VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

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

ANALÝZA ŘEZNÝCH SIL PŘI ŘEZÁNÍ ZÁVITŮ

CUTTING FORCE ANALYSIS WHEN TAPPING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Bc. MICHAL ŠTOKMAN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2014

Místo tohoto listu bude vloženo zadání (oboustranně). Zadání musí být vevázáno v obou vyhotoveních práce. Do druhého výtisku bude vložena kopie.

Tento list není třeba tisknut!

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou silového zatížení při řezání závitů. Práce zahrnuje základní metody výroby závitů, fyzikální podstatu řezného procesu, PVD povlaky, nástrojové materiály, analýzu a vyhodnocení testovaných maticových závitníků s aplikací PVD povlaků.

Klíčová slova

maticový závitník, řezný proces, PVD, povlakování, analýza

ABSTRACT

This master‘s thesis deals with cutting force analysis when tapping. This thesis includes basic methods of manufacture of threads, physical fundamentals of the cutting process, PVD coatings, tool materials, analysis and assessment of the testing nut taps with the application of PVD coatings.

Key words

nut taps, cutting proces, PVD, coating, analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠTOKMAN, M. *Analýza řezných sil při řezání závitů.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 77 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Analýza řezných sil při řezání závitů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Michal Štokman

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu po dobu celého studia.

OBSAH

ABSTRAKT 4
PROHLÁŠENÍ 5
PODĚKOVÁNÍ 6
OBSAH 7
ÚVOD 9
1 Analytický rozbor úlohy 10
1.1 Fyzikální základy procesu řezání 10
1.1.1 Charakteristika vzniku a tvoření třísky 10
1.1.2 Plastická deformace a její oblasti 11
1.1.3 Kinematické veličiny řezného procesu 12
1.1.4 Řezné síly 13
1.1.5 Energetická rovnováha řezného procesu 15
1.1.6 Zdroje tepla a teplota 15
1.1.7 Typy opotřebení nástroje 18
1.2 Základní metody výroby závitů 23
1.2.1 Soustružení závitů 24
1.2.2 Frézování závitů 25
1.2.3 Řezání závitů pomocí závitníků 29
1.2.4 Řezání závitů závitovými čelistmi 32
1.3 Materiály řezného nástroje 33
1.3.1 Rychlořezné oceli 33
1.3.2 Slinuté karbidy 36
1.3.3 Řezná keramika 37
1.3.4 Syntetický diamant 40
1.3.5 Nitrid boru 40
1.4 Metody povlakování 41
1.4.1 Metoda PVD 42
1.4.1.1 Naprašování 42
1.4.1.2 Napařování 44
1.4.1.3 Iontová implantace 45
1.4.2 Vlastnosti povlakovaných vrstev 45
2 Experimentální část 49
2.1 Obráběný materiál 49
2.2 Řezné podmínky 49

2.3 Řezné nástroje 50
2.4 Obráběcí stroj a upnutí nástroje 51
2.5 Způsob měření silového zatížení nástroje 51
2.6 Hodnocení teoretického řezného momentu 52
2.7 Schématické znázornění krouticího momentu při řezání závitu 55
3 Statistický rozbor výsledků 56
3.1 Analýza řezného momentu a statistické vyhodnocení 56
3.2 Analýza zpětného chodu nástroje 58
4 Závěr 60
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 62
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 65
SEZNAM PŘÍLOH 68

ÚVOD

Řezání závitů je základní metodou pro výrobu závitů ve strojírenství. Jednou z nejrozšířenějších metod pro výrobu závitů je řezání pomocí maticových závitníků. Tyto nástroje slouží k výrobě vnitřních závitů do předvrtaných děr. Závitníky jsou vyráběny z nástrojové oceli, přičemž nejrozšířenější jsou nástroje z rychlořezné oceli označované jako HSS, HSSE, atd.

V současné době dochází k rozvoji vysokorychlostního obrábění, což má za následek zvýšení nároků nejen na řezný nástroj, ale i na stroj. Vysoká produktivita a snižování nákladů při zachování kvality jsou hlavními aspekty současné výroby závitů. Jelikož vývoj a použití nových nástrojových materiálů je velice nákladné, dochází v současné době k rozvoji nástrojů povlakovaných. Technologie povlakování nástrojů jsou rozděleny do dvou základních skupin na metody Physical Vapour Deposition (PVD) a Chemical Vapour Deposition (CVD). Rozšířenější metodou povlakování řezných nástrojů je metoda PVD, jelikož celý proces probíhá za nižších teplot, nedochází k tepelnému ovlivnění struktury materiálu a je možné povlakovat ostré hrany nástroje, které by metodou CVD nebylo možno kvalitně provést. Takto povlakované nástroje vykazují lepší mechanické vlastnosti, životnost nástroje, zvýšení kvality obrobených ploch, zvyšování řezné rychlosti, snižování energetické náročnosti a další.

Vývoj povlaků je stále zdokonalován, což přináší každoročně na trh nové druhy povlaků, které rozšiřují oblasti použití. Pro zdokonalování a optimalizaci řezného procesu je nutné tento vývoj neustále sledovat.

Obr. 1.1 Příklady povlakovaných řezných nástrojů

1 ANALYTICKÝ ROZBOR ÚLOHY

1.1 Fyzikální základy procesu řezání

Při procesu řezání nástroj působí na obrobek. Podle nastavení ostří vzhledem ke směru řezného pohybu můžeme proces řezání realizovat jako ortogonální nebo obecné řezání. Ortogonální řezání je typické pro protahování, frézování a zapichování. Podélné soustružení nebo vrtání jsou typickými příklady obecného řezání. Teoretické a experimentální studie pro krystalické materiály jsou využívajívány v případě ortogonálního řezání.

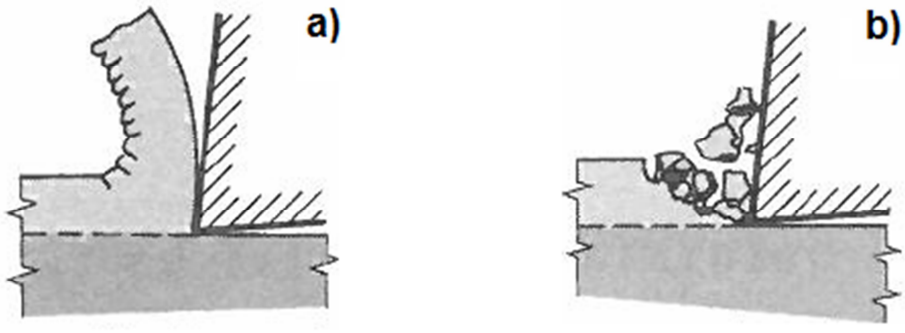
1.1.1 Charakteristika vzniku a tvoření třísky

Proces oddělování třísky je složitým procesem, který závisí především na materiálové charakteristice obráběného materiálu a její závislosti na podmínkách plastické deformace. Tyto plastické deformace při řezání probíhají při vysokých rychlostech, řádově 10^3 až 10^5 s^{-1}. Dalšími charakteristikami doprovázející tento proces jsou vysoká lokální smyková napětí v místě řezu a vysoký počet parametrů nástroje, které mohou ovlivnit celkový proces [1,2,3].

Tříska vzniká oddělením deformované vrstvy materiálu od obrobku. Při procesu řezání se utváří a následně oddělují různé typy třísek. V závislosti dosaženého tečného napětí τ a normálového napětí σ vznikají třísky trhané nebo stříhané.

Stříhaná (obr. 1.2a) - tečná napětí převyšují normálová napětí. Materiál je plasticky tvářen a následně se odděluje. Stříhaná tříska je typická pro oceli, litiny, slitiny mědi a houževnaté materiály [1].

Trhaná (obr. 1.2b) - v případě trhané třísky normálová napětí převyšují tečná napětí. Vzniká při obrábění tvrdých a křehkých materiálů, kdy materiál není tvářen, ale je odtržen ve formě úlomků, šupin, elementů apod. Vzniká tak méně kvalitní povrch. Typické pro sklo, dřevo a plasty [1].



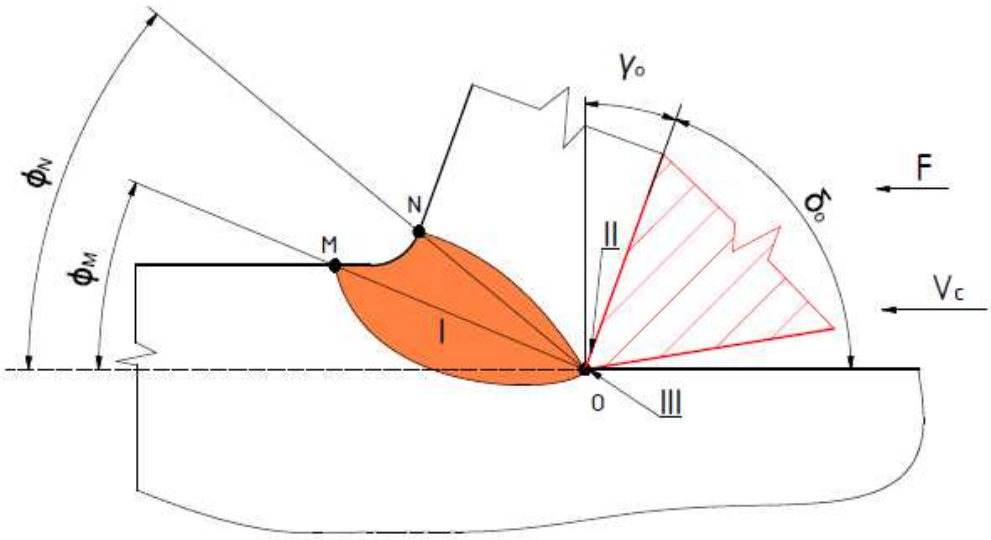
Obr. 1.2 Oddělování třísek [3].
a) stříhaná, b) trhaná

Tvarování a lámání třísek má vliv na bezpečnost a kvalitu celého procesu především u CNC obráběcích strojů. Dlouhá plynulá tříska se namotává na nástroj a zvyšuje tak riziko poškození nástroje a snižuje kvalitu obrobeného povrchu. Pro zajištění efektivity výroby je tvar a způsob odvodu třísek velmi důležitý [23].

1.1.2 Plastická deformace a její oblasti

Při procesu řezání dochází vlivem vnikání nástroje do materiálu k pružným a následně k plastickým deformacím. Smyková napětí rostou, dokud nedojde k plastické deformaci materiálu v oblasti mezi břitem nástroje a obrobkem. Plastická deformace roste, materiál je pěchován v kolmém směru ke kluzným rovinám a končí při oddělení třísky [1].

Tyto pružné a plastické deformace vznikají ve třech oblastech (obr. 1.3).



Obr. 1.3 Oblasti plastických deformací v odřezávané vrstvě

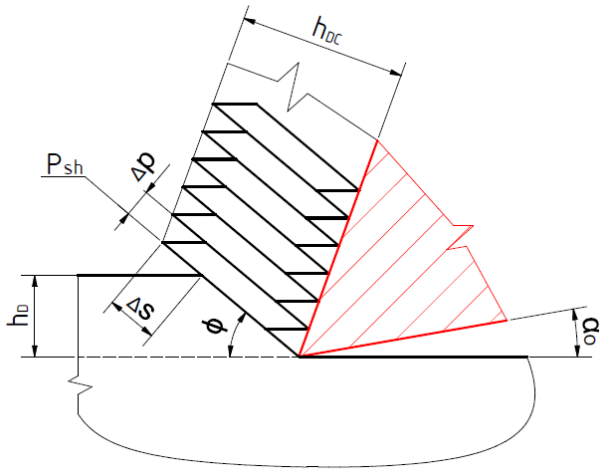
I. Oblast primární plastické deformace

Charakteristickou oblastí primární plastické deformace je oblast ohraničená body MNO (obr. 1.3). Tvar a velikost této oblasti závisí na fyzikálních vlastnostech odebíraného materiálu. Jedná se zejména o deformační a zpevňovací schopnosti obráběného materiálu. Tato oblast může být také značně ovlivněna řeznou rychlostí v_c, posuvovou rychlostí v_f, nástrojovým ortogonálním úhlem řezu δ_o a nástrojovým ortogonálním úhlem čela γ_o [2,4].

Zvyšováním řezné rychlosti se oblast primární plastické deformace zužuje. Zejména při HSC obrábění je tato oblast tak malá, že oddělení třísky vzniká plastickým skluzem v rovině střihu P_{sh} (obr. 1.4).

II. Oblast sekundární plastické deformace

Sekundární plastická deformace se vyskytuje v oblasti styku třísky a čela řezného nástroje. V této oblasti také dochází k opotřebení řezného nástroje na čele. Vlivem tření mezi třískou a čelem nástroje dochází nejen k opotřebení řezného nástroje, ale také dochází k vývinu tepla [1,4].



h_D - jmenovitá tloušťka řezu
h_{Dc} - tloušťka třísky
P_{sh} - rovina střihu
ϕ - úhel roviny střihu
Δp - tloušťka elementu třísky
Δs - posunutí elementu třísky

Obr. 1.4 Zjednodušený model tvorby elementů třísky

III. Oblast terciální plastické deformace

Vlivem plastické deformace v oblasti III dochází k opotřebení řezného nástroje na hřbetu. Dochází ke tření mezi řezným nástrojem a obrobenou plochou [1,3].

1.1.3 Kinematické veličiny řezného procesu

Řezný proces je charakterizován celou řadou technologických veličin. Jednou z těchto technologických veličin jsou veličiny kinematické a dynamické. Kinematické veličiny doprovázející proces řezání jsou řezná rychlost v_c, posuvová rychlost v_f a rychlost řezného procesu [1].

Pro výpočet řezné rychlosti platí vztah:

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

D [mm] - průměr nástroje,
n [min^{-1}] - otáčky.

Pro výpočet posuvové rychlosti platí vztah:

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} \quad [\mathrm{m \cdot min^{-1}}] \tag{1.2}$$

f [mm] - posuv na otáčku,
n [min^{-1}] - otáčky.

Pro výpočet rychlosti řezného pohybu platí vztah:

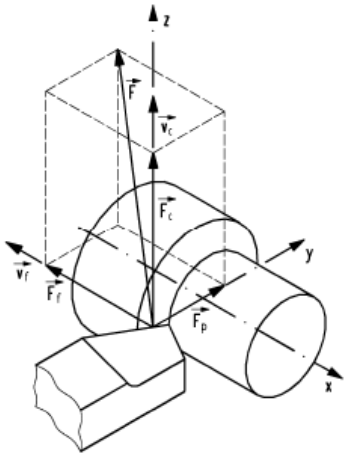
$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad [\mathrm{m \cdot min^{-1}}] \tag{1.3}$$

v_c [m·min^{-1}] - řezná rychlost,

v_f [m·min^{-1}] - posuvová rychlost.

1.1.4 Řezné síly

Při vzájemné interakci nástroje a obrobku dochází k silovému zatížení celé soustavy. Působením řezné části nástroje vůči obrobku dochází k vyvolání celkové řezné síle. Tato síla je rozložena do třech směrů. Při obrábění jedním břitem je možno celkovou řeznou sílu rozložit na sílu posuvovou F_f, pasivní F_p a řeznou F_c.



Obr. 1.5 Jednotlivé složky výsledné řezné síly

Pro výpočet jednotlivých sil slouží empirické vztahy. Velikost jednotlivých složek sil je ovlivněna zejména obráběným materiálem (vyjádřeno pomocí konstanty C_F), šířkou záběru a_p a nejméně jsou ovlivněny řeznou rychlostí v_c. Konstanty C_{Fc}, C_{Fc}, C_{Fc} a exponenty x_{Fc}, x_{Fc}, x_{Fc} jsou pro dané podmínky řezání stanoveny empiricky [1,2].

Pro výpočet řezné síly platí vztah:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad [\mathrm{N}] \tag{1.4}$$

a_p [mm] - šířka záběru ostří,

f [mm] - posuv na otáčku,

C_{Fc} [-] - konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu,

x_{Fc} [-] - exponent, vyjadřující vliv šířky záběru ostří,

y_{Fc} [-] - exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku.

Řeznou sílu lze také určit pomocí měrné řezné síly k_c. Hodnota měrné řezné síly se výrazně mění v závislosti na obráběném materiálu. Hodnotu k_c lze nalézt v odborné literatuře a její hodnoty jsou různé podle typu řezného procesu.

Pro výpočet řezné síly na základě známé měrné řezné síly platí vztah:

$$F_c = k_c \cdot A_D \quad [\mathrm{N}] \tag{1.5}$$

k_c [MPa] - měrná řezná síla,
A_D [mm^2] - jmenovitá plocha řezu.

Pro výpočet pasivní síly platí vztah:

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad [\mathrm{N}] \tag{1.6}$$

a_p [mm] - šířka záběru ostří,
f [min] - posuv na otáčku,
C_{Fp} [-] - konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu,
x_{Fp} [-] - exponent, vyjadřující vliv šířky záběru ostří,
y_{Fp} [-] - exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku.

Pro výpočet posuvové síly platí vztah:

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad [\mathrm{N}] \tag{1.7}$$

a_p [mm] - šířka záběru ostří,
f [min^{-1}] - posuv na otáčku,
C_{Ff} [-] - konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu,
x_{Ff} [-] - exponent, vyjadřující vliv šířky záběru ostří,
y_{Ff} [-] - exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku.

Pro výpočet celkové řezné síly platí vztah:

$$F_e = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad [\mathrm{N}] \tag{1.8}$$

1.1.5 Energetická rovnováha řezného procesu

Řezný proces je souhrn mnoha veličin, které celý proces výrazně ovlivňují. Mezi tyto veličiny patří řezné síly, práce, výkon, teplo a teplota řezání. Hlavním předpokladem souvislého průběhu procesu řezání je energetická rovnováha mezi energií spotřebovanou na řezný proces a energií dodanou strojem [1,2,4].

Celková práce řezání je dána rovnicí:

$$A = A_e + A_p + A_{tč} + A_{th} + A_d \quad [\mathrm{J}] \tag{1.9}$$

A_e [J] - práce pružné deformace v oblasti tvoření třísky (max. 2%),

A_p [J] - práce plastické deformace v oblasti tvoření třísky (40 až 80%),

$A_{tč}$ [J] - práce tření odcházející třísky (10 až 30%),

A_{th} [J] - práce tření na hřbetě nástroje (5 až 20%),

A_d [J] - práce disperzní (max. 1%).

Práce řezání potřebná pro zajištění hlavního řezného pohybu:

$$A_c = \int_0^t F_c \cdot v_c \cdot dt \quad [\mathrm{J}] \tag{1.10}$$

Práce na zajištění posuvového pohybu:

$$A_f = \int_0^t F_f \cdot v_f \cdot dt \quad [\mathrm{J}] \tag{1.11}$$

1.1.6 Zdroje tepla a teplota

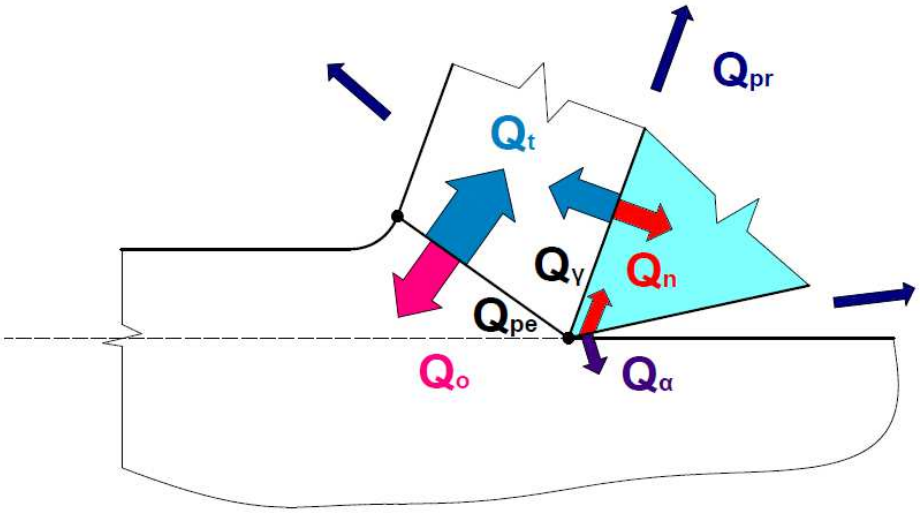
Během řezného procesu dochází k přeměně mechanické práce na teplo. Téměř veškerá vynaložená mechanická energie se transformuje na teplo. Při obrábění je to přibližně 98% mechanické energie, která se přemění v teplo.

Množství vzniklého tepla závisí na [1,3]:

- typu a vlastnostech obráběného materiálu,
- řezných podmínkách, především na řezné rychlosti v_c,
- technologii obrábění,
- materiálu nástroje,
- geometrii nástroje,
- způsobu chlazení.

Teplo při procesu řezání vzniká ve třech oblastech (viz obr. 1.6) [1]:

- v oblasti primární plastické deformace (cca 75% celkového vzniklého tepla),
- v oblasti sekundární plastické deformace na ploše mezi čelem nástroje a odcházející třískou (cca 22%),
- na styčné ploše mezi hřbetem nástroje a plochou obrobku (cca 3%).



Obr. 1.6 Vznik a odvod tepla při řezání

Hlavní zdroje tepla jsou popsány rovnicí:

$$Q = Q_{pe} + Q_{\gamma} + Q_{\alpha} \quad [J] \tag{1.12}$$

Q_{pe} [J] - teplo vzniklé v oblasti plastických deformací při tvoření třísky,

Q_{γ} [J] - teplo vzniklé v oblasti sekundární plastické deformace,

Q_{α} [J] - teplo vzniklé v oblasti mezi hřbetem nástroje a plochou obrobku.

Odvod vzniklého tepla do jednotlivých prvků soustavy:

$$Q = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr} \quad [J] \tag{1.13}$$

Q_t [J] - teplo odvedené třískou,

Q_o [J] - teplo odvedené obrobkem,

Q_n [J] - teplo odvedené nástrojem,

Q_{pr} [J] - teplo odvedené prostředím.

Spojením rovnice zdrojů tepla při řezání (1.12) a rovnice odvodu tepla do jednotlivých prvků soustavy (1.13) dostaneme rovnici tepelné bilance řezného procesu:

$$Q_{pe} + Q_{\gamma} + Q_{\alpha} = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr} \quad [\mathrm{J}] \tag{1.14}$$

Rovnice tepelné bilance řezného procesu udává rovnost mezi množstvím tepla odvedeného a tepla přivedeného do daného místa v daném časovém intervalu.

Většina tepla vzniklého při řezání je v ideálním případě z místa řezu odváděna třískou. Teplotní zatížení nástroje od třísky je pouze po dobu kontaktu třísky s čelem nástroje. Úhel čela výrazně ovlivňuje množství odvedeného tepla do obrobku. Malý úhel čela zvyšuje odvod tepla do obrobku. Teplo vznikající v oblasti mezi hřbetem nástroje a povrchem obrobku by mělo být co nejmenší. Při vysokém tepelném zatížení v této oblasti dochází k výraznému opotřebení hřbetu a vysoké teploty mají za následek rychlý lom břitu. Dostatečně velký úhel hřbetu minimalizuje tytu nežádoucí jevy při obrábění [1,3,4].

V současné době při používání moderních břitových destiček lze řezný proces optimalizovat tak, aby přechod tepla do nástroje byl minimální.

Vzniklé teplo má negativní vliv na řezný proces a řezný nástroj [4]:

- způsobuje degradaci řezného nástroje,
- ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- ovlivňuje kvalitu obrobené plochy,
- mění podmínky tření na hřbetě a čele nástroje.

1.1.7 Typy opotřebení nástroje

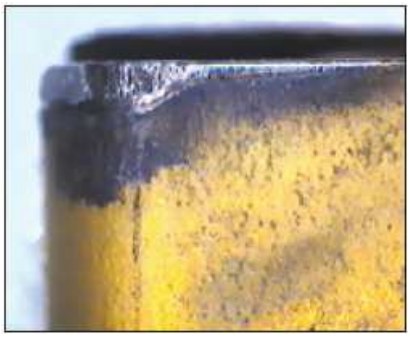
Při obrábění dochází ke vzniku velkého množství tepla, které značně namáhá materiál nástroje. Utváření třísky probíhá za vysokých teplot a tlaku, což má za následek vysoké namáhání nástroje. Za takovým podmínek může také docházek k chemickým reakcím nebo difuzním procesům. Zatěžování nástroje se projevuje jeho opotřebením, které vzniká na základě působení fyzikálních, mechanických, chemických a fyzikálně-chemických procesů [1,6].

Základní mechanismy opotřebení:

- abrazivní otěr,
- difuzní otěr,
- oxidace,
- křehký lom,
- adhezní otěr.

Faktory určující typ opotřebení jsou mechanické a chemické vlastnosti obráběného materiálu, řezná rychlost, teplota a materiálové vlastnosti nástroje. Na základě těchto faktorů lze opotřebení nástroje rozdělit do následujících skupin.

Opotřebení hřbetu

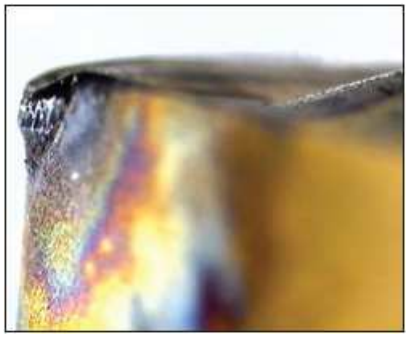


Obr. 1.7 Opotřebení na hřbetu [6].

Tab. 1.1 Charakteristika opotřebení nástroje - opotřebení na hřbetu [5,6].

Důvod	Vliv	Řešení
Příliš vysoká řezná rychlost, nedostatečná odolnost nástroje proti otěru	Velké tření, špatná drsnost povrchu, nedodržení geometrických tolerancí, vývin tepla, nadměrná hlučnost	Snížení řezné rychlosti, použití povlakovaného nástroje a použití účinnější procesní kapaliny

Plastická deformace



Obr. 1.8 Plastická deformace [6].

Tab. 1.2 Charakteristika opotřebení nástroje - plastická deformace [5,6].

Důvod	Vliv	Řešení
Vysoká teplota a tlak v místě řezu, kritické zatížení nástroje, vysoká řezná rychlost, vysoká tvrdost materiálu obrobku	Špatná kontrola odvodu třísky, zhoršená kvalita povrchu, zničení nástroje	Použití nástroje s větší tuhostí, snížení řezné rychlosti a posuvu

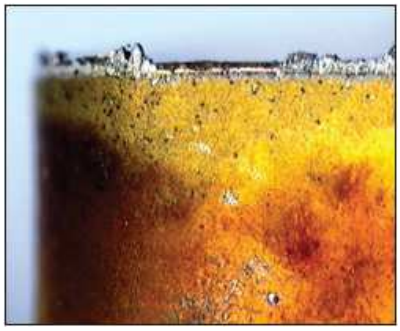
Kráterové opotřebení

Obr. 1.9 Výmol na čele [6].

Tab. 1.3 Charakteristika opotřebení nástroje - výmol na čele [5,6].

Důvod	Vliv	Řešení
Příliš vysoká teplota na řezné hraně nástroje, dochází k difuzi	Zeslabení břitu nástroje, zhoršení kvality povrchu	Snížení řezné rychlosti a posuvu, použití povlakovaného nástroje, použít procesní kapaliny, snížení úhlu nastavení ostří

Nárůstek

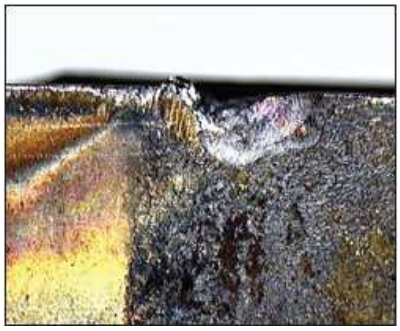


Obr. 1.10 Nárůstek [6].

Tab. 1.4 Charakteristika opotřebení nástroje - nárůstek [5,6].

Důvod	Vliv	Řešení
Vysoký tlak a teplota v místě řezu	Poškozování břitu nástroje, zhoršení kvality povrchu, riziko vzniku chvění nástroje	Zvýšení řezné rychlosti nebo posuvu, použití povlakovaného nástroje, použití vhodné procesní kapaliny

Vrubové opotřebení

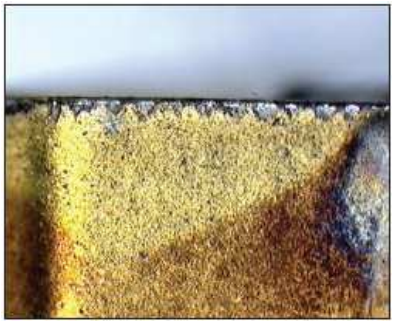


Obr. 1.11 Vrubové opotřebení [6].

Tab. 1.5 Charakteristika opotřebení nástroje - vrubové opotřebení [5,6].

Důvod	Vliv	Řešení
Oxidace, velké tření, tvrdé částice v materiálu obrobku	Dochází k vylamování břitu nástroje, zhoršení kvality povrchu	Snížení řezné rychlosti nebo použití povlakovaného nástroje

Vydrolování ostří

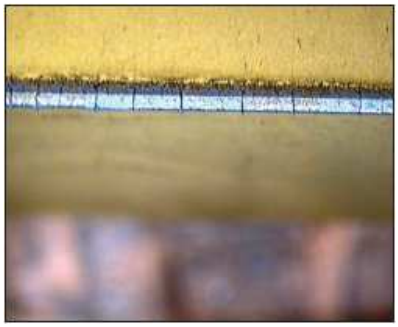


Obr. 1.12 Vydrolování ostří [6].

Tab. 1.6 Charakteristika opotřebení nástroje - vydrolování ostří [5,6].

Důvod	Vliv	Řešení
Vibrace obrobku, nástroje nebo vřetena stroje, přerušovaný řez, tvrdé částice v materiálu obrobku	Zeslabení břitu nástroje, zhoršení kvality povrchu	Zajištění nejvyšší možné tuhosti soustavy, zvolení pevnějšího nástroje, snížení posuvu nebo zvýšení řezné rychlosti

Tepelné trhliny na ostří

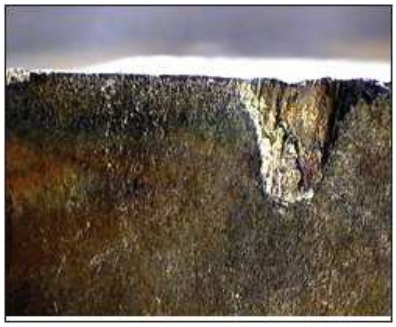


Obr. 1.13 Tepelné trhliny [6].

Tab. 1.7 Charakteristika opotřebení nástroje - tepelné trhliny na ostří [5,6].

Důvod	Vliv	Řešení
Vibrace obrobku, nástroje nebo vřetena stroje, přerušovaný řez, tvrdé částice v materiálu obrobku	Trhliny v břitu nástroje, následně může dojít k vylamování částic nástrojového materiálu a způsobit vylomení břitu	Použití houževnatějšího nástroje, kvalitnější procesní kapaliny, snížení posuvu a řezné rychlosti, použití jiné technologie

Vylamování ostří



Obr. 1.14 Vylamování ostří [6].

Tab. 1.8 Charakteristika opotřebení nástroje - vylamování ostří [5,6].

Důvod	Vliv	Řešení
Příliš velký posuv a velká hloubky řezu	Zhoršení jakosti povrchu, poškození ostří nástroje	Použití houževnatějšího nástroje, zvolení jiného úhlu nastavení ostří, změnit posuv nebo šířku záběru ostří

Totální lom

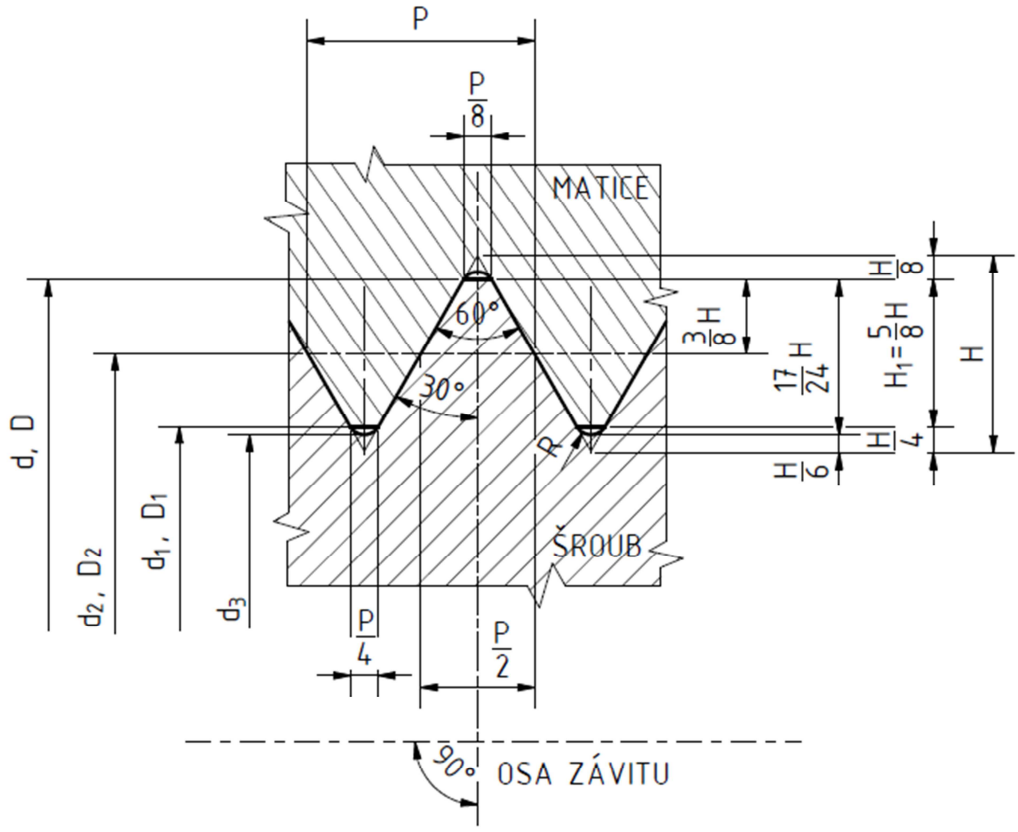
Obr. 1.15 Totální lom [6].

Tab. 1.9 Charakteristika opotřebení nástroje - totální lom [5,6].

Důvod	Degradace	Řešení
Příliš velké mechanické zatížení nástroje	Zlomení nástroje, poškození obrobku	Snížení posuvu nebo řezné rychlosti, kontrola materiálu obrobku na přítomnost tvrdých vměstků, použití houževnatějšího nástroje

1.2 Základní metody výroby závitů

Závity představují významné konstrukční a technologické prvky ve strojírenství. Řezání závitů je nejrozšířenějším způsobem výroby závitů. V praxi se využívá pro výrobu závitů především CNC strojů a to z důvodu větší kvality a produktivnosti výroby. Pro závity s menšími požadavky na přesnost a kvalitu se používají ruční závitníky. Řezání závitů se dělí podle použitého nástroje, ale také podle technologie výroby na soustružení, frézování a řezání závitů závitořeznými nástroji. Každá tato technologie má svá omezení a výhody proti ostatním technologiím. Mezi nejpoužívanější typ závitu patří metrický závit (obr. 1.16).



Obr. 1.16 Základní profil metrického závitu [7].

P - rozteč závitu,

H - výška základního trojúhelníku,

H_1 - nosná hloubka profilu závitu,

d - jmenovitý průměr závitu,

R - poloměr zaoblení závitového dna a hřbetu,

d_1 - průměr vnějšího závitu,

D_1 - průměr vnitřního závitu,

d_2 - střední průměr vnějšího závitu,

D_2 - střední průměr vnitřního závitu.

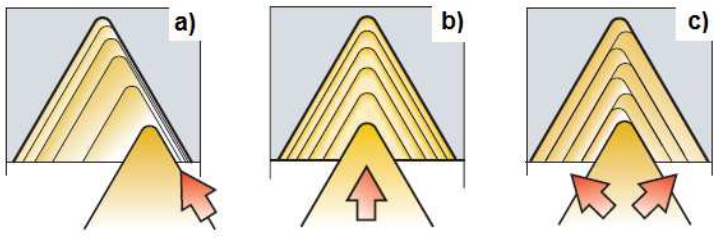
1.2.1 Soustružení závitů

Soustružení závitů je nejběžnější metodou výroby závitů. Principem soustružení závitů je posuv soustružnického nože na otáčku obrobku. Tento posuv je roven stoupání závitu. K výrobě závitů je možno využít soustružnické stroje univerzální, revolverové, poloautomatické, automatické a speciální [24].

Pro vyhotovení závitu jsou používány speciální závitové nože nebo speciální břitové destičky. Takové nástroje mají profil daného závitu. Při použití závitového nože se využívá principu posuvu nástroje vůči otáčkám obrobku. Výsledkem je potom vysoustružená drážka, která má tvar šroubovice a profil odpovídá požadovanému typu závitu o daném stoupání [8,10].

Obr. 1.17 Obrázek soustružení závitu [8].

Pro vytvoření profilu závitu se požívají tři metody posuvu do záběru. Boční, radiální a přírůstkový posuv do záběru. Tyto metody mají přímý vliv na celkový proces řezání závitu. Ovlivňují především kvalitu závitu, opotřebení nástroje, životnost nástroje a také umožňuje kontrolu utváření třísky [9].



Obr. 1.18 Princip posuvů do záběru [8].

Boční posuv do záběru (obr. 1.18a) je nejvýhodnější metodou z důvodu jednodušší kontroly a utváření třísky. Tříska tak vzniká pouze na jedné straně břitové destičky, což vede ke snadnějšímu odvodu třísky z místa řezu. Aby nedocházelo při procesu řezání k rychlému opotřebovávání břitové destičky a degradaci kvality povrchu závitu, volí se úhel posuvu v rozmezí 1÷5º v závislosti na geometrii břitové destičky. Při bočním posuvu do záběru je dosahováno

nejlepšího utváření třísek. Minimalizují se tak problémy se zachycením třísek ve sklíčidle a poškození nástroje, což má za následek efektivnější využití strojního času. Díky výhodám této metody je většina CNC strojů vybavena příslušným programem pro danou metodu.

Pro většinu mechanicky ovládaných soustruhů je nejčastěji používán radiální posuv do záběru (obr. 1.18b). Kontrola a utváření třísky je problematické, protože tříska má tvar V, je velmi tuhá a špatně dělitelná. Při řezání závitů s velkým stoupáním vzniká riziko špatného odvodu třísek z místa řezu a také vznikají vibrace. Z toho důvodu je radiální záběr vhodný pouze pro závity s jemným stoupáním [24].

Přírůstkový posuv do záběru (obr. 1.18c) se využívá pro rozměrnější profily závitů. Při řezném procesu je břitová destička rovnoměrně opotřebovávána, což má za následek dlouhou životnost nástroje [8,9].

1.2.2 Frézování závitů

Při frézování závitů je materiál odebírán břity rotujícího nástroje. Posuv je zprostředkován zpravidla obrobkem ve směru vodorovném ke směru osy nástroje. Pro frézování závitu je nutno mít CNC stroj, který umožňuje pohyb nástroje po spirále. Pomocí této technologie je možno vyrábět závity vnější i vnitřní. Tento proces je relativně pomalý v porovnání s technologií řezání závitů pomocí závitníků. Hlavními přednostmi technologie frézování závitů jsou kvalita povrchu, přesnost a spolehlivost celého procesu [5,8,9].

Obr. 1.19 Typy závitových fréz

Výhody frézování [8].:

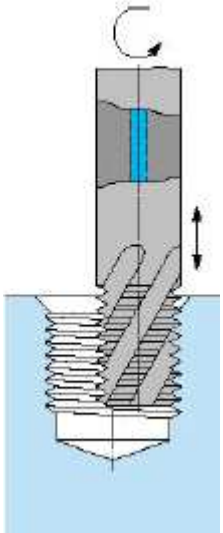
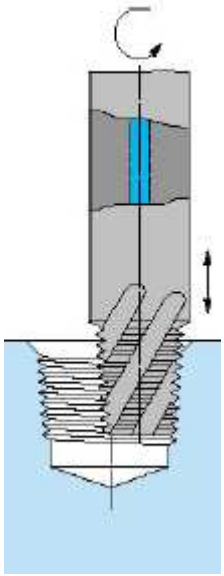
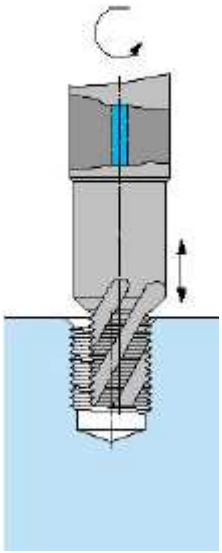
- drobivé třísky,
- možnost dosažení různých tolerancí závitů naprogramováním dráhy frézy,
- plný profil závitu téměř až do dna díry,
- delší životnost nástroje,
- vhodné pro většinu materiálů,

- možnost jedním nástrojem frézovat pravé i levé závity,
- možnost obrábění za sucha,
- možnost jedním nástrojem frézovat vnitřní i vnější závity.

Frézování závitů karbidovou monolitní frézou umožňuje výrobu různých závitů se stejnou roztečí pomocí jednoho nástroje. Tyto nástroje jsou vícebřité a je možno na jeden průchod vytvořit závit, který splňuje všechny technologické požadavky. Tyto nástroje jsou vhodné pro výrobu závitů o menším průměru. Karbidové monolitní frézy jsou vyráběny s vnitřním přívodem řezné kapaliny nebo bez vnitřního přívodu řezné kapaliny. Uplatnění těchto nástrojů je především v hromadné výrobě [5,8].

Obr. 1.20 Závitová monolitní karbidová fréza

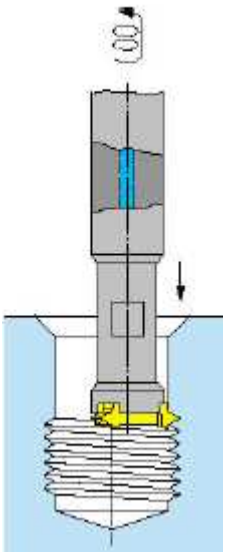
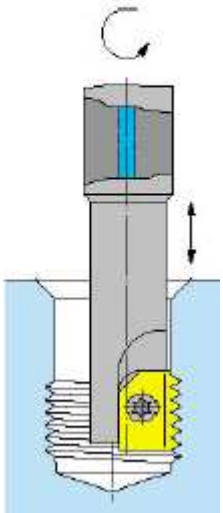
Tab. 1.10 Principy frézování vnitřního závitu monolitní frézou [9].

Typ frézy	GF	GF kuželová	GSF
Cyklus frézování			

Stopkové frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami umožňují velice produktivní frézování závitů. Lze frézovat levé i pravé závity, vnější i vnitřní závity a také lze frézovat dlouhé závity. Díky geometrii nástroje je možno vyrobit plný profil závitu téměř až do dna díry. Pro výrobu vnitřního závitu lze použít frézu o průměru menším než 2/3 průměru závitu. Břitová destička s hřebenovitým tvarem a profilem odpovídající profilu závitu provádí planetový rotační pohyb a zároveň koná posuvový pohyb k ose obrobku. Výrobu závitů nástrojem s jednou břitovou destičkou je možné realizovat pouze na CNC obráběcích strojích, které takový pohyb umožňují [8,9].

Obr. 1.21 Stopková závitová fréza s VBD

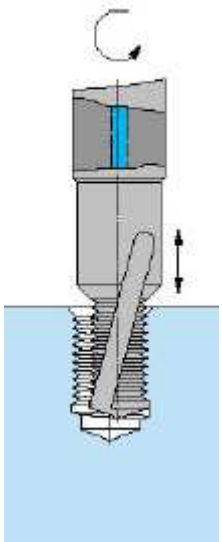
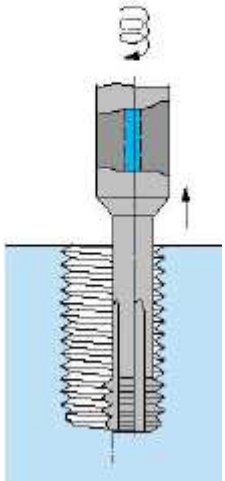
Tab. 1.11 Principy frézování závitu frézou s VBD [9].

Typ frézy	EP	WSP
Cyklus frézování		

Frézování vnitřních závitů lze provést pomocí monolitní vrtací závitové frézy tři různé operace. Jedním nástrojem je možno vrtat díru, srazit hranu a vyfrézovat závit. Díky tomu se ušetří nejen náklady na ostatní nástroje (vrták, záhlubník), ale i strojní čas. Vrtací závitové frézy jsou vyráběny s drážkami a vnitřním přívodem řezné kapaliny. Tyto nástroje slouží k obrábění kalených materiálů, litin, ocelí a hliníkových slitin [5,8].

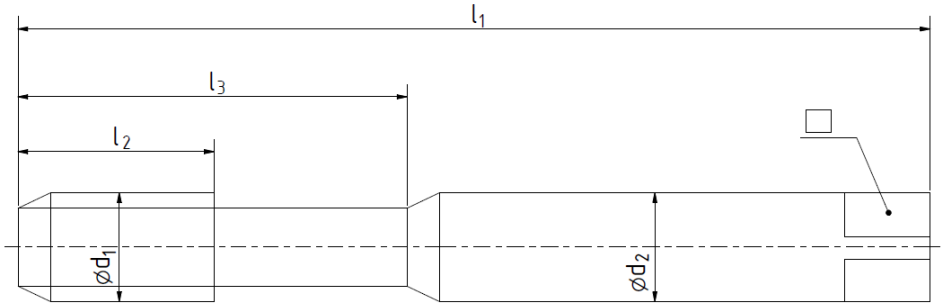
Obr. 1.22 Monolitní vrtací závitová fréza BGF

Tab. 1.12 Principy vrtání a frézování závitu [9].

Typ frézy	**BGF**	**ZBGF**
Cyklus frézování		

1.2.3 Řezání závitů pomocí závitníků

Pro řezání vnitřních závitů se používají závitníky vyrobené z nástrojové oceli nebo slinutých karbidů. Závitníky jsou vyráběny jako nástroje bez povlaků nebo jako nástroje povlakované s rozdílnými druhy povlaků. Závitník je nástroj, jehož řezná část je ve tvaru šroubu, na kterém jsou vytvořeny břity pomocí drážek. Volba vhodného typu závitníku závisí především na obráběném materiálu a typu otvoru.



Obr. 1.23 Základní rozměry závitníku

l_1 - celková délka nástroje,

l_2 - délka závitu,

l_3 - řezná délka,

$ød_1$ - jmenovitý průměr závitu,

$ød_2$ - průměr stopky.

Faktory ovlivňující kvalitu vyrobeného závitu [5]:

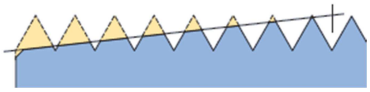
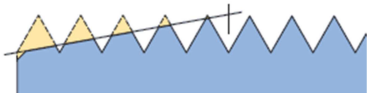
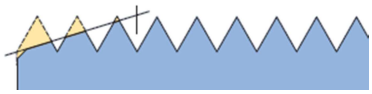
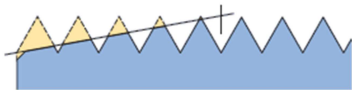
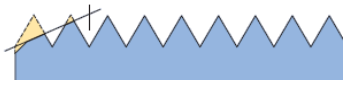
- vhodná geometrie a typ závitníku v závislosti na obráběném materiálu, a zda je díra průchozí či slepá,
- bezpečné a kvalitní upnutí chrání nástroj před zlomením, pozitivně ovlivňuje kvalitu povrchu vyrobeného závitu,
- nutnost dodržení správného průměru vrtáku pro předvrtání díry pro daný závit a minimalizování vytvrzení povrchu při vrtání,
- dodržení předepsané řezné rychlosti,
- použití vhodné řezné kapaliny,
- plynulé a hladké zavedení závitníku do díry.

Při procesu řezání závitů pomocí závitníků je nutno dbát zvýšené pozornosti technologii předvrtání otvoru. Tato operace značně ovlivňuje následující proces závitování a životnost závitníku. Při vrtání jsou okrajové zóny materiálu tepelně a mechanický namáhány, což má za následek vytvrzení povrchu otvoru. Vytvrzení okrajových zón má za následek zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy předvrtaného otvoru. Tato vrstva je ve velmi malé vzdálenosti od povrchu otvoru. Vytvrzení

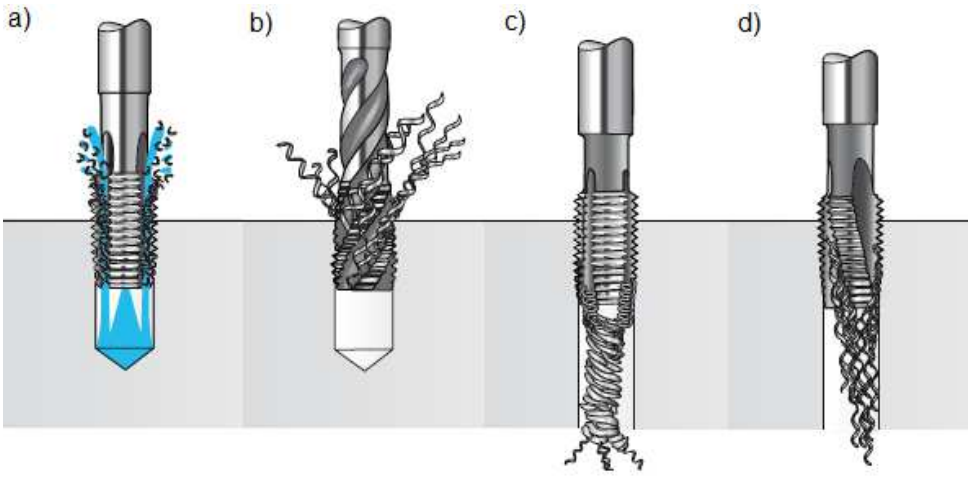
okrajových zón stoupá s mírou opotřebení použitého vrtáku. Rozdíl v tvrdosti povrchové vrstvy dosahuje až 200 HV a životnost závitníku je redukována téměř na čtvrtinu vyrobených závitů. Proto je nutné do procesu řezání závitů zahrnout také problematiku procesu vrtání a vrtací nástroj [22].

Důležitým geometrickým prvkem závitníků je tvar náběhu, který je dán normou DIN 2197 (tab. 1.13). Volba delšího náběhu zvyšuje životnost nástroje a snižuje zatížení řezné hrany, což má za následek nárůstu pevnosti nástroje. Nevýhodou delších náběhů je vyšší momentové zatížení nástroje. Kratší náběhy umožňují řezat závit téměř do dna otvoru [5,9,11].

Tab. 1.13 Typy náběhů řezacích závitníku dle ISO 2197 [11].

Tvar	Délka náběhu	Provedení	Použití
A	 6÷8 stoupání	Přímé drážky	Krátké průchozí otvory, materiály s krátkou třískou
B	 3,5÷ 5,5 stoupání	Přímé drážky s lamačem	Průchozí otvory, materiály tvořící střední a dlouhou třísku
C	 2÷3 stoupání	Přímé nebo spirálovité drážky	Průchozí i neprůchozí otvory, materiály s krátkou třískou
D	 3,5÷5 stoupání	Přímé nebo spirálovité drážky	Neprůchozí otvory, materiály s krátkou i dlouhou třískou
E	 1,5÷2 stoupání	Přímé nebo spirálovité drážky	Krátký výběh závitu, materiály s dlouhou i krátkou třískou, průchozí i neprůchozí otvory
F	1÷1,5 stoupání	Přímé nebo spirálovité drážky	Neprůchozí otvory s velmi krátkým výběhem závitu

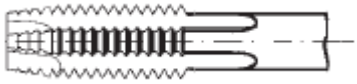
Při vyhotovení závitů pomocí závitníků je nutno věnovat pozornost odvodu třísek z místa řezu. Při řezání závitu do slepého otvoru je potřeba zajistit odvod třísky v axiálním směru z místa řezu. Při obrábění materiálů, které tvoří krátkou třískou je nutno zajistit odvod třísek pomocí řezné kapaliny, kdy je tříska vyplachována proti směru posuvu nástroje (viz obr. 1.24a). Bez vnitřního chlazení dochází k nahromadění třísky na dně otvoru a při kontaktu s nástrojem dochází k poškození závitu a může dojít také ke zlomení nástroje. U materiálů tvořící dlouhou třísku je odvod třísek zajištěn závitníky s drážkami ve šroubovici (obr. 1.24b). S délkou tvořené třísky a hloubkou závitu roste požadovaný úhel šroubovice [12].



Obr. 1.24 Příklady odvodu třísky z místa řezu [12].

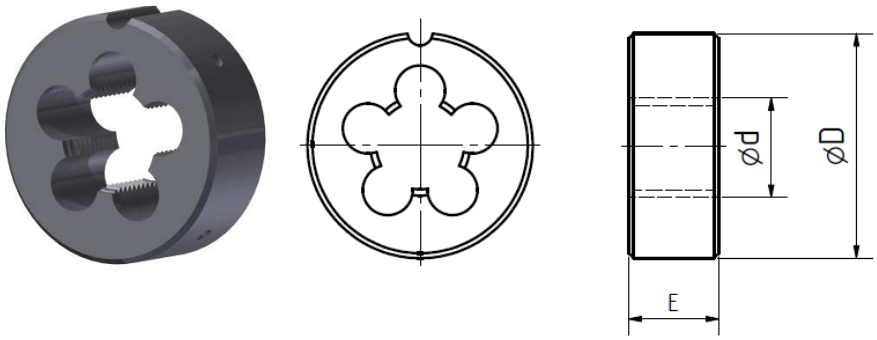
Při řezání průchozího závitu je tříska odváděna dopředu ve směru posuvu. Prioritním nástrojem jsou závitníky opatřené lamačem třísky (obr. 1.24c). Pokud nelze zajistit spolehlivý odvod třísky nástrojem s lamačem, potom je vhodné použít závitník s levotočivou šroubovicí (obr. 1.24d), která zajišťuje odvod třísky ve směru posuvu nástroje.

Tab. 1.14 Provedení drážek závitníků [11,12].

Typ drážky	Délka náběhu	Provedení
Šroubová		D
Přímá		A, C, D, E, F
Přímá s lamačem		B

1.2.4 Řezání závitů závitovými čelistmi

Řezání závitů pomocí kruhových závitových čelistí slouží k výrobě vnějších závitů na soustruzích. Kruhové čelisti jsou upínány do vratidel, jsou vyráběny v provedeních pro pravotočivý i levotočivý závit a jsou opatřeny řezným kuželem na obou stranách nástroje. Při řezání závitů pomocí závitových čelistí se doporučuje řezat závity jednou stranou až do otupení. Až poté je vhodné čelisti obrátit a řezat druhou stranou nástroje [11,12].



Obr. 1.25 Základní geometrie závitové kruhové čelisti

E - jmenovitá šířka nástroje,

ød - jmenovitý průměr závitu,

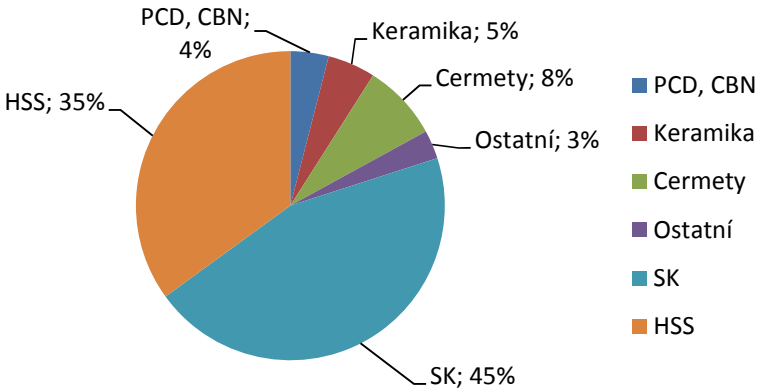
øD - vnější průměr závitového očka.

Pravidla pro řezání závitů závitovým očkem [5,12]:

- zajištění kolmého vedení nástroje na obrobek,
- eliminace prudkého nárůstu zatížení řezných hran pomocí sražení hran na obrobku,
- průměr závitu by měl odpovídat průměru obrobku, na kterém je závit vyhotoven z důvodu minimalizování řezných sil,
- zajištění dostatečného mazání,
- konstrukce není dostatečně pevná pro řezání do plného materiálu a proto jsou maticová očka vhodná pro ruční čištění a kalibraci hotových závitů.

1.3 Materiály řezného nástroje

Na řezný nástroj jsou kladeny nejvyšší požadavky v průmyslu. Při vytváření nového povrchu obráběním dochází mezi břitem nástroje a obrobkem k tepelnému a mechanickému zatížení nástroje, což zvyšuje požadavky na řezný nástroj, jako jsou houževnatost a tvrdost v oblasti ostří.



Obr. 1.26 Využití nástrojových materiálů ve světě [13].

Doposud nebyl objeven nový typ řezného materiálu a ani v blízké budoucnosti se neočekává zcela nový typ řezného materiálu, který by svými vlastnostmi předčil doposud známé řezné materiály. S vývojem nových, číslicově řízených strojů roste použitelná řezná rychlost. Proto se výrobci zaměřují na optimalizaci, aplikace a vývoj nových povlaků a přesné vymezení použití nástroje.

1.3.1 Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli označované jako HSS - High Speed Steel jsou nejstarším nástrojovým materiálem ze současných moderních nástrojových materiálů. I přes současný dominantní podíl slinutých karbidů na trhu jsou nástroje z rychlořezných ocelí díky svým specifickým vlastnostem nenahraditelné. Nástroje vyrobené z rychlořezných ocelí se vyznačují vysokou tvrdostí, pevností za tepla a především vysokou odolností proti vylamování břitu. Lze také zhotovit nástroj s vysokou ostrostí břitu a vysoce pozitivní geometrií břitu, což má za následek obrábění menšími řeznými silami. Díky vysoké ostrosti břitu se docílí vysoké kvality a přesnosti povrchu.

Tyto oceli jsou zpracovatelné všemi běžnými technologiemi, jako jsou odlévání, kování, válcování a třískové obrábění. Díky snadnému zpracování nástrojových ocelí je výroba takových nástrojů ekonomicky velice příznivá proti ostatním nástrojovým materiálům. Nízké náklady spojené s výrobou jsou mnohdy rozhodujícím faktorem ve volbě nástrojového materiálu [1,5].

Rychlořezné oceli můžeme rozdělit do tří hlavních skupin [5]:

- rychlořezná ocel (označována jako HSS)
- kobaltová rychlořezná ocel (HSS-E nebo HSCo)
- spékaná kobaltový rychlořezná ocel (HSS-E-PM nebo HSCoXP)

Tab. 1.15 Rozdělení rychlořezných ocelí a jejich chemické složení dle EN ISO 4957 [15]:

Typ	EN ISO	C [%]	Cr [%]	W [%]	Mo [%]	V [%]	Co [%]
HSS	HS 6-5-2	0,9	4	6	5	2	-
	HS 1-8-1	0,8	4	1,5	8,85	1	-
	HS 2-8-2	1	4	1,75	8,85	2	-
	HS 18-0-1	0,75	4	18	0	1	-
HSS-E (HSS-Co5)	HS 6-5-2-5	0,9	4,2	6,4	5	1,9	4,8
HSS-E (HSS-Co8)	HS 2-9-1-8	1,1	4	1,5	9,5	1,2	8
HSS-PM	HS 6-5-3	1,3	1,4	6,4	5	3	-
	HS 6-5-4	1,45	4,1	6,4	5	4	-
HSS-E-PM	HS 12-0-5-5	1,5	4	12	0	5	5
	HS 6-5-3-8	1,3	4,2	6,4	5	3,1	8,5
	HS 6-7-6-10	2,3	4,2	6,5	7	6,5	10,5

Rychlořezné nástrojové oceli jsou skupinou vysoce legovaných ocelí. Vysoký podílu legujících prvků a jejich kombinací se docílí požadovaných vlastností materiálu. Vysoká tvrdost, pevnost v ohybu a zvýšená popouštěcí teplota jsou charakteristickými vlastnostmi rychlořezných ocelí.

Vliv legujících prvků na výsledné vlastnosti RO:

Wolfram (W) - Základní legující prvek, obsah 6 až 18%, vytváří karbidy odolné vůči opotřebení, zvyšuje odolnost nástroje proti popouštění. Při popouštění pozitivně ovlivňuje sekundární tvrdost. Rychlořezné oceli s vysokým obsahem mají zvýšenou tvrdost při vysokých teplotách. Tato vlastnost je dána pomalou difuzí wolframu. V současnosti se množství wolframu snižuje v závislosti na obsahu vanadu z důvodu lepších plastických vlastností, nižších kalících teplot a příznivější ekonomické nároky při zachování řezivosti nástroje.

Molybden (Mo) - Obdobné vlastnosti jako wolfram, mnohdy slouží jako náhrada za wolfram, obsah 0,7 až 10%, karbidy molybdenu jsou rovnoměrně rozloženy ve struktuře a tím je způsobena vyšší houževnatost molybdenových ocelí.

Uhlík (C) - Obsah uhlíku je v rozmezí 0,75 až 2,3%. Vysoký obsah uhlíku způsobuje po zakalení vznik delta feritu, což má za následek snížení řezivosti. Při

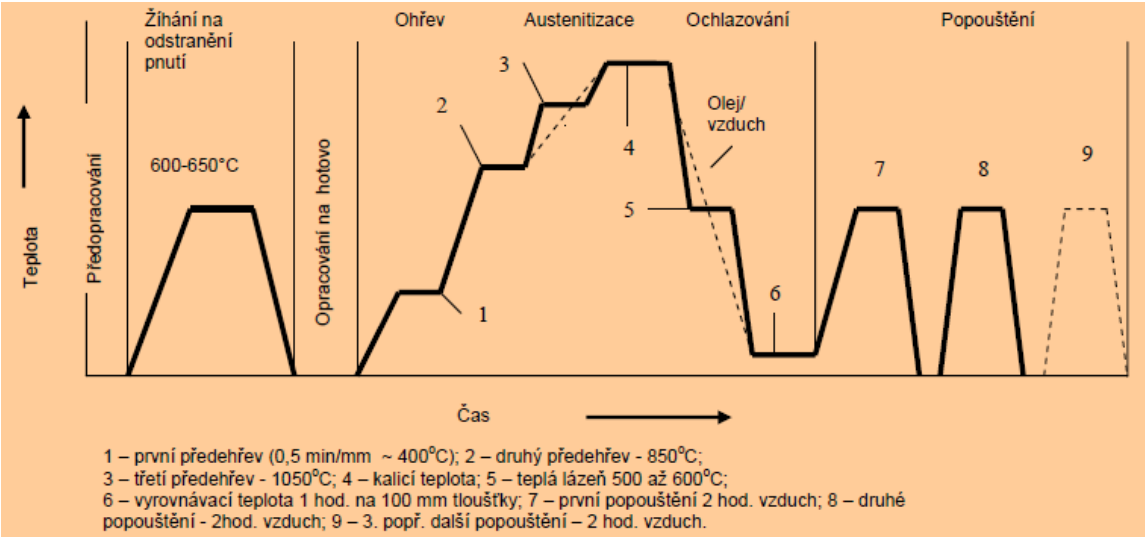
vysokém obsahu uhlíku dochází ke vzniku cementitových karbidů, které se po tepelném zpracování zcela rozpustí a zvyšují podíl zbytkového austenitu ve struktuře. Obsah uhlíku ovlivňuje řezivost, mechanické vlastnosti a množství karbidů ve struktuře.

Chrom (Cr) - Zajišťuje kalitelnost a prokalitelnost oceli. Obsah chromu v rychlořezných ocelích se pohybuje kolem 4%.

Kobalt (Co) - Po zakalení je téměř veškerý kobalt rozpuštěn ve struktuře a jen malé procento tvoří karbidy. Se zvyšujícím se obsahem kobaltu stoupá odolnost proti popouštění a stoupá podíl zbytkového austenitu v matrici. Proto je nutné kobaltové nástrojové oceli popouštět třikrát až pětkrát, aby se snížil podíl austenitu na požadovanou mez.

Vanad (V) - Obsah vanadu v RO je vázaný na obsah wolframu a uhlíku. Je vázán především jako karbid, proto při zvýšení obsahu vanadu musíme zvýšit také obsah uhlíku. Karbidy vanadu zvyšují odolnost proti opotřebení, řezivost a vlivem vysoké tvrdosti komplikují přebrušování nástrojů s vysokým obsahem vanadu.

Výroba a zpracování rychlořezných ocelí je nejčastěji prováděna v elektrických obloukových pecích. Při tuhnutí nástrojových ocelí vlivem vysokého obsahu legujících prvků dochází k segregaci. Tyto rozdíly ve struktuře nelze zcela potlačit ani následným tvářením za tepla, a proto nejkvalitnější rychlořezné oceli jsou vyráběny pomocí práškové metalurgie [1,14].



Obr. 1.27 Tepelné zpracování RO [16].

Rychlořezné oceli se vyznačují vysokým obsahem legujících karbidotvorných prvků. Nejvyšší tvrdosti není dosaženo po zakalení, ale až po následném popouštění. Jedná se o tzv. sekundární tvrdost, která je způsobena velkým množstvím zbytkového austenitu po kalení. Obsah zbytkového austenitu je redukován několikastupňovým popouštěním při teplotách 500 až 700ºC, kdy dochází k rozpadu zbytkového austenitu a precipitaci karbidů. Vlivem popouštění po kalení nastává zvýšení tvrdosti, která je označována jako sekundární tvrdost. [1,14,15,16].

1.3.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou tvořeny karbidy kovů wolframu (WC), titanu (TiC) nebo dalšími přísadami jako jsou karbid tantalu (TaC) či niobu (NbC). Nejčastěji používaným pojícím prvkem je kobalt (Co). Slinuté karbidy se vyznačují vysokou tvrdostí, pevností v tlaku a odolností proti opotřebení až do teplot 900ºC. Ve srovnání s RO mají menší houževnatost a poměrně malou tepelnou vodivost. Nástroje ze slinutých karbidů jsou jedním z nejpoužívanějších nástrojových materiálů. Nejrozšířenějším typem nástroje ze SK jsou břitové destičky, které jsou následně pájeny nebo mechanicky upevňovány k nástroji. V případech komplikovaného nebo nemožného použití nástroje s břitovými destičkami jsou nástroje vyráběny jako monolitní [1,14].

Pro sjednocení značení velkého sortimentu vyráběných SK byla přijata mezinárodní norma ISO 513, která třídí SK do skupin podle způsobu namáhání a mechanismu opotřebení. Norma ISO 513 rozděluje slinuté karbidy do skupin P, M, K, N, S, H a podskupin (viz tab. 1.16). S rostoucím číslem podskupiny roste obsah pojiva a tím i pevnost v ohybu a houževnatost [1].

Tab. 1.16 Rozdělení SK dle ISO 513 [17].

Skupina	Podskupiny	Použití a příklady materiálů
P	P01, P10, P20, P30, P40, P50, P05, P15, P25, P35, P45	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou, plynulou třísku. Nelegovaná, nízkolegovaná a vysocelegovaná ocel, litá ocel, automatová, nástrojová, feritická a martenzitická korozivzdorná ocel.
M	M01, M10, M20, M30, M40, M05, M15, M25, M35	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou a středně dlouhou třísku. Austenitická a feriticko-austenitická ocel, korozivzdorná, žáruvzdorná, žáropevná a otěruvzdorná ocel.
K	K01, K10, K20, K30, K40, K05, K15, K25, K35	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, které tvoří krátkou a drobivou třísku. Šedá, tvárná a temperovaná litina, neželezné kovy jako hliník a bronzy.
N	N01, N10, N20, N30, N05, N15, N25	Slinuté karbidy pro obrábění neželezných materiálů. Slitiny mědi a hliníku, plasty, tvrdá guma, kompozitní materiály.
S	S01, S10, S20, S30, S05, S15, S25	Slinuté karbidy pro obrábění speciálních slitin. Žárupevné slitiny na bázi železa, slitiny titanu, superslitiny na bázi niklu nebo kobaltu.
H	H01, H10, H20, H30, H05, H15, H25	Slinuté karbidy pro obrábění zušlechtěné oceli s pevností nad 1500 MPa, kalené oceli s tvrdostí 48 až 60 HRC

Při použití SK skupiny P je nástroj zatěžování velkými silami. Dochází k velkému opotřebení a teplotnímu zatížení nástroje. Proto tyto SK obsahují přísady TiC nebo TaC, které zvyšují otěruvzdornost a tepelnou odolnost nástroje.

Pro obrábění materiálů tvořící krátkou, drobivou třísku je určena skupina K. Nástroj je primárně vystaven adheznímu a abrazivnímu opotřebení a proto tento typ SK obsahuje větší množství WC.

SK skupiny M jsou označovány jako typ pro univerzální použití a jejich aplikace je určena pro materiály tvořící dlouhou a středně dlouhou třísku.

Tab. 1.17 Chemické složení základních skupin SK [17].

Skupina	WC [%]	TiC [%]	Co [%]	TaC.NbC [%]
P	30÷82	8÷64	5÷17	-
M	79÷84	5÷10	6÷15	4÷7
K	87÷92	-	4÷12	-

Protože materiály jako wolfram a kobalt jsou velice drahé, byly tyto materiály úplně, nebo alespoň částečně nahrazeny materiály jinými. Karbid titanu (TiC), karbonitrid titanu (TiN) a nitrid titanu (TiN) nahradily velmi drahý wolfram a kobalt a vytvořili tak novou skupinu nástrojových materiálů označovány jako cermety. V mnoha případech je brán jako materiál ve skupině slinutých karbidů, jindy jako samostatný nástrojový materiál. Vyznačují se vysokou pevností za tepla a chemickou stabilitou. V porovnání se slinutými karbidy jsou méně houževnaté a odolné proti teplotnímu rázu. Cermety jsou vhodné především pro jemné obrábění nebo pro dokončovací operace u ocelí, případně litin.

1.3.3 Řezná keramika

Jsou to keramické materiály na bázi kysličníku hlinitého nebo nitridu křemičitého. Základní složkou řezné keramiky je korund (Al_2O_3). Korund je jedním z nejtvrdších materiálů, ale jeho nevýhodou je velká křehkost. Za účelem snížení křehkosti a zvýšení houževnatosti se do keramických řezných materiálů přidávají nikl, chrom, molybden, případně karbidy wolframu a molybdenu [1].

Mezi hlavní výhody řezné keramiky patří řezivost, vysoká odolnost proti otěru, stálost za teplot 1200ºC i více a nízká cena. Přidáním karbidu titanu a zjemněním struktury čisté korundové keramiky se dosáhne lepších mechanických vlastností především pevnosti v tlaku a ohybu, zvýšení tvrdosti při vysokých teplotách.

Řezná keramika má i přes značný vývojový pokrok velmi úzkou oblast využití. Tato oblast je omezena na soustružení a frézování šedé litiny, tvárné litiny, žáruvzdorných slitin a kalených ocelí. Největším omezením použití řezné keramiky je nutnost obrábění na vysoce výkonném a tuhém stroji s požadovaným rozsahem otáček a posuvů [14,18].

Řeznou keramiku můžeme rozdělit do třech základních skupin podle chemického složení, vlastností a použití. Jakou čtvrtou skupinu řezné keramiky můžeme označit řeznou keramiku vyztuženou monokrystalickými vlákny karbidu křemíku.

Rozdělení řezné keramiky:

- na bázi oxidu hlinitého
  - čistá,
  - polosměsná,
  - směsná.
- na bázi nitridu křemíku
  - nitridová.
- vyztužená řezná keramika

Jelikož neexistuje mezinárodní norma, která by rozdělovala řeznou keramiku, můžeme ji rozdělit do následujících skupin (viz tab. 1.18).

Tab. 1.18 Příklady značení řezné keramiky dle ČSN ISO 513 [14].

Druh keramiky	Chem. složení	Symbol
Čistá	99,9% Al_2O_3	CA
Polosměsná	Al_2O_3+ZrO_2	CA
Směsná	Al_2O_3+TiC	CM
Nitridová	Si_3N_4	CN

Všechny druhy keramiky uvedené v tab. 1.18 lze v současné době povlakovat (značení CC) a vyztužovat jemnými vlákny karbidu křemíku, označovány jako whiskery.

Vlastnosti a použití řezné keramiky:

- čistá oxidická keramika (CA):
  - tvořena až 99,9% oxidu hlinitého Al_2O_3,
  - bílá nebo šedá barva,
  - vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení za teplot až 1200ºC,
  - relativně nízká pevnost, houževnatost a tepelná vodivost,
  - řezné rychlosti až 1000 m/min,
  - obrábění litiny a konstrukčních ocelí nepřerušovaným řezem.

- Směsná oxidová keramika (CM):
  - černá barva,
  - příměs 20 až 40% TiC nebo TiN,
  - zvýšená teplotní vodivost a odolnost proti teplotním šokům,
  - možnost obrábění přerušovaným řezem a použití chladicí kapaliny,
  - obrábění litin a kalených ocelí o tvrdosti až 64 HRC.

- Nitridová (CN)
  - keramika na bázi Si_3N_4,
  - vyšší tepelná vodivost, pevnost v ohybu a odolnost proti tepelným, rázům v porovnání s oxidickou keramikou,
  - možnost obrábět za sucha i chladicí kapalinou,
  - obrábění šedé a tvárné litiny, kalené oceli, niklové, titanové a žáruvzdorné slitiny,
  - vysoká tvrdost za vysokých teplot,
  - dosažení maximálních řezných výkonů.

- Povlakovaná řezná keramika (CC):
  - povlakování metodou CVD,
  - jedna vrstva TiN nebo TiCN,
  - snížení otěruvzdornosti řezných hran.

- Vyztužená keramika:
  - zelená barva,
  - výrazné zvýšení houževnatosti, pevnosti v tahu a odolnosti proti teplotním rázům,
  - zvýšení tvrdosti za tepla a odolnosti proti opotřebení,
  - možnost obrábět přerušovaným řezem,
  - obrábění žáruvzdorných slitin, kalených ocelí a šedé litiny.

1.3.4 Syntetický diamant

Syntetický diamant mnohdy označovaný taky jako polykrystalický diamant (PKD) je nejtvrdším nástrojovým materiálem. Díky této vlastnosti dokáží nástroje z PKD odolávat velkým abrazivním otěrům a jejich životnost je až stokrát vyšší než u slinutého karbidu. Nevýhodou PKD je křehkost, nízká tepelná odolnost (pouze do 700ºC) a vysoká afinita k železným kovům a niklovým slitinám. Nástroje jsou vyráběny jako břitové destičky mechanicky upnuty, nebo napájeny k tělu nástroje.

Obr. 1.28 Vrtáky opatřené destičkami z polykrystalického diamantu

Polykrystalickým diamantem se osazují nástroje na soustružení, vyvrtávání a frézování. Nástroje z PKD jsou vhodné k obrábění neželezných kovů, jako jsou hliníkové slitiny, slitiny mědi, hořčíku, slinutých karbidů, keramiky a drahých kovů. Tyto nástroje jsou používány k obrábění vysoce abrazivních materiálů a z tohoto hlediska nemají na trhu konkurenci [1,14].

Výhody PKD nástrojů:

- životnost (až 100krát vyšší než u SK),
- kvalita a přesnost obrobeného povrchu,
- odolnost proti abrazivnímu opotřebení,
- nízký koeficient tření.

1.3.5 Nitrid boru

Polykrystalický kubický nitrid boru (PKB nebo CBN) je výjimečně tvrdý řezný materiál, jehož tvrdost je v rozmezí 4000÷5500 HV. Tvrdost PKB se blíží tvrdosti diamantu. Tento druh řezné materiálu se v přírodě nenachází a tak se vyrábí spojováním kubických krystalů bóru s kovovým nebo keramickým pojivem. Tento proces probíhá při vysokém tlaku a teplotě [1].

Obr. 1.29 VBD se vsazeným břitem z PKB

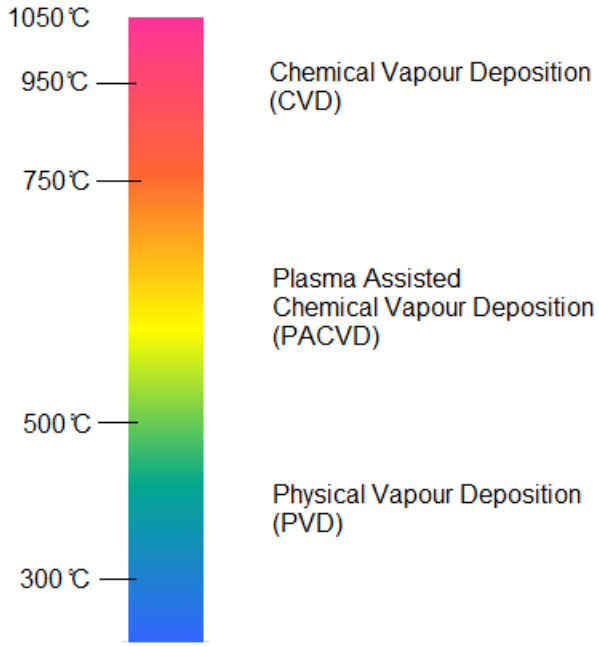
Kubický nitrid boru je keramický kompozitní materiál s obsahem CBN 40÷64% nebo 85÷100% CBN. Tyto řezné materiály se vyznačují vysokou odolností proti abrazivnímu opotřebení, vysokou tvrdostí za tepla (až do 2000ºC) a také dobrou chemickou stabilitou. Výsledné vlastnosti je možno ovlivnit obsahem a typem pojiva. Pro řezné materiály s nízkým obsahem CBN se používá keramické pojivo, které má za následek zvýšení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení a chemické stálosti. Nevýhodou použití keramického pojiva je větší křehkost řezného nástroje. Kovové pojivo použité u materiálů s vysokým obsahem CBN zvyšuje houževnatost a tyto materiály mají vysokou lomovou houževnatost a tepelnou vodivost [14].

Kubický nitrid boru jako nástrojový materiál je používán především při obrábění tvrdých, kalených materiálů s tvrdost 45 až 65 HRC. Při obrábění materiálů s nižší tvrdostí dochází k velkému opotřebení nástroje, a proto jsou vhodné pro obrábění materiálů, jako jsou vysocelegované, nástrojové a rychlořezné oceli a litiny [1].

1.4 Metody povlakování

Z důvodu zpomalení vývoje nových nástrojových materiálů bylo koncem 60. let 20. století vyvinuto povlakování nástrojů. Velmi tenká vrstva materiálu byla nanášena na slinuté karbidy pomocí CVD metody (Chemical Vapour Deposition). Tato vrstva se vyznačovala vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení. Počátkem 80. let bylo vyvinuto povlakování metodou PVD (Physical Vapour Deposition). Nejpoužívanějšími povlaky byly vrstvy typu TiC, TiN, TiCN a Al_2O_3.

Největší kvalitativní změnu v technologii nanášení povlaků přinesly plazmaticky aktivované CVD metody (PCVD nebo PACVD). Tyto metody jsou založeny na principu snížení pracovních teplot. Toto snížení pracovních teplot má za následek menší tepelné zatížení nástroje při procesu povlakování [14].



Obr. 1.30 Pracovní teploty povlakovacích metod

S rozvojem CNC strojů a narůstajícími požadavky na kvalitu a přesnost, roste také trh s povlakovanými nástroji, které umožňují obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Každý rok je zdokonaleno a vyvinuto velké množství povlaků, které více zefektivní proces obrábění. Nové a moderní povlaky zvětšují oblast použitelných řezných rychlostí, které je možno využít na moderních CNC strojích [14].

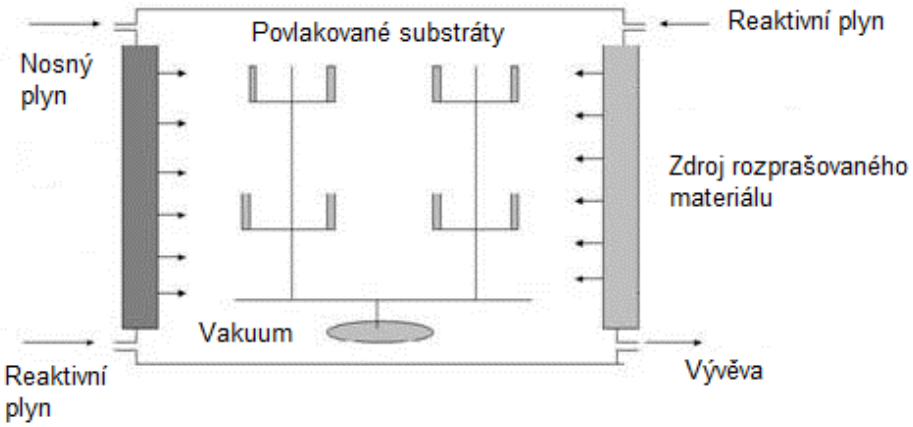
1.4.1 Metoda PVD

Metoda fyzikálního napařování vytváří povlaky kondenzací částic za sníženého tlaku 0,1 až 1 Pa. Tyto částice jsou uvolňovány ze zdroje rozprašováním nebo odpařováním. Částice jsou urychlovány směrem k povrchu, kde se usazují a vytvářejí tak souvislou vrstvu povlaku o tloušťce 2÷6 μm [19].

Pracovní teplota metody PVD se pohybuje pod 500ºC. Nízká pracovní teplota je velkou výhodou této metody povlakování nástrojů, jelikož nedochází k tepelnému ovlivnění nástroje. Další výhodou této metody je možnost povlakování ostrých hran (poloměr zaoblení pod μm). Jednou z nevýhod této metody jsou poměrně vysoké nároky na povlakovací zařízení. Složitý vakuový systém a nutnost pohybu povlakovanými předměty jsou hlavní nevýhody tohoto procesu povlakování. Nutnost zajištění pohybu povlakovaných předmětů souvisí s vytvářením nedokonalých vrstev na plochách, které neleží ve směru pohybu odpařovaných částic [14].

1.4.1.1 Naprašování

Principem metody naprašování je oddělení částic z povrchu zdroje na povrch substrátu. Tento proces probíhá ve vakuu, při nízkém tlaku (menším jak 0,7 Pa) nebo při vyšším tlaku (0,7÷2 Pa). Při použití vyššího tlaku dochází při srážce částic zdroje s částicemi nosného plynu k ohřevu před samotným dopadem na povrch substrátu. Zařízení pro naprašování se skládá z vakuové komory, která tvoří anodu a zdroj materiály označovaný jako terč tvoří katodu. Terč je obvykle chlazen vodou a je zdrojem povlakovacího materiálu a sekundárních elektronů, které udržují výboj [14].



Obr. 1.31 Schéma naprašování

Typy naprašování:

- naprašování doutnavým výbojem,
- magnetronové naprašování,
- radiofrekvenční naprašování,
- naprašování iontovým paprskem.

Nejjednodušším způsobem naprašování je naprašování doutnavým výbojem rovinné diody. Tato metoda vyniká především v jednoduchosti a snadnosti výroby terče. Terče je možno vyrábět z velkého množství materiálů. Malé povlakované plochy, ohřev substrátu v důsledku bombardování povrchu částicemi s vysokou energií a nízká rychlost depozice jsou hlavními nedostatky tohoto způsobu naprašování tenkých vrstev.

Výhody naprašování: [14]

- lze naprašovat a ukládat prvky, slitiny a chemické sloučeniny,
- odprašovaný terč je stabilním zdrojem par a má vysokou životnost,
- v některých uspořádáních může mít terč různé tvary,
- v některých uspořádáních může být reaktivní depozice snadno zdokonalena použitím reaktivních materiálů, které jsou aktivovány v plazmě,
- velmi nízké tepelné zatížení,
- terč a substrát můžou být umístěny blízko sebe,
- depoziční komora může mít malý objem.

Nevýhody naprašování: [14]

- intenzita naprašování je ve srovnání s intenzitou tepelného odpařování nízká,
- vysoká cena terčů, špatné využití materiálu,
- většina energie dopadající na terč se mění na teplo, které je nutno odvádět,
- u reaktivního naprašování je nutné přesné řízení složení plynné atmosféry, aby nedošlo k znečištění terče.

1.4.1.2 Napařování

Materiál je odpařován z terčů, které jsou zahřívány rozdílnými způsoby. Podle způsobu ohřevu terčů jsou rozlišeny typy zdroje na odporové, indukční, obloukové, laserové a paprsek elektronů. Proces napařování probíhá ve vakuu při tlaku 10^{-3} až 10^{-8} Pa. Odpařené atomy se na substrátu pohybují před samotnou kondenzací a vytvářejí tak povlaky s různou tloušťkou. Pro vytvoření rovnoměrné vrstvy napařováním je nutno do komory přivádět pod tlakem 0,7 až 26,7 Pa plyn (např. argon) [20].

Druhy odpařovacích zdrojů:

- odporové,
- elektronovým paprskem,
- obloukové,
- laserem.

Nejjednodušší a nejpoužívanější metodou povlakování odpařováním je za pomoci odporových zdrojů. Omezení je v podobě možnosti použití malého objemu a hmotnosti odpařovaného materiálu (maximálně 1g, při použití miskového tvaru několik gramů). Proud zdroje je v rozsahu 20÷500 A, a proto odporové zdroje nevyžadují vysoké výkony napájení.

Vysoce výkonným zdrojem je elektronový paprsek, který využívá vysokého výkonu elektronového paprsku k tavení a odpaření nanášeného materiálu. Umožňuje také vytvářet multivrstvé povlaky. Zařízení pro odpařování elektronovým paprskem umožňuje regulovat intenzitu odpařování ve velkém rozsahu [14].

Výhody odpařování elektronovým paprskem a odporového odpařování:

- možnost vytvářet vysoce čisté povlaky z vysoce čistých zdrojových materiálů,
- zdrojem odpařovaného materiálů může být tuhé těleso libovolného tvaru a čistoty,
- relativně snadné sledování a řízení,
- nejlevnější PVD metoda.

Neýhody odpařování elektronovým paprskem a odporového odpařování:

- obtížná depozice mnoha slitin a sloučenin,
- chemická reakce mezi odpařovaným materiálem a nosičem může vést k zanášení nečistot do povlaku,
- špatné pokrytí tvarově složitých ploch,
- vysoké zatížení tepelnou radiací,

1.4.1.3 Iontová implantace

Jedná se o hybridní PVD proces, který kombinuje dva předchozí způsoby nanášení povlaků a to naprašování a napařování. Dochází k bombardování povrchu částicemi s vysokou energií, dochází k elektrickému výboji a následné ionizaci částic plynu. Reakcí iontů vzniká na povrchu substrátu požadovaná vrstva. Touto metodou lze vytvářet povlaky různého složení za poměrně nízkých teplot 200 až 450ºC. Takto vzniklé povrchy mají vynikající mechanické vlastnosti a je možno touto metodou povlakovat dokonce i plasty [14].

Hlavní výhody iontové implantace: [14]

- vlivem bombardování povrchu částicemi dochází k čištění povrchu,
- přesně definované chemické složení povrchu,
- rovnoměrná vrstva povlaku po celém povrchu,
- vlastnosti povlaku nejsou tolik závislé na úhlu dopadu deponovaného materiálů jako u naprašování a napařování,
- vynikající adheze povlaku k podkladu,
- možnost snížení teploty substrátu pod 160ºC,
- široký rozsah podkladových i povlakových materiálů.

Hlavní nevýhody iontové implantace: [14]

- složitá kontrola rovnoměrného bombardování celého povrchu substrátu,
- může dojít k nadměrnému ohřevu substrátu,
- v povlaku mohou být vytvořena nadměrná zbytková napětí.

1.4.2 Vlastnosti povlakovaných vrstev

Výsledné mechanické a fyzikální vlastnosti povlaků jsou závislé především na druhu povlaku, metodě povlakování, substrátu a tloušťce povlaku. Vzniklé povlaky umožňují využití vyšších řezných rychlostí a posuvů procesu obrábění a tím zefektivnit celý proces. Životnost, lepší kvalita obrobeného povrchu a menší koeficient tření jsou typickými vlastnostmi povlakovaných nástrojů. V důsledku menšího tření mezi nástrojem a obrobkem klesají řezné odpory a snižuje se celková energetická náročnost obrábění. Při použití povlaku s malým koeficientem tření je možné obrábět bez procesní kapaliny [14,20].

Moderní povlaky se staly nedílnou součástí průmyslové praxe. Použití tvrdých a otěruvzdorných povlaků pro obrábění některých materiálů jsou naprostou nezbytností.

Základní vlastnosti povrchových vrstev:

- tvrdost,
- drsnost povlaku,
- tloušťka,
- adheze,
- otěruvzdornost,
- chemická stabilita,
- tepelná stabilita,
- odolnost vůči oxidaci.

Tab. 1.20 Obecné vlastnosti základních povlaků [14]

Hodnocení	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla
Nejlepší	Al_2O_3	Al_2O_3	TiC	Al_2O_3
	TiAlN	TiAlN	TiAlN	TiAlN
	TiN	TiN	TiCN	TiN
	TiCN	TiCN	Al_2O_3	TiCN
Nejhorší	TiC	TiC	TiN	TiC

TiN (nitrid titanu)

Základní a nejdéle používaný typ povlaku. Tento typ povlaku má univerzální použití. Vyznačuje se zlatou barvou, mikrotvrdost se pohybuje v rozmezí 20÷25 GPa. Používá se pro obrábění ocelí s nízkou pevností, pro méně náročné řezné aplikace a nízké řezné rychlosti. Přednosti TiN povlaku jsou dobrá elasticita a vynikající odolnost proti adheznímu opotřebení. V porovnání s nepovlakovanými nástroji vykazuje o 30÷40% větší trvanlivost ostří. Vzhledem k ceně se velice často používá k povlakování nástrojů z HSS. Využití povlaku TiN je především pro závitníky a vrtáky [14,21].

TiCN (karbonitrid titanu)

Povlaky s vysokou odolností proti otěru a velmi nízkým koeficientem tření, který chrání před vznikem studených svarů. Nástroje s typem povlaku TiCN se vyznačují zvýšenou odolností proti mechanickému opotřebení. Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 2÷12 μm, s narůstající tloušťkou narůstá také její křehkost. Mikrotvrdost tohoto vícevrstvého povlaku dosahuje až 37 GPa. Využití nástrojů s

TiCN povlakem je především v oblasti závitování, frézování, tváření a stříhání. K dosažení efektivního obrábění u tohoto typu povlaku je důležitým faktorem použití kvalitní řezné kapaliny [14,21].

TiAlN

Univerzální vysocevýkonná vrstva s charakteristickou červenohnědou barvou. Jedná se o nejrozšířenější typ povlaků pro vrtání, frézování a vystružování. Povlak je vhodný pro obrábění bez použití řezné kapaliny. Má výborný poměr tvrdosti a houževnatosti díky multivrstvé struktuře. Mikrotvrdost 30÷33 GPa. Maximální teplota použití je do 800ºC. V současnosti nachází využití pro vysokorychlostní obrábění [14,21].

AlTiN

Vysocevýkonná vrstva vhodná pro obrábění tvrdých materiálů. Vysoká teplotní odolnost (až 900ºC) umožňuje obrábění za sucha. Povlak se vyznačuje vysokou oxidační odolností. Mikrotvrdost HV dosahuje až 38 GPa. Jedná se o typ povlaku s obsahem více než 50% Al. Velmi hladký povlak s vysokým obsahem hliníky. Použití nachází u náročných aplikací vyžadující nízkou drsnost povrchu [14,21].

CrAlN

Vrstvy na bázi CrAlN je možno díky multivrstvé struktuře zhotovit do tloušťky až 10 μm. Pro běžné PVD vrstvy je tloušťka 10 μm nereálná. Charakteristickými vlastnostmi vrstvy CrAlN jsou vysoká chemická stabilita při vysokých teplotách a zvýšená adheze k substrátu [14].

nACo

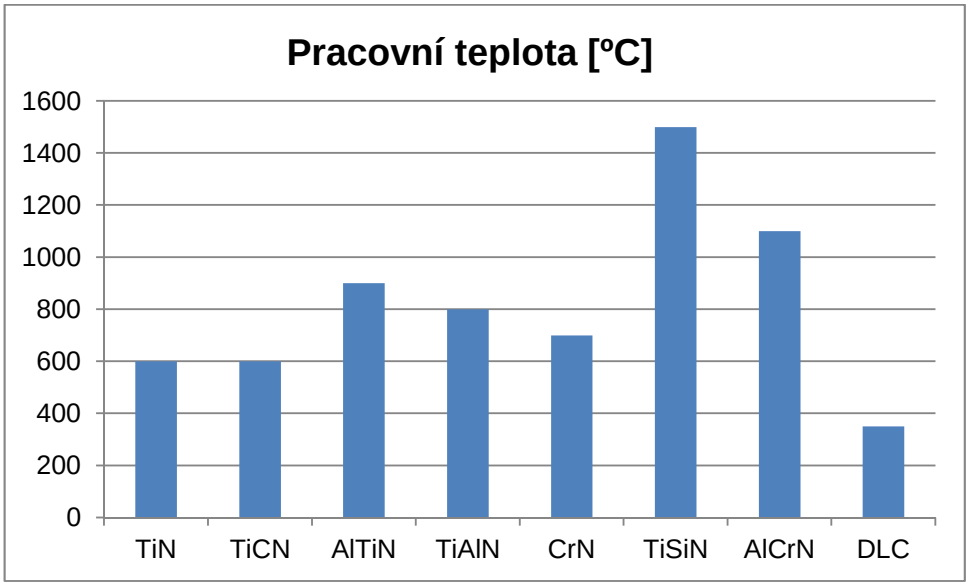
Jedná se vysoce odolnou nanokompozitní vrstvu na bázi AlTiN/Si_3N_4. Vyznačuje se vysokou tvrdostí a teplotní odolností až do 1200ºC. Slouží především k obrábění tvrdých a kalených materiálů. Své využití nachází také v obrábění vysokými řeznými rychlostmi [21].

DLC

(Diamond - like carbon). Jedná se o tzv. kluzné vrstvy kombinující vynikající kluzné vlastnosti a dobrou tvrdost. Vrstvy DLC se vyznačují nízkou tvrdostí HV do 20 GPa a nízkou pracovní teplotou do 350ºC a nízkým koeficientem tření [21].

Tab. 1.20 Základní typy a vlastnosti PVD povlaků [21].

Typ povlaku	Tloušťka [μm]	Pracovní teplota [ºC]	Barva	Koeficient tření	Mikrotvrdost HV [GPa]
TiN	1÷6	600	zlatá	0,4	25
TiCN	1÷4	600	bronzová	0,4	30
AlTiN	1÷6	900	fialová	0,4	25÷35
TiAlN	1÷8	800	fialová	0,4	25÷35
CrN	1÷10	700	stříbrnošedá	0,4	15÷25
AlCrN	1÷6	1100	šedá	0,35	30
TiSiN	1÷6	1500	šedá	0,5	35



Obr. 1.32 Porovnání pracovních teplot vybraných PVD povlaků

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Obráběný materiál

Pro analýzu silového zatížení celého procesu byla použita ocel chrom-niklová austenitická nestabilizovaná (ČSN 10088-1, 1.4301, X5CrNi 18-10). Tato ocel sklon ke zpevňování při tažení za studena a při obrábění nevhodnými řeznými podmínkami, nemagnetická, nekalitelná. Tato ocel se vyznačuje korozní odolností, náchylností k mezikrystalické korozi v tepelně ovlivněné oblasti, leštitelná a má dobrou třískovou obrobitelnost.

Chemické složení (viz tab. 2.1) vyhovuje normě pro použití výrobků pro potraviny a pitnou vodu. Vhodné použití pro gastronomická zařízení, vnější konstrukce, vodárny, zařízení ČOV.

Tab. 2.1 Chemické složení a vlastnosti oceli ČSN 10088-1

Typ	C max.	Cr	Ni	Mo	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Ti
ČSN 10088-1	Hmotnostní obsah prvků [%]								
	0,06	17÷20	8,5÷1,5	-	1,00	2,00	0,045	0,030	-
Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu R_m 520÷720 MPa Mez kluzu $R_{p0,2}$ min. 210 MPa Tažnost A min. 45%								

2.2 Řezné podmínky

Tab. 2.2 Řezné podmínky při experimentu

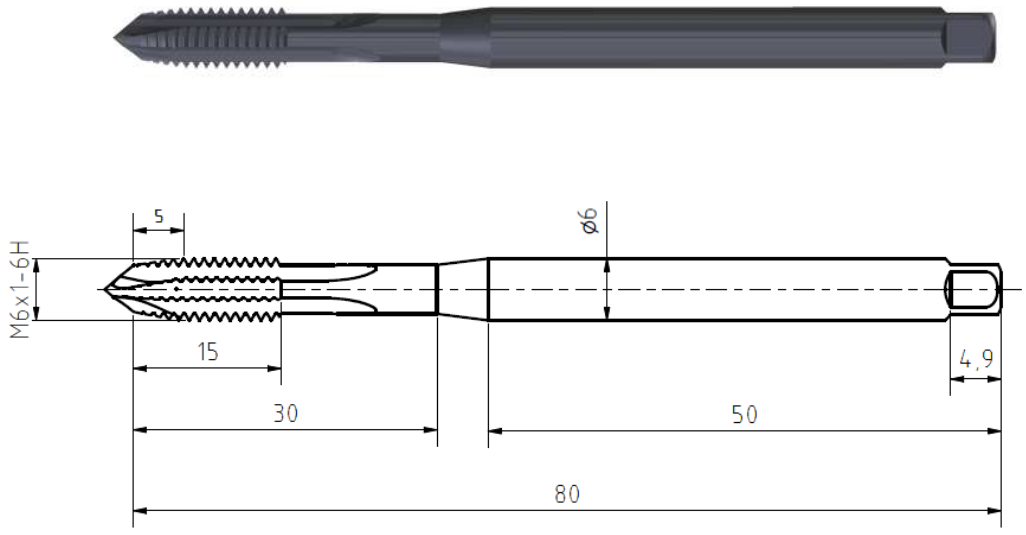
Podmínky	Hodnoty
řezná rychlost	10 $m \cdot min^{-1}$
posuv	1 $mm \cdot ot^{-1}$
průměr předvrtané díry	5 mm
otáčky	530 min^{-1}
procesní kapalina	10% Cimperial HD 801-03, 60 barů

2.3 Řezné nástroje

Testovány byly celkem 4 maticové závitníky M6 s totožnou geometrií, ale s rozdílnými typy povlaků. Závitníky jsou povlakovány metodou PVD, jedná se o povlaky TiN, CrAlN, AlTiN a TiCN. Materiál testovaných závitníků je HSSE.

Tab. 2.3 Přehled testovaných maticových závitníků

Označení závitníku	Typ povlaku
A1	TiN
A2	CrAlN
A3	AlTiN
A4	TiCN



Obr. 2.1 Základní geometrie testovaného závitníku

l_k = 5 mm - délka řezného kužele,
l_1 = 80 mm - celková délka nástroje,
l_2 = 15 mm - délka závitu,
l_3 = 30 mm - řezná délka,
l_4 = 50 mm - délka stopky,
l = 4,9 mm - délka čtyřhranu,

M6 ISO 3 - jmenovitý rozměr závitu,

ød_2 = 6 mm - průměr stopky,

s = 1 mm - stoupání závitu.

2.4 Obráběcí stroj a upnutí nástroje

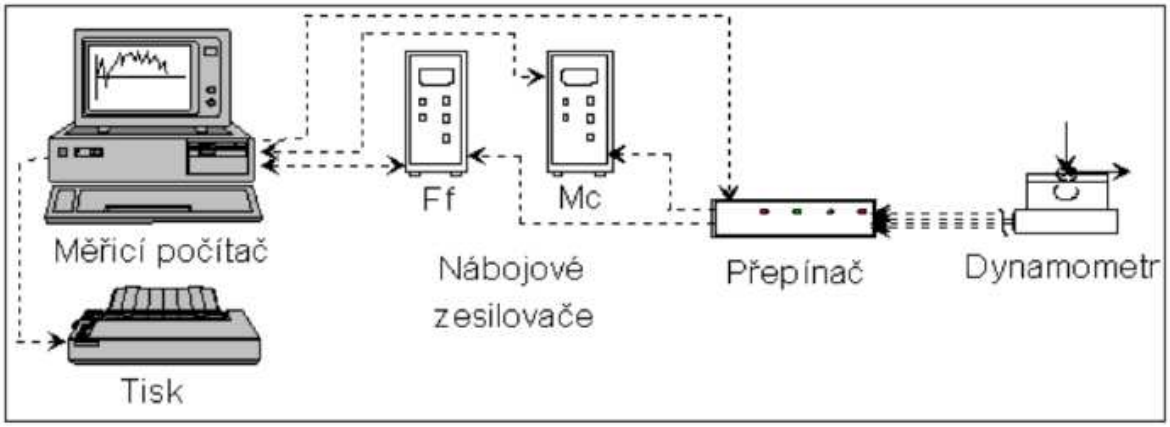
Obráběcím strojem bylo CNC obráběcí centrum MCV 1210 s řídicím systémem Sinumerik 840D. Řezné nástroje byly upnuty do standartních upínacích hlavic s výjimkou závitníků. Závitníky byly upnuty do bezpečnostního aparátu EMUGE KSN-Softsynchro s kompenzací tah-tlak. Při zkouškách nebylo pozorováno uvolnění nástrojů.

Pro upínání obrobků byl použit strojní svěrák, upnutý pomocí speciální příruby, upínek a šroubů k čelní ploše snímače dynamometru KISTLER 9257B.

2.5 Způsob měření silového zatížení nástroje

Pro měření síly posuvové a řezného momentu byl použit piezoelektrický křemíkový dynamometr KISTLER 9257B vybavený nábojovými zesilovači KISTLER 9011A plně řízenými PC (obr. 2.2). Vzorkovací frekvence byla přibližně 50 Hz, na zesilovačích byla nastavena dlouhá časová vybíjecí konstanta a dolnopropustný filtr na hladině 50 Hz.

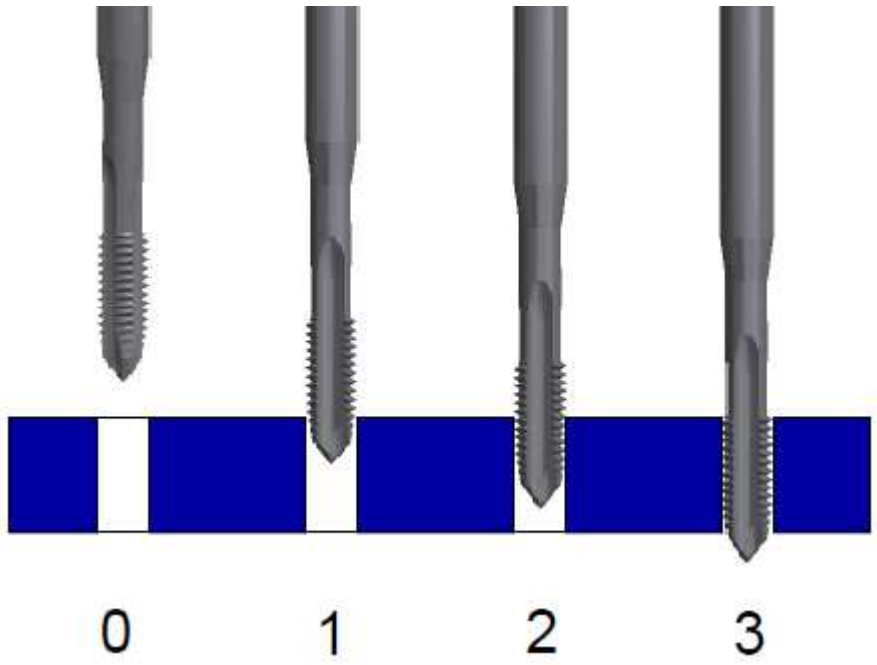
Všechny testy řezání závitů spočívaly v záznamu řezného momentu a posuvové síly. V průběhu zkoušek byly zaznamenávány průvodní jevy opotřebení nástrojů pomocí fotografií a časové řady průběhů krouticích momentů se statistickým vyhodnocením.



Obr. 2.2 Schéma měřící aparatury

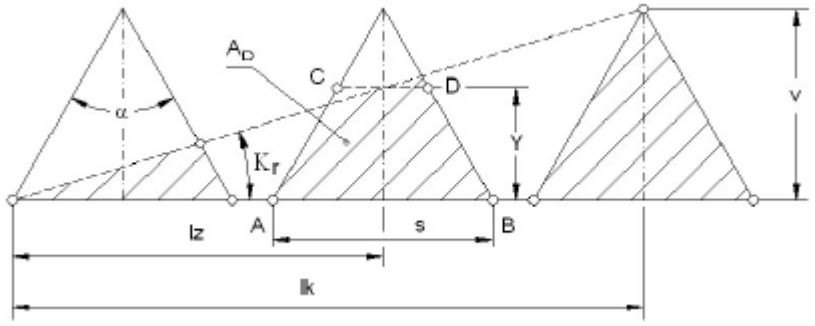
2.6 Hodnocení teoretického řezného momentu

Z hlediska řezání závitů je důležitý interval 2 (viz obr. 2.3), ve kterém je řezný kužel maticového závitníku plně zařezán do obráběného materiálu a nástroj je zatížen plným výkonem.



Obr. 2.3 Časový průběh řezání závitů maticovým závitníkem

Teoretický průběh krouticího momentu při řezání závitu maticovým závitníkem je závislý na měrné řezné síle a velikosti plochy třísky ve tvaru lichoběžníku.



Obr. 2.4 Schéma průběhu průřezu třísky při řezání maticovým závitníkem

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

Přičemž

$y = l_k \cdot tgK_r$

$AB = s$

Z podobnosti trojúhelníků vyplývá

$$v = \frac{s}{2 \cdot (tg30^{\circ})}$$

$$tgK_r = \frac{v}{l_k}$$

Dosazením a úpravou je pak teoretický průběh plochy třísky dán vztahem:

$$A_D = l_z \cdot tgK_r \cdot \frac{s + \frac{s \cdot v - s \cdot y}{v}}{2} = l_z \cdot tgK_r \cdot \frac{2 \cdot s \cdot v - s \cdot l_z \cdot tgK_r}{2 \cdot v} =$$

$$= \frac{l_z \cdot tgK_r \cdot 2 \cdot s \cdot v - s \cdot l_z^2 \cdot tg^2K_r}{2 \cdot v} = \frac{s \cdot v}{2} \cdot \left(2 \cdot l_z \cdot \frac{tgK_r}{v} - l_z^2 \frac{tg^2K_r}{v^2}\right) =$$

$$= A_{D_{max}} \cdot \left(2 \cdot l_z \cdot \frac{tgK_r}{v} - l_z^2 \frac{tg^2K_r}{v^2}\right)$$

Kde

$$A_{D_{max}} = \frac{s \cdot v}{2}$$

Při konstantní hodnotě měrné řezné síly závisí časový průběh řezného momentu na průřezu třísky, který lze rozdělit do třech intervalů, podle hloubky zařezání řezného kužele závitníku:

Časový interval 1: $l \in \langle 0, l_k)$

$$A_{D_1} = A_{D_{max}} \cdot \left(2 \cdot l_z \cdot \frac{tgK_r}{v} - l_z^2 \frac{tg^2K_r}{v^2}\right) \qquad (2.1)$$

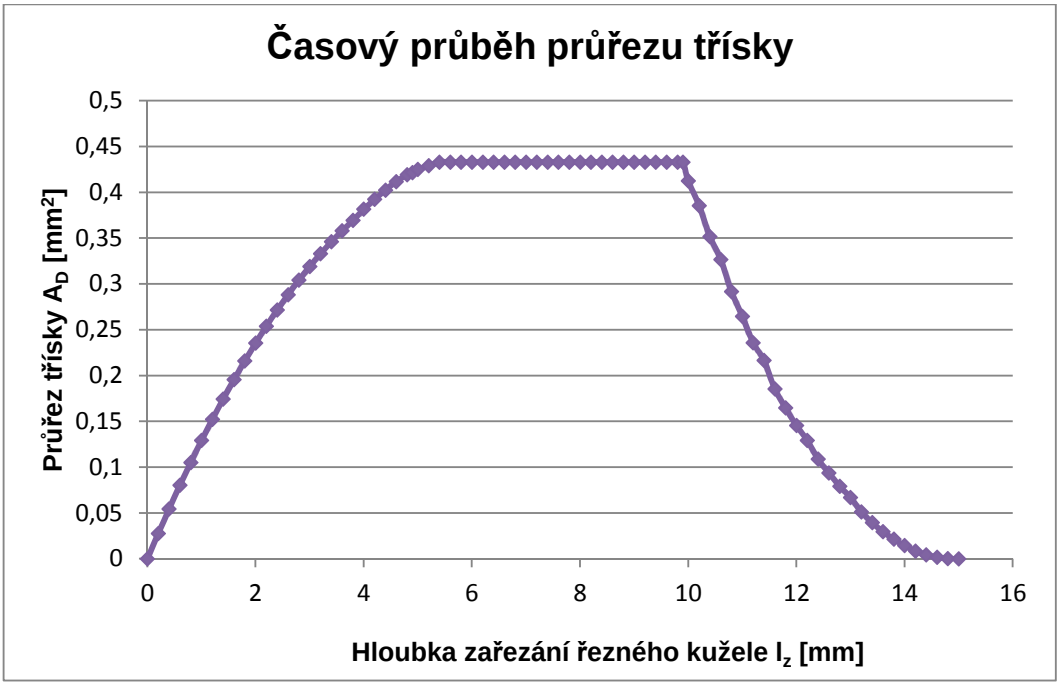
Časový interval 2: $l \in \langle l_k, L \rangle$

$$A_{D_2} = A_{D_{max}} = \frac{s \cdot v}{2} \qquad (2.2)$$

Časový interval 3: $l \in (L, L+l_k>$

$$A_{D_2} = A_{D_{max}} \cdot \left[1 - \left(2 \cdot l_z \cdot \frac{tgK_r}{v} - l_z^2 \frac{tg^2 K_r}{v^2}\right)\right] \qquad (2.3)$$

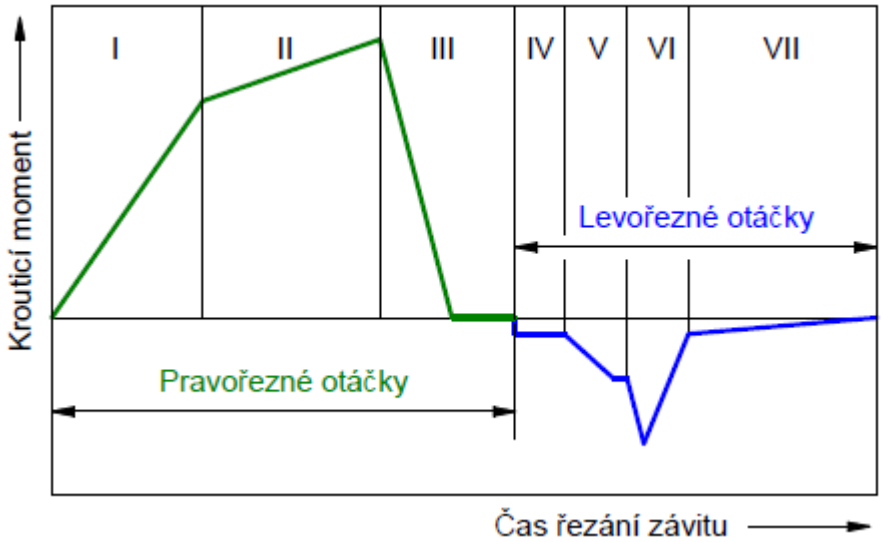
Na základě znalosti závislosti průřezu třísky na hloubce zařezání řezného kužele, lze vynést tuto závislost do příslušného grafu (obr. 2.5).



Obr. 2.5 Teoretický průběh plochy řezu v závislosti na hloubce závitníku

Z hlediska vyhotovení závitů je důležitý časový interval 2 (viz obr. 2.3), ve kterém je řezný kužel maticového závitníku plně zařezán do obráběného materiálu a nástroj je zatížen plným výkonem. Tato hodnota je po dobu řezání téměř konstantní. V reálném případě se mění v důsledku pasivních sil a opotřebením nástroje.

2.7 Schématické znázornění krouticího momentu při řezání závitu



Obr. 2.6 Teoretický průběh krouticího momentu při řezání závitu maticovým závitníkem

Tab. 2.4 Intervaly řezání závitu maticovým závitníkem

I.	Zařezání závitníku až do záběru všech náběhových zubů,
II.	Nárůst řezného momentu závitníku až do maxima,
III.	Zbrždění vřetene stroje až do jeho zastavení,
IV.	Začátek zpětného chodu vřetena až do dotyku hřbetu zubu s třískou následujícího břitu v otvoru,
V.	Odtržení třísky,
VI.	Stlačení kořene třísky, který zůstal po odstřižení,
VII.	Kluzné tření mezi závitníkem a obrobkem.

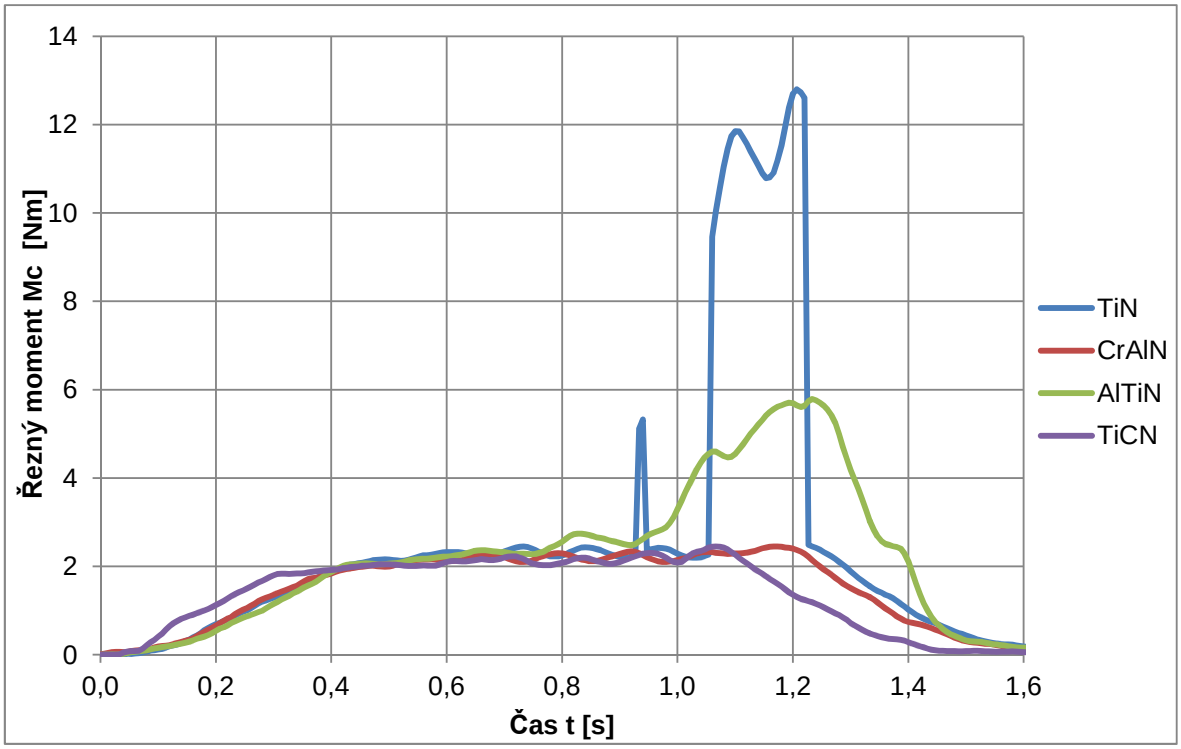
3 STATISTICKÝ ROZBOR VÝSLEDKŮ

Cílem experimentu bylo srovnání řezivosti maticových závitníků M6 povlakovaných metodou PVD. V průběhu zkoušek byly zaznamenávány průvodní jevy opotřebení nástrojů pomocí fotografií, dále pak časové závislosti průběhu krouticího momentu se statickým vyhodnocením. Při testech byly postupně použity nástroje s různými povlaky při neměnné poloze obrobku.

3.1 Analýza řezného momentu a statistické vyhodnocení

Pro vyhodnocení jednotlivých závislostí bylo nutné filtrovat zdrojová data záznamu řezného momentu. Velikost řezného momentu závisí především na průřezu třísky v závislosti na hloubce zařezání řezného kužele maticového závitníku. K separaci dat a znázornění závislostí byl použit program Microsoft Excel 2010.

Ze závislostí řezného momentu na čase (obr. 3.1) je zřejmé, jaký vliv mají jednotlivé typy povlaků na velikost řezného momentu. Na výsledné zatížení nástroje krouticím momentem mají zásadní vliv pasivní síly, kdy při použití nástrojů s totožnou geometrií, ale různým typem povlaku může rozdíl v zatížení činit téměř 80%. Vlivem opotřebení dochází ke ztrátě povlakové vrstvy, což má za následek zhoršení kluzných vlastností nástroje. Vlivem velkého tření poté nastává špatný odvod třísek z místa řezu a dochází tak k nárůstu řezného momentu.



Obr. 3.1 Grafické závislosti řezných momentů

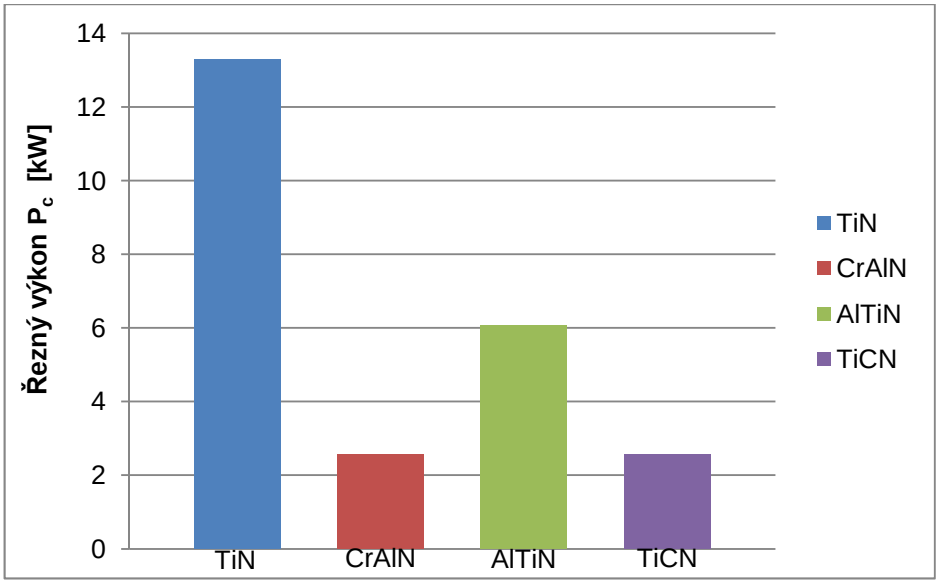
Testovaný maticový závitník A1 s povlakem TiN byl z hlediska zatížení nástroje vyhodnocen jako zcela nevhodný pro řezání závitů za daných podmínek do polotovaru z chrom-niklové oceli. Míra opotřebení překročila kritickou mez již při prvním vyhotovení závitu. Vlivem velkého opotřebení nastalo ve dvou místech ke skokovému nárůstu krouticího momentu. Hodnota krouticího momentu v kritickém místě dosahovala hodnoty 12,7 Nm, což je o 80% více než u testovaných závitníků A2 s povlakem CrAlN a A4 s povlakem TiCN. Hodnota řezného výkonu (viz obr. 3.2) vykazuje nárůst téměř o 82% vzhledem k testovaným závitníkům A2 a A4.

Maticová závitník A2 s povlakem CrAlN vzhledem k průběhu zatížení se jevil jako vhodný nástroj pro řezání závitů za daných podmínek. Maximální zatížení nástroje bylo spolu s nástrojem A4 nejmenší ze všech testovaných nástrojů. V průběhu řezného procesu nebyl zaznamenán žádný skokový nárůst řezného momentu a maximální hodnota dosahovala hodnoty 2,46 Nm a řezný výkon 2,58 kW.

Maximální hodnota testovaného závitníku A3 s povlakem AlTiN dosahovala hodnoty 5,79 Nm, což činí nárůst o 54% proti testovaným závitníkům A2 a A4. V porovnání s nevyhovujícím nástrojem A1 s povlakem TiN nedocházelo v průběhu řezání ke skokovým nárůstům zatížení.

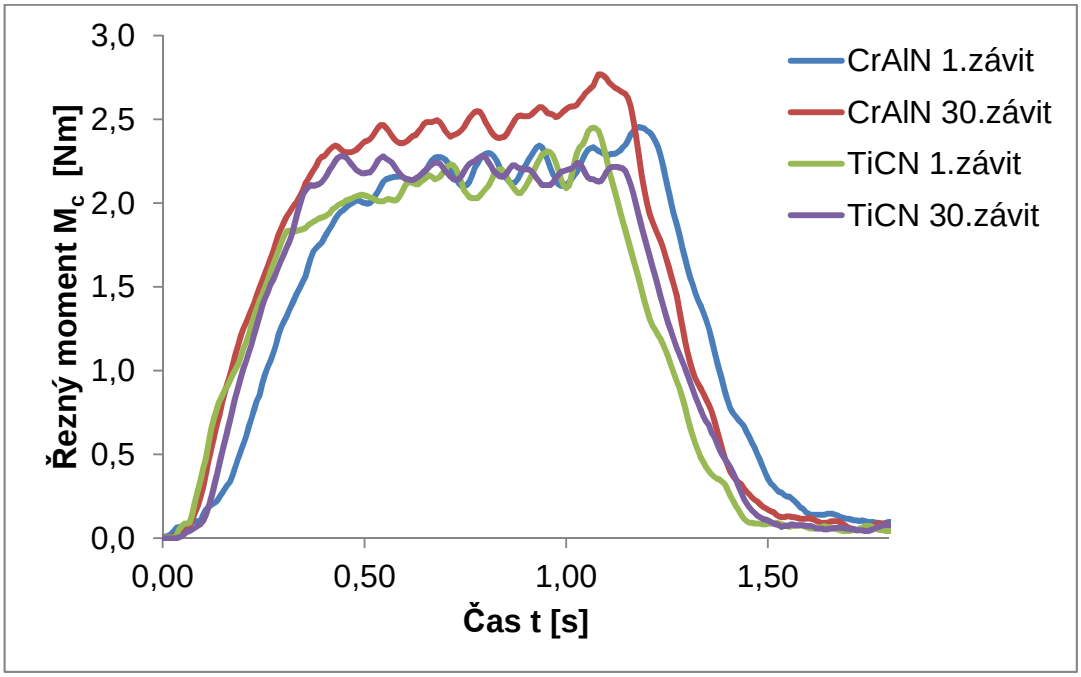
Z testovaných závitníků vykazoval nejmenší zatížení při řezném procesu závitník A4 s povlakem TiCN. Spolu se závitníkem A2 se jeví jako vhodná volba pro řezání závitů za daných podmínek. Testované nástroje s povlaky CrAlN a TiCN vykazují nejnižší hodnoty řezného momentu, které snižují celkovou energetickou náročnost obrábění.

Naopak zcela nevhodným nástrojem pro řezání závitu za daných podmínek se jeví nástroj A1 s povlakem TiN. Maximální hodnota řezného momentu několikanásobně převyšuje hodnoty při použití nástroje s povlakem CrAlN a TiCN. Nástroj s povlakem TiN je zcela nevyhovující vzhledem k vysokému zatížení nástroje a vzhledem k velmi vysoké energetické náročnosti celého řezného procesu.



Obr. 3.2 Grafické znázornění řezných výkonů

Jelikož testované závitníky A2 a A4 s povlaky CrAlN a TiCN vykazovaly velice podobný průběh zatížení a téměř totožné hodnoty řezného momentu, bylo zapotřebí podrobit tyto dva závitníky další analýze. Jednou z možností je analýza průběhu a zatížení řezného procesu v závislosti na počtu vyřezaných závitů (viz obr. 3.3).



Obr. 3.3 Grafická závislost řezných momentů při řezání 30. závitu

Z dané závislosti vyplývá, že testovaný nástroj A4 s povlakem TiCN je zatěžován rovnoměrněji než nástroj A2 s povlakem CrAlN. V konečné fázi řezání závitu dochází u nástroje s povlakem CrAlN k nárůstu řezného momentu vlivem opotřebení. Rozdíl činí téměř 18%. Ze zaznamenaného zatížení plyne, že testovaný nástroj A2 se rychleji opotřebovává a dochází tak ke ztrátě povlakované vrstvy rychleji než u nástroje A4, který se jeví jako nejlepší volbou pro řezání závitů za daných podmínek ze všech testovaných závitníků.

3.2 Analýza zpětného chodu nástroje

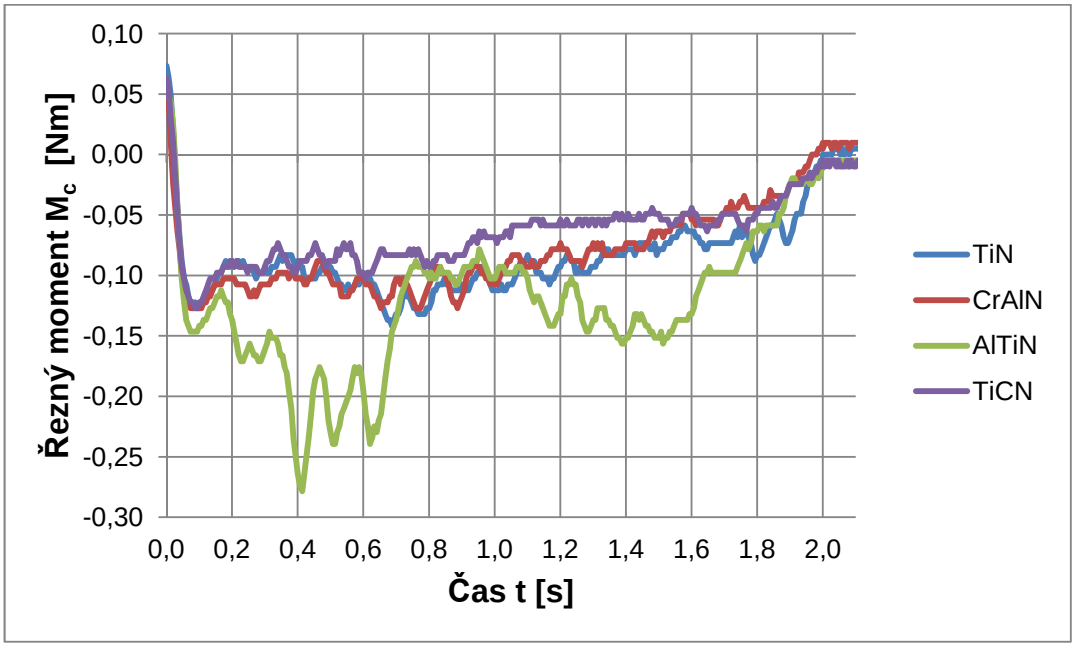
Důležitým aspektem řezného procesu je zpětný chod nástroje z již vyřezaného závitu. Dochází tak ke změně pravořezných otáček na levořezné, odtržení třísky a poté ke stlačení kořene třísky, který zůstal po odstřižení. Plynulý zpětný chod nástroje je jedním z kritérií pro kvalitu závitu. Proto je nutné věnovat pozornost zatížení nástroje i při zpětném chodu, které mnohdy indikuje špatné podmínky při řezání závitu, a mají za následek degradaci kvality vyhotoveného závitu.

Z grafické závislosti zatížení nástrojů při zpětném chodu (viz obr. 3.4) zcela jasně vyplývá, že nástroj A3 s povlakem AlTiN vykazuje nejvyšší momentové zatížení nástroje. V oblasti odtržení a stlačení třísky dochází k nežádoucím skokovým

nárůstům momentového zatížení nástroje až na hodnotu 2,78 Nm. Rozdíl vzhledem k zatížení vzhledem k dalším testovaným nástrojům je 49%. V konečné fázi, kdy nástroj vyjíždí z vyřezaného závitu, nastává pouze kluzné tření mezi závitníkem a obrobkem, závitník A3 také nevyhovuje, dochází k nárůstu zatížení nástroje vlivem špatného tření.

Nástroj A1 s povlakem TiN, vykazoval při zpětném chodu velice příznivý průběh zatížení nástoje. V konečné oblasti kluzného tření mezi nástrojem a obrobkem dochází ke skokovým nárůstům zatížení, které je zapříčiněno horšími kluznými vlastnostmi vrstvy TiN.

Nejlepších výsledků bylo dosaženo při testování závitníků A2 a A4, které měly příznivý průběh zatížení a hodnoty řezného momentu i při řezání závitu.

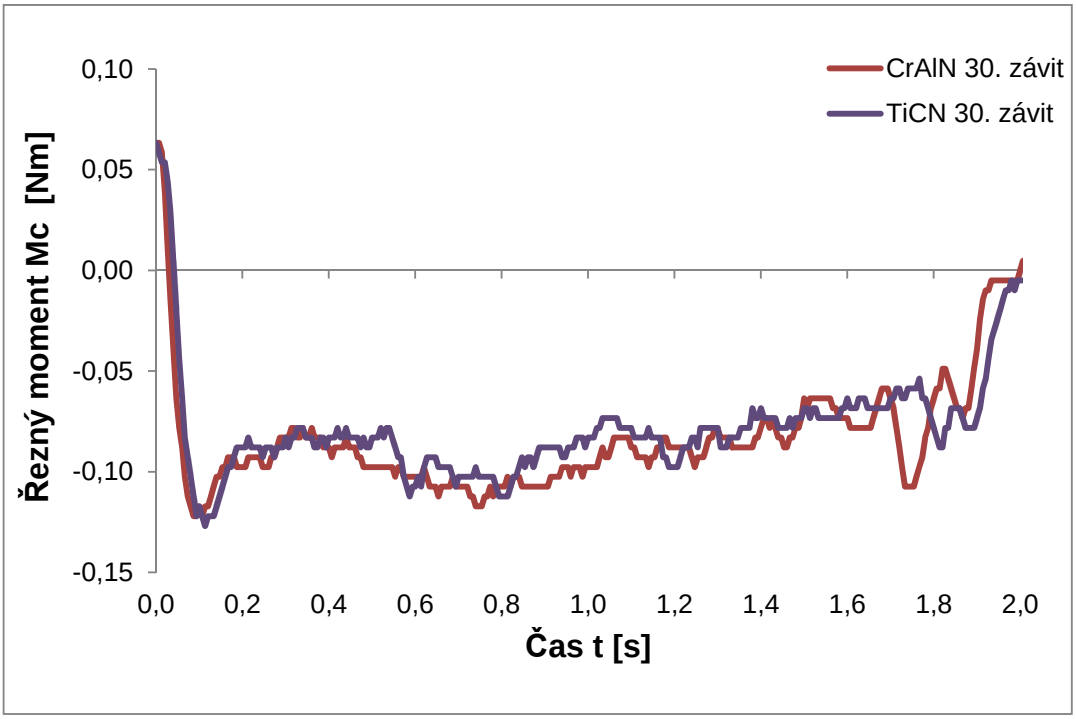


Obr. 3.4 Grafické závislosti zatížení při zpětném chodu nástroje

S ohledem na výsledný průběh zatížení nástrojů při zpětném chodu bylo nutné pro vyhodnocení nejvhodnějšího nástroje dále analyzovat závitníky A2 a A4, a to v závislosti na počtu vyřezaných závitů.

Z vyhodnocení grafické závislosti (obr. 3.5) vyplývá, že nižší momentové zatížení nástroje je při použití závitníku A4 s povlakem TiCN. Z grafu je rovněž patrné, že v oblasti kluzného tření mezi nástrojem a obrobkem dochází u obou typů povlaků ke skokovým nárůstům zatížení, v důsledku opotřebení nástrojů.

V souvislosti hodnocení nástrojů vzhledem k průběhu zatížení při zpětném chodu dosahoval nástroj A4 s povlakem TiCN nejpříznivějších výsledků.



Obr. 3.5 Grafické závislosti zatížení při zpětném chodu nástroje 30. závitu

4 ZÁVĚR

Pro testování byly použity maticové závitníky M6 s aplikací PVD povlaků. Experiment probíhal při konstantní řezné rychlosti v_c=10 m/min, řezná kapalina 10% Cimperial HD 801-03, 60 barů a všechny závity byly řezány do materiálu z chrom-niklové oceli austenitické oceli X5CrNi 18-10. Z důvodu zvýhodnění či poškození výrobce byly testované závitníky označeny následovně:

- A1 s PVD povlakem TiN,
- A2 s PVD povlakem CrAlN,
- A3 s PVD povlakem AlTiN,
- A4 s PVD povlakem TiCN.

Z provedeného testování a z průběhu silového zatížení můžeme vyvodit tyto závěry:

- experimentální zkoušky proběhly podle obvyklých procedur na ÚST FSI VUT v Brně,
- během testování nedošlo k nějaké anomálii, havárii nebo jiným problémům,
- průběh řezného momentu pro závitníky A4 s povlakem TiCN prokázal hladké řezání, žádné zadírání závitníků při zpětném chodu,
- závitníky jsou velmi citlivé k adheznímu ulpívání částic obráběného materiálu na hřbetě a tento jev způsobuje jejich předčasné zadírání,

- k tomuto jevu docházelo při použití nástroje A3 s povlakem AlTiN,
- zpětný chod testovaných závitníků A1, A2 a A4 proběhl bez zadírání,
- jako nevhodný nástroj se jevil pro tuto aplikaci A1 s povlakem TiN, skokový nárůst zatížení při řezání činil 80% ve srovnání s nástroji A2 a A4,
- při testování závitníku A2 s povlakem CrAlN docházelo při řezném procesu ke skokovým nárůstům při řezání jednotlivých závitů, hodnota řezného momentu se pohybovala od 2,5 Nm až 3,8 Nm, u nástroje A4 byl průběh řezání hladký, což dokazují minimální rozdíly mezi zatížením při řezání jednotlivých závitů, hodnota řezných momentů se pohybovala v rozmezí 2,2 Nm až 2,8 Nm,
- nejnižší energetická náročnost řezného procesu byla dosažena při použití závitníků A2 a A4, řezný výkon dosahoval hodnot 2,45 kW a 2,46 kW, při použití nástroje A1 byla energetická náročnost řezného procesu nejvyšší, řezný výkon dosahoval hodnot 12,7 kW a při testování závitníku A3 byl řezný výkon 5,79 kW,
- jako nejvhodnější typy povlaků pro řezání závitů za daných podmínek je možné vyhodnotit povlak TiCN a CrAlN,
- momentové zatížení nástroje A3 s povlakem AlTiN při řezání závitu bylo o 57% vyšší než u nástrojů A2 a A4,
- průběh řezného momentu po třiceti vyřezaných závitech byl hladký při použití nástroje A4, závitník A2 vykazoval nárůst řezného momentu o 18%,
- průběh zatížení při zpětném chodu po třiceti vyřezaných závitech byl hladký při použití nástroje A4, s mírnými skokovými výkyvy v oblasti kluzného tření mezi nástrojem a obrobkem,
- tyto testy prokázaly ze všech zkoušek nejvýhodnější kombinaci řezného nástroje A4 a povlaku TiCN,
- pro zpřesnění, potvrzení nebo vyvrácení dosažených výsledků je nutné provádět testování více nástrojů od různých výrobců a provádět další zkoušky dlouhodobé i krátkodobé.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.

2. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

3. ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění* [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, 1 CD-ROM [cit. 2014-02-20]. ISBN 978-80-248-2533-5.

4. ČEP, Robert. *Skripta Technologie II 1dil* [online]. [cit. 2014-03-23]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf

5. DORMER. *Technická příručka 2013* [online]. 2013. vyd. [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: www.mav.cz/dormer/Technicka_prirucka_2013.pdf

6. DE VOS, P. *Příručka pro technology - Opotřebení se nevyhneme!* [online]. MM - Průmyslové spektrum, 2012 [cit. 2014-03-2]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html

7. LEINVEBER,J. a VAVRA, P. Strojnické tabulky. 1.vyd. ALBRA pedagogické nakladatelství, 2003. 865s. ISNB 80-86490-74-2.

8. SANDVIK COROMANT. *Výroba závitů - UŽIVATELSKÁ PŘÍRUČKA* [online]. 2010 [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/technical%20guides/cs-cz/C-2920-031.pdf

9. HUMÁR, A. *Technologie I – Technologie obrábění – 2. část.* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004. 95 s. [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf>.

10. ČEP, Robert. *Skripta Technologie II 2.díl.* [online]. [cit. 2014-03-23]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf

11. NAREX ŽDÁNICE. *Katalog 27.* [online]. [cit. 2014-04-5]. Dostupné z: http://www.narexzd.cz/files/catalogue27.pdf

12. WALTER TOOLS. *Walter Prototyp: Produktová příručka Závitování.* [online]. 2012 [cit. 2014-04-7]. Dostupné z: www.walter-tools.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/manuals/cs-cz/handbook-prototyp-threading-2012-cz.pdf

13. Keramika [online] [cit. 2012-4-28]
Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/download/rezna%20keramika08-09.pdf>.

14. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje.* [online]. 2006 [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf

15. BOROVAN, Petr. *Rychlořezné nástroje.* [online]. Technický týdeník, 2012 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: http://www.t-support.cz/t-support/?rubrika=1450

16. BOHDAN BOLZANO. *Zpracování nástrojových ocelí.* [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojovky/zpracovaniNO/

17. AB SANDVIK COROMANT. *Všeobecné soustružení.* [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/catalogue/CZE/MC_2009_Klick_CZE_A.pdf>.

18. BOROVAN, Petr. *Moderní řezné materiály 1. část.* [online]. Technický týdeník, 2012 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: http://www.t-support.cz/t-support/?rubrika=1451

19. ZINDULKA, Ondřej. *Moderní metody povlakování nástrojů.* MM – Průmyslové spektrum. 10/2004 [online]. 2004, [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-metody-povlakovani-nastroju.html

20. MM – Průmyslové spektrum. *Moderní metody povlakování nástrojů.* [online]. 7/2001, [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-metody-povlakovani-nastroju.html

21. VÚHŽ A.S. *Povlakovací centrum* [online]. [cit. 2014-04-6]. Dostupné z: http://www.vuhz.cz/media/povlaky-CVD-a-PACVD/VUHZ_povlakovacicentrum_brozurka.pdf

22. ZEMČÍK, O. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. učební texty vysokých škol.BRNO: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002. 193 s.

23. ŠTULPA, Miloslav. *CNC: obráběcí stroje a jejich programování*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 126 s. ISBN 80-730-0207-8.

24. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ S.R.O. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. české vyd. Překlad Miroslav Kudela. Praha: Scientia, c1997, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 91-972-2994-6.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CBN	[-]	kubický nitrid boru
CNC	[-]	computer numerical control
CVD	[-]	chemical vapour deposition
DLC	[-]	diamond - like carbon
HSS	[-]	high speed steel
PACVD	[-]	plasma assisted chemical vapour deposition
PKB	[-]	kubický nitrid boru
PKD	[-]	polykrystalický diamant
PVD	[-]	physical vapour deposition
SK	[-]	slinutý karbid

Symbol	Jednotka	Popis
A_c	[J]	práce řezání
A_d	[J]	práce disperzní
A_D	[mm^2]	jmenovitá plocha řezu
A_e	[J]	práce pružné deformace
A_f	[J]	práce na zajištění posuvového pohybu
A_p	[J]	práce plastické deformace
$A_{tč}$	[J]	práce tření odcházející třísky
A_{th}	[J]	práce tření na hřbetě nástroje
a_p	[mm]	šířka záběru ostří
C_{Fc}	[-]	konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu
C_{Ff}	[-]	konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu

C_{Fp}	[-]	konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu
f	[mm]	posuv na otáčku
F_c	[N]	řezná síla
F_e	[N]	celková řezná síla
F_f	[N]	posuvová síla
F_p	[N]	pasivní síla
h_D	[mm]	jmenovitá tloušťka řezu
h_{Dc}	[mm]	tloušťka třísky
k_c	[MPa]	měrná řezná síla
l_k	[mm]	délka řezného kužele maticového závitníku
l_z	[mm]	hloubka řezání maticového závitníku
M_c	[Nm]	řezný moment
n	[min^{-1}]	otáčky
P_c	[kW]	řezný výkon
Psh	[-]	rovina střihu
Q	[J]	teplo
Q_α	[J]	teplo vzniklé v oblasti mezi hřbetem nástroje a plochou obrobku
Q_n	[J]	teplo odvedené nástrojem
Q_o	[J]	teplo odvedené obrobkem
Q_{pe}	[J]	teplo vzniklé v oblasti plastických deformací
Q_{pr}	[J]	teplo odvedené prostředím
Q_t	[J]	teplo odvedené třískou
Q_γ	[J]	teplo vzniklé v oblasti sekundární plastické deformace
v_c	[$m \cdot min^{-1}$]	řezná rychlost

v_e	[m·min^{-1}]	rychlost řezného pohybu
v_f	[m·min^{-1}]	posuvová rychlost
x_{Fc}	[-]	exponent vyjadřující vliv šířky záběru ostří
x_{Fp}	[-]	exponent vyjadřující vliv šířky záběru ostří
x_{Ff}	[-]	exponent vyjadřující vliv šířky záběru ostří
y_{Fc}	[-]	exponent vyjadřující vliv posuvu na otáčku
y_{Ff}	[-]	exponent vyjadřující vliv posuvu na otáčku
y_{Fp}	[-]	exponent vyjadřující vliv posuvu na otáčku
γ_o	[º]	nástrojový ortogonální úhel čela
δ_o	[º]	nástrojový ortogonální úhel řezu
κ_r	[º]	úhel řezného kužele
Δp	[mm]	tloušťka elementu třísky
Δs	[mm]	posunutí elementu třísky
Φ	[º]	úhel roviny střihu

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Tabulka hodnot – Průřez třísek v jednotlivých časových fázích řezání závitu

Příloha 2 Grafické závislosti zatížení v závislosti na čase pro závitníky A1 a A2 s povlaky TiN a CrAlN

Příloha 3 Grafické závislosti zatížení v závislosti na čase pro závitníky A3 a A4 s povlaky AlTiN a TiCN

Příloha 4 Grafické závislosti zatížení v závislosti na čase a počtu vyřezaných závitů pro závitníky A2 a A4 s povlaky CrAlN a TiCN

Příloha 5 Grafické závislosti zatížení v závislosti na čase pro testované závitníky A1 a A2 ze zdrojových dat bez separace

Příloha 6 Grafické závislosti zatížení v závislosti na čase pro testované závitníky A3 a A4 ze zdrojových dat bez separace

Příloha 7 Fotodokumentace - závitník A1 po testování a A2 před testováním

Příloha 8 Fotodokumentace - závitník A2 po testování a A3 před testováním

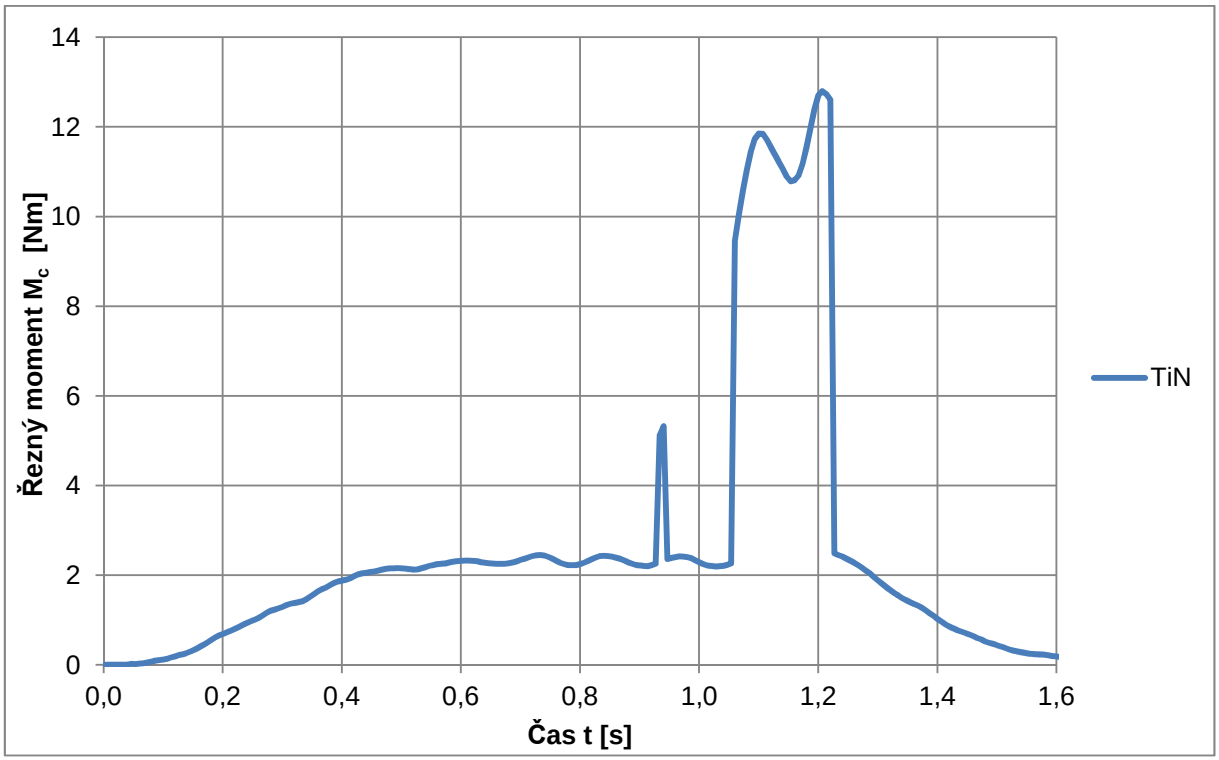
Příloha 9 Fotodokumentace - závitník A3 po testování a A4 před testováním

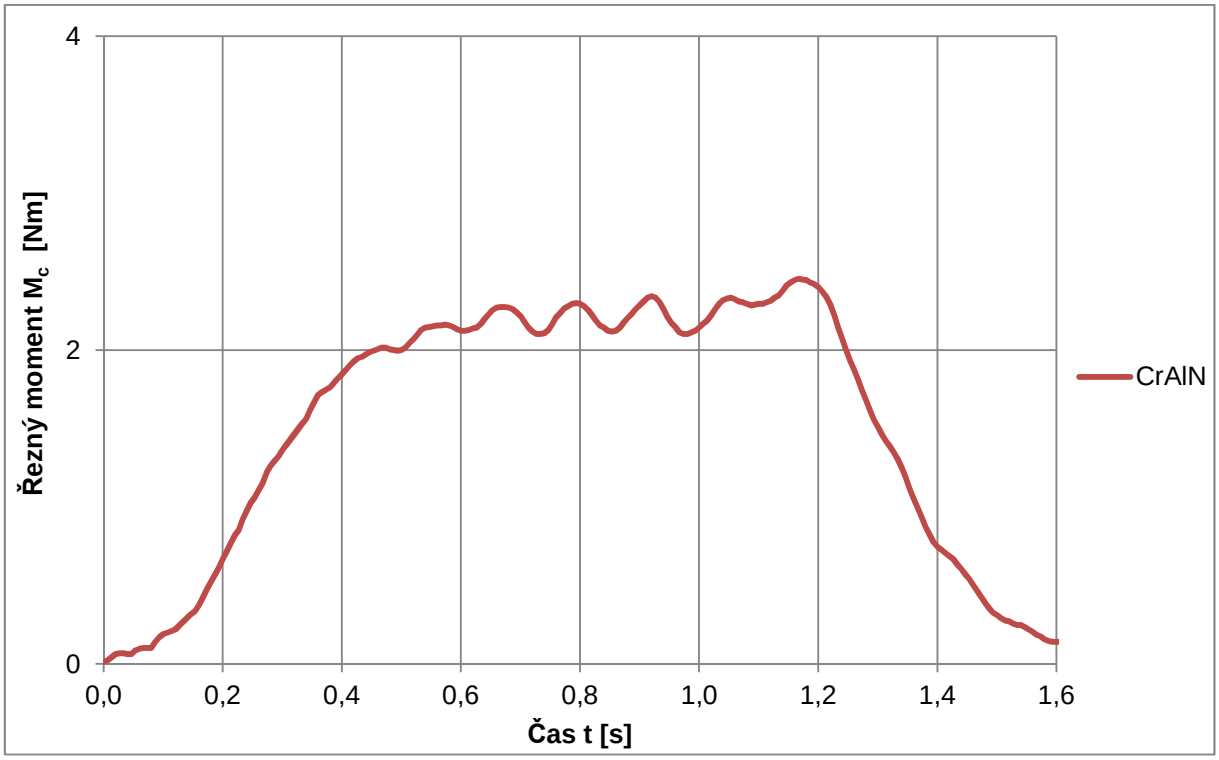
Příloha 10 Fotodokumentace - závitník A4 po testování

PŘÍLOHA 1

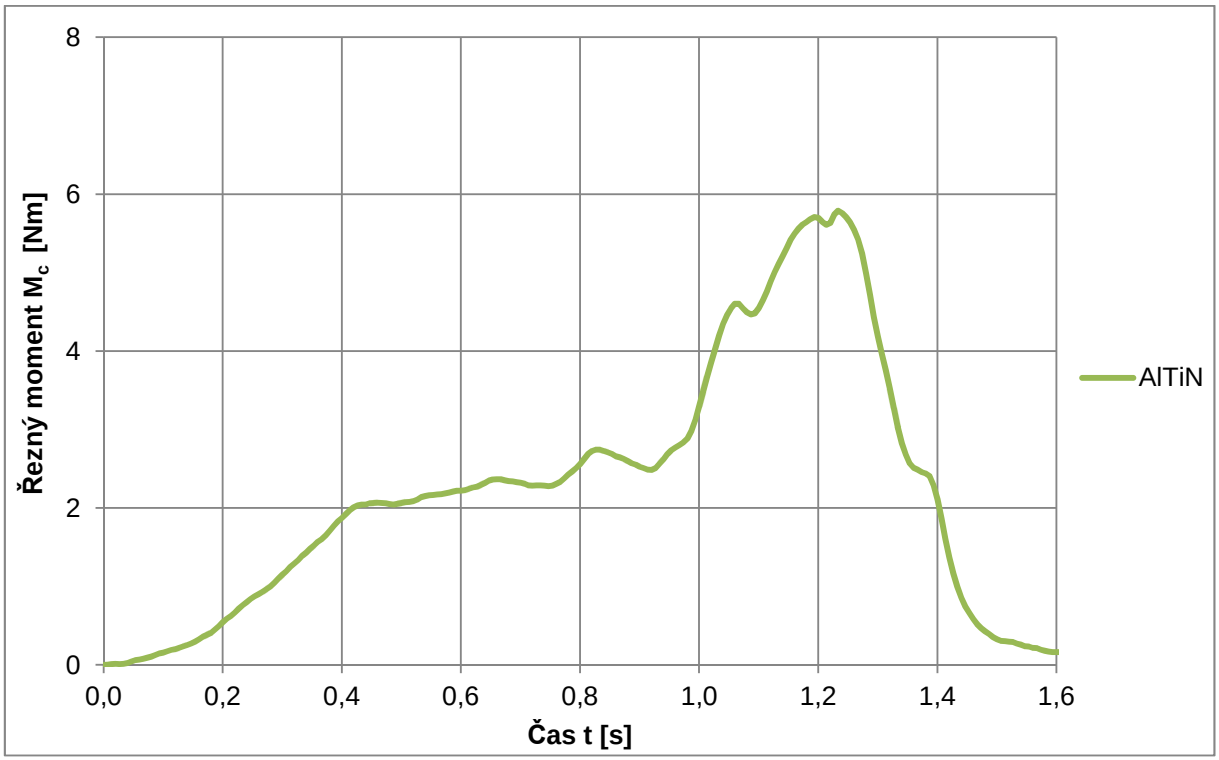
$l_z \in \langle 0, l_k)$	A_{D1}	$l_z \in \langle l_k, L \rangle$	A_{Dmax}	$l_z \in (L, L+l_k \rangle$	A_{D2}
0	0	5	0,433	10	0,412548
0,2	0,027652007	5,2	0,433	10,2	0,38541
0,4	0,054391694	5,4	0,433	10,4	0,351597
0,6	0,080219061	5,6	0,433	10,6	0,326724
0,8	0,105134108	5,8	0,433	10,8	0,291576
1	0,129136836	6	0,433	11	0,264523
1,2	0,152227243	6,2	0,433	11,2	0,23586
1,4	0,174405331	6,4	0,433	11,4	0,216571
1,6	0,195671098	6,6	0,433	11,6	0,185413
1,8	0,216024546	6,8	0,433	11,8	0,16468
2	0,235465674	7	0,433	12	0,14553
2,2	0,253994481	7,2	0,433	12,2	0,12928
2,4	0,271610969	7,4	0,433	12,4	0,108743
2,6	0,288315137	7,6	0,433	12,6	0,093678
2,8	0,304106985	7,8	0,433	12,8	0,079158
3	0,318986514	8	0,433	13	0,066971
3,2	0,332953722	8,2	0,433	13,2	0,05125
3,4	0,34600861	8,4	0,433	13,4	0,0394893
3,6	0,358151179	8,6	0,433	13,6	0,029832
3,8	0,369381427	8,8	0,433	13,8	0,021486
4	0,381546	9	0,433	14	0,014456
4,2	0,39245428	9,2	0,433	14,2	0,008458
4,4	0,40245119	9,4	0,433	14,4	0,0042686
4,6	0,41165425	9,6	0,433	14,6	0,00165962
4,8	0,4191642	9,8	0,433	14,8	0,00015235
4,9	0,42148622	9,9	0,433	15	0

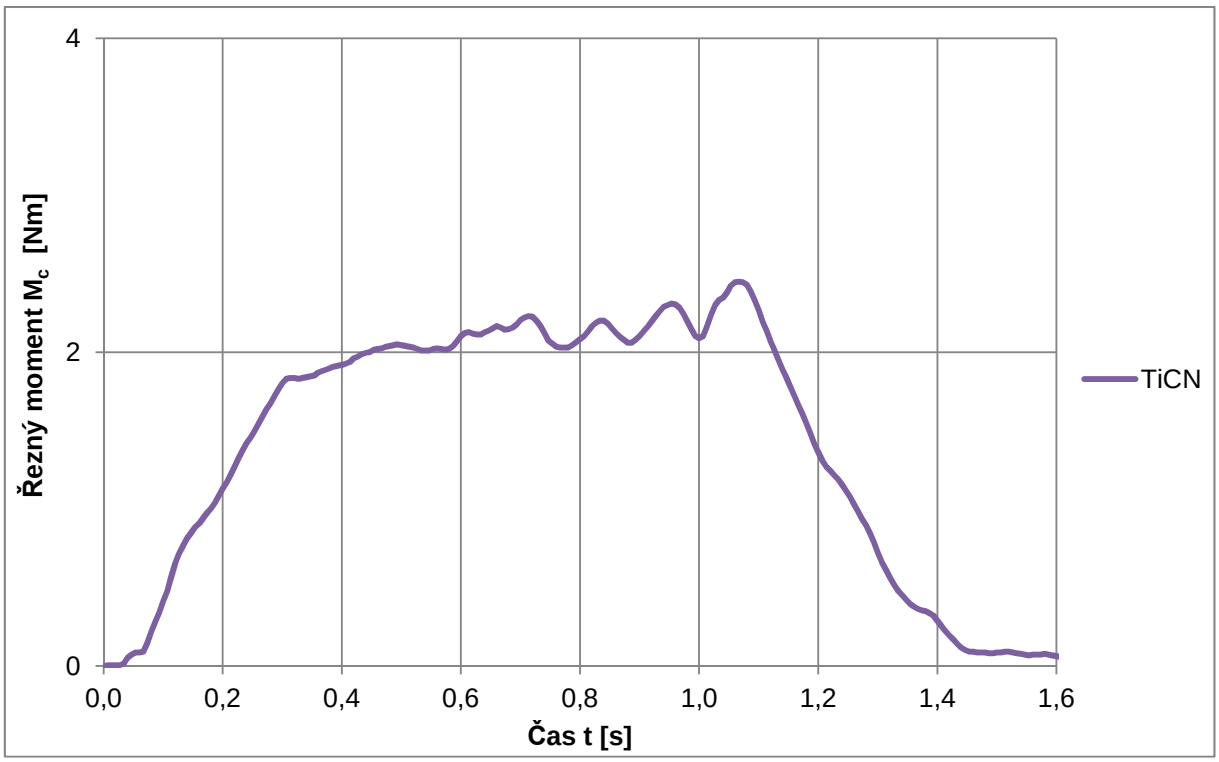
PŘÍLOHA 2


14
12
10
8
6
4
2
0
Řezný moment Mc [Nm]
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
Čas t [s]
TiN

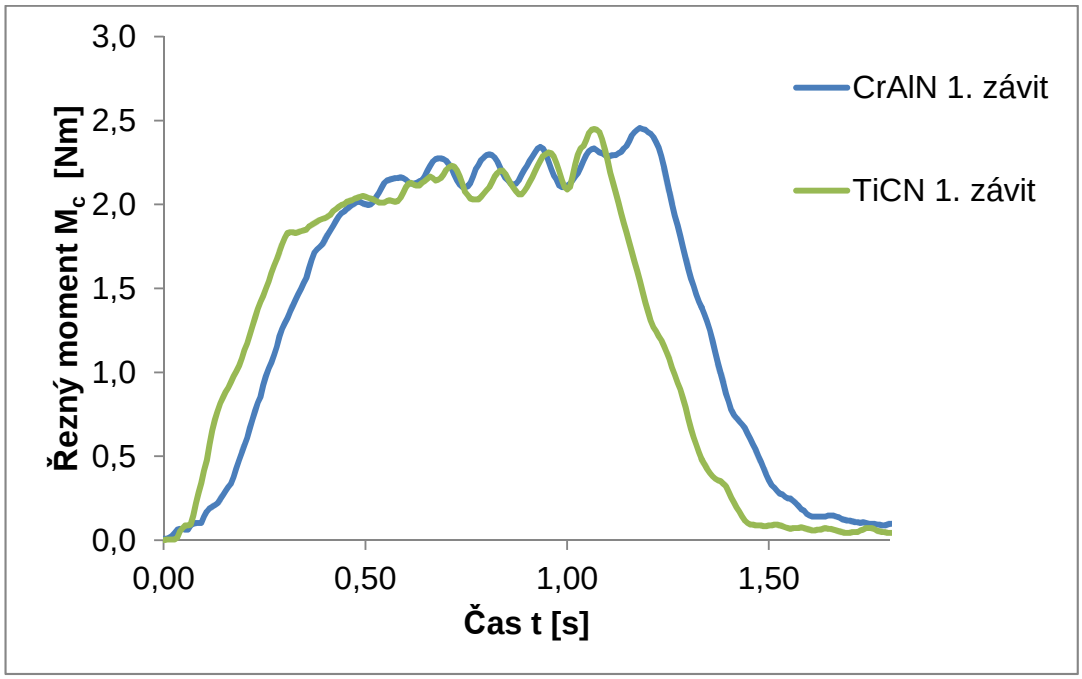

4
2
0
Řezný moment Mc [Nm]
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
Čas t [s]
CrAlN

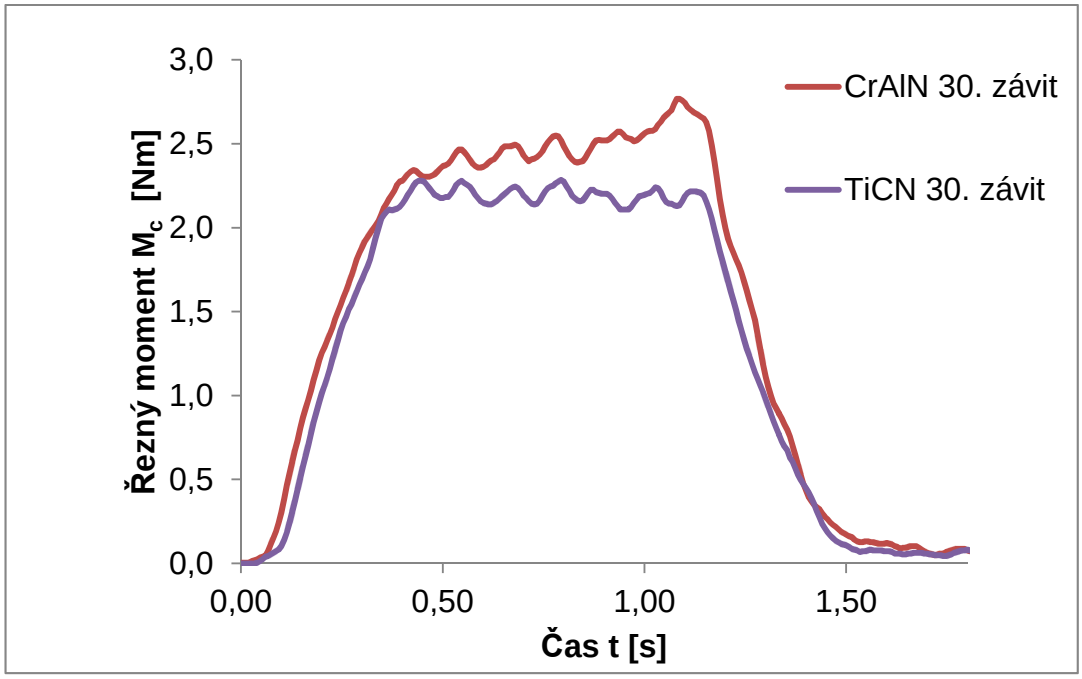
PŘÍLOHA 3


8
6
4
2
0
Řezný moment M_c [Nm]
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
Čas t [s]
AlTiN

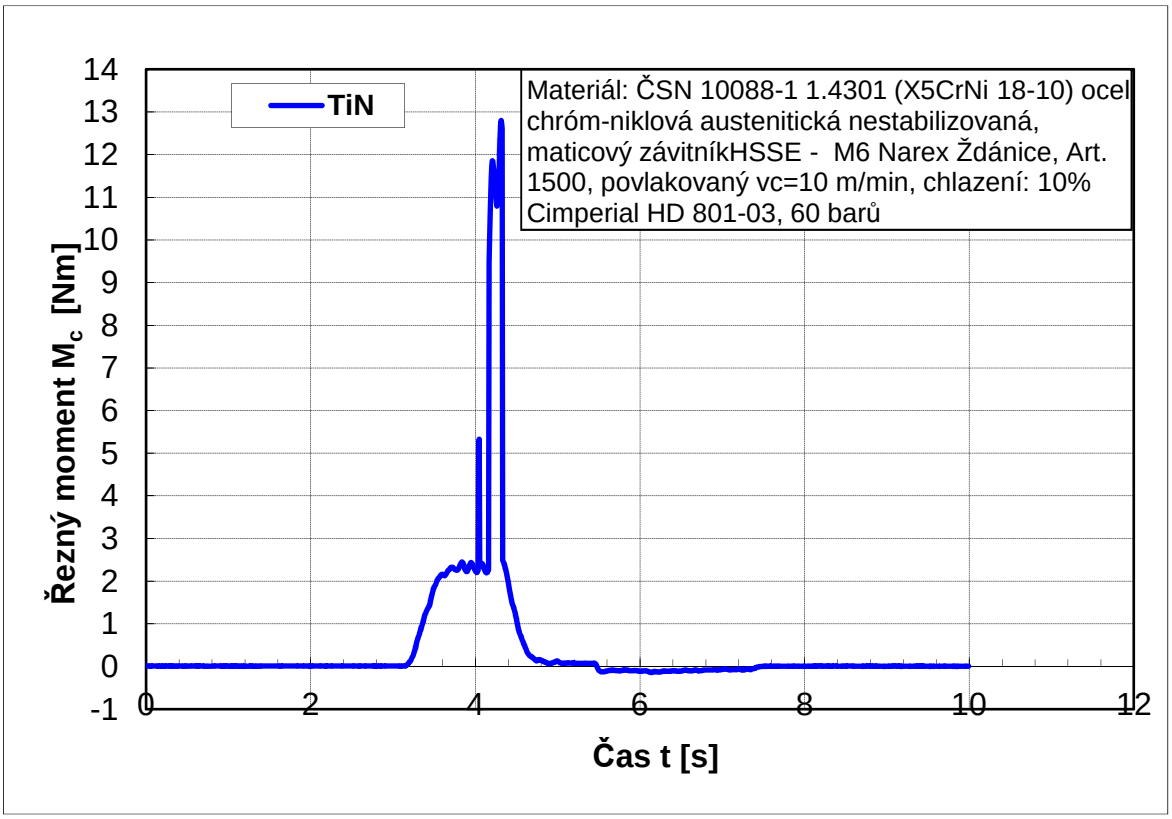

4
2
0
Řezný moment M_c [Nm]
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
Čas t [s]
TiCN

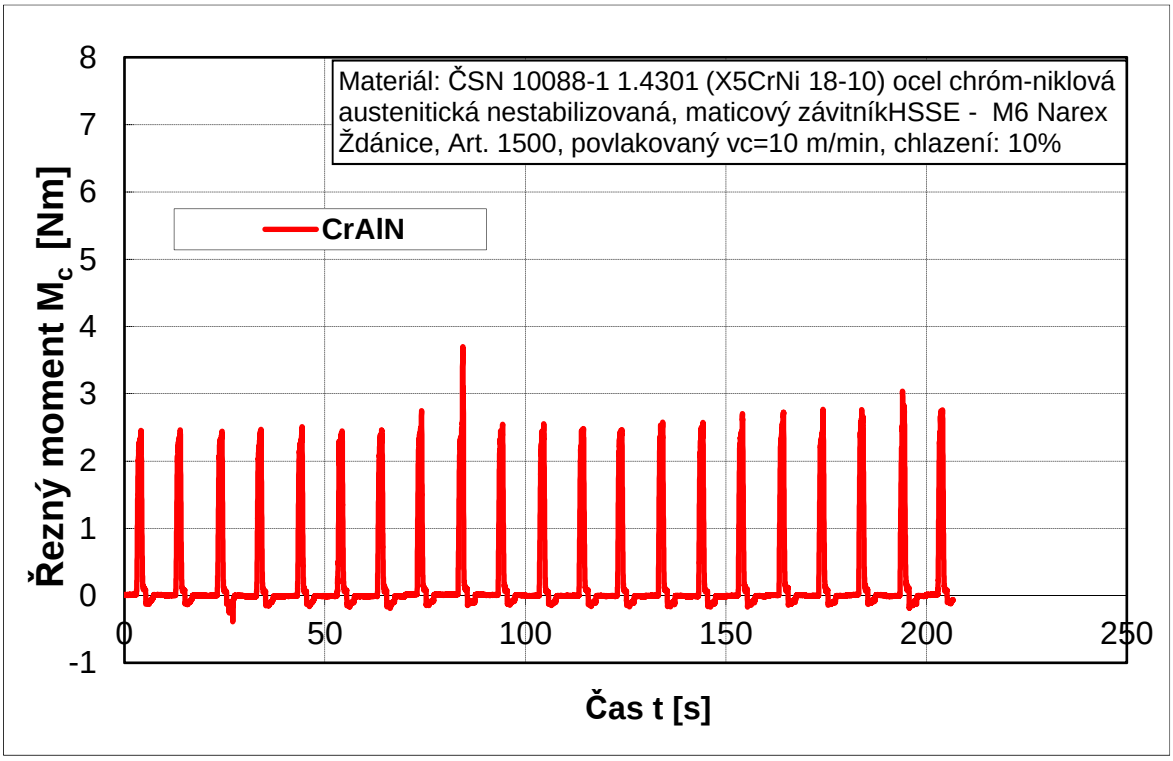
PŘÍLOHA 4


3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
Řezný moment Mc [Nm]
0,00
0,50
1,00
1,50
Čas t [s]
CrAlN 1. závit
TiCN 1. závit

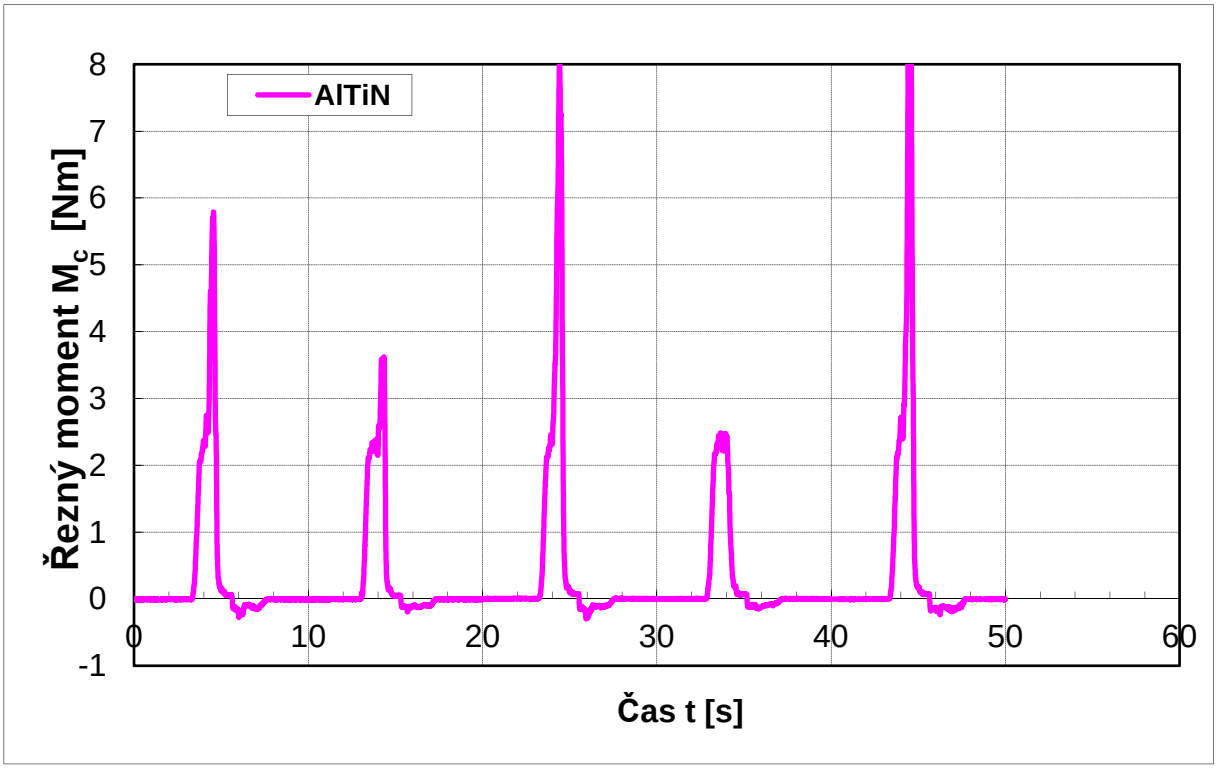

3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
Řezný moment Mc [Nm]
0,00
0,50
1,00
1,50
Čas t [s]
CrAlN 30. závit
TiCN 30. závit

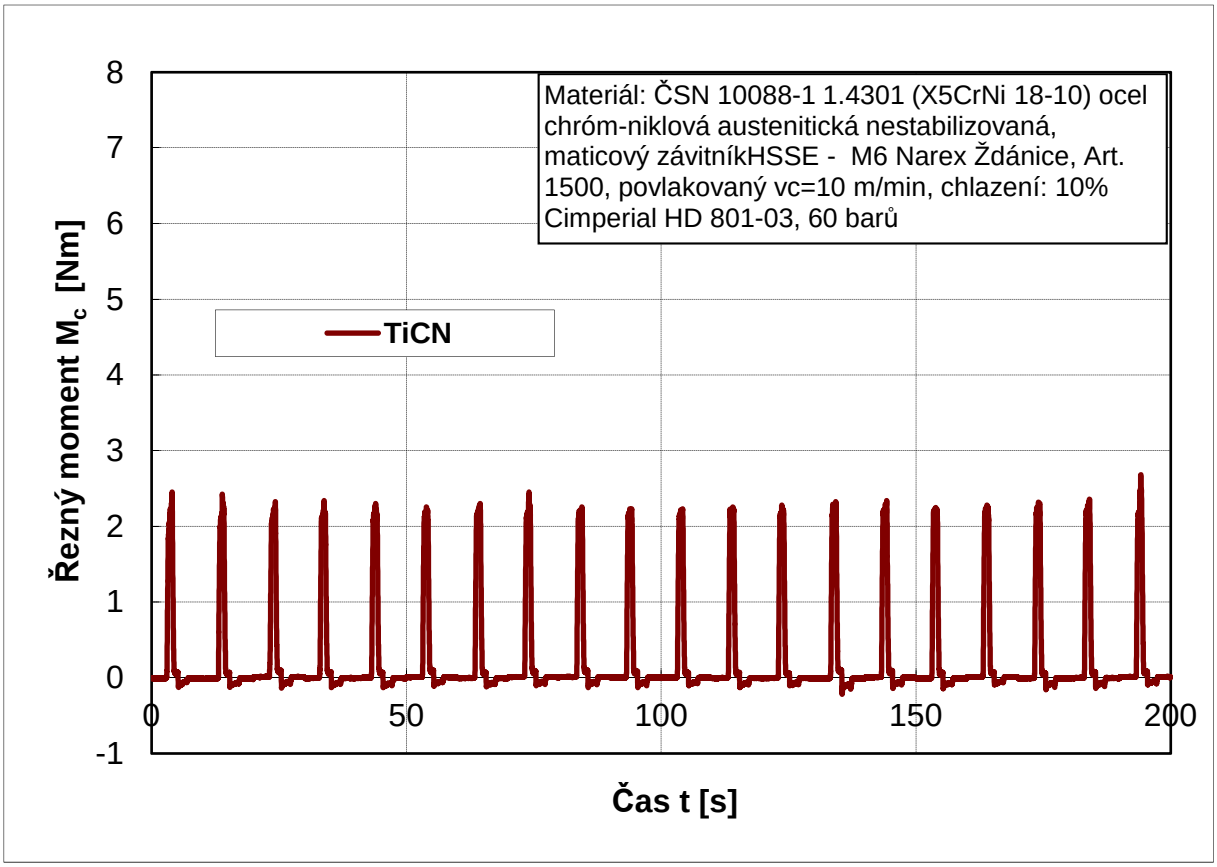
PŘÍLOHA 5


TiN
Materiál: ČSN 10088-1 1.4301 (X5CrNi 18-10) ocel chróm-niklová austenitická nestabilizovaná, maticový závitníkHSSE - M6 Narex Ždánice, Art. 1500, povlakovaný vc=10 m/min, chlazení: 10% Cimperial HD 801-03, 60 barů
Řezný moment M_c [Nm]
Čas t [s]
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
-1
0
2
4
6
8
10
12


CrAlN
Materiál: ČSN 10088-1 1.4301 (X5CrNi 18-10) ocel chróm-niklová austenitická nestabilizovaná, maticový závitníkHSSE - M6 Narex Ždánice, Art. 1500, povlakovaný vc=10 m/min, chlazení: 10%
Řezný moment M_c [Nm]
Čas t [s]
8
7
6
5
4
3
2
1
0
-1
0
50
100
150
200
250

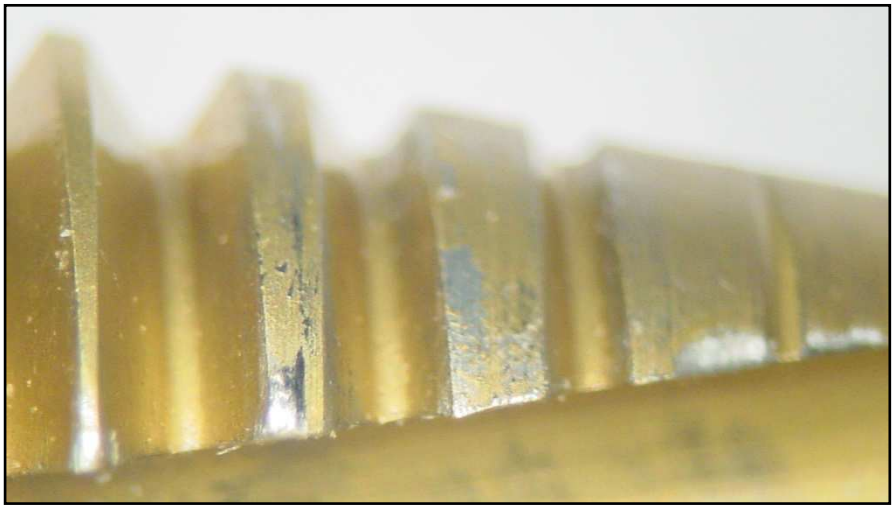
PŘÍLOHA 6


AlTiN
Řezný moment M_c [Nm]
Čas t [s]
8
7
6
5
4
3
2
1
0
-1
0
10
20
30
40
50
60

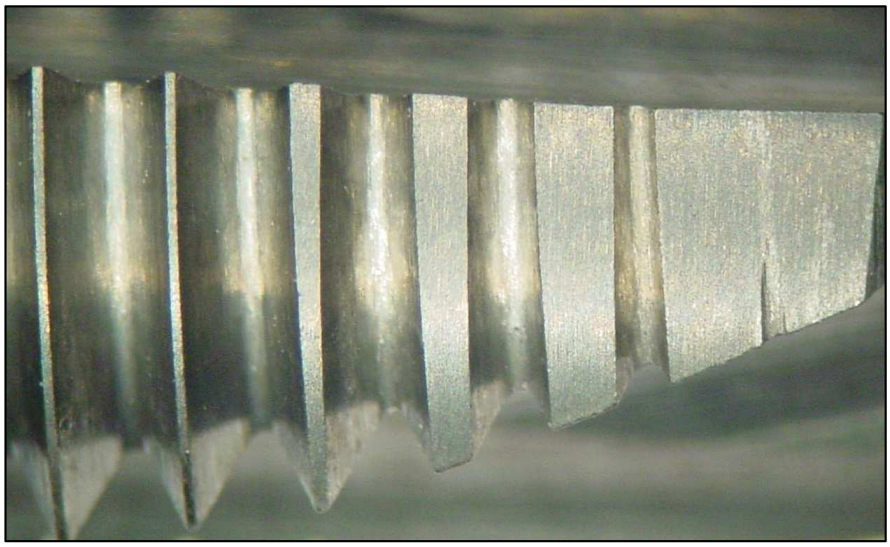

Materiál: ČSN 10088-1 1.4301 (X5CrNi 18-10) ocel chróm-niklová austenitická nestabilizovaná, maticový závitníkHSSE - M6 Narex Ždánice, Art. 1500, povlakovaný vc=10 m/min, chlazení: 10% Cimperial HD 801-03, 60 barů
TiCN
Řezný moment M_c [Nm]
Čas t [s]
8
7
6
5
4
3
2
1
0
-1
0
50
100
150
200

PŘÍLOHA 7

Vzorek A1 s povlakem TiN po testování

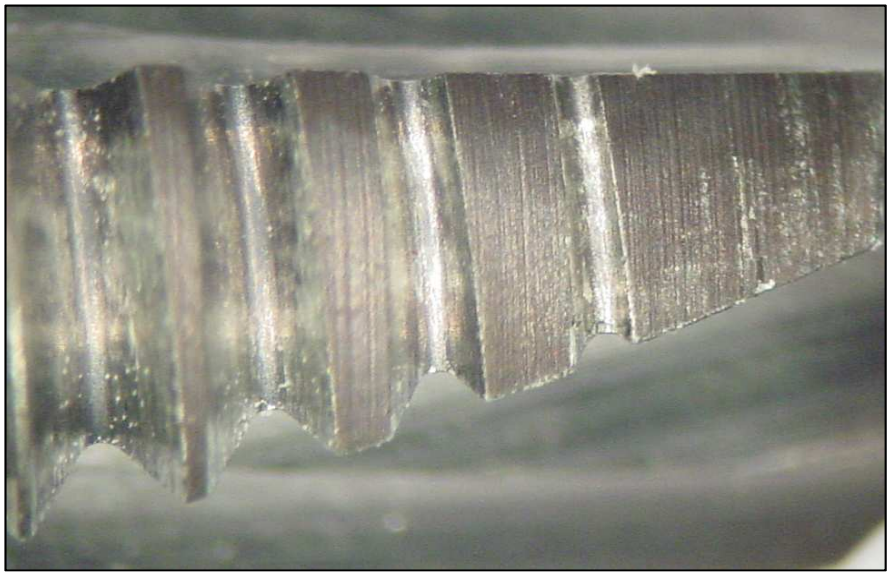


Vzorek A2 s povlakem CrAlN před testováním



PŘÍLOHA 8

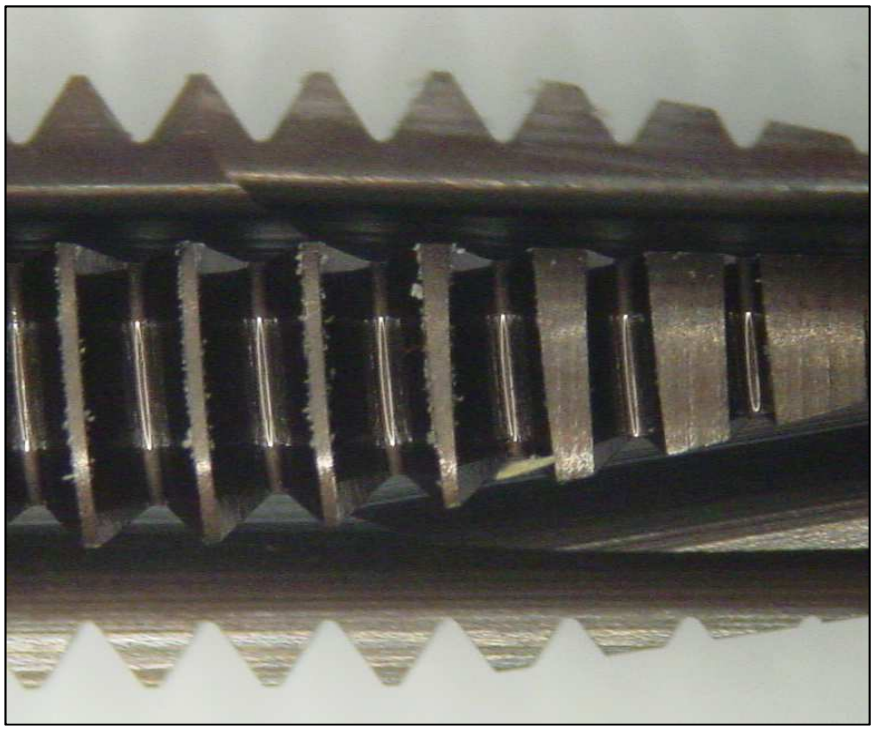
Vzorek A2 s povlakem CrAlN po testování



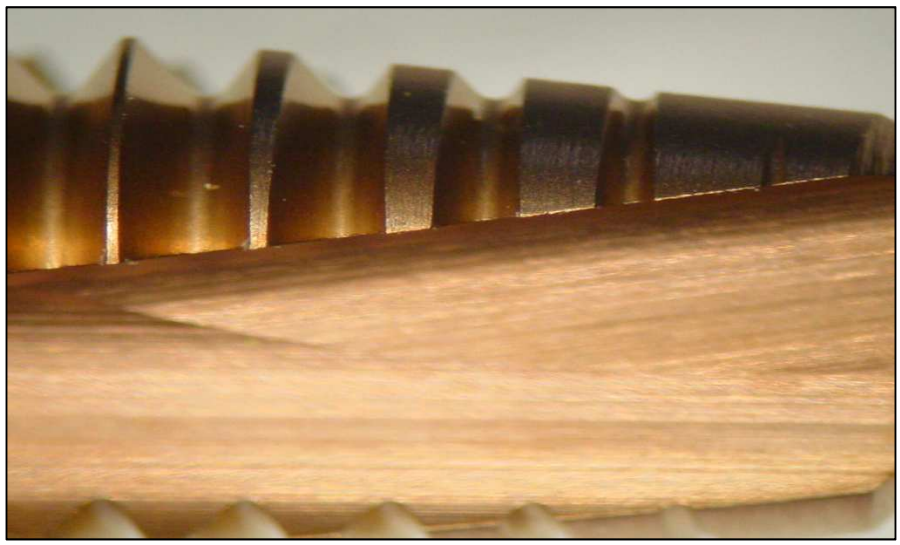
Vzorek A3 s povlakem AlTiN před testováním

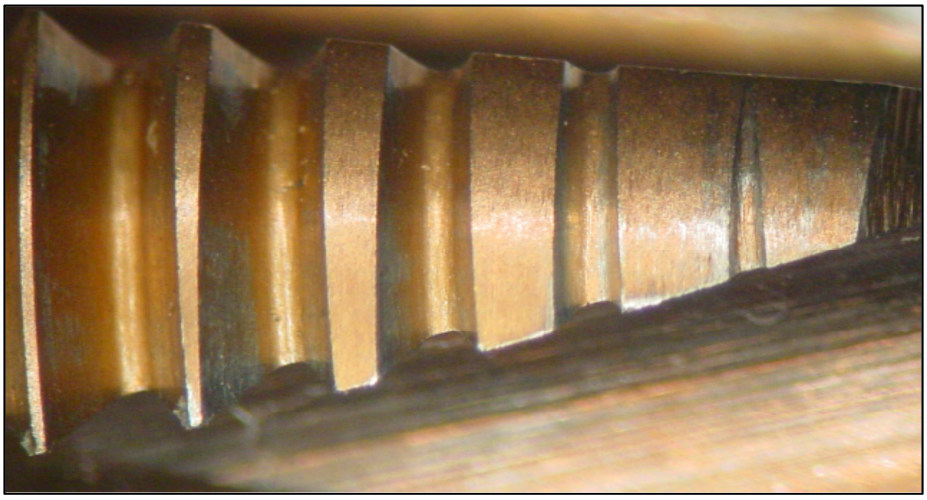
PŘÍLOHA 9

Vzorek A3 s povlakem AlTiN po testování



Vzorek A4 s povlakem TiCN před testováním



PŘÍLOHA 10

Vzorek A4 s povlakem TiCN po testování