dělá povlak AlCrN výjimečným je právě přítomnost chromu, díky kterému má velmi dobrou odolnost proti adhezivnímu typu opotřebení a vysokou odolnost proti oxidaci až do teplot 1200 °C. Novým trendem povlaků, které odolávají vysokým teplotám při obrábění je přidání křemíku. Povlaky AlCrSiN jsou úspěšně používány na nástroje pro vrtání nebo třeba frézování [44].

Způsoby, kterými jsou částice fyzikálně odejmuty ze zdroje, jsou následující:

- naprašování,
- napařování,
- iontová implantace.

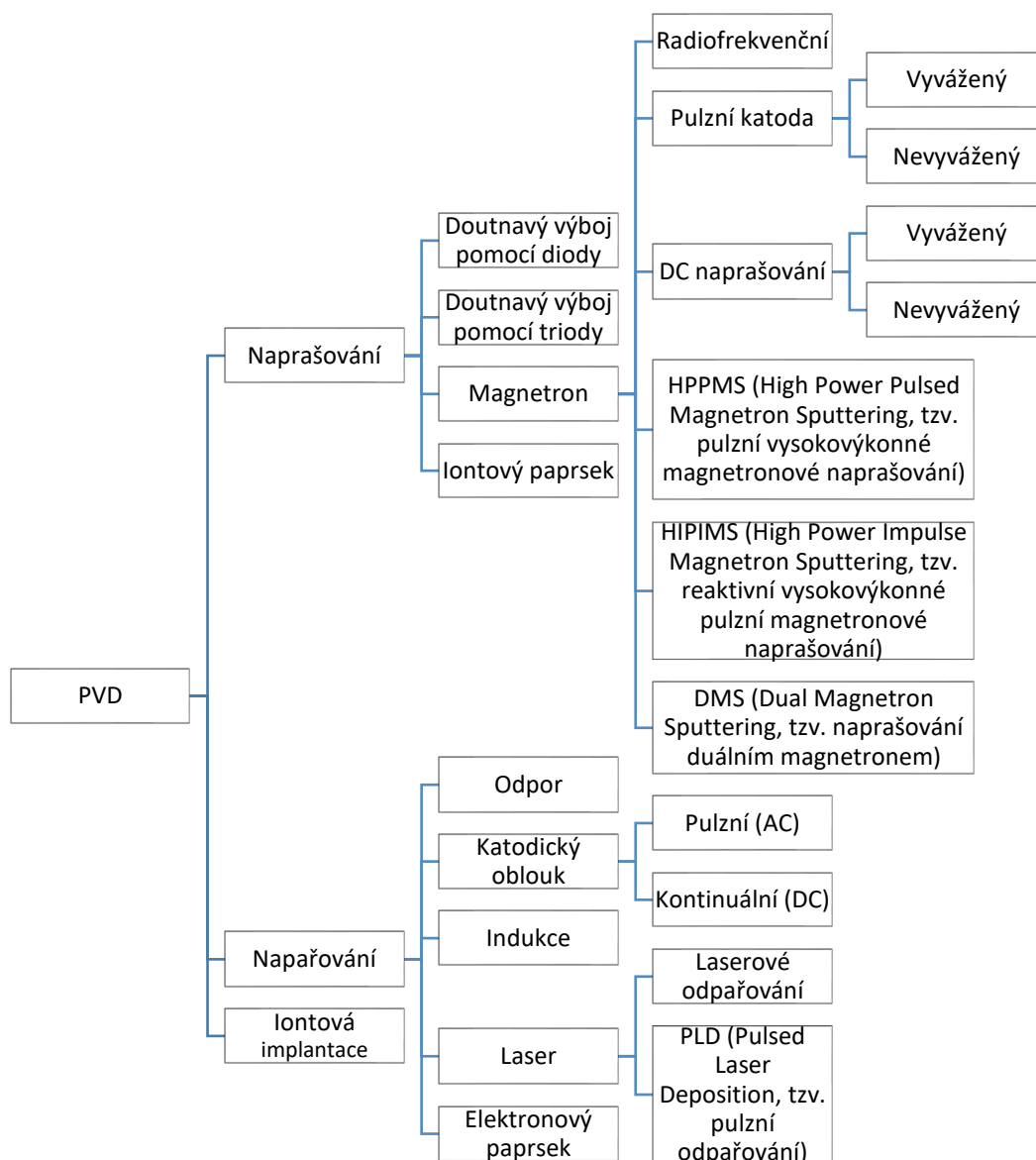
Tyto způsoby se dále rozdělují na mnoho dílčích technologií, které se liší rozdílnými způsoby naprašování i napařování a jsou zřehledněny na obr. 1.38.

a) Naprašování

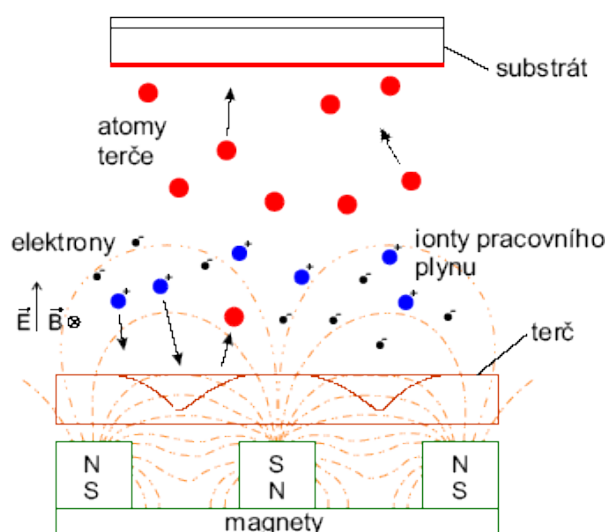
Částice jsou z terčů uvolňovány pomocí fyzikálního odprašovacího procesu. Tlak plynu bývá obvykle menší než 0,7 Pa. Terč, který bývá katodou, je vyroben z materiálu, který má být nanášen na substrát. Vakuová komora, plnicí funkci anody, bývá naplněna inertním plynem, obvykle argonem, a mezi anodou a katodou vzniká elektrický výboj. Ionty, které vznikají v argonové plasmě díky výboji, jsou urychleny na terč a při kontaktu z něj vyraží částice, tzv. je odprašují [42].

Naprašování doutnavým výbojem rovinné diody patří mezi velmi rozšířené metody naprašování. Terč slouží jako zdroj povlakovaného materiálu, ale i jako zdroj sekundárních elektronů, které se starají o udržení doutnavého výboje. Bývá také chlazen vodou, neboť ionty svou vysokou energií ohřívají samotný terč. Intenzita naprašování se zvyšuje s narůstajícím elektrickým napětím, čímž narůstá i elektrický proud (zvětšuje se celkový elektrický výkon). Při vysoké hodnotě napětí již nárůst proudu není lineární a zároveň dochází ke zmenšování příčného průřezu ionizačního svazku. Na intenzitu naprašování má vliv také tlak plynu [42].

Způsobem, jakým lze zlepšit samotný proces, je použití magnetického pole. V takovém případě se tomu říká magnetronové naprašování (obr. 1.39), které bývá nejpoužívanější ze skupiny technologií naprašování [45]. Magnetické pole ovlivňuje elektrony plasmu, ale ne však ionty. Elektrony jsou zachyceny magnetickou siločárou a postupují směrem k anodě (substrát). Pravděpodobnost, že se zachytí na stěnách vakuové komory nebo na anodě bez kolize s atomy plynu je velmi nízká. Magnetron může mít několik konfigurací, jako např. válcový nebo rovinný. I přes to, že použitím magnetronu se dosahuje vysokých rychlostí naprašování, omezení je v materiálu terče, který musí být tenký (v případě feromagnetického materiálu). Magnety jsou umístěny podél vnějšího okraje a uprostřed katody. V případě, že je síla magnetického pole u každého magnetu přibližně stejná, siločáry vytvářejí smyčku mezi vnitřními a vnějšími magnety a takovému magnetronu se říká vyvážený. V opačném případě se jedná o nevyvážený magnetron, kde zpravidla vnější magnet je silnější než vnitřní. Existují další možnosti naprašování, jako např. pomocí iontového paprsku nebo radiofrekvenční naprašování, které se dá použít i u magnetronu [42].



Obr. 1.38 Rozdělení technologie PVD.

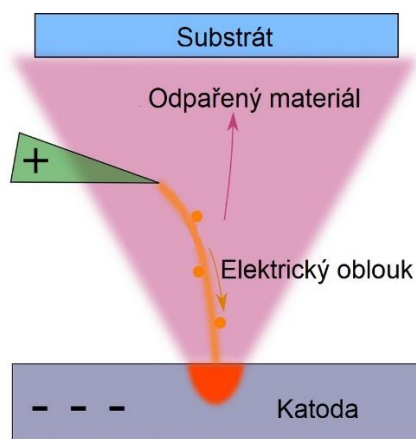


Obr. 1.39 Schematický náčrtek magnetronového naprašování [47].

b) Napařování

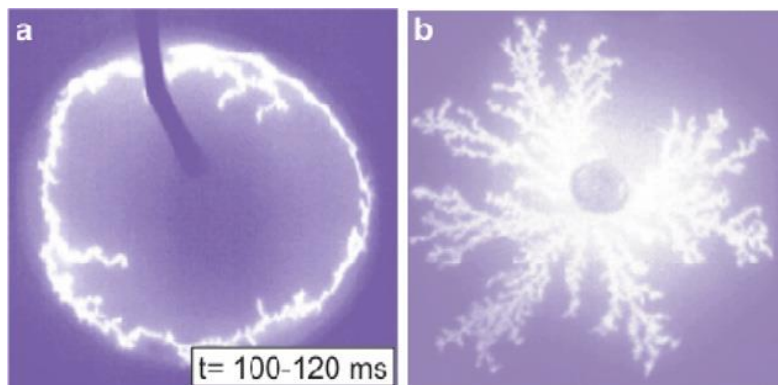
Materiál je z terčů odpařován pomocí různých způsobů ohřevu, jako např. odporový, indukční, obloukový, laserový nebo pomocí paprsku elektronů.

Nejpoužívanější metodou je použití katodického oblouku [45]. Materiál terče, který je zde elektrodou (katodou), je ohříván nízkonapěťovým obloukem a následně odpařován a ionizován. Ionty jsou urychleny k substrátu se záporným předpětím. Na katodě hoří oblouk pouze bodově, a to v místě katodové skvrny [48]. Na obr. 1.40 je schéma s principem nanášení povlaku.



Obr. 1.40 Princip nanášení povlaku na substrát [49].

S ohledem na typ výboje jsou oblouky napájeny pomocí střídavého (AC) nebo stejnosměrného (DC) proudu (z anglického Alternating Current a Direct Current) a každý typ výboje má specifické technologické aspekty a pole použití [44]. Na obr. 1.41 jsou jednotlivé typy zachyceny.

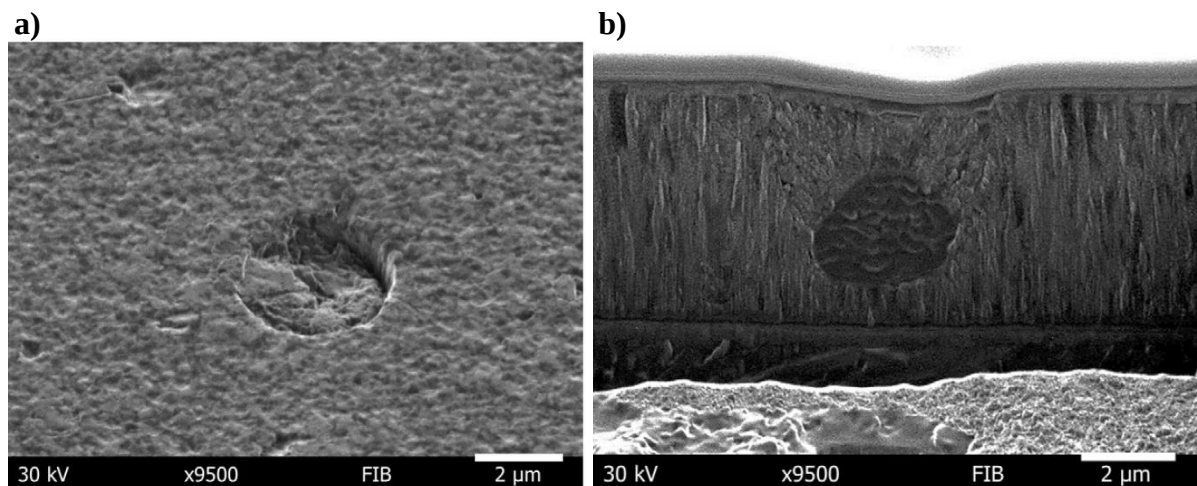


Obr. 1.41 Katodický oblouk napájen pomocí: a) DC, b) AC [50].

Obloukový výboj napájený DC se velikost proudu pohybuje v řádech desítek až po několik stovek ampér (až 300 A) a jsou vytvářeny velmi tvrdé povlaky. Na druhou stranu oblouk napájený AC je charakteristický krátkými opakujícími se pulzy, jimiž prochází proud až několik tisíc ampér. Výhodou je, že plasma způsobuje redukci nebo dokonce eliminaci výskytu makročástic, tzv. dropletů na povrchu povlaku a zvyšuje ionizační účinek plasmu v porovnání s DC, kde se makročástice vyskytují [44].

Dropletů jsou kapičky, které mají velikost 0,01 – 10 μm . Obecně se dá říci, že u materiálu s vyšším bodem tání se dropletů tvoří v menším množství i menších velikostí. Mají tak nižší pravděpodobnost, že se přichytí k povrchu. Dropletů vznikají v místě katody, které je dostatečně zahřáto, aby se materiál roztavil, ale ne sublimoval. V případě, že

dropletu dopadnou na povlak, jsou tak součástí tenkého filmu (obr. 1.42) a mohou také vytvářet dutiny (dochází ke kavitaci), které mohou prorůstat přes celý film [51]. Eliminace dropletů přináší zásadní výhody ve zlepšení odolnosti proti opotřebení a proti oxidaci. K výraznému snížení tvorby dropletů se dá dosáhnout pomocí magnetického pole v blízkosti katody [52].



Obr. 1.42 Droplet, který je součástí tenkého filmu povlaku: a) pohled na povlak před řezem, b) pohled v řezu [51].

c) Iontová implantace

Tato technologie se řadí mezi hybridní proces, neboť se jedná o kombinaci napařování a naprašování. Mezi substrátem a terčem je vytvořeno silné elektrické pole a v plynné atmosféře dochází k elektrickému výboji, jež ionizuje částice plynu i odpařené částice kovu z terče. Všechno probíhá ve vakuu 10-4 Pa. Reakcí iontů a jejich dopadem s vysokou energií na povrch substrátu vzniká povlak. Ionty pronikají do podpovrchových vrstev do hloubky 0,15-0,3 µm. Použitím vysokofrekvenčního napětí lze povlakovat i nevodivé materiály, jako např. plasty. Touto technologií lze vytvářet velmi unikátní struktury, které jinou technologií vytvořit nelze [42, 53].

1.4.3 Vybrané povrchové úpravy a povlaky pro závitníky

Kvůli zlepšení životnosti, vyšší tvrdosti, nižšímu koeficientu tření apod. bývají na závitnících provedeny povrchové úpravy, mezi které lze zařadit i povlakování. Ne všechny technologie jsou však pro povrchové úpravy a povlakování pro závitníky vhodné, neboť se jedná o tvarově složité nástroje. Použití určité úpravy závisí na konkrétní aplikaci.

Používané povrchové úpravy pro závitníky [54, 55]:

1. Nitridace

Na povrchu závitníku dochází k nasycení dusíkem, reagující s prvky HSS nástroje a vzniká tak tvrdý povlak. Teplota během nitridování bývá 500-550 °C a tvrdost a hloubka vrstvy závisí na koncentraci dusíku a jeho reakční doby. Závitníky mají po nitridaci nižší koeficient tření a vyšší odolnost proti navařování (adhezním opotřebení). Používá se pro materiály jako litina s lupínkovým grafitem, tlakové odlitky ze slitin hliníků pro slitiny mědi.

2. Napařování

Na nástroji je vytvořena krystalická oxidační vrstva Fe_3O_4 , jejíž tloušťka bývá 3-10 μm . Vytváří tak porézní vrstvu, kde ulpívá procesní kapalina a dochází tak k lepšímu mazání a chlazení. Tato úprava nezvyšuje tvrdost povrchu, ale pouze snižuje koeficient tření a je tak vhodný pro řezání závitů nižší řeznou rychlostí v materiálech jako jsou uhlíkové oceli.

Používané povlaky pro závitníky, jejichž vlastnosti jsou zřehledněny v tab. 1.12, jsou [54, 55, 56]:

1. TiN

Jedná se o jednovrstvý povlak, který má univerzální použití. Tloušťka vrstvy bývá kolem 3 μm a je vhodný zejména pro uhlíkové oceli a hliníkové výkovky.

2. TiCN

Od povlaku TiN se liší díky dodatečně uloženému uhlíku zásadně. Je multivrstvý nebo gradientní. Má vyšší odolnost proti opotřebení a zároveň lepší houževnatost. Maximální teplota použití je ovšem nižší. TiCN je vhodný pro uhlíkové až vysokolegované oceli, korozivzdorné oceli, litiny, hliníkové slitiny, mosazi a bronzky.

3. TiAlN

Bývá multivrstvý nebo jednovrstvý a vyznačuje se vyšší hodnotami tvrdosti a vyššími pracovními teplotami než povlaky TiN a TiCN. Je vhodný i pro vyšší řezné rychlosti. Používá se u ocelových materiálů a u litiny.

4. CrN

Bývá jednovrstvý a vyznačuje se nižší tvrdostí než u ostatních zmiňovaných povlaků, ale má velmi dobrou teplotní stabilitu. Používá se pro výrobu závitů v materiálech jako je měď a její slitiny (mosazi, bronzky).

5. AlCrN

Používá se jako jednovrstvý i multivrstvý povlak bez obsahu titanu, který má výbornou odolnost proti opotřebení a vysokou oxidační odolnost, přičemž zachovává vysokou tvrdost. Používá se spíše u tvářecích závitníků pro ocelové materiály.

Tab. 1.12 Vlastnosti povlaků vhodných pro závitníky [42, 54, 56].

Povlak	TiN	TiCN	TiAlN	CrN	AlCrN
Barva	zlatožlutá	šedofialová	fialová	stříbrnošedá	šedomodrá
Max. teplota použití	600 °C	400 °C	800 °C	700 °C	1100 °C
Součinitel tření proti oceli	0,4	0,4	0,4	0,5	0,35
Tvrdost podle Vickerse	2300 HV _{0,05}	3000 HV _{0,05}	3300 HV _{0,05}	1750 HV _{0,05}	3200 HV _{0,05}

1.4.4 Úpravy nástrojů

a) Odmašťování

Průmyslová odmašťovadla na bázi ropných derivátů odstraňují konzervační látky a jiné mastné látky z povrchu nástrojů. Zajišťují dobrou smáčivost a nedochází k nadměrnému odpařování oproti dnes již neekologickým prostředkům jako je např. benzín nebo petrolej [42, 57].

b) Mokré čištění

Používají se průmyslové mycí linky, které kombinují několik technologických postupů pro čištění. Mezi ně patří odmašťování, elektrochemické metody čištění, ultrazvuk, oplachy tlakové i bez tlaku a vakuové nebo odstředivé sušení. Čištění probíhá v lázních a používají se čisticí prostředky, které bývají zásaditého charakteru, ale některých případech se používá i kombinace kyselého a zásaditého prostředí v různých vanách. Následují oplachy, zajišťující důkladné odstranění zbytků čisticí lázně. Obsahují i tzv. pasivátory, které chrání povrch vůči korozi a mají různou dobu působení (do dvou dnů u nástrojů před povlakováním). Posledním krokem je sušení, které zajistí dokonalé odstranění zbytkové kapaliny po oplachu [42].

c) Pískování

Slouží k odstraňování nečistot, které pevně ulpívají na povrchu. Používá se abrazivo SiC či Al_2O_3 a během procesu je nutno brát v potaz charakter nástroje, protože během pískování by nemělo dojít k nechtěnému úběru materiálu ve smyslu např. zaoblení hran [42].

d) Odjehlení

Provádí se zejména u nástrojů z rychlořezné oceli pomocí ručního odjehlení a slouží k odstranění ostřin, a to pilníky nebo tkaninou s abrazivem. Používá se také kartáčování [57].

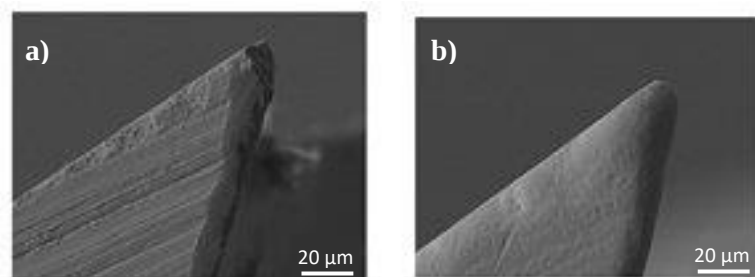
e) Stripping

Neboli odstraňování předešlých povlaků. Chemická nebo elektrochemická reakce nástrojového materiálu s médiem zajistí, že dojde k odstranění povlaku. U rychlořezné oceli se používá roztok z peroxidu vodíku, vody a tetranatriumdifosfát při teplotě kolem 70 °C. U nástrojů ze slinutých karbidů je roztok podobný, avšak koncentrace peroxidu vodíku je nižší a teplota bývá pokojová. Problém spočívá v odleptávání kobaltu [42].

f) Omílání

Jde o mechanickou mikroupravu povrchu, kde dochází za pomoci granulátu s abrazivem k zaoblování hran nástroje a vyhlazení jeho povrchu. Nástroje jsou uchyceny do držáků, které rotují kolem své osy a zároveň ho vlečou granulátem, který plní funkci nosiče abraziva. Tento planetový pohyb zajišťuje rovnoměrný kontakt všech ploch a hran nástroje s granulátem. Nástroje proto mohou mít i složitou geometrii, jako např. závitníky. Nejdůležitějšími parametry, které ovlivňují stupeň zaoblení, jsou typ abraziva, granulát, rychlost a doba omílání. Důležitá je i hloubka zanoření a smysl otáčení nástrojů. Doba omílání může být v řádech několika sekund až po desítky minut, závisí vždy na požadovaném zaoblení břitů a na materiálu nástroje [42, 57, 58]

Provádí se před samotným povlakováním, protože omílání jsou hrany zaobleny, plochy jsou vyhlazeny, a tím má povlak a jednotlivé vrstvi lepší adhezi k nástroji (obr. 1.43). Nedochází tak k tendenci odlupování povlaku u ostrých hran po aplikaci PVD povlaku. Používá se však i po PVD povlakování a výrazným způsobem zvyšuje trvanlivost i kluzné vlastnosti, neboť po nanesení povlaku vznikají na povrchu droplety a ty zhoršují kvalitu povrchu. U omílání se běžně dosahuje drsnosti povrchu R_a 0,4 až 0,8 μm [57, 58].



Obr. 1.43 Čelní stopková fréza ze slinutého karbidu: a) po broušení, b) po omílání [58].

g) Leštění

Nejčastěji se používá ruční leštění pomocí tkanin s abrazivem. Účelem je odstranit mikročástice na povlaku, a tím snížit drsnost povrchu břitů a funkčních ploch [57].

2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK MATICOVÝCH ZÁVITNÍKŮ

Cílem experimentu je zjistit, který závitník je nejvhodnější pro výrobu závitů velikosti M6 v korozivzdorné oceli a jak velký vliv má použitý povlak nástroje na jeho řezivost.

2.1 Obráběný materiál

Materiál obrobku, který byl testován, byl korozivzdorná ocel X5CrNi18-10 (dle ČSN EN, ekvivalent české normy je ocel 17240). Jedná se o chrom-niklovou austenitickou nestabilizovanou ocel. Vyznačuje se zejména vysokou tažností, dobrou svařitelností a obrobitelností. Rozměry polotovaru byly 200x100x10 mm. Chemické složení je v tab. 2.1, kde jsou současně mechanické vlastnosti tohoto materiálu.

Tento materiál je vhodný pro stavbu např. tlakových nádob a chemických zařízení. Odolává anorganickým kyselinám při nízkých koncentracích za normálních teplot a slabým organickým kyselinám do středních teplot. Používá se velmi často v potravinářském a farmaceutickém průmyslu a např. na součásti chladicích a mrazicích zařízení [59].

Tab. 2.1 Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli X5CrNi18-10 [60].

Chemické složení [hmotnostní %]							
C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	N
≤0,07	17,5-19,5	8-10,5	≤2	≤1	≤0,045	≤0,015	≤0,11
Mechanické vlastnosti							
Mez pevnosti R_m		Mez kluzu $R_{p0,2}$		Tažnost A_{50}		Tvrdost podle Vickerse	
500-700 MPa		190-235 MPa		45 %		220-450 HV	

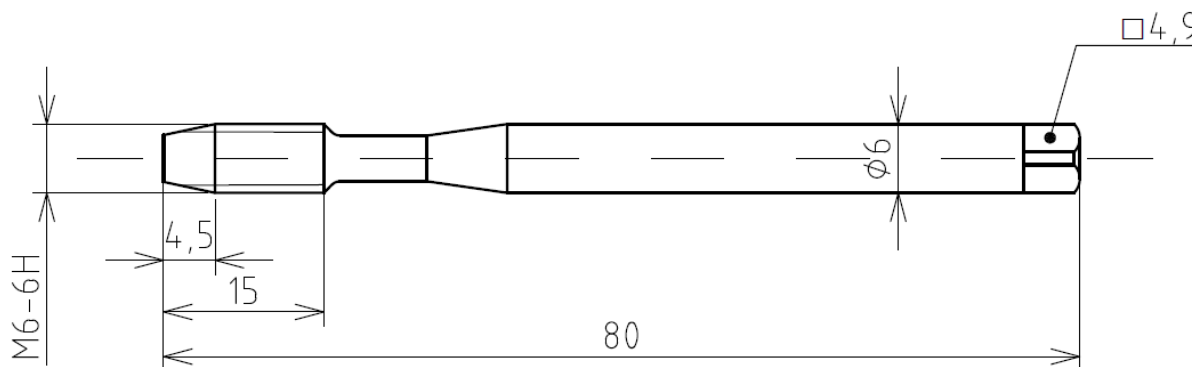
2.2 Volba nástrojů

Obecně při výběru nástroje je nutno postupovat systematicky. Nejprve je nutné zařadit obráběný materiál do určité skupiny dle katalogu výrobce. Tyto skupiny mají většinou číselné označení, do kterého spadají různé skupiny materiálů jako jsou konstrukční, vysokolegované nebo korozivzdorné oceli nebo např. slitiny hliníku nebo mědi. V tomto případě byla zvolena kategorie s korozivzdornými oceli.

Velikost a typ závitů jsou další kritéria, podle kterých se zúží výběr toho správného nástroje, a proto je vybrán závitník pro metrický závit velikosti M6.

Dalším důležitým faktorem je charakter díry, podle kterého je přiřazen závitník s tou správnou geometrií. Díra je v tomto případě průchozí a má hloubku 10,0 mm. Průměr předvrtané díry pro M6 činí 5,0 mm. Jedná se tedy o krátký závit, vzhledem k průměru díry.

Vzhledem ke skutečnosti, že cílem je otestovat několik druhů závitníků se stejnými řeznými podmínkami a stejným materiálem, ze kterého je závitník vyroben, tak jediný faktor, který je odlišný, je povlak. Byly vybrány 4 závitníky z materiálu HSS-E, které jsou povlakovány technologií PVD a jsou označeny od A po D, viz tab. 2.2. Z konkurenčních důvodů zůstává ale výrobce anonymní. Geometrie závitníku je na obr. 2.1. Všechny mají 3 přímé drážky s lamačem a typ náběhu B, který odpovídá 3,5-5,5 stoupání závitu.



Obr. 2.1 Schéma s rozměry použitých závitníků.

Tab. 2.2 Testované závitníky povlakované metodou PVD.

Označení	Typ povlaku	počet kusů
A	CrAlN	1
B	AlTiN	1
C	TiN	1
D	TiCN	1

2.3 Řezné podmínky

Řezání závitů probíhá za nízkých řezných rychlostí. Pro všechny testované závitníky jsou řezné podmínky v tab. 2.3 a jsou stejné. Řezné podmínky byly zvoleny z doporučených hodnot v katalogu výrobce. Každý závitník má doporučený určitý rozsah řezných rychlostí, např. $v_c = 8\text{--}12 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Byla zvolena řezná rychlost o velikosti $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a otáčky vřetene se dají spočítat ze vztahu (18).

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 10}{\pi \cdot 6} = 530,5 \cong 530 \text{ min}^{-1} \quad (19)$$

kde: v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] - řezná rychlost,
 D [mm] - průměr nástroje,
 n [min^{-1}] - otáčky nástroje.

Tab. 2.3 Řezné podmínky a parametry pro zvolené závitníky.

Řezná rychlost	$v_c = 10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Posuv	$f = 1 \text{ mm}$
Otáčky	$n = 530 \text{ min}^{-1}$
Procesní kapalina	emulze, 10% Cimperial HD 801-03, tlak 60 barů
Průměr předvrtané díry	5 mm
Hloubka díry	10 mm

2.4 Obráběcí stroj

Výrobu závitů probíhala na pětiosém CNC obráběcím centru MCV 1210, které má řídicí systém Sinumerik 840D, viz obr. 2.2. Závitníky byly upnuty v upínači s tlačně-tažnou kompenzací od firmy EMUGE typu Softsynchro KSN 1/HD HSK-A63, DIN 69893.

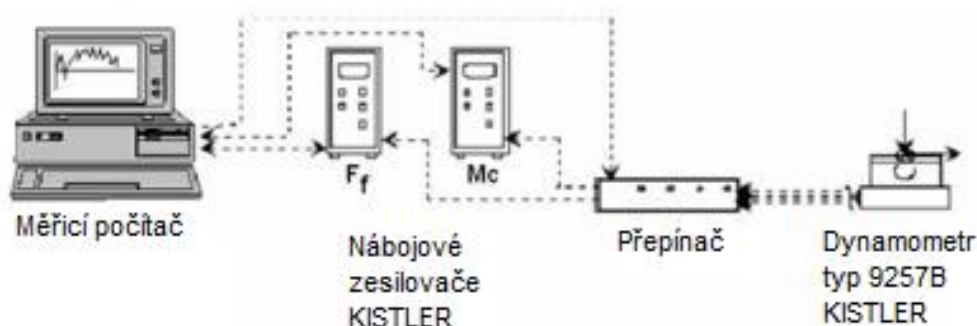


Obr. 2.2 CNC obráběcí centrum MCV 1210 od firmy TAJMAC-ZPS, a.s. [61].

2.5 Způsob snímání potřebných veličin

Měření řezného momentu a posuvové síly bylo zajištěno pomocí piezoelektrického křemíkového dynamometru Kistler 9257B, který byl vybaven zesilovači Kistler 9011A, viz obr. 2.3. Pro upnutí obrobků sloužil strojní svěrák, který byl připevněn k čelní ploše dynamometru pomocí speciální příruby a pomocí upínek a šroubů. Z důvodu použití tlačně-tažného kompenzátoru upínání nebyl záznam posuvové síly potřebný a pro statistické

vyhodnocení sloužily pouze průběhy řezných momentů, které jsou všechny graficky znázorněny v přílohách 1-3. Během zkoušek byly pořízeny fotografie závitníků, které jsou obsahem příloh 4-6.



Obr. 2.3 Schéma měřicí soustavy Kistler [62].

2.6 Teoretický rozbor průřezu třísky

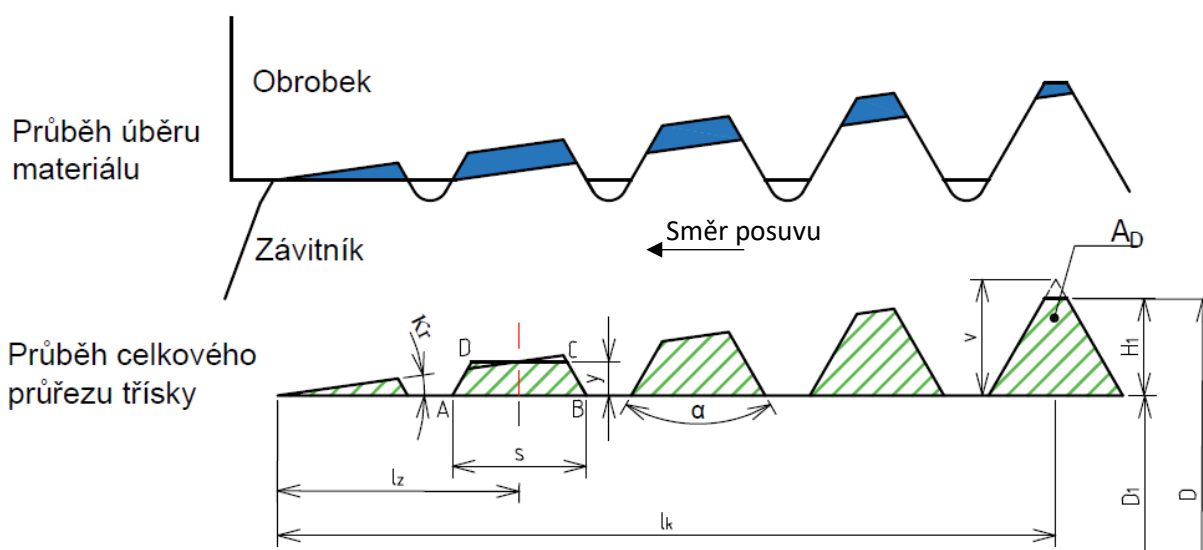
Řezný moment závisí na řezné síle a středním průměru závitu, jak je vidět v již zmiňovaném vztahu (16). Střední průměr závitu je samozřejmě konstantní. Řezná síla je pak závislá na měrné řezné síle a průřezu nedeformované třísky. Měrná řezná síla bývá konstantní a je závislá na materiálu, geometrii nástroje apod. Dá se také definovat jako síla potřebná k oddělení třísky o průřezu 1 mm^2 .

Pro výpočet řezné síly se vychází z následujícího vztahu:

$$F_c = k_c \cdot A_D \quad (20)$$

kde: k_c [MPa] - měrná řezná síla,
 A_D [mm²] - průřez nedeformované třísky.

Vzhledem k tomu, že jediná proměnná je plocha třísky A_D (zanedbáním změny měrné řezné síly vlivem opotřebení nástroje), tak teoretický průběh řezného momentu je možné spočítat vzhledem ke známé geometrii nástroje. Plocha třísky A_D je tvaru lichoběžníku, jak je vidět v geometrickém rozboru na obr. 2.4.



Obr. 2.4 Schéma průběhu úběru materiálu a průřezu třísky u metrického závitu.

Výpočet plochy lichoběžníku lze pro tento případ zapsat jako:

$$A_D = y \cdot \frac{|AB| + |CD|}{2} \quad (21)$$

$$y = l_z \cdot tg(\kappa_r) \quad (22)$$

Z věty o podobnosti trojúhelníků (věta sss) lze získat:

$$\frac{|CD|}{|AB|} = \frac{v - y}{v} \rightarrow \overline{CD} = \frac{|AB| \cdot (v - y)}{v} \quad (23)$$

přičemž

$$s = |AB| \quad (24)$$

$$v = \frac{s}{2} \cdot tg(\alpha) \quad (25)$$

$$tg(\kappa_r) = \frac{v}{l_k} \quad (26)$$

$$H_1 = \frac{D - D_1}{2} \quad (27)$$

Dosazením rovnic (22-25) do rovnice (21) a následnou úpravou lze získat obecný tvar průběhu plochy třísky:

$$\begin{aligned} A_D &= l_z \cdot tg(\kappa_r) \cdot \frac{s + \left(\frac{s \cdot (v - y)}{v} \right)}{2} = l_z \cdot tg(\kappa_r) \cdot \frac{2 \cdot s \cdot v - s \cdot l_z \cdot tg(\kappa_r)}{2v} = \\ &= \frac{2 \cdot s \cdot v \cdot l_z \cdot tg(\kappa_r) - s \cdot l_z^2 \cdot tg^2(\kappa_r)}{2 \cdot v} = \frac{s \cdot tg(\alpha) \cdot l_z \cdot tg(\kappa_r) - l_z^2 \cdot tg^2(\kappa_r)}{tg(\alpha)} = \\ &= s \cdot l_z \cdot tg(\kappa_r) - \frac{l_z^2 \cdot tg^2(\kappa_r)}{tg(\alpha)} \end{aligned} \quad (28)$$

Průřez třísky lze, u průchozích děr vzhledem k hloubce zařezaného kužele závitníku, vyhodnotit ve třech intervalech:

$$1. \quad l_z \in \langle 0; l_k \rangle$$

Zařezání náběhového kužele do materiálu.

$$A_{D1} = s \cdot l_z \cdot tg(\kappa_r) - \frac{l_z^2 \cdot tg^2(\kappa_r)}{tg(\alpha)} \quad (29)$$

2. $l_z \in \langle l_k; L \rangle$

Celý náběhový kužel je již zařezaný a velikost průřezu se až do dosažení hloubky díry L nemění. Dosazením rovnice (27) do (22) a následně do (28) lze získat:

$$A_{D2} = A_{Dmax} = H_1 \cdot s - \frac{H_1^2}{tg(\alpha)} \quad (30)$$

3. $l_z \in (L; L + l_k)$

Dochází k vyjíždění náběhové části závitníku z díry.

$$A_{D3} = \left(H_1 \cdot s - \frac{H_1^2}{tg(\alpha)} \right) - \left(s \cdot (l_z - L) \cdot tg(\kappa_r) - \frac{(L_z - L)^2 \cdot tg^2(\kappa_r)}{tg(\alpha)} \right) \quad (31)$$

Nejdůležitější interval z hlediska výroby je č. 2, kde je nástroj plně zařezán v materiálu. V takovém případě dochází k největšímu zatížení nástroje. Hodnota rezného momentu je téměř konstantní, zejména u ostrého nástroje [63]. Na obr. 2.5 je graf, kde je zaznamenán průběh plochy třísky v závislosti na hloubce závitníků dle rovnic (29-31).



Obr. 2.5 Teoretický průběh plochy třísky v závislosti na hloubce závitníku velikosti M6.

3 REALIZACE EXPERIMENTŮ, JEJICH STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

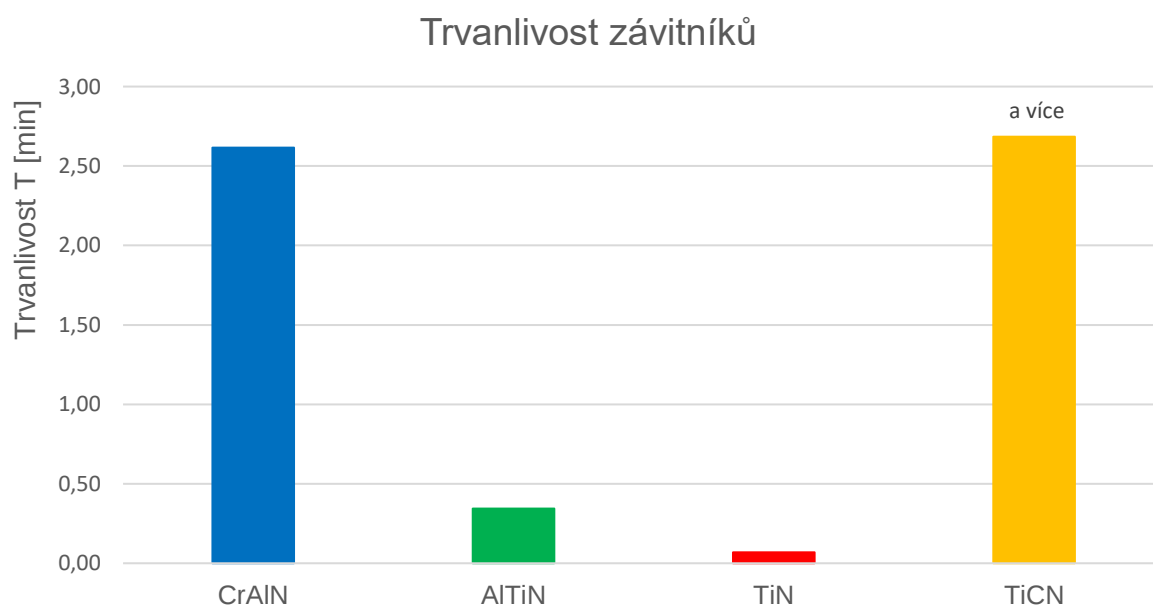
Experiment proběhl v laboratorních prostorách ÚST v Brně. Byly zaznamenány hodnoty krouticích momentů během celého procesu závitování. Frekvence zápisu činila 150 Hz, tedy každou sekundu proběhlo 150 záznamů. Závitníky vyřezávaly závity až do chvíle, kdy jejich opotřebení bylo nepřijatelné. Výjimkou je závitník s povlakem TiCN, u kterého bylo testování před 40. závitem zastaveno, a to z důvodu dosažení již nejvyššího počtu obrobených závitů oproti ostatním závitníkům s jinými povlaky. Trvanlivost nástroje je první krok, který byl proveden a dalším je analýza naměřených dat.

3.1 Trvanlivost nástroje

Během obrábění dochází k opotřebení nástrojů. Při překonání určité míry opotřebení lze zaznamenat nárůst potřebného řezného momentu a také sníženou kvalitu závitu. V takovém případě je obecně nutné použít závitník nový.

Trvanlivost byla počítána vzhledem k počtu obrobených děr v čase, kdy byl nástroj v kontaktu s materiálem. Na obr. 3.1 je graf, kde je porovnání trvanlivosti nástrojů s použitými povlaky. Jako zcela nevhodné z hlediska trvanlivosti se jeví povlaky AlTiN a TiN, u kterých došlo k výraznému zvýšení opotřebení až do nepřijatelné meze. U povlaku TiN k tomu došlo dokonce při obrobení jednoho závitu.

Povlaky CrAlN a TiCN dopadly o poznání lépe. Po obrobení 38 závitů došlo u závitníku s povlakem CrAlN k nepřijatelnému opotřebení, zatímco nástroj s povlakem TiCN byl stále v dobrém stavu. Nejde jednoznačně říci, že povlak TiCN je lepší jenom dle faktu vyšší trvanlivosti, neboť došlo k testování pouze jednoho závitníku každého druhu. Pro jednoznačný závěr by bylo nutné buď další testování s více nástroji se stejným povlakem, nebo dále vyhodnotit jiné řezné atributy, jako např. průběhy krouticích momentů, což je tento případ.



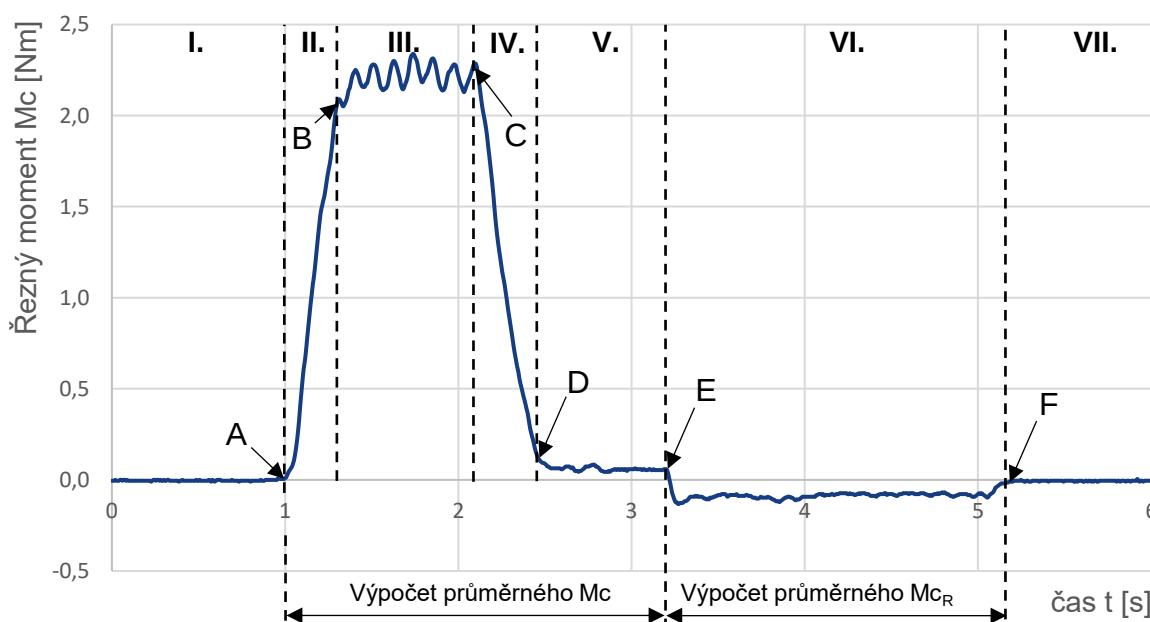
Obr. 3.1 Porovnání trvanlivosti závitníků s různými povlaky.

3.2 Skutečný průběh řezného momentu

Jako první kritérium hodnocení řezného momentu byly spočítány jeho střední hodnoty pro levotočivý dopředný chod (dochází k řezání) a také pro zpětný chod. Průběh řezného momentu lze rozdělit do 7 etap (obr. 3.2). Výpočet průměrného řezného momentu probíhal v oblastech II až V a pro oblast zpětného chodu pouze pro oblast VI, a to pro každý jednotlivý závit. Závitník je v kontaktu s materiálem pouze mezi body A až F, z čehož plyne, že hodnoty, které jsou v I. a VII. oblasti jsou nepodstatné. K separaci dat byl použit program Microsoft Excel 2016.

Průměrné hodnoty nejsou z hlediska statistického hodnocení takového typu dat až tolik důvěryhodné. Každý závit je ale stejný a lze očekávat, že v případě stabilního procesu nebude docházet k velkým rozdílům u jednotlivých vyřezaných závitů. Jedná se samozřejmě o zpracování velkého množství dat, kde je nutné odseparovat právě ta data, která nevykazují dobré výsledky (závitníky které nevyhovují) a zjistit, které výsledky jsou ty nejlepší. Z toho důvodu bylo zjištění a porovnání průměrných řezných momentů zvoleno jako další krok.

Časový průběh řezného momentu



Obr. 3.2 Skutečný časový průběh řezného momentu při řezání závitů u průchozí díry.

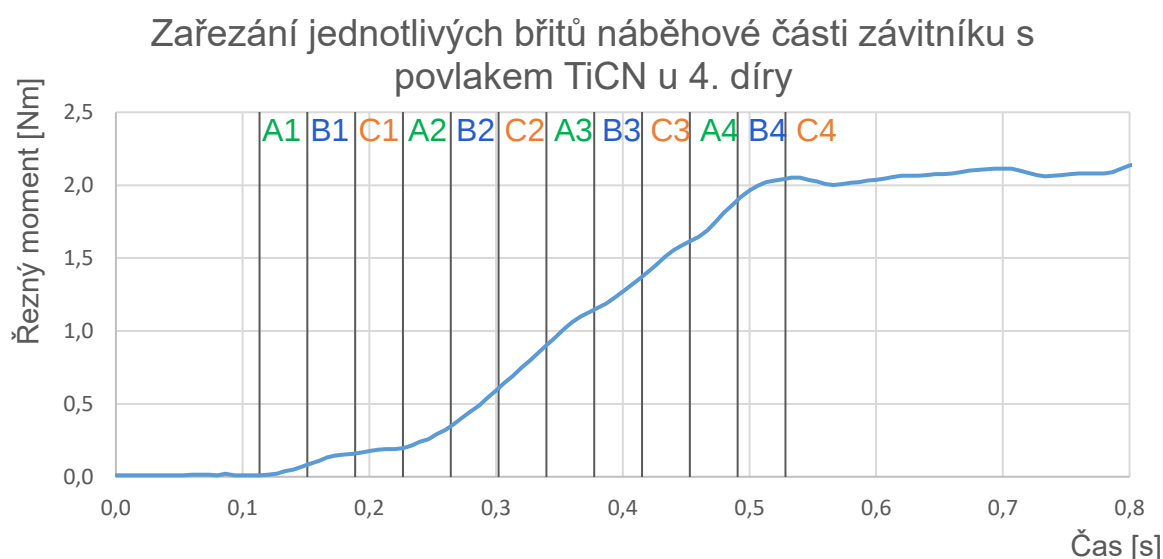
Každou oblast řezného cyklu závitování lze jednoznačně popsat a z grafu lze tak vyčíst, co se v každé oblasti děje. Tyto oblasti jsou popsány následovně:

- I. V této oblasti nedochází k žádnému úběru materiálu, je to oblast mezi startem programu a pozicí těsně před prvním kontaktem nástroje s obrobkem – do bodu A.
- II. V této fázi dochází k zařezání náběhového kužele do materiálu – A až B.
- III. Náběhová část je již plně zařezána a zařezává se i kalibrovací část. V tomto úseku je řezný moment maximální – B až C.
- IV. Dochází k výjezdu náběhového kužele závitníku z díry a zároveň dochází k dořezávání kalibrovací částí – C až D.
- V. Dochází pouze k dořezávání závitů a kalibrovací část postupně vyjíždí z díry – D až E.

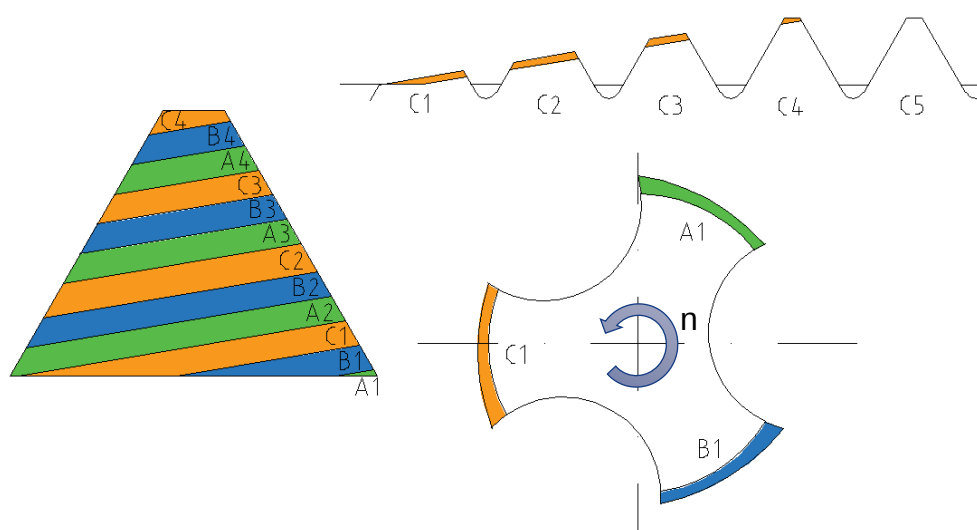
- VI. Jedná se o fázi reverzaci nástroje. V bodě E nastává brzdění a v nulové hodnotě krouticího momentu nastává směr smyslu otáčení. V této fázi nástroj vyjíždí zpět závitem, který již vytvořil – E až F.
- VII. Od bodu F již není závitník v kontaktu s obrobkem a vrací se do bezpečné vzdálenosti. Následuje ukončení programu nebo přejezd nad další díru a řezání dalšího závitu.

3.3 Oblast zařezání náběhové části

Během fáze zařezání náběhové řezné části závitníku (oblast III) dochází k největšímu nárůstu řezného momentu. Na obr. 3.3 je sestaven graf, kde je pouze průběh řezného momentu v náběhové části a kde jsou zobrazeny jednotlivé zuby závitníku v momentě, kdy přicházejí do záběru. Byl náhodně vybrán závitník s povlakem TiCN v momentě obrábění 4. díry. Jednotlivým zubům byly přiřazeny písmena a čísla podle toho, kde se nacházejí, viz obr. 3.4. Výpočet vychází z počtu otáček za sekundu, a to konkrétně $8,83 \text{ s}^{-1}$.



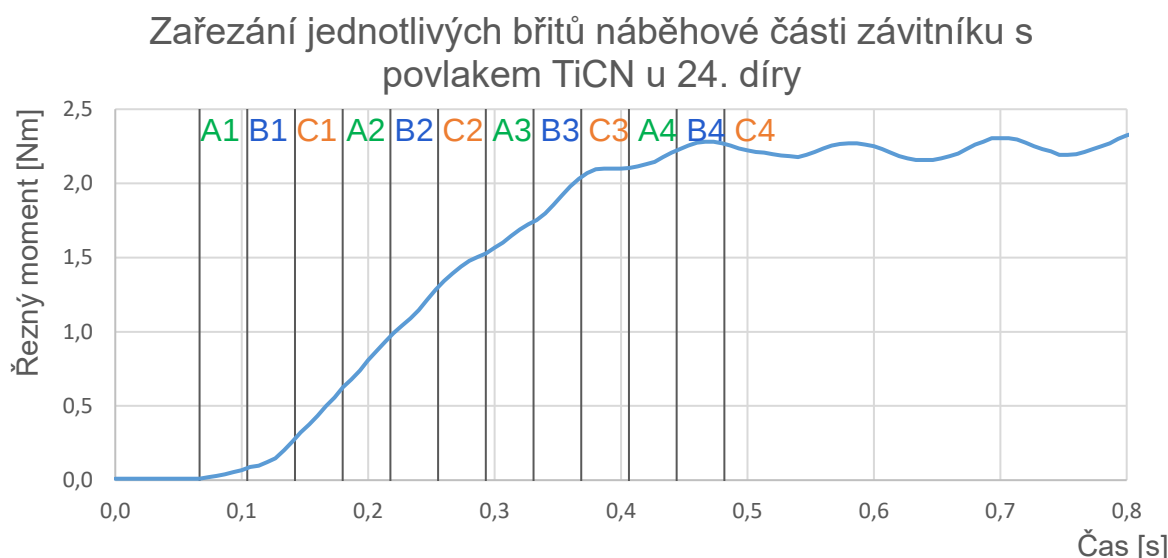
Obr. 3.3 Zařezání jednotlivých břitů náběhové části závitníku s povlakem TiCN u 4. díry.



Obr. 3.4 Schématické znázornění úběru materiálu jednotlivých břitů.

Oblast A1 je v tomto případě první kontakt závitníku s obráběným materiálem. Záleží vždy na velikosti předvrtané díry, neboť obecně nemusí dojít ke kontaktu zubu A1

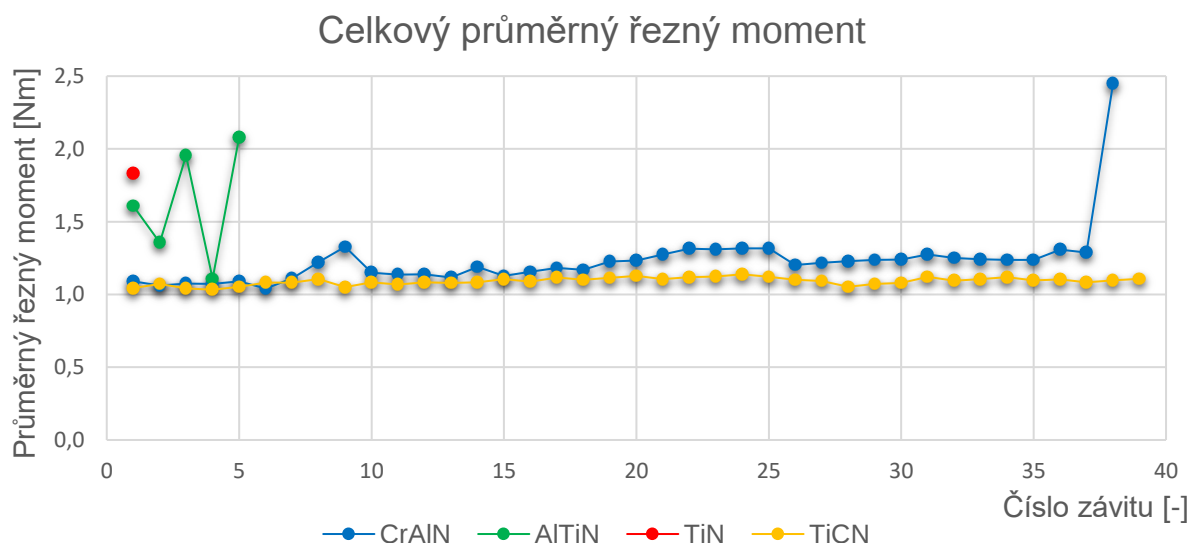
s předvrtanou dírou. Z grafu lze např. vyčíst, že v době, kdy došlo k zařezání zubu C1, nedošlo k výraznějšímu nárůstu řezného momentu, i když by tak být mělo dle pohledu na průřez třísky z obr. 3.4. V momentě, kdy došlo k zařezání zubu A2, tak došlo ke zlomu a k následnému strmějšímu nárůstu řezného momentu. Bylo zjištěno, že u všech předchozích i několika následujících průběhů k tomuto jevu dochází až u zubu C1. Později, jak je vidět v grafu na obr. 3.5, kde je průběh u téhož závitníku, dochází k strmějšímu nárůstu již při zařezání zubu B1. K této změně došlo vlivem opotřebení, stejně tak k celkově vyšším hodnotám řezného momentu v oblasti III.



Obr. 3.5 Zařezání jednotlivých břitů náběhové části závitníku s povlakem TiCN u 24. díry.

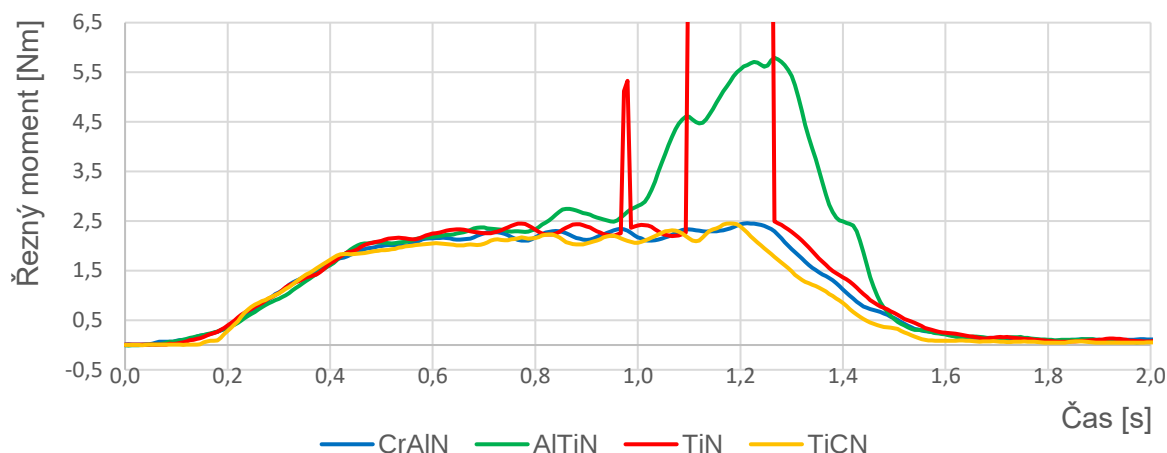
3.4 Analýza naměřených hodnot

Ze zdrojových dat, které byly odfiltrovány, byly spočteny průměrné hodnoty řezných momentů pro každý vyrobený závit (viz obr. 3.6). Povlak TiN, který vyrobil pouze 1 závit, má o 76 % vyšší hodnotu průměrného řezného momentu v porovnání s TiCN. Povlak AlTiN také nedopadl dobře, neboť vykazoval také vysoké hodnoty, které ale doprovázely i velké rozdíly hodnot mezi jednotlivými závity. Pro bližší porovnání je na obr. 3.7 graf s průběhy řezných momentů při obrábění prvních závitů u každého nástroje.



Obr. 3.6 Průměrné hodnoty řezných momentů.

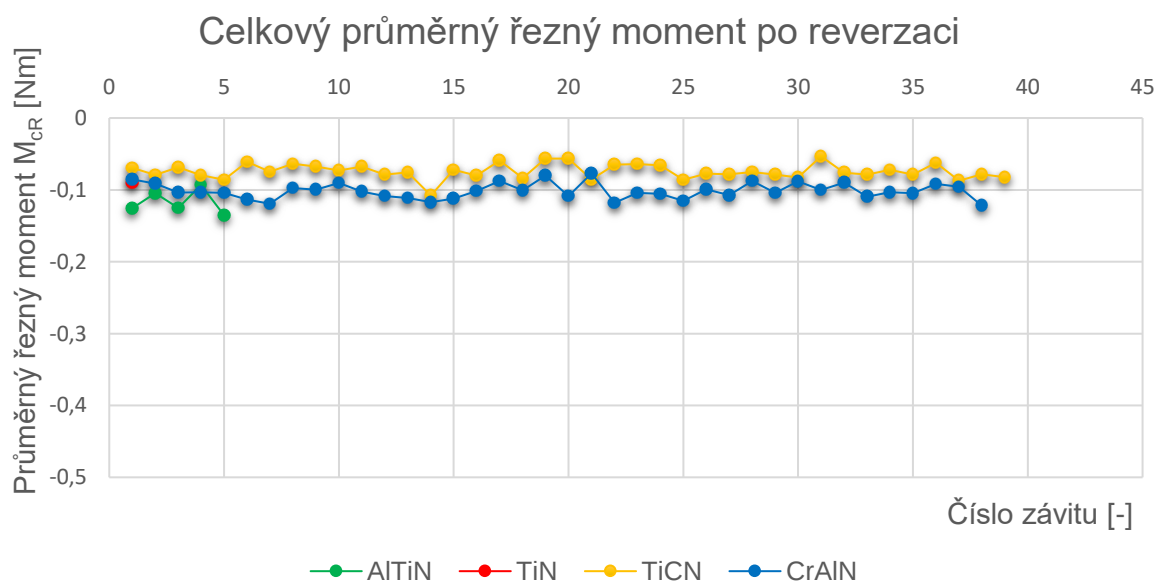
Průběh řezného momentu při řezání prvních závitů



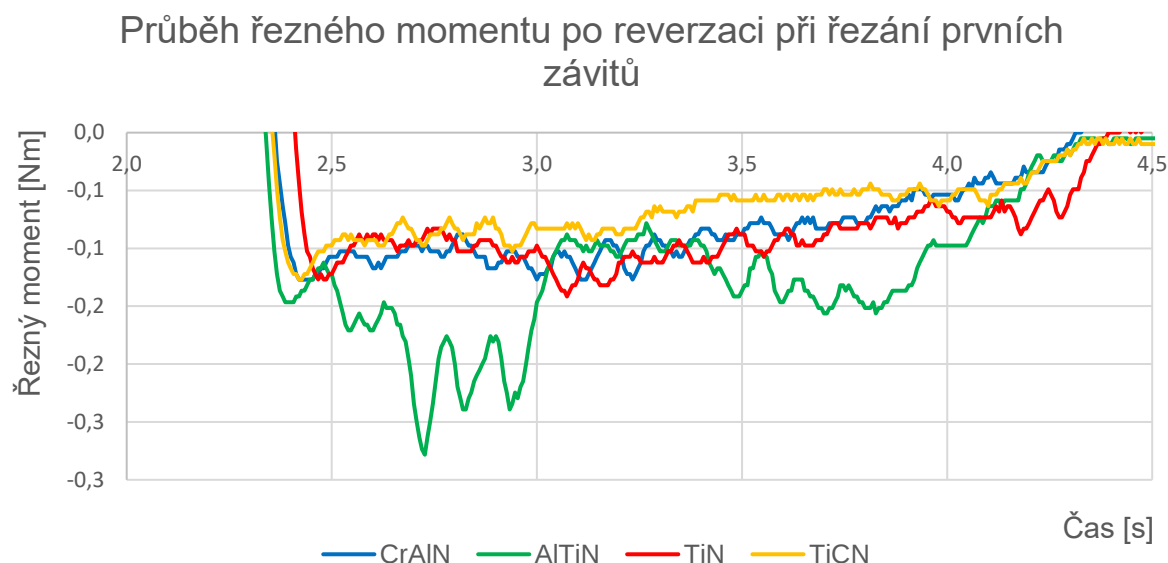
Obr. 3.7 Průběh řezného momentu při řezání prvních závitů.

Hodnoty se liší v oblasti III, tedy v době, kdy je nástroj plně zařezán do materiálu. Vlivem tření a špatného odvodu třísky došlo ke skokovému nárůstu řezného momentu u nástroje s TiN povlakem. Také povlak AlTiN vykazuje nárůst tření, avšak ne skokově. Už z těchto průběhů se dá usuzovat, že povlaky TiN a AlTiN nejsou pro obrábění za nastavených řezných podmínek vhodné.

Jako další kritérium, které je velmi důležité, je zpětný chod nástroje. Po vyhotovení závitu dochází k brzdění vřetene a k reverzaci otáček, aby mohl nástroj vyjet z místa řezu. Během tohoto kroku dochází k odtržení třísky a ke tření mezi nástrojem a obrobkem. Z grafů na obr. 3.8 a 3.9 vyplývá, že nástroj s TiN povlakem nevykazuje největší zatížení řezným momentem, a tedy výkonem stroje. Nejhorší dopadl povlak AlTiN, kde u každého závitu bylo zatížení jiné a kde docházelo k jeho nárůstu vlivem zvýšeného tření z důvodu velkého adhezního opotřebení. Celkově nejlépe jsou na tom povlaky TiCN a CrAlN, jejichž průběhy bez žádných skokových nárůstů řezného momentu vypovídají o tom, že tření je zhruba konstantní a emulze plní svou úlohu správně.

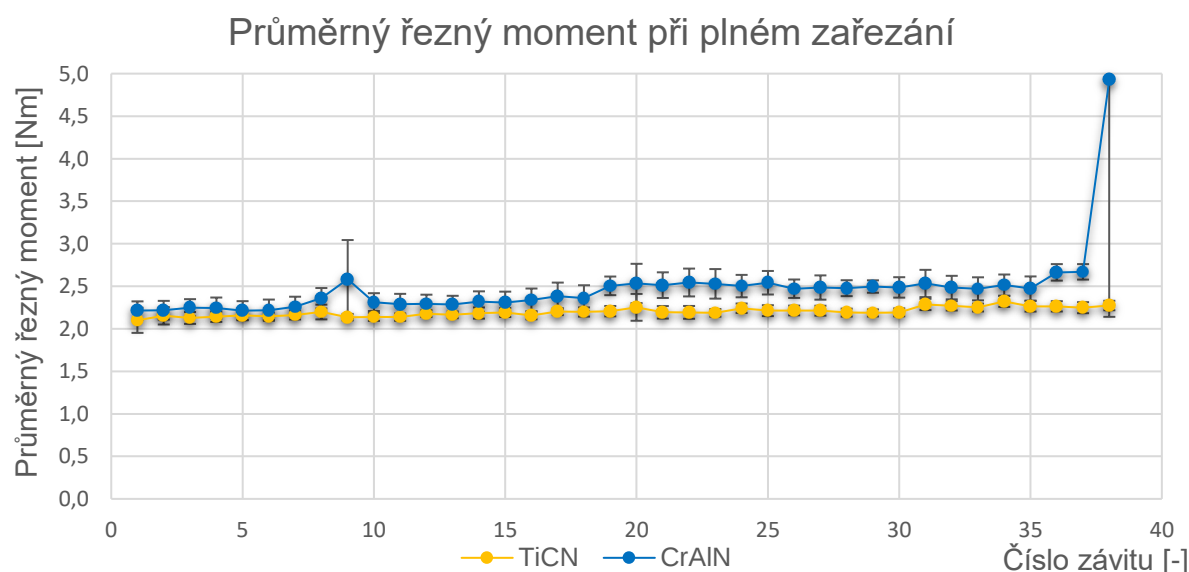


Obr. 3.8 Celkový průměrný krouticí moment po reverzaci.



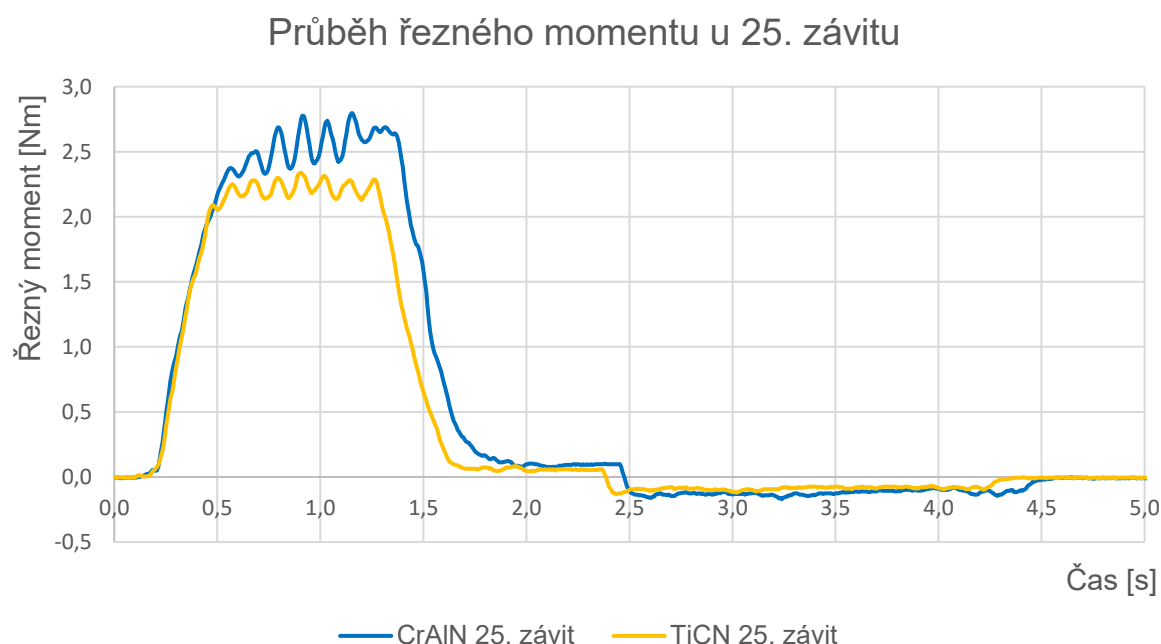
Obr. 3.9 Průběh řezného momentu po reverzaci při řezání prvních závitů.

Lze jednoznačně říci, že povlaky AlTiN a TiN nejsou vhodné pro tuto aplikaci, a proto se s nimi během dalšího vyhodnocení nebude počítat. Povlak TiCN se zdá být na první pohled lepší, ale je nutné porovnat nejdůležitější časový interval procesu řezání závitů. Tím je oblast III, kde je náběhová část plně zařezána do materiálu. Teoreticky by průběh měl být konstantní, avšak dochází k mírné „pulzaci“, ke které dochází periodicky při každé jedné otáčce. V tomto intervalu byly spočteny průměrné hodnoty řezných momentů a také směrodatné odchylky, které byly vyneseny do grafu na obr. 3.10 jako chybové úsečky. Je patrné, že u povlaku CrAlN docházelo postupně k rovnoměrnému zvyšování řezného momentu, a z toho plyne také opotřebení. Dále u 38. závitu došlo k vysokému skokovému nárůstu a z důvodu zjištění nepřijatelné míry opotřebení bylo další řezání ukončeno. Nižší hodnoty průměrných řezných momentů a stabilnější proces vykazuje povlak TiCN. Nebyly zaznamenány žádné velké odchylky v těchto hodnotách ani k výraznému postupnému zvyšování řezného momentu.



Obr. 3.10 Průměrný řezný moment při plném zařezání.

Pro bližší zkoumání byl sestaven graf (viz obr. 3.11), kde je pouze průběh řezných momentů v závislosti na čase pouze u 25. závitu (byl vybrán náhodně). Z grafu je patrné, že průběh u TiCN je v oblasti III periodický a jehož trend není vzrůstající, jako je tomu u povlaku CrAlN, a proto vychází povlak TiCN lépe.



Obr. 3.11 Průběh řezného momentu u 25. závitu pro povlaky CrAlN a TiCN.

3.5 Vyhodnocení řezivosti

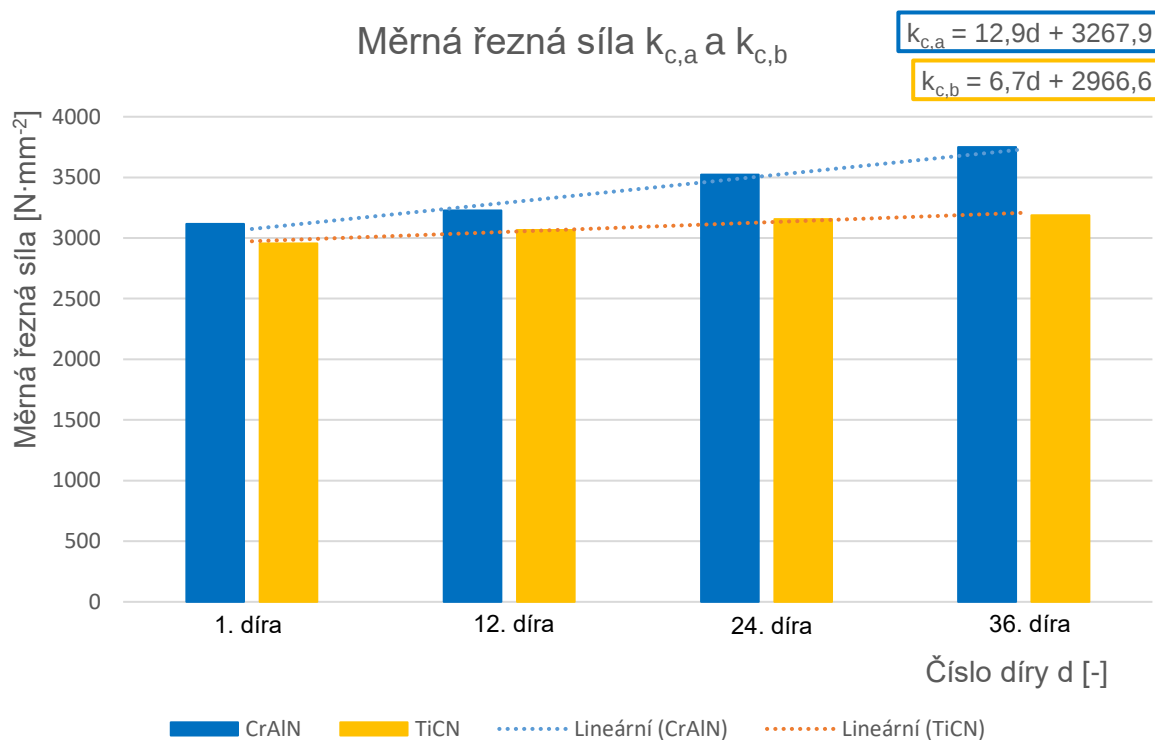
Jako poslední krok byla spočítána měrná řezná síla k_c . Vztah pro výpočet měrné řezné síly z řezného momentu je:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{M_c \cdot 2000}{D_s \cdot A_D} \quad (32)$$

Ovšem vlivem otupení nástroje dochází ke zvyšování řezného momentu, který je přímo závislý na velikosti řezné síly. Proto byly zavedeny následující předpoklady:

- celkový průřez třísky je konstantní pro všechny vyrobené závity,
- měrná řezná síla k_c se mění v důsledku změny makro/mikrogeometrie nástroje.

Pro výpočet byla hodnota průřezu třísky vzata z rovnice (30) pro maximální průřez třísky. Zároveň hodnota řezného momentu je průměrná hodnota v oblasti III. Na obr. 3.12 je sloupcový graf, kde je měrná řezná síla zobrazena pro několik konkrétních závitů. Růst hodnoty k_c je téměř lineární, a proto byla přidána lineární spojnice trendu pro oba typy závitníku. Byly vypočteny rovnice přímek, ze kterých byla vzata hodnota směrnice k . Pro závitník s povlakem CrAlN vyšla směrnice $12,9 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ a pro TiCN je $6,7 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$. Čím je hodnota směrnice vyšší, tím je průběh strmější. Výsledkem je, že směrnice u povlaku CrAlN je 1,9x vyšší než u TiCN. Zároveň čím strmější přímka je, tím rychleji klesá řezivost nástroje.



Obr. 3.12 Graf závislosti měrné řezné síly na počtu vyrobených závitů.

Pro dané řezné podmínky je nejvýhodnější použít závitník s povlakem TiCN, který vykazuje nejlepší řezivost v materiálu X5CrNi18-10 a současně nejvyšší trvanlivost v porovnání s ostatními povlaky. Je nutné ale zdůraznit, že ostatní testované závitníky mohou mít úplně jiné výsledky při použití např. odlišné řezné rychlosti nebo při použití místo řezné emulze např. řezného oleje nebo MQL.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo popsat problematiku výroby závitů pomocí závitníků a vyhodnotit, který povlak, nanesený technologií PVD na nástroj, je nejlepší z hlediska řezivosti. V úvodní části byly představeny výrobní technologie, které se zabývají výrobou závitů a o něco detailněji byly popsány metody, kdy je vnitřní závit vyroben pomocí řezacích nebo tvářecích závitníků. Značná část práce se také zabývá literární rešerší řezných materiálů a povlakováním. Závitníky jsou vyráběny z HSS nebo SK a bývají velmi často povlakovány z důvodu lepší odolnosti proti opotřebení, lepším frikčním vlastnostem, vyšší tvrdosti nebo případně ke zlepšení houževnatosti. Používané povlaky pro závitníky jsou TiN, TiCN, TiAlN, CrN, AlCrN a další, které bývají pod různým obchodním označení výrobce.

Rozsah praktické části a dílčí závěry jsou shrnuty v následujících bodech:

- Samotnému experimentu předcházela volba nástrojů, stroje, polotovaru, řezných podmínek a způsobu snímání řezného momentu, který byl pro vyhodnocení určující. Byly vybrány 4 závitníky s velikostmi M6, jejichž geometrie byla stejná a odlišovaly se pouze použitými povlaky, konkrétně CrAlN, AlTiN, TiN a TiCN.
- Byla provedena analýza teoretického průběhu průřezu třísky v závislosti na hloubce zařezaného závitníku a následně byly sestaveny rovnice, kterými se průběh řídí.
- V laboratorních prostorách ÚST proběhl krátkodobý experiment, kdy byly závitky vyřezány do materiálu X5CrNi18-10 při řezné rychlosti $10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a současně byly zaznamenány hodnoty řezných momentů pomocí měřicí soustavy Kistler.
- Průběh řezného momentu byl rozdělen na 7 fází, přičemž nejdůležitější fáze je v intervalu, kdy dojde k plnému zařazení celého náběhového kužele až po dosažení hloubky díry, kdy začíná naopak náběhový kužel z druhé strany průchozí díry vyjíždět.
- Při zařezání náběhového kužele dochází k největšímu nárůstu řezného momentu, a z tohoto důvodu byl sestaven graf (viz obr. 3.6), kde je vidět, v kterém čase došlo k zařezání konkrétních zubů závitníku. Tímto způsobem lze detailně analyzovat průběh řezného momentu v náběhové části a v případě anomálie zjistit, který zub je za ni zodpovědný.
- Z hlediska trvanlivosti nástroje jsou zcela nevyhovující povlaky TiN a AlTiN. U povlaku TiN došlo během zařezání ke skokovému nárůstu řezného momentu a následným vyhodnocením opotřebení bylo ukončeno další řezání. Povlak AlTiN nedopadl o moc lépe, neboť během řezání docházelo ke skokovým nárůstům a z analýzy zpětného chodu bylo zjištěno, že docházelo k zadírání vlivem velkého adhezního opotřebení.
- Z důvodu nízké hodnoty trvanlivosti a vysokým hodnotám řezných momentů a jejich skokovým nárůstům došlo k vyloučení povlaků TiN a AlTiN z dalšího vyhodnocení.
- Závitníky s povlaky CrAlN a TiCN vykazovaly stabilní řezný proces, kde nedocházelo k téměř žádným skokovým nárůstům řezného momentu. Pro vyhodnocení, který z nich je pro danou aplikaci výhodnější, byly spočteny průměrné hodnoty řezných momentů v oblasti plného zařezání náběhové části závitníku. Z grafů na obr. 3.10 a 3.11 je při detailním pohledu vidět, že stabilnější proces vykazuje závitník s povlakem TiCN.
- Jako kritérium k vyhodnocení, který nástroj má nejlepší řezivost, posloužil výpočet hodnot měrné řezné síly. Výpočet byl proveden u několika děl a výsledky byly zaneseny do grafu (viz obr. 3.12). Byl zaznamenán vzrůstající trend, který je téměř

lineární, a proto byla přidána lineární spojnice trendu a byly vypočteny rovnice těchto přímk. Hodnota směrnice přímky byla u závitníku s povlakem CrAlN 1,9x vyšší, než tomu bylo u TiCN, což je důsledkem strmějšího průběhu opotřebení v závislosti na počtu vyrobených závitů. Závitník s povlakem TiCN vykazoval nižší hodnotu měrné řezné síly i méně strmý trend, a proto ho lze v tomto experimentu považovat za nejvhodnější. Měl také nejvyšší hodnotu trvanlivosti.

- Je nutné podotknout, že byla provedena pouze 1 krátkodobá zkouška a k jednoznačnému výsledku by bylo možné dospět provedením více experimentů, a to i dlouhodobých a za použití více nástrojů i od jiných výrobců.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Nut taps. In: *Scorta taps* [online]. Milano, Italy, b.r. [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <http://scorta-taps.com/images/product/foto1.jpg>
- [2] Metrický závit. In: *E-konstruktor: Portál pro strojní konstruktéry* [online]. 2014 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/files/gallery/metricky-zavit.png>
- [3] Výroba závitů - uživatelská příručka. In: *Sandvik Coromant* [online]. Sandvik Coromant, b.r. [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/technical%20guides/cs-cz/C-2920-031.pdf>
- [4] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [5] SVOBODA, Pavel. *Základy konstruování*. Vyd. 4. Brno: CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-750-5.
- [6] ELSHENNAWY, Ahmad a Gamal WEHEBA. *Manufacturing Processes & Materials* [online]. 5th edition. Dearborn, Michigan: SCE, 2015 [cit. 2018-03-07]. ISBN 087263871-5. Dostupné z: lurl.cz/etcAV
- [7] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. čes. vyd. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-97-2299-4-6.
- [8] Thread turning. In: *Samtec* [online]. b.r. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://www.samtectools.com/images/product/threading/cramex-thread-turning.jpg>
- [9] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 2. část*. Brno, 2004. Dostupné také z: ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Vysoké učení technické v Brně.
- [10] CoroMill 328: Frézování drážek, závitů a drážek pro pojistné kroužky. In: *Sandvik Coromant* [online]. b.r. [cit. 2018-04-09].
- [11] Thread milling cutters. In: *KYOCERA UNIMERCO* [online]. b.r. [cit. 2018-04-09].
- [12] Thread Milling. In: *DC Swiss SA: Thread Technology* [online]. b.r. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <http://dcswiss.com/en/company/tech-school-en/thread-milling>
- [13] ZBGF Circular Thread Milling. In: *DC Swiss SA* [online]. b.r. [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <http://dcswiss.com/docs/default-source/documents/brochure-zbgf.pdf?sfvrsn=32>
- [14] Thread cutting tools: Dies. In: *Thürmer* [online]. Denmark, b.r. [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: http://sw3826.smartweb-static.com/upload_dir/shop/foto-111.jpg

-
- [15] Thread cutting tools: Auxiliaries. In: *Thürmer* [online]. Denmark, b.r. [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: http://sw3826.smartweb-static.com/upload_dir/shop/foto-99.jpg
- [16] Katalog 27. In: *Narex* [online]. Ždánice, 2015 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: https://www.narexzd.cz/klientdata/downloads/catalogue_27.pdf
- [17] Přehled nástrojů CoroTap. In: *Sandvik Coromant* [online]. b.r. [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionImages/Products/CoroTap%20overview/CoroTap-overview.png>
- [18] Produktová příručka: Závitování. In: *Walter Tools* [online]. 2012 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/manuals/cs-cz/handbook-prototyp-threading-2012-cz.pdf>
- [19] Tips film: Selecting the right tap - Sandvik Coromant. In: *YouTube* [online]. 2013 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=glbeVukDDmQ>
- [20] ZHANG, Bi, Fulun YANG a Jiexin WANG. Fundamental aspects in vibration-assisted tapping. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2003, **132**(1-3), 345-352 [cit. 2018-04-16]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602009500>
- [21] KUO, Kei-Lin. Experimental investigation of ultrasonic vibration-assisted tapping. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2007, **192-193**, 306-311 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607004049>
- [22] TENG YUN, Cao a John SUTHERLAND. Investigation of thread tapping load characteristics through mechanistics modeling and experimentation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2002, **42**(14), 1527-1538 [cit. 2018-04-19]. ISSN 0890-6955. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695502001086>
- [23] WAN, Min, Ying-Chao MA, Jia FENG a Wei-Hong ZHANG. Mechanics of tapping process with emphasis on measurement of feed error and estimation of its induced indentation forces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2017, **114**, 8-20 [cit. 2018-04-15]. ISSN 0890-6955. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695516306125>
- [24] Thread forming vs cutting. In: *Balax* [online]. b.r. [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <http://balax.com/sites/default/files/Thread-Forming-vs-Cutting.pdf>
- [25] Výroba vnitřních závitů tvářením. *MM Spektrum* [online]. 2001, (4) [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-vnitrnich-zavitu-tvarenim.html>
-

-
- [26] Tvárnenie závitov: Základné geometrie, označenia. In: *EMUGE-FRANKEN* [online]. Katalóg EMUGE, b.r. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www.emuge.sk/sub/emuge.sk/images/katalogy/techinfo/TvarniaceZavitniky.pdf>
- [27] MATĚJČEK, Jan a Aleš KOUTNÝ. Bezpečné a efektivní závitování. *MM Spektrum* [online]. 2006, **2006**(9) [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/bezpecne-a-efektivni-zavitovani.html>
- [28] *Punch Tap* [online]. Lauf: Emuge-Franken, 2018 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://punchtap.com/en/home-de/>
- [29] NOVÁK, Zdeněk. Unikátní metoda výroby závitů tvářením. *MM Spektrum* [online]. 2015, **2015**(1) [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/unikatni-metoda-vyroby-zavitu-tvarenim.html>
- [30] Punch Tap – the Revolution in Thread Production. In: *Industry Arena* [online]. b.r. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://static.industryarena.com/files/news/images/a/1/8/5/1/ca39e4167cb6d3a9295cf66d00b5a4d4.jpg>
- [31] *Emuge Punch Tap: New Technology Helical-Thread Forming* [online]. In: . b.r. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.emuge.de/seafiler/f/dd0b4cc9397843a2bba2/>
- [32] FROMENTIN, G., A. BIERLA, C. MINFRAY a G. POULACHON. An experimental study on the effects of lubrication in form tapping. *Tribology International*. *Tribology International* [online]. 2010, **43**(9), 1726-1734 [cit. 2018-04-13]. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X10000952>
- [33] FERNÁNDEZ LANDETA, Javier, Asier FERNÁNDEZ VALDIVIELSO, Luis LACALLE, Franck GIROT a J. M. PÉREZ PÉREZ. Wear of Form Taps in Threading of Steel Cold Forged Parts. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. 2015, **137**(3), 11 [cit. 2018-03-30]. ISSN 1087-1357. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Luis_Lacalle/publication/273488730_Wear_of_Form_Taps_in_Threading_of_Steel_Cold_Forged_Parts/links/55858c4808aef58c039eddb9/Wear-of-Form-Taps-in-Threading-of-Steel-Cold-Forged-Parts.pdf
- [34] FROMENTIN, G., G. PAULACHON, A. MOISAN, B. JULIEN a J. GIESSLER. Precision and surface integrity of threads obtained by form tapping. *CIRP Annals: Manufacturing Technology* [online]. 2005, **54**(1), 519-522 [cit. 2018-04-13]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607601590>

-
- [35] BUSTILLO, Andres. Data-mining modeling for the prediction of wear on forming-taps in the threading of steel components. *Journal of Computational Design and Engineering* [online]. 2016, 3(4), 337-348 [cit. 2018-05-13]. ISSN 2288-4300. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2288430016300306>
- [36] DIETHARD, Thomas. Srovnání řezacích a tvářecích závitníků. *MM Spektrum* [online]. 2017, 2017(5) [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/srovnani-rezacich-a-tvarecich-zavitniku.html>
- [37] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [38] JULIŠ, Martin. *Nástrojové oceli*. (přednáška). Brno: Fakulta strojního inženýrství vysokého učení technického v Brně, 2016.
- [39] FREMUNT, Přemysl, Jiří KREJČÍK a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Nástrojové oceli*. Brno: Dům techniky, 1994.
- [40] Značení oceli. In: *Ferona* [online]. b.r. [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/layout/images/data/tab1.gif>
- [41] Značení oceli dle EN. *DDS Steel-Czech* [online]. b.r. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://www.dds-czech.cz/znacenidleeu.php>
- [42] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. 1. vydání. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [43] Sandvik Coromant - technická příručka: Materiály. In: *RPB s.r.o.* [online]. b.r. [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: http://www.rpb.cz/sites/default/files/catalogues/sandvik/MTG_H.pdf
- [44] BOUZAKIS, Konstantinos-Dionysios, Nikolaos MICHAILIDIS, Georgios SKORDARIS, Emmanouil BOUZAKIS, Dirk BIERMANN a Rachid M'SAOUBI. Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance. *CIRP Annals* [online]. 2012, 61(2), 703-723 [cit. 2018-04-24]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850612002053>
- [45] PÍŠKA, Miroslav. Trendy v PVD a CVD povlakování. *MM Spektrum* [online]. 2014, 2014(11) [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-pvd-a-cvd-povlakovani.html>
- [46] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část*. Brno, 2003. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Vysoké učení technické.
- [47] Magnetronové naprašování. In: *Fyzikální sekce Matematicko-fyzikální fakulty UK* [online]. 2014 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/povrch/xps/magnetron.gif>
-

-
- [48] ZINDULKA, Ondřej. Moderní metody povlakování nástrojů. *MM Spektrum* [online]. 2004, **2004**(10) [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-metody-povlakovani-nastroju.html>
- [49] Cathodic arc deposition (CAD). In: *Plasma Electronics* [online]. b.r. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: https://www.plasma-electronics.com/uploads/2/6/3/3/26330640/6968150_orig.jpg
- [50] SCHUELKE, Thomas, Thomas WITKE, Hans-Joachim SCHEIBE, Peter SIEMROTH, Bernd SCHULTRICH, Otmar ZIMMER a Jörg VETTER. Comparison of DC and AC arc thin film deposition techniques. *Surface and Coatings Technology* [online]. 1999, **120-121**, 226-232 [cit. 2018-04-26]. ISSN 0257-8972. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897299004806>
- [51] AZAR, Golnaz, Cagatay YELKARASI a Mustafa ÜRGEN. He role of droplets on the cavitation erosion damage of TiN coatings produced with cathodic arc physical vapor deposition. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2017, **322**, 211-217 [cit. 2018-04-26]. ISSN 0257-8972. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897217305297>
- [52] HELMERSSON, Ulf, Martina LATTEMANN, Johan BOHLMARK, Arutun EHIASARIAN a Jon GUDMUNDSSON. Ionized physical vapor deposition (IPVD): A review of technology and applications. *Thin Solid Films* [online]. 2006, **513**(1-2), 1-24 [cit. 2018-04-26]. ISSN 0040-6090. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609006004317>
- [53] SUCHÁNEK, Jan a Zuzana TATÍČKOVÁ. Otěruvzdorné povrchové vrstvy a povlaky. *Techmagazín* [online]. 2016 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/45782>
- [54] *Katalog GÜHRING: Síla závitování*. 1. Německo: Gühring s.r.o., 2016.
- [55] Rychlý průvodce. In: *Yamawa* [online]. 2017 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: http://www.yamawa.eu/wp-content/themes/yamawa/pdf/Quick-Guide-Yamawa_CZ.pdf
- [56] Hahnreiter - Povlaky závitníků. *ALBA precision* [online]. b.r. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://albaprecision.cz/cz/portal/produkty/hahnreiter/zavitniky/povlaky-zavitniku/>
- [57] HOLUBÁŘ, Pavel, Michal ŠÍMA a Ondřej ZINDULKA. Technologie úprav nástrojů před a po povlakování. *MM Spektrum* [online]. 2005, **2005**(9) [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-uprav-nastroju-pred-a-po-povlakovani.html>

-
- [58] BÁČOVÁ, Radka. Dokonalé povrchy řezných nástrojů. *MM Spektrum* [online]. 2017, **2017**(5) [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dokonale-povrchy-reznych-nastroju.html>
- [59] FIALA, Jaromír, Adolf BEBR a Zdeněk MATOŠKA. *Strojnické tabulky*. 2. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00457-8.
- [60] SteelNumber. *SteelNumber: Searchable database of steels and alloys* [online]. c2011-2018 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=100
- [61] Portálové obráběcí centrum MCV 1210. In: *TAJMAC-ZPS, a.s* [online]. Zlín: TAJMAC-ZPS, a.s, 2012 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.tajmac-zps.cz/sites/tajmac-zps-2.os.zps/files/images/mcv1210fa.jpg>
- [62] VRBOVSKÝ, Jiří, Emil NEČESÁNEK a Miroslav PÍŠKA. Schéma měření pomocí piezoelektrické soustavy Kistler. In: *MM Spektrum* [online]. 2008 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/multimedia/image/45/4535.jpg>
- [63] PÍŠKA, Miroslav a Petra SLIWKOVÁ. Surface Parameters, Tribological Tests and Cutting Performance of Coated HSS Taps. *Procedia Engineering* [online]. 2015, **100**, 125-134 [cit. 2018-04-22]. ISSN 1877-7058. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581500377X>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
3D	3 Dimensional
AC	Alternating Current
CNC	Computer Numerical Control
CVD	Chemical Vapour Deposition
ČSN	Česká Státní Norma
DC	Direct Current
DLC	Diamond Like Carbon
EDS	Energo disperzní spektrometr
HFCVD	Hot Filament CVD
HIP	High Isostatic Pressing
HSS	High Speed Steel
ISO	International Organization for Standardization
KNB	Kubický nitrid bóru
LCVD	Laser Induced CVD
LICVD	Laser Induced CVD
MLQ	Minimal Quantity Lubrication
MTCVD	Middle Temperature CVD
MWPCVD	MicroWave Plasma CVD
NB	Nitrid bóru
PACVD	Plasma Assisted CVD
PECVD	Plasma Enhanced CVD
PVD	Physical Vapour Deposition
ŘK	Řezná keramika
SK	Slinuté karbidy
VBD	Vyměnitelná břitová destička

Značka	Jednotka	Popis
A_D	$[mm^2]$	průřez nedeformované třísky.
D	$[mm]$	velký průměr matice
D_1	$[mm]$	malý průměr matice
D_2	$[mm]$	střední průměr matice
$F(t)$	$[N]$	výsledná celková síla
$F_{A,ij}(t)$	$[N]$	axiální složka síly
$F_c(t)$	$[N]$	řezná síla

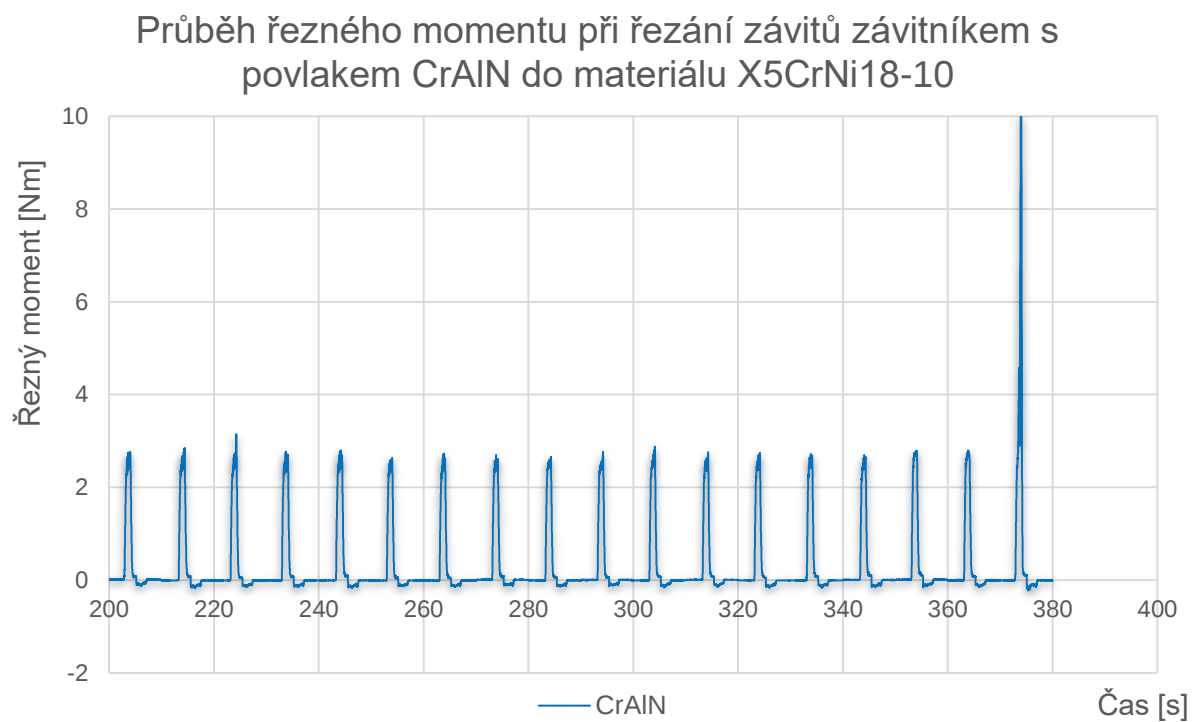
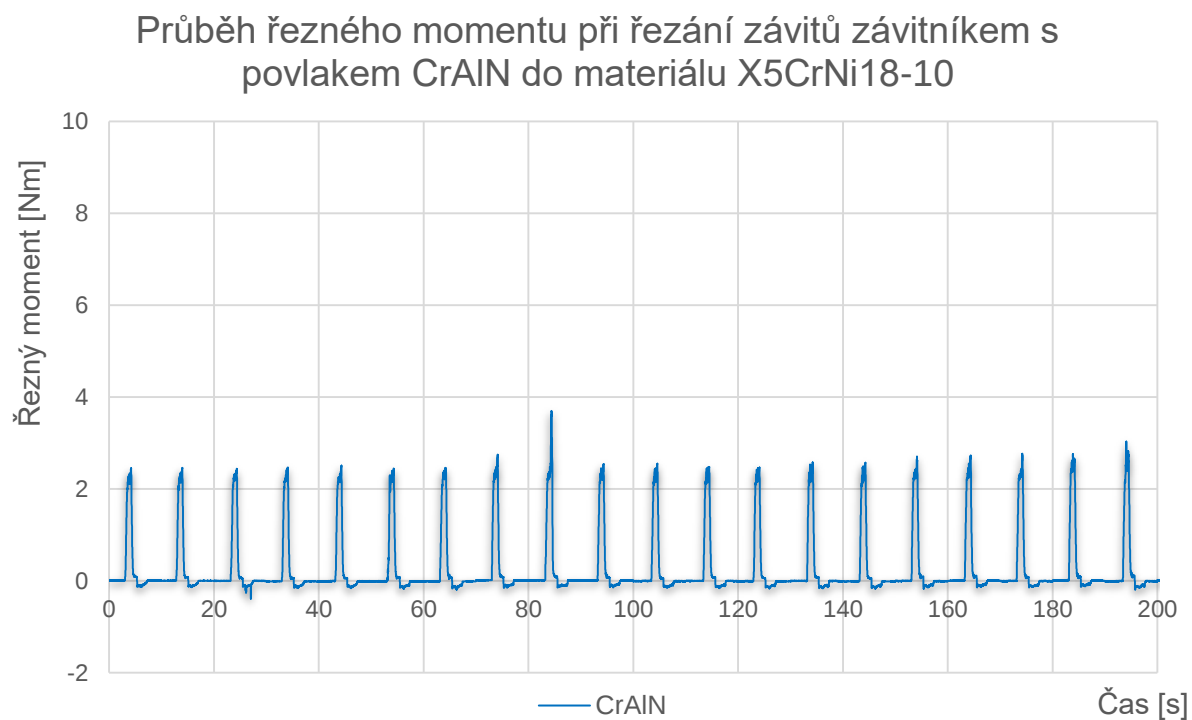
Značka	Jednotka	Popis
$F_f(t)$	[N]	posuvová síla
$F_p(t)$	[N]	pasivní síla
$F_{R,ij}(t)$	[N]	radiální složka síly
$F_{T,ij}(t)$	[N]	tečná složka síly
H	[mm]	výška základního trojúhelníku
K_A	[MPa]	řezný koeficient A (odpor)
K_R	[MPa]	řezný koeficient R (odpor)
K_T	[MPa]	řezný koeficient T (odpor)
M_c	[Nm]	řezný moment
N	[-]	počet elementárních disků,
N_t	[-]	počet zubů na každém elementárním disku
P	[mm]	rozteč závitu
P_h	[mm]	stoupání
T	[s]	perioda jedné otáčky
$a_{e,ij}(t)$	[mm]	šířka záběru ostří, definována jako radiální vzdálenost mezi ostřím aktuálním a předchozím
d	[mm]	velký průměr šroubu
d_1	[mm]	malý průměr šroubu
d_2	[mm]	střední průměr šroubu
dz	[mm]	tloušťka diskového elementu
f	[mm]	posuv
$h_{ij}(t)$	[mm]	tloušťka nedeformované třísky
k_c	[MPa]	měrná řezná síla
n	[min ⁻¹]	otáčky
n_p	[-]	počet diskových elementů mezi aktuálním a předchozím zubem
$r_{0,i}$	[mm]	poloměr čela závitníku
v_c	[m·min ⁻¹]	řezná rychlost
v_f	[mm·min ⁻¹]	posuvová rychlost
v_t	[m·min ⁻¹]	tvářecí rychlost
z_L	[mm]	axiální vzdálenost bodu L a čelem závitníku
z_U	[mm]	axiální vzdálenost bodu U a čelem závitníku
α	[°]	úhel profilu
κ_c	[rad]	úhel nastavení hlavního ostří
κ_{ij}	[rad]	úhel nastavení ostří j-tého disku i-tého zubu
λ	[°]	úhel stoupání šroubovice

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1.....	Průběh řezného momentu u závitníku s povlakem CrAlN
Příloha 2.....	Průběhy řezných momentů u závitníků s povlaky AlTiN a TiN
Příloha 3.....	Průběh řezného momentu u závitníku s povlakem TiCN
Příloha 4.....	Fotografie závitníků s povlakem CrAlN a TiN
Příloha 5.....	Fotografie závitníku s povlakem AlTiN
Příloha 6.....	Fotografie závitníku s povlakem TiCN

PŘÍLOHA 1

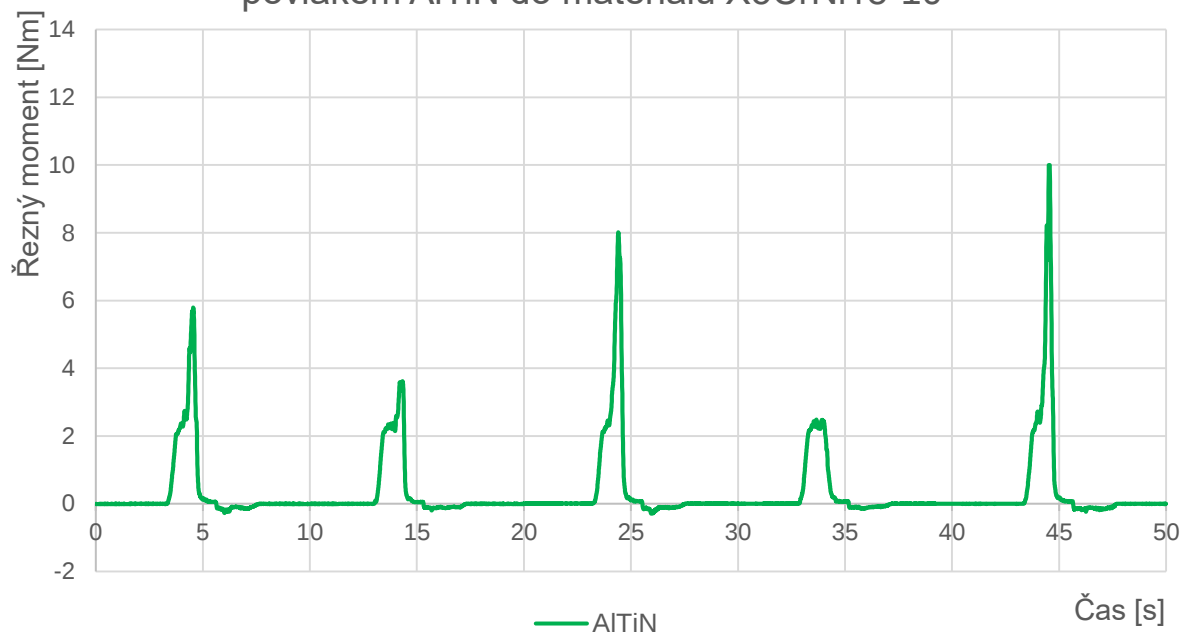
Průběh řezného momentu u závitníku s povlakem CrAlN



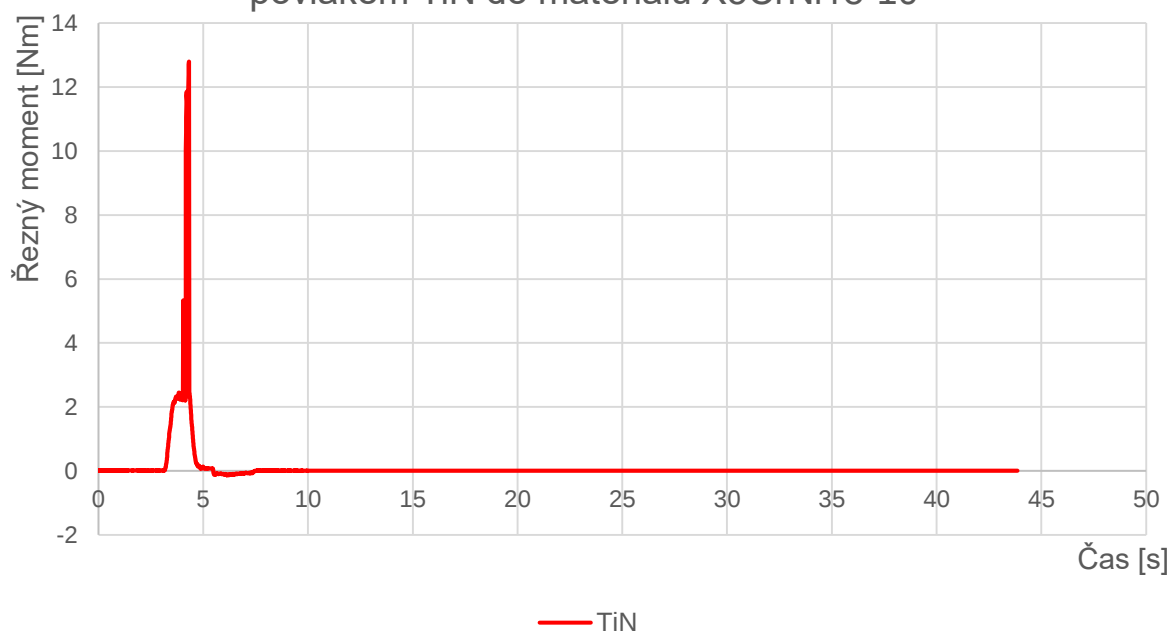
PŘÍLOHA 2

Průběhy řezných momentů u závitníků s povlaky AlTiN a TiN

Průběh řezného momentu při řezání závitů závitníkem s povlakem AlTiN do materiálu X5CrNi18-10

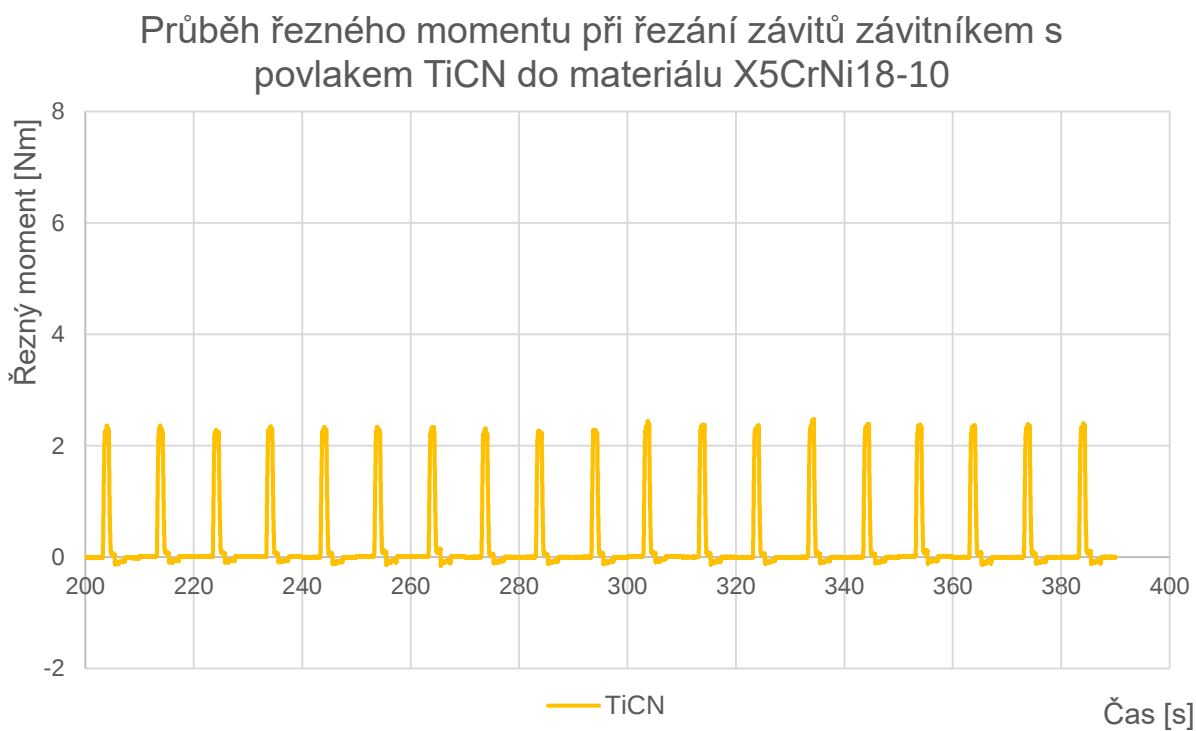
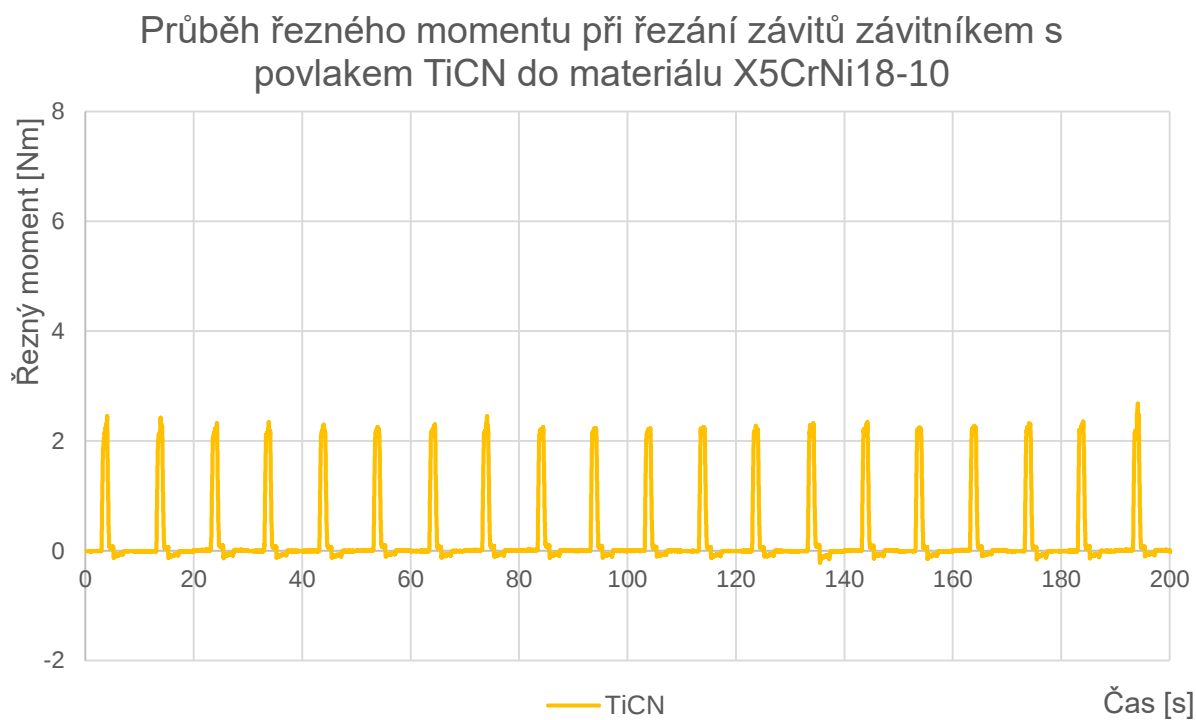


Průběh řezného momentu při řezání závitů závitníkem s povlakem TiN do materiálu X5CrNi18-10



PŘÍLOHA 3

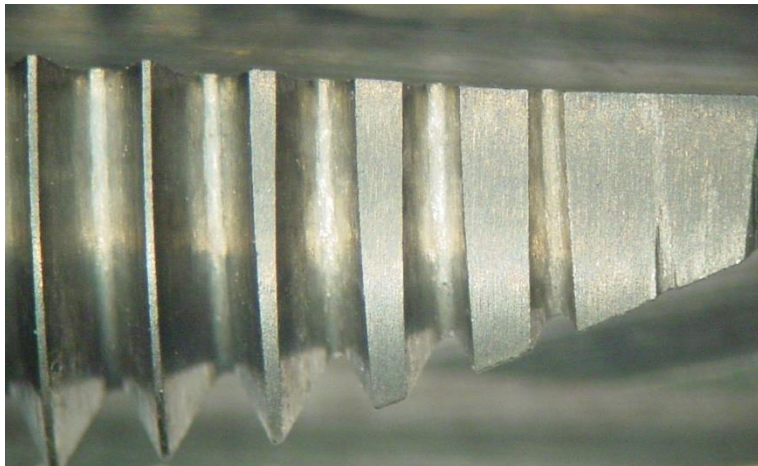
Průběh řezného momentu u závitníku s povlakem TiCN



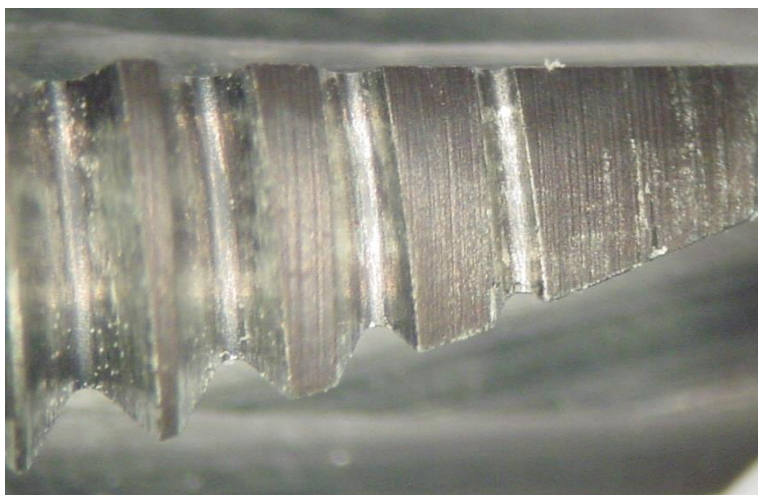
PŘÍLOHA 4

Fotografie závitníků s povlakem CrAlN a TiN

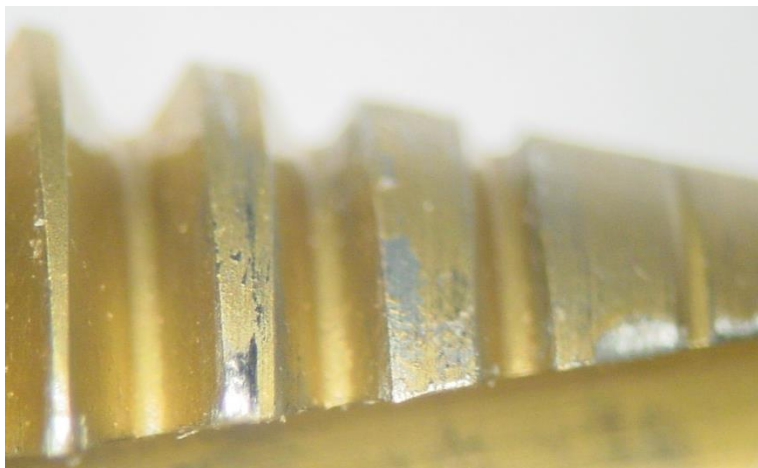
Detail závitníku s povlakem CrAlN před experimentem



Detail závitníku s povlakem CrAlN po experimentu



Detail závitníku s povlakem TiN po experimentu



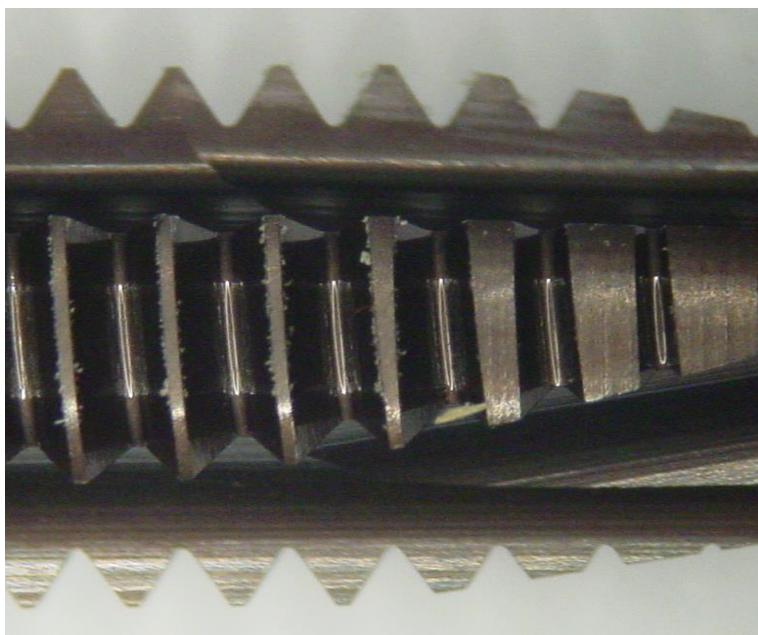
PŘÍLOHA 5

Fotografie závitníku s povlakem AlTiN

Detail závitníku s povlakem AlTiN před experimentem



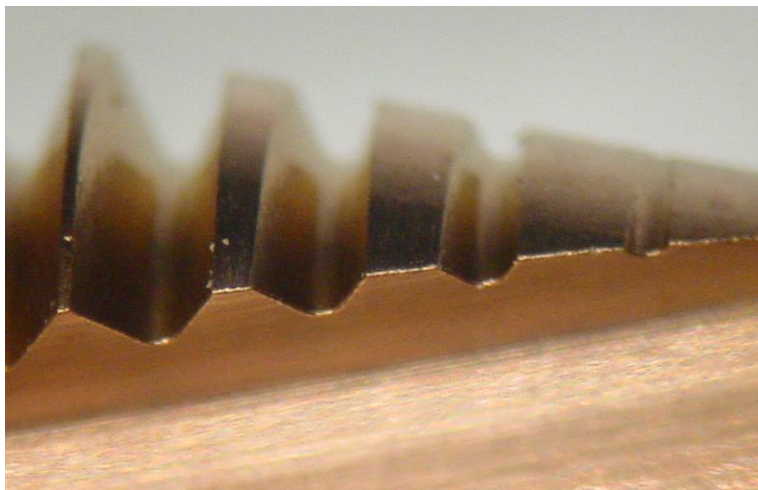
Detail závitníku s povlakem AlTiN po experimentu



PŘÍLOHA 6

Fotografie závitníku s povlakem TiCN

Detail závitníku s povlakem TiCN před experimentem



Detail závitníku s povlakem TiCN po experimentu

