

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGICKÉ, EKONOMICKÉ A
EKOLOGICKÉ ASPEKTY OBRÁBĚNÍ ZA SUCHA
TECHNOLOGICAL, ECONOMICAL AND ECOLOGICAL ASPECTS OF DRY MACHINING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JOSEF VOSTŘEL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Josef Vostřel

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Výrobní technologie a průmyslový management (2303T010)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Technologické, ekonomické a ekologické aspekty obrábění za sucha

v anglickém jazyce:

Technological, economical and ecological aspects of dry machining

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Procesní kapaliny mohou představovat výrazný podíl výrobních nákladů na obrábění, provázených navíc s dopady na environmentální a hygienické aspekty.

Cíle diplomové práce:

Zpracování literárních pramenů.

Analýza mechanismu tvorby třísky při obrábění za sucha.

Distribuce tepla a průběh teplotních polí při obrábění za sucha.

Vliv obrábění za sucha na trvanlivost nástrojů.

Ekonomické a ekologické aspekty obrábění za sucha.

Doporučení pro praxi.

Seznam odborné literatury:

- SREJITH, P.S., NGOI, B.K.A. Dry Machining: Machining of the Future. J. of Material Processing Technology, 2000, Vol.101, pp. 287-291.
- DHAR N.R., KAMRUZZAMAN M. and MAHIUDDIN A. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. Journal of Materials Processing Technology, Volume 172, Issue 2, 28 February 2006, Pages 299-304
- SHAW, M.C., PIOTT, J.D., RICHARDSON, L.P. 1951. Effect of cutting fluid upon chip-tool interface temperature. Trans. ASME, 71:45-56.
- KLOCKE, F., EISENBLÄTTER, G. 1997. Dry cutting. Annals of CIRP. 46(2). pp.519-525.
- ITOIGAWA, F., CHILDS, T.H.C., NAKAMURAA, T., BELLUCO, W. 2005. Effects and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of an aluminum alloy. Wear, 260. pp. 339-344
- KLOCKE, F., EISENBLÄTTER, G. 1997. Machinability investigation of the drilling process using minimal cooling lubrication techniques. Annals of CIRP, 46(1). pp. 19-24.
- SEFRIN, H. 1999. Minimum quantity lubrication, application experience in practice. Tribology and Lubrication Engineering, 46(3)-261-266.
- DE CHIFFRE, L. Function of cutting fluids in machining [J]. Lubrication Engineering. 1988. 44(6). pp.514-519.
- KELLY, J.F., COTTEREL, M.G. Minimal lubrication machining of aluminum alloys[J]. Journal of Material Proc Tech. 2002, 120. pp.327-334.
- DE CHIFFRE, L., ANDREASEN, J.L., LAGERBERG, S. and THESKEN, I.B. Performance Testing of Cryogenic CO₂ as Cutting Fluid in Parting/Grooving and Threading Austenitic Stainless Steel. CIRP Annals - Manufacturing Technology. Volume 56. Issue 1. 2007. pp.101-104
- BARÁNEK, Ivan. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. 1. vyd. Trenčín : TnUAD, 1999. 112 s. ISBN 80-8075-013-0.
- BARÁNEK, I., ŠANDORA, J. Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky. Trenčín: TnUAD, 2004. 212 s. ISBN 80-8075-013-0.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 10.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Používání procesních kapalin zlepšuje průběh a výsledky obrábění, na druhé straně zvyšuje náklady a vyvolává problémy povahy ekologické a hygienické. V práci je postupně rozebrána analýza mechanismu tvorby třísky, průběh a distribuce tepla a teplotních polí stejně jako ekonomické a ekologické aspekty obrábění za sucha a vliv obrábění za sucha na trvanlivost nástrojů. V experimentální části jsou vyhodnocena naměřená data získaná v průběhu vrtání válcového polotovaru s ohledem na průběh teplotních polí obrobku při použití různých druhů povlaků nástrojů. V závěrečné části práce jsou uvedena doporučení pro praxi.

Klíčová slova

Obrábění za sucha, tvorba třísky, teplota řezání, povlakování nástrojů, procesní kapalina.

ABSTRACT

Using of process liquids improves the procedure and results of machining, on the other hand, increases costs and raises some ecological and hygienic issues. In the work there is gradually analyzed mechanism of chip formation, progress and distribution of heat and thermal fields as well as economic and ecological aspects of dry machining and influence of dry machining on durability of tools. In the experimental part there are evaluated data which were measured during the drilling of cylindrical workpiece with regards to progress of workpiece thermal fields while using various kind of tool coating. In the final part there are stated recommendations for practice.

Key words

Dry machining, chip creating, cutting temperature, tool coating, process liquid.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VOSTŘEL, Josef. *Název: Technologické, ekonomické a ekologické aspekty obrábění za sucha*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 64s. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Technologické, ekonomické a ekologické aspekty obrábění za sucha* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 15.5. 2009

.....
Josef Vostřel

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod	9
1 ANALÝZA MECHANISMU TVORBY TŘÍSKY PŘI OBRÁBĚNÍ ZA SUCHA	10
1.1 Plastická deformace v oblasti tvoření třísky	10
1.1.1 Primární plastická deformace.....	11
1.1.2 Sekundární plastická deformace	11
1.1.3 Terciární plastické deformace	13
1.2 Tvorba třísky	13
1.3 Úhel roviny maximálních smykových napětí.....	15
1.4 Poznátky z analýzy mechanismu tvorby třísky pro obrábění za sucha....	17
2 DISTRIBUCE TEPLA A PRŮBĚH TEPLOTNÍCH POLÍ PŘI OBRÁBĚNÍ ZA SUCHA	18
2.1 Tepelná bilance řezného procesu	18
2.2 Distribuce tepla při obrábění za sucha	20
2.3 Teplota řezání.....	21
2.4 Průběh teplotních polí při obrábění za sucha.....	23
3 VLIV OBRÁBĚNÍ ZA SUCHA NA TRVANLIVOST NÁSTROJŮ	26
3.1 Opotřebení a trvanlivost nástroje při obrábění za sucha.....	26
3.1.1 Trvanlivost nástroje	26
3.1.2 Opotřebení břitu nástroje	26
3.1.3 Kritéria opotřebení.....	27
3.1.4 Opotřebení při obrábění za sucha.....	28
3.2 Vliv teploty řezání při obrábění za sucha na trvanlivost nástrojů	30
3.3 Vliv povlakování nástrojů při obrábění za sucha na trvanlivost nástrojů ..	31
3.3.1 Koeficient tření.....	31
3.3.2 Tvrdost	32
3.3.3 Odolnost vůči oxidaci.....	32
3.3.4 Chemická a tepelná stabilita.....	33
3.3.5 Studie vlivu povlakování na obrábění za sucha	34
3.4 Vliv geometrie nástroje při obrábění za sucha na trvanlivost nástrojů	37
4 EKONOMICKÉ A EKOLOGICKÉ ASPEKTY OBRÁBĚNÍ ZA SUCHA	39
4.1 Ekonomické aspekty obrábění za sucha.....	39
4.2 Ekologické a zdravotní problémy při používání procesních kapalin.....	41
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - VLIV JEDNOTLIVÝCH TYPŮ POVLAKŮ NÁSTROJŮ NA VELIKOST TEPLOTNÍCH POLÍ OBROBKU.....	42
5.1.1 Charakteristika experimentu	42
5.1.2 Realizace experimentu	44
5.1.3 Data získaná experimentem.....	45
5.1.4 Vyhodnocení experimentu – obrábění s chlazením	46
5.1.5 Vyhodnocení experimentu – obrábění za sucha.....	49
5.1.6 Závěry experimentu	52
6 DOPORUČENÍ PRO PRAXI	53
6.1 Podmínky obrábění.....	53

6.1.1 Minimalizace množství tepla	53
6.1.2 Odstraňování třísek.....	54
6.2 Možnosti obrábění za sucha pro vybrané technologie obrábění.....	54
6.3 Kdy nelze obrábění za sucha použít.....	57
7 ZÁVĚR.....	59
Seznam použitých zdrojů	60
Seznam použitých zkratek a symbolů.....	63

ÚVOD

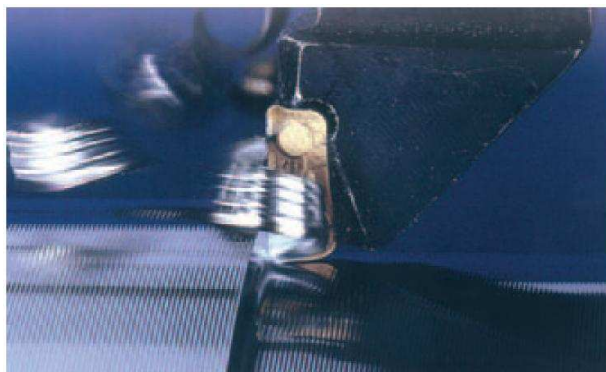
Součásti strojírenských výrobků se s rozvojem vědy a techniky stávají stále náročnějšími. Lépe než jakákoliv jiná metoda výroby vyhovuje zvýšeným požadavkům na přesnost rozměrů, geometrické tvary a jakost povrchu technologie obrábění. Výroba součástí obráběním i nadále zůstává ve strojírenské výrobě základní technologickou profesí.

Úsilí o snižování výrobních nákladů ve strojírenských výrobních procesech vede k jejich postupnému zrychlování a zjednodušování. Týká se to samozřejmě i obrábění kovů jako jednoho z velice náročných a nákladných výrobních procesů. (1)

Většina obráběcích operací se dle provádí při dokonalém chlazení a mazání, tj. s přívodem procesní kapaliny. (6) K jejímu zavedení došlo v době, kdy zvýšeným řezným požadavkům již neodpovídaly vlastnosti řezných materiálů. Nasazením procesních kapalin se vyřešily potíže s trvanlivostí břitu, s kvalitou a přesností obrobeného povrchu, s odstraňováním třísek a s řadou dalších záležitostí. (2) Náklady na likvidaci procesních kapalin však stále rostou a tak se objevují nové strategie, které jsou zaměřeny na jejich omezování vedoucích až k obrábění za sucha. Snížení nákladů se docílí nejen vyloučením procesních kapalin z procesu, ale i příslušného technologického vybavení a nutného zázemí. (6)

Dalším omezujícím faktorem používání procesních kapalin je hledisko ekologické. Pro procesní kapaliny se připravují stále přísnější bezpečnostní a hygienické předpisy. Reakcí na danou skutečnost jsou změny složení kapalin, vznik jejich nových typů, přesuny preferencí uživatelů mezi typy kapalin a také odklon od klasických řezných kapalin k "MQL" nebo obrábění za sucha. (3)

Při obrábění za sucha jsou pro obráběcí proces specifické silné třecí a adhezní poměry mezi obrobkem a nástrojem. (5) V této souvislosti je nutné vyřešit některé technologické problémy, k jejímž úspěšným řešením značně napomáhají pokroky ve vývoji nových geometrií nástrojů a technologiích povlakování. Otázky také zůstávají u některých operací jako např. hluboké vrtání, řezání závitů, vystružování apod.



Obr. 0.1 Pohled na obrábění za sucha (38)

1 ANALÝZA MECHANISMU TVORBY TŘÍSKY PŘI OBRÁBĚNÍ ZA SUCHA

1.1 Plastická deformace v oblasti tvoření třísky

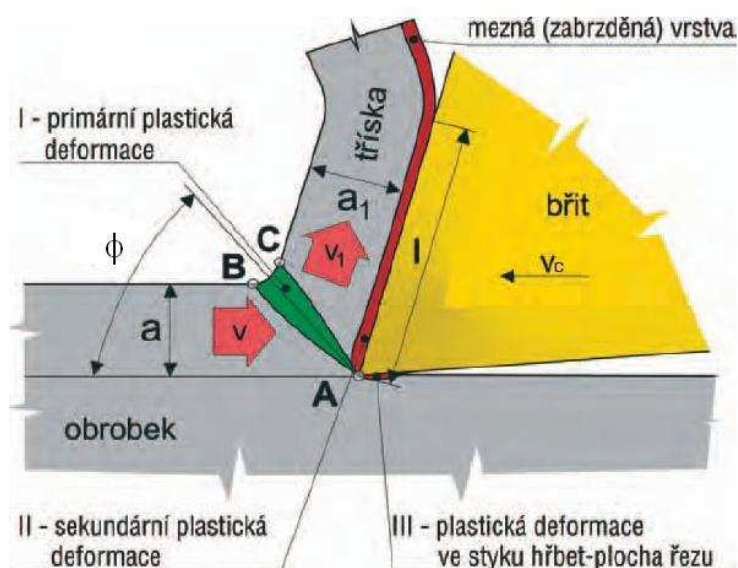
Obrábění je technologický proces, kdy nový povrch vzniká oddělením částic materiálu ve tvaru třísek řezáním. Řezání je procesem plastické deformace, jejíž průběh je ovlivňován vlastnostmi obráběného materiálu a podmínkami, za kterých probíhá. Nejvýznamnější z těchto podmínek jsou deformační rychlost a teplota. (7)

Zvlášť významnou roli v dnešním obrábění zaujímá utváření třísky, především kontrolovaný odchod třísky a lámání třísky. Úkolem je nejen odstranit odebíraný materiál z obrobku, ale také vznikající třísky odvádět z řezné zóny a odvádět pomocí nich teplo vznikající při procesu obrábění. (34)

Oblast materiálu, ve které dochází účinkem řezného nástroje k jeho přetváření na třísku nazýváme kořen třísky. Kořen třísky zahrnuje přibližně tři oblasti výrazné plastické deformace:

- oblast primární plastické deformace materiálu I
- oblast sekundární plastické deformace II
- oblast terciární plastické deformace III

K vysvětlení procesu řezání se obvykle využívá systému pravoúhlého, tzv. ortogonálního řezání, které je znázorněno na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Oblasti plastických deformací v kořenu třísky (33)

1.1.1 Primární plastická deformace

Při obrábění je břit řezného nástroje tlačěn do materiálu obrobku, viz obr. 1.1. V okamžiku překročení meze kluzu materiálu obrobku dojde ke vzniku pružné a plastické deformace. (34) Tato oblast je ohraničena body A,B,C a je označována jako oblast primární plastické deformace.

Po vyčerpání plastické deformace dojde k růstu napětí až k hranici meze pevnosti ve stříhu a k odstřížení segmentu třísky. (9) Dle (1) můžeme uvažovat, že při vysokých řezných rychlostech body B a C postupně splývají a ke vzniku třísky dochází v jedné rovině, tzv. rovině maximálních smykových napětí, která je vůči obrobku skloněna pod úhlem Φ .

Břitem oddělená vrstva o tloušťce a je přeměněna na třísku o tloušťce a_1 a obvykle platí, že $a_1 > a$. To znamená, že se odřezávaná vrstva v oblasti primární plastické deformace pěchuje a po čele odchází tříska rychlostí v_1 menší než je řezná rychlost v_c . (33)

Plastické chování kovu v rovině max. smykových napětí působí rozhodujícím způsobem na plochu řezu a na zpevnění třísky za studena. Zpevnění za studena zvyšuje řezné síly, zmenšuje úhel roviny max. smykových napětí a má za následek klouzání tvrdší třísky po ploše čela břitové destičky. (34)

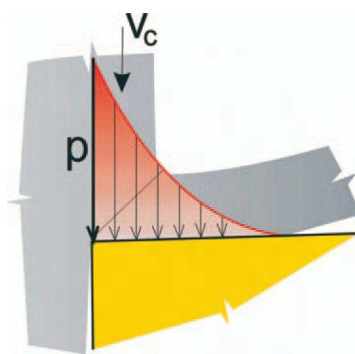
Podmínky vzniklé smykové deformace rozhodujícím způsobem ovlivňují řezné podmínky a úhel čela. (34)

Obecně platí, že čím je vyšší úhel roviny maximálních smykových napětí Φ , tím je štíhlejší tříska, proces je energeticky výhodnější a dochází k nižšímu zatížení a ovlivnění povrchových a podpovrchových vrstev. (8)

1.1.2 Sekundární plastická deformace

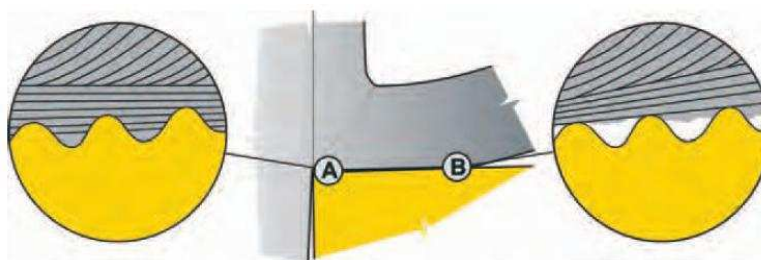
Tříska vytvořená primární plastickou deformací odchází po čele nástroje. V důsledku intenzivního tření třísky o čelo nástroje dochází k silné plastické deformaci tenké vrstvy třísky, tzv. sekundární plastické deformaci. (33)

Ve styčných plochách třísky s čelem nástroje působí vysoké tlaky, které mají vliv na specifický charakter tohoto tření. Tyto tlaky dosahují maximálních hodnot v blízkosti ostří, ve směru pohybu třísky se zmenšují a na konci kontaktní plochy dosahují nulové hodnoty, viz. obr. 1.2. (33)



Obr. 1.2 Průběh tlaku ve styčné ploše mezi třískou a nástrojem (33)

Následkem velmi vysokých normálních tlaků v blízkosti ostří a jeho rychlého poklesu v kontaktní ploše ve směru pohybu třísky vznikají dle (33) dva odlišné typy tření. Vnitřní tření A v oblasti ostří ve zhruba polovině délky kontaktní plochy třísky – čelo nástroje a oblast vnějšího tření B., viz obr. 1.3.



Obr. 1.3 Vnitřní a vnější tření v kontaktní zóně (33)

Oblasti vnitřního tření se zaplní mikronerovnosti povrchu čela nástroje materiálem odcházející třísky, takže skutečná styková plochy se zvětší (33). Vrcholky mikronerovností jsou plasticky deformovány, díky tomu dojde k popraskání oxidů na povrchu nástroje a ke styku čistých kovových ploch a vzniku adhezních sil. (18) Výsledkem je vznik mikroskopických adhezních svarů, které jsou díky dalšímu pohybu obou ploch plynule odtrhávány. (35) Tečné napětí, které je nutné k odtržení těchto svarů bývá zpravidla větší než mez kluzu zpevněného materiálu třísky, čímž dochází k sekundární plastické deformaci. (18)

Dalším pohybem třísky dochází k vnějšímu bodovému tření plasticky zdeformované mezní vrstvy třísky s čelem nástroje (33) a ke vzniku obraze.(34)

Za určitých okolností může docházet u některých materiálů obrobků (např. nástrojová ocel – ocel, slinutý karbid – ocel) k postupnému nárůstu vázoucích vrstev materiálu třísky a k jejich vytvrzení na čele nástroje. Tím vznikne umělý břit tzv. nárůstek, který je vždy negativním jevem. Zabránit jeho vzniku lze v převážné většině případů změnou řezných podmínek. (34) U uhlíkových ocelí se dle (10) nárůstek tvoří při takových řezných podmínkách, kdy

teplota řezání dosáhne 300 °C a přestává se tvořit okolo 600 °C. Při běžných podmínkách obrábění se nárůstek objevuje při řezné rychlosti 18 m.min⁻¹ a mizí při řezné rychlosti 72 m.min⁻¹.

Dle (33) je v sekundární oblasti podstatně vyšší stupeň plastické deformace než v oblasti primární plastické deformace, kde je plasticky deformován celý objem odřezávané vrstvy. Deformace velmi tenké vrstvy odcházející třísky zásadním způsobem ovlivňuje teplotu povrchových vrstev čela nástroje, což je dominantním faktorem při opotřebení.

1.1.3 Terciární plastické deformace

V důsledku dopružení obráběného materiálu na hřbet nástroje dochází ke tření jehož důsledkem je terciární plastická deformace v tenké povrchové vrstvě obrobené plochy. Toto tření ovlivňuje teplotu povrchových vrstev hřbetu nástroje a má vliv na jeho opotřebení. (33) Z pohledu obrobku má terciární plastická deformace vliv na výslednou drsnost obrobeného povrchu. (8)

1.2 Tvorba třísky

Z hlediska tvorby třísky je znám vznik především dvou druhů třísek - soudržné (tvářené) a elementární. (13)

Vznik soudržné třísky je výsledkem tvárného lomu po plastické deformaci. (8) Podle rozložení plastické deformace je soudržná tříska plynulá nebo článkovitá. Plynulá tříska se vytváří u kovů a slitin s krychlovou prostorově nebo plošně středěnou krystalovou mřížkou s vysokou tepelnou vodivostí a malou tvrdostí (např. slitiny hliníku, oceli s nízkým obsahem uhlíku). Tvorba článkovité třísky se vyskytuje u obrábění kovů s hexagonální těsnou krystalovou třískou, která se vyznačuje nízkou tepelnou vodivostí a vysokou tvrdostí (např. titanové a niklové slitiny). (13)

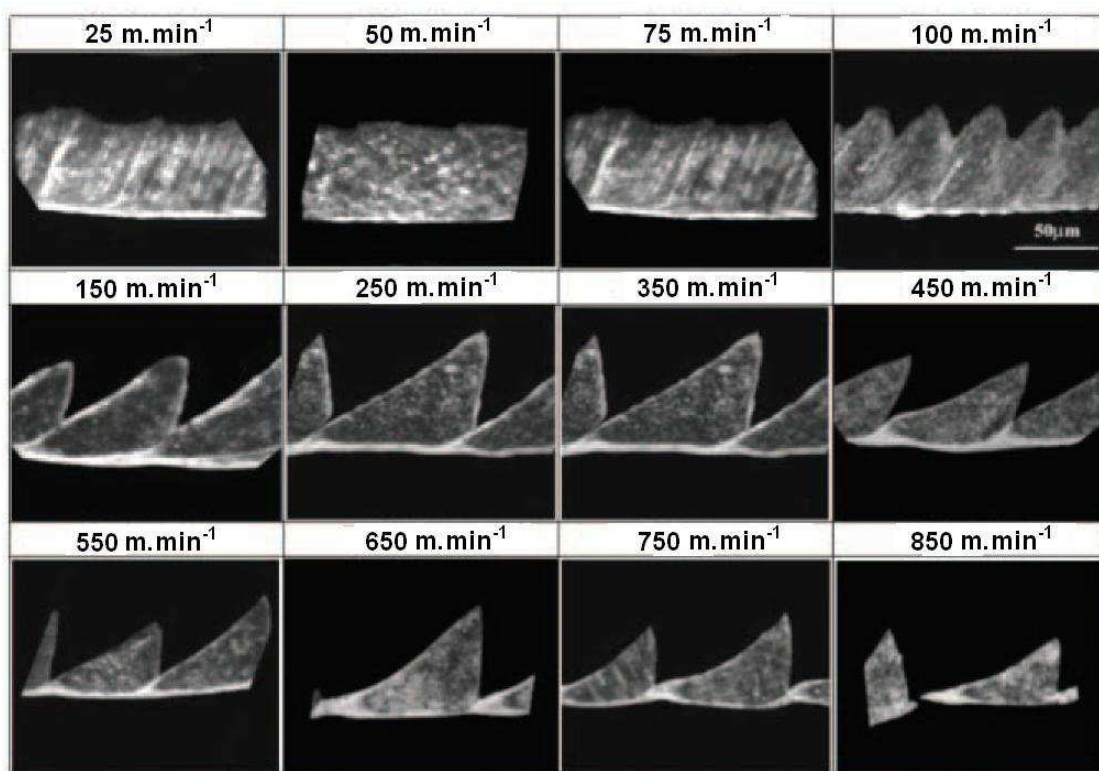
Vznik elementární třísky je výsledkem křehkého lomu bez výrazné plastické deformace. (8) Je charakteristická při obrábění některých materiálů, např. skla, některých hornin a plastů, kdy obrobený materiál odletuje z místa řezu ve formě malých částic. (18)

Druh vznikající třísky je také ovlivněn všemi parametry procesu. Dle (13, 34) mezi ně patří:

- **materiál obrobku** (druh, pevnost, tvrdost, stav, tvar a velikost)
- **geometrie nástroje** (např. úhel nastavení hlavního ostří ovlivňuje délku, šířku a směr pohybu třísky)
- **řezné podmínky** (především řezná rychlost)

Vliv řezné rychlosti je velmi významný. Při nízké řezné rychlosti se může pro jeden obráběný materiál vytvářet plynulá soudržná tříska, od určité rychlosti soudržná článkovitá tříska, která se s dalším nárůstem změni na třísku elementární. (13)

Např. experiment (30) provedený při frézování za sucha nástrojové oceli 19 556.4 ukázal, že při změně řezné rychlosti se tvar třísek, viz obr. 1.4, měnil následovně. Do řezné rychlosti 50 m.min^{-1} probíhala plastická deformace v celém průřezu třísky a vznikala soudržná plynulá tříška stočená do spirály. Při zvyšování řezné rychlosti cca do 350 m.min^{-1} docházelo ke zvětšování délky třísky ve spirále. Zároveň okolo 100 m.min^{-1} docházelo ke vzniku článků třísky. Od 150 m.min^{-1} se plastická deformace lokalizuje pouze v pásech v okolí roviny max. smykových napětí. Od 450 m.min^{-1} došlo k potlačení tvorby spirálovitého tvaru třísky, tříška se stává značně článkovitá, jsou patrné strukturální změny v okolí roviny max. smykových napětí a obrábění přechází do HSC. Od 850 m.min^{-1} se vytvářela pouze tříška elementární. Dle (13) je popsána mechanika tvorby třísky experimentálně potvrzena i pro slitiny hliníku a oceli třídy 12 050.



Obr. 1.4 Změna tvaru třísek v závislosti na řezné rychlosti (30)

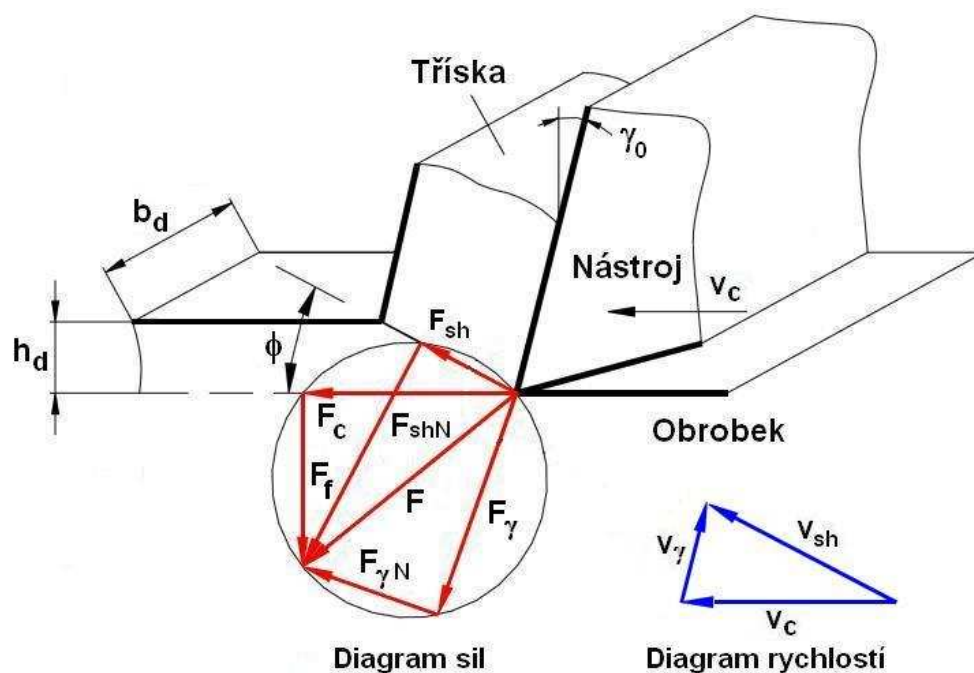
Ocel 19 556.4, frézovací hlava $D = 200 \text{ mm}$, břitové destičky SK

GC 4020 ((TiC)N, Al_2O_3 , TiN) $\alpha = 7^\circ$, $\gamma = 16^\circ$, $f_z = 0,05 \text{ mm}$, $a_p = 3 \text{ mm}$

Vznik třísky článkovité nebo ve tvaru krátkých šroubovic je základním předpokladem ve všech oblastech moderního obrábění. Každá vyměnitelná břitová destička je vybavena geometrií, která v rozsahu stanovené oblasti posuvu a hloubky řezu zajišťuje u přiřazených materiálů obrobku kontrolovaný odchod třísky. (34)

1.3 Úhel roviny maximálních smykových napětí

Rovina maximálních smykových napětí představuje rozhodující místo vlastního procesu obrábění. Odděluje mezi sebou třísku a obrobek, respektive deformovaný a dosud nedeformovaný materiál obrobku. Není to ale jen místo, kde je odebírán materiál a kde vzniká tříska, ale také místo, kde vznikají smyková napětí a smykové síly, které určují co se na čelní ploše řezu děje. (34) Na obr. 1.5. je zobrazen rozklad sil při ortogonálním řezání podle Ernsta a Merchanta.



Obr. 1.5 Rozklad sil a rychlostí při ortogonálním řezání podle Ernsta a Merchanta (36)

Jednotlivé složky řezné síly se dají určit pomocí řezné síly F_c a posuvové síly F_f , které se změří přímo pomocí dynamometrů. (10)

$$F_{sh} = F_c \cdot \cos \phi - F_f \cdot \sin \phi \quad (1.1)$$

$$F_{shN} = F_c \cdot \sin \phi + F_f \cdot \cos \phi = F_{sh} \cdot \tan (\phi + \lambda_t - \gamma_0) \quad (1.2)$$

$$F_\gamma = F_f \cdot \sin \gamma_0 + F_c \cdot \cos \gamma_0 \quad (1.3)$$

$$F_{\gamma N} = F_f \cdot \cos \gamma_0 - F_c \cdot \sin \gamma_0 \quad (1.4)$$

Na poloze úhlu roviny max. smykových ϕ napětí závisí celá řada fyzikálních parametrů obrábění. Základním vyjádřením je rovnice sestavená Merchantem. (8) Lze ji odvodit na základě rovnosti sil ve střížné rovině. (8)

Pro obecnou hodnotu celkové řezné síly F platí: (8)

$$F = \frac{h_d \cdot b_d \cdot \tau_{sh}}{\sin \phi \cdot \cos \phi} \quad (1.5)$$

Ize nalézt extrém, pro který nabývá síla F limitního hodnoty vůči ϕ : (8)

$$\frac{dF}{d\phi} = 0 \quad (1.6)$$

po úpravách pro úhel roviny max. smykových napětí ϕ platí:

$$\phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma_0}{2} - \frac{\lambda_t}{2} \quad (1.7)$$

kde λ_t je třecí úhel:

$$\lambda_t = \arctg \mu \quad (1.8)$$

a μ střední součinitel tření na čele nástroje:

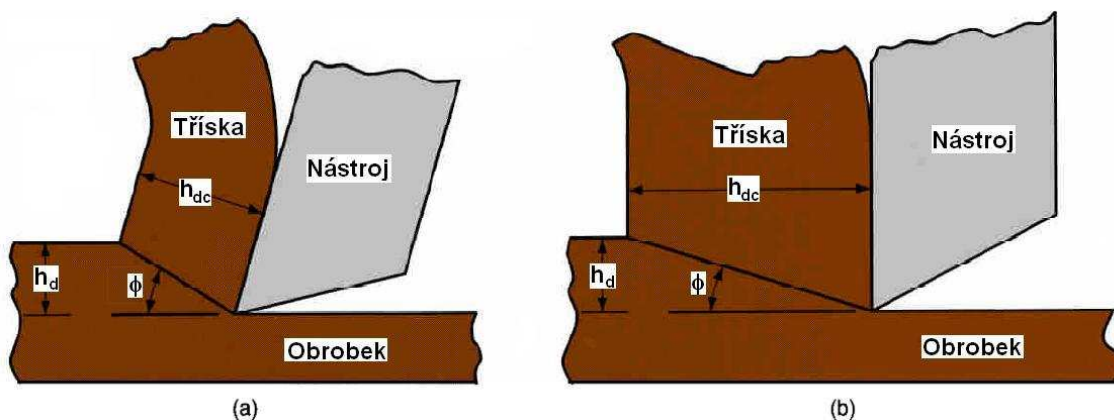
$$\mu = \frac{F_\gamma}{F_{\gamma N}} = \frac{F_f \cdot \sin \gamma_0 + F_c \cdot \cos \gamma_0}{F_f \cdot \cos \gamma_0 - F_c \cdot \sin \gamma_0} = \frac{F_c + F_f \cdot \operatorname{tg} \gamma_0}{F_f - F_c \cdot \operatorname{tg} \gamma_0} \quad (1.9)$$

Ze vztahu (1.7) vyplývá, že na úhel roviny max. smykových napětí má zásadní vliv nástrojový ortogonální úhel čela γ_0 a třecí úhel λ_t mezi odcházející třískou a čelem nástroje. Třecí úhel λ_t se vyjadřuje středním součinitelem tření μ , který zahrnuje tření mezi třískou a nástrojem.

Na úhel roviny max. smykových napětí mají vliv všechny podmínky obrábění, které ovlivňují velikost třecího úhlu λ_t . Hned po fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu je to řezná rychlost (svým vlivem na deformační rychlost a množství vyvinutého tepla) a mazacím médium, které snižuje součinitel smykového tření na čele nástroje. (1)

Při velkém úhlu roviny max. smykových napětí dle (37) dochází ke zmenšení roviny maximálních smykových napětí, viz. obr. 1.6 a tím i ke zmenšení oblasti primární plastické deformace a ke vzniku štíhlejší třísky. To má za následek pokles řezných sil, snížení potřebného příkonu stroje a snižuje-

ní teploty řezání. Zároveň dle (9) dojde k nižšímu ovlivnění povrchových a podpovrchových vrstev obrobku



Obr. 1.6 Vliv úhlu roviny maximálních smykových napětí na šířku třísky (36)

1.4 Poznatky z analýzy mechanismu tvorby třísky pro obrábění za sucha

Z uvedených skutečností je zřejmé, že obrábění je energeticky nejvýhodnější a zatížení nástroje nejnižší, je-li úhel roviny maximálních smykových napětí co největší.

Předpokládáme-li, že při obrábění nemůžeme ovlivnit fyzikální vlastnosti obráběného materiálu, protože materiál obrobku je dán, zůstává řezná rychlost, geometrie nástroje a tření mezi nástrojem a třískou.

Zvýšení řezné rychlosti je možné a s úspěchy se realizuje procesy HSC (vysokorychlostním obráběním), které umožňuje také obrábět za sucha. Má však některé své nevýhody jako jsou dle (4) dosud nedostatečně odzkoušená technologická data pro všechny druhy materiálů, nutnost zvýšení nákladů na zajištění dostatečné bezpečnosti obsluhujícího personálu, vyšší náklady na údržbu strojů a vyšší opotřebení některých částí stroje.

V případě obrábění za sucha za řezných podmínek (především řezných rychlostí), které nedosahují parametrů HSC, má rozhodující vliv na velikost úhlu roviny max. smykových napětí geometrie nástroje a povrch nástroje. (2) Právě sem se obracejí cesty výrobců nástrojů o nichž bude pojednáno v dalších kapitolách.

2 DISTRIBUCE TEPLA A PRŮBĚH TEPLOTNÍCH POLÍ PŘI OBRÁBĚNÍ ZA SUCHA

2.1 Tepelná bilance řezného procesu

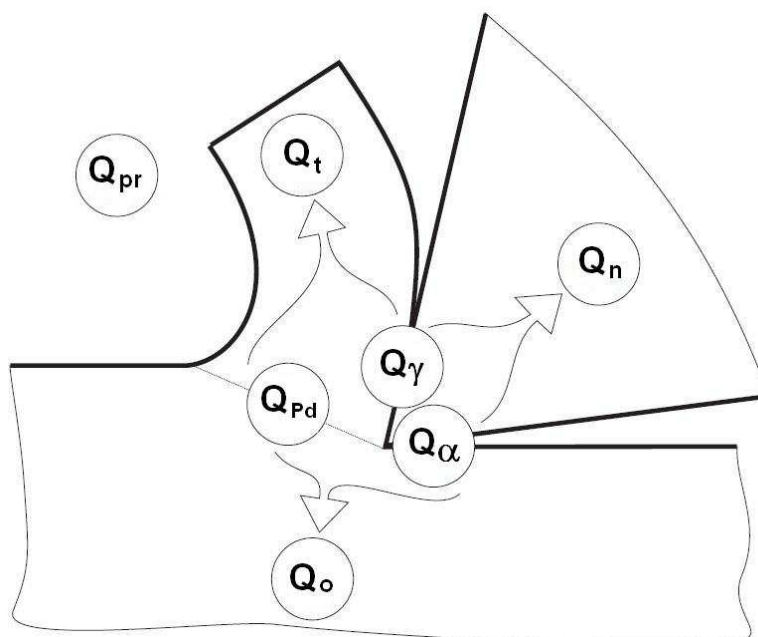
Během obráběcího procesu se téměř veškerá práce řezání přeměňuje v energii tepelnou (95÷98%). Pouze malá část energie je uložena jako plastická energie v deformovaných třískách a ve zbytkové napjatosti obrobeného povrchu. (8)

Teplo řezného procesu Q_e vzniklé při odebrání určitého množství materiálu je přibližně rovné práci řezného procesu E_e , tzn. že $Q_e = E_e$. (1).

Hlavní zdroje tepla při tvoření třísky jsou v oblastech plastické deformace a platí pro ně vztah:

$$Q_e = Q_{Pd} + Q_\gamma + Q_\alpha \quad (2.1)$$

- Q_{Pd} ...teplo v oblasti primární plastické deformace I
vzniklé při tvorbě třísky [J]
- Q_γ ... teplo v oblasti sekundární plastické deformace II
způsobené třením mezi třískou a čelem nástroje [J]
- Q_α ... teplo v oblasti terciární plastické deformace III
způsobené třením mezi obrobenou plochou a hřbetem nástroje [J]



Obr. 2.1 Vznik tepla při tvorbě třísky (14)

Vzniklé teplo řezného procesu je odváděno do jednotlivých prvků obráběcího systému:

$$Q_e = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr} \quad (2.2)$$

Q_t ... teplo odvedené třískou	[J]
Q_o ... teplo odvedené obrobkem	[J]
Q_n ... teplo odvedené nástrojem	[J]
Q_{pr} ... teplo odvedené řezným prostředím	[J]

Vzniklé a odvedené teplo musí být v rovnováze, proto můžeme vytvořit rovnici tepelné bilance řezného procesu:

$$Q_{pd} + Q_\gamma + Q_\alpha = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr} \quad (2.3)$$

Největší množství tepla vzniká v oblasti primární plastické deformace I, následuje oblast sekundární plastické deformace II a oblast terciární plastické deformace III. (9)

Množství vzniklého tepla závisí:

- na vlastnostech obráběného materiálu
- geometrii nástroje
- řezných podmínkách (především řezné rychlosti) (9)

Jejich vliv lze dle charakterizovat následovně:

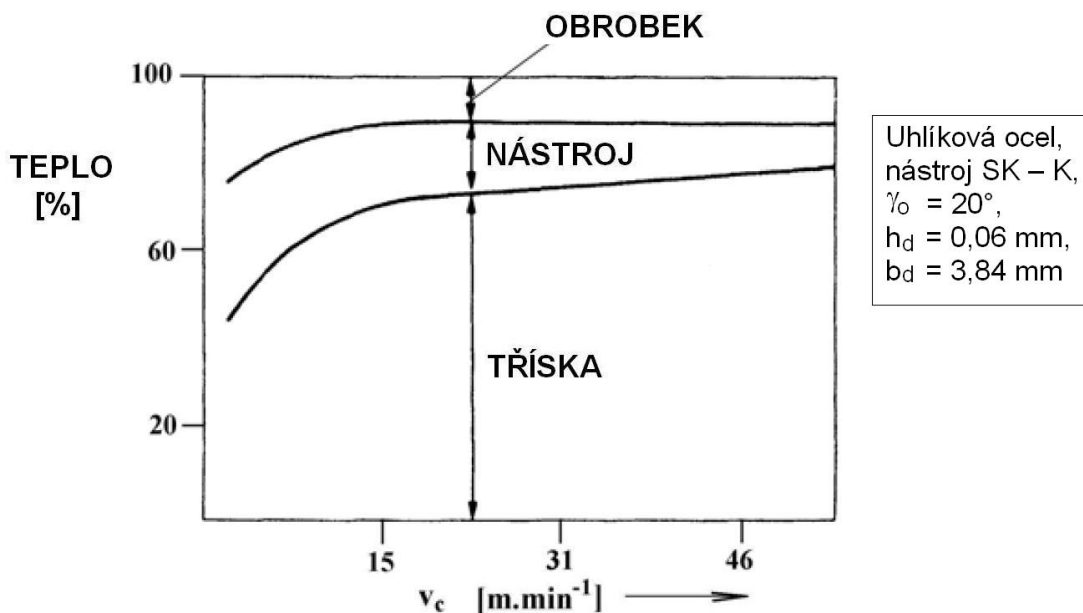
- se zvyšováním řezné rychlosti roste množství vzniklého tepla, klesá měrný řezný odpor a tím i teplota v oblasti primární plastické deformace, ale výrazně roste práce a tření na čele nástroje
- se zvyšováním posunové rychlosti v_f a šířky záběru ostří a_p roste množství vzniklého tepla, ale méně výrazně než u při zvyšování řezné rychlosti. Z hlediska tepleného zatížení nástroje je výhodnější štíhlá tříska – malá hodnota f a velká hodnota a_p
- při zvětšování pracovního úhlu nastavení hlavního ostří κ_{re} se vzniklé teplo soustřeďuje na kratší úsek břitu a proto tepelné zatížení nástroje narůstá
- při zmenšování úhlu čela γ_o narůstá úhle řezu δ_o , intenzita plastické deformace se zvyšuje a proto roste i množství vzniklého tepla
- při zmenšování úhlu hřbetu α_o narůstá práce tření na hřbetě nástroje a tím i množství vzniklého tepla (8)

Vzniklé teplo výrazně ovlivňuje řezný proces:

- negativně působí na řezné vlastnosti nástroje
- ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu
- ovlivňuje přechování a zpevňování obráběného materiálu
- ovlivňuje podmínky tření na čele i hřbetě nástroje (8)

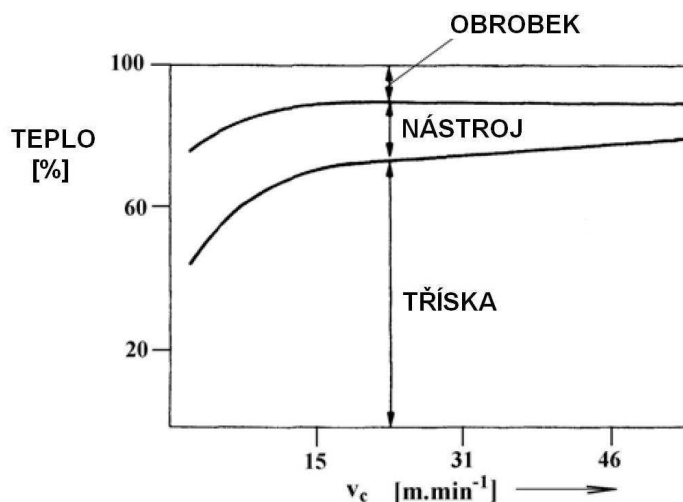
2.2 Distribuce tepla při obrábění za sucha

Podíl jednotlivých složek tepla, které jsou odváděny třískou, obrobkem, nástrojem a prostředím není konstantní, viz obr. 2.2.



Obr. 2.2 Poměrná distribuce tepla v závislosti na řezné rychlosti při obrábění za sucha (8,10)

Velmi záleží na druhu obráběcí operace. Při soustružení ocelí je značná část tepla odváděna třískou a tento podíl s rostoucí řeznou rychlostí vzrůstá (až 95%), u broušení je nejvíce tepla odváděno obrobkem (70-90%) a při vrtání ocelí s chlazením se teplo nejvíce odvádí procesní kapalinou (50-70%). (8) Příklad distribuce tepla při vrtání za sucha je uveden na obr. 2.3.



Obr. 2.3 Poměrná distribuce tepla v závislosti na řezné rychlosti při vrtání za sucha (Schmidt, (10))

2.3 Teplota řezání

Z hlediska intenzity opotřebování nástroje je nejvýznamnější teplota na styčných místech čela s třískou a na hřbetu nástroje. Stanovení tepelného pole na čele a hřbetu nástroje je velmi náročné, proto se spokojujeme s určením střední teploty. Tuto teplotu, která je nižší než maximální teplota v některých částech těchto stykových míst, nazýváme teplota řezání. (9)

Teplota řezání je závislá hlavně na kontaktu třísky a nástroje, na velikosti řezných sil a třecích procesech mezi materiálem obrobku a břitem nástroje. (9)

Střední teplota obrábění θ_m se dle (10) dá vyjádřit vztahem:

$$\theta_m = u \sqrt{\frac{v_c \cdot h_D}{\lambda \cdot C_p}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.4)$$

u – měrná energie řezání
 h_D – hloubka odebírané vrstvy
 λ – měrná tepelná vodivost
 C_p – měrné objemové teplo
 v_c – řezná rychlost

Lze ji dle (10) vyjádřit i ve tvaru:

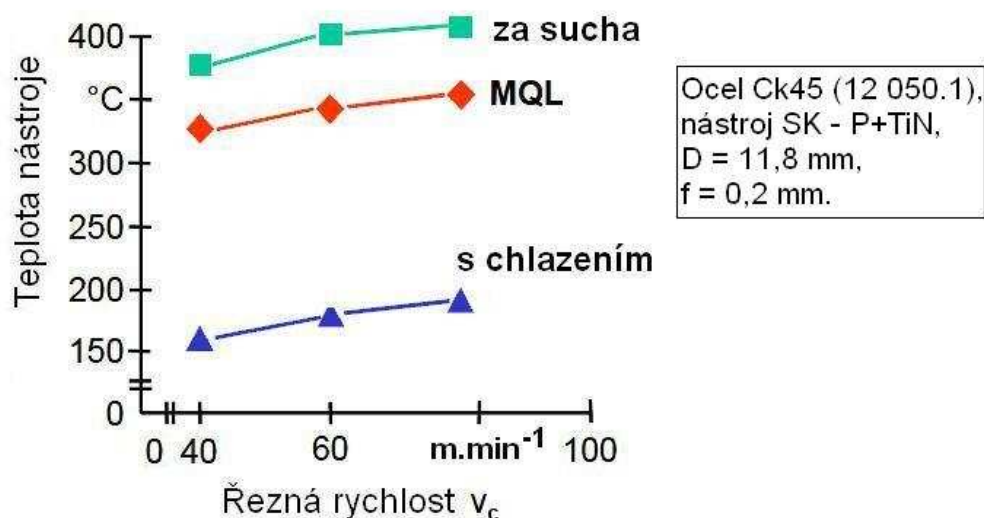
$$\theta_m = u \cdot \sqrt{v_c \cdot h_D^{0,6}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.5)$$

Případně regresní funkcí:

$$\theta_m = C_o \cdot v_c^{a_0} \cdot f^{b_{a_0}} \cdot a_p^{c_0} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.6)$$

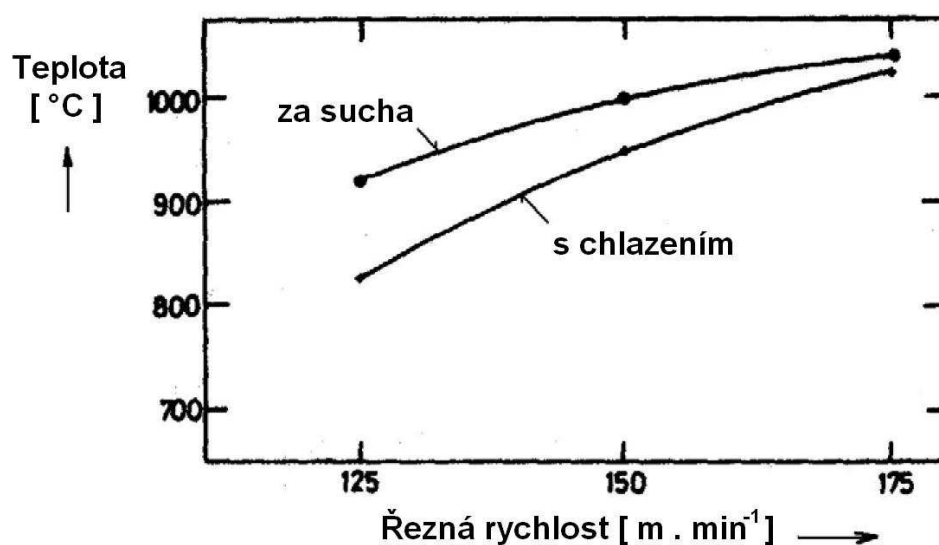
C_o – materiálová konstanta
 a_0, b_0, c_0 – exponenty vyjadřující vliv řezných podmínek na hodnotu střední teploty řezání.

Při obrábění za sucha se nepočítá s přívodem procesní kapaliny. Dochází k vyššímu tření a vyšší adhezi mezi nástrojem a třískou. Nástroj a obrobek jsou vystaveny vyššímu tepelnému zatížení. (6) Porovnání teplot nástroje při vrtání za sucha, s použitím technologie MQL a chlazení je na obr. 2.4.



Obr. 2.4 Teplota nástroje při vrtání s různými druhy chlazení (19)

Jiný příklad porovnání teplot řezání za sucha a s chlazením, tentokrát při vyšších řezných rychlostech je na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Porovnání teplot při obrábění za sucha a s chlazením (10)

Z obr. 2.5 je patrné, že při vyšších řezných rychlostech dochází k přibližování křivek teplot řezání a ukazuje se, že je možné provádět řezání za sucha za stejných podmínek jako s chlazením. (10)

Teplotu řezání nejvíce ovlivňuje řezná rychlost, následuje posuv a nejmenší vliv má hloubka řezu. (12) Teploty řezání se dle (9) mohou přibližovat až 1200 °C.

Vyšší teplota obrábění má vliv na tvoření třísky, na přesnost obrobku a na vlastnosti povrchové vrstvy obrobené plochy. Vyšší teplota také ovlivňuje

opotřebení nástroje. Při menších řezných rychlostech je opotřebení způsobeno abrazivním účinkem, při zvyšující se rychlosti dochází k uplatňování adhezního účinku opotřebení, který se od určité teploty stává rozhodující. Uplatňují se také účinky difúzní a chemické. (6)

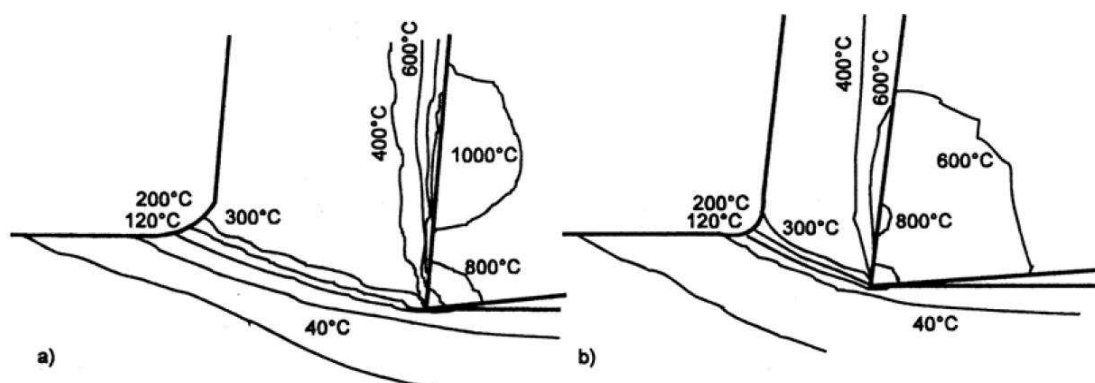
Je zřejmé, že teplota obrábění při obrábění za sucha je klíčovým problémem, protože je zpravidla dosahováno vyšších teplot než při použití procesních kapalin. Každý řezný materiál má své tepelné hodnoty, které nesmí být překročeny. Dle (34) jsou extrémně vysoké teploty zodpovědné za špatnou trvanlivost břitu a omezují používání vyšších řezných rychlostí.

Proto je nutné při obrábění za sucha v co největší míře minimalizovat množství vzniklého tepla a také tepla odváděného do obrobku. (6)

2.4 Průběh teplotních polí při obrábění za sucha

Rozložení teploty v oblasti, v níž probíhá proces odřezávání třísky, závisí na množství vyvinutého tepla a rychlosti jeho odvedení do obrobku, třísky, nástroje a prostředí. Rozložení teplot v jednotlivých bodech daného prostoru nazýváme teplotním polem. Je rozeznáváno teplotní pole třísky, teplotní pole nástroje a teplotní pole obrobku. (17)

Teplotní pole se zpravidla znázorňuje izotermickými plochami nebo křivkami. Teplo vzniklé při řezání se šíří z ohnisek svého vzniku do chladnějších oblastí nástroje a ohřívá je. (18) Příklad teplotního pole je uveden na obr. 2.6.



Obr. 2.6 Rozložení ustáleného teplotního pole v primární a sekundární zóně tvorby třísky (Tay et al, 1976 (10)). Automatová ocel, nástroj SK - P20, $\gamma_0 = 20^\circ$, $v_c = 155 \text{ m.min}^{-1}$, $f = 0,27 \text{ mm}$, $h_d = 0,1 \text{ mm}$, a) $\phi = 18,7^\circ$, b) $\phi = 23,7^\circ$

Na obr. 2.6 je viditelný vliv úhlu roviny maximálních smykových napětí ϕ , kdy se zvyšujícím se úhlem klesá teplota v místě řezu. Nastavení parametrů obrábění tak, aby byl úhel roviny maximálních smykových napětí ϕ co nejvyšší je jednou ze základních podmínek obrábění za sucha.

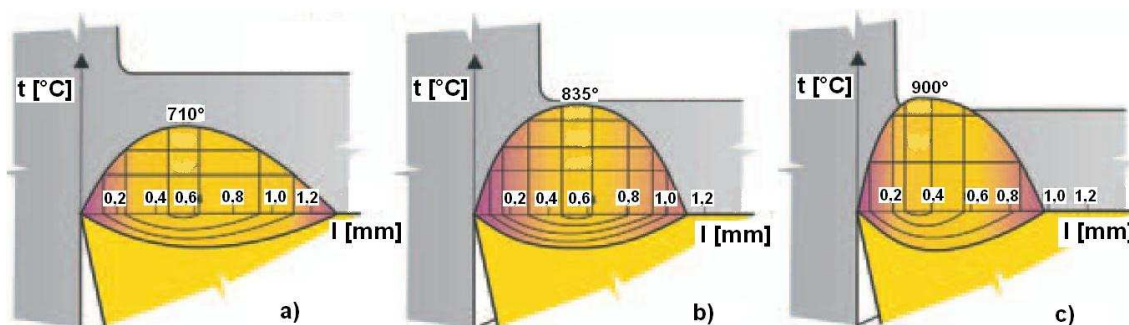
V počáteční fázi řezání je teplotní pole nestacionární, teprve až dojde k rovnováze mezi teplem vzniklým a teplem odvedeným (2 až 5 min) se teplotní pole ustálí. (17)

Teplota určitého bodu závisí:

- na fyzikálních vlastnostech materiálu obrobku a nástroje (především na součiniteli tepelné vodivosti řezného materiálu)
- na řezných podmínkách
- na způsobu práce (vrtání, soustružení, frézování)
- na řezném prostředí (18,16)

U ostrého nástroje je dle (16) maximální teplota na čele 1,2 až 1,5krát větší než na hřbetu.

Rozdělení teploty ve styčných plochách mezi třískou a nástrojem není rovnoměrné. Na čele teplota vzrůstá ve směru pohybu třísky a dosahuje maxima přibližně v polovině kontaktní plochy mezi třískou a nástrojem. (35) Na obr. 2.7 jsou uvedena tři teplotní pole vzniklá při obrábění ušlechtilé uhlíkové oceli při třech různých řezných rychlostech.

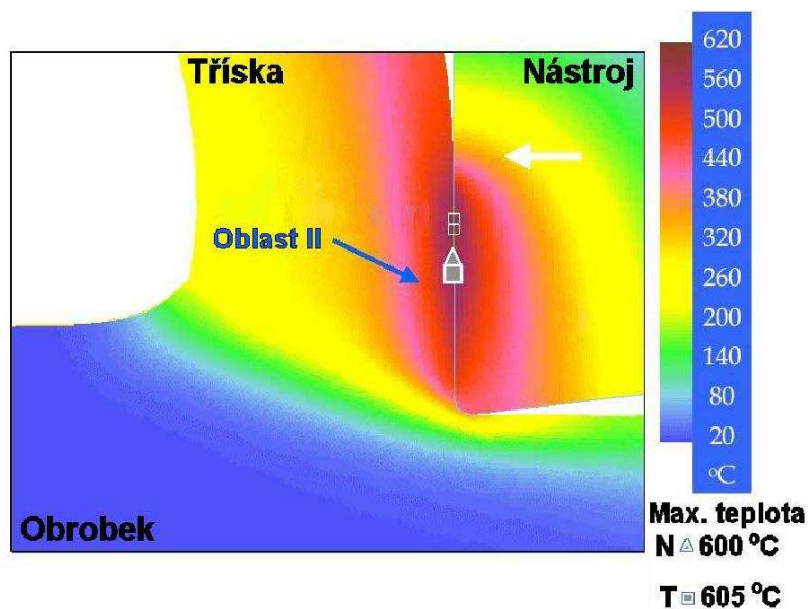


Obr. 2.7 Teplotního pole mezi třískou a čelem nástroje v závislosti na řezné rychlosti (35). Ušlechtilá uhlíková ocel, nástroj SK,
a) $v_c = 57 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ mm}$; b) $v_c = 115 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ mm}$;
c) $v_c = 207 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,2 \text{ mm}$

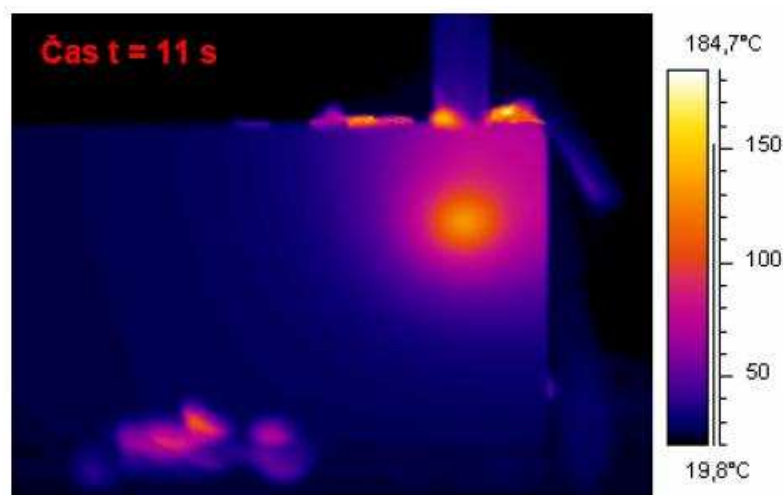
Z obr. 2.7 je patrné, že se zvyšující se řeznou rychlostí roste maximální teplota a posouvá se blíže k ostří. Dle (35) max. teplota odpovídá maximu hloubky výmolu na čele.

Posun je způsoben snížením součinitele tření, který má za následek zkrácení kontaktní plochy mezi třískou a nástrojem. S posunem teplotního pole dochází zároveň k posunu kontaktních napětí blíže k ostří, které způsobují difúzní otěr, plastickou deformaci břitu a splývání jemných zrn povlaků v důsledku velké energie na hranicích zrn. Toto i nadále zůstává problémem při výkonném obrábění za sucha. (29)

Identifikace teplotního pole dle (9) představuje složitý metrologický problém a vyžaduje složité měřicí systémy. Mezi základní způsoby měření patří měření pomocí termočlánků a měření pomocí termokamery. Ukázka teplotního pole změřeného pomocí termokamery je na obr. 2.8 a obr. 2.9.



Obr. 2.8 Teplotního pole při soustružení (9)



Obr. 2.9 Teplotního pole při vrtání za sucha (32)

3 VLIV OBRÁBĚNÍ ZA SUCHA NA TRVANLIVOST NÁSTROJŮ

3.1 Opotřebení a trvanlivost nástroje při obrábění za sucha

3.1.1 Trvanlivost nástroje

Trvanlivost nástroje je doba, po kterou je nástroj schopen efektivně plnit požadované funkce, které jsou identifikovatelné příslušnými parametry. Jedná se tedy o interval mezi nasazením nástroje do řezného procesu a vznikem poruchy. Porucha může být postupná, kdy dochází k postupné změně jednoho nebo více parametrů např. opotřebení nástroje na stanovené kritérium opotřebení nebo náhlá, např. vylomení břitu. (1)

Trvanlivost nástroje se popisuje Taylorovým vztahem:

$$T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m} \quad [\text{min}] \quad (3.1)$$

C_T – konstanta zahrnující materiál obrobku a nástroje. Nabývá hodnot 10^8 až 10^{12}

m – exponent, charakterizuje vlastnosti řezného nástroje

v_c – řezná rychlost

S rostoucí hodnotou exponentu m se snižuje trvanlivost nástroje. Na základě výzkumů se dle (21) exponent m mění s řeznou rychlostí, a to tak, že při nižších řezných rychlostech je ovlivňován povlakem nástroje (kdy je hodnota m menší než u substrátu), při vyšších řezných rychlostech substrátem. Při obrábění za sucha tento přechod nastává při nižší rychlosti, proto je trvanlivost nástroje při obrábění za sucha nižší.

3.1.2 Opotřebení břitu nástroje

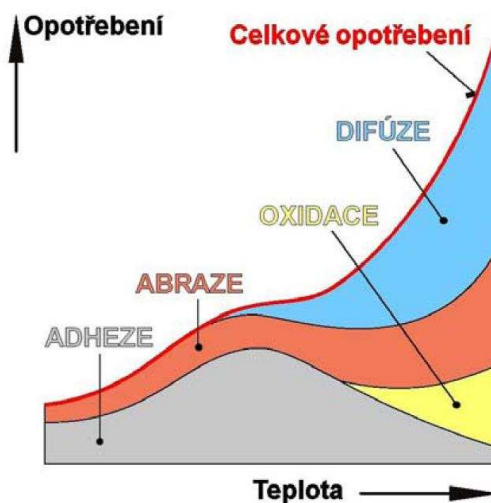
Všechny břity řezných nástrojů podléhají při obrábění určitému opotřebení, kterému jsou vystaveny až do okamžiku dosažení konce doby trvanlivosti(1).

Mezi základní druhy opotřebení patří zejména:

- **abraze** (brusný otěr vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročástic uvolňujících se z nástroje)
- **adheze** (vznik a následné porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích čela a třísky, v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých povrchů)
- **difúze** (migrace atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak a z ní vyplívající vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje)
- **oxidace** (vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí)
- **plastická deformace** (důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase)

- **křehký lom** (důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, např. přerušovaný řez, nehomogenity a vměstky v materiálu) (9)

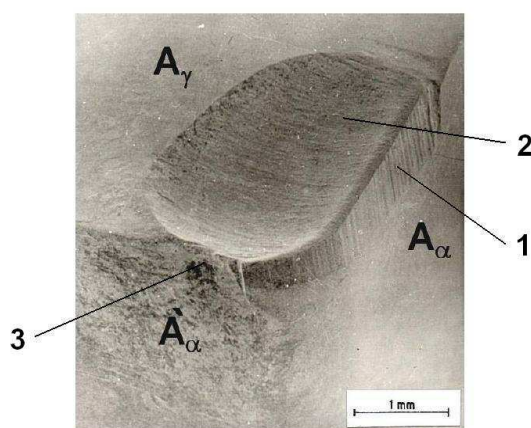
Na obr. 3.1 je znázorněn vliv vzrůstající teploty na jednotlivé mechanismy opotřebení. Je zřejmé, že při obrábění za sucha, kdy dochází k vyšším teplotám řezání dochází k uplatňování všech druhů opotřebení.



Obr. 3.1 Vliv teploty na jednotlivé mechanismy opotřebení (9)

3.1.3 Kritéria opotřebení

Při obrábění na čisto se jako kritérium opotřebování břitové destičky bere schopnost dosahovat požadované jakosti povrchu. U hrubovacích operací se nebere příliš velký ohled na stav povrchu obrobku a přesnost rozměrů a tolerují se proto podstatně větší hodnoty opotřebení. V technologické praxi se často trvanlivost vztahuje ke kritériu opotřebení břitu nástroje, z nichž se nejčastěji využívají VB – šířka fazetky opotřebení na hřbetě a KT – hloubka výmolu na čele (1), viz. obr. 3.2.

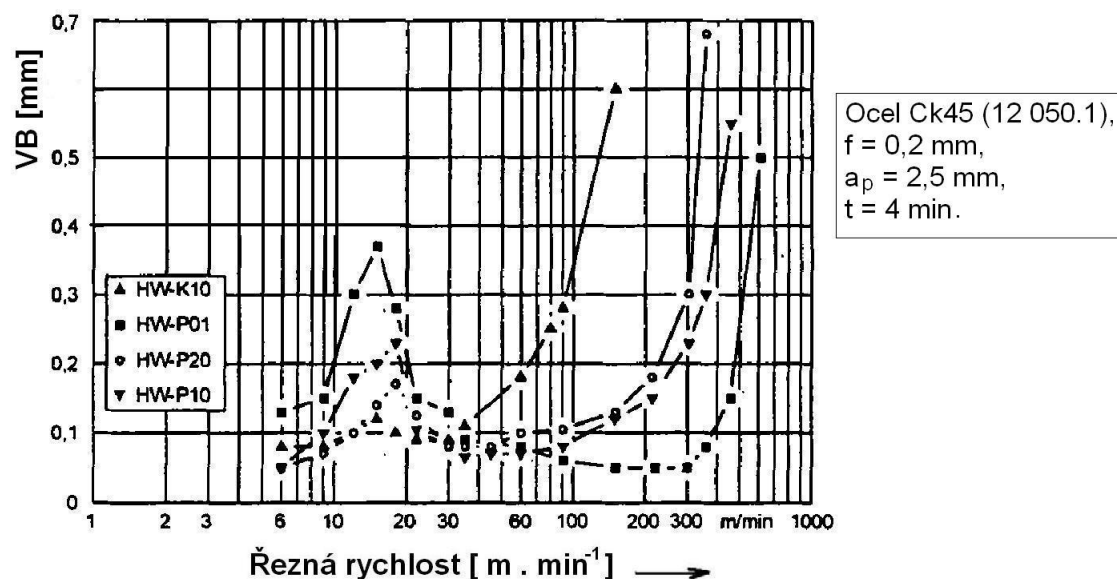


Obr. 3.2 Opotřebovaný břit nástroje (9)

- 1 – fazetka opotřebení na čele
- 2 – výmol na čele
- 3 – sekundární (oxidační rýha)

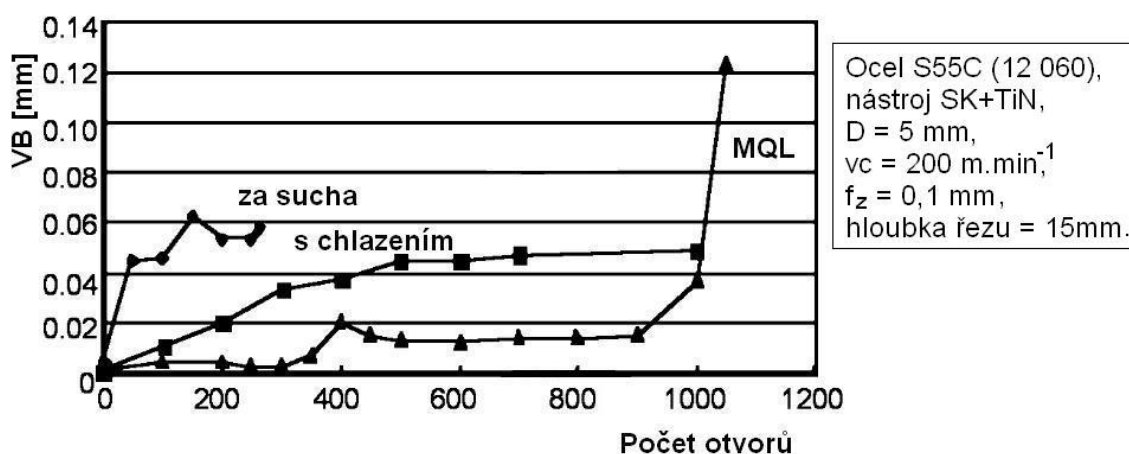
3.1.4 Opatření při obrábění za sucha

Opatření při obrábění za sucha se zabývala řada autorů článků publikovaných v Annals of the Cirp. Příklad opotřebení v závislosti na řezné rychlosti pro různé druhy slinutých karbidů je uvedeno na obr. 3.3.



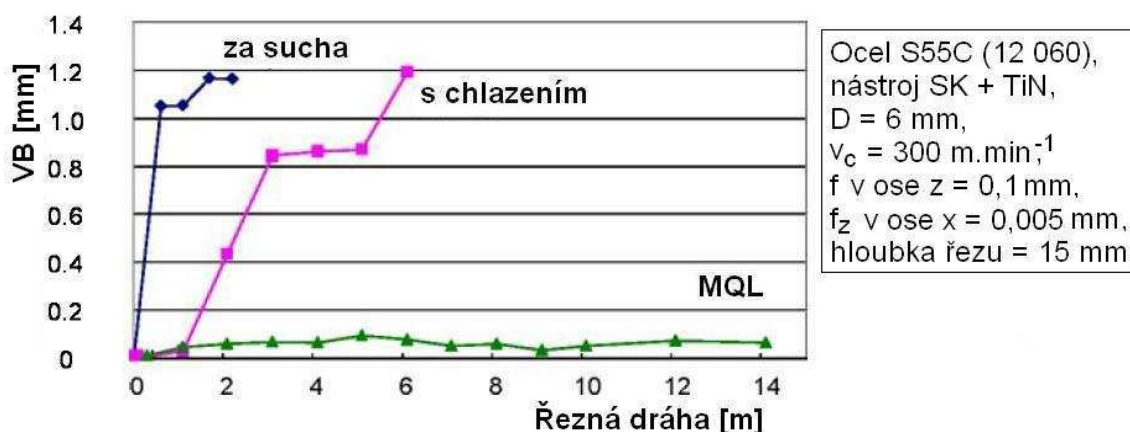
Obr. 3.3 Opatření v závislosti na řezné rychlosti pro různé druhy SK při obrábění za sucha (21)

Příklad velikosti opotřebení při vrtání v závislosti na počtu vyvrtaných otvorů v různém řezném prostředí je uvedeno na obr. 3.4



Obr. 3.4 Průběh opotřebení při vrtání v závislosti na počtu vyvrtaných otvorů (22)

Na obr. 3.5. je zobrazen průběh opotřebení při frézování drážky. Je možné si povšimnout vynikajících výsledků technologie MQL, které jsou v obou případech dosahovány



Obr. 3.5 Průběh opotřebení při frézování drážky (22)

Z uvedených příkladů vyplývá, že hodnota opotřebení při obrábění za sucha roste s teplotou, viz. obr. 3.1. Zároveň je opotřebení při obrábění za sucha nejvyšší v porovnání s chlazením i s technologií MQL.

Obrábění za sucha však může mít na trvanlivost nástroje dle (2) i kladné účinky oproti obrábění s procesními kapalinami. Příkladem je frézování, kdy vlivem přerušovaného řezu vzniká velmi intenzivní střídavé tepelné zatěžování břitu frézy. Použitím procesní kapaliny se toto zatížení ještě zesílí a může dojít nejprve k mikroskopickým, později makroskopickým zatížením končících lo-
mem. Z těchto důvodů se při frézování za sucha dosahují vyšší trvanlivosti břitu než při obrábění s procesními kapalinami. Výjimkou je pouze frézování hliníku, kdy dochází k vysoké adhezi materiálu obrobku na břit nástroje, a tím k výrazně nižší trvanlivosti břitu.

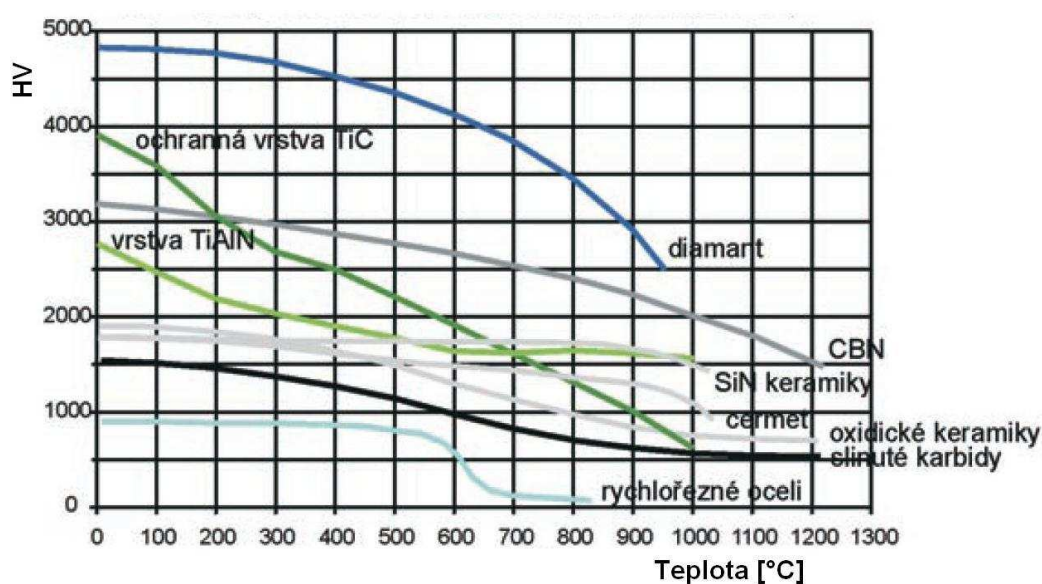
Způsob opotřebení při obrábění za sucha je závislý také na konkrétní kombinaci obráběného materiálu a způsobu obrábění. Při obrábění ocelí hraje prioritní úlohu vysoká teplota řezání, při obrábění šedé litiny a hliníku s vysokým obsahem hliníku je však hlavní abrazivní otěr břitu. U měkčích slitin hliníku způsobuje jejich vysoký sklon k adhezi nalepování třísek na břit i obrobek. (2)

Při soustružení a vrtání za sucha je nutné vždy počítat s nižší trvanlivostí břitu než při obrábění s procesními kapalinami. Cestou jak čelit zvýšeným nárokům na opotřebení je nasazování moderních nástrojů, o kterých bude pojednáno v dalších kapitolách.

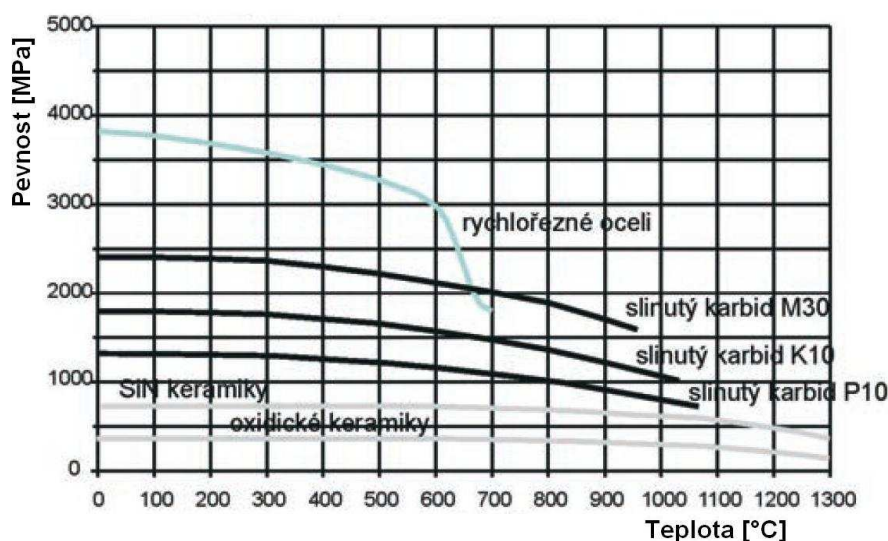
3.2 Vliv teploty řezání při obrábění za sucha na trvanlivost nástrojů

Teplota řezání je při obrábění za sucha vyšší než při obrábění s procesními kapalinami. Je to způsobeno jednak sníženým odvodem vzniklého tepla a díky nárůstu množství tepla ze tření. Schopnost rezného materiálu zachovat si tvrdost a ořezuvzdornost při vyšších teplotách řezání má rozhodující význam při nasazování technologie obrábění za sucha. (20) Teplota řezání výrazně ovlivňuje životnost nástroje.

Závislost tvrdosti a ohybové pevnosti rezných materiálů na teplotě je zobrazeno na obr. 3.6. a obr. 3.7.



Obr. 3.6 Závislost tvrdosti rezných nástrojů na teplotě (20)



Obr. 3.7 Závislost ohybové pevnosti nástrojů na teplotě (20)

U rychlořezné oceli tvrdost za tepla rychle klesá nad teplotou 500 °C. Pro obrábění za sucha ji proto lze použít jen ve výjimečných případech, kdy je od bříty vyžadována vysoká houževnatost a pevnost ohybu. Odolnost rychlořezné oceli proti teplotě a otěru lze do určité míry zvýšit nanesením povlaku. (20)

Vyšší tvrdost za tepla než rychlořezné oceli mají slinuté karbidy (teplotní odolnost 900 °C), cermety, řezná keramika, kubický nitrid bóru, polykrystalický diamant a řada ochranných vrstev. Tyto řezné materiály lze již použít pro obrábění za sucha některých materiálů obrobku. (20)

Z obr. 3.6 je možné si povšimnout, že cermety a řezná keramika SiN mají přibližně stejnou tvrdost, ovšem řezná keramika si ji udržuje i při vysokých teplotách. Oba materiály jsou ale méně houževnaté než slinuté karbidy, viz. obr. 3.7, proto je ostří velmi citlivé na vydrolování a vyštipování. (20)

Velmi tvrdé materiály jako polykrystalické diamanty a kubické nitridy bóru vykazují nejlepší jakosti obrobeného povrchu. Zároveň mají vysokou životnost díky vysoké tvrdosti a teplotní odolnosti.

3.3 Vliv povlakování nástrojů při obrábění za sucha na trvanlivost nástrojů

Mezi základní fyzikální vlastnosti povlaků patří tvrdost, tloušťka, drsnost, adheze a kluzné vlastnosti. Nejdůležitějšími chemickými vlastnostmi jsou odolnost vůči oxidaci, chemická a tepelná stabilita. (28)

3.3.1 Koeficient tření

Významnou úlohu při obrábění sehrává tření mezi třískou a nástrojem. Při obrábění za sucha, kdy chybí mazací účinek procesní kapaliny, je vliv koeficientu tření zvláště významný. Při snižování tření na čele nástroje roste odpovídajícím způsobem úhel roviny max. smykových napětí a také se zmenšuje tloušťka třísky. Celý proces energeticky výhodnější a namáhání nástroje nižší.

Snížit tření mezi nástrojem a obrobkem je možné dosáhnout vhodným výběrem nástrojového materiálu, především vhodným typem tvrdé otěruvzdorné a teplotně odolné vrstvy. Tyto vrstvy jednak snižují tření mezi břitem a obrobkem, ale také mění tepelný režim v oblasti vzniku třísky a bříty. Svými izolačními účinky snižují tepelné zatížení substrátu bříty a zároveň zvyšují podíl tepla odváděného třískou. (20)

Koeficienty tření pro vybrané typy povlaků jsou uvedeny v tab. 3.1. Nejlepších hodnot dosahují povlaky DLC, dobré kluzné vlastnosti vykazují také povlaky na bázi Al.

Tab. 3.1 Koeficienty tření vybraných typů povlaků. (28)

Povlak	Koeficient tření [μ] (proti oceli za sucha)
TiN	0,4
CrN	0,5
TiCN	0,4
TiAlN	0,4
TiAlSiN	0,32
DLC	0,1

3.3.2 Tvrdost

Z pohledu obrábění za sucha je velice důležitá tvrdost povlaku z důvodu odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení. Tvrdost vybraných typů povlaků je uvedena v tab. 3.2.

Tab. 3.2 Tvrdost vybraných typů povlaků. (28)

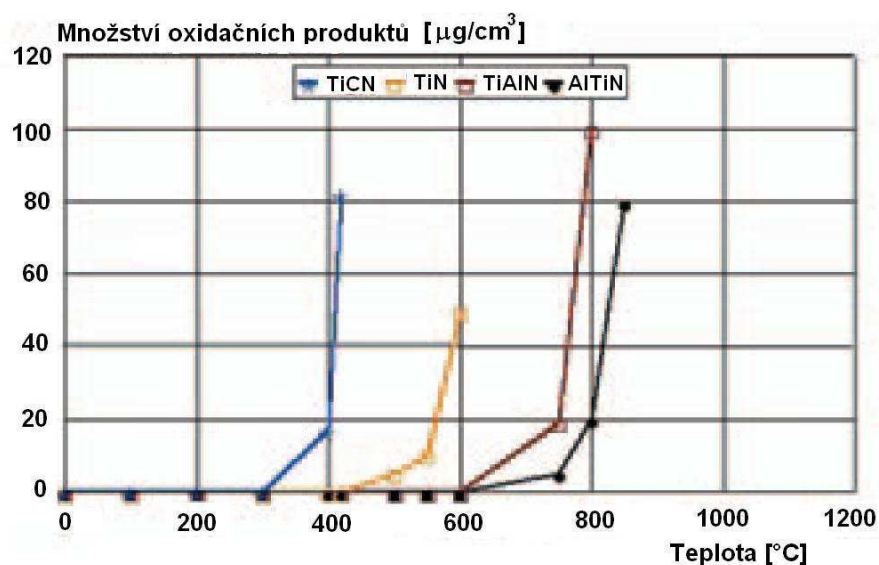
Povlak	Tvrdost [GPa]
CrN	17
TiN	23
TiCN	30
TiAlN	33
TiAlSiN	45
DLC	60

S rostoucí tvrdostí roste odolnost vůči abrazivnímu opotřebení. Z tabulky 3.2 je zřejmé, že velice dobrých výsledků dosahují povlaky na bázi Al, tedy TiAlN a TiAlSiN a povlaky DLC.

3.3.3 Odolnost vůči oxidaci

Každý povlak je charakterizován maximální teplotou použití, jejíž mez je dána odolností vůči oxidaci. Při povrchové oxidaci dochází k pasivaci povrchu, čímž se může vyvolávat bariéra proti další oxidaci. Při hloubkové oxidaci dochází však již k destrukci povrchové vrstvy. (28)

Závislost oxidační odolnosti vybraných povlaků na teplotě je na obr. 3.8.



Obr. 3.8 Závislost oxidační odolnosti vybraných povlaků na teplotě (28)

Je možné si povšimnout, že nejlepších výsledků vykazují povlaky (TiAl)N a především (AlTi)N. Oba tyto povlaky, které se v současné době stávají dominantní na slinutých karbidech, lze pro obrábění za sucha doporučit. Velmi dobrých parametrů dle (29) také dosahují povlaky z nanokrystalických kompozitních materiálů na bázi (TiAlSi)N pro substráty z jemnozrnného slinutého karbidu. Křemík přidávaný do těchto vrstev zvyšuje jejich otěruvzdornost.

3.3.4 Chemická a tepelná stabilita

Chemická stabilita popisuje odolnost vrstvy vůči chemické reakci s obráběným materiálem, zejména za vyšších teplot vznikajících při obrábění. Chemická stabilita se může měnit s typem obráběného materiálu a s řeznými podmínkami. Klasickým příkladem je diamantová vrstva, jejíž chemická stabilita je naprosto nevyhovující při opracování ocelí a vynikající při obrábění neželezných kovů. (18)

Tepelná stabilita popisuje odolnost proti změně vnitřní struktury při zvýšení teploty vlivem obrábění, kdy může docházet např. k nárůstu krystalů, k přechodu k jinému krystalickému uspořádání, změně vnitřního napětí apod. (18)

Díky vyšší teplotě v zóně řezání při obrábění za sucha je chemická a tepelná stabilita povlaku velice důležitá.

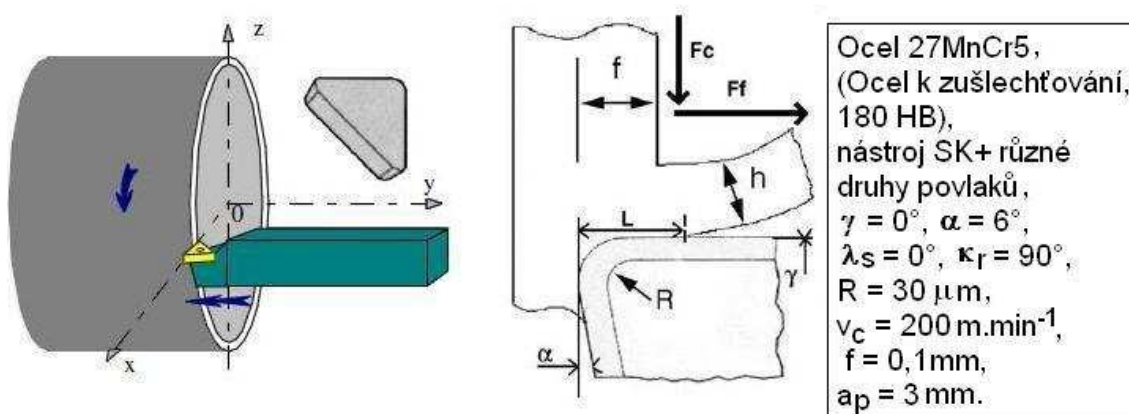
Porovnání vlastností vybraných povlaků je uvedeno v tab. 3.3

Tab. 3.3 Porovnání vybraných vlastností povlaků (9)

	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla
Nejlepší  Nejhorší	Al_2O_3	Al_2O_3	TiC	Al_2O_3
	(TiAl)N	(TiAl)N	(TiC)N	(TiAl)N
	TiN	TiN	Al_2O_3	TiN
	(TiC)N	(TiC)N	TiAlN	(TiC)N
	TiC	TiC	TiN	TiC

3.3.5 Studie vlivu povlakování na obrábění za sucha

Vlivem povlakování na tření mezi nástrojem a obrobkem se zabýval např. J. Retch v (23). Experimentálně soustružením trubky o tloušťce 3 mm za sucha, viz. obr. 3.9 zjišťoval vliv různých druhů povlaků na velikost řezných sil, kontaktní délce tříska – nástroj a tloušťce sekundární plastické deformace. K měření byly použity dynamometry, elektronický mikroskop a infračervená kamera.



Obr. 3.9 Princip experimentálního stanovení vlivu povlakování na vybrané technologické parametry (23)

Pro každý typ povlaku byla zkouška opakována 5x, přičemž hodnoty se od sebe nelišily více než 5%. Získaná data jsou uvedena v tab. 3.4.

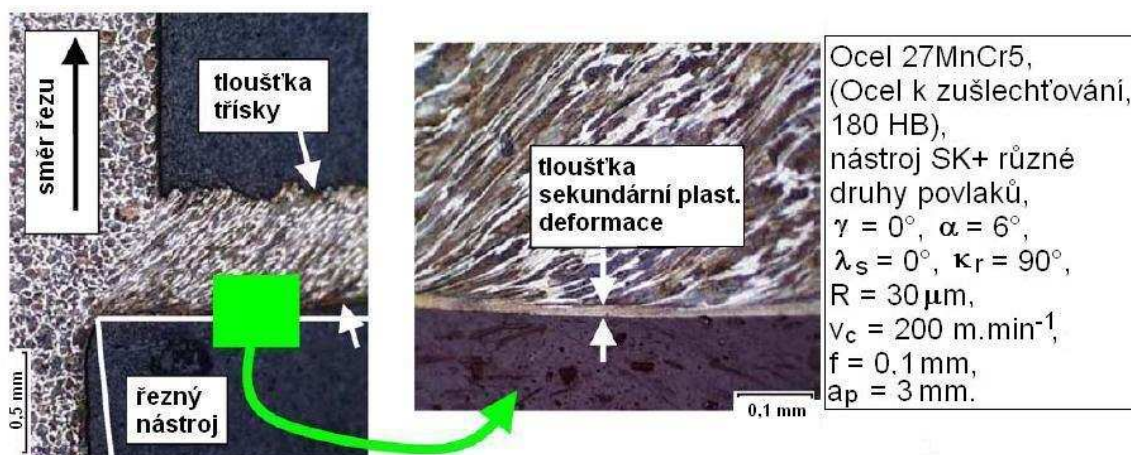
Tab. 3.4 Experimentálně získaná data pro různé druhy povlaků při ortogonálním řezání (23)

	Nepovlakovaný	TiN	(TiAl)N	(Ti,Al)N + MoS ₂
Kontaktní délka třísky - nástroj L[mm]	0,69	0.53	0.53	0,46
Posuvová síla F _f [N]	515	485	490	480
Řezná síla F _c [N]	630	610	615	612
Koeficient tření $\mu = F_f / F_c$	0,82	0,8	0,8	0,78

Z tab. 3.4 vyplývá, že při použití povlakovaných nástrojů dochází k poklesu řezné síly F_c a především posuvové síly F_f . Současně také dochází k poklesu koeficientu tření. Nejlepších hodnot dosáhl povlak (Ti,Al)Ni+MoS₂ (sulfid molybdenu). Dle (23) je to dáno jeho lamelární strukturou a nízkou afinitou povlaku s ocelí.

Povlakování nástrojů také zmenšuje kontaktní délku mezi třískou a nástrojem, což má příznivý vliv na trvanlivost nástroje.

Retch (23) se dále zabýval vlivem povlakování na tloušťku třísky a tloušťku sekundární plastické deformace, viz. obr. 3.10.



Obr. 3.10 Tloušťka třísky a tloušťka sekundární plastické deformace (23)

Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.5. Vyplývá z nich, že nejmenší tloušťky třísek a zároveň nejmenší tloušťky sekundární plastické deformace jsou dosahovány vrstvami TiN a (Ti,Al)Ni+MoS₂.

Tab. 3.5 Experimentálně zjištěné hodnoty tloušťky třísky a tloušťky sekundární plastické deformace pro různé druhy povlaků při ortogonálním řezání (23)

	Nepovlakovaný	TiN	(TiAl)N	(Ti,Al)N + MoS ₂
Průměrná tloušťka sekundární plast. deformace [μm]	12±1	6±1	10±1	7±1
Průměrná tloušťka třísky [mm]	0,25±0,05	0,19±0,05	0,26±0,05	0,21±0,05

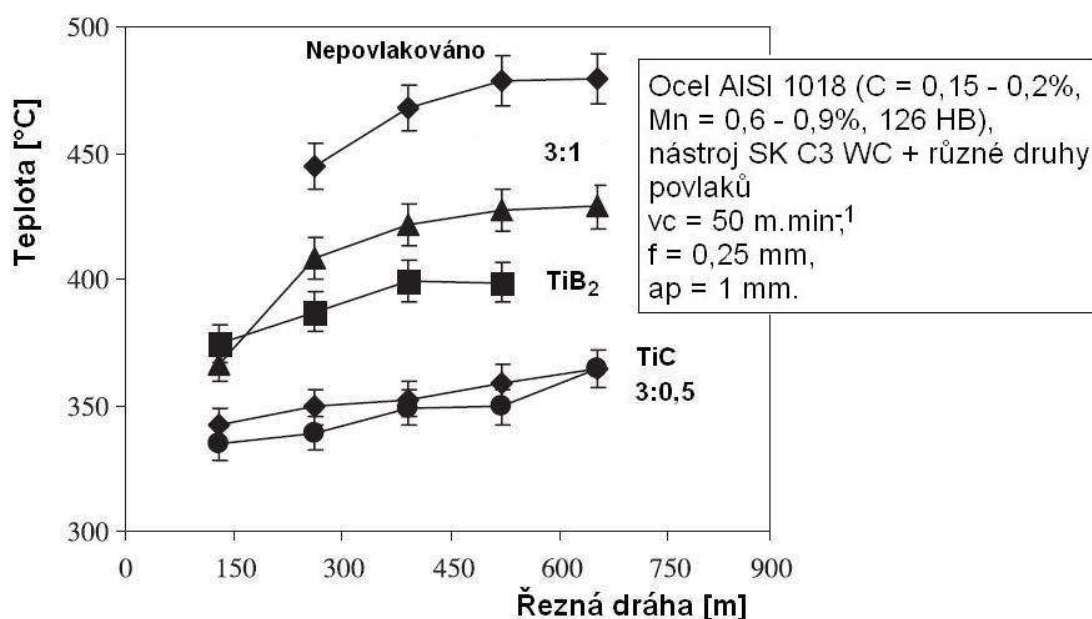
V tab. 3.6 jsou uvedeny naměřené teploty na hřbetě a čele nástroje. Je možné si povšimnout, že tyto teploty jsou sice u povlakovaných nástrojů nižší, ale tento pokles není nijak výrazný, u vrstvy (TiAl)N je teplota na čele nástroje dokonce vyšší než u nástroje nepovlakovaného.

Tab. 3.6 Experimentálně zjištěné hodnoty teploty na čele a hřbetě nástroje pro různé druhy povlaků při ortogonálním řezání (23)

	Nepovlakovaný	TiN	(TiAl)N	(Ti,Al)N + MoS ₂
Max. teplota na čele nástroje [°C]	618-631	602-618	631-643	602-618
Max. teplota na hřbetě nástroje [°C]	643-653	602-618	631-643	602-618

Z uvedených experimentů je dle (23) zřejmé, že povlakování nástrojů má při obrábění za sucha vliv především na tribologické parametry. Snižuje se koeficient tření, délka kontaktu mezi třískou a nástrojem, tloušťka třísky a sekundární plastická deformace. Nejlepších hodnot přitom dosahují povlaky TiN a (Ti,Al)N + MoS₂. Potvrzuje se i snížení teplot na nástroji, i když toto snížení není nijak výrazné.

Zajímavým porovnáním je experiment autorů (24), kteří zkoumali vliv jiných druhů povlaků na nástroji ze slinutého karbidu. Pro zkoušky vybrali povlaky monolitní TiC, TiB₂ a multivrstvé 3:0,5 (tloušťka 3 nm TiB₂ a 0,5 nm TiC) a 3:1 (tloušťka 3nm TiB₂ a 0,5 nm TiC). U tohoto testu je již možné si povšimnout vyššího vlivu povlakování na teplotu mezi třískou a nástrojem, viz obr. 3.11.



Obr. 3.11 Teplota mezi třískou a nástrojem pro vybrané druhy povlaků na SK při soustružení oceli AISI 1018 (24)

Max. teplota dle (24) byla u nepovlakovaného nástroje 475 °C, nejnižší u monolitního TiC a multivrstvého 3:0,5 350 °C.

Z obou uvedených příkladů je zřejmé, že povlakování má na trvanlivost nástrojů při obrábění za sucha značný vliv. Příznivých účinků dosahuje především díky své odolnosti proti abrazivnímu opotřebení a odolnosti proti kontaktním tlakům (24), případně i snížením teploty mezi nástrojem a třískou. Významná je i odolnost povlaku vůči oxidaci.

Povlakování dle (2) také nahrazuje chybějící antiadhézní a antidifúzní ochranné účinky procesních kapalin adhezně a difúzně vhodnějšími ochrannými vrstvami nástrojů.

Při výběru vhodného nástroje pro obrábění za sucha je proto nutné přednostně volit nástroje povlakované, přičemž důležitá je i správná volba druhu povlaku.

3.4 Vliv geometrie nástroje při obrábění za sucha na trvanlivost nástrojů

Klíčovým problémem při obrábění za sucha je minimalizování množství tepla vzniklého v oblasti řezání. Výše teploty je limitní jednak pro použití jednotlivých nástrojových materiálů, ale má také značný vliv u dokončovacích operací, kdy musíme zabránit deformacím obrobku tak, aby se docílily úzké tolerance rozměrů a tvaru. (2)

Na základě poznatků z teorie obrábění je možné říci, že celkové množství tepla a tím i teplota řezání se sníží zmenšením množství měrné energie vynaložené na řezný proces.

Z první kapitoly a ze vztahu 1.7 je známo, že proces je energeticky nejvýhodnější, je-li úhel roviny max. smykových napětí co nejvyšší. Na jejím zvýšení má z pohledu nástroje vliv úhel čela a třecí úhel, který zahrnuje tření mezi nástrojem a třískou. Je tedy zřejmé, že při používání nástrojů s kladnými hodnotami úhlu čela roste úhel roviny max. smykových napětí a tím se zlepšují parametry procesu. Z uvedených důvodů je nutné při obrábění za sucha používat nástroje s pozitivní geometrií.

Snížením úhlu čela se dle (2) sice zhorší schopnost břítu teplo odvádět, ovšem zároveň se snižuje i objem a intenzita plastických deformací doprovázejících vznik třísky a tím i významný zdroj tepla. Mimo to se snižuje intenzita tření mezi třískou a čelem břítu a tím množství tepla vzniklého ze tření.

Používáním nástrojů s kladnými geometriemi se tedy sníží jejich tepelné namáhání, které se příznivě projeví na jejich trvanlivosti.

4 EKONOMICKÉ A EKOLOGICKÉ ASPEKTY OBRÁBĚNÍ ZA SUCHA

Při obrábění kovů v průmyslu se stále ve velké míře uplatňují procesní kapaliny. Jejich používání má příznivý vliv na trvanlivost břitu, kvalitu a přesnost obrobeného povrchu, lámání a odstraňování třísek apod. (2)

Základní funkce procesních procesní kapalin:

- **chladicí efekt** (odvod tepla z místa řezu, stabilizace nízkých teplot řezání),
- **mazací účinek** (eliminace suchého tření, třecí poměry na rozhraní nástroj – obráběný materiál – tříska, velikost stykových ploch),
- **řezný účinek** (vnikání řezné kapaliny do mikrotrhlin v povrchu obráběného materiálu a svým účinkem přispívá k snadnějšímu oddělování třísky),
- **protinárůstkový vliv**,
- **čistící účinek** (odstraňování třísek z místa řezu),
- **ochranný vliv** (obrobku i stroje před korozí),
- **snížení vibrací stroje**.

Z hlediska těchto funkcí lze procesní kapaliny rozdělit: (31)

- kapaliny s výrazným mazacím účinkem pro nízké řezné rychlosti (**minerální a řezné oleje**),
- kapaliny s dobrým mazacím i chladícím účinkem pro střední řezné rychlosti (**obráběcí emulze**),
- kapaliny s převažujícím chladícím účinkem pro vysoké řezné rychlosti, např. broušení (**vodné roztoky chemických látek**). (25, 8)

Dle (31) v současné době výrazně převažuje (nad 75%) použití chladících kapalin mísitelných s vodou, řezné oleje se podílejí na celkové spotřebě více jak 20% a ostatní objem max. 3% tvoří aplikace MQL

4.1 Ekonomické aspekty obrábění za sucha

Informace o spotřebě procesních kapalin v ČR není dle (6) známa. V odborném časopisu Annals of the Cirp však byla publikována studie používání procesních kapalin za současných ekonomických a ekologických podmínek na příkladu obraběčsky vyspělé země jako je Německo.

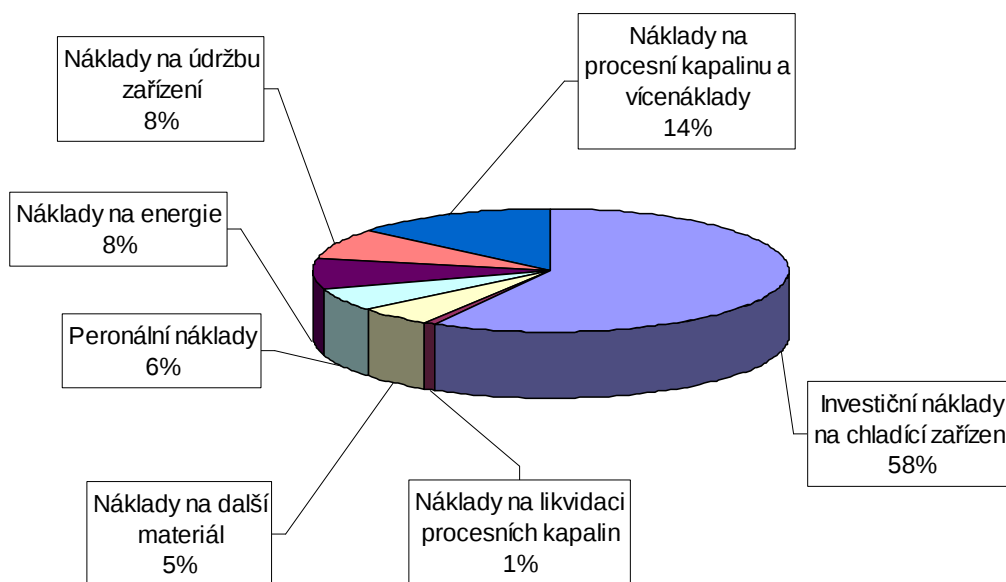
Studie vypracovaná v r. 1994 udává, že se v Německu ročně spotřebovávají řádově desítky tisíc tun procesních kapalin a koncentrátů. Z koncentrátů se navíc připravují další stovky tisíc tun procesních emulzí. (2)

Analýzy studie rovněž ukazují, že jen málo firem si vede přesné záznamy o nákladech spojených s používáním procesních médií. (2)

Mezi náklady spojené s používáním procesních médií lze zařadit:

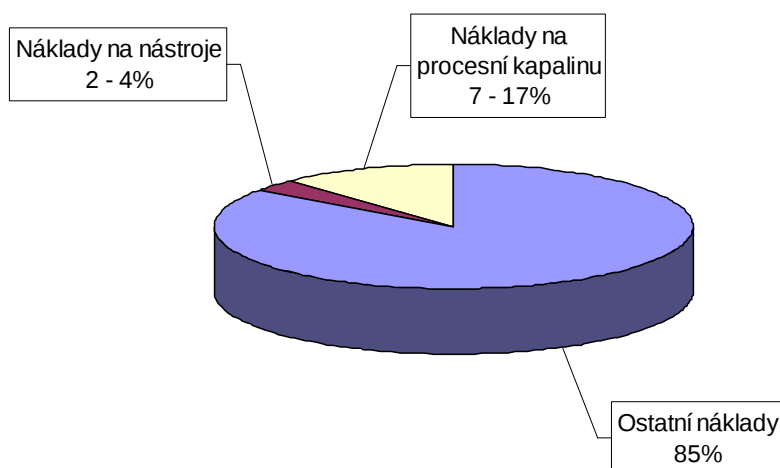
- investice do technologického vybavení,
- náklady na pořízení a likvidaci kapalin,
- náklady na odpisy a údržbu zařízení,
- náklady na energie,
- náklady na dopravu,
- náklady na personální výdaje,
- náklady na zdravotní výdaje,
- náklady na ekologické havárie. (2)

Složení nákladů spojených s používáním procesních kapalin je zobrazeno na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Složení nákladů spojených s používáním procesních kapalin (21)

Studie dle (21) dále udává, že náklady na aplikaci procesních kapalin se na transferových obráběcích linkách pohybují mezi 7 až 17% výrobních nákladů na jeden obrobek, viz obr.4.2. V běžných provozech však obvykle nepřesahují 5%. V porovnání s náklady na řezné nástroje, které jsou v rozmezí 2 až 4%, je tato hodnota poměrně vysoká. Je nutné si ale uvědomit, že přestože jsou náklady na nástroje relativně nízké, tak správná volba nástroje podstatně ovlivňuje ostatní složky nákladů a celý obráběcí proces.



Obr. 4.2 Poměrné rozdělení nákladů na obrobek (21)

4.2 Ekologické a zdravotní problémy při používání procesních kapalin

V obrábění z pohledu ekologie představuje existence a kvalita řezného prostředí klíčový problém. (25) Nasazení, využívání a likvidace procesních kapalin provází celá řada problémů. Především se dostávají do styku s obsluhou a unikají do okolí. (31)

Negativa používání procesních kapalin z hlediska ekologického a zdravotního:

- znečišťování pracovního prostředí,
- množení bakterií a nepříjemný zápach,
- nebezpečí alergií personálu a onemocnění pokožky,
- absence takto postiženého personálu,
- zvyšují náklady v případě ekologických havárií,
- zvyšují náklady v případě zdravotních odškodnění. (2, 3, 26)

Z ekologických a zdravotních důvodů jsou proto v současné době stále rozšiřovány zákonné předpisy o manipulaci s chemickými látkami (2), které požadují nákladná opatření k eliminaci znečišťování, skladování a likvidaci upotřebených procesních kapalin.

Z uvedených skutečností je zřejmé, že používání procesních kapalin při obrábění se stává nákladnou záležitostí, ke které se navíc přidávají problémy ekologické a zdravotní. Obrábění za sucha (příp. omezování množství procesních kapalin) je tak logickým trendem, kde výše uvedené problémy odpadají.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - VLIV JEDNOTLIVÝCH TYPŮ POVLAKŮ NÁSTROJŮ NA VELIKOST TEPLOTNÍCH POLÍ OBROBKU

Vrtání za sucha je vždy problémové a v některých případech nelze vůbec realizovat. Problémy dle (20) způsobuje jednak odvádění třísky z vrtaného otvoru, ale také zvýšené tepelné zatížení vrtáku. Prodloužit životnost nástroje lze povlakováním, které navíc díky nižší tepelné vodivosti povlaků způsobuje, že množství odváděného tepla nástrojem z místa řezu je menší a více tepla je odváděno třískou a obrobkem.

Cílem experimentu, který provedli Polzer a Píška (15) vrtáním za sucha a s použitím procesní kapaliny bylo blížeji osvětlit problematiku zvýšení teploty obrobku použitím PVD povlakových nástrojů.

Data získaná z měření jsou v následující části zpracována a vyhodnocena.

5.1.1 Charakteristika experimentu

Experiment byl proveden v technický laboratořích VUT v Brně za následujících parametrů. (15)

Nástroje:

- šroubovitý vrták $\phi 6\text{mm}$, HSS Co5, DIN 338 R-N, fy GÜHRING Německo,
 - nepovlakovaný,
 - povlakovaný TiN,
 - povlakovaný (TiAl)N,
 - povlakovaný (TiC)N,

Řezné podmínky:

- řezná rychlost $v_c = 18,85 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,
- otáčky $n = 1000 \text{ min}^{-1}$,
- posuv $f = 0,122 \text{ mm}$,
- 5% emulze, $5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ a obrábění za sucha

Obráběcí stroj:

- soustruh SV18R.

Vzorky:

- konstrukční uhlíková ocel ČSN 42 11600.0, viz tab. 5.1,
- válcový polotovár $\phi 10 \text{ mm}$, $L = 60 \text{ mm}$, zarovnané čelo a navrtaný středící důlek,
- válcový povrch opatřen nástřikem speciální barvy s emisivitou $\varepsilon = 0.96$.

Tab.5.1 Materiál obrobku

Ocel	Chemické složení			
	C [%]	S [%]	P [%]	Fe [%]
ČSN 42 11600.0	0.500	0.050	0.055	rest
Mez pevnosti $R_m = \min. 600 \text{ MPa}$.				

Podmínky experimentu:

- emisivita 0.96 [-],
- teplota okolí 21 °C.

Měřidlo:

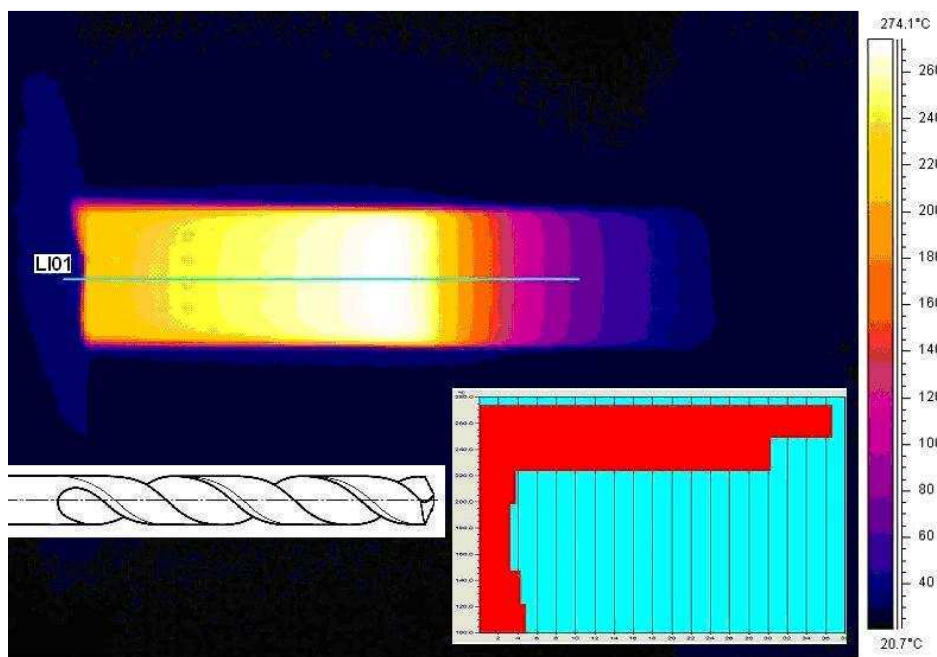
- termovizní kamera Flir SC2000,
- použita předsádková čočka,
- frekvence snímání 2 Hz.



Obr. 5.1 Termovizní kamera Flir SC200 (32)

5.1.2 Realizace experimentu

Vzorky byly vrtány do hloubky 35 mm. Během experimentu bylo bezdotykově termovizní kamerou snímáno teplotní pole obrobku. Měřením byly získány snímky, které byly následně zpracovány v software. Ukázka typického změřeného diagramu teplotního pole je na obr. 5.2.



Obr. 5.2 Typický diagram teplotních polí s histogramem teplot a směrem vrtání (15)

Vodorovná čára LI01 na obr. 5.2 procházející osou obrobku je měřící úsečka, která se přidává do diagramu ve vyhodnocovacím software. V celé její délce se odečtou teploty jednotlivých bodů. Výsledkem je tabulka hodnot, kde jsou uvedeny teploty jednotlivých bodů v závislosti na čase. Čas odečítání byl v tomto experimentu 2 s a zahrnuje jak samotné vrtání, tak i návrat vrtáku do výchozí polohy, celkem 20 s.

Podmínkou při vyhodnocování jednotlivých vzorků je, aby měřící úsečka byla definována u všech vzorků stejně. V levé části začíná na čele obrobku, v pravé části končí v hloubce vrtaného otvoru, v tomto případě 35 mm. Světle modrá oblast v levé části, ve které začíná úsečka je clona, která zabraňuje rozstříku procesní kapaliny na povrch obrobku. Samotné vyhodnocované teplotní pole tedy nezačíná přesně na čele obrobku, ale pro samotný experiment je použití clony nezbytné a posun o několik desetin mm nemá na průběh teplotního pole prakticky žádný vliv.

5.1.3 Data získaná experimentem

Vrtáno bylo celkem 16 vzorků. Ke všem vzorkům jsou známy maximální teploty vrtání. Přehled jednotlivých vzorků, použitých nástrojů, prostředí a naměřených max. teplot je zobrazeno v tab. 5.2.

Tab.5.2 Přehled jednotlivých vzorků

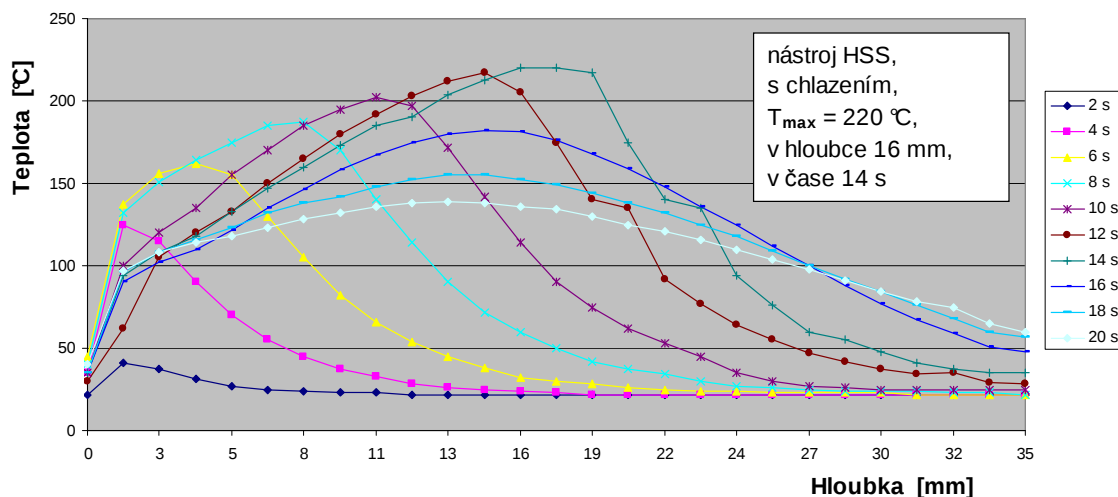
Vzorek č.	Nástroj	Max. teplota obrobku [°C]	Řezné prostředí	Chlazení
1	HSS	220	s chlazením	
2		224		
3		233		
4	HSS + TiN	217		
5		216		
6		235		
7	HSS + (TiAl)N	173		
8		166		
9		184		
10	HSS + (TiC)N	208		
11		255 (ucp.)		
12		209		
13	HSS	274	za sucha	
14	HSS + TiN	273		
15	HSS + (TiAl)N	200		
16	HSS + (TiC)N	260 (288 ucp.)		

Kompletní průběh teplot v závislosti na hloubce vrtání a času měření je však znám pouze pro vzorky zvýrazněné v tab. 5.2. Detailně vyhodnotit lze proto jen tyto vzorky.

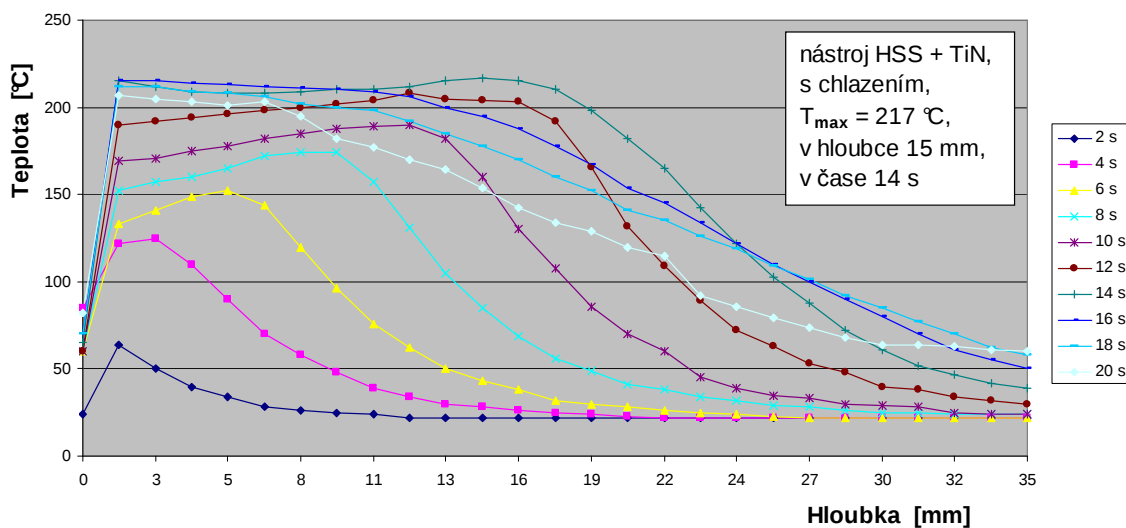
5.1.4 Vyhodnocení experimentu – obrábění s chlazením

Data kompletních průběhů teplot získaná měřením byla zpracována do grafů. V nich jsou vyneseny jednotlivé teplotní křivky pro časové řady v závislosti na hloubce vrtání.

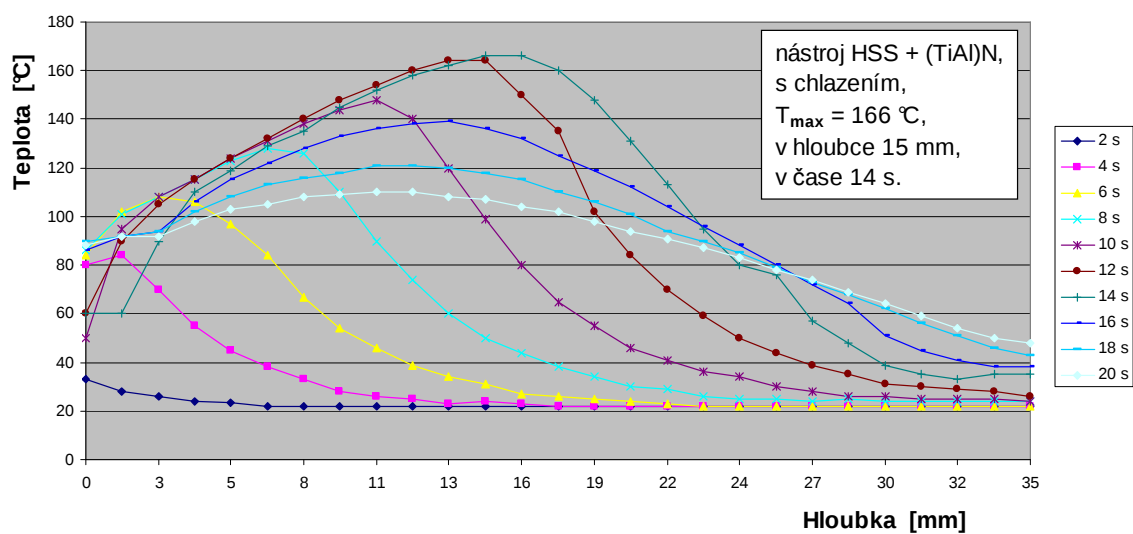
Pro obrábění s chlazením jsou k dispozici 4 kompletní průběhy teplot, pro každý typ nástroje jeden, viz. obr. 5.3 až 5.6.



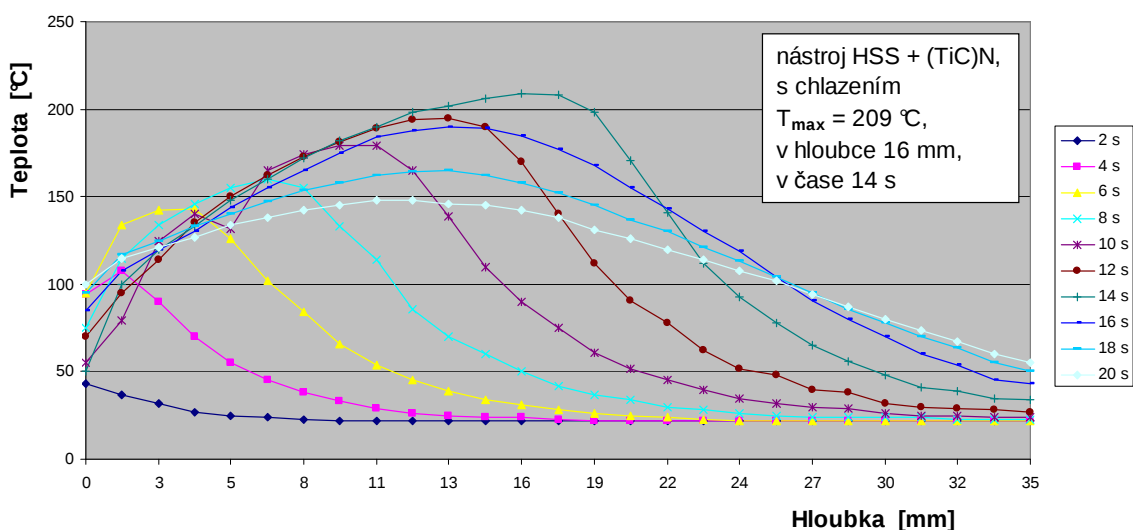
Obr. 5.3 Časové řady teplotních křivek pro vzorek č.1



Obr. 5.4 Časové řady teplotních křivek pro vzorek č. 4



Obr. 5.5 Časové řady teplotních křivek pro vzorek č.8



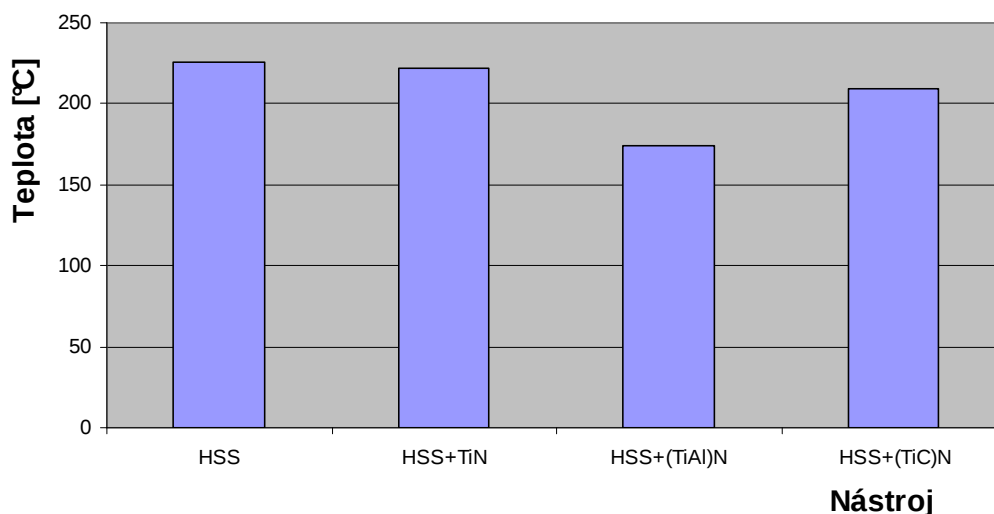
Obr. 5.6 Časové řady teplotních křivek pro vzorek č.12

Maximální teploty obrobku

Z max. teplot získaných vrtáním s chlazením, viz. tab. 5.2 byly vypočteny průměrné max. teploty obrobku pro jednotlivé nástroje. Hodnoty byly zapsány do tab. 5.3 a vyneseny do grafu, viz obr. 5.7.

Tab.5.3 Max. teploty obrobku při vrtání s chlazením

Nástroj	Průměrná max. teplota [°C]
HSS	226
HSS+TiN	222
HSS+TiAlN	174
HSS+TiCN	209



Obr. 5.7 Maximální teploty obrobku pro různé druhy nástrojů při obrábění s chlazením

Z uvedených maximálních teplot obrobku pro jednotlivé nástroje je zřejmé, že použitím povlakovaných nástrojů dochází k menší distribuci tepla do obrobku.

Nejhorší vliv na velikost teplotního pole měl povlak TiN. Při jeho použití bylo dosaženo nejvyšší max. teploty blížící se nepovlakovanému nástroji, zároveň došlo k dosažení vysokých teplot velmi brzo od vstupu nástroje do obrobku, viz. obr. 5.4. Jako nevhodný se ukázal povlak (TiC)N, kdy v jednom případě došlo k ucpání nástroje třískami a k růstu teploty o 23%.

Naopak velmi dobrých výsledků dosáhl povlak typu TiAlN, při jehož použití došlo ke snížení teploty obrobku o 23% oproti nepovlakovanému HSS.

Jednotkový strojní čas vrtání

Z jednotlivých průběhů teplotních polí je také možné si povšimnout, že teploty rostou přibližně do 14 s, kdy je dosahováno nejvyšších teplot, poté klesají. Je to způsobeno dosažením stanovené hloubky vrtání, po které dochází k návratu vrtáku do výchozí polohy.

Výpočtem z použitých řezných podmínek lze stanovit skutečný strojní čas vrtání.

Po posuvovou rychlost platí:

$$v_f = f \cdot n \quad (5.1)$$

$$v_f = 0,122 \cdot 1000 = 122 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

Pro jednotkový strojní čas vrtání platí:

$$t_{AS} = \frac{L \cdot 60}{v_f} \quad (5.2)$$

kde L je hloubka vrtaného otvoru.

$$t_{AS} = \frac{35 \cdot 60}{122} = 17,2s$$

Z výsledku je patrný rozdíl mezi skutečným jednotkovým strojním časem vrtání a časy, kdy jsou dosahovány max. teploty obrobku. Zpoždění max. teplot činí cca 3s.

Průběh teplotních polí v závislosti na hloubce vrtaného otvoru

Ze získaných průběhů teplotních polí je možné pozorovat, že maximálních teplot není dosahováno v maximálních hloubkách vrtaného otvoru, ale zpravidla v necelé polovině vrtaného otvoru.

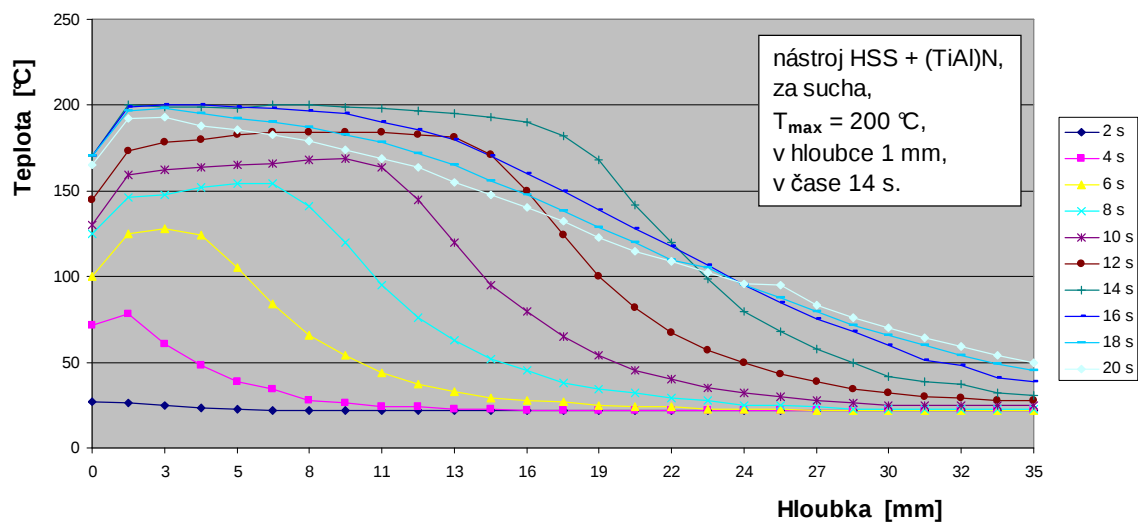
Lze se domnívat, že je to způsobeno kombinací následujících faktorů:

- teplotním zpožděním mezi břitem nástroje a povrchem obrobku
- distribucí tepla před nástroj do dosud nevyvrtané části obrobku
- ohřevem již vyvrtané části obrobku odcházejícími třískami
- intenzivnějším odvodem tepla v nevyvrtané části obrobku díky upnutí do sklíčidla (ocelové sklíčidlo má vyšší tepelnou vodivost než okolní prostředí).

5.1.5 Vyhodnocení experimentu – obrábění za sucha

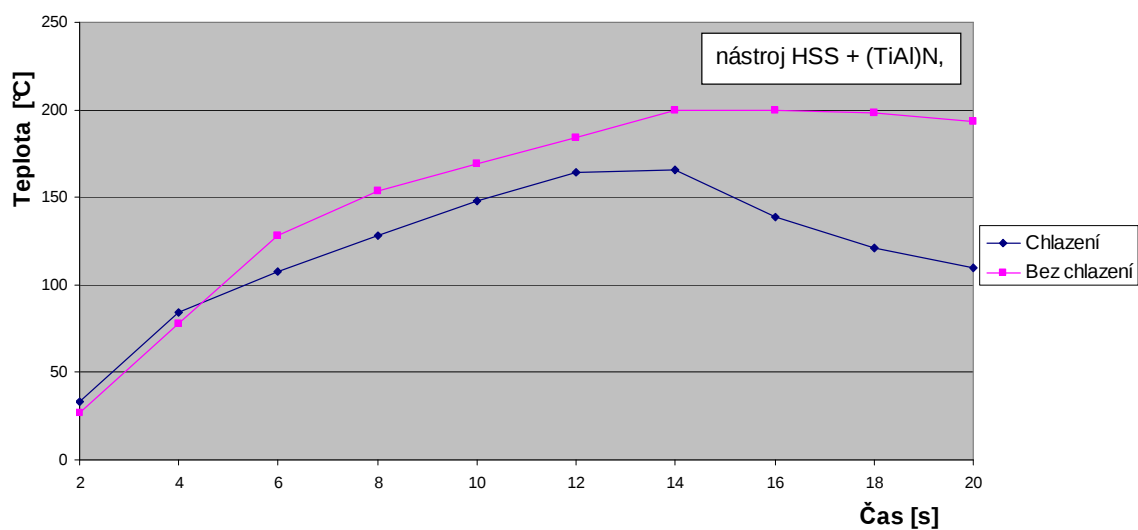
Porovnat průběh teplotních polí mezi obráběním za sucha a s chlazením lze u vrtáku HSS + (TiAl)N viz. obr. 5.5 a 5.8.

Při obrábění za sucha je díky absencí procesní kapaliny na nástroji a čele obrobku patrný posun max. teplotního zatížení téměř na čelo obrobku a výdrž na těchto hodnotách v průběhu celého vrtání, viz. obr. 5.8.



Obr. 5.8 Časové řady teplotních křivek pro vzorek č. 15

Porovnání průběhu max. teplot obrobku mezi obráběním za sucha a s chlazením v závislosti na čase měření při použití nástroje HSS + (TiAl)N je uvedeno na obr. 5.9.

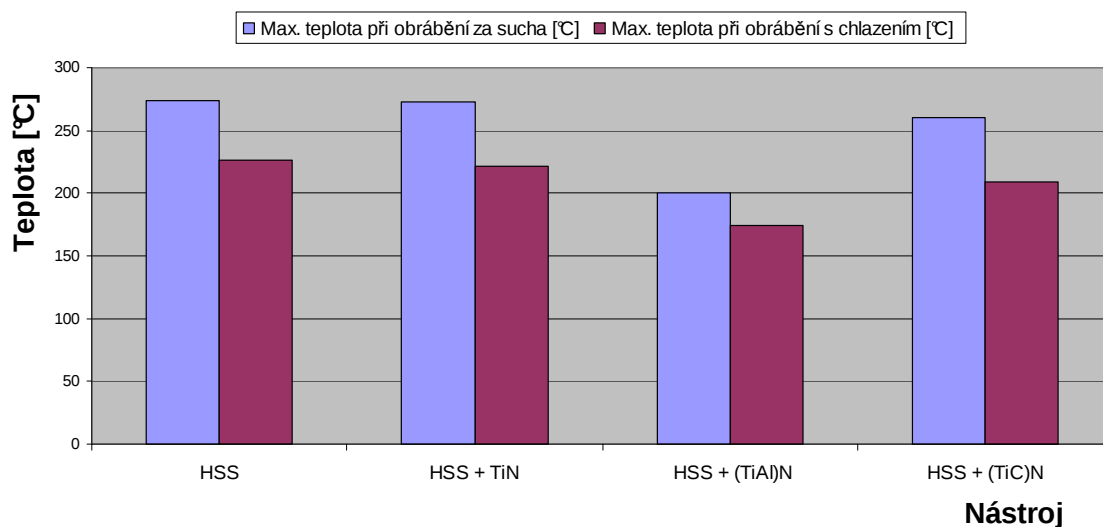


Obr. 5.9 Průběh max. teplot obrobku v závislosti na čase měření

Porovnání max. dosažených teplot obrobku mezi obráběním za sucha a s chlazením pro jednotlivé druhy nástrojů je uvedeno v tab. 5.4. a vyneseno do grafu, viz. obr. 5.10.

Tab.5.4 Porovnání max. teplot obrobku mezi obráběním za sucha a s chlazením

Nástroj	Max. teplota při obrábění za sucha [°C]	Max. teplota při obrábění s chlazením [°C]
HSS	274	226
HSS + TiN	273	222
HSS + (TiAl)N	200	174
HSS + (TiC)N	260	209



Obr. 5.10 Maximální teploty obrobku pro různé druhy nástrojů při obrábění s chlazením

Jak je patrné, teplota obrobku při obrábění za sucha pro jednotlivé nástroje byla vyšší než s chlazením, což potvrzuje závěry uvedené v kap. 2.3. Zároveň je také možné si povšimnout, že max. teplota u povlaku (TiAl)N je i přes chybějící procesní kapalinu menší než u ostatních povlakovaných nástrojů, které byly chlazeny.

Nárůst teploty při obrábění za sucha oproti obrábění s chlazením byl vyšší o 21% u vrtáků HSS bez povlaku, o 23% u TiN, o 15% u (TiAl)N a o 24% u TiCN. Navíc dle (15) při vrtání s vrtáky HSS bez povlaku v některých případech docházelo k ulpívání třísky, které způsobovalo výrazný nárůst teploty a ohřev obrobku, třísky i nástroje. Tento nárůst přesahoval 40% a měl za následek prudké opotřebení vrtáku a intenzivní oxidaci třísky. K ulpívání třísky a ucpávání šroubovice docházelo také u povlaku (TiC)N, a to jak při obrábění za sucha, tak s chlazením.

5.1.6 Závěry experimentu

Provedený experiment prokázal, že při použití povlakovaných nástrojů nedojde ke zvýšení teploty obrobku.

Dle (15) lze usuzovat, že je to způsobeno:

- nižším podílem pasivních sil ovlivňujících růst teploty
- nižšími třecími silami, které zatěžují vrtáky v oblasti sekundární a terciární plastické deformace
- vyšším úhlem roviny max. smykových napětí
- lepší řezivostí a odolností proti opotřebení

Experiment zároveň potvrdil skutečnost, že při obrábění za sucha je teplota obrobku vyšší než při použití chlazení. Prokázalo se také, že teplota obrobku závisí na použitém druhu nástroje, v tomto případě povlaku, přičemž nejlepších výsledků dosahovaly vrtáky HSS + (TiAl)N, které vykazovaly velmi dobré výsledky jak při vrtání s chlazením, tak za sucha.

Závěrem je nutno říci, že vyhodnocovaná data byla získána na relativně malém počtu vzorků, především při obrábění za sucha, proto výsledek může být ovlivněn chybou měření. Pro objektivnější vyhodnocení dané problematiky by bylo vhodné experiment zopakovat pro větší počet vzorků.

6 DOPORUČENÍ PRO PRAXI

6.1 Podmínky obrábění

Při aplikaci zavádění obrábění za sucha je nutné v každém určitém případě provést analýzu pracovních podmínek, která by měla ukázat, jak se řezný proces vyrovná s úbytkem chlazení. Jedná se o řešení komplexního systému interakce materiálu obrobku a nástroje. Svůj vliv má materiál obrobku a jeho vlastnosti, nástroj a nástrojový materiál se svými vlastnostmi, druh operace, řezné podmínky, použitý obráběcí stroj a výsledný efekt řezání, tj. obrobek a jeho rozměrová, tvarová přesnost a vlastnosti povrchové vrstvy, včetně zbytkových pnutí. (6)

6.1.1 Minimalizace množství tepla

Základním problémem při obrábění za sucha je množství tepla vznikajícího v oblasti řezání, viz kap. 3.4. V této souvislosti je dle (25) a (2) potřeba přijmout některé technologické předpoklady:

- používat moderní řezné materiály, které mají vysokou tepelnou stabilitu - jedná se především o nástroje povlakované
- používat nástroje, u kterých dochází k nižšímu vývoji teplot - nástroje s pozitivní geometrií
- do budoucna doplnit obráběcí stroje o nové kontrolní a regulační systémy, které umožní kontrolovat a usměrňovat vyšší tepelnou zátěž obráběcího procesu

Teplo vznikající v oblasti řezání je dle (2) možné snížit následujícími opatřeními:

- používat tvarově přesné polotovary – polotovary tvarově podobné hotovému obrobku (technologie „Near-Net-Shape-Technology“), kdy díky menšímu objemu obráběného materiálu se sníží i množství vzniklého tepla
- používat materiály obrobku se zlepšenou obrobitelností – např. deoxidované oceli kalciumsiliem SiCa s přísadou hliníku, které obsahují hlinitaný vápník, které se při teplotě řezání taví a působí jako mazadlo. Trvanlivost se dle (2) může zvýšit až o 400%.

Při dokončovacích operacích musíme zajistit, aby množství vznikajícího tepla přecházejícího do obrobku bylo co nejnižší, aby nedocházelo k deformacím obrobku a aby byla dodržena tvarová a rozměrová přesnost. Toho lze dosáhnout např. volbou vhodných řezných podmínek.

Při soustružení lze vznikající teplo přecházející do obrobku snížit např. zvýšením posuvu a hloubky řezu, tj. průřezu odebírané vrstvy. Podobně u frézování je vhodné zvýšit hodnotu posuvu na zub, ale především používat soustředné frézování omezující tření hřbetu břitu o plochu řezu. (2)

Obecně pro všechny způsoby obrábění platí, že pokud to dovolí tepelná odolnost řezného materiálu, lze snížit množství tepla odváděného obrobkem zvýšením řezné rychlosti. Tím dojde ke zvýšení objemu tepla odváděného třískami a také ke snížení plasticity obráběného materiálu v oblastech vzniku třísky, které způsobí zmenšení vzniku plastických deformací. (2)

6.1.2 Odstraňování třísek

Chybějící čistící účinek procesní kapaliny, tj. odplavování třísek, může způsobovat zahlcování a zaslepování prostoru pro třísky zvláště u vrtáků, závitorezných a brusných nástrojů, v některých případech i fréz. Zpevněné třísky poškozují obrobené plochy a břity nástroje, když se dostanou mezi břit a obrobek, kde jsou znovu řezány. Problém lze řešit nejlépe odsáváním, ale i novově odfukováním třísek tlakovým vzduchem. S odfukováním ale souvisí problém zafukování kovového prachu např. do ložisek, vodících ploch, šroubů apod.

Lepšímu odstraňování třísek přispívá i změna polohy nástroje vůči obrobku, tj. obrábění zespodu obrobku nebo lépe při vodorovné poloze vřetena frézky nebo vrtačky. (2)

Vyšší teplota řezání, která je příznivá pro zlepšení plasticity odřezávaného materiálu třísky, snadnější deformaci a zmenšení řezných sil má na druhou stranu při nepřerušovaném řezu nepříznivý vliv na tvar třísky - struhovitý nebo smotaný. Tato skutečnost obvykle vyžaduje speciální utvařeče nebo tvary drážek pro třísky u vrtáků tak, aby nedocházelo při obrábění za sucha k jejich zahlcování třískami (2)

S ohledem na odstraňování třísek musí být také konstruovány upínací přípravky a některé skupiny obráběcího stroje jako lože, suporty apod. (2)

6.2 Možnosti obrábění za sucha pro vybrané technologie obrábění (20), (6)

Soustružení ocelí

V důsledku plynulého řezu při soustružení ocelí za sucha je hlavním problémem zvýšené tepelné zatížení břitu. Řezný materiál musí především odolávat zvýšené teplotě řezání, požadavky na pevnost v ohybu bývají obvykle druhořadé.

Pro dokončovací soustružení se doporučuje používat cermety s ochrannou vrstvou z (TiC)N nebo z polykrystalického kubického nitridu bóru (PKNB), popř. z oxidické keramiky. Pro hrubovací operace jsou vhodnější houževnatější slinuté karbidy s ochrannou vrstvou Al_2O_3 nanesené metodou CVD. Poloměr zaoblení ostří by měl být do $30\mu\text{m}$, proto je výhodnější pro nanesení vrstvy metody MT CVD.

Frézování ocelí

Při frézování za sucha slinutým karbidem se obvykle dosahuje delší trvanlivosti břitu frézy než při frézování s chlazením. Příčinou je snížení střídavého tepelného zatěžování břitu frézy, kdy již není horký břit po výběhu z řezu rychle ochlazen procesní kapalinou. Tento jev se projevuje jak u slinutého karbidu ochrannou vrstvou, tak bez ní. Proto se i s jinými velmi tvrdými řeznými materiály, jako jsou cermet a kubický nitrid boru obrábí většinou za sucha.

Ochranné vrstvy se na břity nanášejí metodou PVD nebo lépe MT CVD, které výrazně nezvětšují poloměr zaoblení ostří. Největší zlepšení dává vrstva (TiAl)N díky své vysoké tvrdosti i za vyšších teplot, zatímco (TiC)N je lepší při frézování s procesními kapalinami.

Vrtání ocelí

Hlavním problémem vrtání za sucha je spolehlivé odvádění třísky z vrtaného otvoru. Nebezpečí napěchování třísky ve drážce vrtáku narůstá s hloubkou vrtaného otvoru. U vrtáků pro obrábění za sucha je proto důležitá optimalizace tvaru průřezu drážky, především její zvětšení, které poskytuje tříске více prostoru a snižuje tření o stěny otvoru. Důležitý je také tvar vznikající třísky, proto musí být správně navržen tvar břitu, především čela. Tření třísek o boky drážky vrtáku se snižuje vhodným druhem ochranné vrstvy, např. z TiN.

Velké nároky jsou na kvalitu zakotvení vrstvy povlaku. Po přebroušení opotřebovaného břitu, např. u vrtáku z SK, dochází k roztírání kobaltového pojiva po broušeném povrchu a nově nanesená vrstva pak nemá dostatečnou adhezi k substrátu. Proto je nutné před nanesením vrstvy provádět mikrotřiskání, které má příznivý vliv i na trvanlivost břitu, zvýšení přesnosti otvoru a drsnosti povrchu.

Díky zhoršenému odvodu tepla při vrtání za sucha dochází ke zvýšenému tepelnému zatížení vrtáku. To nejenže způsobuje snížení odolnosti řezného materiálu proti opotřebení a tím i trvanlivosti břitů, ale z důvodu tepelné roztažnosti nástroje může zapříčinit i zadření vrtáku ve vrtaném otvoru. Proto je nutné používat vrtáky s větší kuželovitostí směrem ke stopce vrtáku. Vyšší teploty rovněž způsobuje větší délkovou roztažnost celé nástrojové soustavy (vrták, pouzdro upínač), a tím se ovlivňuje přesnost hloubky otvoru.

U nástrojů s destičkami ze slinutých karbidů se osvědčila úprava, která spočívá v tom, že destičky slinutých karbidů jsou zpevňovány tryskáním zrn oxidu hliníku o velikosti 12 až 14 μm . V povrchové vrstvě dojde k plastické deformaci, která způsobuje zvýšení odolnosti destičky slinutého karbidu proti opotřebení.

Obrábění litin

Teploty řezání při obrábění litin jsou podstatně nižší než při obrábění ocelí, protože grafit uvolňovaný ze šedé litiny příznivě snižuje koeficient tření. Šedé litiny za sucha se proto soustruží i frézují většinou dobře.

Vhodnými řeznými materiály pro obrábění litin za sucha jsou řezná keramika Al_2O_3 nebo Si_3N_4 , nejvhodnější je však kubický nitrid bóru (CBN). Má vysokou tepelnou vodivost a také účinně odvádí teplo vzniklé při řezání. To příznivě působí na snížení teploty obrobku, ovšem může to znamenat i silné zahřívání nástroje a tím jeho tepelné prodlužování. Tento jev hraje důležitou roli u dokončovacích operací velmi přesných rozměrů, které se však u litin obvykle nevyskytují.

Obrábění hliníkových slitin

Hliník a jeho slitiny patří při obrábění za sucha mezi velmi problémové materiály a to i přes svoje poměrně nízké mechanické vlastnosti. Je to způsobeno jeho vysokou tepelnou vodivostí a výrazným sklonem k adhezi na břit většiny řezných materiálů. Díky vysoké tepelné vodivosti se odvádí značné množství tepla z místa řezu do obrobku a ve spolupráci s vysokou tepelnou roztažností hliníku vznikají tepelné deformace obrobku.

Díky sklonu k adhezi dochází často k nalepování třísky na břit a k zahlcování prostoru zubových mezer a drážek u vrtáků třískami. Snahu tvořit nárůstek mají nepovlakované nástroje ale i některé povlaky – CrN, MoS_2 , TiN.

Proto, aby mohli být prováděny operace jako vrtání, vystružování, řezání závitů nebo čelní frézování hliníkových slitin za sucha, je nezbytné používat nástroje s vhodnou ochrannou vrstvou snižující adhezi, popř. používat mazání mlhou (MQL), které kromě zamezení tvorby nárůstku projeví i ve zlepšení drsnosti a přesnosti obrobené plochy.

Nejvýhodnější pro obrábění za sucha jsou řezné nástroje povlakované ochrannou vrstvou z polykrystalického diamantu (PCD) naneseného CVD metodou. Tvrdý PCD dobře odolává abrazivním účinkům i tvrdých silicidů, které obsahují hliníkové slitiny a zároveň omezuje adhezi hliníku na břit, čímž se snižuje sklon ke vzniku nárůstku. Zároveň díky nízkému koeficientu tření snižuje řezné síly a tím i silové zatížení soustavy obráběcí stroj – nástroj – obrobek. Trvanlivost břitu při použití PCD povlaku se udává o 30% vyšší v porovnání s konvenční technologií s použitím procesních kapalin.

Obdobný účinek jako PCD vrstvy mají vrstvy podobné diamantu, tzv. DLC vrstvy (Diamond-Like-Carbon) a vrstvy z karbidů kovů (Metal Karbon Coating). Oba povlaky mají nízký koeficient tření (0,1 až 0,2) a dobrý antiadhezní účinek. Tvorba nárůstku je omezena, ovšem oproti běžně používaným slinutým karbidům a procesním kapalinám dochází k větší intenzitě opotřebení. Zatím se ale tyto vrstvy příliš neprosadily.

Příznivých stavů se také docílí kombinací tvrdých vrstev (odolávajících abrazivnímu opotřebení) a měkkých vrstev (omezujících tvorbu nárustku). Příkladem je tvrdá vrstva TiN a měkká povrchová vrstva ze sulfidu molybdenu MoS₂. Charakteristiky opotřebení dosahované tímto multivrstvým povlakem dosahují až 10% v porovnání s konvenční technologií s použitím procesních kapalin.

U některých měkkých slitin hliníku se při obrábění nezabrání tvorbě nárustku, ani s použitím ochranných vrstev. V těchto případech je nutné použít metodu MQL, která přinese téměř 100% zlepšení, zvláště při frézování.

Obrábění slitin niklu a titanu

Pro obrábění slitin titanu a niklu není obrábění za sucha příliš vhodné. Předpokládá se spíše dokonalé chlazení s velkým množstvím přiváděné kapaliny. Obrábění za sucha lze doporučit pouze u přerušovaného řezu, protože se sníží účinek tepelných šoků. Ale i zde je lepší použít spíše metodu MQL.

6.3 Kdy nelze obrábění za sucha použít

Obrábění za sucha se dá obecně doporučit pouze tam, kde je možné zaručit, že bude zachována stejná jakost obrobku, trvanlivost nástroje a čas obrábění jako při použití procesních kapalin. (6)

Existuje celá řada výrobních metod a jejich kombinací, které nemohou být ekonomicky prováděny bez přívodu procesní kapaliny. Jedná se především o obrábění tepelně odolných slitin, které se provádí při nízkých řezných rychlostech. V některých případech je nutno tyto součásti mazat a chladit procesní kapalinou, např. při frézování hlubokých drážek. (26) Mazání vyžadují také operace při opracování součástí z ocelí jako např. řezání závitů, protahování, výroba ozubení odvalovacím způsobem apod. (8)

Při výrobě velmi přesných součástí je použití procesních kapalin velmi důležité, protože zabrání snížení rozměrové přesnosti a povrchové kvality.

Při dokončování korozivzdorné oceli a hliníku zabrání použití procesní kapaliny zadíráání malých částic do obrobeného povrchu. (26)

U obrábění tenkostěnných ocelí se chlazení používá k omezení geometrické deformace. (26)

Použití procesních kapalin také odvádí prach vznikající při obrábění např. šedých a tvárných litin, to se dá ale i řešit pomocí odsávání. Procesní kapalina provádí také oplach palet, součástí a částí obráběcího stroje od jemných pilin. I to lze s úspěchy řešit odsáváním nebo vhodnými konstrukčními úpravami. (26)

Při vrtání hlubokých děr také nelze suché obrábění použít. Často způsobuje problémy i běžné chlazení z důvodu nutnosti zabránění vzniku par a potřeby spolehlivého odvodu třísek. S úspěchy se pak používá vysokotlaké a velkoobjemové chlazení. Pro většinu operací jsou dostatečné tlaky okolo 70 barů. (27) Pro vrtání hlubokých děr lze také využít metodu MQL. (2)

Pokud je nutné frézovat za mokra je vhodné používat také vysokotlaké a velkoobjemové chlazení. Třidu slinutého karbidu se doporučuje volit pro frézování za sucha i za mokra, např. tvrdý jemnozrnný karbid s tenkým PVD povlakem TiN. (26)

Problematické je také vrtání, vystružování a řezání závitů v šedé litině, ve slitinách hliníku, oceli a dále také čelní frézování především slitin hliníku. V těchto případech je výhodné aplikovat metodu MQL (Minimum Quantities of Lubricant). Tato metoda, u nás známá jako mazání mlhou, spotřebuje méně než 50 ml média na hodinu obrábění. Proto nástroje, obrobky i třísky zůstávají prakticky suché, tudíž nejsou nutné další technologické pochody pro odstranění procesních kapalin z třísek nebo obrobků. Přesto však vznikající aerosol může vyvolávat problémy s hygienou pracovního prostředí. Proto se většinou vyžaduje dobré utěsnění pracovního prostoru obráběcího stroje od okolí a odsávání vzniklého aerosolu přes účinné filtry. To samozřejmě vede ke zvýšení investičních nákladů. (2)

7 ZÁVĚR

Ze studie dané problematiky vyplývá, že obrábění za sucha je jedním z moderních způsobů obrábění. Odstraněním nákladných procesních kapalin a jejich technologického vybavení z procesu dojde ke snížení výrobních nákladů asi o 5%, nepřehlédnutelná jsou také ekologická a zdravotní hlediska.

Při nasazení obrábění za sucha je však nutné počítat s určitými specifiky, proto je nutné v každém konkrétním případě provést analýzu pracovních podmínek. Klíčovým problémem je především minimalizace množství vzniklého tepla a odvod třísek z místa řezu.

Obrábění za sucha lze realizovat především díky moderním řezným nástrojům. Jedná se o nástrojové materiály s vysokou tepelnou odolností a pevností v ohybu za tepla. Jde především o slinuté karbidy, cermety, řeznou keramiku, polykrystalický kubický nitrid bóru a polykrystalický diamant. Tyto nástroje musí být povlakovány z důvodu vyšší tepelné odolnosti a snížení tření. Nástroje pro obrábění za sucha je nutné volit s pozitivní geometrií, která má příznivý vliv na množství tepla vzniklého při obrábění.

Z experimentální části práce, kde byl zjišťován vliv druhu povlaku na průběh a velikost teplotních polí při vrtání, lze učinit závěr, že povlakované nástroje snižují teplotu obrobku, a to jak při chlazení, tak při obrábění za sucha. Byla také potvrzena skutečnost, že při obrábění za sucha je teplota obrobku vždy vyšší než při použití chlazení. U vrtáků HSS bez povlaku došlo ke zvýšení teploty o 21%, u HSS + TiN o 23%, u HSS + (TiAl)N o 15% a u HSS + TiCN o 24%. Nejlepších výsledků v testu dosáhnul povlak (TiAl)N, který lze pro obrábění s chlazením i za sucha jednoznačně doporučit.

Je nutné si také uvědomit, že obrábění za sucha nelze použít v každém případě a v řadě aplikací je obrábění s chlazením dosud nenahraditelné. Obecně lze obrábění za sucha použít pouze tam, kde je dodržena stejná jakost obrobku, jako při obrábění s chlazením. Chlazení je nutné zachovat např. při obrábění tepelně odolných slitin, vrtání hlubokých děr, řezání závitů, protahování a všude tam, kde je potřeba dodržet rozměrovou přesnost a vysokou jakost povrchu obrobené plochy. V některých případech, kdy není možné obrábění za sucha použít, lze s úspěchy aplikovat metodu MQL.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOCMAN, K. PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
2. HOFMANN, P. *Obrábění za sucha ano či ne?* (2. část) [DVD-ROM]. MM Průmyslové spektrum 11/2001. Kompletní desetiletý archiv jednotlivých vydání MM Průmyslového spektra 1997-2006.
3. TECHNIK, TECHNICKÉ A TECHNOLOGICKÉ NOVINKY PRO VÝZKUM, VÝROBU, TRH., *Ekologičtější strojírenství: Kapaliny pro obrábění mění svou „tvář“* [online]. [cit. 16. 2. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <http://technik.ihned.cz/c4-10004030-11353150-800000_d-technologie-hsc>.
4. ZEMAN, P., ŠAFEK, J., VANĚČEK, D. *Technologie HSC* [online]. [cit. 28. 2. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://technik.ihned.cz/>>.
5. MÁDL, J. *Integrita povrchu po obrábění* [online]. [cit. 2. 3. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://web.tuke.sk/fvtpo/casopis/pdf08/2-str-05-07.pdf>>.
6. BUMBÁLEK, B. *Obrábění s chlazením nebo za sucha? Ekologie obrábění*. Brno, 2000. 91 s. ISBN 80-7044-232-8.
7. BUMBÁLEK, B., ODVODY, V., OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha, SNTL, 1989. ISBN 04-252-89.
8. FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
9. HUMÁR, A. *Technologie I, Technologie obrábění – 1. část* [online]., Studijní opory pro magisterskou formu studia, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 137 s. Dostupné na World Wide Web: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>>.
10. BUMBÁLEK, B. *Fyzikální podstata řezání* [online]., Studijní opory pro magisterskou formu studia, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. 125 s. Dostupné na World Wide Web: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>>.
11. KOCMAN, K. *Speciální technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 227 s. ISBN 80-214-2562-8.
12. DRASTÍK, F., A KOL. *Strojnická příručka, svazek 4, obrábění*. Praha: Verlag Dashöfen, nakladatelství s.r.o., 2007.
13. SVOBODA, J., SKOPEČEK, T., ŘEHOŘ. J., HOFMAN, P. *Tvorba třísky při vysokorychlostním obrábění* [online]. [cit. 16. 2. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/tvorba-trisky-pri-vysokorychlostnim-obrabeni>>.
14. MARINOV, V. *Manufacturing Technology* [online]. [cit. 08. 4. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <http://me.emu.edu.tr/me364/ME364_cutting_temperatures.pdf>.
15. POLZER, A., PÍŠKA, M. *Workpiece Thermal Fields when Machining in Dry and Wet Cooling Environment*. Brno, FSI VUT v Brně, 2006. Fakultní projekt

16. BENEŠ, P., KŘÍŽ, A. *Teplotní degradace tenkých otěruvzdorných PVD vrstev* [online]. [cit. 13. 4. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ateam.zcu.cz/benes_metal06.pdf>.
17. LIEMERT, G., DRÁBEK, F., ONDRA, J., VAVŘÍK, I. *Obrábění*. Praha, SNTL, 1974. 350 s. ISBN 04-231-74
18. PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R. *Teorie obrábění*. Praha, SNTL, 1982. 235 s. ISBN 04-230-82
19. WEINERT, K., INASAKI, I., SUTHERLAND, W. J., WAKABAYASHI, T. *Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication* [online]. [cit. 23. 2. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
20. HOFMANN, P. *Obrábění za sucha ano či ne? (2. část)* [DVD-ROM]. MM Průmyslové spektrum 12/2001. Kompletní desetiletý archiv jednotlivých vydání MM Průmyslového spektra 1997-2006.
21. KLOCKE, F., EISENBLÄTTER, G. *Dry cutting* [online]. [cit. 23. 2. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
22. AOYAMA, T. *Development of a Mixture Supply System for Machining with Minimal Quantity Lubrication* [online]. [cit. 23. 2. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
23. RETCH, J. *Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool-chip interface in orthogonal dry turning* [online]. [cit. 23. 2. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
24. LEE, K. W., CHUNG, Y., KORACH, CH., KEER, L. M. *Tribological and dry machining evaluation of superhard TiB₂/TiC multilayer coatings deposited on Si(001), M2 steel, and C3 WC cutting tool inserts using magnetron sputtering* [online]. [cit. 2. 4. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
25. MARŠÍČEK, R., ZIMA, L. *Enviromentalizace řezného procesu a obrábění za sucha* [DVD-ROM]. MM Průmyslové spektrum 04/2004. Kompletní desetiletý archiv jednotlivých vydání MM Průmyslového spektra 1997-2006.
26. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM., *Důležité aspekty vysokorychlostního obrábění* [online]. [cit. 16. 2. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/dulezite-aspekty-vysokorychlostniho-obrabeni>>.
27. CEJNAROVÁ, A. *Jak zvolit správné chlazení pro obráběcí stroj* [DVD-ROM]. MM Průmyslové spektrum 05/2005. Kompletní desetiletý archiv jednotlivých vydání MM Průmyslového spektra 1997-2006.
28. ŠÍMA, M., ZINDULKA, O. *Měření vlastností povlaků na nástrojích* [DVD-ROM]. MM Průmyslové spektrum 06/2004. Kompletní desetiletý archiv jednotlivých vydání MM Průmyslového spektra 1997-2006.
29. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Rervm Cognoscere Causas* [DVD-ROM]. MM Průmyslové spektrum 04/2005. Kompletní desetiletý archiv jednotlivých vydání MM Průmyslového spektra 1997-2006.
30. SKOPEČEK, T., SVOBODA, J., ŘEHOŘ, J., HOFMAN, P. *Experimentální studium tvorby třísky při HSC – tvrdém frézování* [DVD-ROM]. MM Průmyslové spektrum 12/2003. Kompletní desetiletý archiv jednotlivých vydání MM Průmyslového spektra 1997-2006.

31. KŘÍŽ, P. *Řezné oleje pro extrémní výkony* [DVD-ROM]. MM Průmyslové spektrum 03/2006. Kompletní desetiletý archiv jednotlivých vydání MM Průmyslového spektra 1997-2006.
32. POLZER, A. *Technologie vrtání v IR spektru* [online]. [cit. 16. 4. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.techtydenik.cz/cnc_priklady/priklad_13.pdf>.
33. HOUDEK, J., KOUŘIL, K. *Opotřebení bříty nástrojů ze slinutých karbidů* [DVD-ROM]. MM Průmyslové spektrum 12/2004. Kompletní desetiletý archiv jednotlivých vydání MM Průmyslového spektra 1997-2006.
34. AB SANDVIK COROMANT – SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění – Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Silentia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6
35. HOUDEK, J., KOUŘIL, K. *Opotřebení bříty nástrojů ze slinutých karbidů II* [DVD-ROM]. MM Průmyslové spektrum 01/2005. Kompletní desetiletý archiv jednotlivých vydání MM Průmyslového spektra 1997-2006.
36. ASTAKHOV, V, P. *Metal cutting Theory – missed chances or a science without history: Part 2* [online]. [cit. 13. 4. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://viktorastakhov.tripod.com/mc2.pdf>>.
37. WILEY, J., GROOVER, M, P. *Theory of metal machining* [online]. [cit. 13. 4. 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.engineer.tamuk.edu/departments/ieen/faculty/DrLPeel/Courses/MEEN3349.html>>.
38. CZÁN, A., PILC, J., ĎURECH, L. *Nástroje pro vysoko - produktivní obrábění* [DVD-ROM]. MM Průmyslové spektrum 12/2004. Kompletní desetiletý archiv jednotlivých vydání MM Průmyslového spektra 1997-2006.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
CBN		Kubický nitrid bóru
DLC		Diamond-Like-Carbon (Uhlíkový povlak podobný diamantu)
HSC		High speed cutting (vysokorychlostní obrábění)
HSS		High speed steel (rychlořezná ocel)
IR		Infračervený
MQL		Minimum Quantities of Lubricant (mazání minimálním množstvím kapaliny)
PKD		Polykrystalický diamant
SK		Slinutý karbid
a_p	[mm]	Šířka záběru ostří
a_0, b_0, c_0	[-]	Exponenty vyjadřující vliv řezných podmínek na hodnotu střední teploty řezání
α	[°]	Úhel h řbetu
b_d	[mm]	Šířka řezu
C_p	[J.m ⁻³ .K ⁻¹]	Měrné objemové teplo
C_0	[-]	Materiálová konstanta
C_T	[-]	Konstanta zahrnující materiál obrobku a nástroje
γ_0	[°]	Ortogonální úhel čela
D	[mm]	Průměr
E_e	[J]	Práce řezného procesu
f	[mm]	Posuv na otáčku
f_z	[mm]	Posuv na zub
f_x	[mm]	Posuv na zub v ose x
F_c	[N]	Řezná síla
F_f	[N]	Posunová síla
F_{sh}	[N]	Tečná síla působící v rovině max. smykových napětí
F_{shN}	[N]	Normálová síla působící v rovině max. smykových napětí
$F_{\gamma \dots}$	[N]	Tečná síla působící na čele nástroje
$F_{\gamma N}$	[N]	Normálová síla působící na čele nástroje
Φ	[°]	Úhel roviny maximálních smykových napětí
h_d	[mm]	Hloubka řezu
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Měrná tepelná vodivost
λ_t	[°]	T řecí úhel

m	$[-]$	Exponent, charakterizuje vlastnosti řezného nástroje
n	$[\text{min}^{-1}]$	Otáčky
μ	$[-]$	Střední součinitel tření na čele ná- stroje
p	$[\text{MPa}]$	Tlak
π	$[-]$	Ludolfovo číslo
Q_e	$[\text{J}]$	Teplo řezného procesu
Q_{Pd}	$[\text{J}]$	teplo v oblasti primární plastické deformace I
Q_γ	$[\text{J}]$	teplo v oblasti sekundární plastické deformace II
Q_α	$[\text{J}]$	teplo v oblasti terciální plastické deformace III
Q_t	$[\text{J}]$	teplo odvedené třískou
Q_o	$[\text{J}]$	teplo odvedené obrobkem
Q_n	$[\text{J}]$	teplo odvedené nástrojem
Q_{pr}	$[\text{J}]$	teplo odvedené řezným prostředím
T	$[\text{min}]$	Trvanlivost nástroje
$T_{\max}$	$[\text{°C}]$	Maximální teplota
τ_k	$[\text{MPa}]$	Střední kritické napětí v kluzu obrá- běného materiálu v oblasti primární deformace
Θ_m	$[\text{°C}]$	Střední teplota obrábění
u	$[\text{J} \cdot \text{m}^{-3}]$	Měrná energie řezání
v_c	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	Řezná rychlost
v_γ	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	Rychlost odcházející třísky
v_{sh}	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	Rychlost v rovině max. smykových napětí

