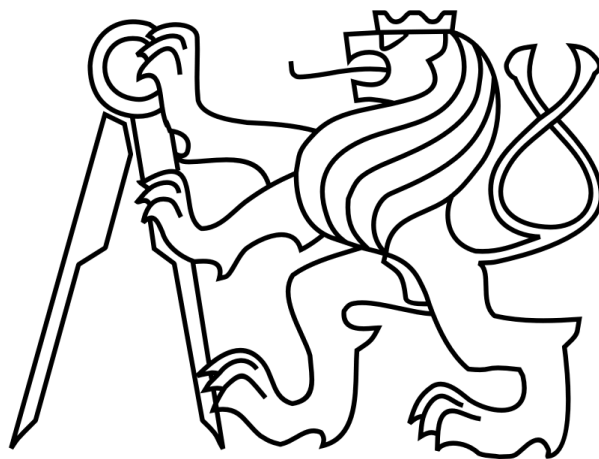


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Diplomová práce

Řezivost vrtáků s novými povlaky

Zadání: Vloženo

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma „Řezivost vrtáků s novými povlaky“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vítězslava Rázka, CSc. a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 1.7.2016

.....

podpis

Poděkování

Úvodem bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc., za vedení této diplomové práce, jeho podnětné rady a připomínky při jejím vypracování.

Děkuji také panu Ing. Martinu Daňkovi, jednatele společnosti AdvaMat s.r.o., za množství hodnotných informací a připomínek, jež mi poskytl při tvorbě této diplomové práce.

Chtěl bych také velice poděkovat svým rodičům za nesmírnou podporu a trpělivost, se kterou mě podporovali v průběhu celého studia a tvorbě této diplomové práce.

Anotace

Diplomová práce je zaměřena na řezivost vrtáků s nově vyvinutými povlaky. Jedná se o povlaky s TiAlN vrstvou obohacené o určité procentuální množství chromu. Chrom je v povlaku přidán ve množství 13%, 20% a 25%. Práce popisuje nanesení povlaků na nástroje a další možnosti nanášení a dále popisuje charakteristiky opotřebení a možnosti hodnocení řezivosti. V experimentální části jsou tyto vrtáky testovány a vyhodnoceny za různých podmínek obrábění. Pro porovnání jsou vrtáky s těmito povlaky srovnány i s klasickými vrtáky s TiAlN povlakem a také s vrtáky bez povlaku. Práce je zaměřena nejenom na řezivost vrtáků při doporučených hodnotách vrtání, ale také na odolnost povlaku při zvýšených až extrémních podmínkách obrábění, hlavně co se teplot týče. Zjišťuje se opotřebení vrtáků v závislosti na čase, teplotní působení při různých hodnotách řezných rychlostí a silové působení nástroje na obrobek.

Klíčová slova: řezivost, vrták, povlakování, magnetronové naprašování, opotřebení, nástrojové materiály, TiAlN, chrom, obrábění

Annontation

Master's thesis is focused on cutting performance of drills with recently developed coatings. These coatings have TiAlN layer and they are enriched by percentage of chrome. Chrome is added into coating in amount of 13%, 20% and 25%. Thesis describes the application of coatings on machining tools and other application possibilities and further describes wear characteristics and possibilities of cutting performance evaluation. In experimental part, the drills are tested and evaluated during different machining conditions. The drills with these coatings are compared with standard drills with TiAlN coating and also with drills without coating. The thesis is focused not only on cutting performance of drills during drilling with recommended drilling parameters, but also on durability of the coating during bad and even extreme drilling conditions, especially regarding temperature. The wearing of the drills is monitored in dependence on time. Temperature influence during different cutting speeds and force influence of the tool on the workpiece are researched.

Keywords: cutting performance, drill, coating, magnetron sputtering, wear, cutting tools, TiAlN, chrome, machining

Přehled použitých veličin a jednotek

Označení	Název	Jednotky
V	Množství prvků	%
R_e	Rychlost eroze	$A \cdot \text{min}^{-1}$
J	Proudová hustota iontů	$\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$
S	Výtěžnost naprašování	$\text{atomy} \cdot \text{iont}^{-1}$
m_t	Atomová hmotnost	g
ρ	Měrná hmotnost materiálu terče	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
p_v	Tlak vakua	Pa
r	Zaoblení břitových destiček	μm
Z	Životnost nástroje	min
VB	Opotřebení nástroje	mm
α_n	Úhel hřbetu	°
δ_n	Úhel řezu	°
χ_f	Úhel nastavení	°
t	Poloměr ostří	mm
T	Trvanlivost	mm
z_o	Počet možných přeostření	-
H	Délka břitu	mm
A	Přídavek na přebroušení	mm
X	Úbytek nástroje na čele	mm
v_c	Řezná rychlost	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
n	Otáčky	$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$
D	Průměr nástroje	mm
v_f	Posuvová rychlost	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
v_e	Řezná rychlost	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$

f_z	Posuv na zub	mm
f	Posuv nástroje	mm.ot ⁻¹
z	Počet břitů nástroje	-
h_D	Jmenovitá tloušťka třísky	mm
b_D	Jmenovitá šířka třísky	mm
a_p	Šířka záběru ostří	mm
f_z	Posuv na břit	mm
A_D	Průřez třísky	mm ²
F	Zatížení vrtáku	N
M_K	Krouticí moment	N.m
H	Tvrдость	GPa
P	Pevnost v tlaku	Mpa
t_v	Doba vrtání	sek.
c_T	Konstanta závislá na trvanlivosti	-
c_v	Konstanta závislá na c_T	-
T_1	Trvanlivost při nejvyšší řezné rychlosti	min
m	exponent závislý na řezném materiálu	-
q_v	Hodnota tepla vedením	W.m ⁻¹
q_p	Přestup tepla mezi materiálem a prostředím	W.m ⁻¹
λ	Součinitel tepelné vodivosti	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
d	Šířka stěny	m
t_i	Teplota okolí	°C
t_{p1}	Teplota v místě řezu	°C
t_{p2}	Teplota naměřená na povrchu	°C

Obsah

1. Úvod	11
2. Cíl práce	12
2.1. Předpokládané výstupy.....	12
3. Rozdělení povlakování a charakteristika povlakování.....	13
3.1. PVD povlakování.....	13
3.1.1. PVD napařování – klasické	14
3.1.2. PVD napařování - magnetronové	14
3.1.3. PVD napařování.....	17
3.1.4. PVD iontová implantace.....	17
3.2. CVD povlakování	17
3.3. Charakteristiky povlaků a tloušťky povlaků	18
4. Nástrojové materiály, obrábění materiálů, charakteristiky opotřebení a hodnocení řezivosti nástroje.....	20
4.1. Nástrojové materiály.....	20
4.1.1. Slinuté karbidy.....	21
4.1.2. Povlakované slinuté karbidy.....	22
4.2. Obrábění těžkoobrobitelných materiálů.....	23
4.2.1. Obrábění titanu a jeho slitin (Ti6Al4V).....	23
4.2.2. Obrábění korozivzdorných ocelí.....	24
4.2.3. Obrábění nástrojové oceli 1.2714 (ČSN 19 663)	24
4.2.4. Obrábění konstrukční oceli 1.7131 (ČSN 14 220).....	25
4.3. Geometrie břitu nástroje, velikost a druhy opotřebení a jejich měření	25
4.3.1. Měření opotřebení	25
4.3.2. Vhodná geometrie břitu.....	26
4.3.3. Optimální velikost opotřebení	28
4.3.4. Druhy opotřebení	30
4.4. Řezivost nástroje	31
4.5. Charakteristika vrtání.....	33
5. Experimentální část.....	34
5.1. Charakteristiky zkoušených vrtáků	34

5.2.	Vrtání za konstantní síly	38
5.2.1.	Vrtání do materiálu 1.7131 (ČSN 14 220)	39
5.2.2.	Vrtání do Ti6Al4V	40
5.2.3.	Vrtání do korozivzdorného materiálu 1.4301 (ČSN 17 240)	41
5.2.4.	Vrtání konstantní silou klasickým vrtákem z HSS.....	41
5.3.	Měření sil při vrtání.....	43
5.3.1.	Vrtání do 1.7131 (ČSN 14 220).....	43
5.3.2.	Vrtání do Ti6Al4V	44
5.3.3.	Porovnání naměřených výsledků při vrtání konstantním posuvem	45
5.3.4.	Vrtání do 1.2714 (ČSN 19 663) za vyšších řezných rychlostí.....	46
5.4.	Měření opotřebení na nástrojích	48
5.4.1.	Měření opotřebení při řezné rychlosti 50 [m.min ⁻¹]	49
5.4.2.	Měření opotřebení při řezné rychlosti 100 [m.min ⁻¹]	53
5.4.3.	Měření opotřebení při řezné rychlosti 200 [m.min ⁻¹]	56
5.4.4.	Porovnání opotřebení vrtáků s různým % chromu pro různé rychlosti	59
5.4.5.	Měření opotřebení vrtáků s přídavkem Al ₂ O ₃	61
5.4.6.	Měření opotřebení na vrtácích bez povlaku	63
5.4.7.	Zhodnocení všech vrtáků z hlediska opotřebení.....	63
5.4.8.	Experimentální řešení Taylorovy závislosti	64
5.5.	Měření teplot při vrtání.....	67
5.5.1.	Snímání teploty na fólii	67
5.5.2.	Snímání teploty na nanesené vrstvě barvy	69
6.	Zhodnocení dosažených výsledků a doporučení pro praktické aplikace	73
7.	Závěr.....	74
	Seznam použité literatury	75
	Seznam obrázků.....	77
	Seznam tabulek	79
	Seznam použitého software	80
	Elektronické přílohy (uvedeny na CD)	80

1. Úvod

Při zvyšujících se požadavcích na řezivost nástrojů a jejich trvanlivost zejména v sériových výrobcích, je kladen čím dál tím větší důraz na jejich povrchové vrstvy a opotřebení těchto vrstev. Vývoj materiálů používaných na nástroje dosáhl takové úrovně, že řezné podmínky jsou prakticky limitovány pouze výkonovými charakteristikami obráběcích strojů. Čím dál více vznikají nové technologie založené na nanotechnologiích a vývoji nových tenkých vrstev a povlaků. S tím je spojeno větší využití těchto povlaků a jejich rozvoj a zdokonalování. Povlaky pomáhají výrazně zvýšit výkon nástrojů a jejich životnost. Dále s vývojem materiálů, kdy rostou jejich pevnosti a tvrdosti, jsou zvyšovány požadavky na jejich obrobiteľnost. I zde se v hojně míře využívají různé povlaky pro zvýšení životnosti nástrojů při obrábění těchto těžkoobrobitelných materiálů. Neméně důležité jsou i dosahované přesnosti a drsnosti obráběných ploch. Použití povlaků na nástrojích má stále své opodstatnění i přesto, že jsou dostupné materiály s daleko větší tvrdostí a odolností vůči opotřebení. Výhoda slinutých karbidů s povlaky je v jejich ceně a možnosti přepovlakování po opotřebení a znovuzavedení do výroby.

I přesto, že začátek povlakování sahá až do sedmdesátých let minulého století, je pořád vzhledem k rozvíjejícím se technologiím stále co vyvíjet. V dnešních sériových a hromadných výrobcích je čím dál více kladen důraz při obrábění na snižování strojních časů a zvýšení produktivity jednotlivých operací. To s sebou přináší zvýšené nároky na odolnost nástrojů a co jejich nejdélejší životnost. Snižování strojních časů se dosáhne vhodnou kombinací posuvů a otáček. Právě se zvyšujícími se otáčkami se zvyšují teploty v místě řezu a ty mají na trvanlivost nástroje značný vliv. Proto aplikace povlaků hraje významnou roli a při volbě jednotlivých složek povlaků se klade důraz na teplotní odolnost vytvořené vrstvy. Velkou roli hrají také tvrdosti vrstev.

V této diplomové práci jsou testovány povlaky TiAlN s přidávkou chromu v určitém procentuálním množství. TiAlN vrstvy jsou už několik let využívány a právě chrom má zvýšit jejich odolnost při vyšších teplotách obrábění a snížit náchylnost k oxidaci, která při těchto teplotách vzniká. Tyto povlaky jsou nanášeny na monolitních vrtácích ze slinutých karbidů. Vrstva povlaku byla na vrtáky nanášena PVD metodou magnetronového naprašování. Kvalita povlaků na vrtácích je testována za doporučených řezných rychlostí pro vrtání, tak i za zvýšených rychlostí, kdy je brán ohled na kvalitu povlaku.

Vrtáky jsou testovány z hlediska silového působení na obrobek a z hlediska jejich opotřebení v závislosti na čase. Dále jsou zohledněny i teploty vznikající při obrábění. Jsou porovnány jednotlivé vrstvy a jejich vhodné složení při daných podmínkách obrábění.

2. Cíl práce

Cílem této práce je vyhodnocení řezivosti vrtáků s povlaky, které jsou na vrtáky nanášeny metodou magnetronového naprašování. Testování bude probíhat na těžkoobrobitelných materiálech, jako jsou nástrojové oceli, korozivzdorné oceli a titan. Důraz bude kladen hlavně na odolnost povlaku. Při testování vrtáků dojde k jejich porovnání s klasickými dostupnými vrtáky TiAlN a s vrtáky bez povlaku. Porovnání bude provedeno jak pro doporučené řezné rychlosti pro vrtání tak i při zvýšených rychlostech, kdy bude docházet k zvýšenému tepelnému zatížení. Tyto vrtáky byly zapůjčeny společností Advamat s.r.o.. Tato společnost se zabývá výzkumem a vývojem tenkých pevných vrstev vytvářených fyzikálními nebo chemickými metodami. V akademickém prostředí se společnost zabývá testováním převážně supertvrdých a tribologických vrstev. Společnost vznikla jako spin-off subjekt ČVUT v Praze, konkrétně na oddělení Pokročilých materiálů na Fakultě elektrotechnické.

2.1. Předpokládané výstupy

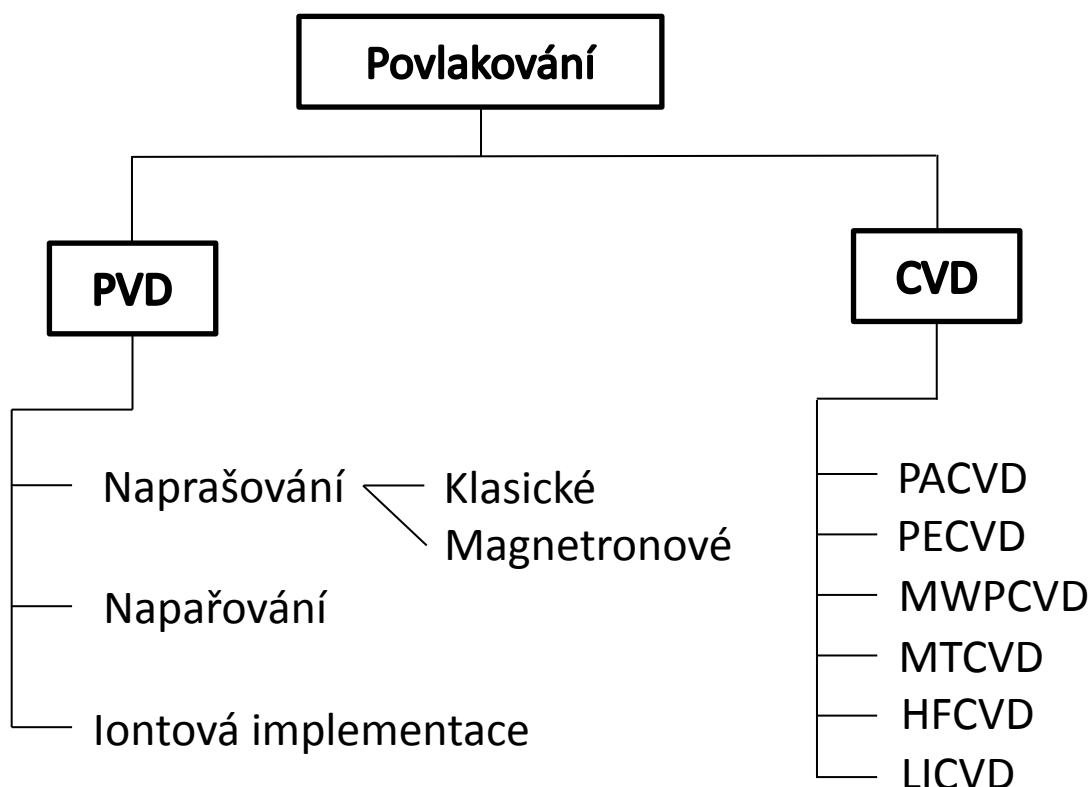
Předpokládaným výstupem práce je otestování jednotlivých vrtáků se speciálním povlakem na těžkoobrobitelných materiálech a vyhodnocení opotřebení těchto vrtáků při reálných podmínkách obrábění. Dále bude výstupem porovnání silového působení na obrobek při procesu vrtání a vyhodnocení teplotního působení.

Jako kritérium hodnocení řezivosti jednotlivých nástrojů byla zvolena hodnota trvanlivosti při dosažení předem stanoveného opotřebení. Dalším kritériem bude silové namáhání obrobku.

3. Rozdělení povlakování a charakteristika povlakování

Moderní povlakovací metody jsou v dnešní době pravidelně využívanou součástí v průmyslové praxi. Použitím povlaků se zvyšuje efektivnost a produktivita obrábění. Pro některé materiály je povlakování absolutní nezbytností. Nejčastěji se povlakování využívá na funkčních částech nástrojů. Další využití povlakování je jako dekorativní.

Při výrobě povlaků jsou na funkční části nástroje se v principu využívají dvě základní metody. Tyto metody jsou CVD (Chemical Vapour Deposition) a PVD (Physical Vapour Deposition). Od těchto metod jsou dále odvozeny další speciální metody (Obr. 1).



Obr. 1 Rozdělení povlakování

3.1. PVD povlakování

PVD proces probíhá v prostředí vysokého vakua (0,1 až 1,0 Pa), při teplotách v rozmezí 150 až 500 °C. K povlakování dochází díky kondenzaci atomů, případně sluků atomů, které jsou uvolňovány z terčů. Takto vytvořené povlaky mají menší tloušťku než stejné typy povlaků vytvářené metodou CVD. V dnešní době jsou nejčastěji využívány tři odlišné PVD technologie – naprašování, napařování a iontová implantace. [2] [3]

Metoda PVD je ekologicky šetrnou metodu depozice vrstev, díky tomu, že se zde nepoužívají žádné nebezpečné materiály a při procesu depozice se neuvolňují toxické látky.

Výhodou je možnost nanášet vrstvy i na ostré hrany s poloměrem zaoblení pod 20 μ , a možnost vytvářet vícevrstvé povlaky různých typů. Mohou se kombinovat například tvrdé, ořezuvzdorné vrstvy s kluznými vrstvami, čímž je možné docílit lepší životnosti nástroje. [2] [3]

Nevýhodou všech metod PVD je ale složitý vakuový systém a nutnost pohybovat povlakovaným předmětem, aby bylo zaručeno rovnoměrné povlakování. Tento požadavek souvisí se stínovým efektem - na plochách, které neleží ve směru pohybu deponovaných částic, se buďto povlak vůbec nevytvoří nebo je vzniklý povlak velmi nekvalitní. [2]

3.1.1. PVD naprašování – klasické

Proces povlakování metodou klasického naprašování, pracující na principu depozice částic, oddělených z povrchu zdroje odprašovací procesem, probíhá ve vakuu do 0,7 Pa. Díky vakuu se odprašované částice z terče nedostanou do kolize s molekulami plynu v prostoru mezi substrátem a zdrojem. V některých případech se používá vakuum 0,7÷2 Pa. Zde dochází v důsledku kolizí odprašených částic s molekulami vnitřní atmosféry ke zvyšování teploty částic ještě před vlastním kontaktem s povrchem substrátu.

Aby bylo možné odprašovat částice z terče, je na něj nejprve přiveden vysoký záporný elektrický potenciál, řádově ve stovkách až tisících voltech. Poté je do vakuové komory přiveden přes jehlový ventil pracovní plyn (nejčastěji Ar) o tlaku v jednotkách pascalu. Před terčem se zapálí doutnavý výboj a kladné ionty pracovního plynu jsou urychlovány a bombardují záporně nabitý terč. Záporně nabitě částice (elektrony) dopadají na stěny komory, která má kladný potenciál. Kladné ionty svou kinetickou energií při dopadu rozprašují terč. Odprašené částice se často průchodem oblastí ionizovaného pracovního plynu samy ionizují a ve formě kondenzátu usazují na vnitřních površích ve vakuové komoře. Substráty se proto umísťují před terč, aby se odprašené částice usazovali přednostně na nich a vytvářely povlak. [4]

Rychlost eroze terče lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$R_e = 62,3 \cdot \frac{J \cdot S \cdot m_t}{\rho} [A \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1)$$

Kde: J [$\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$] - je proudová hustota iontů

S [$\text{atomy} \cdot \text{iont}^{-1}$] - je výtěžnost naprašování

m_t [g] - je atomová hmotnost

ρ [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$] - je měrná hmotnost materiálu terče [2]

3.1.2. PVD naprašování - magnetronové

Touto metodou jsou vytvářeny povlaky TiAlNCr na zkoušených typech vrtáků. Tato metoda byla zvolena vzhledem k nutnosti stejné tloušťky povlaku na celé pracovní ploše vrtáku.

Tato metoda je zdokonalenou metodou klasického naprašování. Je to další z metod PVD povlakování.

Proces opět probíhá ve vakuové komoře (Obr. 2), kde je umístěn většinou kovový zdroj materiálu, ze kterého jsou postupně uvolňovány páry kovu, prolétající vakuem, kde pak dopadají na povlakovaný materiál a vytvářejí nový povrch.

Při začátku procesu je v komoře vytvořeno vakuum o tlaku přibližně $p_v=1$ mPa, což je o 8 řádů nižší tlak než atmosférický. Tímto procesem dojde k odstranění nežádoucích plynů. Poté je do komory puštěn pracovní plyn argon nebo krypton, ve kterém je zapálen doutnavý výboj. Katoda umístěná v komoře (Obr. 3) je vyrobena z materiálu, který je naprašován, a jsou na ni přitahovány kladné ionty použitého plynu. Tento iont dodá svoji kinetickou energii naprašovanému kovu. Tyto vybuzené částice dopadají na povlakovaný materiál a i na stěny komory. Tomu se říká line-of-sight proces. Při zefektivnění této metody je možnost vpustit do pracovní komory reaktivní plyn a vytvořit tak sloučeniny s lepšími vlastnostmi jako jsou nitridy, oxidy nebo karbidy. Tomuto procesu se říká reaktivní magnetické naprašování. [5]

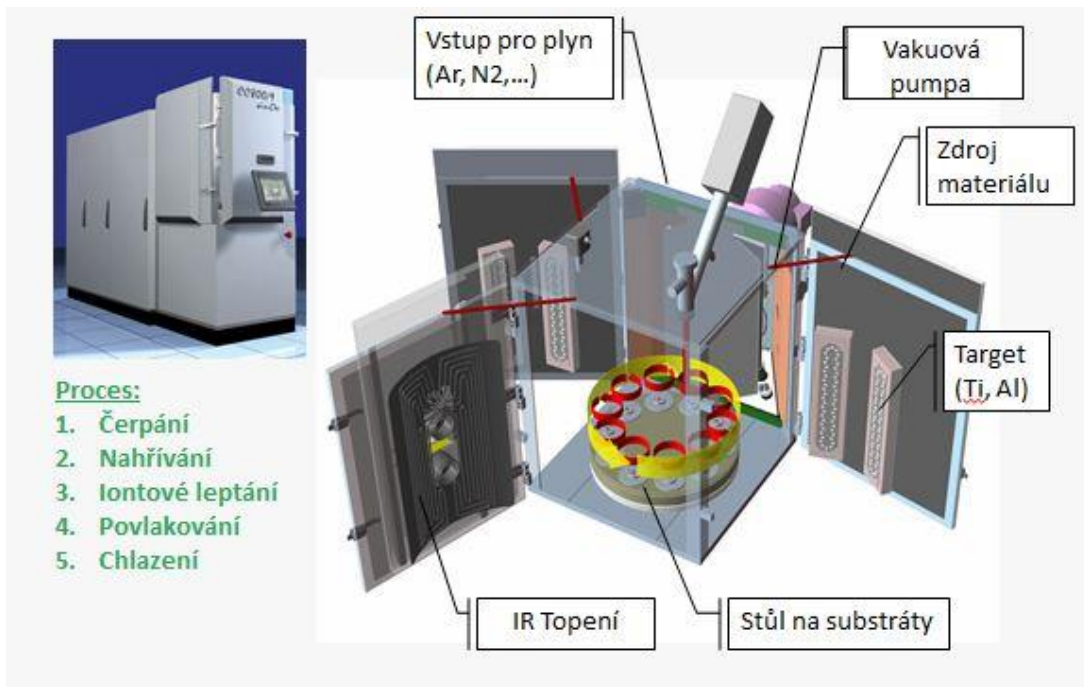
Touto metodou lze provádět i nanášení nevodivých materiálů, např. keramik. Je ovšem nutné použít vysokofrekvenční signál, který umožňuje rychle odstraňovat hromadící se elektrické výboje.

Výhody magnetického naprašování

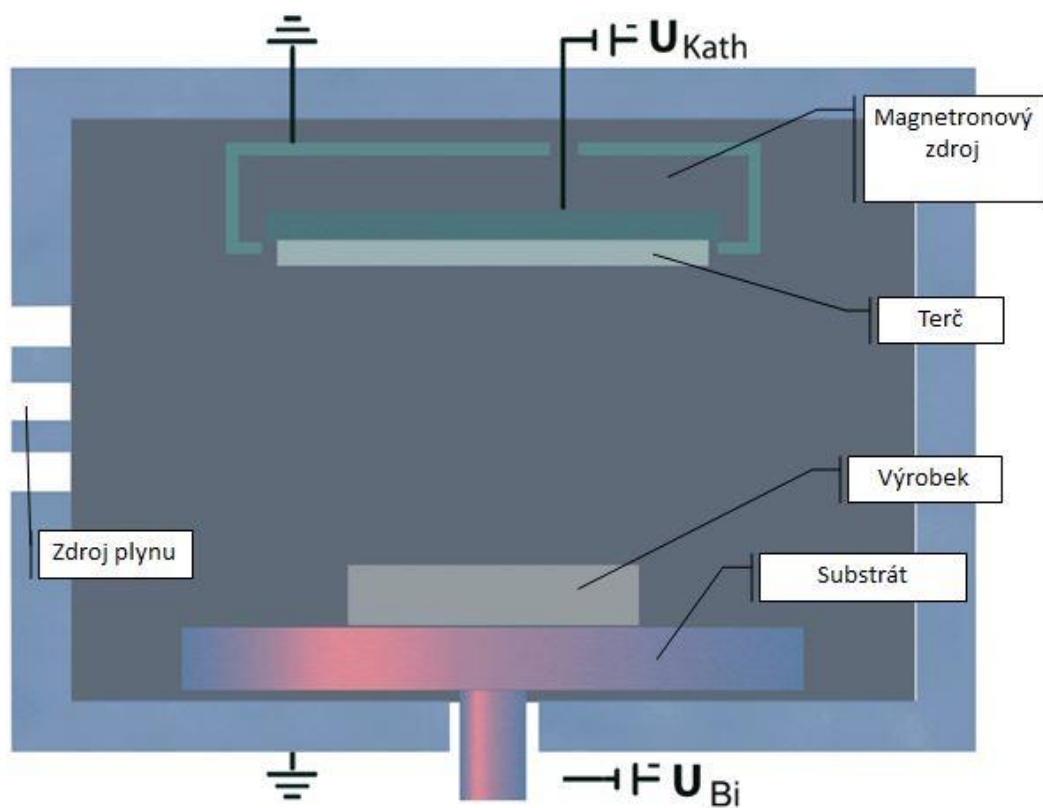
- umožňuje rovnoměrné potahování větší nebo členitých ploch
- přesný poměr rozprašovaných složek
- nanášení na nevodivé povrchy (plasty)
- zachování reliéfu na povrchu
- jednou vyvinutý proces = 100% jeho opakovatelnost
- jednoduchá depozice i z těžkovitelných materiálů
- terč a substrát mohou být umístěny blízko sebe, možnost malé pracovní komory
- možnost odprašování prvků, slitin i sloučenin

Nevýhody magnetického naprašování

- povlak téměř atomově kopíruje podklad (není možné tak odstranit např. i drobné škrábance)
- nutnost složitějšího vyhlazení procesu při povlakování nevodivých materiálů
- terče jsou velmi drahé
- nutnost odvodu tepla vznikajícího z energie dopadající na terč
- intenzita naprašování je ve srovnání s intenzitou tepelného odpařování nízká
- u reaktivního naprašování je nutné přesné seřízení plynné atmosféry [6]



Obr. 2 Vakuová komora [6]



Obr. 3 Schéma vakuové komory [6]

3.1.3. PVD napařování

Při napařování je materiál odpařován z ohřátých terčů. Proces probíhá ve vakuu, při hodnotách tlaku 10^{-3} až 10^{-8} Pa. Substrát je také ohříván nebo je připojen ke zdroji stejnosměrného nebo střídavého napětí. Nevýhodou této metody je, že se odpařené atomy před kondenzací na substrátu pohybují po nekolizních drahách. Tím je vytvářen povlak s nerovnoměrnou tloušťkou (největší tloušťka je těsně nad terčem). Aby se zamezilo této nevhodné vlastnosti, tak je do komory přiváděn odpovídající plyn (Argon) pod tlakem 0,7 až 26,7 Pa. Tím odpařované složky při transportu na substrát prodělají vícenásobné srážky, což vede k rovnoměrnosti povlaku. Tato metoda je vhodná při aplikacích v polovodičovém průmyslu. [2] [4]

3.1.4. PVD Iontová implantace

Látka určená k vytváření povlaku se do plynného skupenství převádí fyzikálním procesem (odpařování či odprašování). Je to tzv. hybridní proces povlakování. Povrch substrátu je bombardován svazkem částic s vysokou energií. Mezi substrátem a zdrojem odpařovaného materiálu je vytvořeno silné elektrické pole (50-1000 V), dochází k elektrickému výboji v plynné atmosféře (0,01 až 10 Pa) a tento výboj ionizuje částice plynu i odpařené částice terče. Při tomto procesu reakcí iontů vzniká povlak, který se usazuje na povrchu substrátu. Z povrchu terče jsou atomy odprašovány pomocí urychlených iontů. Ionty současně dopadají na povlakovaný předmět.

Po očištění a zahájení povlakovacího procesu je napětí sníženo na 50 až 100 V. Nižší elektrický potenciál má za následek oslabení elektrického pole, které již iontům neudělí tolik energie. Energie však stále dostačuje na to, aby dopadající ionty plynu odprašovaly z povrchu substrátu během růstu vrstvy hůře vázané atomy povlaku. [2]

3.2. CVD povlakování

CVD je zkratka anglického výrazu Chemical Vapor Deposition – chemické metody nanášení povlaku. CVD povlak vzniká chemickými reakcemi při teplotách v intervalu 700 – 1050°C. CVD povlaky mají vysokou odolnost proti otěru a skvělou adhezi ke slinutým karbidům. [7]

Proces povlakování je založen na reakci plynných chemických sloučenin v plazmě. Plazma se vytváří v blízkosti povlakovaného materiálu a pomocí heterogenní reakce jsou částičky ulpívány na povrchu. Výchozí plyny musí obsahovat stabilní prchavou sloučeninu, která se v důsledku přivedení energie rozpadá. Plyn musí také obsahovat nekovový reaktivní plyn (např. N_2 , CH_4). Na ohřátý povrch jsou poté ukládány částice, které působí jako katalyzátor.

Výhody CVD povlakování

- vysoká hustota, homogenita (dobré krytí) a teplotní stabilita povlaku
- vynikající adheze k podkladovému materiálu a rovnoměrná tloušťka u tvarově složitých nástrojů a součástí

- možnost vytvářet poměrně složité vrstvy a to nejen nitridu kovů (Al_2O_3 , uhlíkové kluzné vrstvy, diamantové vrstvy)
- povlakování předmětu ze všech stran v důsledku poměrně vysokých pracovních tlaků plynné směsi ($1\div 100$ kPa)
- relativně nízké pořizovací i provozní náklady, slučitelnost s ostatními výrobními postupy

Nevýhody CVD povlakování

- vysoké pracovní teploty, které mohou mít nepříznivý vliv na vlastnosti povlakovaného předmětu i samotného povlaku (rozdílný koeficient tepelné roztažnosti)
- nelze vytvářet některé typy povlaků (např. kombinací různých typů kovů - TiAlN)
- nelze napovlakovat ostré hrany
- vysoká energetická náročnost, ekologicky nevyhovující plynné směsi (toxické chloridy)
- dlouhý pracovní cyklus $8\div 10$ hodin [2]

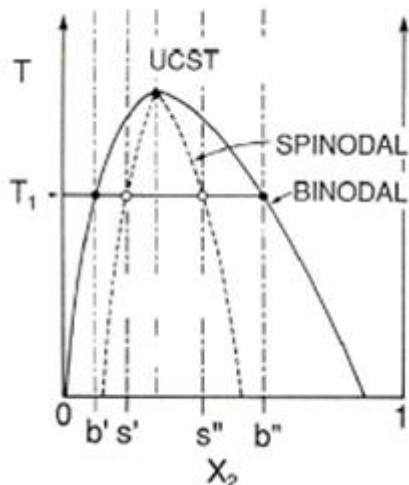
V poslední době se ve velké míře používají modifikované metody CVD. Např. metoda CVD indukovaná laserem (Laser Induced CVD – LICVD, LCVD), nebo metoda CVD se žhavicím vláknem (HFCVD) a další (PACVD, MWPCVD, MTCVD). [2]

3.3. Charakteristiky povlaků a tloušťky povlaků

Typickým problémem u použití povlaků nebo nátěrů je vysoká teplota vznikající při obrábění. Vrstva povlaku musí být teplotně stabilní, mít velkou adhezi k základnímu povrchu, vysokou tvrdost a houževnatost. V dnešní době je jeden z nerozšířenějších povlaků TiAlN (nitrid titanu a hliníku), který disponuje dostatečnou tepelnou stabilitou až do 900°C , má vysokou tvrdost a odolnost proti oxidaci. Schopnost povlaku TiAlN si zachovat vysokou tvrdost i při vysokých teplotách je založena na tzv. spinodální dekompozici. Metastabilní tuhý krychlový roztok TiAlN se rozkládá na C-AlN (C=cube) a C-TiN. Po zvýšení teploty se složky C-TiN, C-AlN, transformují do méně tvrdých složek H-TiN, H-AlN (H=hexagon) a proto tvrdost povlaku při zvýšených teplotách klesá.

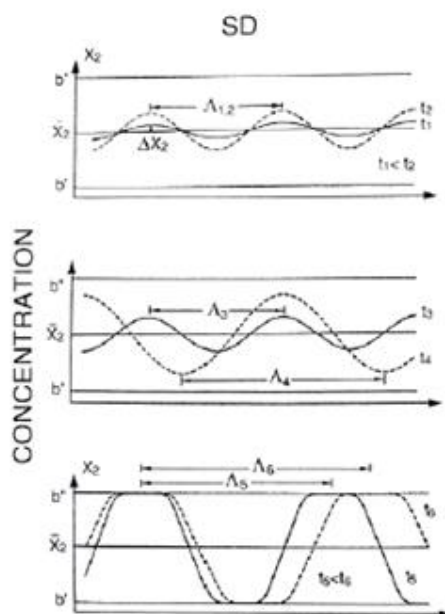
Vyvinuté vrstvy TiAlN + Cr, mají za úkol přidáním chromu zabránit spinodální dekompozici za vyšších teplot při obrábění, tím že zpomaluje vznik a šíření složek H-AlN a H-TiN. Na rozdíl od nitridu titanu a hliníku, má nitrid chromu lepší odolnost proti oxidaci a jeho segregace na hranicích zrn v povrchových oblastech tuto odolnost výrazně zlepšuje. Chrom na sebe také váže při vysokých teplotách na sebe hliník.

Při procesu spinodální dekompozice se původní termodynamicky nestabilní roztok, chovající se jako homogenní roztok, přemění na směs o dvou fázích. Tento proces probíhá v mezeře mísitelnosti roztoků (Obr. 4) a nepotřebuje žádná nukleační činidla, jelikož stabilní fáze kontinuálně difundují v roztoku. Proces probíhá při termodynamické nerovnováze.



Obr. 4 Izobarický fázový diagram binární směsi [15]

K procesu spinodální dekompozice dochází při snížení teploty z křivky binodály (koexistenční oblast) do metastabilní oblasti mezi binodálu a chemickou spinodálu. Směs se tak dostane do nemísitelné oblasti. K procesu spinodální dekompozice se lze dostat dvěma způsoby. Jeden způsob je pomocí pomalého ochlazování pře metastabilní oblast, kdy spinodální dekompozice probíhá za nukleace a růstu. Druhý způsob je prudké zchlazení roztoku. Díky prudkému zchlazení nedojde k spinodální dekompozici v metastabilní oblasti ale dojde k ní kolísáním koncentrace směsi. Poté dochází k samotnému procesu spinodální dekompozice ve třech fázích. Při první fázi dochází pouze ke změně koncentrace směsi bez změny vzdálenosti mezi složkami. Při druhé dochází ke zvýšené koncentraci a zvětšující se vzdálenosti mezi složkami, a ve třetí fázi je koncentrace konstantní a dochází pouze ke zvětšování vzdálenosti mezi prvky, dokud nedojde k úplnému odmísení fází (Obr. 5). Spinodální dekompozice je v praxi využívána pro výrobu mikroporézních materiálů. [13]



Obr. 5 Tři fáze spinodální dekompozice [15]

4. Nástrojové materiály, obrábění materiálů, charakteristiky opotřebení a hodnocení řezivosti nástroje

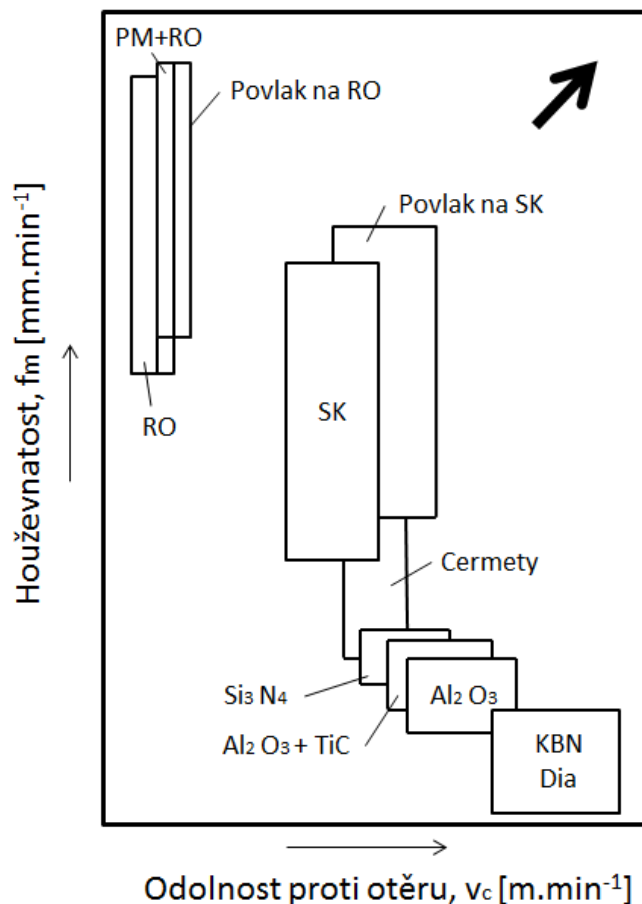
4.1. Nástrojové materiály

Při obrábění různých typů materiálů hraje správná volba nástrojového materiálu důležitou roli. Žádný dostupný materiál nezaručí komplexní požadavky obrábění (Obr. 6), i když některé moderní varianty zabírají širokou oblast aplikace. Limitujícími pevnostními vlastnostmi, které se musí nechat zachovat i na úkor řezivosti, se projevuje zejména u monolitních nástrojů. To vede k rychlému rozvoji skládaných nástrojů. I přes to na trhu najdou své místo nástroje s nanesenými aktivními vrstvami nebo povlaky na funkčních výměnných elementech i na celých nástrojích.

Hlavními požadavky po nástrojových materiálech jsou:

- vysoká tvrdost a pevnost při pracovních teplotách
- vysoká houževnatost, eliminující křehké porušení bříty
- odolnost proti teplotnímu rázu
- chemickou stálost

[8]



Obr. 6 Trend vývoje nástrojových materiálů [8]

Dělení nástrojových materiálů:

- Rychlořezné oceli
- Slinuté karbidy
- Povlakované slinuté karbidy
- Cermety
- Keramika
- Polykrystalický kubický nitrid boritý
- Diamanty

4.1.1. Slinuté karbidy

Dle ČSN ISO 513/1994 se slinuté karbidy dělí dle svého složení:

- K: WC + Co
- P: WC + TiC + Co
- M: WC + TiC + TaC/NbC + Co

Slinuté karbidy jsou materiály připravovány práškovou metalurgií, kdy jsou slinovány tvrdé karbidové částice v kovové vazbě. Mohou být jak dvoufázové tak i vícefázové. Základní složkou všech slinutých karbidů je karbid wolframu WC a kubické karbidy TiC, TaC a NbC v kobaltovém pojivu. Vlastnosti slinutých karbidů jsou dány velikostí (rozsah 0,8 až 10 μm) částic a jejich typem, typem a množstvím pojiva (5 – 40 %) a použitým procesem výroby. Velmi dobré vlastnosti slinutých karbidů zajišťují čím dál větší procento nástrojů doposud vyráběných z rychlořezných ocelí. Týká se to hlavně monolitních nástrojů, např. vrtáků, nebo podkladů pro supertvrdé materiály, jako jsou KBN a diamanty.

Oproti rychlořezným materiálům mají slinuté karbidy lepší vlastnosti skoro ve všech směrech. Jsou otěruvzdornější, mají větší pevnost v tlaku, vyšší tuhost a větší tvrdost, ale mají nižší houževnatost. Karbidy skupiny K mají výbornou tepelnou a teplotní vodivost, což je vhodné pro operace, kde je nutnost dostatečného odvodu z místa řezu.

Slinuté karbidy jsou kromě použití na vrtácích a podkladech supertvrdých materiálů dále v hojně míře využívány na všechny typy obráběcích nástrojů, jako jsou např. odvalovací frézy. Kromě monolitních nástrojů jsou vyráběny i výměnné břitové destičky a různé řezné elementy ze slinutých karbidů. Tvary a rozměry destiček jsou uvedeny v normě ISO 1832/1985. Destičky jsou lisovány a dále broušeny. Tyto destičky, ale i monolitní nástroje, umožňují své přeostření pomocí moderních ostříček a brusné kotouče s diamantovým brusivem.

Slinuté karbidy jsou doporučovány hlavně pro obrábění hliníku, žárupevných a Ti slitin, frézování ocelí, ale jsou vhodné i pro obrábění většiny technických materiálů, jak určuje norma ČSN ISO 513.

4.1.2. Povlakované slinuté karbidy

Povlakované slinuté karbidy dovolují zvýšit řeznou rychlost o 200 až 300 % oproti nepovlakovaným druhům. Jejich vývoj sahá už ke konci 60. let, 20 století. Postupným zdokonalováním následoval vývoj tzv. čtyř generací otěruvzdorných povlaků. Prvně vytvořeným povlakem byl povlak TiC pro skupinu slinutých karbidů K. Postupně byl doplňován ještě ostatními vrstvami (např. TiCN), a tím docházelo k odlišným fyzikálním vlastnostem, adhezí k podkladu, odolností proti opotřebení a koeficientům tření. Tyto jemnozrnné jednofázové povlaky CVD povlaky TiC nebo TiN jsou dnes využívány výjimečně.

Důležitým faktorem je tloušťka povlaků. S rostoucí tloušťkou povlak „křehne“. Dalším důležitým faktorem povlaku je podkladový materiál a povrchová vrstva tohoto podkladu. Podkladový tvar musí být stabilní při pracovních teplotách a tlacích a musí být odolný proti křehkému porušení. Neméně důležitým faktorem je také tvar nástroje, případně tvar břitových destiček. Převážné procento břitových destiček je např. upravena zaoblením v rozmezí 20 až 50 μm . Pokud je požadavek na povlakování ostrého břitu nebo vysokou pevnost při pozitivní geometrii na destičkách nebo i na monolitních nástrojích, je používáno PVD povlakování. Tyto povlaky umožňují zvýšit řeznou rychlost o 50 % nebo zvýšení trvanlivosti 2 až 3x oproti nepovlakovaným nástrojům. PVD povlaky mají nejčastěji tloušťky 3 až 5 μm . Jejich uplatnění je vhodné při nestabilních podmínkách a zejména pro obrábění ocelí malými a středními řeznými rychlostmi.

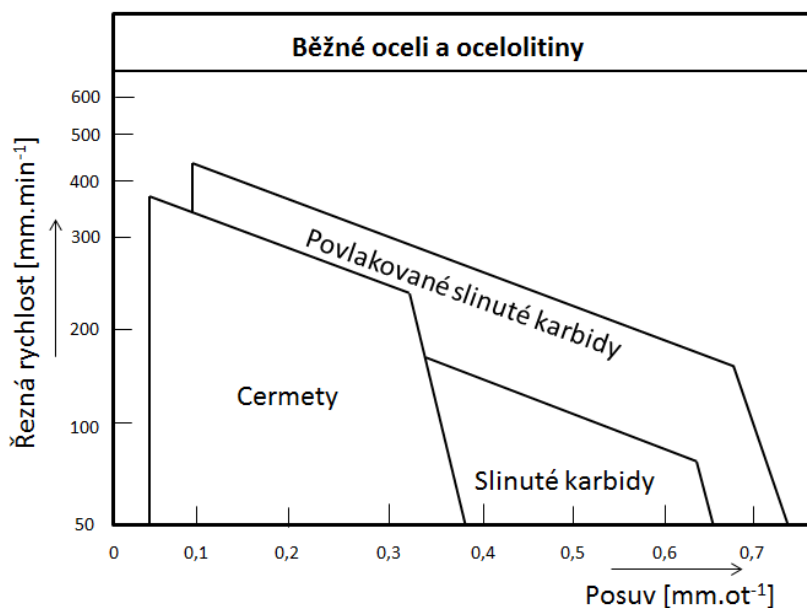
Použití povlaků je výhodné a i proto dnes představuje více než 75 % soustružnických operací a 40 % frézovacích operací s použitím povlakovaných nástrojů ze slinutých karbidů. Povlakované nástroje jsou vhodné pro všechny soustružnické operace. Zvýšené procento povlakovaných slinutých karbidů zaznamenávají hlavně monolitní nástroje osové (vrtáky). Povlakované nástroje umožňují vyšší rychlosti a posuvy než nepovlakované slinuté karbidy a cermety (Obr. 7).

Většina povlaků je vícevrstevných anebo s rozdílnou morfologií jednotlivých vrstev, např.:

- TiAlN + Cr – zkoušené vrtáky v tomto experimentu
- Dvě vrstvy TiC s rozdílnou zrnistostí + Al_2O_3
- TiC + Al_2O_3 + TiN

Vícevrstvé povlaky mají následující výhodné vlastnosti:

- Kombinace vlastností různých druhů povlaků (morfologie)
- Univerzálnější použití
- Posloupnost vrstev ovlivňuje přilnavost povlaku k podkladovému materiálu [8]



Obr. 7 Základní aplikační oblasti SK, povlakovaných SK a cermetů (Sumitomo)

4.2. Obrábění těžkoobrobitelných materiálů

Mezi těžkoobrobitelné materiály patří materiály jako nikl a kobalt a jejich slitiny, ale také i mnou použité materiály titan, nástrojová ocel a korozivzdorná ocel. Tyto materiály mají rozdílné mechanické a chemické složení než klasické oceli a proto i jejich úprava obráběním je nutná pomocí jiných parametrů. Tyto materiály především disponují větší tvrdostí než ocel a proto i nároky na nástroje jsou vyšší. Tyto materiály nalézají uplatnění hlavně v oborech jako je letectví nebo medicína. Nutnost obrábění těchto materiálů vede k rozvoji nástrojů a jejich úprav z hlediska geometrie nebo požití speciálních povlaků.

Na zkoušené vrtáky byly použity povlaky TiALN + Cr. Crom byl přidán v určitém procentuálním množství. Vliv tohoto prvku, který způsobuje korozivzdornost, je součástí experimentu, kdy bude zjišťován jeho vliv na řezivost.

4.2.1. Obrábění titanu a jeho slitin (Ti6Al4V)

Nové titanové slitiny pronikají do průmyslové výroby značně rychlým tempem díky jejich lepším fyzikálním vlastnostem. Titanové slitiny jsou rovnocenným soupeřem pro slitiny hliníku nebo nikl-feritickým slitinám. Hlavní využití a největší rozmach mají slitiny titanu v leteckém a kosmickém průmyslu. Se zvyšujícím se podílem titanových slitin v průmyslu s sebou přináší potřebu řešit technologické zpracování. Výroba součástí v malokusových i sériových výrobach má za následek rozvoj a inovace při obrábění, dosahování potřebné produktivity v daných výrobních tolerancích a jakostí. Pevnost tohoto materiálu je 900 – 1100 N.mm⁻². Tvrdost dosahuje hodnot 30 – 40 HRC.

Volba titanových slitin jako konstrukčních materiálů vychází z některých jeho specifických vlastností, jako jsou:

- vysoká pevnost v poměru k měrné hmotnosti
 - chemická odolnost
 - odolnost proti korozi
 - výjimečné mechanické vlastnosti
 - malá tepelná roztažnost
- [9]

Při obrábění titanu dochází ke vzniku větších řezných sil než při relevantním obrábění ocelí ekvivalentní tvrdosti. Při působení vyšších řezných sil vzniká vyšší řezný odpor, který generuje vyšší tepelné namáhání nástroje. Vysoké řezné síly a teplo generují tzv. kráterové výmoly podél břitu a to vede k rychlejšímu opotřebení. Titan patří mezi tzv. zpevňující materiály. To znamená, že obrobená plocha má vyšší tvrdost než původní materiál. To vede k nutnosti použít pozitivnější geometrii nástroje než při obrábění ocelí. Další nevýhodou obrábění titanu je jeho nižší tepelná vodivost. Tím si třísky udržují teplo déle a nástroj je tak více namáhán. Další velkou nevýhodou je podstatně vyšší modul pružnosti než ocel. To způsobuje v kombinaci s vyšším řezným odporem nežádoucí vlastnost odtlačování se obrobku od nástroje. [9]

4.2.2. Obrábění korozivzdorných ocelí

Korozivzdorné oceli mají podobnou tvrdost jako oceli ušlechtilé. Z toho vyplývá, že řezné síly budou podobné, a nejsou nutné jakékoliv kompenzace řezných sil. Hlavním druhem opotřebení je opotřebení na hřbetu. Oproti tomu mají korozivzdorné oceli nižší tepelnou vodivost. Tím je podobně jako u titanu více namáhán nástroj, protože tříška déle udržuje teplo. Tím jsou přítomny vysoké teploty na řezné hraně. Další podobnou vlastností korozivzdorných ocelí je náchylnost k deformačnímu zpevnění.

Použití povlaků klade vysoké nároky vzhledem k větší abrazivosti povrchu. Abrazivost způsobuje vznik výmolů. Povlaky musí být vysoce otěruvzdorné. Použití povlakovaných nástrojů klade vysoké požadavky na optimalizaci komplexního systému: řezný materiál – geometrie – povlak – řezné parametry. Použití povlaku chrání nástroj před difuzním opotřebením. Tvrdost používané korozivzdorné oceli je 160 – 210 HB a pevnost je 500 – 700 N.mm⁻².

4.2.3. Obrábění nástrojové oceli 1.2714 (ČSN 19 663)

Testování vrtáků je prováděno i na tomto typu oceli. Ocel se označuje také dle DIN (55NiCrMoV7) a ČSN (19663). Tyto oceli se vyznačují vysokou prokalitelností a tím i vysokou výslednou tvrdostí, dobrou houževnatostí a dobrou odolností proti popuštění. Jedná se o nástrojovou ocel používanou pro nástroje pro tváření za tepla, jako jsou zápustky s vysokou pevností (cca nad 1300 N.mm⁻²) pro buchary a kovací lisy.

Použitelné jsou také pro průtlačníky pro protlačování neželezných kovů, dále pro nože a pro nástroje pro lisování plastických hmot, jako jsou tvárníky nebo tvárnice. Tvrdost této oceli je 250 HB (50 HRC). Pevnost je od 1000 – 2000 N.mm⁻².

4.2.4. Obrábění konstrukční oceli 1.7131 (ČSN 14 220)

Nejedná se o těžkoobrobitelný materiál, ale je zde uveden, jelikož bude při experimentu také použit jako etalon. Tato ocel je značena dle DIN (16MnCr5) a dle ČSN (14 220). Jedná se o ušlechtilou konstrukční ocel určenou především k cementování a nitridování. Ocel je dobře tvářitelná za tepla a vykazuje dobrou obrobitelnost i svařitelnost. Pevnost oceli je 780 - 850 N.mm⁻². Tvrdost je 240 HB.

4.3. Geometrie břitu nástroje, velikost a druhy opotřebení a jejich měření

4.3.1. Měření opotřebení

Základní rozdělení měření opotřebení je pomocí metod přímých nebo nepřímých. Přímé metody mají nevýhodu, že jejich aplikace je náročná z důvodu nedostupnosti otupující se plochy. Proto je nutné vždy proces pozastavit. To se může projevit v další části měření. V tomto ohledu mají výhodu metody nepřímé, které se používají přímo při obráběcím procesu.

Metody přímé

- Mikrometrická
- Váhová
- Optická
- Pneumatická
- Nanesené odporové vrstvy
- Radioizotopová

Metody nepřímé

- Vzrůst složek řezné síly
- Zvýšení příkonu řezání
- Zvýšení teploty řezání
- Změna barvy a tvaru třísky
- Změna rozměrů obrobku
- Zhoršení drsnosti povrchu

Pro vysvětlení jsou rozebrány pouze metody, které budou využity při hodnocení opotřebení při testování vrtáků s chromem.

Metoda přímá - mikrometrická

Při měření bude tato metoda použita. Konkrétní aplikace bude vysvětlena v dané kapitole. Metoda mikrometrická je založena na principu měření lineárních rozměrů metodou přímého měření. Měření probíhá nejčastěji na dílenských mikroskopech s křížovým stolem. Jak už bylo zmíněno, tak nevýhodou metody je její neaplikovatelnost přímo při procesu obrábění. Proces musí být vždy pozastaven a měření probíhá mimo pracovní stroj. Mezi tuto metodu se řadí i měření pomocí souřadnicového měřicího stroje. Tím jsme schopni vytvořit skutečný obraz opotřebení.

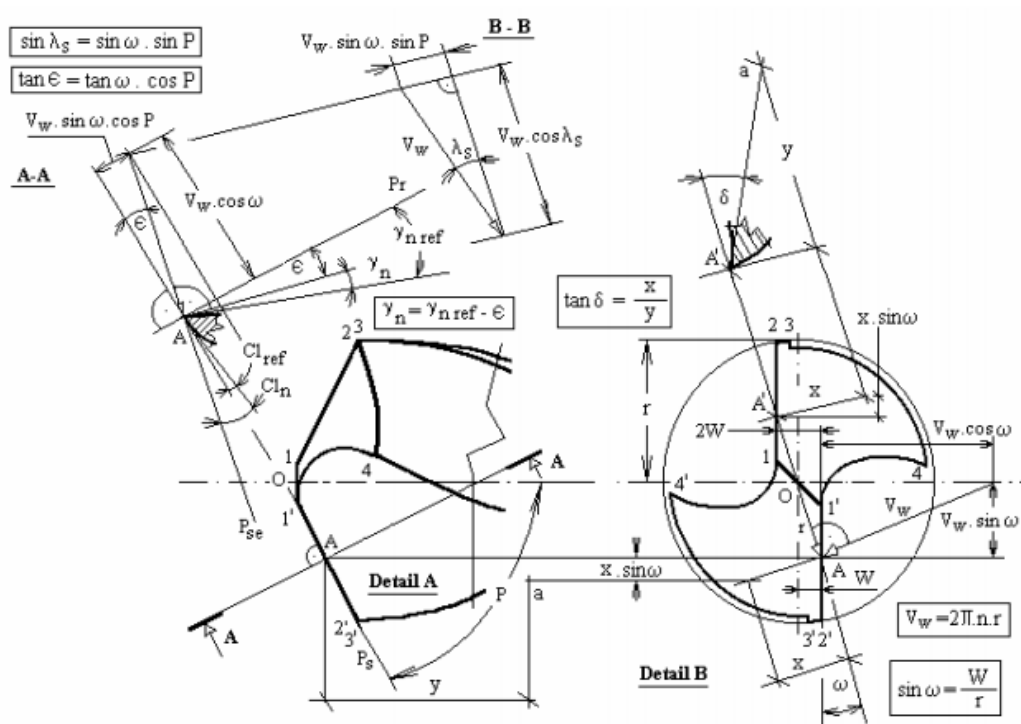
Metoda nepřímá – měření složek řezné síly a krouticího momentu

Toto měření je realizováno pomocí dynamometrů. Princip měření je založen na měření deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek – přípravek v průběhu obrábění.

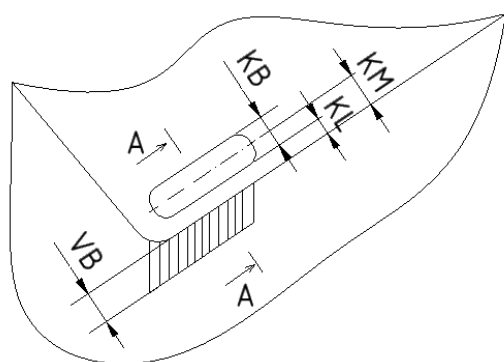
Při měření se hledá určitá závislost mezi opotřebením nástroje a zvýšením teploty řezání, vzrůstem složek síly při řezání, změnou rozměrů obrobku, zhoršením drsnosti povrchu nebo zvýšením potřebného výkonu řezání. Nevýhodou této metody je malá citlivost při postupném opotřebením nástroje. Využívá se spíše pro určení destruktivního opotřebením nástroje.

4.3.2. Vhodná geometrie břitu

Obráběcí nástroje jsou opotřebávány různými formami. Formy opotřebením jsou u nástrojů ze všech druhů materiálů v podstatě stejné. Vhodná geometrie břitu (Obr. 8) má vliv na intenzitu opotřebením. Jako hlavní forma opotřebením je opotřebením na hřbetu, případně na čele nástroje (Obr. 9). Opotřebením vzniká i na jiných částech nástroje, ale tyto dvě formy výrazně převažují. Jiné formy opotřebením se berou v potaz pouze výjimečně.



Obr. 8 Geometrie vrtáku [10]



- VB – šířka opotřebením hřbetu
- KB – šířka opotřebením na čele
- KM – vzdálenost opotřebením na čele od hrany
- KL – vzdálenost osy opotřebením na čele od hrany
- KT – hloubka opotřebením na čele

Obr. 9 Hlavní formy opotřebením [8]

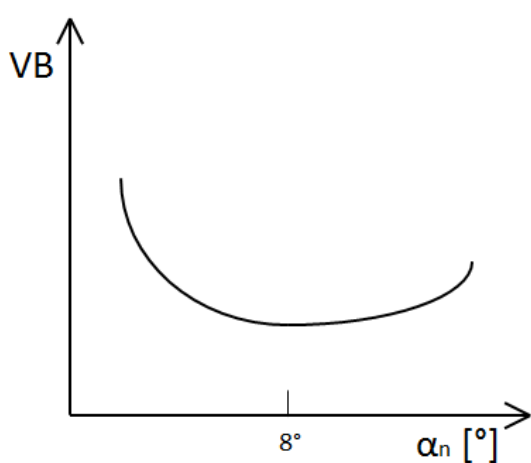
Vliv nastavení jednotlivých úhlů má vliv na opotřebení nástroje. Např. úhel hřbetu nemá na velikost jednoznačný vliv. Při malých úhlech hřbetu vzniká velké tření mezi nástrojem a hřbetem nástroje a plochou řezu. Vlivem velkého tření se zvyšuje i teplota v místě řezu. Při větším nastavení úhlu hřbetu se hodnota opotřebení snižuje až do experimentálně zjištěného úhlu 8° (Obr. 10). Při zvětšení úhlu nad hodnotu 8° se opět zvyšuje hodnota opotřebení a zhoršuje se odvod tepla zeslabujícím se břitem nástroje. Zeslabováním břitu může docházet k opotřebení břitu nebo i dokonce k celkové jeho destrukci.

Stejně jako úhel hřbetu je nejednoznačný i vliv úhel řezu. Při malých nebo naopak při velkých úhlech řezu je vysoké tepelné i mechanické zatížení. Zvláště se zeslabujícím se břitem roste vysoce tepelná odolnost a opotřebení roste (Obr. 11). Tento úhel je volen vzhledem k převažujícímu druhu namáhání.

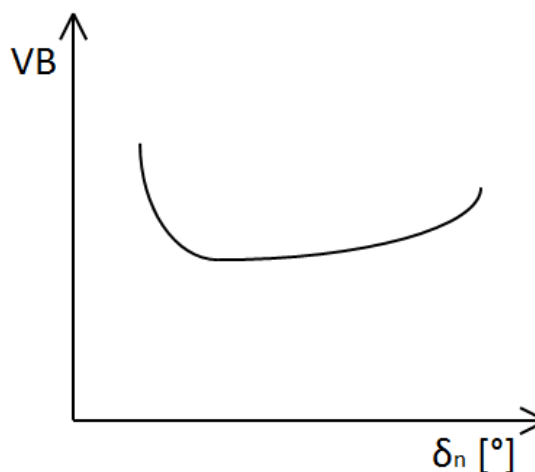
Naopak jednoznačný vliv na opotřebení má úhel nastavení (Obr. 12). Má vliv na teplotu, kdy se vzrůstající hodnotou úhlu nastavení roste velikost opotřebení. Z tohoto důvodu je nutno volit úhel nastavení co nejmenší. I přes tento fakt je nutné mít na zřeteli, že čím menší úhel nastavení je, tím je nástroj náchylnější na samobuzené kmitání.

Poloměr ostří ovlivňuje velikost opotřebení v závislosti na čase (Obr. 13). To zapříčiňují adhezní poměry, mechanika tvorby třísky a tření na ostří.

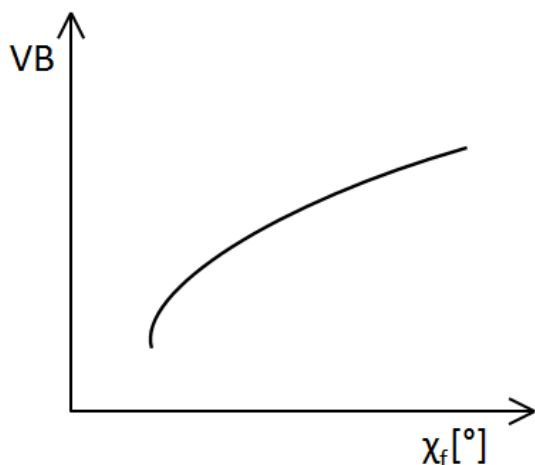
Poloměr špičky nemá na intenzitu opotřebení takový vliv. Ten především ovlivňuje drsnost obrobené plochy. Drsnost obrobené plochy klesá, pokud se zvětšuje velikost poloměru špičky. S tím ale současně vzniká nebezpečí samobuzeného kmitání. Pokud se zmenšuje poloměr špičky, tím se zhoršuje odvod tepla do nástroje a zvětšuje se nebezpečí plastické deformace břitu. Opotřebení nástroje je vlastnost, která úzce souvisí s trvanlivostí nástroje. Z Tab. 1 je vidět, že ztráta trvanlivosti nástroje je nejdůležitější příčinou nevyužití strojních časů u všech obráběcích operací včetně vrtání, a podíl na všech ztrátových časech je přibližně 30%. Dalším faktorem, který úzce souvisí s opotřebením, je následný lom nástroje. Ten se podílí přibližně 10% stejně jako různé nepřesnosti. Tyto položky zabírají více než polovinu všech ztrátových časů a proto je nutné se jim při obrábění vyvarovat.



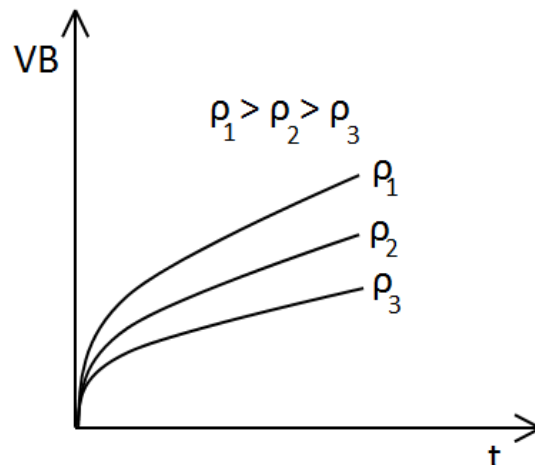
Obr. 10 Závislost opotřebení na úhlu hřbetu [8]



Obr. 11 Závislost opotřebení na úhlu řezu [8]



Obr. 12 Závislost opotřebení na úhlu nastavení [8]



Obr. 13 Vliv poloměru ostří na opotřebení [8]

Tab. 1 Technologické příčiny nevyužití strojních časů

Technologie	Soustružení		Vrtání		Frézování		Hoblování	
Příčina	Časový podíl výpadku %		%		%		%	
	10	30	10	30	10	30	10	30
Ztráta trvanlivosti	■	■	■	■	■	■	■	■
Lom nástroje	■		■		■		■	
Nepřesnost	■		■		■		■	
Drsnost povrchu	■		■		■		■	
Třísky	■		■		■		■	
Prostoj	■		■		■		■	

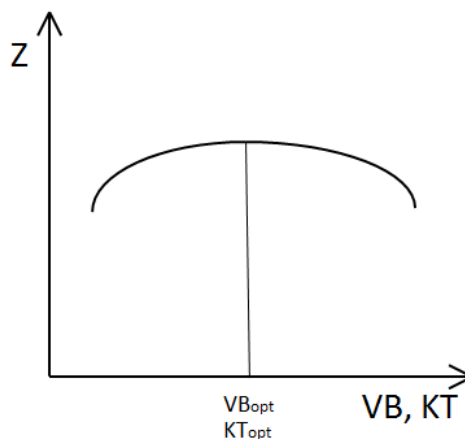
4.3.3. Optimální velikost opotřebení

Při výměnách nástrojů se bere ohled právě na velikost opotřebení. U každého nástroje je brán zřetel na maximální životnost „Z“ celistvého nástroje nebo výměnné destičky (Obr. 14). Při této maximální životnosti se určuje optimální velikost opotřebení daného nástroje z daného materiálu. Životnost určuje součet trvanlivostí břitů. Při dosažení maximální životnosti dochází k výměně nástroje. Opotřebení v tomto okamžiku by mělo být vždy optimální. Při výměně nástroje mimo optimální oblast dochází ke zvyšování nákladů. Při nevhodném zvolení výměny nástroje nejsou rozdílné hodnoty nákladů zanedbatelné a dosahují rozdílu až 30 %. Optimální velikost závisí také na tom, jestli jde o celistvý nástroj nebo nástroj s upnutými břitovými destičkami a také na typu prováděných operací (hrubování, obrábění na čisto). Závislost opotřebení na čase je vhodné určit pro daný nástroj experimentálně nebo v reálných podmínkách obrábění, např. při výměně nástroje, kdy dochází k měření opotřebení.

Životnost nástroje u monolitních (přestřovaných) nástrojů je dána vztahem

$$Z = (z_0 + 1) \cdot T \quad [\text{min}], \quad (2)$$

kde Z je životnost nástroje v minutách, T je trvanlivost nástroje v minutách a z_0 je počet možných přestření břitu.



Obr. 14 Závislost životnosti nástroje na jeho opotřebení [8]

Životnost nástroje lze popsat vztahem

$$Z = (z_0 + 1) \cdot T = T \cdot \frac{H}{x + A}, \quad (3)$$

kde H je délka břitu, kterou lze na nástroji odbrousit v mm, A je přídavek na přebroušení břitu v mm (0,1 až 0,2 mm) a x je úbytek nástroje na čele v mm.

Pro měření šířky opotřebení lze vycházet ze dvou variant. Lze měřit kolmo k čelu nebo kolmo k opotřeбенé ploše. Z praktického hlediska v tom není rozdíl.

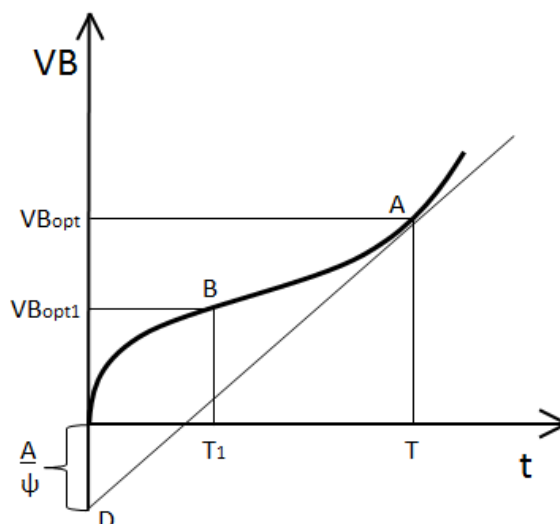
Z geometrických poměrů lze odvodit vztah

$$\chi = VB \frac{\text{tg } \alpha_n}{\sin \beta_n} = VB \psi \quad (4)$$

Když dojde k dosažení vztahu (4) do vztahu (3) a k provedení první derivace životnosti podle šířky opotřeбенé plochy na hřbetu, která je položena rovno 0, vyjde vztah

$$\frac{dVB}{dT} = \frac{VB + \frac{A}{\psi}}{T} \quad (5)$$

Z toho výsledku lze odvodit optimální velikost opotřebení, kdy je vedena tečna z bodu D ke křivce závislosti opotřebení na čase obrábění t (Obr. 15).

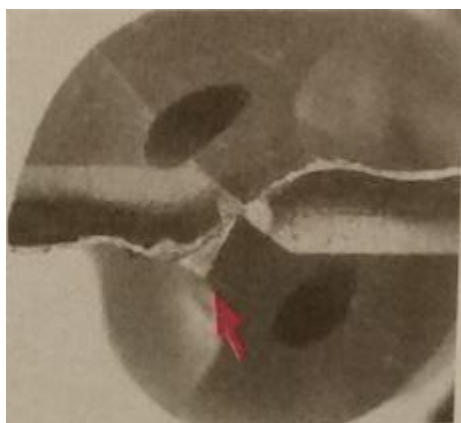


Obr. 15 Určení optimální velikosti opotřebení VB [8]

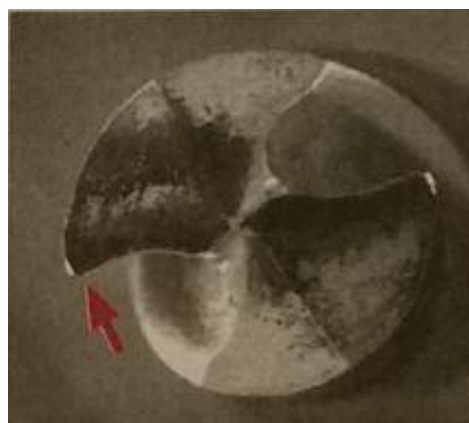
Tato křivka odpovídá rychlořezným a nástrojovým ocelím. Pro slinuté karbidy, řezné keramiky a cermety je část vpravo od bodu A, kdy dochází k lavinovitému opotřebení, výrazně strmější.

4.3.4. Druhy opotřebení

Při vrtání otvorů klasickým vrtákem existuje několik druhů opotřebení. Jedná se o opotřebení příčné hrany (Obr. 16), které se vyskytuje u středu nástroje. Naopak na obvodu nástroje se objevuje opotřebení rohové hrany (Obr. 17). Toto opotřebení se vyskytuje při vyšších řezných rychlostech obrábění. Když dochází k velkému zatížení vrtáku, objevuje se opotřebení silné (Obr. 18), na hlavní řezné hraně a na rohové hraně. Dalším typem opotřebení je opotřebení na příčné a na hlavní řezné hraně (Obr. 19).



Obr. 16 Opotřebení příčné hrany [12]



Obr. 17 Opotřebení rohové hrany [12]

Opotřebení příčné hrany vzniká u vrtáků nejčastěji. Při zvýšených rychlostech vrtání se může objevovat spíše opotřebení rohové hrany. Silné opotřebení na hlavní řezné hraně vzniká při obrábění velmi tvrdých materiálů.



Obr. 18 Silné opotřebení na hlavní řezné hraně a rohové hraně [12]



Obr. 19 Opotřebení na příčné hraně a na hlavní řezné hraně [12]

4.4. Řezivost nástroje

Řezivost je schopnost nástroje obrábět konkrétním způsobem v dané technologii daný obráběný materiál. Z hlediska charakteristik řezivosti je možné řezivost rozdělit na řezivost absolutní a relativní. [14]

Absolutní řezivost je charakterizována buď funkčním vztahem mezi parametry, které s řezivostí souvisejí nebo určitou velikostí dané veličiny charakterizují řezivost. [14]

Relativní řezivost je charakterizována bezrozměrnými čísly, které udávají poměr velikostí určité veličiny, a sice poměr velikosti této veličiny vztahující se k danému materiálu obrobku, resp. nástroji a velikosti této veličiny odpovídající etalonovému materiálu obrobku, resp. nástroji.

[14]

Řezivost je hodnocena především z hlediska intenzity opotřebování břitu, dále též z hlediska teplotního, silového, technologického a kvalitativního. Nejdůležitější kritéria pro hodnocení řezivosti vycházejí z intenzity opotřebování břitu. Nejdůležitějším kritériem tohoto typu je komplexní Taylorův vztah. Dalšími kritérii jsou jednoduchý Taylorův vztah a hodnota řezné rychlosti v_c odpovídající určité trvanlivosti břitu. Uvedené charakteristiky patří do absolutní kategorie. K relativním charakteristikám, které vycházejí z intenzity opotřebování břitu, patří především index obrobiteľnosti. [14]

Taylorův vztah je uveden v normě ČSN ISO 3685, ČSN ISO 8688-1 a ČSN ISO 8688-2. Používá se pro něj i označení T- v_c závislost.

Taylorův vztah má tvar

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} [\text{min}], \quad (6)$$

kde T je trvanlivost v min, C_T je konstanta, v_c je řezná rychlost v $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ a m je exponent závislý na řezném materiálu.

Vzhledem k vysoké hodnotě konstanty C_T (řádově 10^9 až 10^{13}) se vztah uvádí v této podobě:

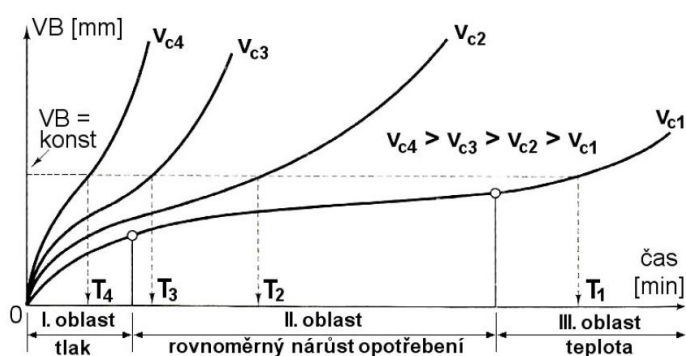
$$v_C = \frac{C_V}{T^m} \text{ [min]}, \quad (7)$$

kde, C_V je konstanta ($C_V = C_T^{1/m}$, řádová velikost konstanty C_V pouze $10^2 - 10^3$)

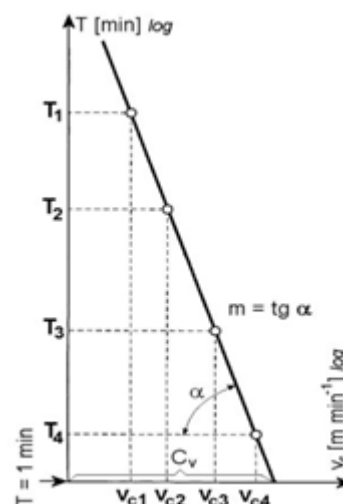
Tab. 2 Hodnoty exponentu m pro různé řezné materiály [2]

Řezný materiál	Nástrojové oceli	Rychlořezné oceli	Slinuté karbidy	Řezná keramika
m [-]	$10 \div 8$	$8 \div 5$	$5 \div 2,5$	$2,5 \div 1,5$

Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti (Obr. 21) se stanovuje pro konkrétní kombinaci řezného nástroje a obráběného materiálu. Poté jsou zjištěné trvanlivosti při konkrétních řezných rychlostech vyneseny do logaritmického diagramu $T-v_c$. V diagramu se vytvoří regresní závislost, která je lineární a odpovídá zvolené hodnotě VB . Z tohoto diagramu lze vyčíst hodnotu konstanty C_V na ose X pro trvanlivost $T = 1$ [min]. Z osy Y lze vyčíst hodnotu $v_c = 1$ [$m \cdot \text{min}^{-1}$]. Hodnota exponentu m se mění v závislosti na vlastnostech použitého řezného materiálu a znázorňuje citlivost na změnu řezné rychlosti. Tato hodnota vyjadřuje směrnici přímky $m = \text{tg } \alpha$. Na Obr. 20 je uvedena závislost opotřebení na řezných rychlostech.



Obr. 20 Časová závislost opotřebení na řezných rychlostech [2]



Obr. 21 $T - v_c$ závislost

Použitím těchto vztahů, je omezení některými podmínkami, jako jsou: Hloubka třísky, posuv nebo opotřebení. Proto je v praxi využíván rozšířený Taylorův vztah

$$v_C = \frac{C_v}{a p^{x_v} \cdot f y_v \cdot T^m} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}, \quad (8)$$

kde, T je trvanlivost v min, C_v je konstanta, v_c je řezná rychlost v $m \cdot \text{min}^{-1}$, m je exponent závislý na řezném materiálu, x_v je exponent vyjadřující vliv na hloubku řezu a y_v je exponent vyjadřující vliv posuvu.

4.5. Charakteristika vrtání

Vrtání je obráběcí proces, kdy hlavní rotační pohyb vykonává nástroj. Hlavní rotační pohyb lze vykonávat i obrobkem (vrtání na soustruhu), ale to je realizováno pouze ve výjimečných případech. Vrták kromě hlavního rotačního pohybu vykonává i vedlejší posuvový pohyb směrem do obrobku. Osa vrtáku je k obrobku většinou kolmá. Vrtacími metodami se zhotovují otvory do plných materiálů, nebo se zvětšují již hotové otvory (např. předkované, předlité apod.). Kromě vrtání se používají ještě další operace pro vytváření nebo zpřesňování otvorů, jako je vyhrubování, vystružování a zahlubování.

Charakteristickou vlastností všech rotačních nástrojů je, že v ose je nulová řezná rychlost. Ta se směrem k obvodu nástroje zvyšuje. Proto řezná rychlost rotačního nástroje je funkcí průměru.

Hodnoty řezné rychlosti v_c , posuvové rychlosti v_f a rychlosti řezného pohybu v_e , se vyjádří pomocí vztahů:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m \cdot \text{min}^{-1}], \quad (9)$$

$$v_f = f \cdot n [mm \cdot \text{min}^{-1}], \quad (10)$$

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} = 10^{-3} \cdot n \cdot \sqrt{(\pi \cdot D)^2 + f^2} [m \cdot \text{min}^{-1}], \quad (11)$$

kde, D je průměr obráběného otvoru v mm, n jsou otáčky nástroje v min^{-1} a f je posuv nástroje na jednu otáčku v mm.

Z důvodu vícebřitých vrtáků, výhrubníků a výstružníků se definuje hodnota posuvu na zub f_z :

$$f_z = \frac{f}{z} [mm \cdot \text{zub}^{-1}], \quad (12)$$

kde z , je počet břitů nástroje.

Pro průřez třísky vrtáním je dán obecný vztah:

$$A_D = h_D \cdot b_D = a_p \cdot f_z [mm^2], \quad (13)$$

kde, h_D je jmenovitá tloušťka třísky v mm, b_D je jmenovitá šířka třísky v mm, a_p je šířka záběru ostří a f_z je posuv na břit v mm.

Při uvažování vrtáku jako dvoubřitého nástroje, lze odvodit tento vztah:

$$A_D = h_D \cdot b_D = \frac{D \cdot f}{4} [mm^2]. \quad (14)$$

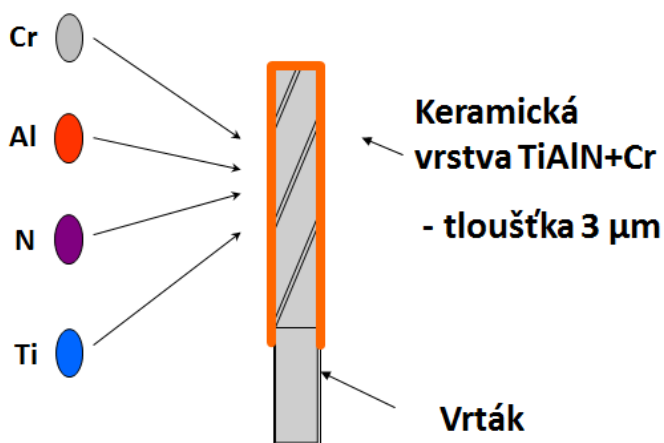
[11]

5. Experimentální část

5.1. Charakteristiky zkoušených vrtáků

Testované vrtáky jsou monolitní vrtáky klasického tvaru bez přidání břitových destiček a bez speciálních úprav např. pro vnitřní chlazení. Vrstvou povlaku je pokryta celá funkční část bez dřívku (Obr. 22), který je bez úpravy. Specifické u těchto vrtáků je složení povlaku s přidáním určitého procenta chromu. Pro experiment byly zapůjčeny vrtáky povlakovány klasickou vrstvou TiAlN (Tab. 3). Dále byly zapůjčeny vrtáky s povlakem TiAlN+Cr, kde bylo přidáno 13% chromu (Tab. 4), 20 % chromu (Tab. 5) a s 25% chromu.

Testované vrtáky mají povlak nanesen na základní povrch slinutého karbidu, který je pískován. Nanesení povlaku bylo provedeno metodou PVD magnetronového naprašování. Dalšími testovanými vrtáky, byly vrtáky s přidavkem Al_2O_3 .

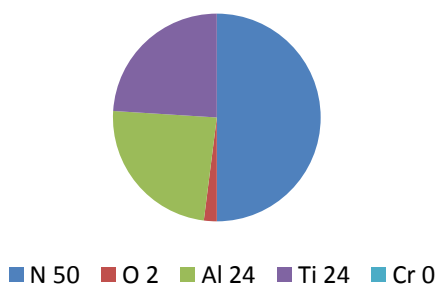


Obr. 22 Naznačení vrstvy na vrtáku

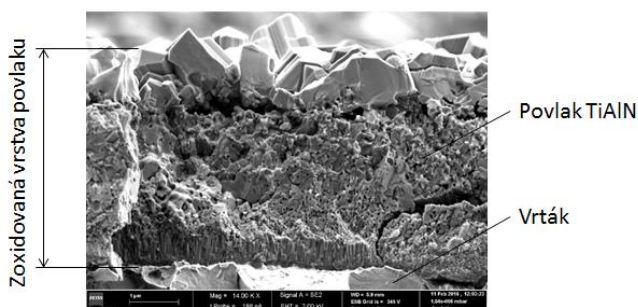
Tab. 3 Přesný obsah prvků v povlaku TiAlN [1]

Výsledný typ	Množství V [%]			
	N	O	Al	Ti
Statistika				
Max	49.95	1.96	23.98	24.63
Min	49.78	1.45	23.92	24.33
Průměr	49.85	1.77	23.95	24.43
Standartní odchylka	0.07	0.23	0.03	0.14
Označení	104-WCD-T-11	104-WCD-T-12	104-WCD-T-13	104-WCD-T-14
N	49.88	49.78	49.95	49.81
O	1.79	1.96	1.45	1.89
Al	23.97	23.93	23.98	23.92
Ti	24.37	24.33	24.63	24.38
Celkem	100.00	100.00	100.00	100.00

Klasická vrstva TiAlN je běžně používaná vrstva odolávající pracovní teplotě 600 °C. Procentuální obsah prvků je dán technologií výroby povlaku a také je dán know-how a zkušenostmi vyrábějícího subjektu. Testované vzorky mají přesný obsah prvků, viz Tab. 3. Zaokrouhlené hodnoty prvků jsou uvedeny na Obr. 23. Při teplotě 900 °C dochází k zoxidování veškerého povlaku (Obr. 24) a tím i ke ztrátě vlastností povlaku.



Obr. 23 Procentuální obsah prvků v povlaku TiAlN

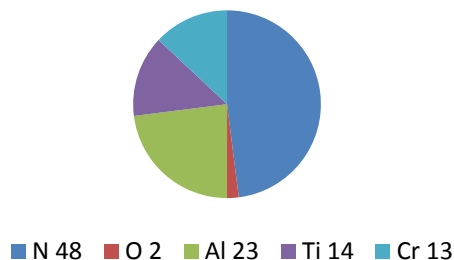


Obr. 24 Zoxidovaná vrstva TiAlN povlaku při 900 °C

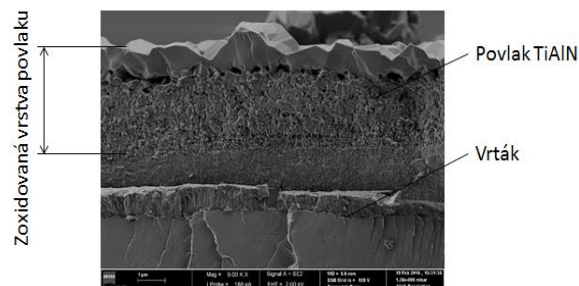
Dalšími testovanými vrtáky jsou vrtáky s povlakem TiAlN s přidáním 13% chromu. Složení těchto povlaků je uvedeno v Tab. 4. Z Obr. 25 je vidět, že chrom je do povlaku vložen na úkor titanu. Zoxidovaná vrstva povlaku není při teplotě 900 °C v celém průřezu ale pouze ve 2/3 průřezu (Obr. 26).

Tab. 4 Přesný obsah prvků v povlaku TiAlN+13%Cr [1]

Výsledný typ	Množství V [%]				
	N	O	Al	Ti	Cr
Statistika					
Max	48.06	2.00	22.85	14.95	13.1
Min	47.75	1.68	22.61	14.58	12.66
Průměr	47.86	1.87	22.76	14.72	12.79
Standartní odchylka	0.14	0.14	0.10	0.17	0.15
Označení	105-WCD-T-1	105-WCD-T-2	105-WCD-T-3	105-WCD-T-4	-
N	47.80	48.06	47.84	47.75	-
O	2.00	1.86	1.95	1.68	-
Al	22.61	22.77	22.80	22.85	-
Ti	14.58	14.59	14.76	14.95	-
Cr	13.1	12.72	12.66	12.77	-
Celkem	100.00	100.00	100.00	100.00	-



Obr. 25 Procentuální obsah prvků v povlaku TiAlN+13% Cr

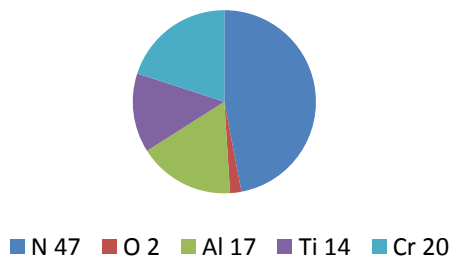


Obr. 26 Zoxidovaná vrstva TiAlN+13% Cr povlaku při 900 °C

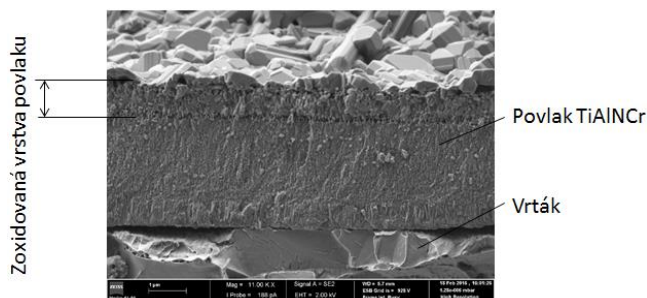
Dalšími testovanými vrtáky jsou vrtáky s povlakem TiAlN s přidáním 20% chromu. Složení těchto povlaků je uvedeno v Tab. 5. Z Obr. 28 je vidět, že chrom je do povlaku vložen na úkor titanu a hliníku. Zoxidovaná vrstva povlaku není při teplotě 900 °C v celém průřezu ale pouze ve 1/3 průřezu (Obr. 28).

Tab. 5 Přesný obsah prvků v povlaku TiAlN+20%Cr [1]

Výsledný typ	Množství V [%]				
	N	O	Al	Ti	Cr
Statistika					
Max	46.68	2.79	16.84	13.73	20.81
Min	46.34	2.14	16.64	13.50	20.55
Průměr	46.49	2.47	16.73	13.63	20.68
Standartní odchylka	0.16	0.27	0.10	0.10	0.11
Označení	106-WCD-T-11	106-WCD-T-12	106-WCD-T-13	106-WCD-T-14	-
N	46.68	46.34	46.56	46.39	-
O	2.14	2.55	2.41	2.79	-
Al	16.84	16.66	16.64	16.78	-
Ti	13.63	13.65	13.73	13.50	-
Cr	20.71	20.81	20.66	20.55	-
Celkem	100.00	100.00	100.00	100.00	-



Obr. 27 Procentuální obsah prvků v povlaku TiAlN+20% Cr

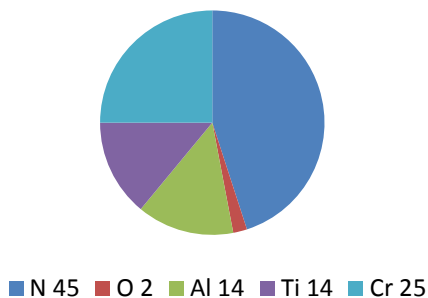


Obr. 28 Zoxidovaná vrstva TiAlN+20% Cr povlaku při 900 °C

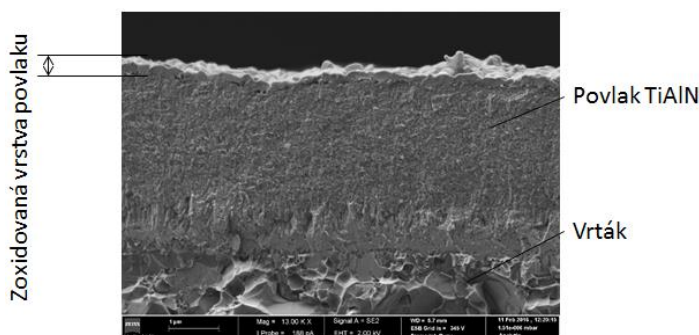
Posledními testovanými vrtáky jsou vrtáky s povlakem TiAlN s přidáním 25% chromu. Složení těchto povlaků je uvedeno v Tab. 6. Z je vidět, že chrom je do povlaku vložen na úkor titanu a hliníku. Zoxidovaná vrstva povlaku není při teplotě 900 °C v celém průřezu ale pouze ve 1/10 průřezu (Obr. 28).

Tab. 6 Přesný obsah prvků v povlaku TiAlN+25%Cr [1]

Výsledný typ	Množství V [%]				
	N	O	Al	Ti	Cr
Statistika					
Max	45.91	2.7	14.86	13.45	24.39
Min	45.40	1.51	14.79	13.13	24.27
Průměr	45.65	1.88	14.82	13.32	24.33
Standartní odchylka	0.27	0.25	0.03	0.14	0.06
Označení	107-WCD-T-11	107-WCD-T-12	107-WCD-T-13	107-WCD-T-14	-
N	45.86	45.40	45.43	45.91	-
O	1.93	2.7	2.00	1.51	-
Al	14.79	14.83	14.79	14.86	-
Ti	13.13	13.31	13.41	13.45	-
Cr	24.29	24.39	24.37	24.27	-
Celkem	100.00	100.00	100.00	100.00	-



Obr. 29 Procentuální obsah prvků v povlaku TiAlN+25% Cr



Obr. 30 Zoxidovaná vrstva TiAlN+25% Cr povlaku při 900 °C

5.2. Vrtání za konstantní síly

V první části experimentu došlo k přípravě pracoviště a naladění parametrů k prvotnímu testování. V první fázi experimentu bylo vrtáno za konstantní síly do jednotlivých materiálů (Obr. 34) a byl měřen čas, při kterém došlo k vyvrtání otvoru o hloubce 7 mm (Obr. 33). Došlo tak tedy k odladění experimentu a naměření prvních hodnot, od kterých se bude vyvíjet další pokračování.

Pracovní pomůcky a řezné podmínky

K experimentu byla použita stolní vrtačka KAZANLIK (Obr. 31, Obr. 32), upínací zařízení, závaží (10 kg), stopky, vrtaný materiál (Ocel 1.7121, TiAl6V4, 1.4301), vrtáky s povlakem (0% Cr, 13% Cr, 20% Cr a 25% Cr) a vrtáky bez povlaku HSS (3 ks).

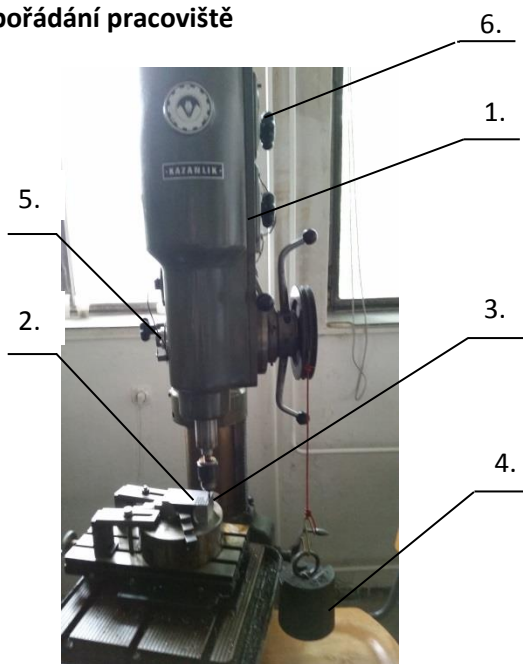
Průměr vrtáků $D = 5,5 \text{ mm}$

Řezná rychlost $v_c = 8,21 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Otáčky vřetene $n = 475 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$

Zatížení vrtáku $F = 98 \text{ N}$

Uspořádání pracoviště



Obr. 31 Uspořádání pracoviště - pohled 1

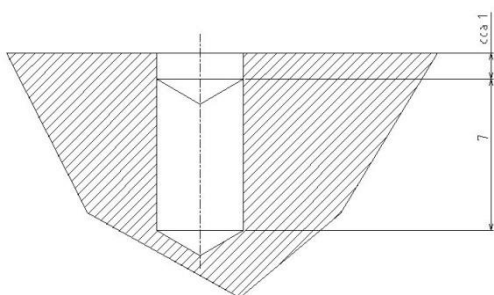


Obr. 32 Uspořádání pracoviště - pohled 2

Legenda

1. Vrtačka
2. Obráběný materiál
3. Vrták WCD
4. Závaží 10 kg
5. Snímač polohy pohybu – nastaven na dráhu řezu 7 mm
6. Stopky

Pohled na řez



Obr. 33 Dráha řezu



Obr. 34 Vzorky obráběného materiálu

L = 7 mm (délka otvoru, ve kterém je měřen čas vrtání za působení konstantní síly)

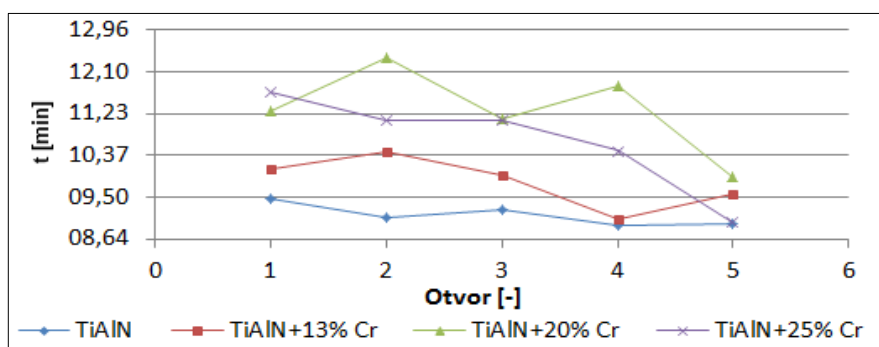
5.2.1. Vrtání do materiálu 1.7131 (ČSN 14 220)

Naměřené hodnoty

První měření probíhalo do materiálu 1.7131. Jedním vrtákem z každé řady, bylo navrtáno 5 otvorů a byl změřen čas (Tab. 7, Obr. 35), za jakou dobu vyvrtali danou vzdálenost.

Tab. 7 Časy naměřené vrtáky s přidavkem 0%, 13%, 20% a 25% Cr v povlaku

	0% Cr	13% Cr	20% Cr	25% Cr
1	09,47	10,10	11,28	11,69
2	09,09	10,44	12,38	11,10
3	09,25	09,96	11,13	11,10
4	08,91	09,05	11,79	10,46
5	08,94	09,56	09,91	08,97



Obr. 35 Časy naměřené při vrtání do 1.7131

Zhodnocení pro vrták s povlakem bez přídavku chromu

Celkem bylo vrtákem zhotoveno 9 děr. Ostatní 4 díry byly zkušební a byl na nich nalazený proces. Hodnoty času se pohybovaly pro každý vrták v rámci přibližně 1 sekundy a vykazovaly mírně klesající hodnoty. Zajímavé z tohoto prvotního testování je, že tento vrták s povlakem bez přídavku chromu měl nejnižší hodnoty časů.

Zhodnocení pro vrták s povlakem s přídavkem 13% chromu

Celkem bylo vrtákem zhotoveno 5 děr stejným postupem, jako vrtákem TiAlN. Hodnoty času se pohybovaly v rámci přibližně 1,5 sekundy a vykazovaly klesající hodnotu jako u vrtáku TiAlN. Tyto vrtáky vykazovali vyšší hodnoty naměřených časů než vrtáky bez přídavku chromu.

Zhodnocení pro vrták s povlakem s přídavkem 20% chromu

Celkem bylo vrtákem zhotoveno 5 děr stejným postupem. Naměřené hodnoty se pohybovaly přibližně v rozmezí 1,5 sekund ve vyšším intervalu než předcházející 2 vrtáky.

Zhodnocení pro vrták s povlakem s přídavkem 25% chromu

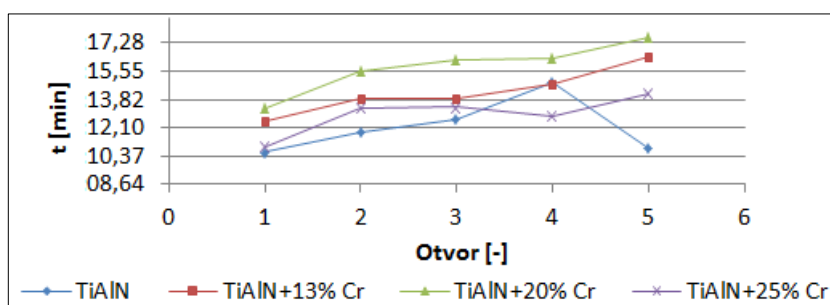
Celkem bylo vrtákem zhotoveno 5 děr stejným postupem. Naměřené hodnoty se pohybovaly přibližně v rozmezí 2 sekund, což oproti předchozím vrtákům byl výraznější rozdíl. Z výsledků je vidět, že vyšší procento chromu způsobuje vyšší tření a tím i zvyšující se hodnoty časů.

5.2.2. Vrtání do Ti6Al4V

Vrtání do slitiny Ti6Al4V probíhalo za stejných podmínek jako do materiálu 1.7131. Byly opět změřeny časy a graficky vyhodnoceny (Tab. 8, Obr. 36) .

Tab. 8 Časy naměřené vrtáky 0%, 13%, 20% a 25% Cr v povlaku

	0% Cr	13% Cr	20% Cr	25% Cr
1	10,60	12,55	13,26	10,93
2	11,82	13,90	15,60	13,32
3	12,65	13,93	16,22	13,35
4	14,90	14,81	16,37	12,84
5	10,80	16,41	17,60	14,22



Obr. 36 Hodnoty naměřené při vrtání do Ti6Al4V

Zhodnocení pro vrták s povlakem bez přídavku chromu

Celkem bylo vrtákem zhotoveno 5 děr. Hodnoty času se pohybovaly v rámci přibližně 3,5 sekundy a vykazovaly oproti vrtání do 1.7131 stoupající hodnoty.

Zhodnocení pro vrták s povlakem s přídavkem 13% chromu

Celkem bylo vrtákem zhotoveno 5 děr stejným postupem, jako vrtákem TaAlN. Hodnoty času se pohybovaly v rámci přibližně 4 sekund a vykazovaly stoupající hodnoty jako u vrtáku TiAlN. Časové hodnoty byly přibližně o 1 sekundu výše než u vrtáku s TiAlN. Opět tyto vrtáky vykazovali vyšší tření než vrtáky TiAlN.

Zhodnocení pro vrták s povlakem s přídavkem 20% chromu

Celkem bylo vrtákem zhotoveno 5 děr stejným postupem. Naměřené hodnoty se pohybovaly přibližně v rozmezí 3,5 sekund ve vyšším intervalu než předcházející 2 vrtáky. Přibližně o 2 sekundy. Opět se zvyšujícím se procentem chromu je vyšší tření.

Zhodnocení pro vrták s povlakem s přídavkem 25% chromu

Celkem bylo vrtákem zhotoveno 5 děr stejným postupem. Naměřené hodnoty se pohybovaly přibližně v rozmezí 2,5 sekund, v rozmezí hodnot vrtáků bez přídavku chromu a s přídavkem 13% chromu. Zde je tření nižší než u vrtáku s 20% Cr.

5.2.3. Vrtání do korozi vzdorného materiálu 1.4301 (ČSN 17 240)

Vrtákem s přídavkem 13 % chromu

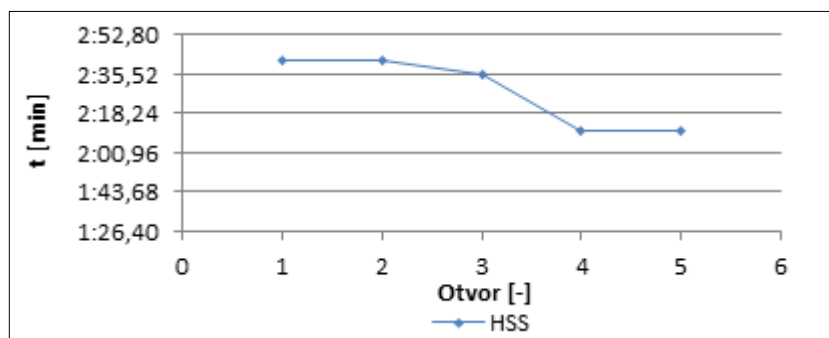
Po 22 vteřinách v záběru, těsně po najetí na plný průměr se uštípla půlka břitu. Odlovení břitu je dáno nabroušením břitu vrtáku. Tyto vrtáky jsou přednostně doporučeny pro použití na vrtání ocelí.

5.2.4. Vrtání konstantní silou klasickým vrtákem z HSS

Vrtání konstantní silou bylo provedeno i vrtákem z HSS. Podmínky testování byly zachovány jako v předchozím případě. Naměřené časy byly zaznamenány a vyhodnoceny (Tab. 9, Obr. 37).

Tab. 9 Časy vrtání konstantní silou vrtákem z HSS

Otvor	1.7121	TiAl4V6 a 1.4301
1	02:41,9	Do titanu a 17 240 nevrta
2	02:41,9	10 kg závaží – nevrta
3	02:35,7	20 kg závaží – nevrta
4	02:10,5	10 kg závaží – nevrta
5	02:10,8	20 kg závaží – nevrta



Obr. 37 Hodnoty naměřené při vrtání vrtákem z HSS

Z naměřených hodnot je viditelné, že porovnání klasického vrtáku a testovaného vrtáku je nemožné. Časy vrtání vrtáky z HSS jsou až 15x vyšší. Těmito vrtáky se dalo vrtat pouze do materiálu 1.7121. Toto vrtání obyčejným vrtákem je oproti vrtákům s povlakem velmi zdouhavé a nedá se považovat za vrtání. Nedochází k vhodnému záběru vrtáku do materiálu a vrták není schopen materiál vhodně odebrat. Do materiálu Ti6Al4V a do 1.7121 nebyl vrták schopný vytvořit otvor. Nedocházelo k záběru ani k odebírání materiálu. Časy jsou až o 2 minuty 20 sekund delší → tření napovlakovaného vrtáku je daleko větší.

Vypočítané hodnoty pro vrtání za konstantní síly

Řezná rychlost v_c :

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 5,5 \cdot 560}{1000} = \underline{\underline{9,7 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]}} \quad (15)$$

Posuvová rychlost v_f :

$$v_f = f \cdot n = 0,11 \cdot 560 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (16)$$

Rychlost řezného pohybu v_e :

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} = \sqrt{9,7^2 + 0,0616^2} = \underline{\underline{9,7 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]}} \quad (17)$$

Posuv na zub f_z :

$$f_z = \frac{f}{z} = \frac{0,11}{2} = \underline{\underline{0,055 \text{ [mm} \cdot \text{zub}^{-1}]}} \quad (18)$$

Průřez třísky:

$$A_D = h_D \cdot b_D = \frac{D \cdot f}{4} = \frac{5,5 \cdot 0,11}{4} = \underline{\underline{0,152 \text{ [mm}^2]}} \quad (19)$$

Závěr prvotního testování při měření konstantní silou

Na začátku experimentu bylo zhotoveno pracoviště pro měření a došlo k odladění prvního zkoušení. Poté byly jednotlivé vrtáky testovány, při vrtání do materiálu 1.7121, TiAl6V4 a do 1.4301. Při vrtání byl měřen čas, kdy vrták urazil vzdálenost 7 mm. Při porovnání metod bylo zjištěno, že při vrtání do materiálu 1.7121 jsou hodnoty pro všechny vrtáky v rozmezí přibližně 3 sekund a jejich hodnoty jsou mírně klesající. Při vrtání do TiAl6V4 jsou hodnoty v rozmezí až 7 sekund a jejich hodnoty stoupají. Pro porovnání byl tento samý experiment opakován s vrtáky z HSS. Při vrtání do materiálu 1.7121 byly hodnoty naměřených časů přibližně 15x vyšší než u testovaných napovlakovaných vrtáků. Při vrtání do Ti6Al4V a 1.7121 nebylo schopné vrtáky z HSS vytvořit otvor.

5.3. Měření sil při vrtání

Pro další porovnání vlastností povlaku byly provedeny zkoušky silového působení vrtáku na materiál. U tohoto měření byly zvoleny otáčky jako u měření konstantní silou ($n=560 \text{ ot. min}^{-1}$). Posuv byl $0,1 \text{ mm. ot}^{-1}$. V další části měření sil byly vrtáky testovány za řezných rychlostí 50 m. min^{-1} , 100 m. min^{-1} a 200 m. min^{-1} . Síla byla měřena dynamometrem Kistler 9272 a měření bylo prováděno na konzolové vrtačce Kazanlik (Obr. 38) a na frézce FC 16 CNC (Obr. 39).



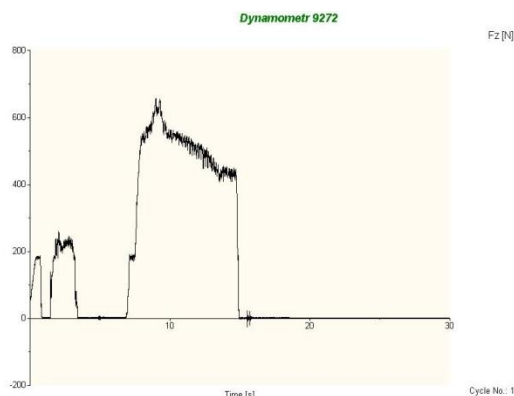
Obr. 38 Konzolová vrtačka Kazanlik s připojeným dynamometrem



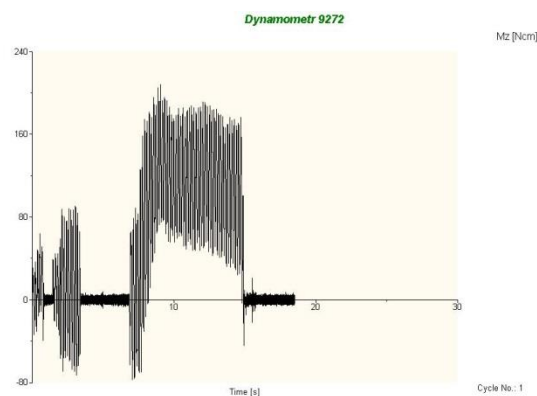
Obr. 39 Frézka FC 16 CNC s připojeným dynamometrem

5.3.1. Vrtání do 1.7131 (ČSN 14 220)

Nejprve bylo provedeno měření na vrtačce Kazanlik, kde byly změřeny síly při řezné rychlosti $9,7 \text{ m. min}^{-1}$ a posuvu $0,1 \text{ mm. ot}^{-1}$. Nejprve byl ručně navrtán malý otvor pro správné vedení vrtáku a poté byl spuštěn konstantní posuv a byly naměřeny síly. Z grafu (Obr. 40) je vidět, že hodnota osové síly je pro první měření 500 N. Při stejném měření byl zaznamenán i krouticí moment. Hodnota kroutícího momentu je $120 \text{ N.cm} = 1,2 \text{ N.m}$ (Obr. 41). Pro každý vrták byly provedeny 3 otvory, ze kterých byl proveden průměr (Tab. 10).



Obr. 40 Osová síla při vrtání do 1.7121



Obr. 41 Kroticí moment při vrtání do 1.7121

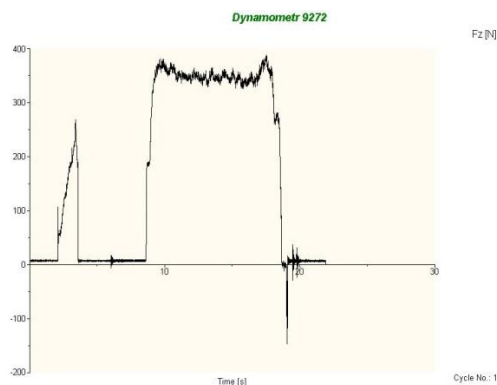
Tab. 10 Naměřené hodnoty osově síly a kroticího momentu při vrtání do 14 220

	F_1 [N]	F_2 [N]	F_3 [N]	F_v [N]	Mk_1 [N.m]	Mk_2 [N.m]	Mk_3 [N.m]	Mk_v [N.m]
Měření	1	2	3	-	1	2	3	-
0% Cr	500	300	400	400	1,2	1,5	1,35	1,35
13% Cr	550	490	450	497	2	2	2	2
20% Cr	550	550	550	550	1,4	2,3	2,3	2
25% CR	570	600	600	590	2,3	2	2	2,1

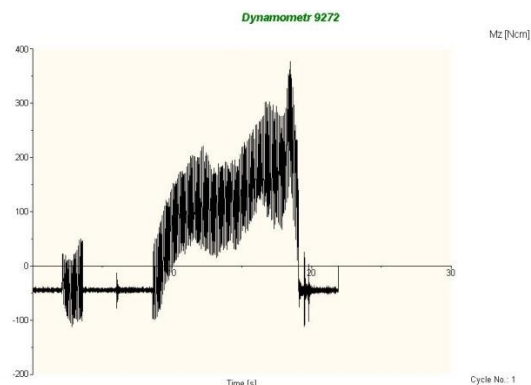
Z výsledků je patrné, že nejmenší hodnoty síly i kroticího momentu působící na vrták, jsou pro vrták bez přídavku chromu. Chrom, jako další prvek v povlaku působí při těchto řezných podmínkách negativně a zvyšuje tření a tím i zvýšené silové namáhání obrobku.

5.3.2. Vrtání do Ti6Al4V

Stejně jako při měření sil (Obr. 42) a kroticích momentů (Obr. 43) bylo postupováno i při vrtání do materiálu Ti6Al4V. Z naměřených hodnot (Tab. 11) je vidět, že hodnoty pro osově zatížení jsou přibližně o 100 až 200 N menší než u vrtání do 1.7121. Opět jako nejlepší se jevil vrták bez přídavku chromu, který vykazoval nejnižší tření.



Obr. 42 Osově síla při vrtání to Ti6Al4V



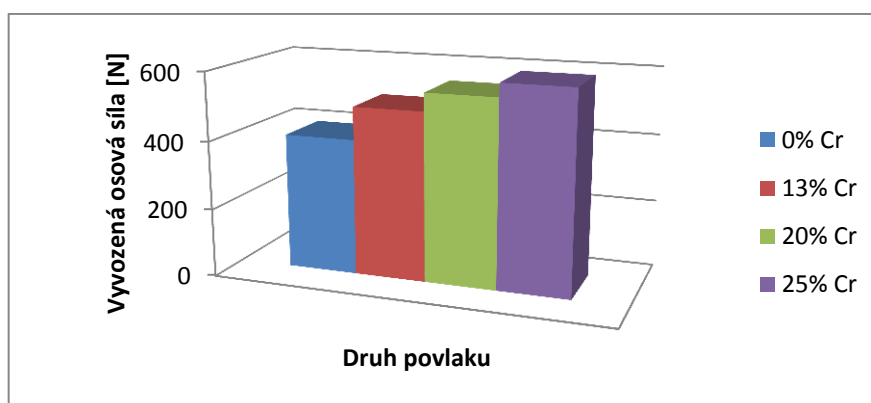
Obr. 43 Kroticí moment při vrtání do Ti6Al4V

Tab. 11 Naměřené hodnoty osové síly a krouticího momentu při vrtání do Ti6Al4V

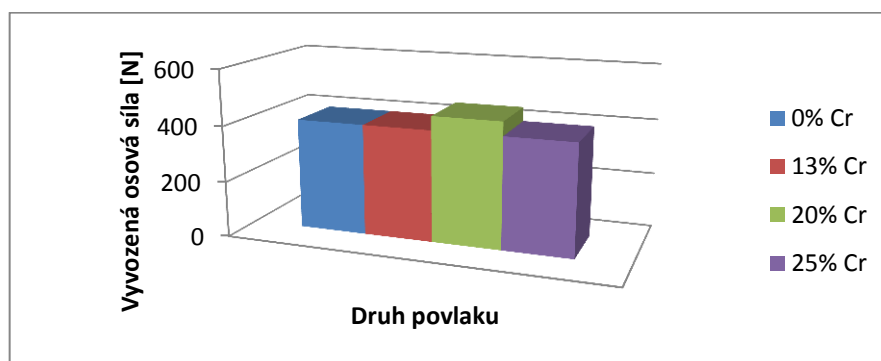
	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	F _V [N]	Mk ₁ [N.m]	Mk ₂ [N.m]	Mk ₃ [N.m]	Mk _V [N.m]
Měření	1	2	3	-	1	2	3	-
0% Cr	350	350	400	367	1,5	1,5	1,5	1,50
13% Cr	350	380	400	377	2,5	1,9	0,6	1,67
20% Cr	390	430	450	423	1,3	1,7	1,7	1,57
25% Cr	370	400	400	390	1,5	1,4	1,4	1,43

5.3.3. Porovnání naměřených výsledků při vrtání konstantním posuvem

Při vrtání s vrtáky s povlakem s přidavkem chromu se hodnoty síly i krouticího momentu pohybovaly v přibližně stejných hodnotách. Při vrtání do materiálu 1.7131 (ČSN 14 220) byly hodnoty osové síly kolem 500 N (Obr. 44) a hodnoty krouticího momentu kolem 2 N.m. Při vrtání do titanu jsou hodnoty síly kolem 380 N (Obr. 45) a hodnoty krouticího momentu kolem 1,6 N.m.



Obr. 44 Naměřené síly při vrtání konstantním posuvem do 1.7131



Obr. 45 Naměřené krouticí momenty při vrtání konstantním posuvem do Ti6Al4V

Při předběžném vyhodnocení vhodnosti vrtáků byla zvolena stupnice (Tab. 12) od 1 (nejlepší) až 5 (nejhorší). Z tohoto vyhodnocení je usouzeno, že nejlepší vlastnosti mají vrtáky bez obsahu chromu.

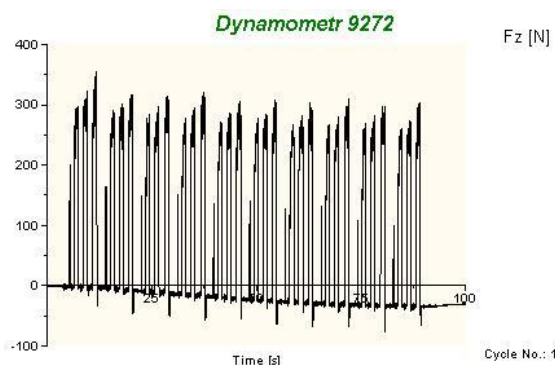
Pro toto prvotní měření byly zvoleny malé otáčky i posuvy, proto nedocházelo při vrtání k vysokým teplotám blízcím se teplotám, kdy se začíná projevovat spinodální dekompozice. Proto je vliv chromu při takto malých rychlostech nepatrný, naopak je jeho přítomnost negativní.

Tab. 12 Vyhodnocení vrtáků z předběžného měření

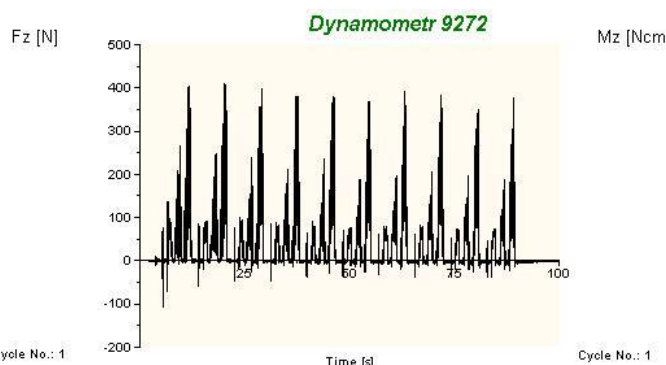
Vrták	Konstantní síla		Konstantní posuv	
	1.7131	Ti6Al4V	1.7131	Ti6Al4V
0% Cr	1	1	1	1
13% Cr	2	2	2	2
20% Cr	4	4	3	4
25% Cr	3	3	4	3

5.3.4. Vrtání do 1.2714 (ČSN 19 663) za vyšších řezných rychlostí

Měření sil bylo provedeno i při řezných rychlostech 50 m.min⁻¹, 100 m.min⁻¹ a 200 m.min⁻¹. Pro tyto hodnoty bylo v další části změřeno i opotřebení a teplotní působení. Do materiálu bylo každým vrtákem vytvořeno 10 otvorů o hloubce 10 mm a bylo zaznamenáno silové působení a krouticí moment (Obr. 47, Obr. 46, Tab. 13, Tab. 14, Tab. 15, Tab. 16).



Obr. 46 Ukázka naměřených hodnot síly při 6 000 [ot.min⁻¹]



Obr. 47 Ukázka naměřených hodnot krouticího momentu při 6 000 [ot.min⁻¹]

Tab. 13 Průměrné hodnoty osových sil a krouticích momentů pro vrták s 0% Cr

v_c [m.min ⁻¹]	50	100	200
Fz [N]	300	300	600
Mz [N.m]	2,0	2,0	1,7

Tab. 14 Průměrné hodnoty osových sil a krouticích momentů pro vrták s 13% Cr

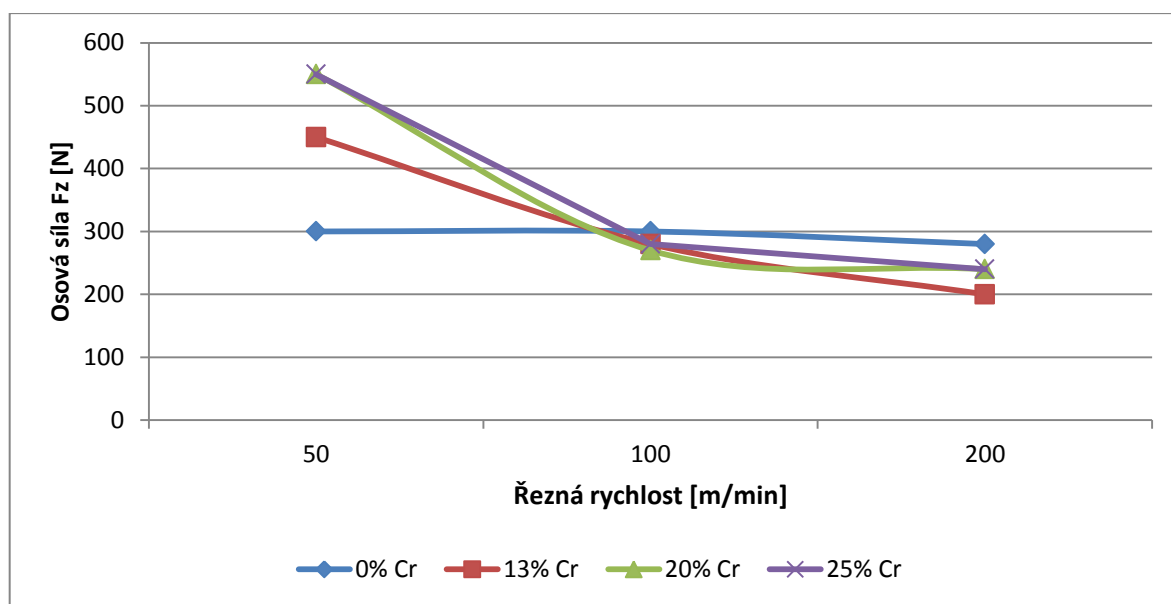
v_c [m.min ⁻¹]	50	100	200
Fz [N]	450	280	200
Mz [N.m]	2,3	2,0	1,5

Tab. 15 Průměrné hodnoty osových sil a krouticích momentů pro vrták s 20% Cr

v_c [m.min ⁻¹]	50	100	200
Fz [N]	550	270	240
Mz [N.m]	3,0	2,5	2,0

Tab. 16 Průměrné hodnoty osových sil a krouticích momentů pro vrták s 25% Cr

v_c [m.min ⁻¹]	50	100	200
Fz [N]	550	280	240
Mz [N.m]	2,5	2,5	2,4



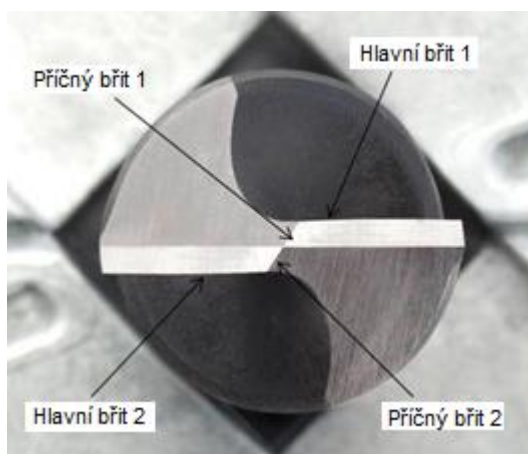
Obr. 48 Průběh osové síly při jednotlivých rychlostech

Dle předpokladů se síla se zvyšujícími se otáčkami snižovala. Dle grafu (Obr. 48) působí při doporučené rychlosti 50 m.min⁻¹ nejmenší silou vrták bez přídavku chromu. Při vyšších rychlostech je silové působení přibližně stejné. Z toho lze usoudit, že při vyšších řezných rychlostech nehraje počet prvků ani jejich procentuální obsah v povlaku výraznou roli z hlediska namáhání. Pouze u nižších rychlostí je přítomnost chromu znatelná a působí negativně. Dopování chromem způsobuje vznik mimo oxidu hlinitého i oxid chromitý a to vyvolává změny v chování.

5.4. Měření opotřebení na nástrojích

V další části experimentálního zkoušení povlaků na vrtácích byla zvolena metoda měření opotřebení při různých řezných podmínkách. Dle geometrie břitu vrtáku bylo měřeno opotřebení na dvou hlavních a dvou příčných břitech (Obr. 49). Toto rozdělení zvoleno pro snazší orientaci. Vrtací proces byl prováděn na obráběcím stroji FV 25 CNC (Obr. 50) a na stoji FC 16 CNC (Obr. 52). Druhý stroj FC 16 CNC byl použit pro vrtání při vyšších řezných rychlostech. Stroj FV 25 CNC disponuje maximálními otáčkami $6\,000\text{ ot.min}^{-1}$. Měření opotřebení probíhalo metodou přímou mikrometrickou na mikroskopu s křížovým odměřováním (Obr. 51).

Systematika měření byla nastavena tak, aby experiment byl stabilní a nedocházelo k vnějším rušivým vlivům. Vrtání bylo prováděno do materiálu 1.2714, který disponuje vysokou tvrdostí a pevností (viz kapitola 5.2.). Opotřebení bylo měřeno vždy po 15-ti vyvrtaných otvorech o hloubce 10 mm. Po vyvrtání 15-ti otvorů došlo k vyjmutí nástroje ze sklíčidla stroje a k jeho umístění do mikroskopu a kontrole a změření opotřebení. Poté byl vrták vložen zpět do sklíčidla a do vřetena stroje, došlo k nastavení nového nulového bodu a k provedení stejného vrtacího procesu. Doba, při které docházelo k sejmutí nástroje, kontrole opotřebení a vložení zpět trvala 5 minut. Tato časová hodnota byla vždy dodržena až do okamžiku, kdy došlo k výraznému opotřebení nebo celkové destrukci břitu a tím k ukončení testování.



Obr. 49 Označení geometrie břitu



Obr. 50 Obráběcí stroj FV 25 CNC



Obr. 51 Mikroskop



Obr. 52 Obráběcí stroj FC 16 CNC

Pro vrtací cyklus byl vytvořen program v řídicím systému stroje (viz příloha) a byly zde i nastaveny řezné podmínky. Program byl vytvořen ručně vzhledem k snadnější další případné úpravě.

5.4.1. Měření opotřebení při řezné rychlosti 50 [m.min⁻¹]

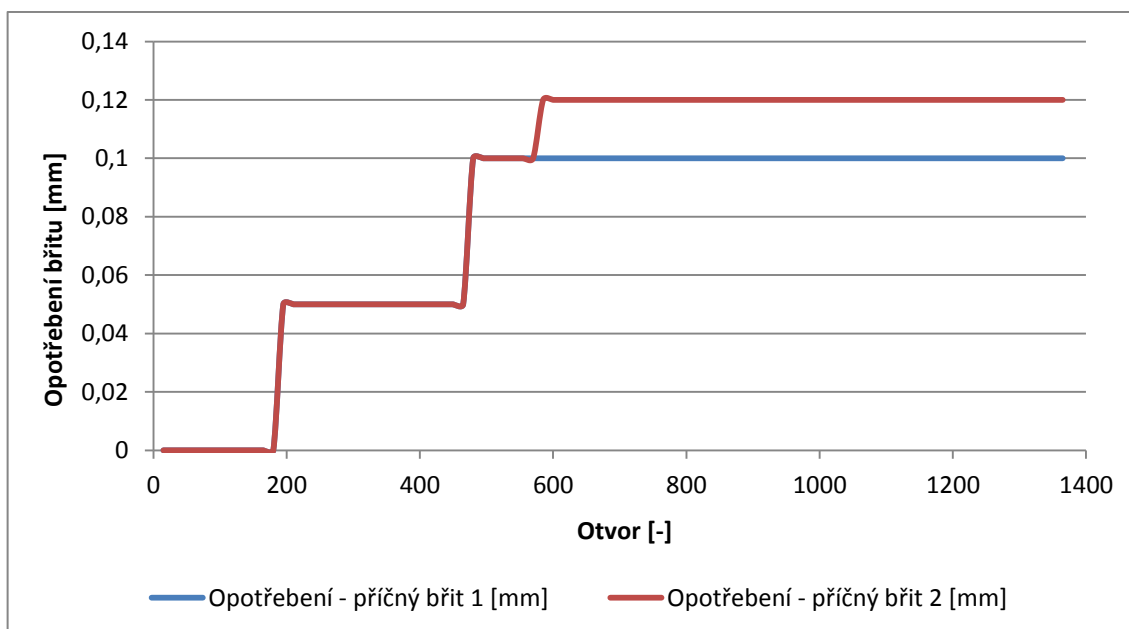
Pro první testování byly zvoleny řezné rychlosti doporučené pro monolitní vrtáky s povlakem TiAlN dle katalogu společnosti Sandvik Coromant.

Posuv: 0,05 [mm.ot⁻¹] – doporučená hodnota: 0,05 – 0,1 [mm.ot⁻¹]

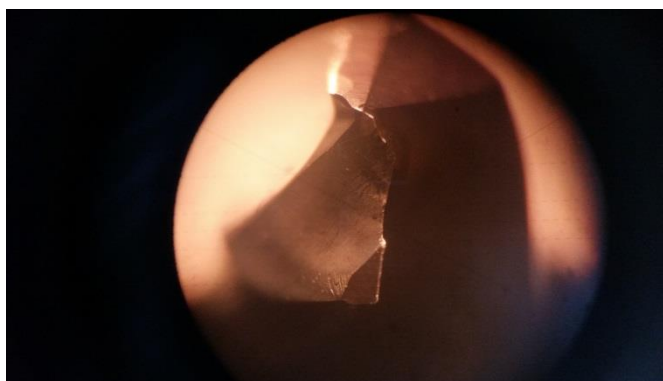
Otáčky: 3000 [ot.min⁻¹]

Na základě takto zvolených podmínek experimentu byla zhotovena závislost opotřebení v [mm] na počtu vyvrtaných otvorů [-] a bylo provedeno porovnání pro jednotlivé povlaky. Použité vrtáky měli pískovaný základní povrch.

Měření opotřebení vrtáku s povlakem bez přídavku chromu



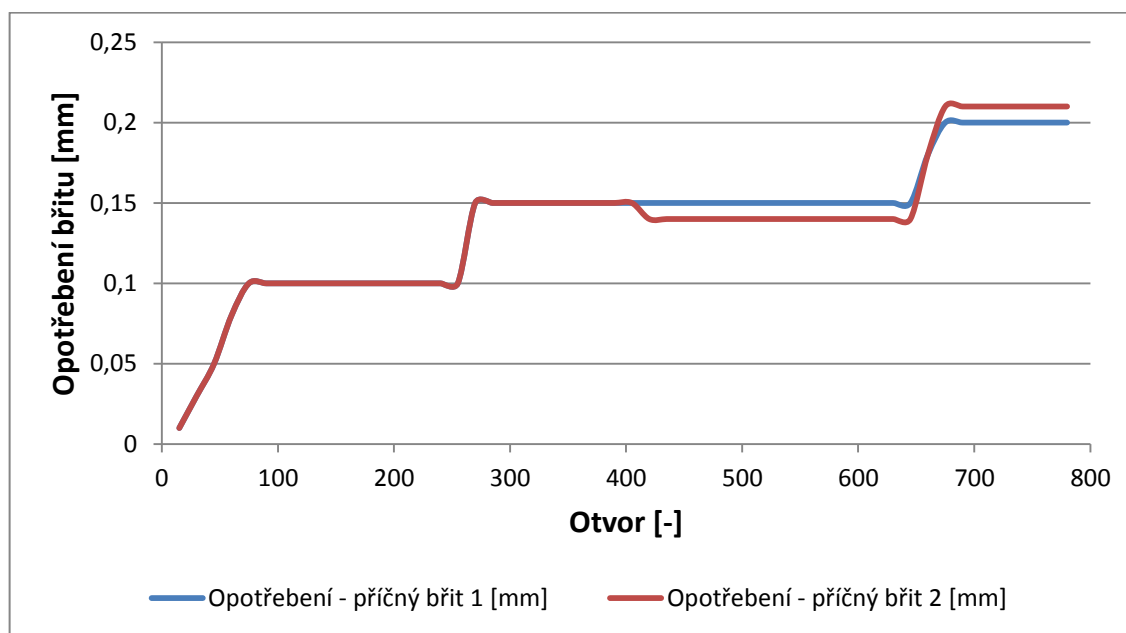
Obr. 53 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem bez přídavku chromu



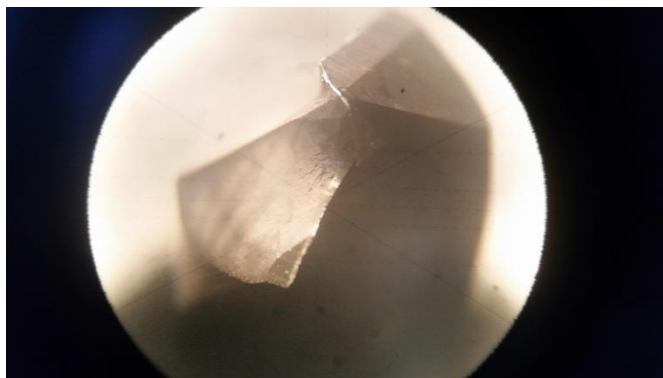
Obr. 54 Mikroskopický snímek po destrukci břitu vrtáku s povlakem s 0% Cr

Z Obr. 53 je vidět, že opotřebení na příčném břitu 1 a 2 bylo stejné až do hodnoty 570 vyvrtaných otvorů. Poté je opotřebení na břitu 2 o 0,02 mm vyšší oproti břitu 1 až do destrukce, která nastala při vyvrtání 1365 otvoru. K opotřebení na obou hlavních břitech při testování nedošlo. Při destrukci břitu došlo k odlomení břitu na celé jedné polovině vrtáku (Obr. 54). Při vrtání nedocházelo k vibracím stroje, proces vrtání byl klidný. Špona měla tvar článkovitý až elementární. Vyvrtané otvory byly bez výrazně ztelného vlivu teploty.

Měření opotřebení vrtáku s povlakem s přídavkem 13% Cr



Obr. 55 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 13% Cr

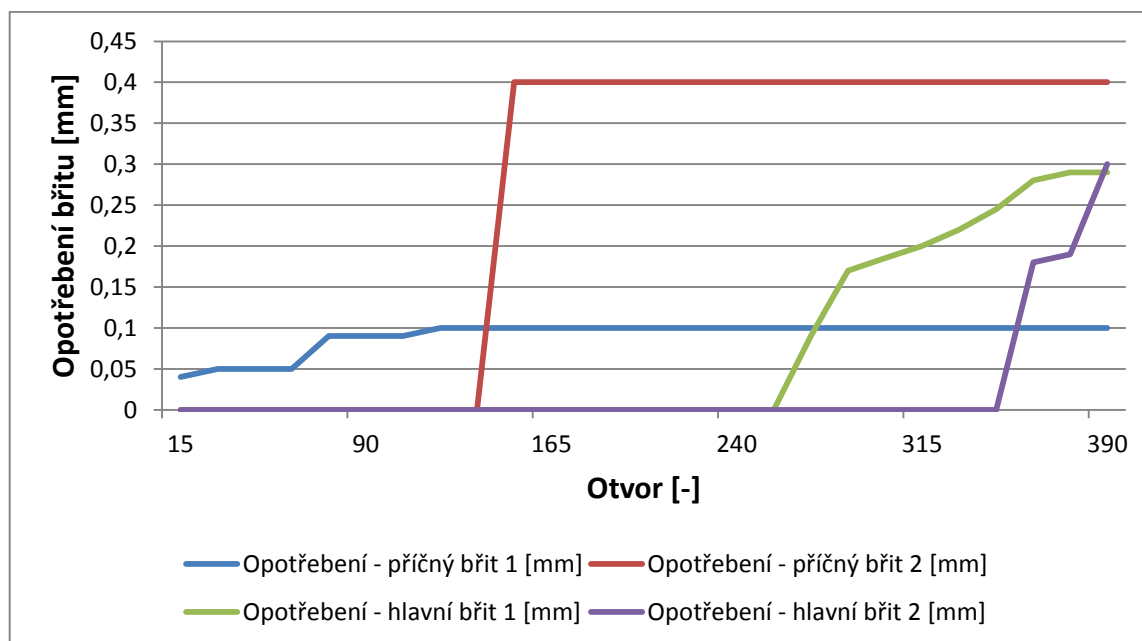


Obr. 56 Mikroskopický snímek po destrukci břitu vrtáku s povlakem s 13% Cr

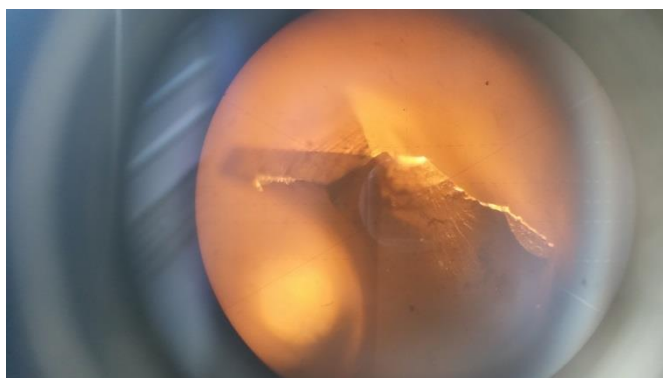
U vrtáku s 13% Cr přídavku chromu v povlaku došlo k vyvrtání pouze 780 otvorů (Obr. 55). To je přibližně o 50% méně než u vrtáku s povlakem TiAlN bez chromu. To může být způsobeno větším třením, které vzniká při styku povlaku s materiálem, nebo i nižší tvrdostí povlaku (TiAlN = 2400 Hv, TiAlCr₁₃N=1700 HV). Průběh procesu vrtání byl stejný jako v předchozím případě. Od otvoru přibližně 600 se na břitech nástroje začalo objevovat mírné navaření materiálu obrobku. Opotřebení na příčných břitech bylo souměrné na obou břitech.

Na obou hlavních břitech opět k opotřebení nedocházelo až k destrukci (Obr. 56), která nastala při vyvrtání 780 otvoru.

Měření opotřebení vrtáku s povlakem s přídavkem 20% Cr



Obr. 57 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 20% Cr

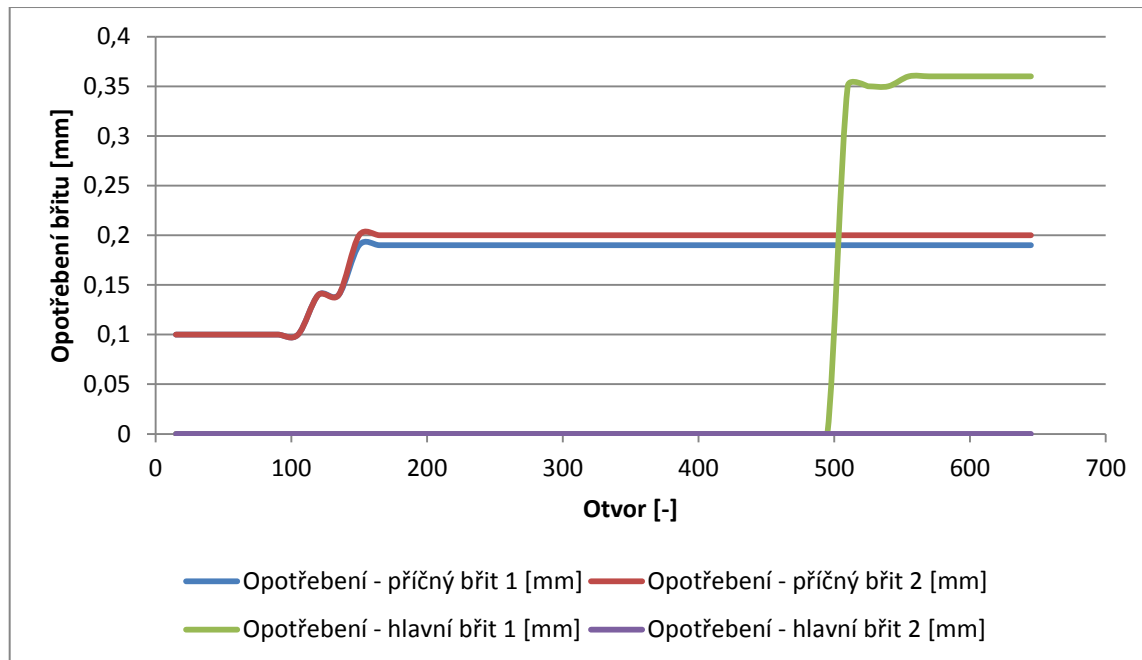


Obr. 58 Mikroskopický snímek po destrukci břitu vrtáku s povlakem s 20% Cr

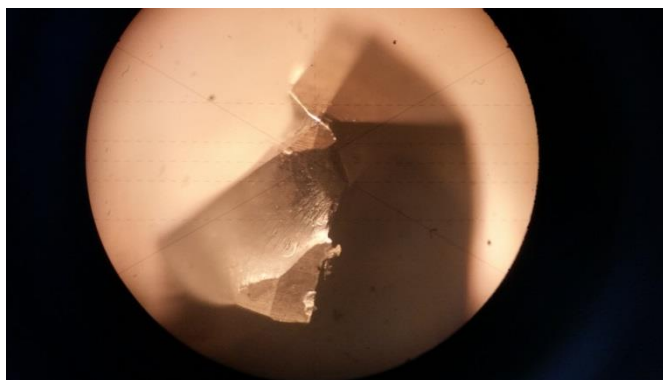
Z grafu (Obr. 57) je vidět, že při použití vrtáku s povlakem s přídavkem 20% chromu dojde k destrukci přibližně 4x rychleji za použití výše zmíněných řezných podmínek, do materiálu 1.2714, než při použití vrtáku s čistým povlakem TiAlN. Při použití většího procenta chromu vzniká vyšší tření a tím dochází k vyššímu silovému působení na vrták a tím i k jeho rychlejšímu opotřebení. Zde je vidět postupné opotřebení na všech čtyřech břitech než dojde k destrukci při 390 otvoru (Obr. 58). I přesto, že povlak s 20% Cr je tvrdší než povlak s 13% Cr, tak vykazuje nižší odolnost. Z toho vyplývá, že tvrdost povlaku nemá na opotřebení vliv.

Měření opotřebení vrtáku s povlakem s přídavkem 25% Cr

Dle doposud naměřených hodnot opotřebení se očekávalo, že k destrukci vrtáku s přídavkem 25% Cr dojde při nejmenším počtu vyvrtaných otvorů. Paradoxně tento vrták vydržel 665 otvorů (Obr. 59, Obr. 60).



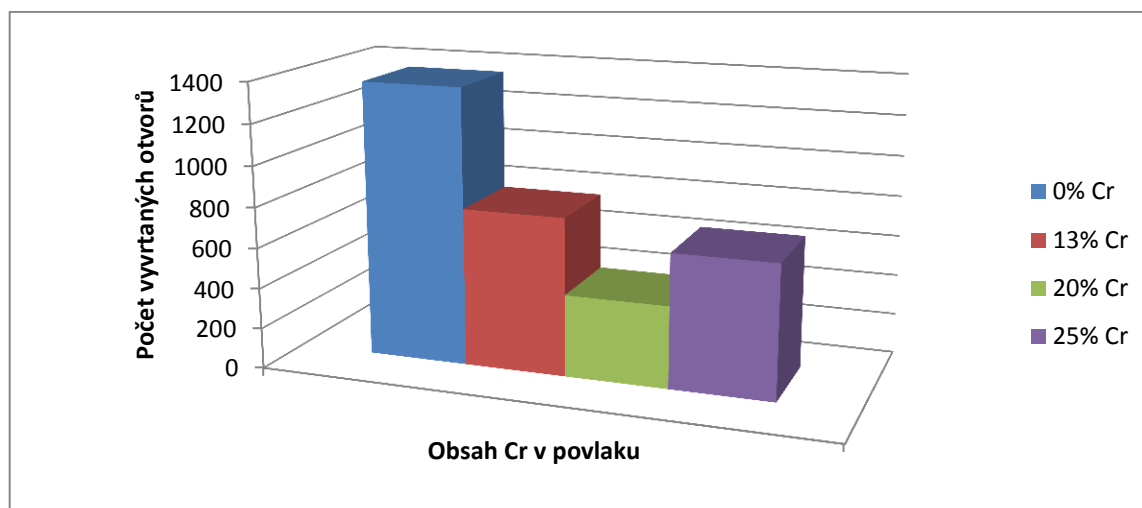
Obr. 59 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 25% Cr



Obr. 60 Mikroskopický snímek po destrukci břitu vrtáku s povlakem s 20% Cr

Zhodnocení při vrtání řeznou rychlostí 50 [m.min⁻¹]

Při testování vrtáků z hlediska opotřebení, při doporučené řezné rychlosti pro vrtání pro vrtáky s TiAlN povlakem, vycházeli výsledky pro vrtáky s povlaky s přídavkem chromu s negativním výsledkem. Vrtáky s přídavkem chromu vykazovali 2 – 4x nižší životnost než klasické TiAlN povlaky (Obr. 61). To je způsobeno vyšším třením. Při takto nízkých rychlostech nedochází ani ke vzniku spinodální dekompozice, při které by chrom začal působit předpokládanými vlastnostmi. Také nedochází ke vzniku vysokých teplot, při kterých dochází k zoxidování povlaku a tím i eliminaci jeho vlastností a projevení zlepšených vlastností povlaku s chromem.

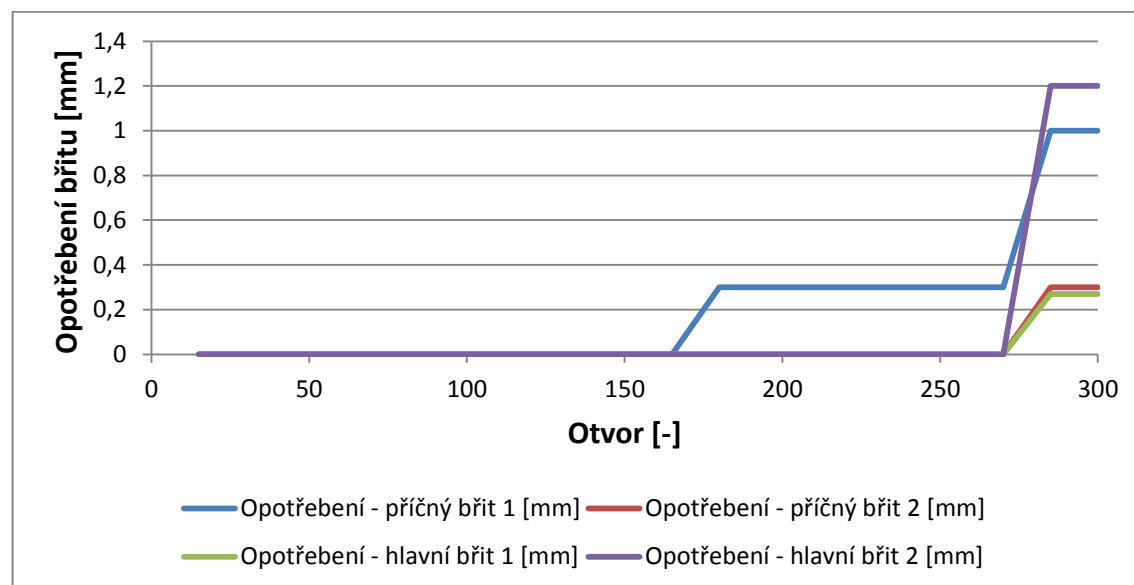


Obr. 61 Porovnání vrtáků při 50 [m.min⁻¹]

5.4.2. Měření opotřebení při řezné rychlosti 100 [m.min⁻¹]

Pro druhé testování zvoleny řezné rychlosti 2x vyšší než při prvním experimentu. Posuv byl ponechán, ale byly zvýšeny pouze otáčky.

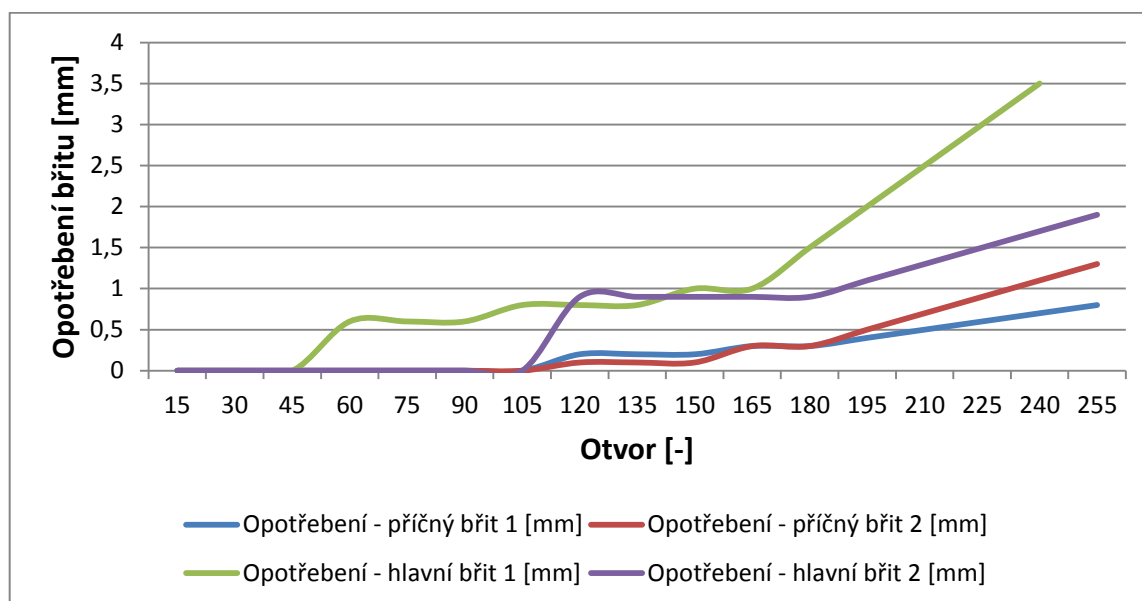
Měření opotřebení vrtáku s povlakem bez přidavku chromu



Obr. 62 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem bez přidavku chromu

Při testování 2x vyššími rychlostmi bylo opotřebení vrtáku s TiAlN povlakem 5x nižší než při rychlosti 50 [m/min] (Obr. 62). Při procesu vrtání docházelo k odlétávání velmi žhavých třísek a jisker. Vyvrtané otvory měly mírně zčernalý povrch a vrták ztratil hned po prvních 15-ti otvorech svojí barvu v délce vyvrtávaného otvoru. Během vrtání se objevovalo mírné pískání a přibližně od otvoru 180 se objevovalo značné navaření základního materiálu na hlavním břitu vrtáku.

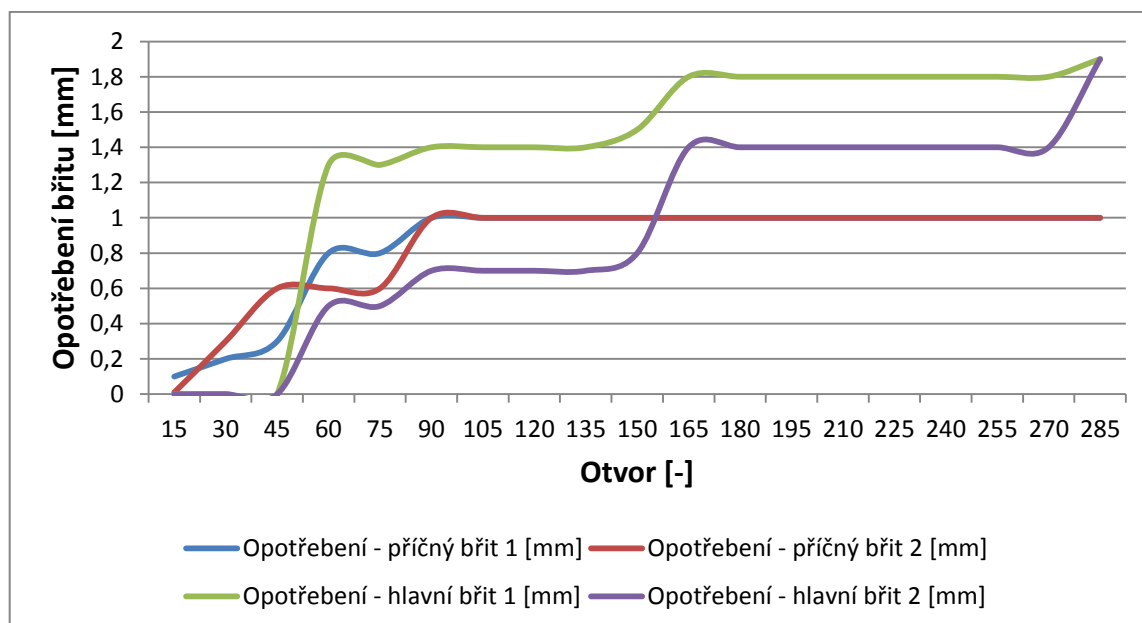
Měření opotřebení vrtáku s povlakem s přídavkem 13% Cr



Obr. 63 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 13% Cr

Za použití těchto rezných podmínek došlo k destrukci vrtáku při 250 otvorech (Obr. 63). To je o 50 otvorů méně než čistého TiAlN, ale průběh opotřebení je plynulý a mírně vzrůstající. Při takovémto průběhu je umožněno vhodně monitorovat opotřebení, a v určité hodnotě lze obrábění přerušit a může dojít k výměně nástrojů a opravě opotřebovaných nástrojů.

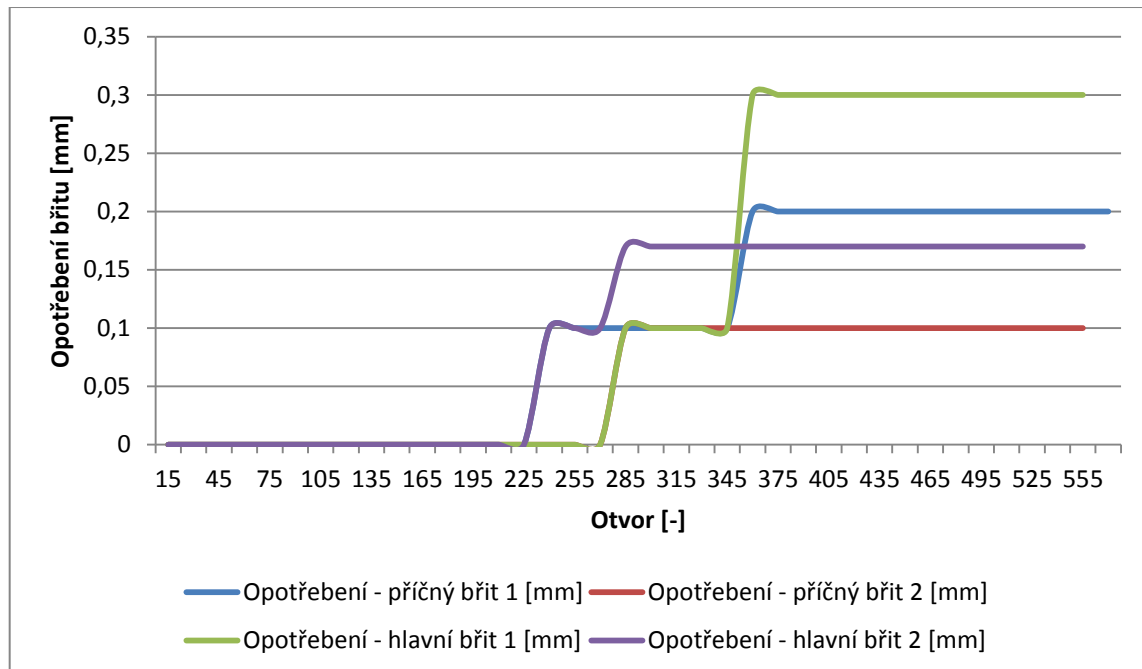
Měření opotřebení vrtáku s povlakem s přídavkem 20% Cr



Obr. 64 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 20% Cr

Podobně jako v předchozím případě je průběh opotřebení plynulý a umožňuje vhodné monitorování obráběcího procesu. Počet vyvrtaných otvorů se je přibližně stejný jako v případě čistého TiAlN a TiAlN s 13% Cr (Obr. 64).

Měření opotřebení vrtáku s povlakem s přidávkou 25% Cr



Obr. 65 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přidávkou 25% Cr

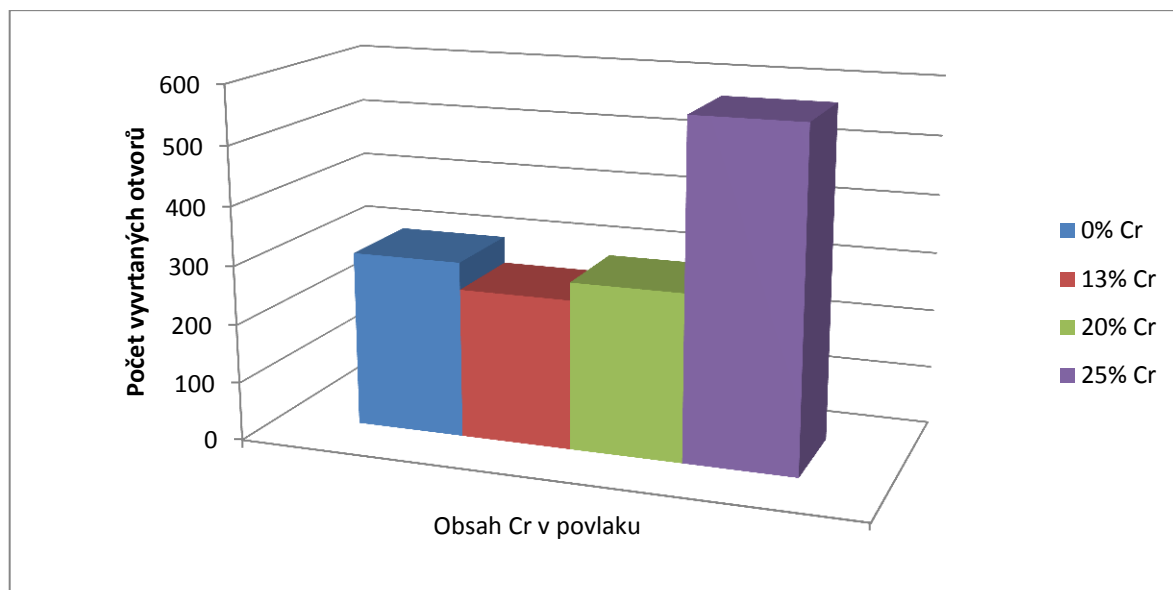
Z grafu (Obr. 65) je vidět, že hodnoty opotřebení jsou o jeden řád nižší než v předchozích třech případech. Průběh opotřebení je opět plynulý. Počet vyvrtaných otvorů je přibližně 2x vyšší. Než došlo k destrukci při 570 otvoru, byla hodnota opotřebení max. 0,3 mm. Povlak s tímto složením tedy odolává řezné rychlosti 100 m.min⁻¹ daleko lépe než povlaky s ostatní testované povlaky a to nejenom z hlediska počtu vyvrtaných otvorů.

Zhodnocení při vrtání řeznou rychlostí 100 [m.min⁻¹]

Při zvýšení řezné rychlosti na dvojnásobek poklesla trvanlivost vrtáků na polovinu. U vrtáku s čistým TiAlN dokonce na čtvrtinu. To může být způsobeno zvýšenou teplotou při obrábění a tím i vznikem zoxidované vrstvy v povlaku. Vyšší teplota také způsobila odlétávání žhavých třísek a vysoké zahřátí polotovaru, nástroje i skličidla. Vyvrtané otvory měli zčernalý povrch a v okolí otvoru byly patrné teplotní izotermy. Vrtáky s přidávkou 13% Cr a 20 % Cr dosahovaly vysokých hodnot opotřebení již při 50 – 100 vyvrtaných otvorech. Vrták bez přidávky chromu dobrou odolnost až do okamžiku, kdy u něj došlo k narušení vrstvy a následnému odlomení při další cyklu vrtání.

Nejlepší vlastnosti vykazoval vrták s 25 % chromu. Co se týče intenzity opotřebení ale i počtu vyvrtaných otvorů (Obr. 66). Z tohoto výsledku lze vyvodit, že dopování chromem má pozitivní vliv při vyšších řezných rychlostech a tedy i teplotách, které při těchto rychlostech vznikají. Vrtání při těchto řezných rychlostech je pro praxi nevhodné. Odolnost vrtáku je sice vyšší, ale kvalita otvorů je nekvalitní a průběh procesu je nevhodný.

Ušetření strojního času je kontraproduktivní vzhledem ke kvalitě. Při takovýchto vyšších podmínkách řezných rychlostí je vhodná aplikovatelnost povlaku např. na břitové destičky pro soustružení a frézování.

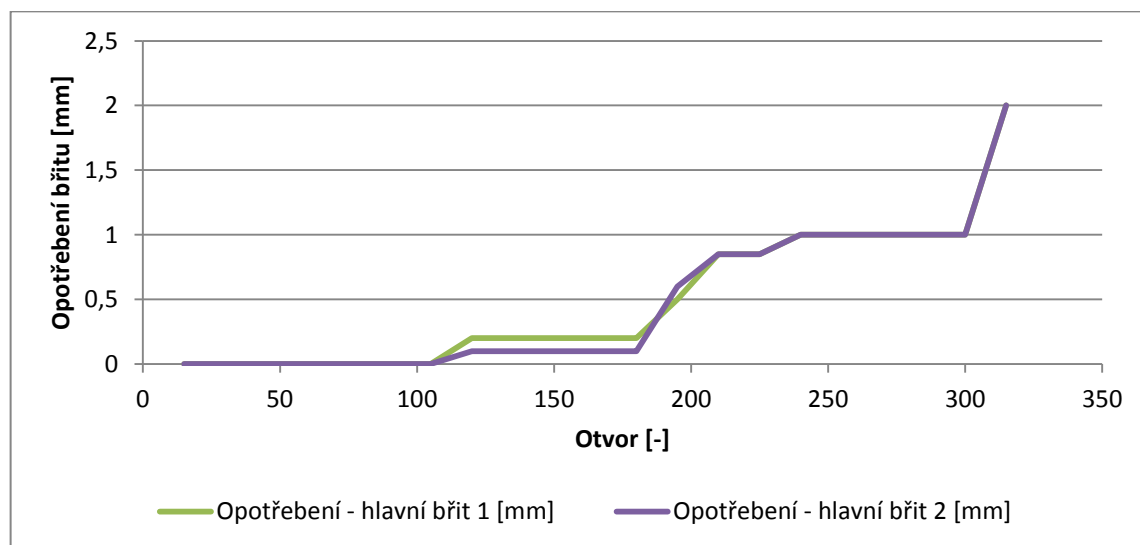


Obr. 66 Porovnání vrtáků při 100 [m.min⁻¹]

5.4.3. Měření opotřebení při řezné rychlosti 200 [m.min⁻¹]

Pro třetí testování opět zvoleny řezné rychlosti 2x vyšší než při předchozím experimentu. Posuv byl ponechán, a byly zvýšeny otáčky.

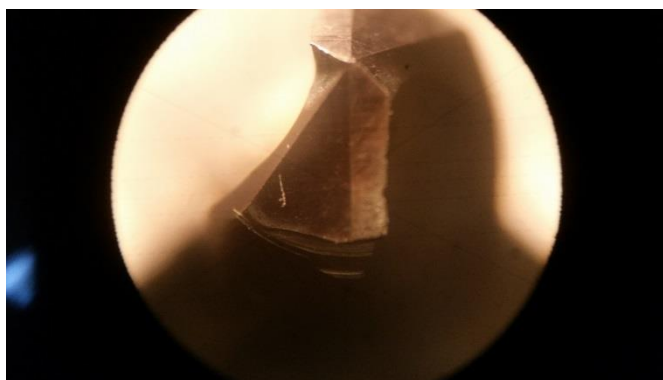
Měření opotřebení vrtáku s povlakem bez přidavku chromu



Obr. 67 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem bez přidavku chromu

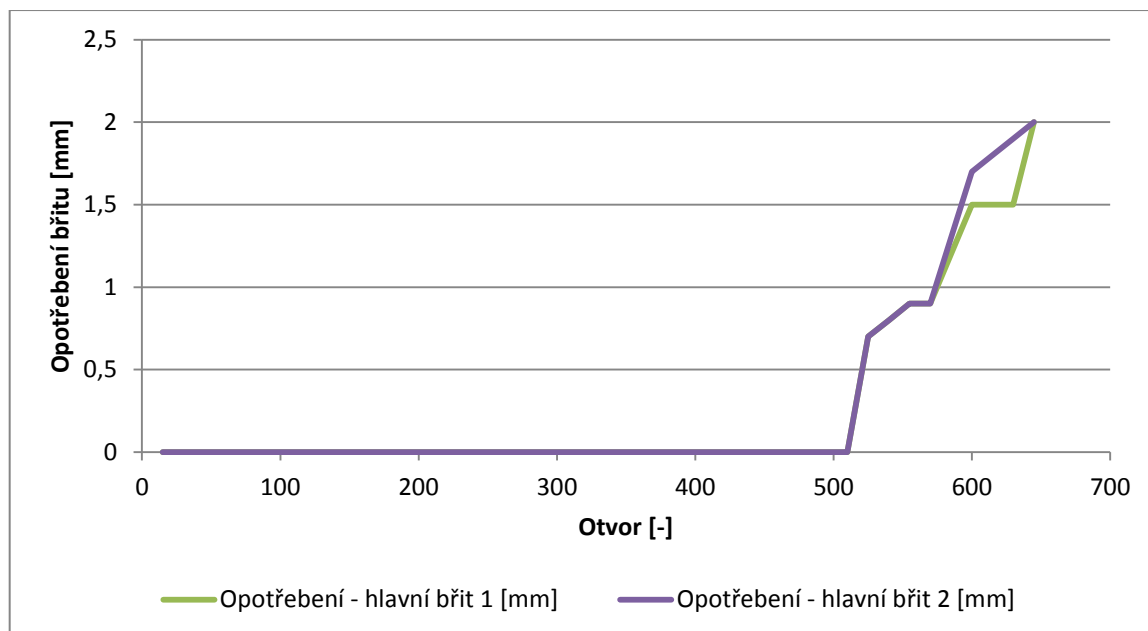
Při nejvyšší rychlosti použité při experimentu byly vlastnosti tohoto vrtáku velmi podobné jako při rychlosti $100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Opět při testování vznikaly velmi vysoké teploty a kvalita vyvrtaných otvorů nebyla vyhovující z hlediska použitelnosti v praxi. Na obou příčných břitech nedocházelo k opotřebení až k momentu destrukce. Na hlavních břitech bylo opotřebení plynulé.

Opět se projevilo opotřebení vhodné z hlediska monitorování při obrábění. Při této řezné rychlosti se na rozdíl od předchozích testování objevilo opotřebení na špičce vrtáku (Obr. 68) a opotřebení se postupně zvětšovalo bez výrazné destrukce nebo prasknutí. Testování bylo přerušeno při hodnotě opotřebení 2 mm. Při této hodnotě bylo tímto vrtákem navrtáno 315 otvorů (Obr. 67).



Obr. 68 Mikroskopický snímek po destrukci břitu vrtáku s povlakem s 0% Cr

Měření opotřebení vrtáku s povlakem s přídavkem 13% Cr

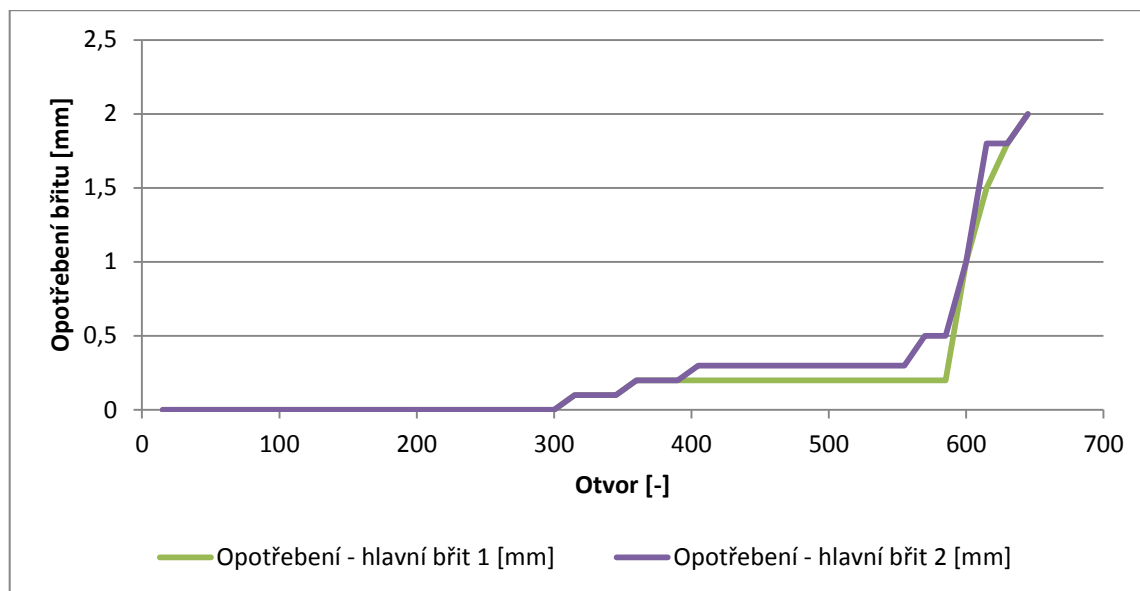


Obr. 69 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 13% Cr

Vrták s přídavkem 13% chromu v povlaku nevykazoval za těchto řezných podmínek opotřebení až do hodnoty 500-ti navrtaných otvorů.

Poté se opotřebování plynule zvětšovalo až do hodnoty 2 mm při 645 otvorech (Obr. 69). Opotřebení se objevilo opět na špičce vrtáku. Tento výsledek ukazuje, že při vyšších teplotách má vrstva chromu pozitivní vlastnosti vzhledem k odolnosti vrtáku než dojde k názna opotřebení.

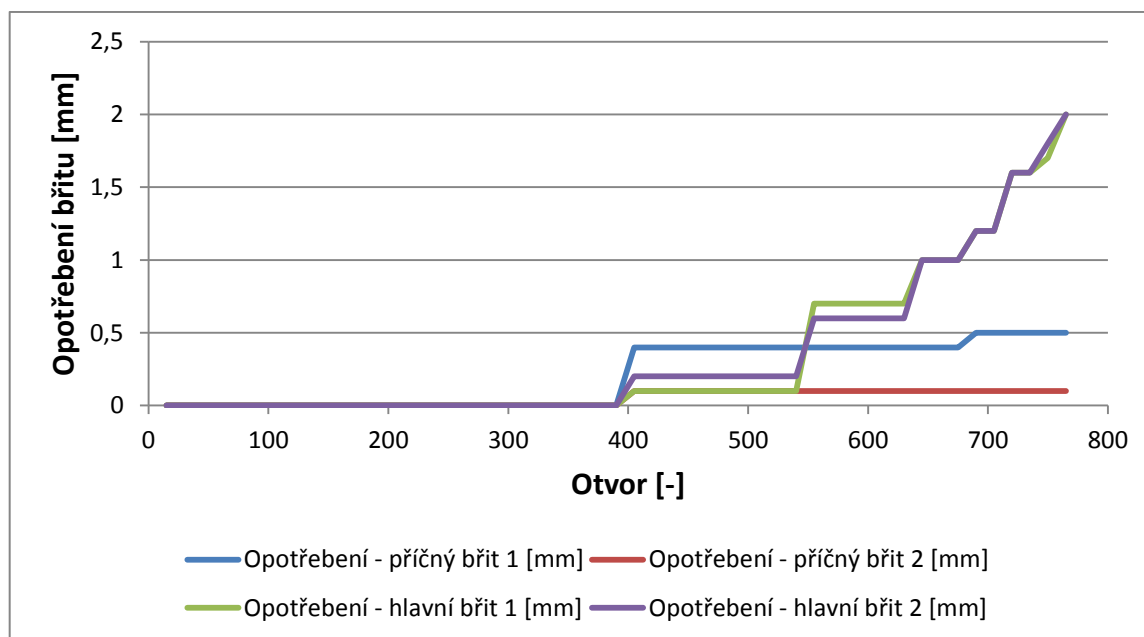
Měření opotřebení vrtáku s povlakem s přídavkem 20% Cr



Obr. 70 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 20% Cr

Průběh opotřebení i počet vyvrtaných otvorů byl velmi podobný vrtáku s 13% chromu. Rozdíl byl pouze ve vzniku názna opotřebení, které se objevilo už u otvoru 300 (Obr. 70).

Měření opotřebení vrtáku s povlakem s přídavkem 25% Cr

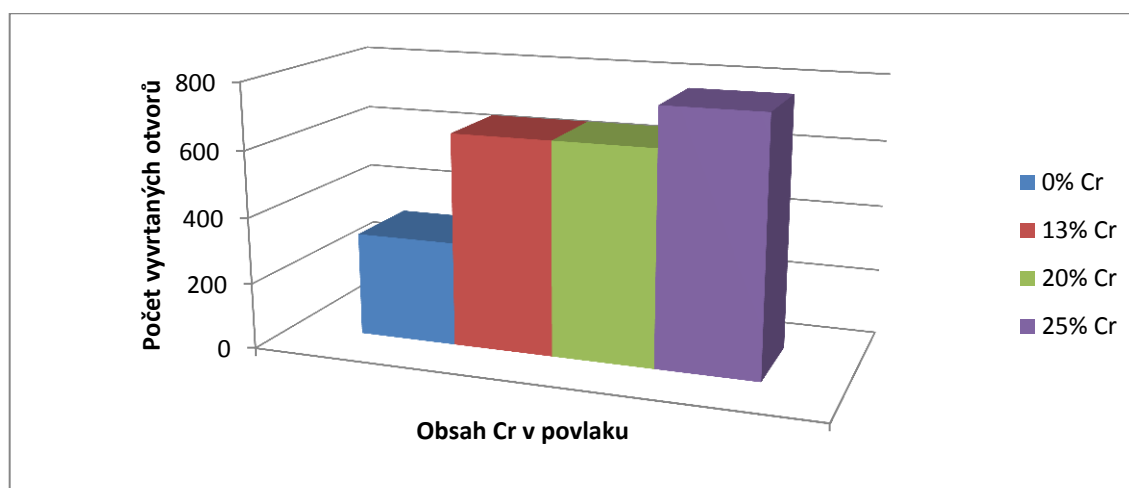


Obr. 71 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 25% Cr

Tento typ vrtáku vykazoval nejlepší vlastnosti. Při hodnotě, kdy u ostatních vrtáků bylo opotřebení na špičce 2 mm, tento vrták vykazoval opotřebení max. 0,7 mm. Hodnoty 2 mm bylo dosaženo až při 765 otvoru (Obr. 71).

Zhodnocení při vrtání řeznou rychlostí 200 [m.min⁻¹]

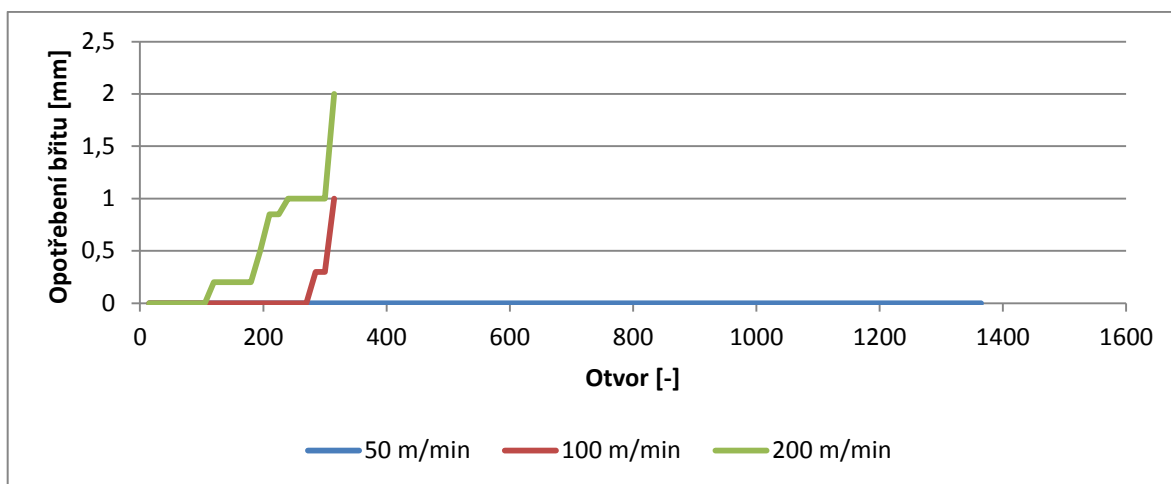
Při zvýšení řezné rychlosti na dvojnásobek oproti předchozímu testování při rychlosti 100 m.min⁻¹ nedošlo ke větším změnám v procesu vrtání. Použití za těchto rychlostí by bylo vhodné použít na soustružnické nebo frézařské operace. Opět by tyto řezné podmínky nešli použít při vrtání v praxi. Vlastnosti povlaku byly podobné jako při řezné rychlosti 100 m.min⁻¹ až na povlak s přídavkem 25% chromu. Tento povlak se dostal na maximální měřenou hodnotu opotřebení o 200 otvorů později (Obr. 72). Z toho je patrné, že ochranná složka chromu je v tomto případě znatelná a má pozitivní vlastnosti na trvanlivost. U této složky nevzniká téměř žádná oxidační vrstva, která znatelně snižuje tvrdost povlaku.



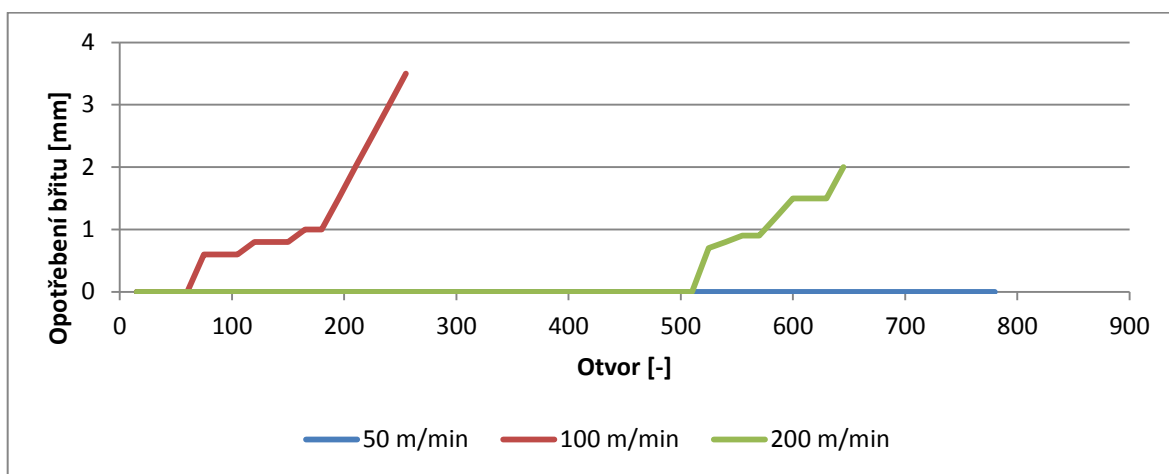
Obr. 72 Porovnání vrtáků při 200 [m.min⁻¹]

5.4.4. Porovnání opotřebení vrtáků s různým % chromu pro různé rychlosti

Pro toto porovnání byly zvoleny hlavní břity vrtáků, které se nejvíce podílejí na odebírání materiálu. Jejich opotřebení je nejvýznamnější a je nejlépe monitorované při procesu. U tohoto porovnání je vidět, že vrták bez chromu vykazuje nejlepší vlastnosti z hlediska opotřebení (Obr. 73).

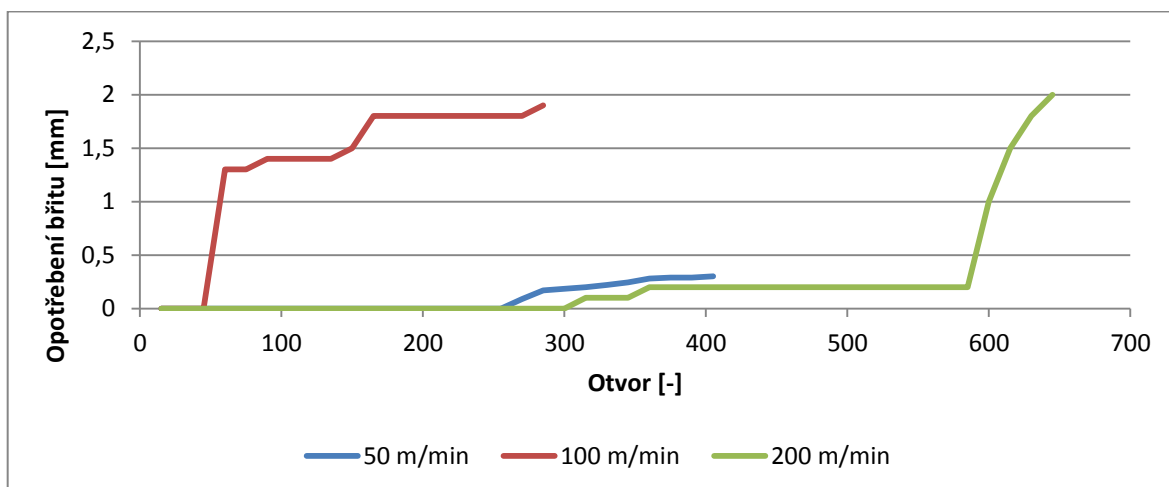


Obr. 73 Opatření hlavních břitů vrtáků s povlaky s 0 % Cr při různých rychlostech

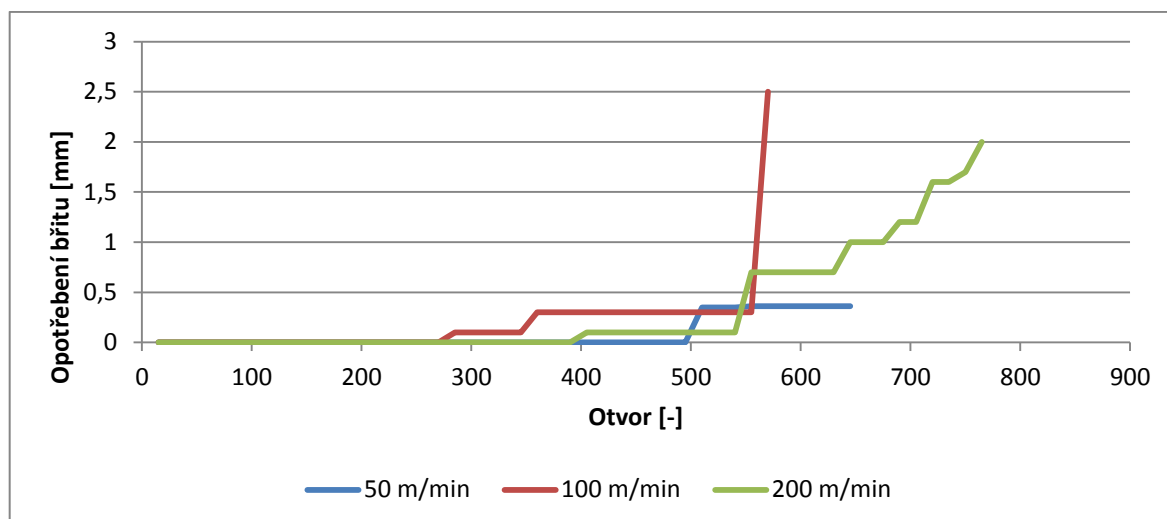


Obr. 74 Opatření hlavních břitů vrtáků s povlaky s 13 % Cr při různých rychlostech

Opět jako v předchozím případě vykazuje tento typ nejlepší vlastnosti při nejnižší rychlosti 50 m.min⁻¹ (Obr. 74).



Obr. 75 Opatření hlavních břitů vrtáků s povlaky s 20 % Cr při různých rychlostech



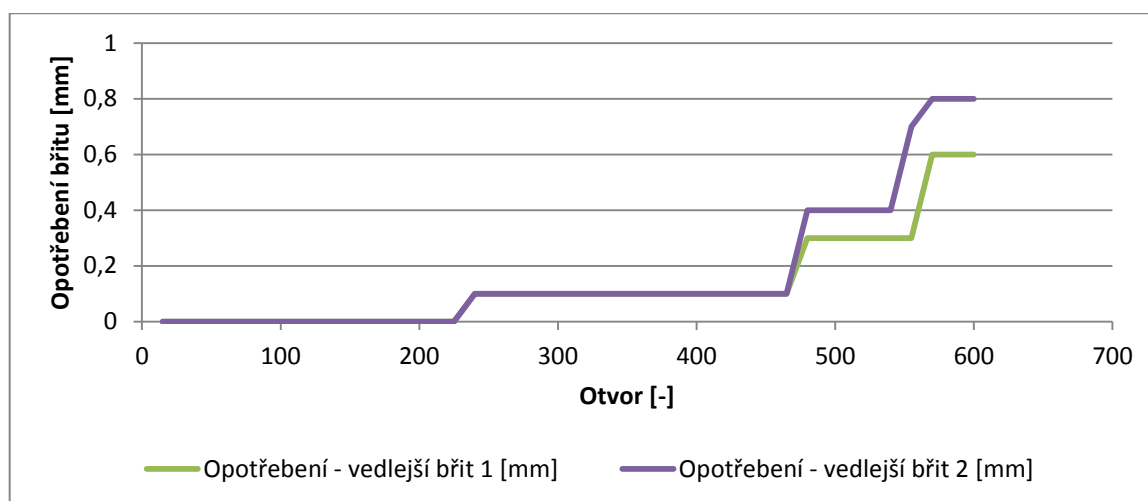
Obr. 76 Opotřebení hlavních břitů vrtáků s povlaky s 25 % Cr při různých rychlostech

Vrtáky s 20% a 25% chromu mají trvanlivost nejvyšší při řezné rychlosti $200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ (Obr. 75 a Obr. 76). Při této rychlosti dochází ke vzniku vysoké teploty a tím i k rozkladu povlaku TiAlN. Přídavek chromu tomuto rozpadu zabraňuje a povlak má vyšší odolnost, jelikož neoxiduje. Naopak při nižších rychlostech pod $100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ přídavek chromu zvyšuje tření a trvanlivost se snižuje.

5.4.5. Měření opotřebení vrtáků s přídavkem Al_2O_3

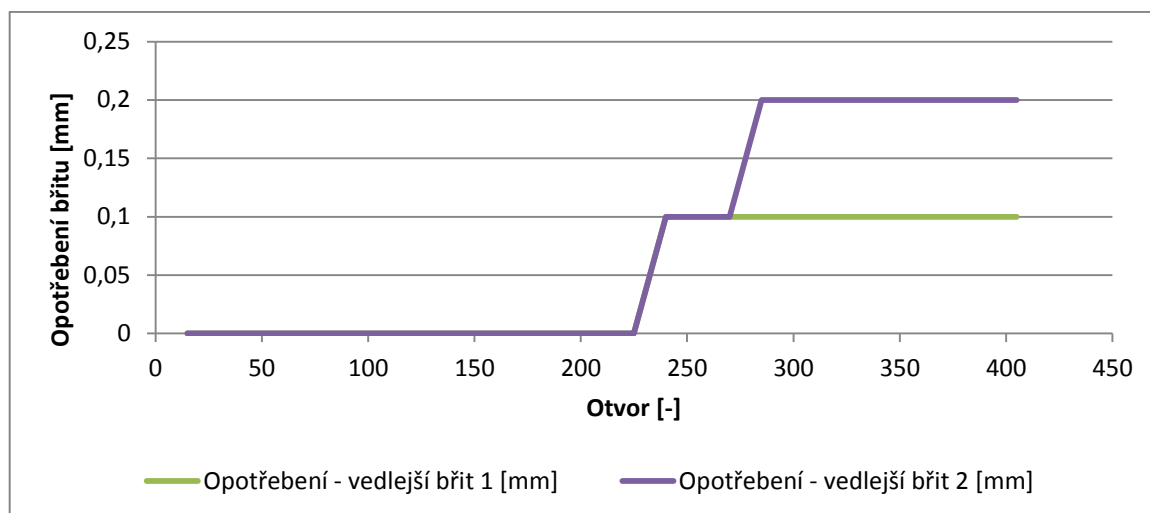
Pro testování byly poskytnuty také vrtáky s přídavkem Al_2O_3 (oxid hlinitý). Teplota tání této krystalické látky je $2045 \text{ }^\circ\text{C}$, tvrdost je 15 – 19 GPa a pevnost v tlaku 2000 – 4000 MPa. Předpokládá se, že tyto vlastnosti by mohly mít na kladný vliv na při použití jako přídavek v TiAlNcr povlaku.

Měření opotřebení vrtáku s povlakem s přídavkem Al_2O_3 při řezné rychlosti $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$



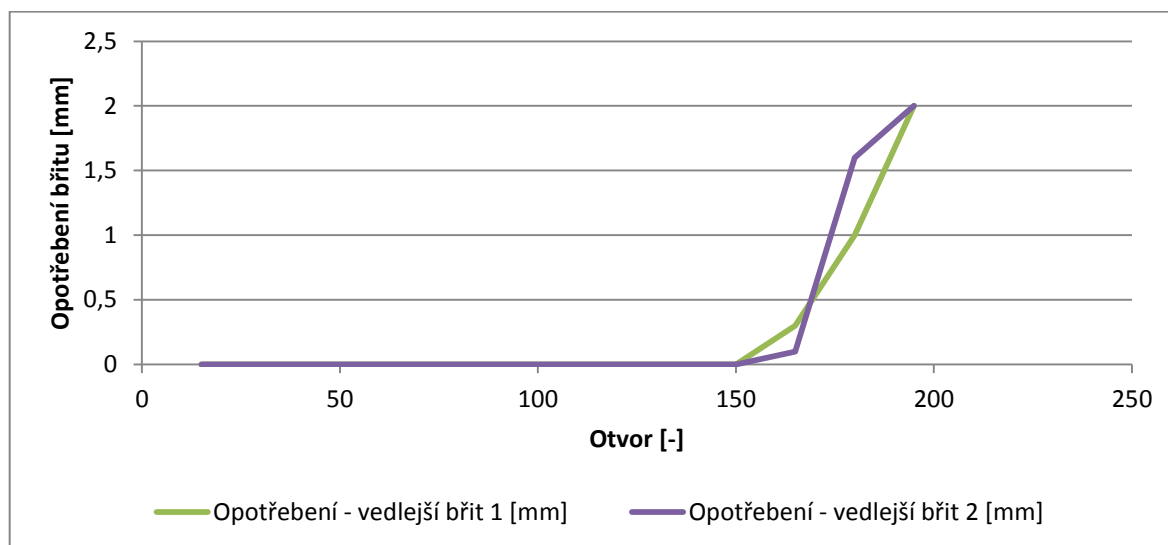
Obr. 77 Opotřebení vrtáku Al_2O_3 při $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Průběh opotřebení při řezné rychlosti $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ je podobný jako při stejné rychlosti pro vrták TiAlN + 25% chromu. K destrukci břitu došlo při vyvrtání 600 otvoru.



Obr. 78 Opotřebení vrtáku Al₂O₃ při 100 m.min⁻¹

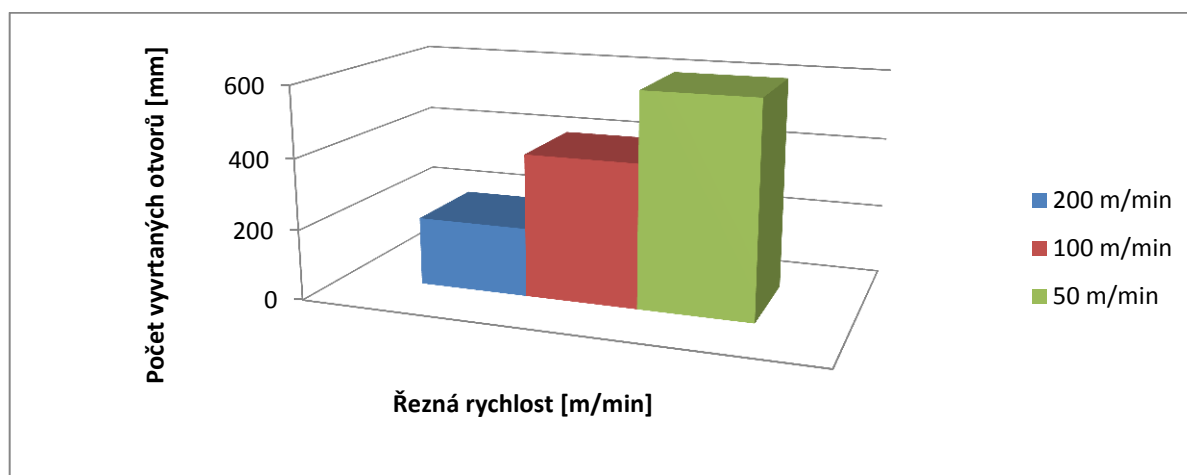
Z hlediska počtu vyvrtaných otvorů mají vrtáky při této rychlosti podobné vlastnosti jako vrtáky bez přídavku chromu.



Obr. 79 Opotřebení vrtáku Al₂O₃ při 200 m.min⁻¹

Nejhorší vlastnosti vrták vykazoval při rychlosti 200 m.min⁻¹. Bylo vyvrtáno pouze 200 otvorů. To je nejhorší výsledek při této rychlosti.

Zhodnocení vrtáků s přídavkem Al_2O_3



Obr. 80 Zhodnocení vrtáků s přídavkem Al_2O_3

Z Obr. 80 je vidět, že nejhorší vlastnosti vykazovali vrtáky při nejvyšší rychlosti. Při rychlosti $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, zase vykazovali vlastnosti podobné vrtáku s přídavkem 25% chromu. Z toho vyplývá, že s přibývajícím rychlostí vrták prudce ztrácí svojí odolnost vůči opotřebení a na rozdíl od vrtáku s 25 % chromu je jeho odolnost naopak nižší. Vrták sice vykazuje vyšší povrchovou tvrdost i pevnost, ale tyto vlastnosti spíše působí negativně a vrták je při vyšším zatížení více náchylný na křehké porušení. Při náznaku opotřebení se byla odolnost vůči opotřebení při vyšších rychlostech daleko nižší a docházelo k destrukci již po 50 – 100 vyvrtaných otvorech.

5.4.6. Měření opotřebení na vrtácích bez povlaku

Z hlediska porovnání povlakovaných a nepovlakovaných vrtáků byly stejným testům podrobeny i vrtáky bez povlaku.

Tab. 17 Tabulka vyvrtaných otvorů vrtáky bez povlaku

v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	50	100	200
Počet otvorů [-]	4	5	1

Z Tab. 17 je vidět, že s vrtáky bez povlaku chromu nebylo možné vytvořit více jak 5 otvorů za jakýchkoliv řezných podmínek. Byl také změněn posuv na $0,1 \text{ mm}\cdot\text{ot}^{-1}$ a $0,2 \text{ mm}\cdot\text{ot}^{-1}$ a i zde byly výsledky podobné. Vrtáky tohoto typu bez povlaku jsou tedy na obrábění nástrojových ocelí nepoužitelné.

5.4.7. Zhodnocení všech vrtáků z hlediska opotřebení

Na základě výše zjištěných hodnot byly jednotlivé vrtáky porovnány a bylo provedeno porovnání určující jejich použitelnost za daných podmínek. Stupnice 1 (nejlepší) až 5 (nejhorší).

Tab. 18 Zhodnocení všech vrtáků z hlediska opotřebení

Vrták	Řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]		
	50	100	200
TiAlN	1	3	3
TiAlN + 13% Cr	2	3	2
TiAlN + 20% Cr	3	3	2
TiAlN + 25% Cr	2	2	1
TiAlN + Al_2O_3	2	3	4
Nepovlakované	5	5	5

Porovnáním všech vrtáků z hlediska obrábitelnosti (Tab. 18), za různých řezných rychlostí, lze odečíst, že při nejnižších rychlostech měly nejlepší vlastnosti vrtáky bez přídavku chromu. Velmi dobré vlastnosti vykazovali i vrtáky s přídavkem 25% chromu, ale při jejich použití dochází ke vzniku většího tření a tím i zvýšeného silového působení. Naopak při rychlosti $200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, kdy dochází k nejmenšímu silovému působení, vykazovali vrtáky s vyšším obsahem chromu. Bylo zde patrné velké teplotní ovlivnění, kterému tyto vrtáky lépe odolávali.

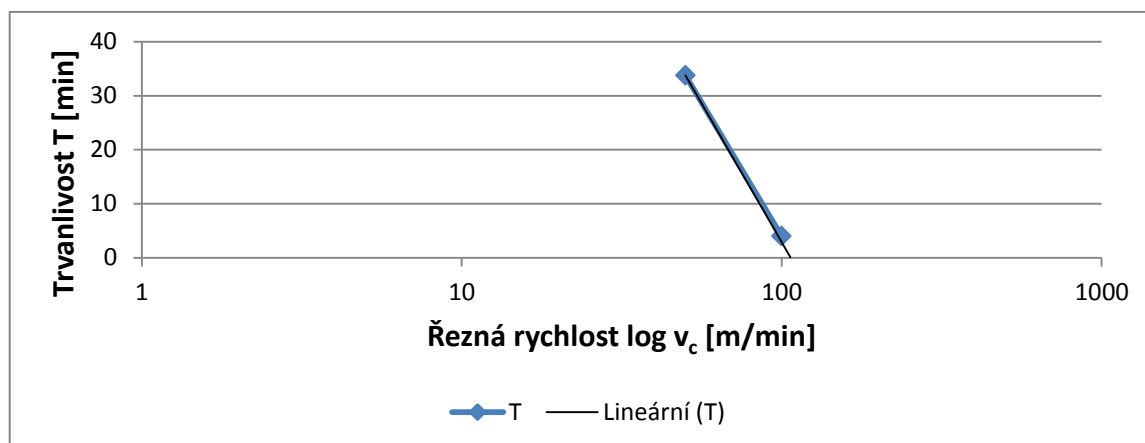
Jako nejhorší při všech rychlostech vycházeli vrtáky s přídavkem Al_2O_3 a nepovlakované vrtáky.

5.4.8. Experimentální řešení Taylorovy závislosti

Pro experimentální vyšetření Taylorovy závislosti $T=f(v_c)$ byly z grafů Obr. 73, Obr. 74, Obr. 75 a Obr. 76 odečteny hodnoty vyvrtaných otvorů pro $V_B = 1 \text{ mm}$. Tyto hodnoty byly přepočteny na čas. Pomocí těchto hodnot se odvodil Taylorův vztah pro vrtání do nástrojové oceli 1.2714.

Tab. 19 Časy vrtání jednotlivých otvorů

v_c $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	Čas vrt. [s]	0% Cr		13% Cr		20% Cr		25% Cr	
		Počet otvorů [-]	Pracovní čas [min]	Počet otvorů [-]	Pracovní čas [min]	Počet otvorů [-]	Pracovní čas [min]	Počet otvorů [-]	Pracovní čas [min]
50	5	1365	113,75	780	65	405	33,75	645	53,75
100	4	300	20	570	38	60	4	560	37,33
200	3	240	12	165	8,25	645	32,25	645	32,25



Obr. 81 Grafické znázornění $T = f(v_c)$, pro 20% Cr z rychlostí $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a $100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Z Taylorova vztahu vyplývá: $T_1 \cdot v_{c1}^m = T_2 \cdot v_{c2}^m$ (20)

$$m = \frac{\log T_1 - \log T_2}{\log v_{c2} - \log v_{c1}} \quad (21)$$

Poté stanoví konstanty c_T a c_V :

$$c_T = T_1 \cdot v_{c1}^m \quad (22)$$

$$c_V = c_T^{\frac{1}{m}} \quad (23)$$

Příklad výpočtu pro vrták TiAlN s přídavkem 20% chromu:

$$m = \frac{\log T_1 - \log T_2}{\log v_{c2} - \log v_{c1}} = \frac{\log 33,75 - \log 4}{\log 100 - \log 50} = \underline{\underline{3,1}} \quad (24)$$

Stanovení konstant c_T a c_V :

$$c_T = T_1 \cdot v_{c1}^m = 33,75 \cdot 50^{3,1} = \underline{\underline{6\,238\,510}} \quad (25)$$

$$c_V = c_T^{\frac{1}{m}} = 6\,238\,510^{\frac{1}{3,1}} = \underline{\underline{155,6}} \quad (26)$$

$$\text{Závislost pro 20\% Cr: } T = f(v_c) = c_T \cdot v_c^{-m} = \underline{\underline{6\,238\,510 \cdot v_c^{-3,1}}} \quad (27)$$

Tab. 20 Hodnoty m a c_T pro ostatní povlaky

	0% Cr	13% Cr	20% Cr	25% Cr
m	2,5	1,5	3,1	0,4
c_T	2 073 095	22 012	6 238 510	228

$$\text{Závislost pro 0\% Cr: } T = f(v_c) = c_T \cdot v_c^{-m} = \underline{\underline{2\,073\,095 \cdot v_c^{-2,5}}} \quad (28)$$

$$\text{Závislost pro 13\% Cr: } T = f(v_c) = c_T \cdot v_c^{-m} = \underline{\underline{22\,012 \cdot v_c^{-1,5}}} \quad (29)$$

$$\text{Závislost pro 25\% Cr: } T = f(v_c) = c_T \cdot v_c^{-m} = \underline{\underline{228 \cdot v_c^{-0,4}}} \quad (30)$$

Pro zjištění jednotlivých Taylorových vztahů bylo počítáno s rychlostmi 50 m.min⁻¹ a 100 m.min⁻¹. Vyhodnocení Taylorova vztahu ze dvou měření je možné, ale výsledek je pouze přibližný. Z výsledků pro 13% chromu a 25% chromu je vidět, že hodnota exponentu „m“ vychází velmi malá, což je způsobeno malým počtem měření. Pro přesnější vyhodnocení by bylo třeba provést několik měření a výsledky těchto měření vyhodnotit.

5.5. Měření teplot při vrtání

Při čím dál větších nárocích na snižování strojních časů a zvýšení produktivity výroby se využívají vyšší řezné rychlosti. Při aplikaci zvýšených rychlostí výrazně roste teplota v místě řezu, která má vliv na budoucí kvalitu obráběné plochy, ale také na opotřebení nástroje a teplotní ovlivnění celého obrobku a funkčních částí stroje. Proto se ve většině dnešních operací využívají řezné kapaliny pro eliminaci teplot. Další ochranou je právě použití povlaků.

Nejvýhodnějším způsobem pro měření teplot při vrtání je použití termoelektrického teploměru. Ten využívá k měření teploty kontaktní termoelektrické články. Ty slouží k dálkovému měření teploty, kdy jejich čidlo převádí teplotní změnu v prostředí na změnu elektrického napětí. Z hlediska momentální nedostupnosti této metody, nebyly teploty takto změřeny.

Pro měření teplot byla zvolena metoda měření pomocí termokamery (Obr. 82). Tato metoda je nevhodná z důvodu nemožného přesného měření v zapuštěném otvoru. Pro měření je ale užitečná z hlediska měření teplotního rozdílu, při jednotlivých rychlostech, na povrchu materiálu, u kterého je vytvářen otvor. Otvory byly vrtány ve vzdálenosti 0,3 mm od kolmé plochy.

Měření bylo provedeno na frézovacím centru MCFV 5050 JN (LM1). Obrobek byl nejprve přesně ofrézován, aby snímaný povrch měl co nejpřesnější a z hlediska drsnosti nejvýhodnější povrch. Poté byla kolmá stěna obrobku opatřena fólií s emisivitou 0,96 pro vytvoření měřících bodů na lesklém povrchu (Obr. 83). Kromě fólie byl použit i speciální sprej, který byl nanesen na povrch a zajišťoval vlastnosti jako fólie. Vzdálenost snímání teploty byla 0,7 m a byly nastaveny 3 body (SP01, SP02, SP03), kde byla teplota snímána. Tyto body směřovaly na povrch najetí do obrobku, na hloubku 5 mm a 10 mm. Měření bylo prováděno tak, aby byl patrný teplotní vliv po předchozí operaci. Vrtání bylo prováděno s dostatečným časovým rozestupem a vzdáleností mezi otvory.



Obr. 82 Uspořádání pracoviště pro měření teplot

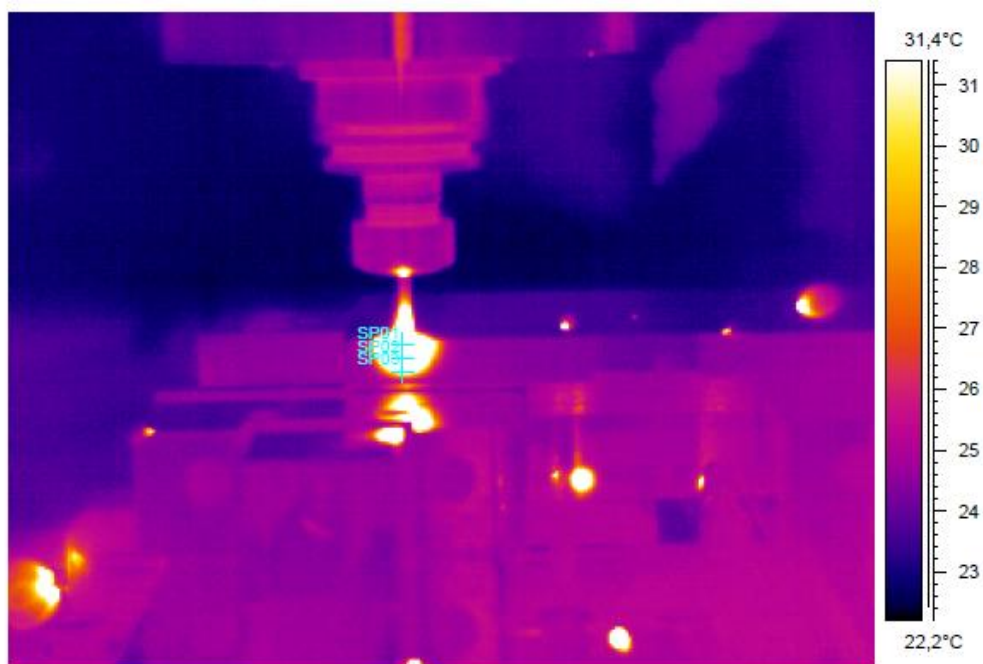


Obr. 83 Nanesená fólie a sprej na obrobku

5.5.1. Snímání teploty na fólii

Při řezných rychlostech, které byly zvoleny jako při měření opotřebení ($50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a $200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$), se vytvořil otvor. Byly změřeny teploty ve třech místech a byla zaznamenána vždy nejvyšší teplota, která se během procesu zaznamenala (Obr. 84).

Pro měření byly zvoleny vrtáky bez přídavku chromu a vrtáky s přídavkem 25% Cr.



IR Text Comment	Value
Section	Room
Equipment	
Additional information	
Fault	
Recommendation	No action

Object parameter	Value	
Emissivity	0,96	-
Object distance	0,7 m	-
Ambient temperature	24,0°C	-
Reference temperature	*	-
Label	Value	Diff temperature
IR : max	178,3°C	-
IR : min	22,3°C	-
SP01	168,7°C	*
SP02	87,7°C	*
SP03	35,5°C	*

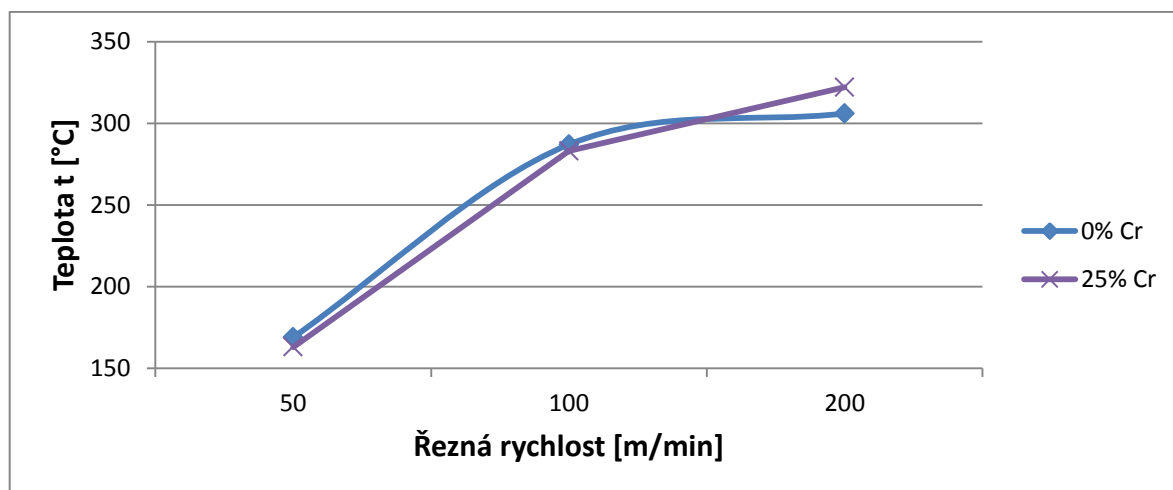
Obr. 84 Zaznamenání teplot vrtáku TiAlN při řezné rychlosti 50 m.min⁻¹

Nejvyšší teplota byla zaznamenána v místě dotyku vrtáku s povrchem polotovaru. I při takto nízkých rychlostech obrábění je vidět znatelné ohřátí, které může mít vliv na budoucí tvar a přesnost obrobku.

Stejně vrtání bylo provedeno i pro vrták s přidavkem 25% chromu a při ostatních řezných rychlostech. Při zvýšených rychlostech je patrné vysoké zahřátí a ovlivnění velké části polotovaru. Je viditelné i vysoké zahřátí nástroje i třísek.

Tab. 21 Naměřené hodnoty teplot při použití fólie

v_c [m.min ⁻¹]	50	100	200
0% Cr	169 °C	287 °C	306 °C
25% Cr	163 °C	283 °C	322 °C

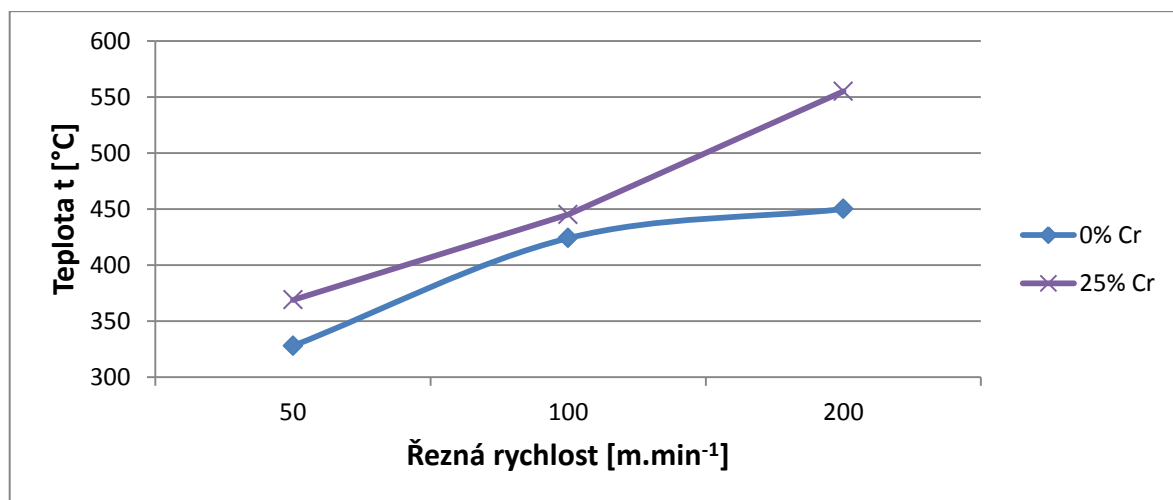


Obr. 85 Průběh naměřených teplot pro jednotlivé rychlosti s použitím fólie

5.5.2. Snímání teploty na nanesené vrstvě barvy

Tab. 22 Naměřené hodnoty teplot při použití spreje

v_c [m.min ⁻¹]	50	100	200
0% Cr	328 °C	424 °C	450 °C
25% Cr	369 °C	445 °C	555 °C



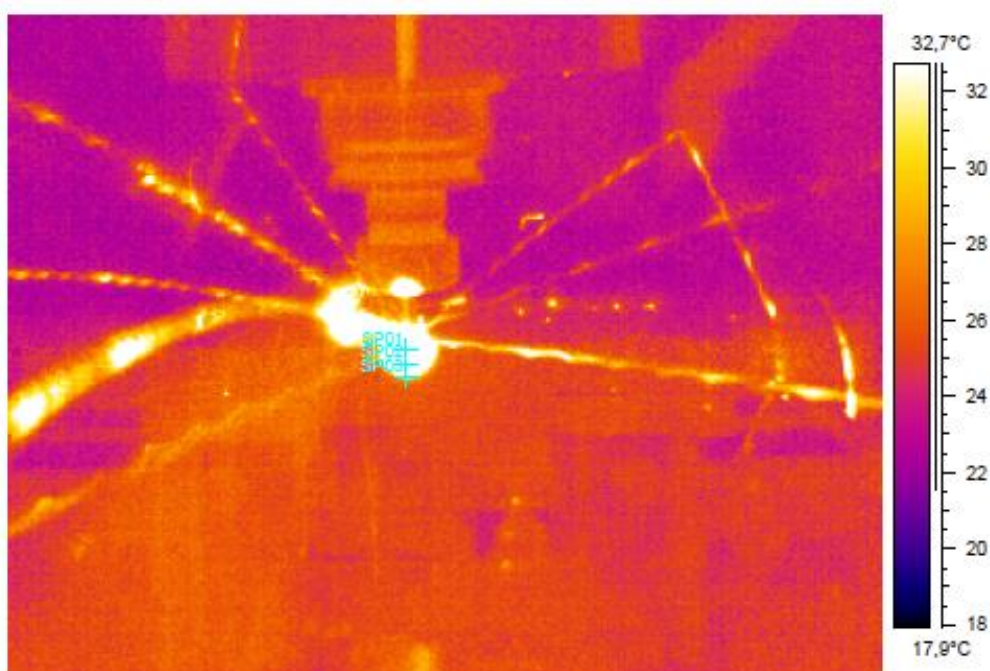
Obr. 86 Průběh naměřených teplot pro jednotlivé rychlosti s použitím spreje

Při použití lepících fólií byly hodnoty pro rychlost 50 m.min⁻¹ a 100 m.min⁻¹ nižší u vrtáku s přidavkem chromu. Pro nejvyšší rychlost je teplota nižší u vrtáku bez přidavku chromu (Obr. 85).

U měření teplot při použití spreje byly teplotní rozdíly jednotlivých vrtáků ztelnější. Při rychlosti $200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ byla dokonce teplota u vrtáku bez přídavku chromu o $105 \text{ }^\circ\text{C}$ nižší než u vrtáku s 25 % chromu (Obr. 86). Z toho lze vyvodit, že při vyšších rychlostech je povlak s obsahem chromu náchylnější na teplotní změny a při stejných podmínkách je teplota v místě řezu zvýšená.

Oproti tomu ale při těchto rychlostech vykazuje velkou stabilitu a odolnost proti opotřebení. Vznik vysoké teploty by tedy nebyl škodlivý, pokud by teplota nijak neovlivňoval polotovar a funkční části stroje.

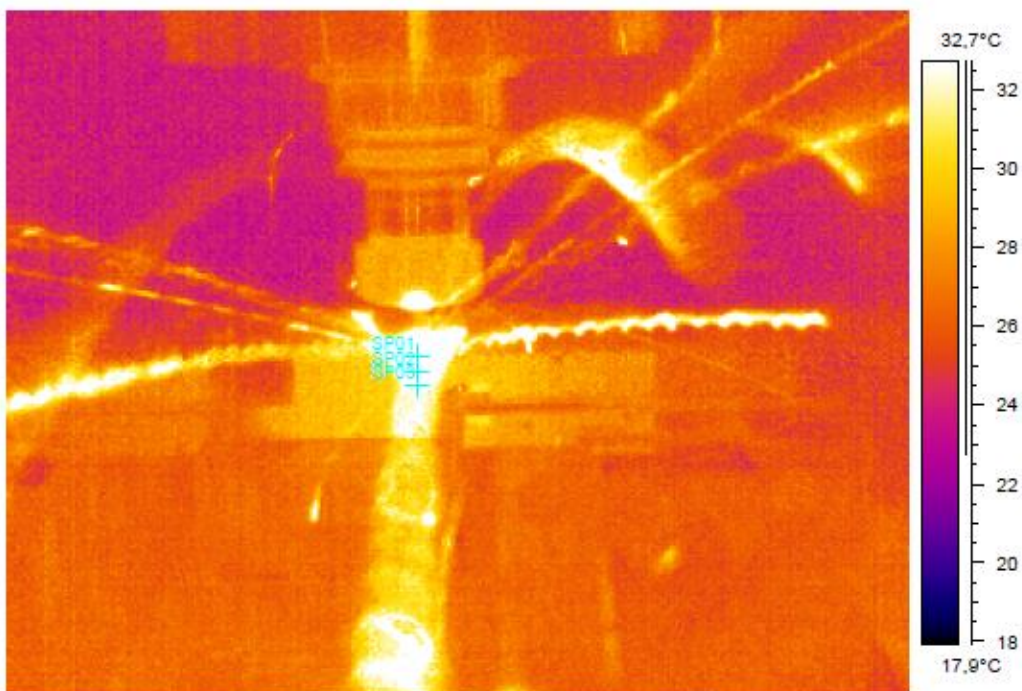
Dále při vysokých teplotách dochází k nebezpečnému odlétávání žhavých jisker z místa řezu (Obr. 87, Obr. 88). Proto je nutné pro použití v praxi opatřit stroj bezpečnostními prvky a dbát zvýšené bezpečnosti.



IR Text Comment	Value
Section	Room
Equipment	
Additional information	
Fault	
Recommendation	No action

Object parameter	Value	
Emissivity	0,96	-
Object distance	0,7 m	-
Ambient temperature	24,0°C	-
Reference temperature	*	-
Label	Value	Diff temperature
IR : max	572,8°C	-
IR : min	21,3°C	-
SP01	450,2°C	*
SP02	331,1°C	*
SP03	32,9°C	*

Obr. 87 Zaznamenání teplot vrtáku TiAlN při řezné rychlosti $200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$



IR Text Comment	Value
Section	Room
Equipment	
Additional information	
Fault	
Recommendation	No action

Object parameter	Value	
Emissivity	0,96	-
Object distance	0,7 m	-
Ambient temperature	24,0°C	-
Reference temperature	*	-
Label	Value	Diff temperature
IR : max	467,8°C	-
IR : min	22,4°C	-
SP01	377,5°C	*
SP02	224,5°C	*
SP03	34,4°C	*

Obr. 88 Zaznamenání teplot vrtáku TiAlN + 25% Cr při řezné rychlosti 200 m.min⁻¹ těsně před dosažením maximální naměřené hodnoty

Naměřené teploty na povrchu součásti nejsou teploty v místě řezu. Teploty v místě řezu se při zvýšených rychlostech (100 m.min⁻¹ až 200 m.min⁻¹) mohou pohybovat v rozmezí 700 °C až 1200 °C.

Pro upřesnění hodnot teploty v místě dotyku nástroje s obrobkem je použito vzorců pro vedení a přestup tepla.

Na tloušťku polotovaru mezi otvorem a okolním prostředím působí přestup tepla vedením, pro který platí:

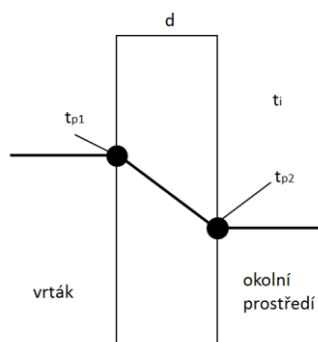
$$q_v = \frac{\lambda}{d} \cdot (t_{p1} - t_{p2}) [W \cdot m^{-1}], \quad (31)$$

kde, λ je součinitel tepelné vodivosti v $[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, d je šířka stěny v $[\text{m}]$, t_{p2} je naměřená hodnota teploty na povrchu v $[\text{°C}]$ a t_{p1} je hodnota teploty v místě dotyku nástroje s obrobkem v $[\text{°C}]$.

Pro přestup tepla mezi okolním prostředím a materiálem platí vztah:

$$q_p = \alpha \cdot (t_{p1} - t_i) [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}], \quad (32)$$

kde, α je součinitel přestupu tepla v $[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$, t_{p1} je hodnota teploty v místě dotyku nástroje s obrobkem v $[\text{°C}]$ a t_i je teplota okolí v $[\text{°C}]$.



Obr. 89 Znárodnění přestupu tepla stěnou

Pro zjištění teploty v místě dotyku nástroje s polotovarem je nutná v tomto případě rovnost přestupu tepla a vedení tepla polotovarem. Výpočet proveden pro největší naměřenou teplotu 555 °C.

$$q_v = q_p \quad (33)$$

$$\frac{\lambda}{d} \cdot (t_{p1} - t_{p2}) = \alpha \cdot (t_{p1} - t_i) \quad (34)$$

$$t_{p1} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \cdot (t_{p1} - t_i) + t_{p2} = \frac{8 \cdot (0,3 \cdot 10^{-3})}{46} \cdot (555 - 24) + 555 = \underline{\underline{555,03[\text{°C}]}} \quad (35)$$

Z tohoto výsledku je patrné, že teplota vznikající na povrchu polotovaru je v řádu jednotek stejná jako v místě dotyku nástroje s polotovarem. Je to způsobeno velmi malou šířkou stěny a velkou tepelnou vodivostí nástrojové oceli.

Zhodnocení měření teplot

Naměřené teploty nedosahují vysokých hodnot, při kterých by se uplatňovalo pravidlo spinodální dekompozice, přesto je vliv chromu v povlaku znatelný. Teploty u povlaků s přidavkem jakéhokoliv procenta chromu jsou vyšší než u klasického povlaku TiAlN. I tak ale vrtáky mají vyšší odolnost vůči opotřebení než vrtáky bez přidavku chromu. Při měření teploty vhodnější metodou, by bylo nejspíše dosaženo teplot přesně v místě řezu až předpokládaných 900 °C, kdy by se projevil vliv oxidace. Patrné náznaky oxidace byly vidět na vrtácích při vyjmutí ze sklíčidla, proto je předpokládáno, že k ní při vyšších řezných rychlostech dochází.

6. Zhodnocení dosažených výsledků a doporučení pro praktické aplikace

Výše provedené testy ukázaly, že tyto povlaky mohou být použity na aplikaci pro nástroje, používané při vysokých řezných rychlostech. Při těchto rychlostech prokázali svojí odolnost, co se týče opotřebení, která byla přibližně 2 x vyšší než klasický povlak TiAlN, který je v dnešní době hojně využíván.

Pro aplikaci na vrtácích jsou tyto povlaky nedoporučitelné, jelikož řezné rychlosti pro vrtací operace jsou nižší než pro soustružnické nebo frézařské operace. Naopak tyto povlaky vykazovaly při vrtání horší vlastnosti ve všech směrech. Jak z hlediska působících sil, tak z hlediska opotřebení.

Při vyšších rychlostech, při kterých vznikají v místě řezu vysoké teploty, jsou tyto povlaky doporučeny. Chrom totiž při těchto zvýšených rychlostech zvyšuje teplotu začátku spinodální dekompozice a rozpad mřížek jednotlivých prvků nastává při vyšších teplotách. Proto tyto povlaky mají vyšší odolnost.

Dále povlaky s přídavkem chromu vykazují při teplotách nad 900 °C menší zoxidovanou vrstvu a chrom tak zajišťuje stálost při takt vysokých teplotách.

Z hlediska nákladů nemají tyto rozdílné povlaky žádné rozdíly, proto je vhodné doporučit pro budoucí použití povlaků jejich složení s 25 % chromu, které vykazovali při nejvyšších podmínkách testování nejideálnější vlastnosti.

Nejideálnější použití by bylo na břitové destičky, u kterých by bylo prováděno monitorování opotřebení během procesu opotřebení a jejich následná výměna, přebroušení a přepovlakování opotřebovaných destiček.

Při použití nástrojů s těmito povlaky je doporučeno intenzivního chlazení při obrábění. To by mělo zvýšit trvanlivost až o 30%.

7. Závěr

V této diplomové práci byly otestovány a vyhodnoceny TiAlN povlaky na vrtácích s určitým přídavkem chromu (0%, 13%, 20%, 25%). Povlaky byly nanесeny metodou PVD na funkční části monolitních vrtáků ze slinutých karbidů. Kvalita povlaku byla hodnocena z hlediska silového působení na polotovár, časové hodnoty v závislosti na vyvrtané hloubce otvoru a z hlediska opotřebení za jednotlivých řezných rychlostí. Pro testování z hlediska opotřebení byly zvoleny doporučené řezné rychlosti pro vrtání a další zvýšené rychlosti, při kterých byly povlaky podrobeny značnému teplotnímu zatížení.

Při testování z hlediska časové hodnoty, která nastala při vyvrtání otvoru dané délky, byly nastaveny řezné podmínky doporučené pro vrtání. Vrták byl zatížen konstantní silou po celou dobu vrtání. Při tomto experimentu bylo zjištěno, že za těchto podmínek mají nejlepší vlastnosti vrtáky bez přídavku chromu. U vrtáků s přídavkem chromu v povlaku docházelo ke většímu tření.

Testování z hlediska silového působení probíhalo již za různých řezných rychlostí. Stroj byl opatřen dynamometrem, na kterém byl umístěný obrobek, do kterého se vrtalo konstantním posuvem. Při testování za stejných rychlostí jako při vrtání konstantní posuvovou silou byly nejnižší hodnoty sil pro vrtání vrtákem s povlakem TiAlN bez chromu. Při vyšších řezných rychlostech byly naměřené hodnoty sil přibližně stejné. Proto z hlediska silového působení lze označit jako nejlepší vrtáky ty bez přídavku chromu.

Nejrozsáhlejší testy byly provedeny při měření opotřebení. Měření probíhalo při doporučené rychlosti pro vrtání $50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a dále při zvýšených rychlostech $100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Při zvolených parametrech byly vrtáky po určitém počtu navrtaných otvorů vyjmuty z vřetene stroje a bylo změřeno opotřebení přímou metodou odměřování. Odměřování bylo prováděno až do určité hodnoty opotřebení nebo do destrukce břitu. Při obrábění rychlostí $50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ vycházeli jako nejlepší vrtáky bez přídavku chromu, které měli odolnost o 50 % až 100 % vyšší než vrtáky s povlakem s přídavkem jakéhokoliv množství chromu. Průběh opotřebení byl konstantní na určité hodnotě, než došlo k destrukci. Při řezné rychlosti $100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ docházelo ke vzniku značných teplot a trvanlivost vrtáků se značně snížila. U klasického TiAlN dokonce na 25%. U vrtáku s povlakem s přídavkem 25 % chromu docházelo k minimálnímu opotřebení, než došlo k destrukci. Při těchto podmínkách docházelo k opotřebení na příčném břitu a na hlavním břitu. Řeznou rychlostí $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ bylo dosaženo značných teplotních zatížení, které dosahovalo hodnoty až $600 \text{ }^\circ\text{C}$. Při těchto teplotách nedochází k oxidaci povlaku, ale i přesto povlaky s vyšším procentem přidaného chromu vykazovali lepší odolnost vůči opotřebení. Opotřebení vznikalo u všech typů na špičce vrtáku a bylo postupné, což umožňuje vhodné monitorování. Jako nejlepší se jeví povlaky s 25 % chromu. Dále byly testovány vrtáky TiAlN s přídavkem Al_2O_3 . Ty nevykazovaly dobré vlastnosti při všech zvolených rychlostech. S přibývajícím řeznou rychlostí ztrácejí ztelně svojí odolnost.

Z výše uvedených testů se došlo k výsledkům, že obsah chromu má kladný vliv na odolnost povlaku při zvýšených řezných podmínkách, kdy jsou nástroje vystaveny zvýšenému teplotnímu zatížení. Pro podrobnější vyhodnocení je doporučeno vrtáky testovat při více řezných rychlostech a vrtání provádět vícekrát a to i do různých materiálů.

Seznam použité literatury

- [1] ALBANO, Thomas. *Sistema de revestimento*. University of Coimbra, Portugal, 2016.
- [2] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Brno, 2006 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf
- [3] KŘÍŽ, Antonín. Tenké vrstvy [online]. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam - materiálový výzkum. [cit. 2016-02-07]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf
- [4] LIBRA, Martin. Naprašování tenkých vrstev. *Elektro* [online]. 2013,(7), 1, [cit. 2016-02-07]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/napasovani-tenkych-vrstev-14441>
- [5] HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. *Elektro* [online]. 2006(1), 192 [cit. 2016-02-07]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf
- [6] DANĚK, Martin. *Význam tenkých vrstev pro zlepšování vlastností strojírenských součástí*. Praha, 2015.
- [7] CVD povlaky. *Sandvik Coromant* [online]. 2013,(2), 1 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cscz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/coating-%E2%80%93cvd.aspx
- [8] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01864-6.
- [9] Problematika obrábění titanových leteckých dílů. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2012,(2), 42 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/problematika-obrabeni-titanovych-leteckych-dilu.html>
- [10] A Study of Effects of Drill Point Geometry. [online]. 2013, 3 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.fvt.tuke.sk/journal/pdf10/3-str-10-12.pdf>
- [11] HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění* [online]. 2004. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2004 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf

- [12] WALTER, Titex. *Přebroušení a povlakování pro vrtací a vyvrtávací nástroje*. ČVUT v Praze, 2006.
- [13] FORSÉN, Rikard, Mats JOHANSSON, Magnus ODÉN a Naureen GHAFOR. Decomposition and phase transformation in TiCrAlN thin coatings. .. 2012, 8.
- [14] MÁDL, Jan. *Teorie a obrábění*. ČVUT v Praze. Praha: Ediční středisko ČVUT, Praha 6, 1990. ISBN 14,06 - 14,62.
- [15] SVOBODA, P. *Polymer Blends Phase Transition*. Fakulta Technologická Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Zlín: ., 2007. ISBN 9788073185183.

Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení povlakování	13
Obr. 2 Vakuová komora [6]	16
Obr. 3 Schéma vakuové komory [6]	16
Obr. 4 Izobarický fázový diagram binární směsi [15]	19
Obr. 5 Tři fáze spinodální dekompozice [15]	19
Obr. 6 Trend vývoje nástrojových materiálů [8]	20
Obr. 7 Základní aplikační oblasti SK, povlakovaných SK a cermetů (Sumitomo)	23
Obr. 8 Geometrie vrtáku [10]	26
Obr. 9 Hlavní formy opotřebení [8]	26
Obr. 10 Závislost opotřebení na úhlu hřbetu [8]	27
Obr. 11 Závislost opotřebení na úhlu řezu [8]	27
Obr. 12 Závislost opotřebení na úhlu nastavení [8]	28
Obr. 13 Vliv poloměru ostří na opotřebení [8]	28
Obr. 14 Závislost životnosti nástroje na jeho opotřebení [8]	29
Obr. 15 Určení optimální velikosti opotřebení VB [8]	30
Obr. 16 Opotřebení příčné hrany [12]	30
Obr. 17 Opotřebení rohové hrany [12]	30
Obr. 18 Silné opotřebení na hlavní řezné hraně a rohové hraně [12]	31
Obr. 19 Opotřebení na příčné hraně a na hlavní řezné hraně [12]	31
Obr. 20 Časová závislost opotřebení na řezných rychlostech [2]	32
Obr. 21 $T - v_c$ závislost	32
Obr. 22 Naznačení vrstvy na vrtáku	34
Obr. 23 Procentuální obsah prvků v povlaku TiAlN	35
Obr. 24 Zoxidovaná vrstva TiAlN povlaku při 900 °C	35
Obr. 25 Procentuální obsah prvků v povlaku TiAlN+13% Cr	36
Obr. 26 Zoxidovaná vrstva TiAlN+13% Cr povlaku při 900 °C	36
Obr. 27 Procentuální obsah prvků v povlaku TiAlN+20% Cr	36
Obr. 28 Zoxidovaná vrstva TiAlN+20% Cr povlaku při 900 °C	36
Obr. 29 Procentuální obsah prvků v povlaku TiAlN+25% Cr	37
Obr. 30 Zoxidovaná vrstva TiAlN+25% Cr povlaku při 900 °C	37
Obr. 31 Uspořádání pracoviště - pohled 1	38
Obr. 32 Uspořádání pracoviště - pohled 2	38
Obr. 33 Dráha řezu	39
Obr. 34 Vzorky obráběného materiálu	39
Obr. 35 Časy naměřené při vrtání do 1.7131	39
Obr. 36 Hodnoty naměřené při vrtání do Ti6Al4V	40
Obr. 37 Hodnoty naměřené při vrtání vrtákem z HSS	42
Obr. 38 Konzolová vrtačka Kazanlik s připojeným dynamometrem	43
Obr. 39 Frézka FC 16 CNC s připojeným dynamometrem	43
Obr. 40 Osová síla při vrtání do 1.7121	44
Obr. 41 Krouticí moment při vrtání do 1.7121	44
Obr. 42 Osová síla při vrtání do Ti6Al4V	44
Obr. 43 Krouticí moment při vrtání do Ti6Al4V	44

Obr. 44 Naměřené síly při vrtání konstantním posuvem do 1.7131.....	45
Obr. 45 Naměřené krouticí momenty při vrtání konstantním posuvem do Ti6Al4V.....	45
Obr. 46 Ukázka naměřených hodnot síly při 6 000 [ot.min ⁻¹].....	46
Obr. 47 Ukázka naměřených hodnot krouticího momentu při 6 000 [ot.min ⁻¹].....	46
Obr. 48 Průběh osové síly při jednotlivých rychlostech.....	47
Obr. 49 Označení geometrie břitu	48
Obr. 50 Obráběcí stroj FV 25 CNC	48
Obr. 51 Mikroskop	48
Obr. 52 Obráběcí stroj FC 16 CNC	48
Obr. 53 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem bez přídavku chromu	49
Obr. 54 Mikroskopický snímek po destrukci břitu vrtáku s povlakem s 0% Cr	49
Obr. 55 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 13% Cr	50
Obr. 56 Mikroskopický snímek po destrukci břitu vrtáku s povlakem s 13% Cr	50
Obr. 57 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 20% Cr	51
Obr. 58 Mikroskopický snímek po destrukci břitu vrtáku s povlakem s 20% Cr	51
Obr. 59 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 25% Cr	52
Obr. 60 Mikroskopický snímek po destrukci břitu vrtáku s povlakem s 20% Cr	52
Obr. 61 Porovnání vrtáků při 50 [m.min ⁻¹].....	53
Obr. 62 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem bez přídavku chromu	53
Obr. 63 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 13% Cr	54
Obr. 64 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 20% Cr	54
Obr. 65 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 25% Cr	55
Obr. 66 Porovnání vrtáků při 100 [m.min ⁻¹].....	56
Obr. 67 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem bez přídavku chromu	56
Obr. 68 Mikroskopický snímek po destrukci břitu vrtáku s povlakem s 0% Cr	57
Obr. 69 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 13% Cr	57
Obr. 70 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 20% Cr	58
Obr. 71 Závislost opotřebení na počtu otvorů pro vrták s povlakem s přídavkem 25% Cr	58
Obr. 72 Porovnání vrtáků při 200 [m.min ⁻¹].....	59
Obr. 73 Opotřebení hlavních břitů vrtáků s povlaky s 0 % Cr při různých rychlostech.....	60
Obr. 74 Opotřebení hlavních břitů vrtáků s povlaky s 13 % Cr při různých rychlostech.....	60
Obr. 75 Opotřebení hlavních břitů vrtáků s povlaky s 20 % Cr při různých rychlostech.....	60
Obr. 76 Opotřebení hlavních břitů vrtáků s povlaky s 25 % Cr při různých rychlostech.....	61
Obr. 77 Opotřebení vrtáku Al ₂ O ₃ při 50 m.min ⁻¹	61
Obr. 78 Opotřebení vrtáku Al ₂ O ₃ při 100 m.min ⁻¹	62
Obr. 79 Opotřebení vrtáku Al ₂ O ₃ při 200 m.min ⁻¹	62
Obr. 80 Zhodnocení vrtáků s přídavkem Al ₂ O ₃	63
Obr. 81 Grafické znázornění T = f (v _c), pro 20% Cr z rychlostí 50 m.min ⁻¹ a 100 m.min ⁻¹	65
Obr. 82 Uspořádání pracoviště pro měření teplot.....	67
Obr. 83 Nanesená fólie a sprej na obrobku	67
Obr. 84 Zaznamenání teplot vrtáku TiAlN při řezné rychlosti 50 m.min ⁻¹	68
Obr. 85 Průběh naměřených teplot pro jednotlivé rychlosti s použitím fólie	69
Obr. 86 Průběh naměřených teplot pro jednotlivé rychlosti s použitím spreje	69
Obr. 87 Zaznamenání teplot vrtáku TiAlN při řezné rychlosti 200 m.min ⁻¹	70

Obr. 88 Zaznamenání teplot vrtáku TiAlN + 25% Cr při řezné rychlosti 200 m.min ⁻¹ těsně před dosažením maximální naměřené hodnoty	71
Obr. 89 Znázornění přestupu tepla stěnou	72

Seznam tabulek

Tab. 1 Technologické příčiny nevyužití strojních časů	28
Tab. 2 Hodnoty exponentu m pro různé řezné materiály [2]	32
Tab. 3 Přesný obsah prvků v povlaku TiAlN [1]	34
Tab. 4 Přesný obsah prvků v povlaku TiAlN+13%Cr [1].....	35
Tab. 5 Přesný obsah prvků v povlaku TiAlN+20%Cr [1].....	36
Tab. 6 Přesný obsah prvků v povlaku TiAlN+25%Cr [1].....	37
Tab. 7 Časy naměřené vrtáky s přidavkem 0%, 13%, 20% a 25% Cr v povlaku.....	39
Tab. 8 Časy naměřené vrtáky 0%, 13%, 20% a 25% Cr v povlaku	40
Tab. 9 Časy vrtání konstantní silou vrtákem z HSS.....	41
Tab. 10 Naměřené hodnoty osové síly a krouticího momentu při vrtání do 14 220	44
Tab. 11 Naměřené hodnoty osové síly a krouticího momentu při vrtání do Ti6Al4V.....	45
Tab. 12 Vyhodnocení vrtáků z předběžného měření	46
Tab. 13 Průměrné hodnoty osových sil a krouticích momentů pro vrták s 0% Cr	46
Tab. 14 Průměrné hodnoty osových sil a krouticích momentů pro vrták s 13% Cr	46
Tab. 15 Průměrné hodnoty osových sil a krouticích momentů pro vrták s 20% Cr	47
Tab. 16 Průměrné hodnoty osových sil a krouticích momentů pro vrták s 25% Cr	47
Tab. 17 Tabulka vyvrtaných otvorů vrtáky bez povlaku.....	63
Tab. 18 Zhodnocení všech vrtáků z hlediska opotřebení.....	64
Tab. 19 Časy vrtání jednotlivých otvorů.....	64
Tab. 20 Hodnoty m a c _T pro ostatní povlaky	66
Tab. 21 Naměřené hodnoty teplot při použití fólie	68
Tab. 22 Naměřené hodnoty teplot při použití spreje	69

Seznam použitého software

Microsoft Office

Řídicí systém Heidenhain

Řídicí systém Mikronex

Elektronické přílohy (uvedeny na CD)

Kaspar_DP.docx

Kaspar_DP.pdf

Grafy_DP_Kaspar.xlsx

Grafy_1.xlsx

Záznam měření sil

Grafické vyhodnocení měření sil

Mikroskopické snímky ostatních opotřebení

Záznam z měření teplot

Programy pro řídicí systémy Heidenhain a Mikronex