

Trvanlivosti břitů HSS nástrojů nové generace při frézování slitiny Ti6Al4V

Jiří Váňa, Ing. Pavel Zeman Ph.D.

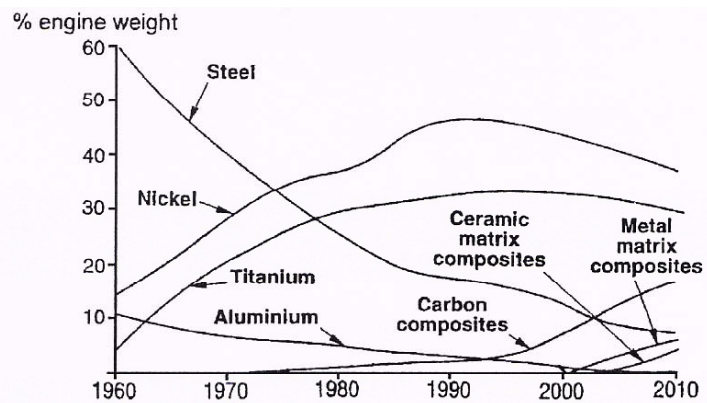
VCSVTT, ČVUT v Praze, Horská 3, 12800 Praha 2, tel: 605205923, p.zeman@rcmt.cvut.cz

Cílem výzkumu bylo provedení zkoušek pro určení trvanlivosti břitů, řezných výkonů a výrobních nákladů nástrojů z rychlořezné oceli (HSS) v různých variantách řezného materiálu, a to při frézování titanové slitiny s označením Ti6Al4V. Byly testovány celkem čtyři řezné materiály s výrazně odlišnými vlastnostmi - klasické oceli i oceli vyráběné práškovou metalurgií. V další fázi výzkumu byly zjišťovány možnosti povlakování uvedených řezných materiálů, konkrétně pak vliv povlaku na sledované charakteristiky v porovnání s nepovakovaným nástrojem. Pro experimenty obráběním byly zvoleny řezné podmínky vycházející z podmínek pro praktické aplikace těchto řezných materiálů. Řezné podmínky v experimentu byly: řezná rychlost 30 až 50 m/min, axiální hloubka řezu 5 mm, radiální hloubka řezu 1 mm a posuv na zub 0,2 mm.

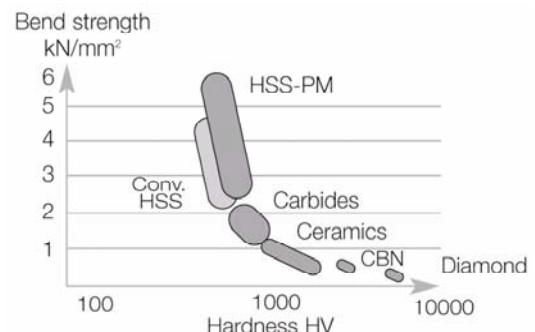
1 Úvod

Výhodný poměr pevnostních charakteristik slitin titanu vzhledem k hustotě materiálu a jejich korozivzdornost vedou ke zvýšenému počtu aplikací těchto materiálů ve strojírenství, zvláště pak v leteckém a chemickém průmyslu. Pro chemické účely převládá použití čistého titanu a tzv. α -slitin. Pro tepelně namáhané součásti se používají pseudo α (mají podíl druhé fáze přibližně do 5%) a $\alpha+\beta$ slitiny.[1, 2] Z obr.1 je patrný výrazný podíl titanových slitin v konstrukci leteckých motorů, který u komerčních aplikací dosahuje 30 % u vojenských až 40 %.[3] Slitiny $\alpha+\beta$ tvoří nejhojnější skupinu slitin, kdy typickým zástupcem této skupiny je slitina Ti6Al4V (VT6), která byla také předmětem našeho výzkumu. Podstatnou nevýhodou slitin titanu je náročná metalurgická výroba a také jejich špatná obrobitelnost. Slitiny se vyznačují nepříznivou obrobitelností především ve vztahu k možnému zvyšování řezné rychlosti. Problémem může být rovněž v dosažení vysoké kvality obrobeného povrchu, která je rozhodujícím faktorem pro spolehlivost a životnost namáhaných součástí. Při studiu průběhu a výsledků technologického procesu byla zjištěna bezprostřední závislost mezi stavem povrchové vrstvy a druhem, sledem i podmínkami výrobních operací. [2]

Špatná obrobitelnost leteckých slitin, včetně Ti6Al4V, vystavuje materiály řezných nástrojů extrémnímu tepelnému a mechanickému zatížení blízko řezné hrany, které často vede k plastické deformaci břitu a zvýšenému opotřebení nástroje. Při obrábění těchto slitin můžeme pozorovat typické poškození ve formě rýhy na



Obr.1 Podíl jednotlivých skupin materiálů v konstrukci leteckých motorů.



Obr.2 Závislost pevnosti v ohybu na tvrdosti pro různé řezné materiály.

špičce bříty, opotřebení na hřbetu, žlábků na čele nebo vyštipování bříty. Nástroje proto musí mít dostatečnou tvrdost při vysokých teplotách, aby odolávaly zvýšeným teplotám i při obrábění vysokými rychlostmi. Z řezných materiálů se pro obrábění Ti slitin se používají zejména povlakované slinuté karbidy a kubický nitrid boru (CBN/PCBN). Pro obrábění nižšími řeznými rychlostmi lze použít slinuté karbidy nepovlakované nebo nástroje z HSS. Řezná keramika není obvykle používána kvůli vysoké rychlosti opotřebení, která je způsobena vysokou reaktivitou keramiky s titanovými slitinami. [3]

Především maximální možná pracovní teplota se při obrábění Ti slitin jeví jako limitující faktor pro všechny řezné materiály. Nejvíce na tuto skutečnost doplácí právě klasické HSS nástroje, kdy přibližně od teploty 600 °C dochází k prudkému poklesu tvrdosti tohoto materiálu. Naopak výhodou oproti ostatním materiálům je jejich vyšší pevnost v ohybu (obr.2), odolnost proti chippingu a možnosti vyšších posuvů na zub f_z [4]. Relativně nové postupy při výrobě nástrojů z rychlořezných ocelí v případné kombinaci s novými generacemi ochranných povlaků břitů však poskytují HSS nástrojům další dimenzi pro jejich uplatnění. Další důležitý aspekt používání těchto řezných materiálů vychází přímo z jejich hlavní nevýhody, a to z použití při nízkých teplotách v místě řezu (nízkých řezných rychlostech). Dle tzv. diagramů stability se totiž právě v oblasti otáček používaných pro nástroje z rychlořezné oceli vyskytuje výrazný nárůst meze stability směrem k větším axiálním hloubkám řezu (a_p). Pokles úběru materiálu v důsledku nižší řezné rychlosti tak lze, ve vhodných případech, kompenzovat a případně i navýšit zvětšováním axiální hloubky řezu (a_p) při zachování stability obrábění. [5]

Hlavním cílem výzkumu popsaného v tomto článku proto bylo definovat možnosti povlakovaných a nepovlakovaných nástrojů u klasických ocelí i ocelí vyráběných práškovou metalurgií (PM oceli), a to ve vztahu k opotřebení bříty fréz a jejich výkonnosti.

2 Podmínky experimentů

Zkoušky trvanlivosti bříty nástrojů z rychlořezných ocelí byly prováděny při sousledném frézování materiálu Ti6Al4V. Obrábění bylo realizováno při povodňovém chlazení řezného procesu olejovou emulzí. Testované nástroje měly podobu čtyřzubých válcových čelních fréz s nepravidelnou roztečí zubů, při jmenovitém průměru 32 mm – viz. obr.3.



Obr.3 Fréza z rychlořezné oceli použitá pro experimenty – celkový pohled a detail špičky.

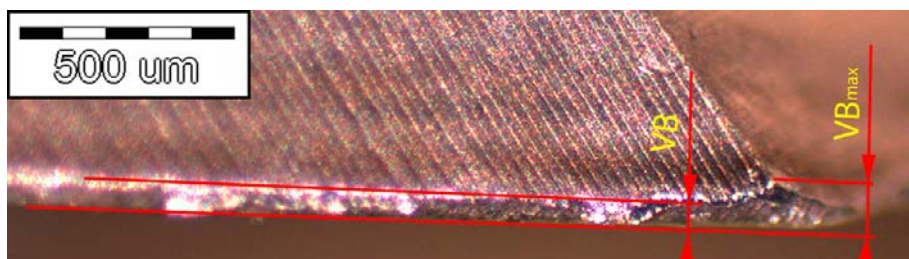
V rámci experimentů byla trvanlivost bříty určována pro čtyři různé řezné materiály pod označením: HSS Co Böhler (8% Co, klasická ocel), ASP 2030 Erasteel (PM ocel), CPM REX T15 (PM ocel) a CPM REX 76 (PM ocel). V první fázi experimentu byly použity nepovlakované nástroje, následně byly testovány i nástroje s ochranným povlakem nACRo®.

Pracovní a řezné podmínky byly po celou dobu zkoušek konstantní. Změna byla prováděna pouze v řezné rychlosti. Podmínky zkoušek zachycuje tab.1.

Tab. 1: Pracovní a řezné podmínky pro provedení experimentů.

řezná rychlost v_c [m/min]	30, 40 a 50
posuv na zub f_z [mm]	0,2
radiální hloubka řezu a_e [mm]	1
axiální hloubka řezu a_p [mm]	5
obráběcí operace	čelní, sousledné frézování
materiál obrobku	Ti6Al4V (žíhaný)
chlazení řezného procesu	voda + Blasocut Kombi (koncentrace 5%)
obráběcí stroj	MCFV 5050LN

Opotřebení břitů v průběhu jejich trvanlivosti bylo sledováno na dílenském mikroskopu Mitutoyo TM500. Velikost opotřebení na hřbetě břitu byla posuzována na základě vyhodnocení dvou základních parametrů – VB (střední velikost plošky opotřebení) a VB_{max} (maximální velikost plošky opotřebení). Na doporučení výrobce nástrojů bylo, s ohledem na další používání nástrojů po jejich přeostření a případném přepovlakování, stanoveno kritérium opotřebení VB_{max}=150 μm na jednom ze 4 břitů. Po dosažení této hodnoty opotřebení byly zkoušky ukončeny.



Obr.4 Schéma vyhodnocení charakteristik opotřebení na hřbetě břitu.

Výsledky provedených experimentů byly v podobě hodnot trvanlivosti břitu. Z hodnot trvanlivosti břitu byl dále vypočten řezný výkon nástrojů. Posléze byly také určeny náklady na odebrání jednotkového objemu obráběného materiálu.

3 Výsledky experimentů

Výsledky provedených experimentů jsou popsány v následujícím textu. Ukázány jsou rovněž v tab.2 a na obr.5 až 9.

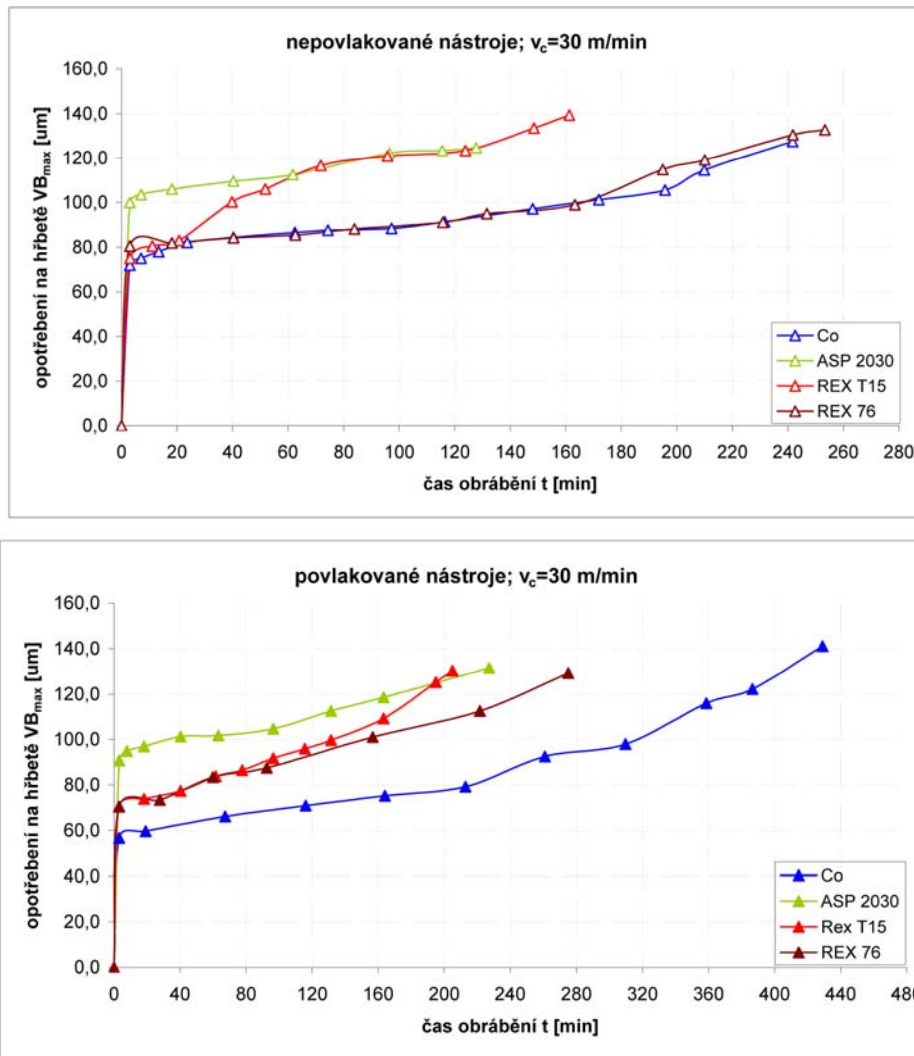
Tab. 2: Pracovní a řezné podmínky pro provedení experimentů.

		řezná rychlost v_c [m/min]					
		30		40		50	
		trvanlivost břitu T [min]	řezný výkon [cm ³]	trvanlivost břitu T [min]	řezný výkon [cm ³]	trvanlivost břitu T [min]	řezný výkon [cm ³]
nepovlakováno	Co	241,7	290,0	24,3	38,9	x	x
	ASP 2030	127,7	153,3	93,1	149,0	28,2	56,3
	REX T15	161,3	193,5	62,8	100,4	33,3	66,6
	REX 76	253,3	304,0	81,6	130,5	x	x
povlakováno	Co	429,0	514,8	172,4	276,0	x	x
	ASP 2030	227,2	272,7	153,3	245,3	93,5	186,9
	REX T15	204,9	245,9	127,4	203,8	51,5	102,9
	REX 76	275,1	330,1	156,8	250,9	x	x

Trvanlivost břitu při řezné rychlosti $v_c=30$ m/min

Při této řezné rychlosti se u nepovlakovaných nástrojů projevují pozitivní vlastnosti nástrojového materiálu Co Böhrler, kdy jde zejména o jeho výrazně odlišné chemické složení od ostatních použitých materiálů. Kritéria opotřebení bylo dosaženo po 242 minutách obrábění. Z nepovlakovaných PM ocelí při rychlosti 30 m/min obstál nejlépe materiál CPM REX 76 (T=253 minut). Zbývající dva PM materiály vykazovaly zvýšenou intenzitu opotřebení břitu, při velmi podobném průběhu opotřebení v čase obrábění (CPM REX T15 – 168 minut, ASP 2030 – 128 minut) - viz. obr.5, tab.2.

Jak bude ještě potvrzeno v dalším textu, vedlo povlakování u všech nástrojových materiálů ke snížení intenzity opotřebení břitu. Při 30 m/min byl ochranný účinek povlaku nevýraznější u materiálu Co, kritéria opotřebení bylo dosaženo až po asi 429 minutách obrábění. Účinek povlaku na PM ocelích nebyl sice tak výrazný, ale i přesto došlo k prodloužení trvanlivosti břitu nástroje, a to u REX 76 na 275 minut, u APS 2030 na 215 minut a u REX T15 na 207 minut - viz. obr.5, tab.2.

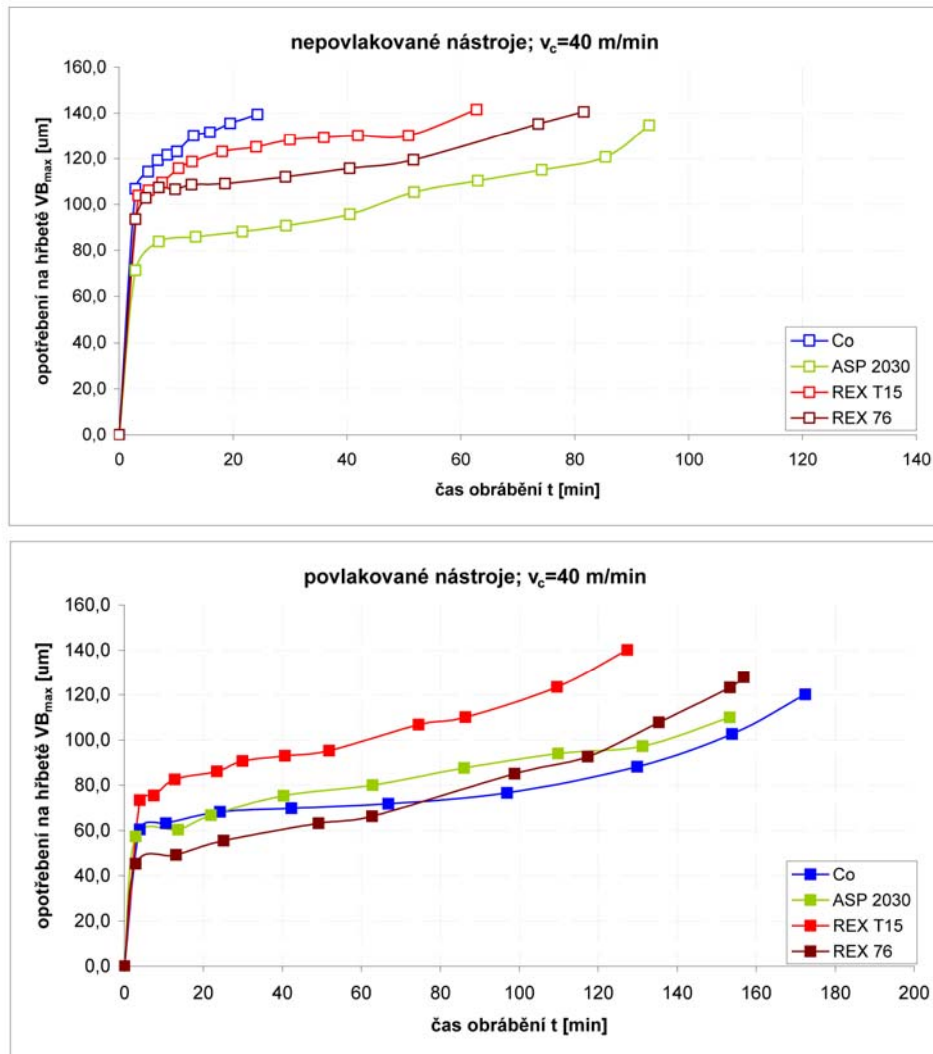


Obr.5 Závislost opotřebení hřbetu VB_{max} na čase obrábění pro $v_c=30$ m/min.

Trvanlivost břítu při řezné rychlosti $v_c=40$ m/min

Zvýšením řezné rychlosti se výrazně změnilo také průběhy opotřebení břitů z jednotlivých řezných materiálů - viz. obr.6, tab.2. Zkoušky na nepovlakovaných materiálech zachytily výrazný nárůst intenzity opotřebení u oceli Co. Při této rychlosti se tato ocel jeví z hlediska trvanlivosti břítu jako nejhorší materiál ($T=24$ min). To je až desetinásobný pokles trvanlivosti břítu při zvýšení rychlosti o 10 m/min. U nástrojů z PM oceli nebyl tento pokles tak výrazný. Nejdélší trvanlivosti břítu bylo dosaženo materiálem ASP 2030 ($T=93$ min). REX 76 dosáhl kritéria opotřebení po 82 minutách obrábění a REX T15 po 63 minutách.

Výsledky této části experimentu prokázaly, že s rostoucí rychlostí roste u všech materiálů i ochranný vliv povlaku břítu nástroje. Trvanlivosti břitů byly povlakováním prodlouženy na 172 minut obrábění u Co, 157 min u REX 76, 153 min u ASP 2030 a 127 min u REX T15. Povlakování má tak nejvýraznější účinek v případě materiálu Co (zvýšení trvanlivosti více než 7x!). U PM povlakovaných nástrojů bylo prodloužení trvanlivosti břítu velmi podobné, a to 1,5 až 2x trvanlivosti pro nepovlakované nástroje.



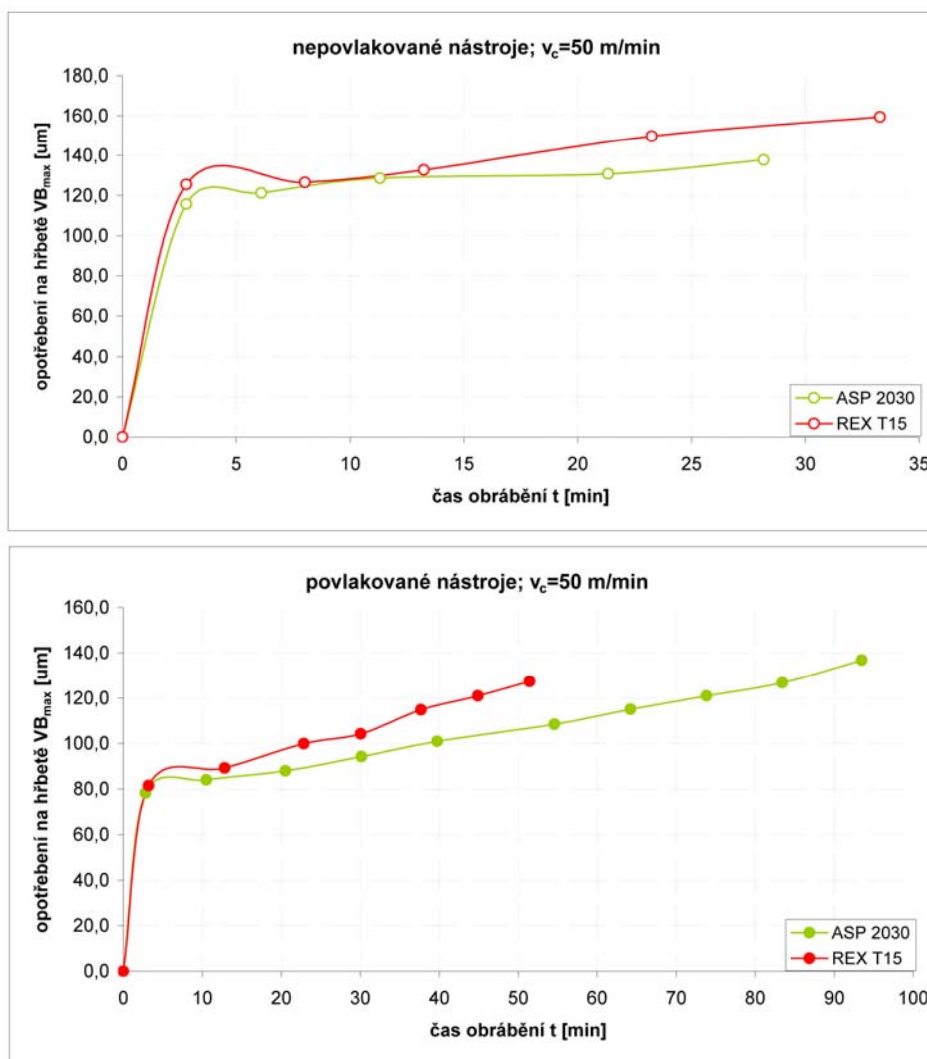
Obr.6 Závislost opotřebení hřbetu VB_{max} na čase obrábění pro $v_c=40$ m/min.

Trvanlivost břitu při řezné rychlosti $v_c=50$ m/min

Je třeba zdůraznit, že tato řezná rychlost již leží v oblasti používaných rychlostí pro obrábění slitin Ti slinutými karbidy. Přestože se tato rychlost může jevit jako příliš vysoká pro nástroje z rychlořezné oceli, byla do experimentů zahrnuta především pro zdůraznění maxima výkonu nástroje a minima nákladů při obrábění, které byly očekávány při nižších rychlostech. Testy při této rychlosti byly provedeny jen pro materiály ASP 2030 a REX T15 - viz. obr.7, tab.2.

Zvýšení řezné rychlosti na 50 m/min logicky vedlo k dalšímu snížení trvanlivosti břitu řezných nástrojů z obou PM ocelí. Získané průběhy opotřebení v závislosti na čase obrábění byly podobné. Mírně lepších výsledků trvanlivosti břitu bylo dosaženo pro materiál REX T15 - trvanlivost břitu $T=33$ min. Nástroje z ASP 2030 vykazovaly při daných podmínkách obrábění trvanlivost břitu 28 min.

Povlakováním bylo u obou nástrojových materiálů, stejně jako v předchozích případech, dosaženo podstatného zvýšení odolnosti břitu proti opotřebení. Povlakování nástroje z materiálu ASP 2030 vedlo při 50 m/min ke zvýšení opotřebení břitu nástroje na 93 minut (cca 3,3x trvanlivosti pro nepovlakovaný břit). Prodloužení trvanlivosti břitu z 33 na 51 minut potom bylo zaznamenáno u materiálu REX T15.



Obr.7 Závislost opotřebení hřbetu VB_{max} na čase obrábění pro $v_c=50$ m/min.

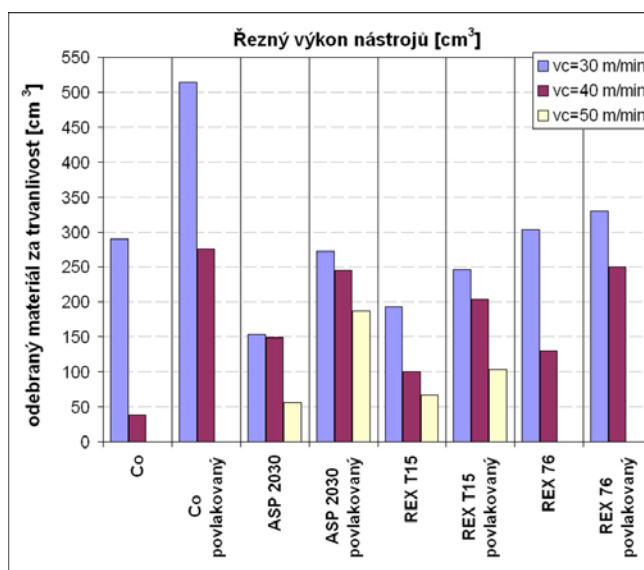
Řezný výkon nástrojů

Vzhledem ke skutečnosti, že během celého experimentu byly postupně nastavovány různé řezné rychlosti (otáčky nástroje), bylo dosaženo také různých rychlostí pracovních posuvů. Pro možnost přesnějšího vzájemného porovnání nástrojů byl zaveden parametr „řezný výkon nástroje“.

Řezný výkon udává velikost objemu odebraného materiálu danými podmínkami a daným nástrojem během jeho jedné trvanlivosti břitu. Je to tedy součin úběru materiálu v cm^3/min a trvanlivosti daného břitu nástroje.

Z této modifikace

naměřených výsledků opotřebení vyplývá, že nejvíce materiálu bylo v rámci trvanlivosti břitu jednoznačně dosaženo povlakovaným nástrojem Co Böhler při řezné rychlosti 30 m/min



Obr.8 Řezný výkon nástrojů pro různé řezné rychlosti.

(obr.8). Do dosažení kritéria opotřebení bylo odebráno více než 500 cm³ materiálu obrobku. Zvýšením řezné rychlosti u tohoto nástroje však řezný výkon výrazně poklesl, a to především pro nepovlakovaný typ. Z PM ocelí vykazoval nejlepší výkon nástroj REX 76 (cca 330 cm³ při 30 m/min). Naopak nejhorších řezných výkonů bylo dosaženo nástrojem Co při 40 m/min (cca 39 cm³). Relativně nízký řezný výkon vykazoval také nepovlakovaný nástroj ASP 2030.

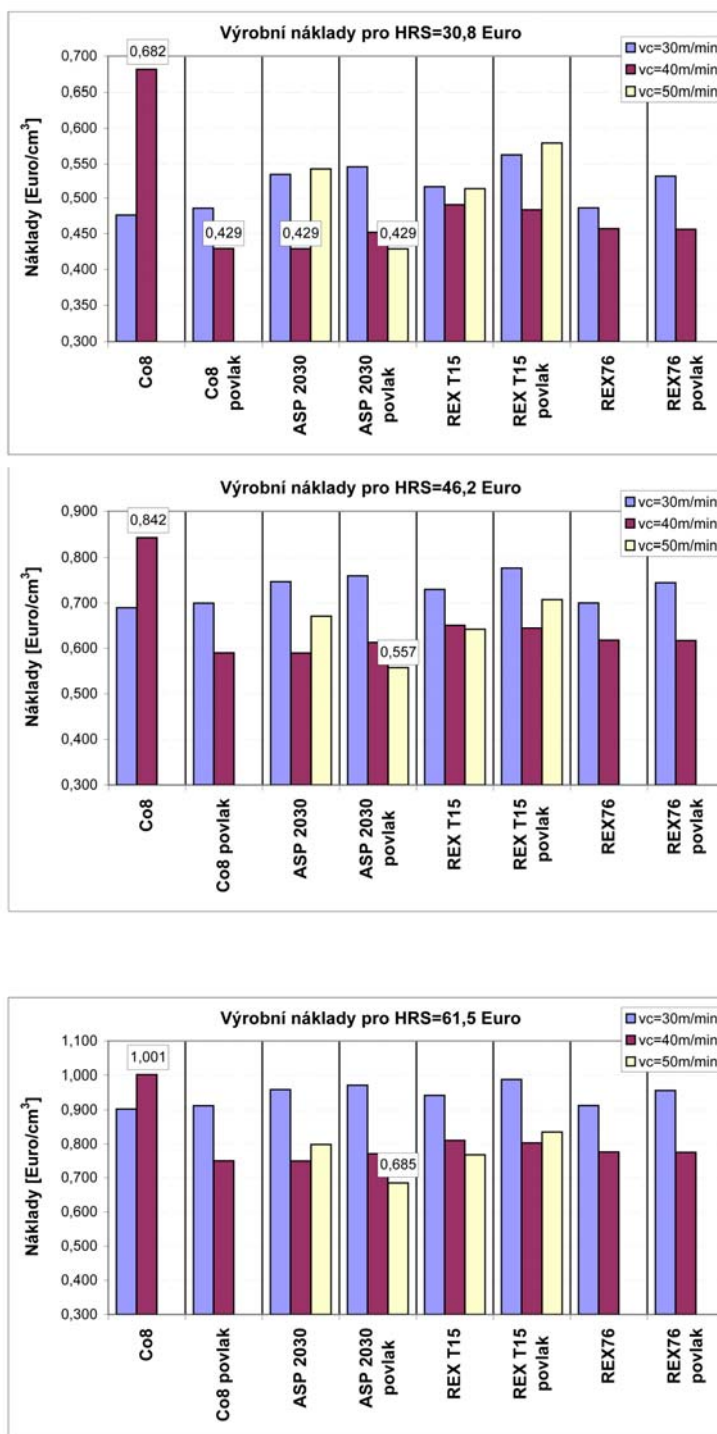
Pro všechny nástroje bylo společnou vlastností pokles objemu řezného výkonu nástroje s nárůstem řezné rychlosti – nejvýraznější byl tento pokles u materiálu Co. Naopak nejméně náchylný na změnu rychlosti byl materiál ASP 2030 nepovlak a především povlak. Jak již bylo naznačeno, vedlo povlakování nástroje u všech nástrojů ke zvýšení trvanlivosti břitu a stejně tak i řezného výkonu.

Výrobní náklady

Výrobní náklady byly určovány s cílem porovnat jednotlivé typy nástrojů v podmínkách praktických aplikací. Výrobní náklady byly proto součtem nákladů na nástroj a na provoz stroje. Na obr.9 je zaznamenána velikost výrobních nákladů jednotlivých případů obrábění, a sice pro tři různé modely pracovišť. Tyto modely jsou určeny třemi různými hodinovými režiiemi výrobního zařízení, nebo-li hodinovými režijními sazbami (HRS). Hodnoty HRS byly zvoleny jako 30,8 EUR/hod, 46,2 EUR/hod a 61,5 EUR/hod. Struktura nákladů byla sestavena na základě přesných informací dodaných výrobcem nástrojů a zkušeností získaných v několika průmyslových podnicích.

Z grafů výrobních nákladů je evidentní silná závislost mezi volbou materiálu řezného nástroje, řezných podmínek a úpravou břitu nástroje. Z rozboru výrobních nákladů plyne, že nejnižších nákladů bylo ve všech třech modelech dosaženo při obrábění povlakovaným nástrojem ASP 2030 při $v_c=50\text{m/min}$ (tedy při rychlosti, která se při návrhu zkoušek již zdála být pro HSS nástroje příliš vysoká!), a to od 0,429 do 0,685 Euro na odebrání

1 cm³ materiálu. Při těchto podmínkách je totiž kombinován



Obr.9 Výrobní náklady na odebrání 1 cm³ pro různé varianty hodinových režijních sazeb výrobních zařízení.

relativně vysoký řezný výkon s velkým úběrem materiálu. Naopak nejvyšších nákladů bylo dosaženo u nepovlakovaného nástroje Co při 40 m/min, u kterého převládal vliv velmi krátké trvanlivosti břitu (nízkého řezného výkonu) – 0,682 až 1,001 Euro/cm³.

Vliv povlaku na náklady obrábění nebyl jednoznačný. V některých případech vedlo povlakování ke snížení nákladů. Bylo to u materiálu Co, REX 76 a REX T15 při 40m/min a ASP 2030 při rychlosti 50 m/min. U zbylých podmínek (tedy především u rychlosti 30 m/min) bylo zaznamenáno naopak navýšení nákladů vlivem nanesení povlaku. Je to především v důsledku zvyšování ochranného účinku povlaku s rostoucí řeznou rychlostí.

4 Závěr

Nástroje z ocelí vyrobených metodou práškové metalurgie poskytují další zvyšování trvanlivosti břitu a řezného výkonu oproti klasickým HSS materiálům při obrábění titanových slitin. Zlepšené vlastnosti se projevují především při vyšších rychlostech (40 a 50 m/min). Stejný účinek byl zaznamenán i v případě použití ochranného povlaku nACRo®. Z hlediska trvanlivosti břitu a řezného výkonu byl pozitivní vliv povlaku zaznamenán u všech nástrojových materiálů a při všech řezných podmínkách. Účinek povlaku na ochranu břitu se zvyšuje s rostoucí řeznou rychlostí, resp. teplotou řezání.

Volba vhodných podmínek, řezného materiálu a úpravy břitu (povlak x nepovlak) silně ovlivňuje velikost výrobních nákladů. Správná volba materiálu nástroje je důležitá především při vyšších řezných rychlostech. Efekt povlakování na snižování nákladů byl pozorován jen u některých řezných materiálů. Při ceně povlakování je totiž pro snížení nákladů nezbytný výrazný vliv povlaku na zvýšení trvanlivost břitu nástroje.

5 Seznam použité literatury

- [1] MACEK, K; BENEŠ, V; JANOVEC, J; PLUHAŘ, J; ZUNA, P. *Kovové materiály*, České vysoké učení technické v Praze. 157s. 1991.
- [2] KVASNIČKA, I. *Soubor současných poznatků o obrábění titanových slitin nástroji s definovaným břittem*. 48s., 1990, Habilitační práce.
- [3] EZUGWU; E. O.; BONNEY, J.; YAMANE Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 134, p. 233-253.
- [4] Informace na HSS Forum [online], [cit. 25.11.2008]. Dostupné na WWW: www.HSS-forum.com
- [5] BACH, P; TRMAL, G J. *Economy of titanium milling*. Proceedings of International conference MATAR PRAHA 2008. Prague 16th-17th and Brno 18th September 2008. České vysoké učení technické v Praze. 157s. 1991.

Tyto výsledky byly získány za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci podpory projektu výzkumu a vývoje IM684077000.

