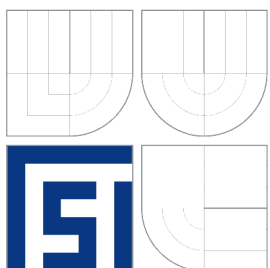


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA VLIVU OBRÁBĚNÉHO MATERIÁLU NA OPOTŘEBENÍ A TRVANLIVOST NÁSTROJE

ANALYSIS OF MATERIAL TO BE MACHINED INFLUENCE ON THE WEAR
AND TOOL DURABILITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Josef TOLKNER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Bohumil BUMBÁLEK, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Josef Tolkner

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

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

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

Analýza vlivu obráběného materiálu na opotřebení a trvanlivost nástroje

v anglickém jazyce:

Analysis of material to be machined influence on the wear and tool durability

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analýza se týká hodnocení chování slinutých karbidu při obrábění titanové slitiny Ti6Al4V. Povrch vytvořený obráběním ovlivňuje spolehlivost a životnost součástí. Odborné práce zaměřené do této oblasti uvádějí základní mechanismy vyvolávající degradaci povrchové vrstvy obrobku a současně doporučují jak zmenšovat tuto degradaci např. volbou rezných podmínek. Tím se mění plastická deformace, která ovlivňuje vlastnosti povrchové vrstvy i mechanismus opotřebení nástroje. Ukazuje se, že titanové slitiny jsou citlivější na volbu rezných podmínek než oceli.

Cíle diplomové práce:

1. Přehled titanových slitin
2. Vlastnosti titanu a jeho slitin z hlediska obrábění
3. Strukturně mechanické vlastnosti titanu
4. Deformační chování titanu a jeho slitin. Vznik nového povrchu
5. Metodika experimentálních prací, volba pracovních podmínek
6. Opotřebení nástroje při soustružení slitiny titanu
7. Závěr z provedených experimentů a doporučení pro výrobu

Seznam odborné literatury:

1. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění- kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1.vyd. Praha: Scientia, s.r.o. 1997. 857 s. Přel. z Modern Metal Cutting – Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
2. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Moderní řezné nástroje a nástrojové materiály. MM Průmyslové Spektrum – Speciální vydání. Zář 2004. 110s.. ISSN 1212-2572.
3. BEŇO, J. Teória rezania kovov. 1.vydání. Košice: Vienale. 1999. 255s. ISBN 80-709 429- 0.
4. SHAW, M.C.. Metal cutting principles. Edited by Clarendon Press – Oxford Reprinted. 1997. Oxford: University Press. 594p. ISBN 0-19-859020-2.
5. TRENT, E.M. and WRIGHT, P.K. Metal Cutting , 4th edition. Oxford: Butterworth, Heinemann, 2000. 446p. ISBN 0-7506-7069-X.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 25.11.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Technologie obrábění je multi disciplinární obor a společně s ekonomikou hraje stále významnější úlohu pro úspěch podniku na trhu výrobků a služeb. Současné studie ukazují, že to vyžaduje velmi úzké propojení technologií, managementu a informačních technologií např. integraci procesu výroby a plánování, simulace výrobních systémů, virtuální obrábění, kontrolní algoritmy apod. Klíčové změny vycházejí z požadavků na miniaturizaci výrobků, vyšší výrobní přesnost, užší tolerance, vyšší jakost povrchu, snižování hmotnosti součástí, snižování velikosti série a výrobních nákladů, flexibilitu výroby. Zpráva je zaměřena na problematiku obrábění titanových slitin. V teoretické části jsou uvedeny vlastnosti a rozdělení titanových slitin. V praktické části je potom proveden experiment zaměřený na vliv složení obráběného materiálu na opotřebenění nástroje. Výsledky experimentu a doporučení jsou uvedena v závěru zprávy.

Klíčová slova

titan, titanové slitiny, Ti6Al4V, soustružení, nano- titan, opotřebenění nástroje

ABSTRACT

Machining technology is a multi disciplinary field, and together with the economy are playing always more important role in the success of the enterprise market products and services. Recent studies show that it requires very close link between technology, management and information technology such as the integration process and production planning, simulation of manufacturing systems, production flexibility, virtual machines, control algorithms, etc. The key changes are based on the requirements for miniaturization of products, higher production accuracy, closer tolerances, better surface quality, part of weight reduction, reduction of lot size and reducing production costs. The report is focused on machining titanium alloys. In the theoretical part are presented the properties and the distribution of titanium alloys. In the practical part is then carried out an experiment aimed to influence the composition of workpiece material on tool wear. Experiment results and recommendations are listed at the end of this report.

Key words

titanium, titanium alloy, Ti6Al4V, turning, nano- titanium, tool wear

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TOLKNER, Josef. *Analýza vlivu obráběného materiálu na opotřebení a trvanlivost nástroje*. Brno 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 77 s. příloh. Vedoucí práce: prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.

BIBLIOGRAPHIC CITATION

TOLKNER, Josef. *Analysis of material to be machined influence on the wear and tool durability*. Brno 2012. Master's thesis. Brno university of technology, Faculty of mechanical engineering, Institute of Manufacturing Technology. 77 pgs. appendices. Supervisor: prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Analýza vlivu obráběného materiálu na opotřebení a trvanlivost nástroje** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Josef Tolkner

PODĚKOVÁNÍ

Tímto chci poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Prof. Ing. Bohumilu Bumbálkovi, CSc. za cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce a také za poskytnutí důležitých literárních zdrojů, ze kterých jsem čerpal.

Děkuji také panu Pavlu Svobodovi, který mi pomohl realizovat praktickou část a provedení experimentu na školní dílně.

Děkuji i panu doc. Ing. Antonu Humárovi, CSc. za poskytnutí řezných materiálů a konzultaci jejich charakteristiky dle normy ISO 513.

Dále děkuji panu Ing. Leošovi Bumbálkovi, PhD. a Milanu Rusiňákovi za pomoc s provedením zkoušek drsnosti obrobených vzorků testovaných materiálů.

Děkuji i panu Prof. Ing. Ladislavu Zemčíkovi, CSc. za poskytnutí vzorku materiálu intermetalické slitiny titanu a veškeré informace o jeho vlastnostech a použití.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům za finanční a morální podporu při mých studiích.

Děkuji paní Dagmar Polzerové za pořízení snímků opotřebení břitových destiček a soustružených ploch.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ	7
OBSAH.....	8
ÚVOD	10
1 Strategie technologie obrábění.....	12
1.1 Technologie obrábění při přechodu od mikro k nanotechnologii.....	12
1.1.1 Nanomateriály.....	13
1.1.2 Nanokompozity.....	14
1.2 Integrita povrchu.....	15
2 Titan	17
2.1 Historie objevu a výroby titanu	17
2.2 Komerčně čistý titan (CP)Ti	18
2.2.1 Obecné vlastnosti (CP)Ti.....	18
2.2.2 Struktura (CP)Ti	20
2.2.3 Použití (CP)Ti.....	20
2.3 Slitiny titanu.....	21
2.3.1 Slitiny α	23
2.3.2 Slitiny pseudo α	24
2.3.3 Slitiny β	24
2.3.4 Slitiny pseudo β	25
2.3.5 Slitiny $\alpha + \beta$	25
2.3.6 Intermetalické slitiny (γ slitiny titanu).....	29
2.4 Nanostrukturovaný titan (N)Ti	32
2.4.1 Vlastnosti nano- titanu.....	32
2.4.2 Výroba (N)Ti	32
2.4.3 Struktura (N)Ti	34
2.4.4 Použití (N)Ti	34
3 Technologie obrábění titanu a jeho slitin.....	35
3.1 Obrobitelnost	35
3.1.1 Doporučení při obrábění titanu a jeho slitin	36
3.2 Mechanismus tvorby třísky.....	36
3.3 Jakost povrchové vrstvy.....	38
3.3.1 Změny v povrchové vrstvě při obrábění	39

3.3.2	Drsnost povrchu	42
3.5	Opotřebenění nástroje	44
3.5.1	Doporučení ovlivňující trvanlivost nástrojů	46
4	Experimentální část	49
4.1	Metodika hodnocení parametrů zkoušek	49
4.1.1	Obecné podmínky zkoušek	49
4.1.2	Dosažené výsledky měření	51
4.2	Drsnost obrobeného povrchu titanové slitiny Ti6Al4V	56
4.2.1	Dosažené výsledky měření drsnosti Ti6Al4V	56
4.3	Intermetalická slitina TiAl	58
4.3.1	Obecné podmínky zkoušek	58
4.3.2	Dosažené výsledky měření	59
4.4	Drsnost obrobeného povrchu titanové slitiny Ti46Al7Nb0,7Cr0,1Si0,2Ni	62
4.4.1	Dosažené výsledky měření drsnosti na intermetalické slitině	63
5	DISKUZE	65
5.1	Porovnání výsledků měření s literaturou (viz. literární zdroj [22])	65
5.2	Doporučení	67
5.3	Hodnocení	67
	ZÁVĚR	68
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A PŘÍLOH	74

ÚVOD

Za posledních 50 let zaznamenala technologie obrábění velký pokrok. Zásadní změny vycházely z požadavků na zmenšování rozměrů výrobku, vyšší přesnost výroby, užší tolerance, lepší jakost povrchu, snižování hmotnosti a nákladů apod. Takové požadavky měly a mají přímý vliv na proces řezání, především na nástroje a nástrojové materiály, materiály obrobku a procesní kapaliny. Významným prvkem tohoto pokroku je vývoj nástrojových materiálů (slnuté karbidy, cermety, řezná keramika, kubický nitrid boru, polykrystalický diamant) a taktéž i vývoj materiálů obrobku (niklové a titanové slitiny, keramika,...) Hlavní pozornost byla zaměřena na obrobky pracující v extrémních podmínkách zatěžování, na nástrojové materiály, na užívání minimálního množství procesních kapalin, na jakost obrobků a na využívání přesných mikro procesů řezání. Řada výrobních podniků soustřeďuje svou pozornost při zavádění inovací na materiály obrobků. To se projevuje především v automobilovém a leteckém průmyslu, kde jsou využívány lehké slitiny, jejichž aplikace znamená snížení hmotnosti a energie při jejich zpracování. Pro obrábění materiálů na turbíny, pro obrábění titanu a jeho slitin a niklových slitin se využívají jemnozrnné slnuté karbidy nebo keramika zesílená whiskery, polykrystalický diamant či kubický nitrid boru, které umožňují výrazné zvýšení rychlosti úběru materiálu.

Titan- aluminidy vyžadují zvýšené požadavky na proces řezání. Řezání těchto materiálů je velmi obtížné proto, že tyto materiály mají nízkou tepelnou vodivost a chovají se jako křehké a mají vysokou chemickou afinitu ke všem známým nástrojovým materiálům a také ke vzdušným plynům za zvýšených teplot, což může způsobit i jejich vzplanutí. Z důvodu křehkého chování titan- aluminidu je nutné nejen volit správně typ nástrojového materiálu, ale také vlastnosti povrchu po obrábění. Na povrchu těchto slitin se mohou po jejich obrobení objevit mikro trhliny a nalepené částice (nárůstky) kolmo na stopy posuvu. Takové defekty zhoršují opotřebení nástroje. Defekty na povrchu součástí se mění se stupněm křehkosti materiálu, který má malou, nebo žádnou odolnost proti plastické deformaci. U těchto materiálů je tedy nutné řešit dva problémy. Prvním je malá trvanlivost nástrojů a druhým je nízká jakost obrobeného povrchu.

Řešené téma je velmi perspektivní z důvodu stále častějšího výskytu titanových materiálů na širším poli strojírenského odvětví. Tyto moderní materiály se dnes nepoužívají pouze v leteckém, kosmonautickém a raketovém průmyslu, jak tomu bylo dříve. Pro tyto účely byly titanové materiály původně vyvíjeny, postupem času však pronikly i do dalších oblastí vědy a techniky. S jejich rostoucí výrobou a spotřebou klesá jejich cena a stávají se dostupnějšími. Stále častěji se vyskytují především ve zdravotnictví, sportovním náčiní, bižuterii, automobilovém průmyslu, v gastronomii a potravinářském průmyslu, v chemickém průmyslu a různých dalších oblastech. V řadě případů jsou povrchy takových součástí dokončovány obráběním. Je proto nutné zaměřit pozornost na technologii obrábění takových materiálů.

V první části je zpracována strategie technologie obrábění a historie zpracování titanu. Dále je charakterizován titan jako čistý kov, běžně používané titanové slitiny, intermetalické slitiny

titanu a nanostrukturované slitiny titanu. U všech jsou uvedeny jejich vlastnosti a možné způsoby použití.

V druhé části je zpracován experiment, který je zaměřen na opotřebení a trvanlivost nástroje při podélném soustružení titanové slitiny Ti6Al4V. Ze získaných dat jsou zpracovány průběhy křivek opotřebení pro jednotlivé nástrojové materiály, sloupkový graf trvanlivosti nástrojových materiálů a pro nejvýhodnější materiál je dále zpracována rychlostní charakteristika a z ní odvozena T_f-v_c závislost pro tento nástrojový materiál, který vykazoval nejlepší vlastnosti při obrábění Ti6Al4V. Pro tři nástrojové materiály, které byly vyhodnoceny jako vhodné pro obrábění této slitiny, byly následně provedeny zkoušky drsnosti.

Nástrojový materiál, který vykazoval největší trvanlivost při obrábění Ti6Al4V byl dále použit i při zkouškách na vzorku intermetalické slitiny titanu. Ze získaných hodnot opotřebení jsou vyneseny křivky opotřebení pro dvě řezné rychlosti, sloupkový graf trvanlivosti nástroje a zkoušky drsnosti obrobených ploch při obou řezných rychlostech.

V závěru zprávy jsou dosažené výsledky měření porovnány s výsledky, které jsou uváděny v jiné literatuře. Tyto výsledky jsou porovnány i graficky. Dále jsou doporučeny další řezné materiály, které by si zasloužily pozornost při provádění dalších obdobných zkoušek.

1 STRATEGIE TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

Vývojové trendy současného průmyslu jsou přednostně orientovány na zákazníka či odběratele, což je podmíněno velkým množstvím konkurence v oboru a naší „konzumní“ společností. Tomu se musí přizpůsobit i management všech výrobních společností, které chtějí uspět na současném trhu. Předpokladem úspěchu je především spokojený zákazník, u něž spolupráce s firmou předčí jeho očekávání, a také spokojení zaměstnanci. Pro splnění tohoto základního faktoru úspěchu je potřeba dodržovat také jisté požadavky na podnik, mezi něž dnes patří především variabilita výroby, schopnost včas reagovat na změny, rychlost výrobních procesů, spolehlivost, optimální využití výrobních kapacit, nízká cena a celková vizáž firmy, přičemž jakost výrobků a kvalita poskytovaných služeb je samozřejmostí. Takovým vysokým nárokům je mnohdy obtížné vyhovět, zvláště uvážíme-li, že se pohybujeme v prostředí výroby nazývaném Just in time, ve kterém prakticky neexistují sklady a vše tedy závisí na dokonalém materiálovém a výrobním toku. Aby vše probíhalo jak má a aby se předcházelo případným kolizním situacím ve výrobním procesu, je potřeba celý proces výroby naplánovat. Na dodržování plánu dohlíží interaktivní kontrola celého výrobního systému, která upozorňuje na případné odchylky. Celý systém může být propojením všech článků výrobního řetězce informačními technologiemi do značné míry zjednodušen, což umožňuje snadnou kontrolu, schopnost pružně reagovat na změny či odchylky od plánu a zařazovat novou výrobu.

Trend vývoje současné technologie obrábění je podmíněn nároky na snižování výrobních časů, vyšší produktivitu práce, snižování výrobních nákladů, nároky na jakost a spolehlivost poskytovaných služeb zákazníkům, což podněcuje soupeřivost výrobních podniků v boji o zákazníka. Aby se urychlil proces obrábění, je potřeba zvýšit rychlost úběru materiálu. Jednou z možností zvýšení rychlosti úběru materiálu je zvýšit řeznou rychlost. Moderní je dnes zařazovat do výrobního programu tzv. vysokorychlostní obrábění HSM (high speed machining) či HSC (high speed cutting). Rozvoj vysokorychlostního obrábění umožnilo vyvinutí nových řezných materiálů, mezi něž patří SK (slnuté karbidy), cermety, KNB (kubický nitrid boru), PKD (polykrystalický diamant) a taktéž vývoj nových obráběcích strojů, jejichž vřetena dosahují otáček v řádu desetitisíců za minutu.

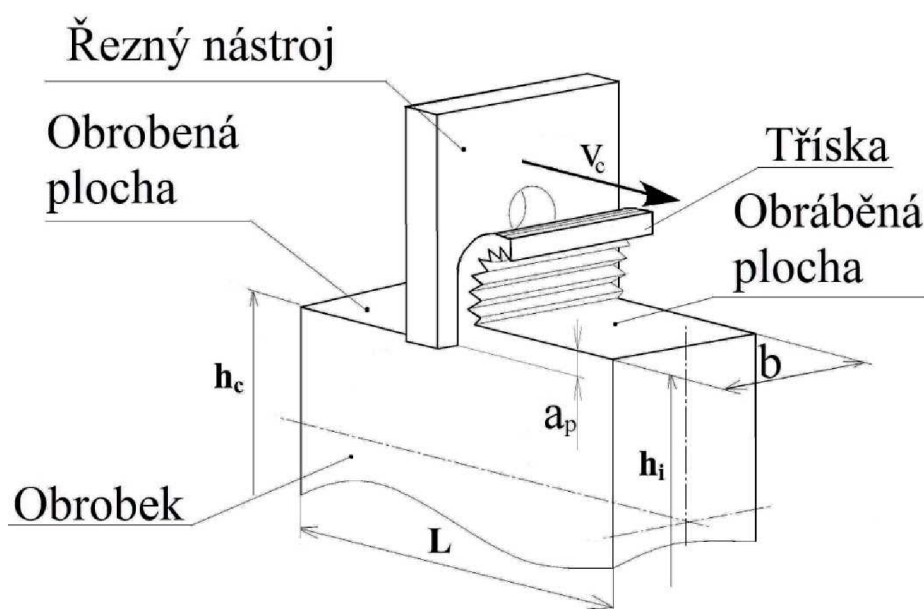
1.1 Technologie obrábění při přechodu od mikro k nanotechnologii

Je nutné zvažovat budoucí potřeby výrobních technologií z hlediska perspektiv technologie obrábění, která patří mezi významné dokončovací technologie. Důvody, proč je nutné řešit tyto problémy, vycházejí z následujících požadavků:

- zmenšování rozměru součástí (miniaturizace),
- vysoká požadovaná jakost výrobků,
- vyšší výrobní přesnost a zmenšování tolerancí,
- snižování hmotnosti výrobků,

- snižování výrobních nákladů,
- environmentální aspekty výroby.

Takové požadavky mají přímý vliv na proces řezání, především na volbu metody obrábění, na volbu nástroje, nástrojového materiálu, na materiál obrobku a řezné prostředí. Tyto požadavky se promítají i na obráběcí stroje, které zaznamenaly výrazný pokrok jak v konstrukci, tak i v systémech řízení. Ústředním cílem technologie obrábění je provozní schopnost výrobků a optimalizace výrobního systému. Vývoj výrobků a jejich konstrukce jsou významným předpokladem do budoucna jako schopnost podniku uspět na trhu v boji s konkurencí. To ukazuje na nutnost vidět a využívat možnosti, které přináší mikro a nanotechnologie. V praxi to znamená vstupovat do fáze vývoje výrobku, zohlednit použité materiály a výrobní procesy tak, aby se staly vhodnými pro připravovanou výrobu.



Obr. 1 Obecné schéma řezání, podle [11].

S ohledem na globální ekonomiku a sociální přínos nanotechnologie je nutné stanovit a formulovat strategii vysoce přesné výroby. Nanotechnologie je významná i z toho hlediska, že se dá uplatnit v hromadné a nákladově nižší výrobě. Požadavky trhu na miniaturizaci rostou a je třeba hledat technologii, která je zabezpečí.

1.1.1 Nanomateriály

Za nanomateriál lze považovat takový materiál, u něž rozměry částic (zrn) se pohybují v řádech jednotek až nejvýše stovek nanometrů. Díky tomu se mění základní specifické vlastnosti materiálu, především pevnostní charakteristiky, zlepšení tepelné odolnosti, vzrůst

tvrdosti, zlepšení ořezavzdornosti, nižší propustnost par, plynů a kapalin (tzv. bariérový efekt), lepší odolnost proti UV záření, snížení koeficientu povrchového tření, snížení hodnoty koeficientu roztažnosti, menší hořlavost, antimikrobiální vlastnosti, rozměrová stálost, větší odolnost proti šíření trhlin. Tyto vlastnosti mají vliv nejen na životnost výrobků, ale jsou důležité i z hlediska konečné aplikace. Nanomateriály budou nacházet stále větší využití v ořezavzdorných a korozivzdorných povlacích, u nových keramických materiálů pro výrobu vodních trysek, injektorů, opláštění zbraňových systémů či povlakování elektrod v energetických zařízeních. Logické obvody současnosti se budou nahrazovat optickými spoji. Při výrobě pružných obrazovek, displejů a velkokapacitních pamětí budou využívány nanotrubičky. Další využití naleznou nanotrubičky při uskladňování vodíku v palivových člancích. Výzkum bude zaměřen především na přípravu nanočástic, dispergační proces a na studium vlivu modifikujících látek na konečné vlastnosti nanokompozitů [6,31].

Již dnes nanomateriály nalézají své uplatnění v neinvazivní medicíně. Nejdále je jejich aplikace v oblasti zachovné stomatologie, v oblasti kostních náhrad a u dentálních implantátů. U nanokompozitů se jedná převážně o kompozity s uhlíkovou či polymerní maticí vyztuženou uhlíkovými vlákny. Mají perspektivu ve využití při konstruování kostních a kloubních protéz a kostních implantátů. Protože nanomateriály vynikají vysoce specifickými a jedinečnými vlastnostmi, které běžné materiály nemají, lze předpokládat, že systémy, ve kterých se budou tyto materiály využívat, naleznou v medicíně široké uplatnění. Je třeba brát v potaz, že ačkoli se s příchodem nových materiálů objevily i nové materiálové vlastnosti, jejich použití představuje díky jejich bioaktivitě i jistá, ne zcela probádaná, rizika. Medicína na nové materiály a výrobky již dlouhou dobu čekala a dnes je v podstatě na počátku jejich aplikace. Všechny materiály, používané v medicíně, musí být netoxické a biokompatibilní s lidskou tkání [31].

1.1.2 Nanokompozity

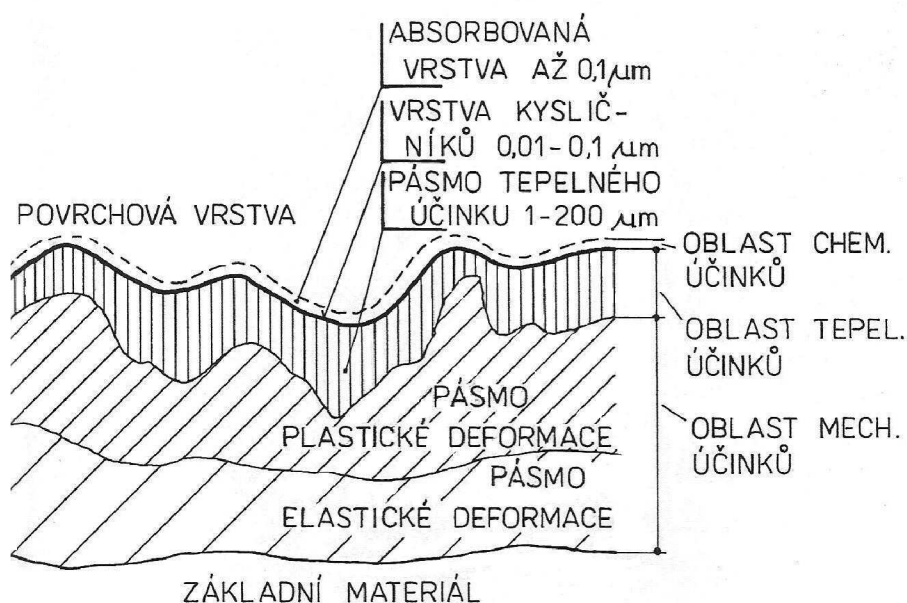
Za nanokompozity můžeme považovat materiály obsahující dvě nebo více různých složek, přičemž aspoň u jedné se velikost jejich částic pohybuje v řádu jednotek až desítek nanometrů. Mnohdy se jedná o aktivní nanočástice, tj. částice, u nichž se projevují specifické magnetické, optické, elektrické či jiné vlastnosti, které jsou rozptýlené rovnoměrně nejčastěji v matici na bázi polymeru. Aktivní složka ve formě nanočástic se používá pro její odlišné fyzikální vlastnosti ve srovnání s běžnými plnivými. Na vlastnosti nanokompozitů má vliv nejen jejich složení, ale také velikost částic, jejich morfologie a uspořádání ve struktuře. Oblast použití kompozitních nanomateriálů je velmi široká. Využívají se např. k ukládání informací, magnetickému chlazení, k metodám zobrazování v medicíně, u čidel, u elektromechanických a magnetomechanických měničů, u endoprotéz, antiseptických vláken, a různé další. Jistým problémem je výroba takových materiálů z hlediska rovnoměrného rozptýlení nanoplniv v matici a jejich přilnavost k polymeru. Nanokompozity mají velkou perspektivu v oblasti konstrukčních plastů, které vykazují vyšší tvrdost a pevnost, tvarovou stálost i při vyšších teplotách a nižší hořlavost. K nanokompozitům řadíme také tzv. „chytré či inteligentní“ laky a povlaky (clearcoaty), pokud ovšem obsahují nanočástice. Inteligentní nátěry se vyznačují

novými specifickými vlastnostmi a funkcemi. Mohou reagovat na vnější podněty s okolním prostředím. Mezi jejich nejvýznamnější vlastnosti patří „samoopravitelnost“ (po poškrábání se vlivem působení vnějšího prostředí poruchy laku zacelují), antistatické vlastnosti (neulpívá na nich prach ani kapaliny), odolnost proti agresivnímu prostředí, optická aktivita nebo elektroaktivita. Své využití dnes nacházejí především v automobilovém a zbrojním průmyslu [31].

„Nanokompozity jsou reálnou aplikací nanomateriálů a nanotechnologií v řadě významných oborů techniky. Tyto materiály často s novými vynikajícími vlastnostmi přinášejí do řady odvětví žádoucí inovace a nezachycení těchto trendů může negativně ovlivnit budoucí konkurenceschopnost např. strojírenství, automobilového průmyslu, výroby nátěrových hmot, stavebnictví a atd. ČR má dobré předpoklady pro efektivní rozvoj aplikací moderních nanokompozitů. Možný směr vývoje nanokompozitů by mohla být i možnost aplikace nanovláken. Tato vlákna na bázi různých polymerů i anorganických sloučenin (TiO_2 , ZrO_2 , TiN) jsou v ČR vyvíjena na Technické Univerzitě v Liberci v úzké spolupráci s firmou Elmarco.“ [31]

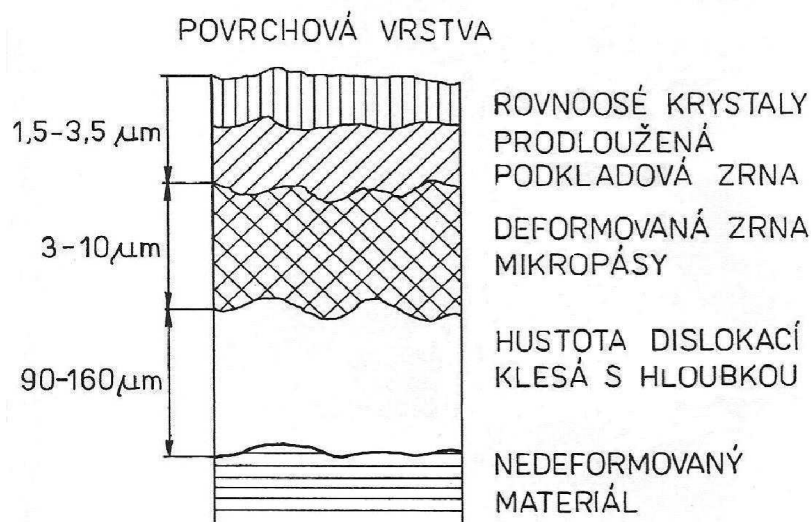
1.2 Integrita povrchu

Obrábění je stále nejdůležitější metoda dokončování povrchu přesných strojních součástí. Integrita povrchu je komplexní pojem, který zohledňuje celou historii vzniku povrchu hotové součásti, tedy jednotlivé operace a jejich vliv na výsledné vlastnosti povrchové vrstvy jako je textura, zbytková pnutí, zpevnění apod. a následné využití těchto vlastností ve funkci hotové součásti. Je důležité si uvědomit, že každá technologická operace má vliv na výsledné vlastnosti povrchové vrstvy [3,4].



Obr. 2 Povrchová vrstva obrobku [4].

Vlastnosti povrchové vrstvy obrobku lze ovlivnit zvolením vhodných řezných podmínek, a to především geometrií nástroje, posuvem, hloubkou řezu, řeznou rychlostí, dále způsobem upnutí součásti a též zvolením vhodného nástrojového materiálu pro daný materiál obrobku.



Obr. 3 Pásma ovlivnění povrchové vrstvy obrobenej plochy [4].

Jako příklad lze uvést požadavek na zbytková tlaková napětí v povrchové vrstvě ložiskových kroužků. Nedodržení technologického postupu výroby (tepelné zpracování, vyšší řezná rychlost, větší hloubka řezu...) u takových součástí znamená zásadní změnu požadovaných vlastností v povrchové vrstvě. Tato změna nemusí být na první pohled patrná, protože textura (drsnot a vlnitost povrchu) může zůstat nezměněna. Katastrofický dopad to ale může mít na požadovaná zbytková tlaková napětí, která mohou vlivem vyšší tepelné energie buďto zcela vymizet, nebo se změnit na tahová. To vede k předčasné degradaci povrchu a zkrácení životnosti dílce nebo dokonce až k prasknutí celé součásti.

Je proto nutné brát zřetel na celou řadu faktorů, které působí na součást při jejím provozu, uvážit vlastnosti, které musí plnit a jim přizpůsobit vhodný technologický postup výroby a ten bezpodmínečně dodržovat.

Zvýšené nároky na proces řezání vyžadují zvláště materiály obtížně obrobitelné, mezi něž patří i titan- aluminidy. Titan a jeho slitiny se řadí k těžkoobrobitelným materiálům z několika důvodů:

- nízká tepelná vodivost,
- křehké chování,
- vysoká chemická afinita ke vzdušným plynům a uhlíku (H, N, O a C),
- chemická afinita k nástrojovým materiálům, obsahující sloučeniny titanu.

Při obrábění titanu a jeho slitin se vyskytují dva zásadní problémy, a to nízká trvanlivost nástrojů a nízká kvalita povrchu obrobenejch ploch.

2 TITAN

Strojírenská výroba (především letectví) již dlouho hledala materiál, který by měl vlastnosti podobné oceli, tedy vysokou pevnost, tvrdost, tvárnost, kujnost, svařitelnost a který by měl především nižší měrnou hmotnost (hustotu) než železo. Aby neztrácel své vlastnosti za vysokých teplot, aby odolával korozním vlivům prostředí a aby se nerozpouštěl v kyselinách. Zároveň, aby se na dostupných místech na zemi, nalézalo dostatek surovin pro jeho výrobu. Všechny tyto požadavky splňuje právě titan. Titan je moderní kov, který byl do výroby zaveden až v padesátých letech dvacátého století. Nalézá své využití v leteckém průmyslu, v kosmonautice, medicíně a dnes už i v gastronomii a automobilovém průmyslu. Horninou pro výrobu titanu je rutil, který obsahuje až 90% TiO_2 a ilmenit, ve kterém je obsaženo 40-60% TiO_2 . Uměle vyrobený oxid titaničitý je bílý prášek, nazývaný „titanová běloba“ a je využíván jako pigment v nátěrových hmotách. Pro jeho výborné krycí vlastnosti je nazýván „králem pigmentů“ [5,23,32].



Obr. 4 Rutil [30].



Obr. 5 Ilmenit [27].



Obr. 6 TiO_2 „titanová běloba“ [32].

2.1 Historie objevu a výroby titanu

Už v roce 1790 byl objeven Angličanem Viliamem Gregorem na jihozápadě Anglie černý písek (ilmenit), který reagoval na magnet. Gregor tento písek nechal rozpustit v kyselině chlorovodíkové a sírové, roztok nechal odpařit a výsledkem byl bílý prášek- oxid titaničitý. O pět let později byl tento prášek označen německým chemikem Martinem Klaprothem za nový prvek a pojmenován titan po bájných postavách řecké mytologie- Titánech. Až v roce 1875 se podařilo ruskému profesorovi Kirišlovovi získat laboratorně čistý titan. Téměř čistý titan (98%) se podařilo získat Francouzovi Muassanovi v roce 1885 a v roce 1910 byl izolován titan s čistotou 99,9% Američanem Hanterem. Jeho titan byl však křehký, protože obsahoval karbidy a nitridy titanu. Až v roce 1947 v Nevadě (USA) bylo vyrobeno prvních 45kg komerčně čistého titanu, a to metodou založenou na magnetickém principu. Během třech let tato produkce vzrostla na 700 tun ročně. Veliká naleziště titanové rudy byla objevena v Ilmenských horách na Urale. Podle toho byla ruda pojmenována na ilmenit. Tvrdí se, že výrobu komerčně čistého titanu jako první zvládli Rusové a že její postup byl za doby studené války špionážně odhalen a převeden do západní Evropy a USA. Tomu by nasvědčovaly i úspěchy kosmického programu sovětů v padesátých letech. V Rusku byla výroba titanu

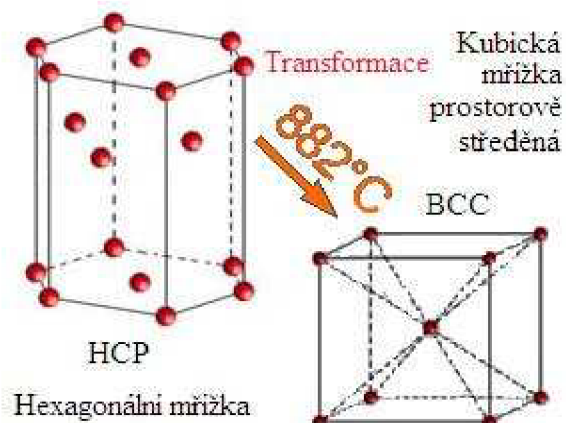
v roce 1952 dále zdokonalena metodou chlоровání titanové strusky na chlorid titaničitý, který je pak dále redukován hořčíkem na čistý titan. V České republice nejsou titan ani jeho slitiny normovány. V malé míře, ale dobré kvalitě byla jeho výroba zvládnuta v devadesátých letech v Poldi Kladno a.s., kde se vyráběl čistý titan a dvě slitiny typu $\alpha+\beta$, odpovídající ruskému značení VT6 a VT3-1. Tyto materiály byly u nás vyráběny pro potřeby chemického průmyslu. K jejich výrobě byly používány ruské suroviny. V současnosti se u nás už titan ani jeho slitiny nevyrábí [5,15,23,32].

2.2 Komerčně čistý titan (CP)Ti

Titan je světle šedý kov s ocelovým leskem. Je to polymorfní kov, který se může vyskytovat ve dvou alotropických modifikacích. Za normální teploty je přítomen ve fázi α s hexagonální mřížkou HCP a ta je stabilní až do teploty 882°C, kdy překrystalizuje na fázi β s krychlovou, prostorově středěnou mřížkou BCC, která je stabilní až do teploty tavení 1668°C [5,15].

Tab. 1 Teploty tavení a rekrystalizace titanu [5]

Teplota překrystalizace	885 °C
Teplota tavení	1668 °C
Bod varu	3210 °C



Obr. 7 Překrystalizace čistého titanu z α fáze na β fázi při 882°C, podle [13].

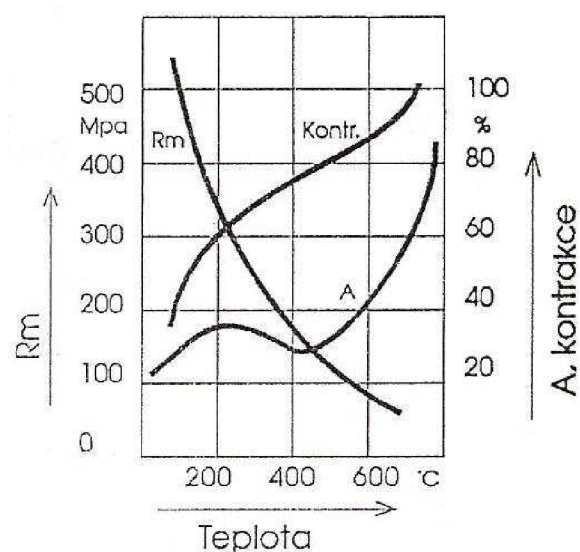
2.2.1 Obecné vlastnosti (CP)Ti

Mezi přednosti titanu patří především nízká měrná hmotnost (hustota), vysoká měrná pevnost, dobrá tvárnost a kujnost. Je odolný proti korozi na vzduchu, v říční a mořské vodě. Ve většině kyselin je stabilní- úbytek v řádu setin až desetin milimetrů ročně. Výjimkou je kyselina fluorovodíková (HF), ve které se při vyšší koncentraci titan rozpouští podobně jako led v horké vodě. Prudce reaguje také na ohřáté roztoky chloru. Při vyšších teplotách čistý titan ztrácí pevnost, lze jej použít tedy jen na konstrukce vystavené malým zatížením a provozním teplotám nejvýše 300°C. Při nízkých teplotách se u titanu zvyšuje mez pevnosti, mez kluzu i modul pružnosti a snižuje se tažnost, kontrakce i vrubová houževnatost. Lze jej použít také při teplotách pod bodem mrazu. Čistý titan je dobře svařitelný elektrickým obloukem v ochranné atmosféře inertního plynu- argonu. Nevýhodou titanu a jeho slitin jsou vysoké náklady na jeho výrobu a zpracování a obtížná obrobiteľnost. Při teplotách nad 600°C reaguje

se vzdušnými plyny a oxiduje. Vrstva oxidů se pak obtížně odstraňuje. Titan má špatnou elektrickou i tepelnou vodivost. Má také vysoký součinitel smykového tření. Jediné mazivo, které má schopnost zabránit zadírání je grafit nebo molybdenit. Jak již bylo řečeno, titan má vysokou afinitu ke vzdušným plynům. To způsobuje, že částice titanu mohou být zapáleny a hořet. Je proto nutná prevence proti požáru- nejčastěji používáním chladicích kapalin na bázi vody. Třísky titanu se po ukončení práce na stroji musí ihned odvážet na označené místo mimo pracoviště. Další charakteristiky (CP)Ti jsou uvedeny na obrázku 9 a v tabulkách 2, 3 a 4 [2,5,23,32].



Obr. 8 Krystaly čistého titanu [32].



Obr. 9 Mechanické vlastnosti titanu v závislosti na teplotě [5].

Tab 2. Chemické složení komerčně čistého titanu (CP)Ti s čistotou 99,87% [6]

N	O	C	Fe	Al	Cr	Ti
0,004	0,068	0,008	0,03	0,01	0,01	zbytek

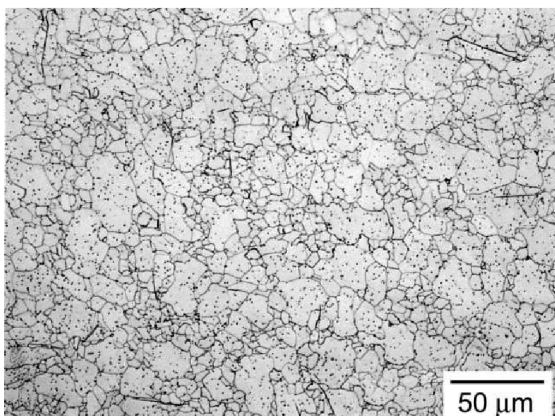
Tab. 3 Mechanické vlastnosti čistého titanu (CP)Ti [5,6,23]

Materiál čistota	Zpracování	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]	Modul pružnosti E [GPa]	Tvrdość HV30
(CP)Ti 99,87%	žiháno na 649°C po dobu 1 hodiny	212	365	51	71	100	130
(CP)Ti 99,6%	neuveđeno	170	240	25	-	103	-
(CP)Ti 99%	neuveđeno	480	550	15	-	104	-
(CP)Ti 99,3%	neuveđeno	417	540	21,6	54,6	105	190

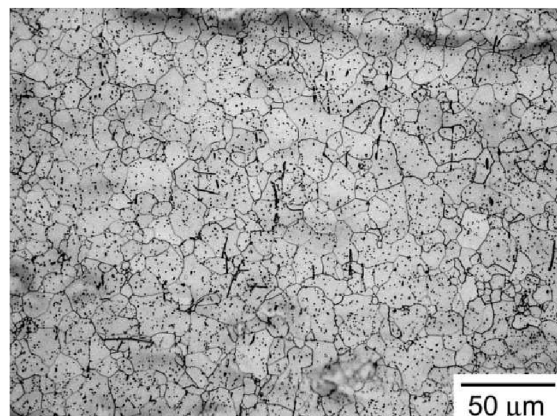
Tab. 4 Fyzikální vlastnosti čistého titanu (CP)Ti [23]

Hustota ρ [g.cm ³]	Měrná tepelná kapacita c_p [kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ_t [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Koeficient vedení tepla a [m ² .s ⁻¹]	Koeficient pohlcování tepla H [J ² .m ⁻⁴ .s ⁻¹ .K ⁻²]	Koeficient lineární teplotní roztažnosti α [K ⁻¹]
4,51	0,535	17	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$41,4 \cdot 10^{-6}$	$9,4 \cdot 10^{-6}$

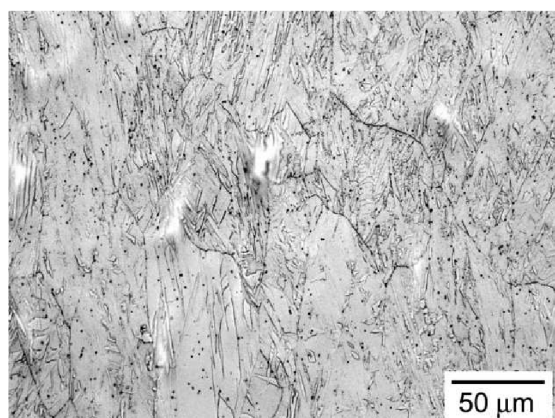
2.2.2 Struktura (CP)Ti



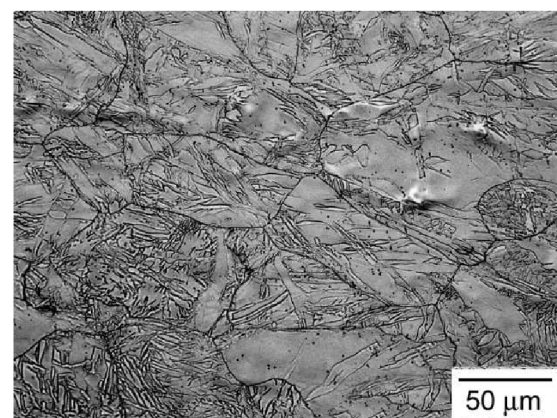
Obr. 10 Počáteční mikrostruktura (CP)Ti (podélný směr) [6].



Obr. 11 Počáteční mikrostruktura (CP)Ti (příčný směr) [6].



Obr. 12 Mikrostruktura (CP)Ti po válcování za studena (podélný směr) [6].



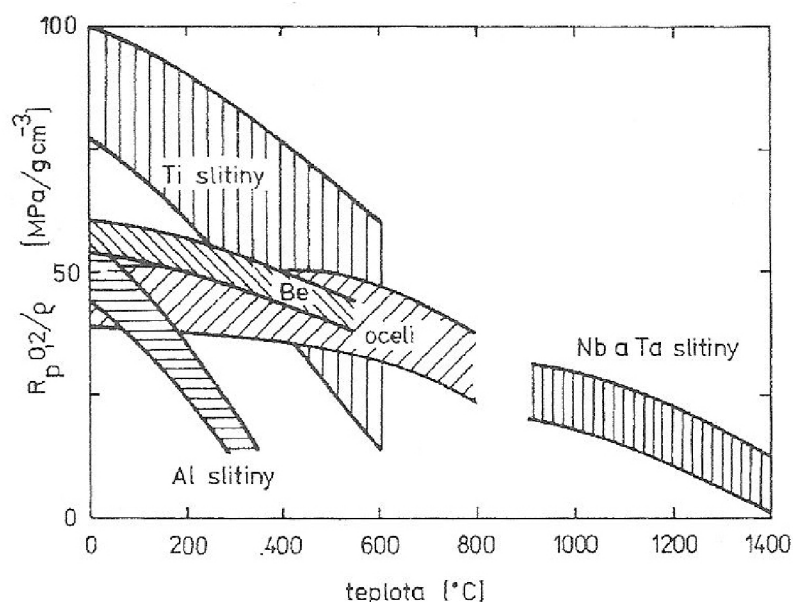
Obr. 13 Mikrostruktura (CP)Ti po válcování za studena (příčný směr) [6].

2.2.3 Použití (CP)Ti

Pro svou vysokou biokompatibilitu, netoxičnost a odolnost proti korozi se čistý titan používá ve zdravotnictví, ve farmaceutickém, v potravinářském, papírenském, textilním a chemickém průmyslu. Je vhodný pro prostředí s vlhkým chlorem a jeho sloučeninami např. při výrobě plastů a různých chemikálií. V galvanovnách a mořárnách se používá na koše na součásti, držáky elektrod a tepelné výměníky. Využívá se při výrobě odstředivých čerpadel, reakčních nádob, armatur, měřících a regulačních přístrojů, kostních implantátů a dalších [15,23].

2.3 Slitiny titanu

Jak již bylo zmíněno, čistý titan má jednu velkou nevýhodu a tou je poměrně nízká mez kluzu a mez pevnosti. Aby se zvýšila pevnost, případně jinak upravily další charakteristiky, začaly se vyrábět slitiny titanu. Výhodou titanových slitin je jejich vysoká měrná pevnost a veliký rozsah pracovních teplot. Nevýhodou titanových slitin je jejich vysoká cena, zapříčiněná nákladnou výrobou a zpracováním (tavení a odlévání ve vakuu nebo v ochranné atmosféře argonu, obtížná obrobitelnost a horší svařitelnost než čistý titan, velký součinitel tření a nemožnost použití většího množství vratného materiálu). Podle oblasti použití se mohou titanové slitiny dělit na slitiny pro tváření a slitiny na odlitky. Přísadové prvky mají v obou alotropických modifikacích titanu úplnou nebo částečnou rozpustnost. U titanu stabilizují buďto fázi α (mřížka HCP) nebo fázi β (mřížka BCC) nebo s titanem mohou tvořit intermetalické sloučeniny, které se označují jako fáze γ [5,15,23].



Obr. 14 Vliv teploty na měrnou mez kluzu titanových slitin ve srovnání se slitinami jiných kovů [15].

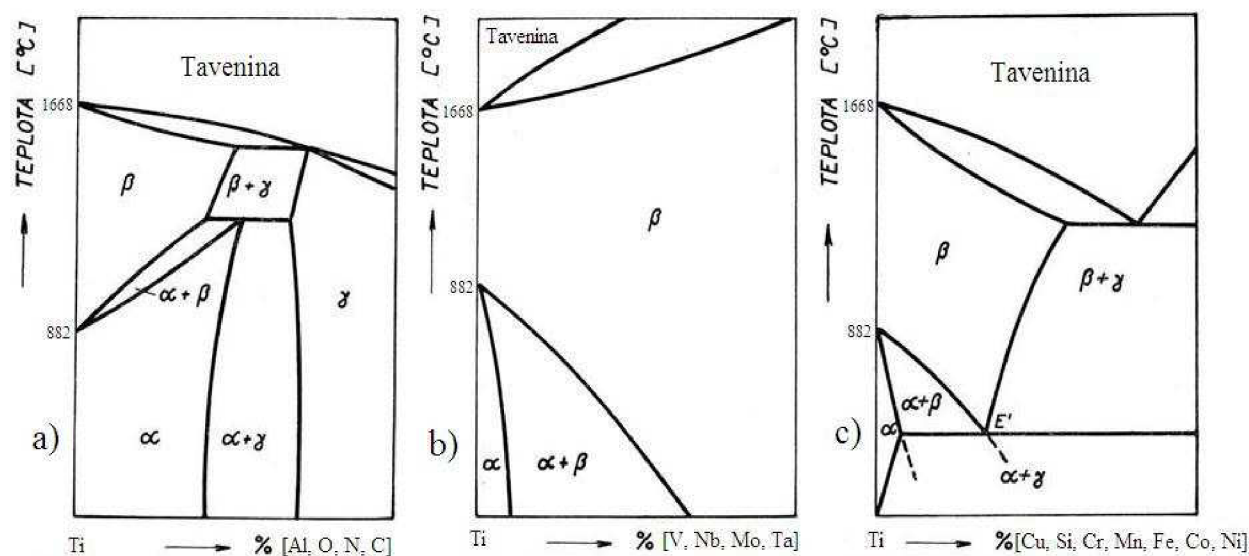
α stabilizátory se více rozpouští v HCP fázi α než v BCC fázi β , zvyšují teplotu fázové přeměny $\alpha \leftrightarrow \beta$ a stabilizují tuhý roztok α . Patří k nim prvky: Al, O, N, C. Z nich největší význam má pouze hliník a obsah ostatních nekovů (O, N, C) je potřeba držet co nejnižší, protože se značně zvyšuje tvrdost a zároveň i křehkost. Při vyšší koncentraci hliníku a případně dalších prvků vnikají v α fázi intermetalické sloučeniny γ a při dalším zvyšování koncentrace hliníku α fáze zcela mizí a vznikají pouze intermetalické sloučeniny γ (TiAl a Ti₃Al). Tyto slitiny se uvažují jako tzv. intermetalické γ slitiny titanu. Fázový diagram (viz. obr. 15a) a binární rovnovážný diagram Ti-Al (viz. obr. 16).

β stabilizátory se více rozpouští v BCC fázi β než v HCP fázi α , snižují teplotu fázové přeměny $\alpha \leftrightarrow \beta$ a při dostatečně vysokém obsahu stabilizují tuhý roztok β , který zůstává

při ochlazování stabilní až do pokojové teploty. Tyto slitiny mohou být homogenní (pouze β fáze) nebo heterogenní ($\alpha + \beta$ fáze). K β stabilizátorům se řadí prvky: V, Nb, Mo, Ta. Fázový diagram (viz. obr. 15b).

Další β stabilizátory, které mají větší rozpustnost v BCC β fázi než v HCP α fázi, ale podporují eutektoidní přeměnu v oblasti nižších teplot, při které eutektoid, tvořený tuhým roztokem α a intermetalickými sloučeninami γ , které jsou bohaté na přísadový prvek. Rozpustnost přísadového prvku v α fázi je nejvyšší za eutektoidní teploty a s klesající teplotou se zmenšuje. Takovými prvky jsou: Cu, Si, Cr, Mn, Fe, Ag, Co, Ni, H. Fázový diagram (viz. obr. 15c).

Neutrální prvky nemají žádný vliv na teplotu přeměny a vznik α nebo β fáze tuhého roztoku. Jsou to Sn, Zr. [5,12,15]



Obr. 15 Fázové diagramy titanových slitin

a) α slitiny, b) β slitiny, c) β slitiny s eutektoidní přeměnou, podle [12].

Dělení titanových slitin podle konečné struktury, vzniklé při pomalém ochlazování z žíhací teploty tuhých roztoků:

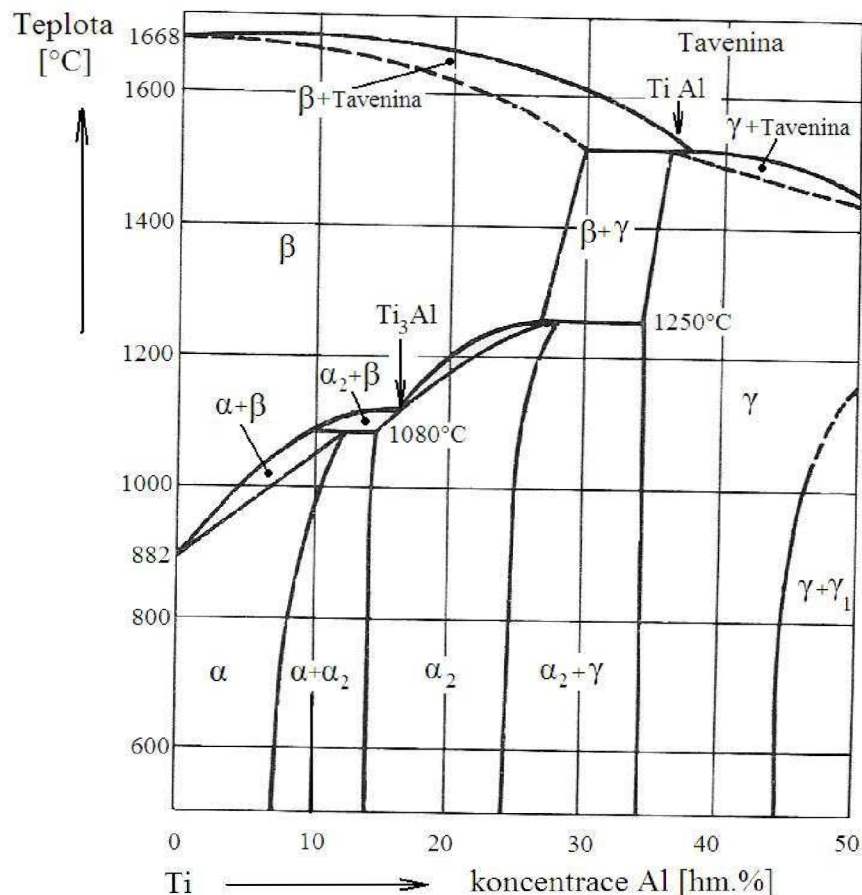
- slitiny α ,
- slitiny pseudo α (obsahující nejvýše 6% fáze β),
- slitiny β ,
- slitiny pseudo β (obsahující malá množství fáze α),
- slitiny $\alpha + \beta$ (heterogenní),
- slitiny γ obsahující intermetalické sloučeniny (TiAl , Ti_3Al).

2.3.1 Slitiny α

Základní báze je Ti-Al. Tyto slitiny se vyznačují velkou tepelnou stabilitou, dobrou pevností a odolností proti křehkému lomu, a to i za velmi nízkých teplot. Mimo hliníku často obsahují neutrální prvky Sn a Zr nebo v malé míře β stabilizátory podporující eutektoidní rozpad tuhého β roztoku (např. Ti-2Cu). Obsah nekovů (N, O, C) je potřeba udržet co nejnižší, protože tyto prvky mají vliv nejen na zvýšení tvrdosti slitiny, ale především na její křehkost. Slitiny α mají podobné vlastnosti jako čistý titan, ale téměř dvojnásobné pevnostní charakteristiky, modul pružnosti zůstává téměř nezměněn a vyznačují se špatnou tvárností. Výhodou je veliký rozsah pracovních teplot (-200 až 500°C). I přes vysokou mez kluzu je lze omezeně tvářet za studena, zejména při nižším obsahu nečistot [5,15].

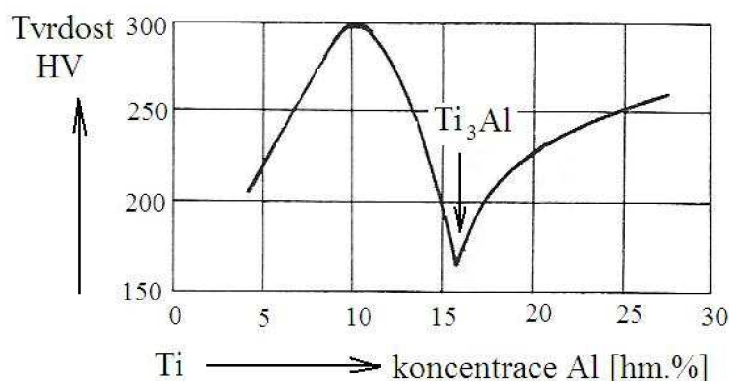
Tab. 5 Mechanické vlastnosti některých α slitin [5,15]

Slitina	R _m [MPa]	R _{p0,2} [Mpa]	A [%]	E [GPa]	Max. prov. Teplota
Ti-5Al-2,5Sn	825	795	10	110	300 °C
Ti-5Al-2,5Sn ELI	725	655	10	110	300 °C



Obr. 16 Rovnovážný diagram Ti-Al, podle [12].

V binárním rovnovážném diagramu Ti-Al (obr. 16) lze pozorovat v oblasti koncentrací 10-20 hm. % další peritektoidní přeměnu, při které vzniká fáze α_2 a utváří se intermediální fáze Ti_3Al . To má za následek rapidní pokles tvrdosti slitin o těchto koncentracích hliníku s výrazným singulárním bodem při koncentraci 16 hm.% Al (viz. obr. 17) [12].



Obr. 17 Průběh tvrdosti v oblasti výskytu Ti_3Al , podle [12].

2.3.2 Slitiny pseudo α

Vznikly přidáním malého množství β stabilizačních prvků (především molybdenu) a ve výsledné struktuře se objevuje max. šest hmotnostních procent β fáze v rovnovážném stavu. Ve srovnání s α slitinami mají vyšší pevnost o 10-20% a lepší tvařitelnost za studena, díky přítomnosti β fáze, která má vlivem BCC mřížky lepší plasticitu [5,15].

Tab. 6 Mechanické vlastnosti některých pseudo α slitin [5,15]

Slitina	Rm [MPa]	Rp _{0,2} [Mpa]	A [%]	E [GPa]	Max. prov. teplota
Ti-2Al-4Mo-11Sn	1000	895	10	100	350 °C
Ti-6Al-11Zr-Nb-Mo-Si	1000	950	9	120	550 °C
Ti-6Al-2Nb-1Mo-1Ta	770	670	10	114	550 °C
Ti-8Al-1V-1Mo	895	825	10	124	500 °C

2.3.3 Slitiny β

Vyznačují se vysokou odolností vůči korozi a velmi dobrou tvařitelností za studena, což je dáno BCC mřížkou β fáze. Ve svém složení mají nejvýše 3% hliníku. Vynikají vysokou pevností v žíhaném stavu. Jejich nedostatkem je vyšší měrná hmotnost (hustota) a vyšší cena, která je zapříčiněna nákladnou výrobou legujících prvků- kovů, které mají rovněž velmi vysokou teplotu tání a je tedy zapotřebí více energie při jejich výrobě [5,15].

- Přehled některých β slitin:
- Ti-3Al-13V-11Cr
 - Ti-3Al-15V-3Cr-3Sn
 - Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr

Tab. 7 Mechanické vlastnosti slitiny typu β : Ti-3Al-13V-11Cr [5]

Stav	Rm [MPa]	Rp _{0,2} [Mpa]	A [%]	Z [%]
žíhaný	980	950	15	40
tvářený a vytvrzený	1695	1600	6	10

2.3.4 Slitiny pseudo β

Tyto slitiny obsahují ve výsledné struktuře kromě fáze β s BCC mřížkou i fázi α s mřížkou HCP. To způsobuje především vyšší tvrdost výsledné slitiny a zlepšuje odolnost proti křehkému lomu. Ve vystárnutém stavu vynikají dobrou tvárností, vysokou pevností, houževnatostí i zpracovatelností, a to i u součástí s většími rozměry [5,15].

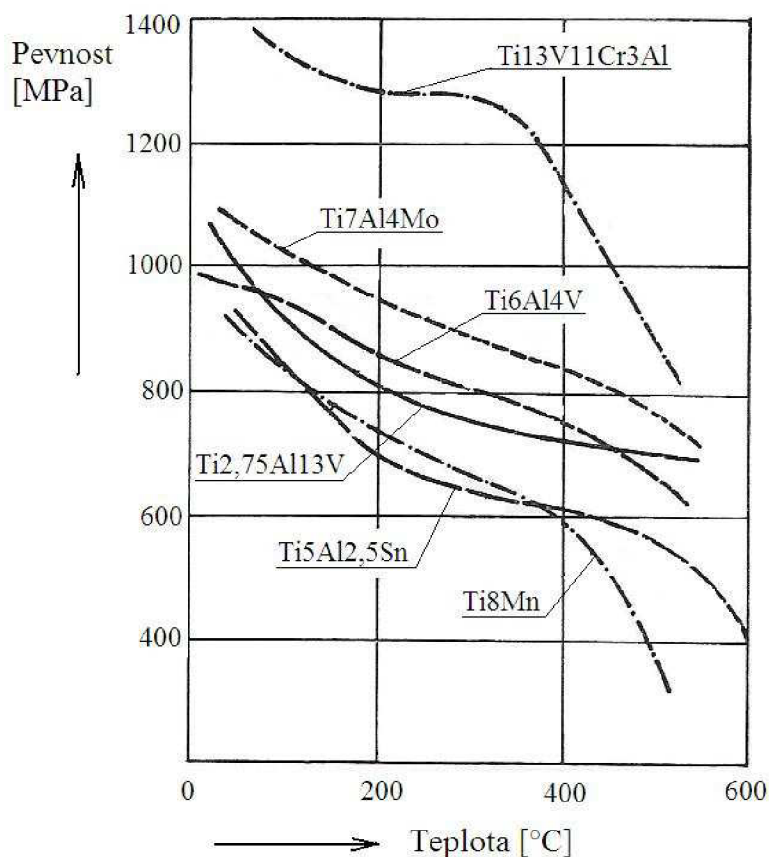
Příklad některých pseudo β slitin: - Ti-3Al-10V-2Fe
- Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr

2.3.5 Slitiny $\alpha + \beta$

Jsou to dvoufázové slitiny titanu, tedy se v nich v rovnovážném stavu za normální teploty objevují obě fáze α i β ve „vyváženém“ poměru. Je to nejpočetnější a nejvíce používaná skupina titanových slitin. Vyznačují se velkým množstvím struktur a v důsledku toho i vlastností, které závisejí na podmínkách tváření, obrábění a tepelného zpracování. Strukturu mohou tvořit buďto rovnoosá zrna nebo lamely obou tuhých roztoků, nebo kombinace obou morfologií. V žíhaném stavu mají lepší tvařitelnost než slitiny α a pseudo α , lepší odolnost proti únavovému porušení a lze je i tepelně vytvrzovat. Vytvrzené slitiny mají však nižší lomovou houževnatost než slitiny β a pseudo β . Jsou hůře svařitelné a mají menší odolnost proti tečení než slitiny α . Sdružují v sobě tedy vlastnosti obou předešlých skupin a zvolením optimálního poměru obou fází a vhodného tepelného zpracování lze dosáhnout téměř jakýchkoli požadovaných vlastností. Používají se pro silově zatížené součásti, např. lopatky turbín a kompresorů, letecké draky a podvozky, sportovní náčiní, jízdní kola apod. [5,12,15].

Tab. 8 Mechanické vlastnosti některých dvoufázových slitin [5,15]

Slitina	Rm [MPa]	Rp _{0,2} [Mpa]	A [%]	E [GPa]	Max. prov. teplota
Ti-2Al-1,5Mn	655	560	20	-	350 °C
Ti-6Al-2Mo-2Cr-Fe-Si	1050	900	13	115	500 °C
Ti-6Al-2Zr-Si	990	850	6	121	530 °C
Ti-6Al-3Mo-Zr-Fe-Si	1100	950	12	120	550 °C
Ti-6Al-3,5Mo-2Zr-Si	1150	1050	10	118	550 °C



Obr. 18 Pevnostní charakteristiky některých titanových slitin za zvýšených teplot [12].

Slitina Ti-6Al-4V

Nejpoužívanější titanovou slitinou, na které byly prováděny i zkoušky opotřebení a drsnosti v rámci experimentu, je slitina Ti-6Al-4V. Je zavedena ve výrobním programu všech předních výrobců titanových slitin a byla vyráběna i v bývalé Poldi Kladno a.s. Mezi její přednosti patří příznivé mechanické vlastnosti, dobrá zpracovatelnost i svařitelnost v ochranné atmosféře argonu. Nečastěji se používá v měkkém stavu. Zařazuje se mezi vysoce pevné slitiny, jejichž mechanické vlastnosti lze upravit tepelným zpracováním (žiháním, zušlechťováním). Rekrystalizační žihání se sestává z ohřevu na 700-800°C, výdrže na teplotě 1-8 hodin a pomalého ochlazení na 550°C. Pevnostní vlastnosti slitiny lze zlepšit tepelným zpracováním, které se skládá z kalení z teploty ohřevu 850-950°C a stárnutí při teplotě 480-510°C. Slitinu je možné legovat dalšími legurami (Pd, Ni), čímž vzniká celá řada variant této slitiny, označovaných jako grade (např. grade 25 = Ti6Al4V + 0,05%Pd + 0,5% Ni apod.). Takové slitiny mají lepší únavové vlastnosti a své užití nalézají převážně v leteckém průmyslu jako konstrukční materiál součástí draků letadel i motorů, ve vojenské technice apod. Negativní vlastností je špatná obrobitelnost v důsledku špatné tepelné vodivosti a vysokému součiniteli tření s kovy [5,15,26].

Tab. 9 Chemické složení; mechanické a fyzikální vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V [5,15]

Chemické složení [hm. %] slitiny Ti-6Al-4V							
Al	V	N	C	H	Fe	O	Ti
5,5-6,75	3,5-4,5	max. 0,05	max. 0,08	max. 0,01	max. 0,3	max. 0,2	zbytek
Mechanické vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V							
Stav	Rm [MPa]	Rp _{0,2} [Mpa]	A ₅ [%]	E [GPa]	Tvrđost HV		
žiháný	990	900	30	100	min. 36		
kalený	1050-1200	750-1000	2-25	90-110	min. 39		
vytvřzovaný	1100-1250	1025-1150	2-5	110-115	min. 41		
Fyzikální vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V							
Hustota ρ [kg.m ⁻³]	Teplotní součinitel délkové roztáhnutosti α [K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ_t [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Konduktivita λ_e [MS.m ⁻¹]	Maximální provozní teplota T _{max} [°C]			
4430	9,2 . 10 ⁻⁶ (při 20-300°C)	7	6	350			

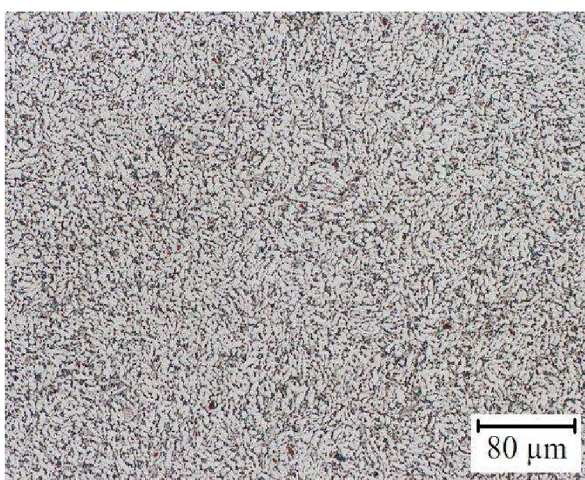
Tab. 10 Tepelné zpracování slitiny Ti6Al4V [5]

Tepelné zpracování	Teplota [°C]	Prostředí a doba
žihání ke snížení zbytkových napětí	480-650	1 až 4 hod. / vzduch či pec
žihání na měkko	705-790	1 až 4 hod. / vzduch či pec
kalení	955-970	1 hod. / voda
zpevňující popouštění (vytvřzování)	480-595	4 až 8 hod. / vzduch

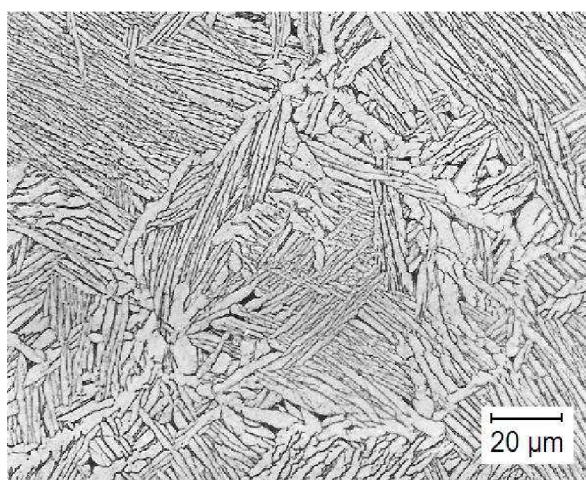
Mikrostruktura slitiny se skládá z fází α a β a ve většině případů se jedná o velmi jemnou strukturu. Množství fáze α a β je závislé na chemickém složení, tepelném zpracování a přítomnosti intersticiálních prvků (především kyslíku). Existuje několik strukturních morfologií (rovnoosá, lamelární, bimodální = kombinace lamelární a rovnoosé, widmannstättenova = jehlicovitá), jejichž vznik je ovlivněn podmínkami tváření a tepelného zpracování. Struktura tvořená rovnoosými zrny se vyznačuje dobrou tvárností a únavovou pevností. Lamelární struktura má horší mechanické vlastnosti, ale vyznačuje se vyšší žarupevností a lepší lomovou houževnatostí, což je dáno značným větvením trhlin při jejich šíření. Jehlicovitá (Widmannstättenova) struktura vzniká vlivem bezdifúzní martenzitické přeměny při nerovnovážných podmínkách ochlazování z kalící teploty, kdy se fáze β přemění

na přesycený tuhý roztok α . Na rozdíl od ocelí se tvrdost přesyceného tuhého roztoku α nikterak výrazně neliší od fáze α . Za normální teploty má tato struktura sníženou tažnost. Za vyšších teplot má pak vyšší odolnost proti tečení. Při jistých nevhodně zvolených podmínkách ochlazování (plynulé ochlazování bez stárnutí za zvýšené teploty, izotermická přeměna $\beta \rightarrow \alpha$ apod.) může dojít ke vzniku nežádoucí fáze ω , která se vyznačuje vysokou tvrdostí, ale činí slitinu velice křehkou. To je zapříčiněno tím, že ve skutečnosti je fázová přeměna u titanových slitin do značné míry komplikovanější ($\beta \rightarrow \omega \rightarrow \alpha$). Vznik fáze ω v titanových slitinách eliminuje přísada hliníku [12,26].

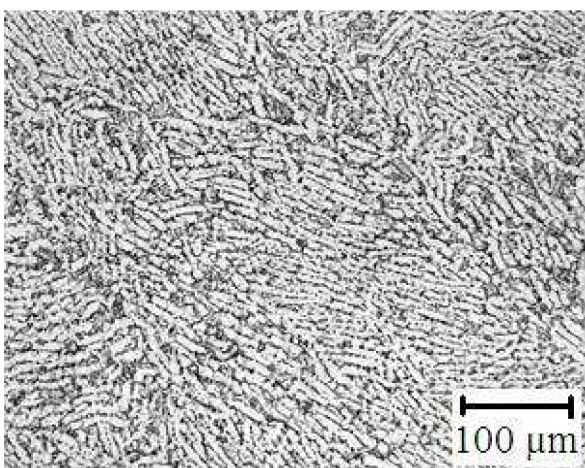
Příklady mikrostruktur Ti6Al4V:



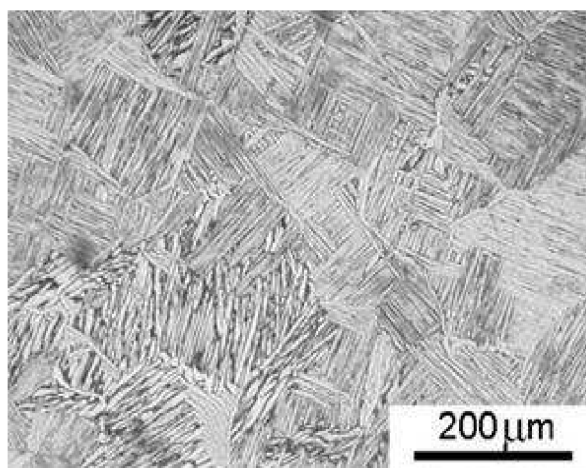
Obr. 19 Rovnoosá struktura Ti6Al4V [26].



Obr. 20 Lamelární struktura Ti6Al4V [3].



Obr. 21 Struktura Ti6Al4V po tváření [13].

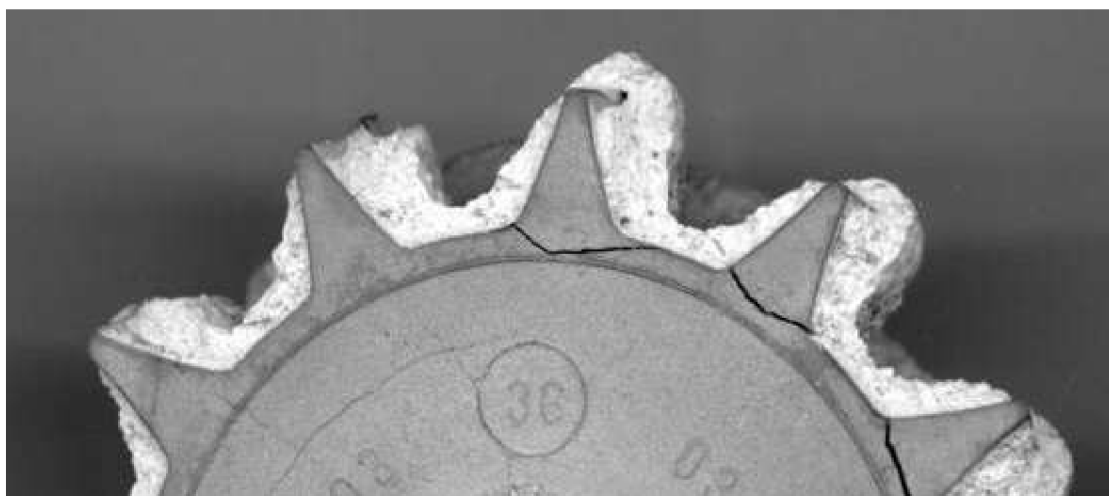


Obr. 22 Widmannstättenova jehlicovitá struktura Ti6Al4V jehlice β (světlé) ve fázi α (tmavé) [13].

2.3.6 Intermetalické slitiny (γ slitiny titanu)

Jsou to titanové slitiny, v nichž se vyskytují intermetalické sloučeniny. Mohou vznikat dvěma způsoby. Jednak to může být u slitin, u nichž probíhá eutektoidní reakce za nižších teplot (viz. obr. 15c). To způsobují některé β stabilizátory: Mn, Fe, Cr, Co, W, Ni, Cu, Au, Ag, Si (seřazeno podle rychlosti, s jakou dochází k této reakci). Při ochlazování slitin tohoto typu z teploty žíhání dochází při eutektoidní teplotě k reakci, kdy se β fáze přemění na α fázi a navíc se v tuhém roztoku objeví intermetalické sloučeniny typu: TiCr_2 , Ti_3Au , Ti_2Mn , TiCu , TiNb_3 apod. V některých případech ovšem může být rychlost reakce tak pomalá, že k ní za běžných podmínek vůbec nedoje. Např. ve slitinách s chromem proběhne eutektoidní reakce po zakalení z teploty 1150°C až po 75 dnech žíhání při teplotě 460°C . Naopak u slitin s rychlou reakcí, např. slitiny se zlatem, k této reakci dochází prakticky ihned při překročení eutektoidní teploty a vzniká typická lamelární struktura fáze α s intermetalickou sloučeninou Ti_3Au , obdobná jako u perlitu. U technických slitin titanu s eutektoidní reakcí je potřeba volit takové podmínky tepelného zpracování, aby buď to k této reakci vůbec nedocházelo (tyto slitiny jsou zcela běžné), nebo takové, aby reakce proběhla ihned a v celém rozsahu (takové slitiny se prakticky nevyskytují) [12].

Druhou skupinu titanových slitin, u nichž se vyskytují intermetalické sloučeniny, jsou slitiny typu α , u nichž je koncentrace stabilizačního prvku α fáze- hliníku vyšší než odpovídá oblasti homogenního tuhého roztoku. V těchto slitinách se objevuje fáze γ (viz. obr. 15a; 16). Fáze γ se ve slitině titanu s hliníkem začíná objevovat při cca 25% hm. koncentraci hliníku a tvoří ji intermetalické sloučeniny titanu s hliníkem typu TiAl s uspořádanou, plošně centrovanou tetragonální mřížkou. Tyto intermetalické sloučeniny způsobují, že se slitina stává velmi křehkou, tvrdou, s poměrně vysokým modulem pružnosti a nízkou měrnou hmotností s velice dobrými vlastnostmi za vyšších teplot. Limitujícím faktorem je nízká tažnost a špatná tvařitelnost za nízkých a středních teplot. Titanové intermetalické slitiny typu γ - TiAl se vyznačují zhoršenou obrobitelností oproti standardním titanovým slitinám, a je proto nutné volit až desetkrát nižší řezné podmínky (především řeznou rychlost) ve srovnání s jinými slitinami titanu [1]. Tyto slitiny se nejčastěji používají na odlitky součástí, u nichž je kladen důraz na nízkou hmotnost, vysokou žárupevnost a žáruvzdornost, oxidačně- korozní odolnost, odolnost proti tečení při statickém zatížení i za vysokých teplot (750 - 900°C) např. lopatky turbín i celá turbínová kola, výfukové ventily spalovacích motorů či stacionární díly leteckých turbín. Problémy může působit jejich rozdílná roztažnost s roztažností formy při chladnutí rozměrnějších a tvarově složitějších odlitků, kdy vlivem termoelastických napětí může dojít k jejich praskání (viz. obr. 23). Z důvodu velké afinity titanu i hliníku ke vzdušným plynům za vysokých teplot (1630°C) se pro tavení a odlévání odlitků ze slitin γ - TiAl používají vakuové indukční pece s keramickým kelímkem (Al_2O_3) nebo se studeným, vodou chlazeným měděným kelímkem. Před tavbou je vhodné napustit pec inertním plynem. Pro odlévání tvarově složitějších odlitků (turbínová kola) se využívá lití do keramických forem, zhotovených metodou vytavitelného modelu. Při velkosériové výrobě tvarově jednodušších odlitků (ventilů) se může užít technologie lití do kokil [1,12,25].



Obr. 23 Odlitek turbínového kola z intermetalické TiAl slitiny- praskliny v oblasti kořene lopatky vlivem termoelastických napětí, vznikajících mezi odlítkem a keramickou formou v průběhu chladnutí [25].

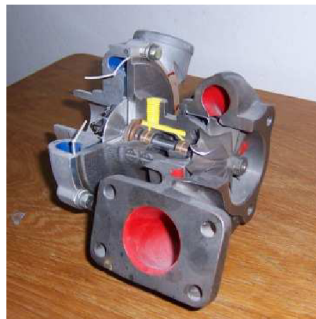
Mikrostruktura odlitku ze slitiny Ti-48Al-2Cr-2Nb-1B (viz. obr. 27) se skládá z lamelárních zrn s malým objemovým podílem rovnoosých zrn γ -fáze, ve kterých jsou patrné interkrystalické trhliny. Tyto mikroskopické defekty výrazně snižují houževnatost za pokojové teploty a únavovou pevnost součásti [25].

Vzorek intermetalické slitiny Ti-46Al-7Nb-0,7Cr-0,1Si-0,2Ni (at.%), na němž byly provedeny zkoušky obrobitelnosti a následně vyneseny křivky opotřebení, je v podstatě zbytek vtokového kanálu, který vznikl při odlévání turbínových kol při přesném lití do skořepin. Na povrchu vzorku je možné pozorovat nehomogenitu materiálu- vzduchové mezery, které vznikly při samotném odlévání taveniny do formy, a to díky reakci se vzdušnými plyny (H, N, O). Tyto „bubliny“ mohly negativně ovlivnit opotřebení břitu nože, což se mohlo bohužel projevit i při měření opotřebení a dále mít vliv i na průběh křivky opotřebení. Testovaná intermetalická slitina se používá jako materiál pro turbínová kola turbodmychadel, konkrétně pro sportovní typ automobilu Mitsubishi Lancer, kde nahradila běžně používanou niklovou slitinu (Inconel 713C). Důvod užití titanové slitiny je její měrná hmotnost (4g/cm^3), která je ve srovnání se standardně používanou niklovou slitinou (8g/cm^3) poloviční. Snížení hmotnosti turbínového kola má příznivý vliv na jakoukoli změnu provozního režimu motoru (akcelarace, decelarace), a to díky nižšímu momentu setrvačnosti. Díky tomu je při akceleraci hřídel turbodmychadla schopna se rychleji roztočit, v sacím potrubí vznikne v kratším čase požadovaný přetlak a motor je tak schopen rychleji akcelarovat. Při decelaraci potom díky menšímu momentu setrvačnosti hřídele turbodmychadla rychleji klesají jeho otáčky a tím i přetlak v sacím potrubí motoru a následně i otáčky motoru, což je výhodné jednak při brzdění vozidla, ale především pro rychlejší pokles otáček předlokové hřídele převodovky, což umožňuje rychlejší přeřazení převodového

stupně. Mimo jiné má tato skutečnost za následek i snížení množství škodlivin ve výfukových plynech, což se příznivě projevuje při plnění předepsaných emisních limitů [9,21].



Obr. 24 Mitsubishi Lancer [21].

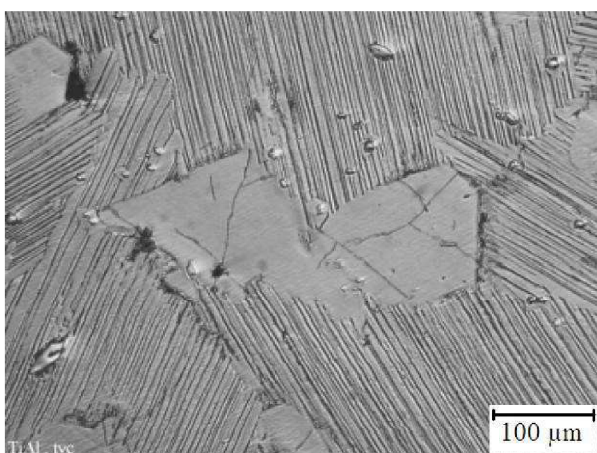


Obr. 25 Turbokompresor.

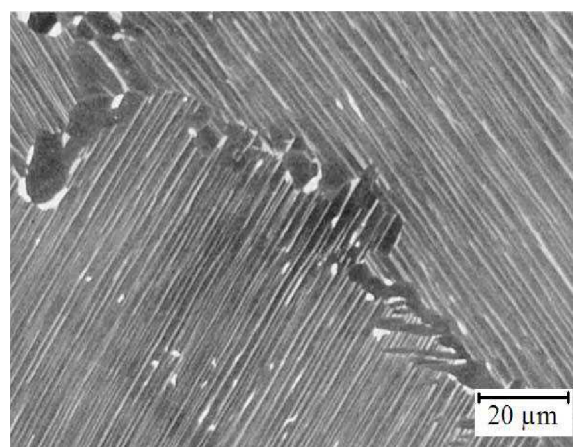


Obr. 26 Odlitek turbínového kola.

Mikrostruktura odlévaného materiálu Ti-46Al-7Nb-0,7Cr-0,1Si-0,2Ni (viz. obr. 28) je rovnoosá na rozdíl od konvenčních TiAl slitin, které mají sloupcovitou strukturu. Mikrostruktura TiAl materiálu je zcela lamelární, což je příznivé pro vysokoteplotní pevnost a houževnatost. Tyto vlastnosti jsou žádoucí u tahem namáhaných součástí za vysokých teplot, mezi které patří i turbínové kolo [21].



Obr. 27 Mikrostruktura odlitku z TiAl slitiny Ti-48Al-2Cr-2Nb-1B (praskliny uvnitř rovnoosých zm gamma) [26].



Obr. 28 Struktura testovaného TiAl materiálu Ti-46Al-7Nb-0,7Cr-0,1Si-0,2Ni [21].

Tab. 11 Chemické složení slitiny Ti-46Al-7Nb-0,7Cr-0,1Si-0,2Ni [21]

Chemické složení [at. %] slitiny Ti-46Al-7Nb-0,7Cr-0,1Si-0,2Ni							
Prvek	Ti	Al	Nb	Cr	Si	O	N
S nízkým obsahem Nb	51,212	47,3	0,4	0,4	0,6	0,074	0,014
S vysokým obsahem Nb	46,82	45	7,1	1	-	0,07	0,01

2.4 Nanostrukturovaný titan (N)Ti

Nanostrukturovaný titan se vyznačuje jemnějším zrnem, jehož rozměry se pohybují v rozmezí 100-300 [nm]. Díky zpevnění materiálu na hranicích zrn pak se zmenšujícím se zrnem rostou i pevnostní charakteristiky, což popisuje Hallův Petchův vztah viz. níže.

$$R_{eL} = \sigma_0 + k_y \cdot d^{-\frac{1}{2}}$$

Kde:	R_{eL}	...dolní mez kluzu [MPa]	
	σ_0	...třecí napětí potřebné pro pohyb dislokací [MPa]	
	k_y	...materiálová konstanta [$\text{N} \cdot \text{m}^{-\frac{3}{2}}$]	
	d	...střední průměr zrna [mm]	podle [15]

2.4.1 Vlastnosti nano- titanu

Nano-titan má vyšší specifické pevnostní vlastnosti než obyčejný (hrubozrnný) titan. Mez pevnosti R_m (N)Ti se pohybuje okolo 1000 [MPa] a mez kluzu $R_{p0,2}$ okolo 850 [MPa]. Zároveň si ale (N)Ti zachovává poměrně nízký modul pružnosti, který se pohybuje v rozmezí $E = 80-120$ [GPa].

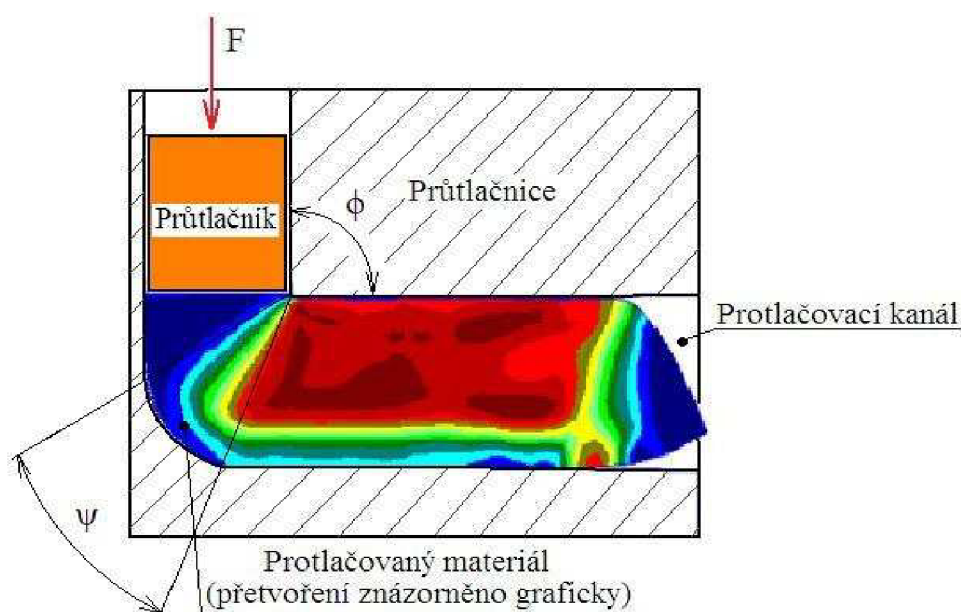
Tab. 12 Vlastnosti nano- titanu ve srovnání s komerčně čistým titanem [6]

Materiál	Zpracování	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]	Modul pružnosti E [GPa]	Střední průměr zrna d_z [μm]
Čistý titan (CP)Ti	žiháno na 649°C po dobu 1 hodiny	212	365	51	71	100	500 - -700
Nano titan (N)Ti	ECAP 10 průtahů	850	960	12	16	100	0,1 - -0,3
	taženo $D_d = 6$ [mm]	920	1030 - -1050	9	12	100	0,1 - -0,3

2.4.2 Výroba (N)Ti

Nano-titan vyžaduje jemnozrnnou strukturu. Té se dá dosáhnout různými metodami tváření. Jednou z nich je metoda ECAP (equal channel angular pressing). Je to metoda úhlového kanálového protlačování, při níž se dosahuje extrémní plastické deformace. Princip metody, ukázka nástroje a vzorků (viz. obr. 28-30). Podstatou této metody je extrémní deformace vzorků uskutečněná smykem beze změny průřezu. Vzorek je protlačován nástrojem-

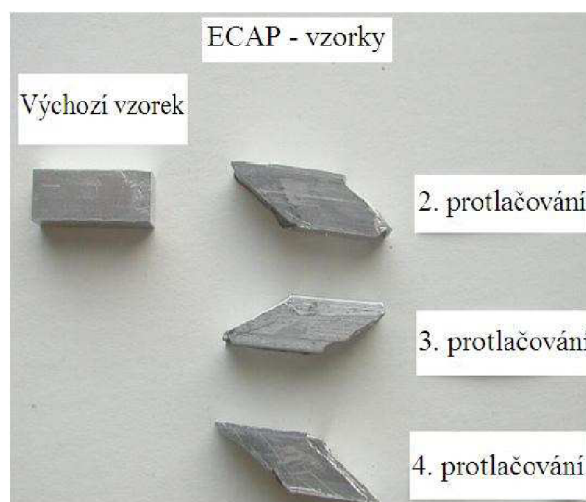
zápustkou, ve které se protínají dva kanály svírající obvykle úhel $\phi = 90^\circ$. Protlačování se realizuje buď za pokojové, nebo zvýšené teploty. Ekvivalentní deformace může dosáhnout až hodnoty 10 nebo i vyšší. Pro vývoj mikrostruktury a výsledných vlastností vzorků jsou kritické především počet průchodů a výběr deformační cesty (způsob otáčení vzorku po každém průchodu). Jako nevýhoda této metody se může jevit nestejná deformace (přetvoření) na čelech vzorku, což je způsobeno lokací roviny maximálních smykových napětí, obvykle pod úhlem 45° . Tato skutečnost je eliminována právě pootáčením vzorku mezi jednotlivými průchody. Velikost deformace je závislá nejen na úhlu ϕ , který mezi sebou svírají oba kanály, ale také na velikosti úhlu ψ , který vymezuje oblouk zakřivení v místě protnutí obou kanálů (viz. obr. 29) [6,17].



Obr. 29 Schéma metody ECAP s naznačením přetvoření materiálu, podle [17].



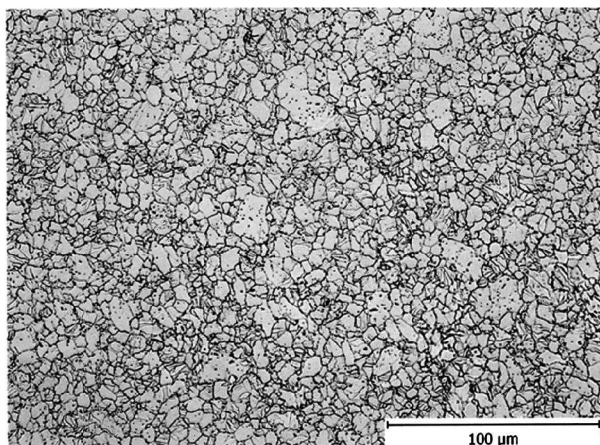
Obr. 30 Dělená zápustka se ze zalomeným kanálem [9].



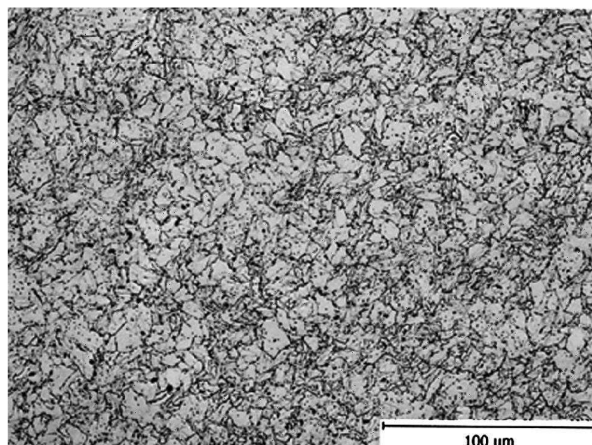
Obr. 31 Ukázka ECAP vzorků, podle [17].

2.4.3 Struktura (N)Ti

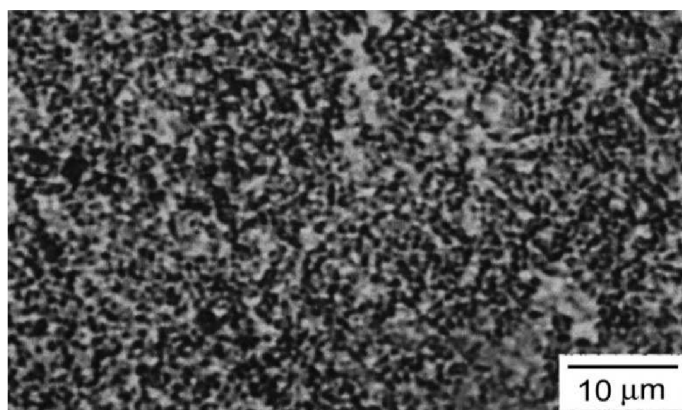
Mikrostruktura nano- titanu je dána čistotou výchozího materiálu (CP)Ti, jeho tepelným zpracováním a dále postupem vlastní výroby (N)Ti. Záleží tedy na zvolené metodě jeho výroby, počtu opakovaných cyklů (průtahů) a na směru v jakém deformace probíhá, tedy způsobu otáčení vzorku mezi jednotlivými cykly. Na obr. 32-34 jsou znázorněny mikrostruktury (N)Ti, používaného při výrobě dentálních implantátů metodou ECAP [6].



Obr. 32 Mikrostruktura (N)Ti po ECAP
(2 průchody v podélném směru) [6].



Obr. 33 Mikrostruktura (N)Ti po ECAP
(2 průchody v příčném směru) [6].



Obr. 34 Mikrostruktura (N)Ti po ECAP (10 průchodů) [6].

2.4.4 Použití (N)Ti

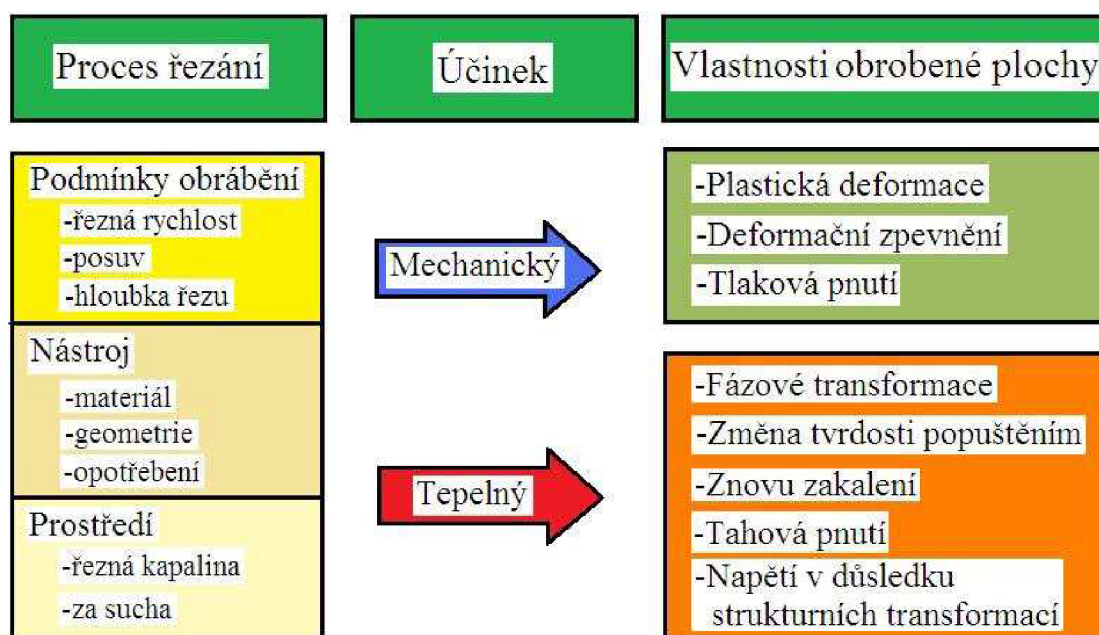
Vlastnosti nano- titanu činí tento materiál pevným a zároveň dostatečně pružným a ve spojení s vysokou biokompatibilitou k živým tkáním nalézá své uplatnění v medicíně již dnes jako materiál pro dentální implantáty, kde nahrazuje doposud používané slitiny TiTa, TiMo, které jsou díky rozdílným teplotám tavení používaných prvků obtížně vyrobitelné a tedy i drahé. Dále by se tento materiál mohl využívat i pro moderní totální endoprotézy kloubů, které již není potřeba v kostech fixovat pomocí cementu, ale stačí je pouze natlačit do připravených přesně vyfrézovaných jamek, kde potom drží díky strukturovanému povrchu (vroubky) či se případně fixují pomocí závitů, nebo jako kosterní implantáty [6].

3 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ TITANU A JEHO SLITIN

Titan se řadí do skupiny těžkoobrobitelných materiálů. To je způsobeno jeho nízkou tepelnou vodivostí, vysokým součinitelem tření s ostatními kovy a vysokou chemickou afinitou ke vzdušným plynům a k titanu, obsaženého v nástrojích. Dalším problémem je jeho hořlavost, což při jeho obrábění způsobuje jisté riziko, pokud nejsou přijata zvláštní opatření.

3.1 Obrobitelnost

Trvanlivost nástrojů je omezena opotřebením nástroje na hřbetě a deformací řezného klínu. Řezná rychlost a trvanlivost nástrojů je podstatně nižší než při obrábění oceli. Řezné síly a řezný výkon jsou menší než při obrábění čistého železa či niklu. To je způsobeno menší stykovou plochou třísky s čelem nástroje. Důsledkem je velký úhel ϕ (úhel roviny maximálních smykových napětí) a následně tenká tříska, nepatrně silnější než hloubka řezu. Součinitel přechování třísky se tedy blíží jedné [23]. Důsledkem vysokého součinitele tření mezi čelem nástroje a třískou je, že tříska není plynutá, ale vzniká po segmentech, vlivem periodických adiabatických smyků v materiálu. Vzniká tak tzv. segmentovaná tříska, která neodchází po čele nástroje, ale vrství se na sebe před nástrojem. Díky nízké tepelné vodivosti titanu, která brání odvodu tepla do třísky a do obrobku, se teplo koncentruje v úzké oblasti místa řezu. Všechny tyto faktory (nízká tepelná vodivost titanu, vysoký součinitel tření, malá kontaktní plocha třísky s nástrojem) jsou příčinou vysokého tepelného namáhání nástroje a vedou k předčasné degradaci řezného klínu nástroje. Se zvyšující se řeznou rychlostí se zvětšuje teplotní pole na nástroji a stoupá jeho teplota. Při překročení kritické rychlosti nástroj ztrácí svou pevnost, řezný klín se bortí a nástroj ztratí řezné schopnosti. Opotřebením nástroje se projevuje zvětšováním poloměru ostří. Je to typický mechanismus průběhu opotřebením při obrábění titanu a jeho slitin. Dalším problémem spojeným s nerovnoměrným průběhem plastické deformace v zóně primárních plastických deformací, které vedou k utváření segmentovaných třísek při obrábění titanu, jsou vibrace nástroje. Kmitání nástroje je pak ještě umocněno při nedostatečné tuhosti soustavy stroj - nástroj- obrobek. Vibrace nástroje mají nepříznivý vliv jak na jakost obrobené plochy, tak na životnost nástroje. Eliminovat kmity je možné snížením řezné rychlosti, čímž se sníží i výkon obrábění nebo zvýšením tuhosti soustavy. Díky nízkému modulu pružnosti titanu, který umožňuje velké plastické deformace, při procesu řezání nastává rychlé zpevňování povrchu, a to vede ke značnému otupování nástroje. Vlivem malé stykové plochy třísky s nástrojem vznikají vysoké měrné tlaky, což přispívá k nízké trvanlivosti nástroje. Titan je náchylný k poškození povrchu při obrábění, především při broušení. To se může projevit snížením únavové pevnosti obrobku. Obecné schéma vlivu obrábění na vlastnosti povrchové vrstvy je na obrázku 35. Optimálním zvolením řezných podmínek lze běžnými metodami obrábění dosáhnout dobrých řezných výkonů a obrobené plochy s vynikající jakostí. V současnosti se používají řezné rychlosti 60-90 [m.min⁻¹]. Pro obrábění se používají nepovlakované i povlakované slinuté karbidy typu S, K, H, N (dle ISO 513), případně řezná keramika, KNB, PKD a rychlořezné oceli (wolframové a molybdenové RO) [3,23].



Obr. 35 Mechanický a tepelný účinek vyvolaný obráběním, podle [3].

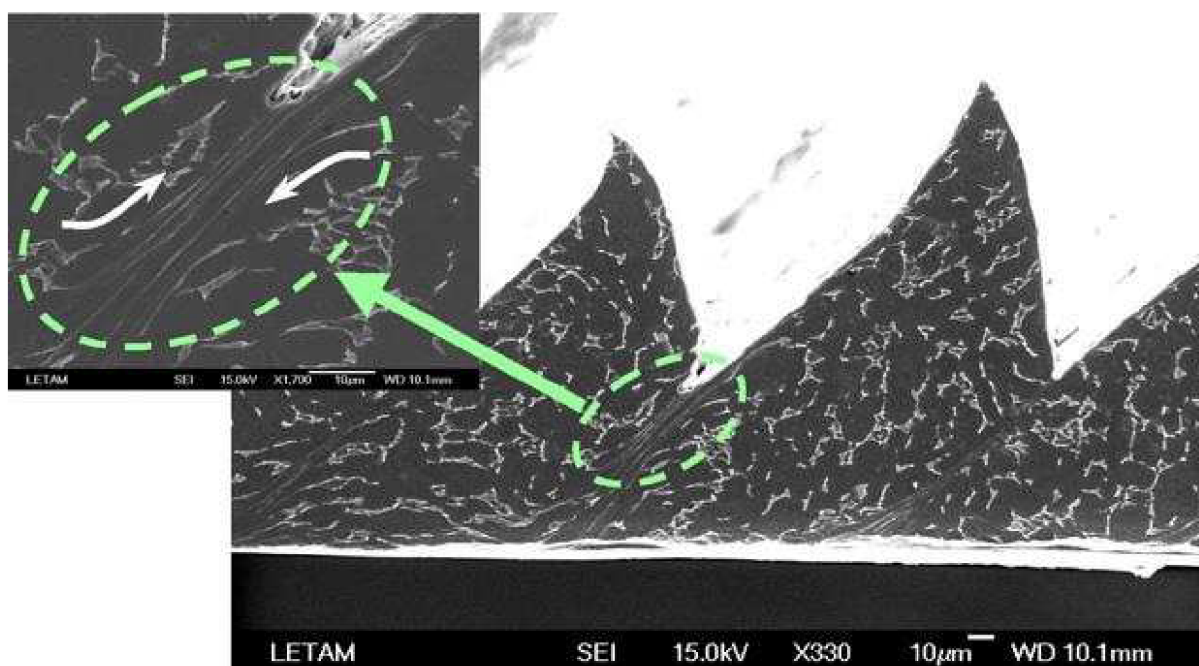
3.1.1 Doporučení při obrábění titanu a jeho slitin

- **volit nízké řezné rychlosti:** nízká řezná rychlost znamená nižší tepelné namáhání nástroje a jeho delší trvanlivost,
- **vysoké posuvy:** vyšší posuv znamená menší měrný tlak na nástroj, mimo to nemá významný vliv na teplotu nástroje. Též hloubka řezu by měla být větší než zpevněná vrstva po předchozím řezu,
- **používat dostatečné množství procesní kapaliny:** chladicí kapalina odvádí teplo a třísky, čistí povrch, snižuje tření i řezné síly a prodlužuje trvanlivost,
- **mít ostrý nástroj:** na opotřebeném nástroji se tvoří nárůstky, to snižuje jakost obrobené plochy, způsobuje nalepování a vytrhávání a deformace obrobku,
- **nepřerušovat řez:** zastavování pohybu nástroje znamená zpevňování povrchu, což může vyvolat zadírání a degradaci nástroje,
- **používat dokonale tuhousoustavu (stroj-nástroj-obrobek):** tím se eliminují vibrace.

3.2 Mechanismus tvorby třísky

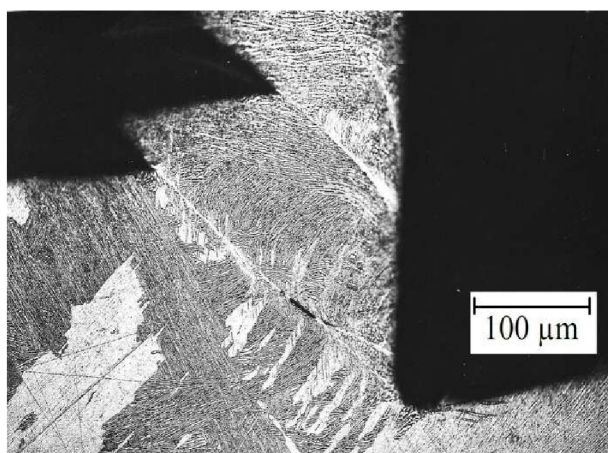
Při tvorbě třísky dochází u titanu a jeho slitin k lokalizaci plastické deformace. Charakteristickým znakem tvorby třísky je periodický vznik pásů koncentrovaného smyku s velkou plastickou deformací, která je provázená rychlým smykovým porušením materiálu v důsledku plastické nestability. Proces deformace lze považovat za adiabatický skluz.

Segmentace třísek souvisí s nestabilním charakterem deformace, který je podmíněn vzájemným působením deformačního zpevnění a snížením pevnosti vlivem tepelných účinků. Utváření pásů koncentrovaného smyku je spojené se špatnou tepelnou vodivostí. Tepelná energie se koncentruje v páse. Při pozorování utváření třísky vysokorychlostní kamerou bylo zjištěno, že se pohyb třísky periodicky zastavuje. To může být vysvětleno svary mezi třískou a nástrojem, což by vysvětlovalo jeho nízkou trvanlivost [23]. Vlastní proces utváření třísky lze rozdělit do dvou stádií. V prvním se projevuje plastická nestabilita, která vede k lokalizaci deformace podél plochy smyku. Tato plocha začíná na řezné hraně a je orientovaná ve směru pohybu nástroje. Následně se stáčí nahoru a protíná se s obráběnou plochou. Smykové porušení třísky se objevuje ve formě trhlin na její vnější straně a na vnitřní straně ve formě silně deformovaných pásů. Ve druhém stádiu dochází k vyhlazování poloklínu třísky na stykové ploše čela nástroje, posouvá se řezný klín a pohyb třísky po čele nože je minimální. Díky tomu bude tloušťka třísky přibližně rovna hloubce řezu. V důsledku toho je tedy použití termínu „úhel smyku“ nevodné. Stlačování tvořícího se segmentu vytlačuje tvořený segment nahoru. Proces tvorby článkovité třísky je odrazem dynamiky procesu řezání a dochází k únavovému porušení řezného klínu nástroje. Na obr. 36 je ukázka typického mechanismu tvorby třísky u slitiny Ti6Al4V, kdy se nově utvářený segment vtlačuje pod předcházející segment a vytlačuje jej tak nahoru. Na detailu je dobře vidět extrémní plastická deformace zrn v oblasti smykového pásu, zatímco okolní zrna zůstávají téměř nezasažena. Proces utváření titanové třísky je obdobný jako u HSC vysokorychlostního obrábění ocelí, kdy vlivem vysoké řezné rychlosti vzniká velké množství tepla, které není možné odvést třískou, ale koncentruje se do oblasti primárního pásma plastické deformace, kde ovlivňuje cyklicky vlivy zpevnění a návazně snížením pevnosti (odpevněním), což má za následek tvorbu segmentované třísky a pokles řezné síly [11,23,24].

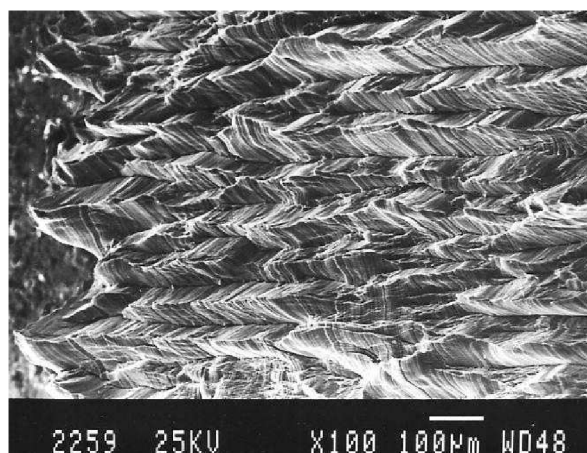


Obr. 36 Mechanismus tvorby třísky u Ti6Al4V a detail smykového pásma [24].

Utváření kořene třísky u slitiny Ti6Al4V je znázorněno na obrázku 37. I když je tříska při obrábění odpadem, právě morfologie třísek (viz. obr. 38) dává řadu informací o podmínkách procesu řezání, tedy jakým způsobem probíhala plastická deformace, jak byla velká a jaký charakter měl její průběh. Tříška tedy doplňuje informace o deformačním chování obráběného materiálu, z čehož je možné odvodit, jaký charakter bude mít nově vzniklý povrch obrobku a jaké budou jeho předpokládané vlastnosti. Především z hlediska zpevňování či odpevňování povrchu a na zbytková napětí povrchové vrstvy, která mohou být buď tahová, nebo tlaková. Mechanismus procesu utváření třísky při řezání má přímou souvislost s integritou nově vznikajícího povrchu [3].



Obr. 37 Utváření kořene třísky slitiny Ti6Al4V při $v_c = 60$ [m.min⁻¹] a $f_n = 0,15$ [mm.ot⁻¹] [3].



Obr. 38 Morfologie třísky Ti6Al4V při $v_c = 60$ [m.min⁻¹] a $f_n = 0,2$ [mm.ot⁻¹] [3].

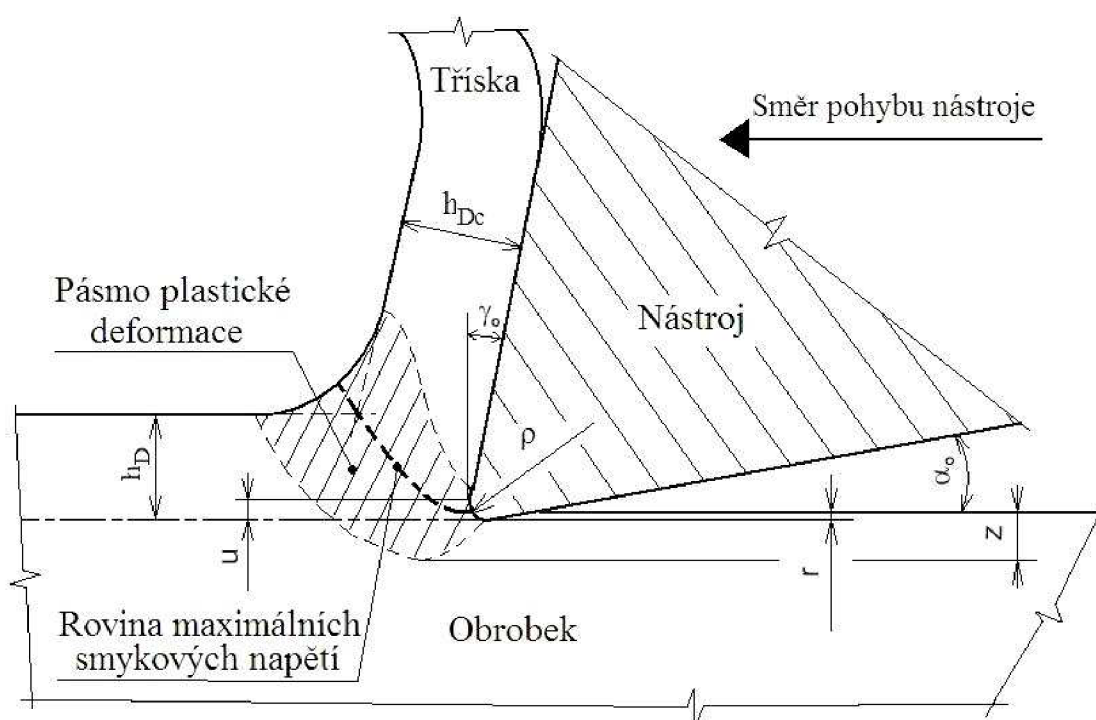
3.3 Jakost povrchové vrstvy

Proces obrábění titanu a jeho slitin provází kromě většího opotřebení nástrojů i snížená jakost obrobených ploch. Titan má zvýšenou citlivost na volbu rezných podmínek. To se musí brát v potaz, zejména při dokončovacích operacích, kdy je potřeba klást důraz na minimální vývin tepla, nebo zabezpečit jeho odvod. Zvolení vhodných rezných podmínek má vliv na vlastnosti povrchu součásti, které se pak návazně využijí v praxi při jejím provozu. Toho se nejčastěji využívá u extrémně namáhaných součástí, kde je potřeba podle požadovaných vlastností povrchové vrstvy navolit optimální rezné podmínky. Degradace součástí začíná zpravidla na jejich povrchu nebo těsně pod ním. V povrchu obrobků se projevují fyzikální, metalurgické i chemické změny, které působí na jejich funkčnost, mechanické, napěťově-korozní a únavové vlastnosti. Proto je potřeba volit vhodný nástrojový materiál, geometrii nástroje a rezné podmínky. Příznivý vliv na jakost povrchové vrstvy má ostrý nástroj, zvětšování úhlu čela, zvyšování rezné rychlosti a snižování hloubky řezu. Kvalita povrchu a jeho vlastnosti mají přímý vliv na jakost součástí. Na ty jsou u titanových slitin kladeny nejvyšší nároky, vzhledem k oblastem jejich použití [3,4].

3.3.1 Změny v povrchové vrstvě při obrábění

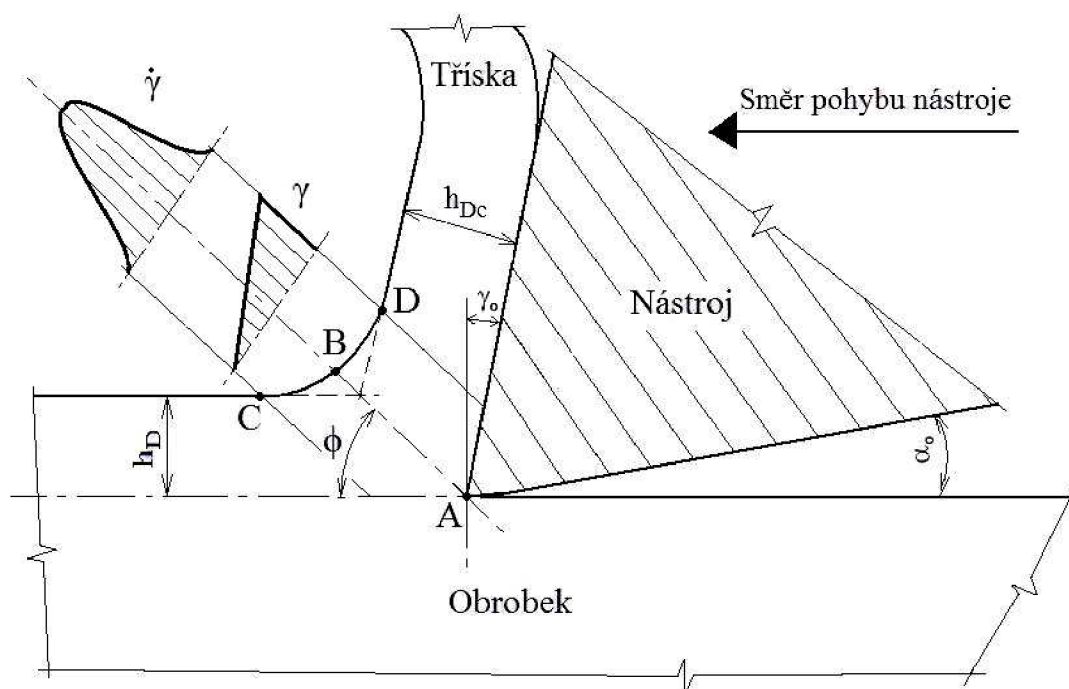
Rozhodující vliv na vlastnosti povrchové vrstvy má stupeň plastické deformace γ a deformační rychlost $\dot{\gamma}$. Čím jsou obě veličiny větší, tím se zvyšují i mechanické charakteristiky obrobeného povrchu. Zvyšuje se mez kluzu i mez pevnosti a roste tvrdost povrchové vrstvy. Plastická deformace ovlivňuje i hloubku a stupeň zpevnění, mikrostrukturu a mikrotvrdost a další fyzikální vlastnosti povrchové vrstvy. Je též nezbytnou podmínkou pro existenci zbytkových napětí. Zbytková tahová napětí, vznikající vlivem uvolňování velkého množství tepelné energie při obrábění titanových slitin, jsou nebezpečná, protože působí jako technologické vruby, které snižují únavovou pevnost a korozní odolnost součástí. Mimo to mohou při nerovnoměrném rozložení v povrchové vrstvě způsobit i deformaci součástí [23].

Na stlačení povrchové vrstvy a hloubku deformace při řezání má vliv geometrie nástroje, především poloměr ostří „ ρ “, úhel čela „ γ_0 “ a úhel hřbetu „ α_0 “ (viz. obr. 39). Uplatňuje se zde tzv. rozměrový účinek, kde je důležitý poměr mezi hloubkou odřezávané vrstvy „ h_D “ a poloměrem ostří nástroje „ ρ “. Rozsah a tvar oblasti plastické deformace je takový, že zasahuje až do hloubky „ z “ pod nově vzniklým povrchem. Tloušťka této vrstvy je závislá na napětí, velikosti pásma plastické deformace v materiálu a na jejím teplotním poli. Poloměr ostří „ ρ “ způsobuje stlačení obrobené plochy do hloubky „ u “ a elasticky deformovaná část materiálu se po průchodu nástroje uvolní na hodnotu „ r “ [3].



Obr. 39 Vznik stlačení a hloubka deformace, podle [3].

Obecné schéma průběhu plastické deformace γ a deformační rychlosti $\dot{\gamma}$ při řezání je znázorněno na obr. 40. Úsečka \overline{AB} představuje rovinu maximálních smykových napětí a úhel ϕ je úhel roviny maximálních smykových napětí. Obecně platí, že v této rovině je rychlost deformace $\dot{\gamma}$ největší a velikost plastické deformace (přetvoření) γ dosahuje poloviční hodnoty než na konci plastické deformace. Na počátku plastické deformace (bod C) je velikost deformace γ i deformační rychlost $\dot{\gamma}$ nulová. Na konci plastické deformace (bod D) je přetvoření ukončeno a dosahuje konečné, maximální hodnoty. Deformační rychlost je potom nulová.



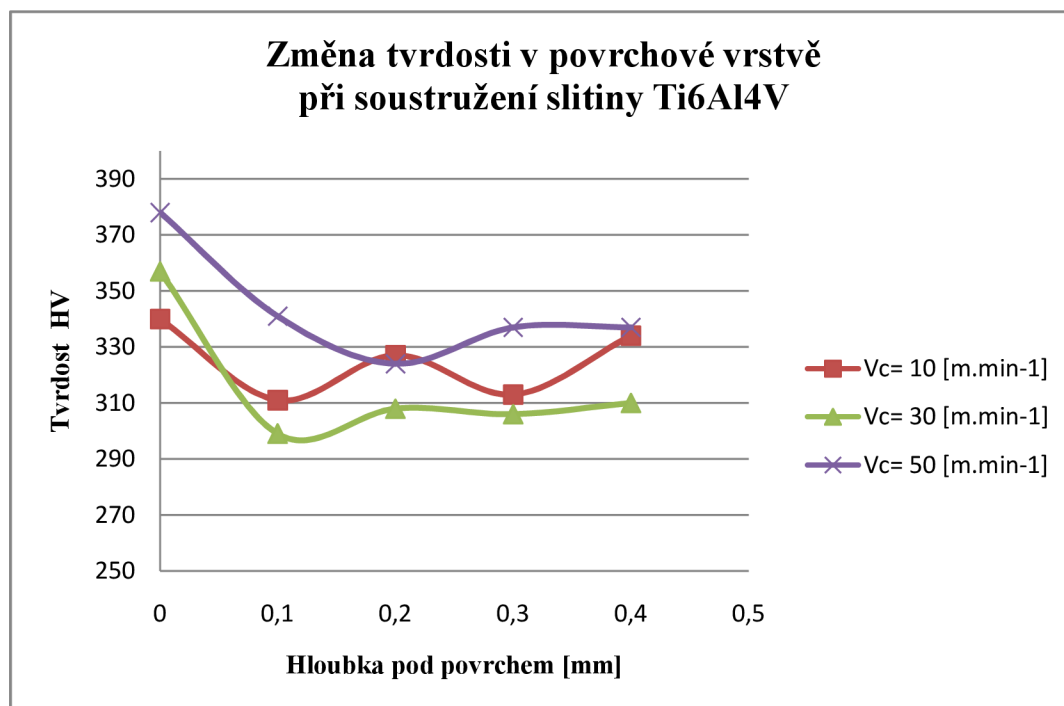
Obr. 40 Obecné znázornění průběhu plastické deformace γ a deformační rychlosti $\dot{\gamma}$ při řezání.

Zpevnění povrchové vrstvy je tím větší, čím je obráběný materiál tvárnější a náchylný ke zpevňování. Více náchylné ke zpevňování jsou materiály s nízkým modulem pružnosti.

Zpevněný povrch charakterizuje:

- houbka zpevnění,
- tvrdost a mikrotvrdost,
- gradient zpevnění (pokles tvrdosti se vzdáleností od povrchu),
- intenzita zpevnění.

Nejvýznamnější vliv na zpevnění má hloubka řezu a úhel čela. Při zvětšení hloubky řezu roste tvrdost obrobeného povrchu. Rovněž tvrdost roste při přechodu od pozitivního úhlu čela k negativnímu. Ukázka poklesu tvrdosti se vzdáleností od povrchu při soustružení různými řeznými rychlostmi slitiny Ti6Al4V (viz. obr. 41) [3].



Obr. 41 Pokles tvrdosti v povrchové vrstvě při soustružení Ti6Al4V, podle [3].

Změny v obrobené ploše nastávají v důsledku mechanické a tepelné interakce materiálu obrobku a nástroje. Tyto změny je potřeba řešit z hlediska metalurgicko- mechanického a s ohledem na vliv nově vzniklého povrchu na funkční vlastnosti součásti. Chování materiálu při obrábění ovlivňuje především jeho krystalická stavba, složení a rozměr zrn, ale také vměstky a nečistoty. To se následně projeví v mikrostruktúře povrchu, v profilu dislokací a interakcí mezi nimi a dalšími lokálními defekty.

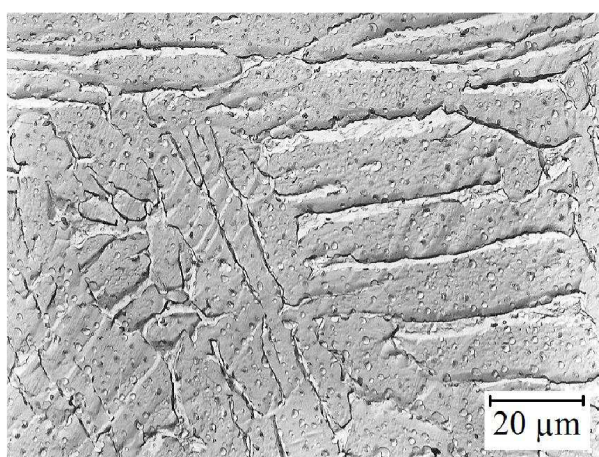
Hlavními příčinami změn v povrchové vrstvě jsou:

- plastická deformace,
- vysoký teplotní gradient mezi povrchem obrobku a nástrojem,
- chemická reakce mezi obrobkem, nástrojem a prostředím,
- absorpce na nově vytvořeném povrchu.

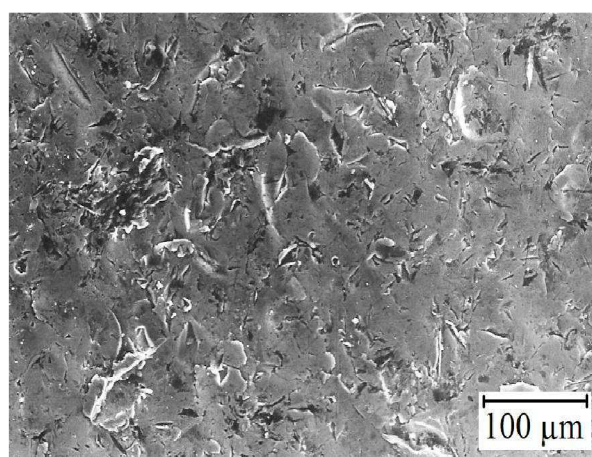
Na vlastnosti povrchové vrstvy obrobku má vliv každá technologická operace, při čemž z nich nejvýznamnější je metoda jejího dokončování. Celý technologický postup výroby má vliv na funkční vlastnosti součásti, jako je např. únava nebo opotřebení. Nízká tepelná vodivost titanu způsobuje značný nárůst teploty v místě řezu, což se může projevit alfatizací

obráběného povrchu. Vlivem vyšší tvrdosti a odolnosti proti deformaci α fáze dochází při překrystalizaci ke zvýšení pnutí, které způsobuje deformaci β fáze. Tyto změny se projevují ve změnách struktury a v hustotě dislokací v povrchové vrstvě obráběného materiálu. Na obr. 42 je vidět precipitace fází, probíhající v tenké podpovrchové vrstvě při obrábění Ti6Al4V, kdy vlivem plastické deformace se utvářejí globulární zrna α fáze. Tato globulární zrna byla pozorována do hloubky 40 [μm] pod povrchem [3].

Povrchovou vrstvu materiálů, které i po obrábění mají v povrchové vrstvě dostatečnou rezervu plasticity, lze dodatečně zpevňovat např. kuličkováním, válečkováním, tryskáním, balotínováním, apod. To je výhodné především u součástí s technologickými vruby v místech vrubu (např. kořeny lopatek turbíny), kde se zpevněním povrchu vytvářejí zbytková tlaková napětí, která vedou ke zvýšení únavové pevnosti součástí. Ukázka balotínovaného povrchu slitiny Ti7Al4Mo (viz. obr. 43).



Obr. 42 Struktura slitiny Ti6Al4V - precipitace fází v podpovrchové vrstvě [3].



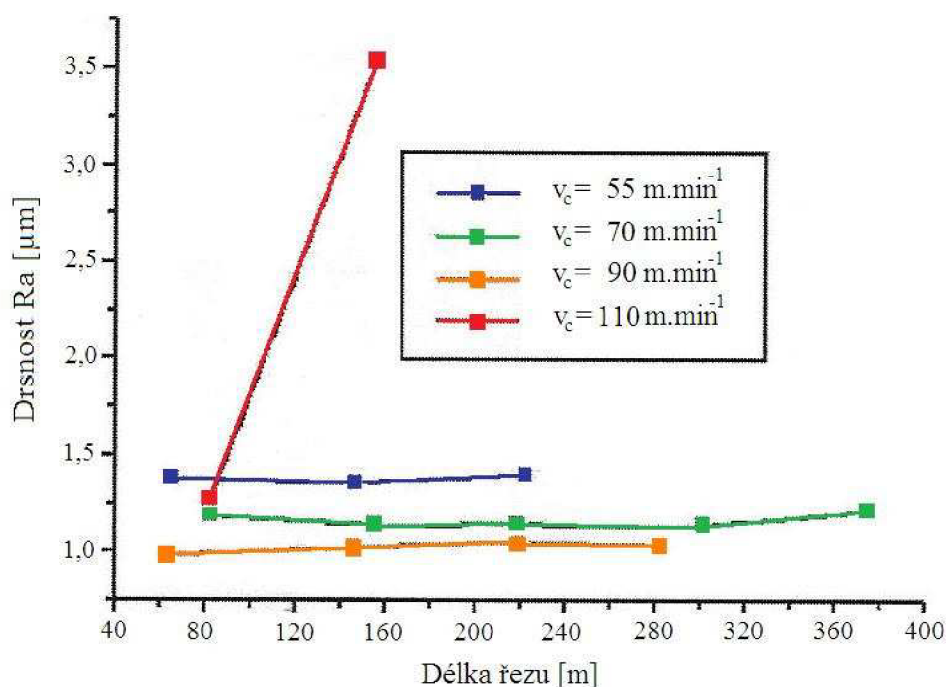
Obr. 43 Povrch slitiny Ti7Al4Mo dokončený balotínováním [3].

3.3.2 Drsnost povrchu

Dalším faktorem ovlivňujícím únavové vlastnosti je drsnost a textura povrchu. Při zvýšení drsnosti povrchu titanových slitin o jeden řád klesá mez únavy až o 20% [23]. Drsnost povrchu hraje významnou roli v případě, že je v povrchové vrstvě vyčerpána zásoba plasticity. To nastává vždy, když se obrábí materiály s malým rozdílem mezi mezí kluzu a mezí pevnosti. V tomto případě plastická deformace povrchové vrstvy znamená velké zpevnění, překročení meze pevnosti a velká drsnost povrchu působí jako vruby a má podstatný vliv na snížení únavové pevnosti součástí. U takových materiálů nepřináší zpevňování povrchové vrstvy žádný užitek a je potřeba předepisovat nízké drsnosti povrchu. Mezi tyto materiály lze zařadit např. slitinu Ti7Al4Mo [3].

Obecně platí, že se vzrůstající řeznou rychlostí klesá hodnota drsnosti a lze tak dosáhnout jakostnějšího povrchu. Tento jev lze pozorovat na obr. 44. Jedná se o graf závislosti drsnosti povrchu na délce řezu nástroje. Tyto zkoušky byly prováděny při podélném soustružení

za sucha na slitině Ti6Al4V, byl použit nepovlakovaný SK typu S15, H20 (dle ISO 513) a zvoleny řezné podmínky $a_p = 0,5$ [mm]; $f_n = 0,1$ [mm.ot⁻¹]; $v_c = 55-110$ [m.min⁻¹]. Řezné podmínky jsou tedy srovnatelné s podmínkami, které jsou voleny v experimentální části práce při obrábění slitiny Ti6Al4V. Z grafu je patrné, že drsnost povrchu klesá a zůstává po celou dobu (délku) řezu konstantní v závislosti na zvyšování řezné rychlosti jen do určité míry. Nejnižších stálých hodnot drsnosti bylo dosaženo při řezné rychlosti $v_c = 90$ [m.min⁻¹]. Při této hodnotě řezné rychlosti byla v rámci experimentů na testované slitině Ti6Al4V rovněž naměřena nejmenší drsnost povrchu $R_a = 0,8$ [μm] při použití zkoušené VBD Pramet 6615. Tuto řeznou rychlost lze považovat za hraniční hodnotu, protože při dalším zvýšení řezné rychlosti na 110 [m.min⁻¹] se již ukázalo, že drsnost povrchu je závislá na délce (době) řezu a přímoúměrně s ní roste. Dá se předpokládat, že je to způsobeno degradací řezného nástroje v důsledku generování velkého množství tepla v místě řezu a vzrůstu teploty [16].



Obr. 44 Závislost drsnosti na délce řezu [16].

Rozhodujícími faktory pro drsnost povrchu při obrábění je poloměr špičky nástroje velikost posuvu. Pro jednobřitý nástroj platí následující vztah:

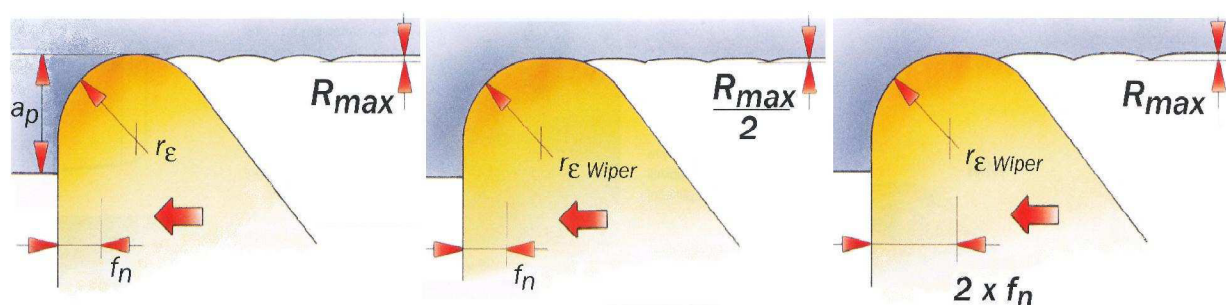
$$R_{max} = \frac{f_n^2}{8 \cdot r_\epsilon} \cdot 1000$$

kde:

- R_{max} ... přibližná očekávaná hodnota drsnosti
- f_n ... posuv na otáčku
- r_ϵ ... poloměr špičky nástroje

podle [18]

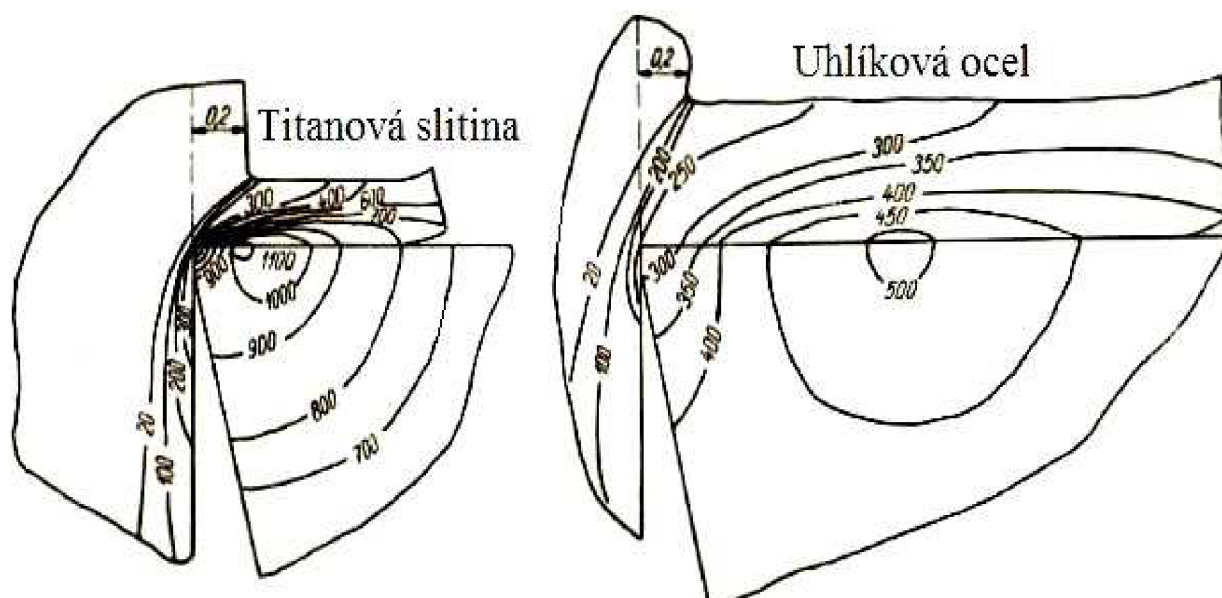
Pokud se při obrábění použijí hladící VBD (tzv. Wiper), lze tak dosáhnout polovičních hodnot drsnosti při zachování posuvu, a nebo stejných hodnot drsnosti při dvojnásobném posuvu (viz. obr. 45).



Obr. 45 Vliv poloměru špičky nástroje na drsnost [18].

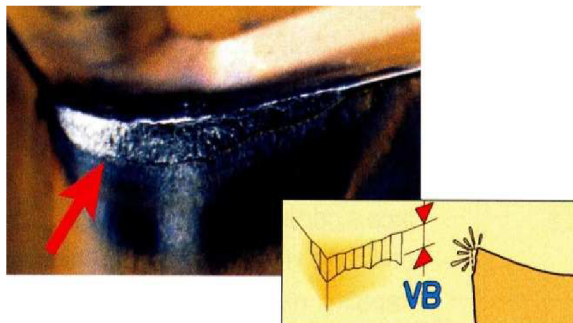
3.5 Opatřebení nástroje

Značné opotřebení nástrojů při obrábění titanových slitin je zapříčiněno především nízkou tepelnou vodivostí titanu a vysokým součinitelem tření s ostatními kovy. Uváží-li se malá plocha kontaktu třísky s čelem nástroje, má to za následek generování velkého množství tepla v místě řezu a následné vysoké lokální tepelné namáhání nástroje. Díky tomu se při obrábění titanu odvádí až 80% generovaného tepla do nástroje [16]. Porovnání teplotního pole při obrábění titanové slitiny a oceli za stejných řezných podmínek je na obr. 46.

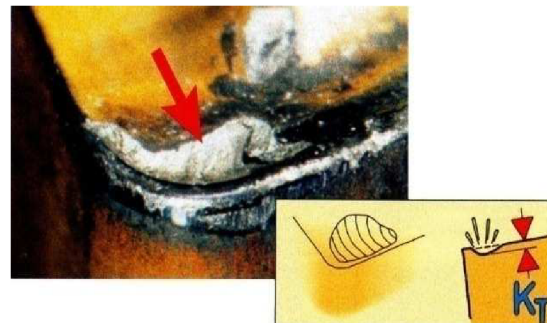


Obr. 46 Teplotní pole při obrábění titanové slitiny a uhlíkové oceli, podle [10].

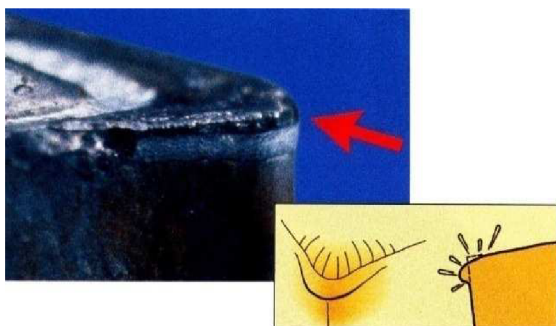
Nejčastějšími projevy degradace nástroje při obrábění titanových slitin jsou: hřbetní opotřebení VB (měřeno při technologických zkouškách v rámci experimentu), čelní opotřebení KT, plastická deformace nástroje a tvoření nárůstků (viz. obr. 47-50).



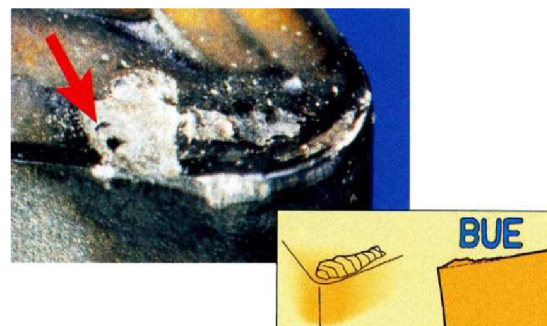
Obr. 47 Hřbetní opotřebení VB [18].



Obr. 48 Čelní opotřebení KT [18].



Obr. 49 Plastická deformace břitu [18].



Obr. 50 Tvorba nárůtku BUE [18].

Příliš vysoká řezná rychlost nebo malá odolnost nástrojového materiálu proti opotřebení způsobuje rychlé opotřebení nástroje na hřbetě VB, a to má za následek špatnou jakost obrobekových ploch či dokonce nedodržení předepsaných tolerancí. Jako opatření proti nadměrnému opotřebení na hřbetě se doporučuje snížit řeznou rychlost, zvolit nástrojový materiál s vyšší odolností proti opotřebení, použít nástroje povlakované oxidickou keramikou Al_2O_3 či zvolit cermetovou třídu. U materiálů, u nichž dochází ke zpevňování při jejich obrábění (titan) je doporučeno zvolit menší úhel nastavení κ_r [18].

Kráterové opotřebení (výmol na čele) nástroje ve tvaru žlábků KT je důsledkem vysokých řezných teplot na straně čela a dochází k difúznímu opotřebení. Žlábek na čele způsobuje zeslabení břitu a může dojít k jeho vylomení, což podstatně sníží jakost obrobekových ploch. Jako opatření proti kráterovému opotřebení na čele se doporučuje snížit řeznou rychlost, případně posuv, zvolit VBD s pozitivní geometrií či použít nástroje povlakované Al_2O_3 [18].

Plastická deformace břitu je způsobena vysokými řeznými teplotami za současného působení vysokých měrných tlaků v místě řezu. Způsobuje změny v geometrii, následně špatnou kontrolu třísky a špatnou jakost obrobekových ploch. Může vést až ke zlomení břítové destičky. Proti plastické deformaci břitu je možné se bránit použitím třídy SK s lepší odolností proti plastické deformaci a snížením řezné rychlosti [18].

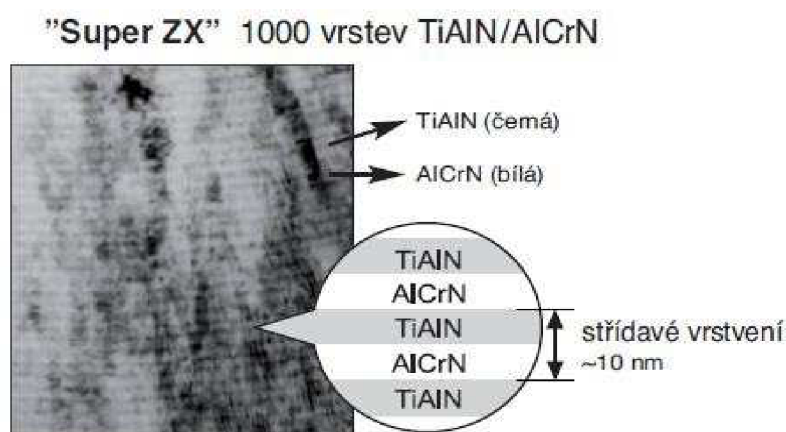
Tvorba nárůstku BUE (Built Up Edge) je způsobena navařováním obráběného materiálu na čelo nástroje v důsledku nízké řezné rychlosti či negativní geometrie. Nárůstek na břítu nástroje způsobuje špatnou jakost obrobených ploch, případně se může objevit i vylamování břítu při jeho odtržení. Pro eliminaci tvorby nárůstků se doporučuje zvýšit řeznou rychlost, použít pozitivní geometrii a vyvarovat se přerušovaného řezu [18].

Všechny výše zmíněné problémy s opotřebením nástrojů je možné rovněž eliminovat vhodnou aplikací procesních kapalin, které jednak snižují tření nástroje s obrobkem, ale především odvádějí značnou část generovaného tepla a tím snižují tepelné namáhání nástroje.

3.5.1 Doporučení ovlivňující trvanlivost nástrojů

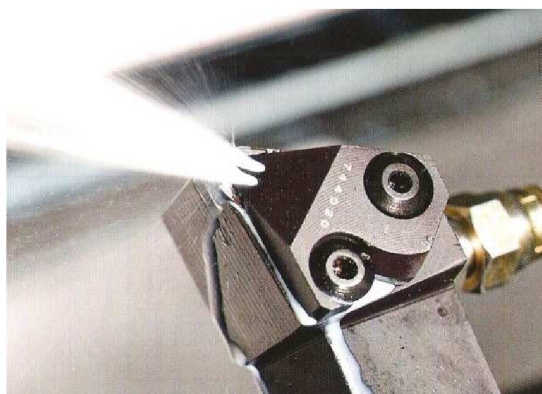
Na životnost nástrojů ze slinutých karbidů a zároveň i na jejich vlastnosti (tuhost, tvrdost, pevnost, houževnatost...) má vliv nejen procentuelní obsah tvrdých částic a pojiva, ale i velikost částic. Například u karbidu wolframu, který má z hlediska tvrdosti největší význam, se jako pojivo používá kobalt, který zvyšuje houževnatost, ale snižuje tvrdost. Tento nepříznivý jev se eliminuje použitím jemnozrnného karbidu wolframu s velikostí zrn do 7[μm], případně ultrajemných zrn (do 5[μm]) a nanozrn (pod 1[μm]). Použitím nástroje z jemnozrnného karbidu wolframu oproti standardnímu nástroji bylo při stejných řezných podmínkách dosaženo téměř dvojnásobné trvanlivosti břítu nástroje [25].

Povlakování nástrojů se používá především proto, aby se snížilo tření mezi nástrojem a obrobkem. V důsledku toho klesají řezné síly, klesá teplota a prodlužuje se životnost. Standardně používané povlaky (TiC, TiN, TiCN) jsou pro obrábění titanu a jeho slitin nevhodné, protože v sobě obsahují titan, který reaguje s obráběným materiálem, dochází k difuzi a k rychlému opotřebení. Pro obrábění titanu lze tedy doporučit takové povlaky, které nejsou založeny na bázi titanu, např. nitrid chromu (CrN), který se využívá při plynulém řezu jako ochrana proti tvorbě nárůstků nebo výše zmíněný Al_2O_3 , který eliminuje tepelné namáhání nástroje. V posledních letech se více uplatňuje metoda povlakování PVD, kdy se na povrch nanese vrstva 2-6 [μm], přičemž v povrchové vrstvě vznikají příznivá tlaková napětí oproti metodě CVD, kdy nanesená vrstva má tloušťku větší (5-15 [μm]), ale v povrchové vrstvě vznikají při chladnutí nepříznivá tahová napětí. Ta mají nepříznivý dopad na ostří a na výkon nástroje při přerušovaném řezu či cyklickém zatěžování v případě obrábění těžkoobrobitelných kovů, kterým titan je. Za jistých podmínek lze pro obrábění titanových slitin použít jako povlak titan aluminium nitrid (TiAlN), který přispívá k delší životnosti v aplikacích s prudkým uvolňováním tepla. Tento materiál se používá často jako multivrstva v kombinaci s multivrstvou Al_2O_3 , nebo AlCrN [24]. Takový druh vrstveného povlaku, použitelný pro obrábění titanu a jeho slitin je nový ultra tvrdý „super povlak ZX“ s extra houževnatým substrátem. Povlak tvoří 1000 střídajících se vrstev TiAlN/AlCrN (viz. obr. 51). S tímto povlakem se dosahuje výborné teplotní a ořevové odolnosti a díky němu se může až dvakrát prodloužit životnost nástroje [20,24].



Obr. 51 Povlak „Super ZX“ [20].

Další možností jak prodloužit trvanlivost nástroje je nový způsob řešení přívodu chladící kapaliny přímo do zóny řezu. Firma Seco používá technologii „Jet Stream Tooling“ (viz. obr. 52), která spočívá v intenzivním chlazení čela nástroje tlakovou kapalinou. Trysky pro přívod chladící kapaliny jsou umístěny přímo na držáku nástroje a nasměrovány tak, aby proud kapaliny o tlaku až 200 [bar] a vysoké rychlosti směřoval přímo do místa, kde se tříška smýká po čele nástroje. Řezná kapalina tak vniká mezi třísku a čelo, snižuje se tření třísky po čele, díky tomu klesá množství generovaného tepla a již vzniklé teplo se efektivněji odvádí z místa řezu, klesá teplota a prodlužuje se tak životnost nástroje [19].



Obr. 52 Technologie chlazení čela tlakovou kapalinou Jet Stream Tooling [19].



Obr. 53 Technologie chlazení čela i hřbetu nože tlakovou kapalinou JET HPC [28].

Firma Iscar vyvinula technologii přívodu chladící kapaliny do zóny řezu „Jet High Pressure Coolant“ (viz. obr. 53). Při této technologii se nejen že chladí čelo nástroje, jako je tomu u technologie „Jet Stream Tooling“, ale navíc se chladí i hřbet nástroje přívodem tlakové kapaliny zespoda tryškou, která je přímo integrována v držáku nástroje. Díky tomu se navíc snižuje i tření hřbetu nože po obrobené ploše a díky tomu klesá množství generovaného tepla

a vzniklé teplo je lépe odváděno. V důsledku toho klesá teplota nejen na čele, ale i na hřbetu nástroje a dá se říci, že nástroj je tak dokonale chráněn proti tepelným účinkům. Dosahuje se tak prodloužení trvanlivosti nástroje a zvýšení produktivity obrábění o 30 až 50% ve srovnání s konvenčním způsobem chlazení (viz obr. 54). Z obrázku je patrné, že při stejných řezných podmínkách vlivem působení tlakové kapaliny dochází k lámání utvářených třísek, oproti konvenčnímu způsobu chlazení, kdy vzniká plynulá tříška, díky čemuž následně odpadá problém s jejich odvodem, skladováním a případnými problémy při transportu odpadu. Tato technologie přivodu chladicí kapaliny do zóny řezu je hojně využívána v praxi při obrábění titanu a jeho slitin a postupně vytlačuje konvenční způsob chlazení.



Obr. 54 Porovnání technologie JET HPC s konvenčním chlazením [28].

V tabulce 13 jsou uvedeny řezné podmínky pro obrábění titanových slitin bez použití řezné kapaliny, úhel nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 45-60^\circ$ a trvanlivost nástroje $T = 15$ [min]. Obecně platí, že při obrábění titanových slitin by hloubka řezu a_p neměla klesat pod 0,5 [mm].

Tab. 13 Doporučené řezné podmínky pro obrábění titanových slitin [18]

Parametr	Dokončování	Polohrubování	Hrubování
hloubka řezu a_p [mm]	1,5	2,5	5
posuv na otáčku f_n [mm.ot ⁻¹]	0,1	0,3	0,5
řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	85	70	55

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Metodika hodnocení parametrů zkoušek

Cílem měření bylo ověření vlivu strukturního složení materiálu nástroje na opotřebení vyměnitelných břitových destiček při soustružení titanové slitiny Ti6Al4V. Měřila se střední výška opotřebení fasetky na hřbetě při podélném soustružení titanové slitiny Ti6Al4V. Testovány byly čtyři destičky od třech výrobců slinutých karbidů a to: Pramet Tools, s.r.o.; WidiaTM, a Sumitomo Electric.

4.1.1 Obecné podmínky zkoušek

Obráběný materiál

Obráběným materiálem byla titanová slitina Ti6Al4V, jejíž chemické složení, materiálové a fyzikální charakteristiky jsou uvedené v tabulce 9. Rozměr opracovávaného polotovaru byl ϕ 85,8 – 453mm.

Upnutí obrobku

Obrobek byl upnut v univerzálním tříčelistovém sklíčidle a podepřen otočným hrotem v pinole koníku.

Obráběcí stroj

Zkoušky byly prováděny na univerzálním hrotovém soustruhu SV18RD s plynulou regulací otáček, výrobce TOS Trenčín, výrobní číslo 218100820g, rok výroby 1982. Pro přesné měření otáček byl použit univerzální čítač BM 520.

Řezné podmínky

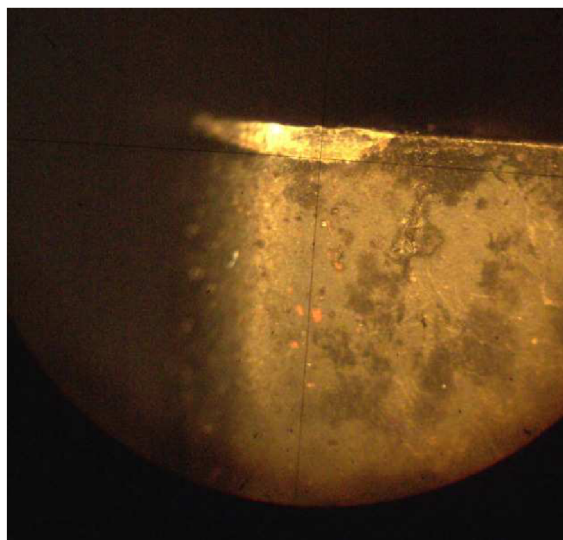
Řezné podmínky byly zvoleny takové, aby naměřené výsledky bylo možné porovnat s literaturou (viz. zdroj 22). Použité řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 14.

Tab. 14 Použité řezné podmínky při soustružení titanové slitiny Ti6Al4V

Řezné podmínky	Jednotka	Rozsah
řezná rychlost v_c	[m.min ⁻¹]	120
hloubka řezu (přisuv) a_p	[mm]	0,5
posuv na otáčku f_n	[mm]	0,1
chlazení	-	bez chlazení

Měření šířky opotřebení na hřbetě VB

Pro odečítání hodnoty šířky opotřebení na hřbetě břitových destiček byl použit optický mikroskop BK OSAN s mikrometrickými šrouby umožňujícími pohyb stolu mikroskopu v příčném a v podélném směru, výrobce CARL ZEISS, rok výroby 1978.



Na obrázku 55 je dobře patrný posuvný kříž, který se ovládá pomocí mikrometrického šroubu se stupnicí.

Obr. 55 Pohled do mikroskopu při měření šířky opotřebení.

Charakteristika použitých nástrojových materiálů

Při zkouškách byly použity nástrojové materiály uvedené v tabulce 15. Nožový držák PLCNR 2020 K12 KT551 a vyměnitelné břitové destičky typu CNMG 120408. Nožový držák byl při provádění zkoušek nastaven tak, aby úhel nastavení hlavního ostří břitové destičky byl $\alpha_r = 45^\circ$.

Tab. 15 Charakteristika použitých nástrojových materiálů

Výrobce	Materiál	Typ SK (ISO 513)	Charakteristika
Widia Krupp	TN 7115	P 15	SK typu P vhodný pro ocel, střední hrubování a mírně přerušovaný řez, povlakovaný MT-CVD multivrstvou TiN-TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN, dobrý kompromis mezi těrůvzdorností a pevností
Pramet Tools	6615	P 15, K 10	SK typu P vhodný pro ocel nebo K vhodný pro litinu, podmíněně i pro kalené materiály, dokončování až střední hrubování, kontinuální až mírně přerušovaný řez, povlakovaný MT-CVD a PVD s nosnou vrstvou TiCN a svrchní vrstvou TiC
Pramet Tools	9230	P 30, M 25	SK typu P vhodný pro ocel nebo M vhodný pro kalené materiály, podmíněně i pro špatně obrobitelné materiály (slitiny TiAl, Ni...), dokončování až hrubování, kontinuální až přerušovaný řez, povlakovaný MT-CVD středně silnou multivrstvou se svrchní vrstvou TiN
Sumitomo	AC 15	P10-P20	SK typu P vhodný pro ocel, povlakovaný TiN

4.1.2 Dosažené výsledky měření

Zkoušky opotřebení

Provedením zkoušek byly naměřeny hodnoty opotřebení na hlavním hřbetu VB a zaznamenány v tabulce 16. Jako kritérium opotřebení byla zvolena hodnota $VB = 0,3$ [mm]. Z těchto naměřených hodnot byl sestrojen graf závislosti hřbetního opotřebení břitů VB (viz. obr. 57). Jednotlivé body grafu každé břitové destičky jsou proloženy křivkou opotřebení (polynom třetího stupně) a v legendě je zaznamenána i hodnota spolehlivosti každé křivky. Hodnoty trvanlivosti $T_{VB0,3}$ jednotlivých destiček, uvedené v tabulce 17 byly zjištěny odečtením z grafu křivek opotřebení pro hodnotu $VB = 0,3$ [mm] a následně vyneseny do sloupkového grafu trvanlivosti $T_{VB0,3}$ (viz. obr. 58).

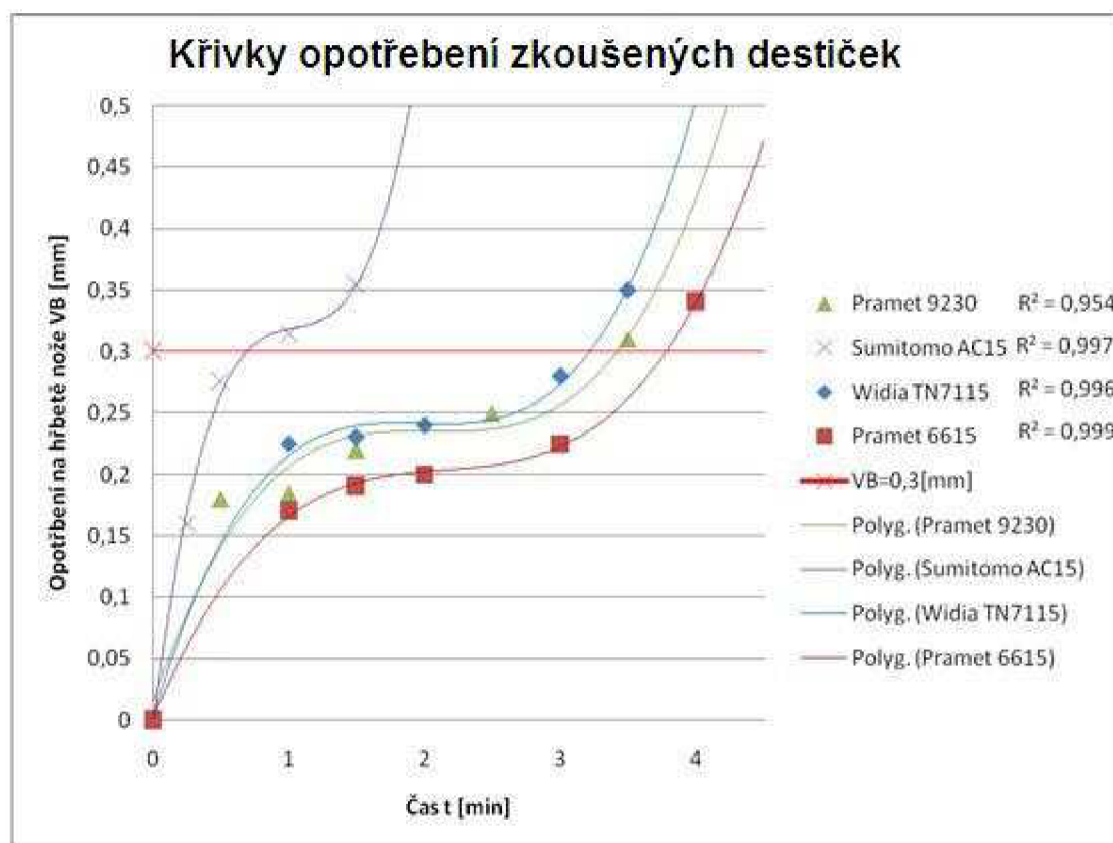


Po čele nástroje Pramet 6615 odchází plynulá tříška obráběného materiálu Ti6Al4V

Obr. 56 Tříška titanové slitiny Ti6Al4V.

Tab. 16 Naměřené hodnoty hřbetního opotřebení

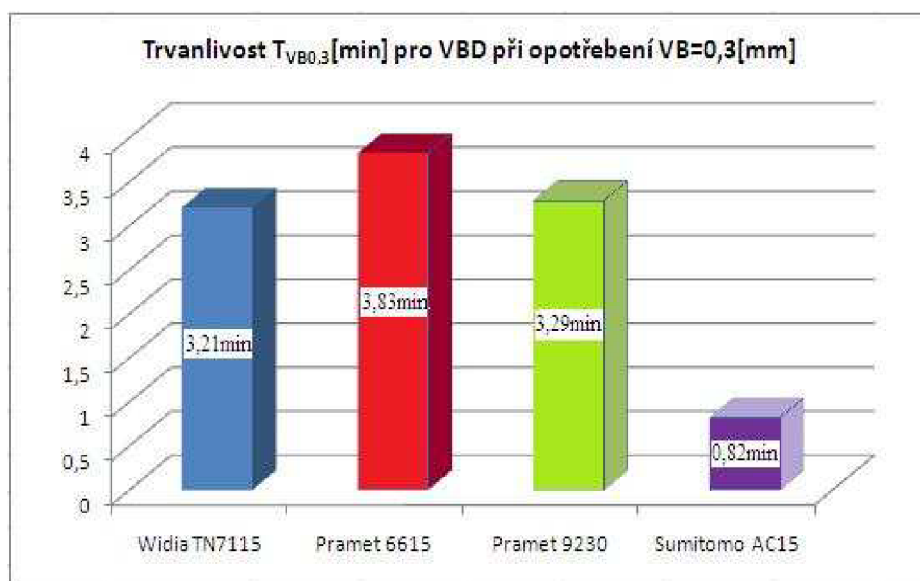
Datum měření 5.12.2011	materiál vzorku: Ti6Al4V	Naměřené hodnoty opotřebení hřbetu VB břitových destiček zkoušených řezných materiálů v závislosti na době obrábění				
		řezná rychlost v_c : 120[m.min ⁻¹]	hloubka řezu a_p : 0,5 [mm]	posuv na otáčku: f_n 0,1 [mm]	měřil: Tolkner Josef	asistoval: Svoboda Pavel
Výrobce, typ ISO 513, materiál	řezné podmínky:					
	čas t_1 [min]	1	1,5	2	3	3,5
WIDIA P 15, K TN7115	VB [mm]	0,225	0,23	0,24	0,28	0,35
PRAMET P 15, K 10 6615	čas t_2 [min]	1	1,5	2	3	4
	VB [mm]	0,17	0,19	0,2	0,225	0,34
PRAMET P 30, M 25,K 9230	čas t_3 [min]	0,5	1	1,5	2,5	3,5
	VB [mm]	0,18	0,185	0,22	0,25	0,31
SUMITOMO P 10- P 20 AC15	čas t_4 [min]	0,25	0,5	1	1,5	
	VB [mm]	0,16	0,275	0,315	0,355	



Obr. 57 Křivky opotřebení zkoušených nástrojových materiálů.

Tab. 17 Hodnoty trvanlivosti VBD

VB 0,3 [mm]	$T_{VB0,3}$ [min]
Widia TN7115	3,21
Pramet 6615	3,83
Pramet 9230	3,29
Sumitomo AC15	0,82



Obr. 58 Sloupkový diagram trvanlivosti zkoušených VBD.

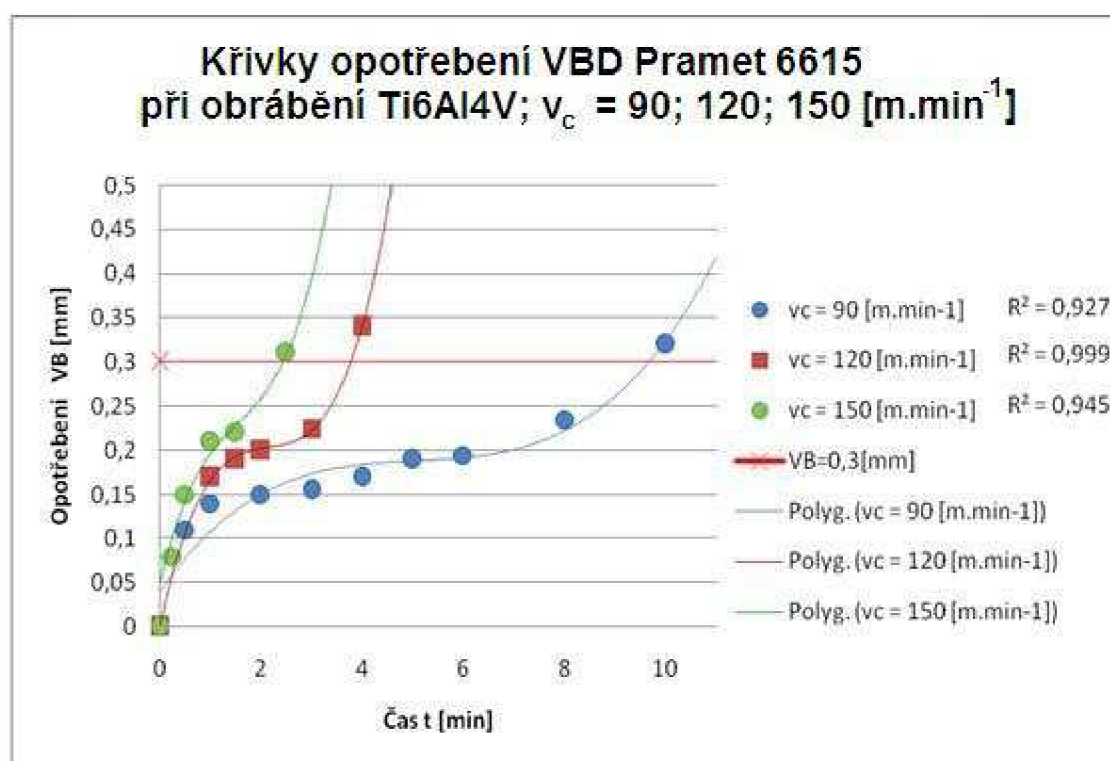
Ze názorných výsledků měření se může usuzovat, že materiál VBD Sumitomo AC15 není vhodný materiál pro obrábění titanové slitiny Ti6Al4V. O materiálech VBD Widia TN 7115; Pramet 9230 a Pramet 6615 se může říci, že pro obrábění této Ti-slitiny vhodné jsou.

Rychlostní zkoušky VBD Pramet 6615

Jako nejvýhodnější ze zkoušených materiálů se jeví VBD 6615 (P15, K10) od firmy Pramet Tools, jejíž trvanlivost je při zadaných řezných podmínkách 3,83 [min]. Byl proto vybrán pro další zkoušky při řezných rychlostech $v_c = 90; 150$ [m.min⁻¹]. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 18 a byl sestaven graf rychlostní charakteristiky pro tento materiál (viz. obr. 59).

Tab. 18 Hodnoty hřbetního opotřebení VBD Pramet 6615 při obrábění titanové slitiny Ti6Al4V

čas t [min]	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10
$v_c = 90$ [m.min ⁻¹]		0,11	0,14		0,15		0,155	0,17	0,19	0,195	0,235	0,32
$v_c = 120$ [m.min ⁻¹]			0,17	0,19	0,2		0,225	0,34				
$v_c = 150$ [m.min ⁻¹]	0,08	0,15	0,21	0,22		0,31						



Obr. 59 Křivky opotřebení VBD Pramet 6615 při obrábění titanové slitiny Ti6Al4V.

Kritérium opotřebení bylo opět zvoleno $VB = 0,3$ [mm]. Hodnoty trvanlivosti uvedené v tabulce 19 byly zjištěny odečtením z grafu rychlostní charakteristiky a z nich sestrojen graf T_t - v_c závislosti (viz. obr. 61) pro materiál Pramet 6615 (P15, K10).

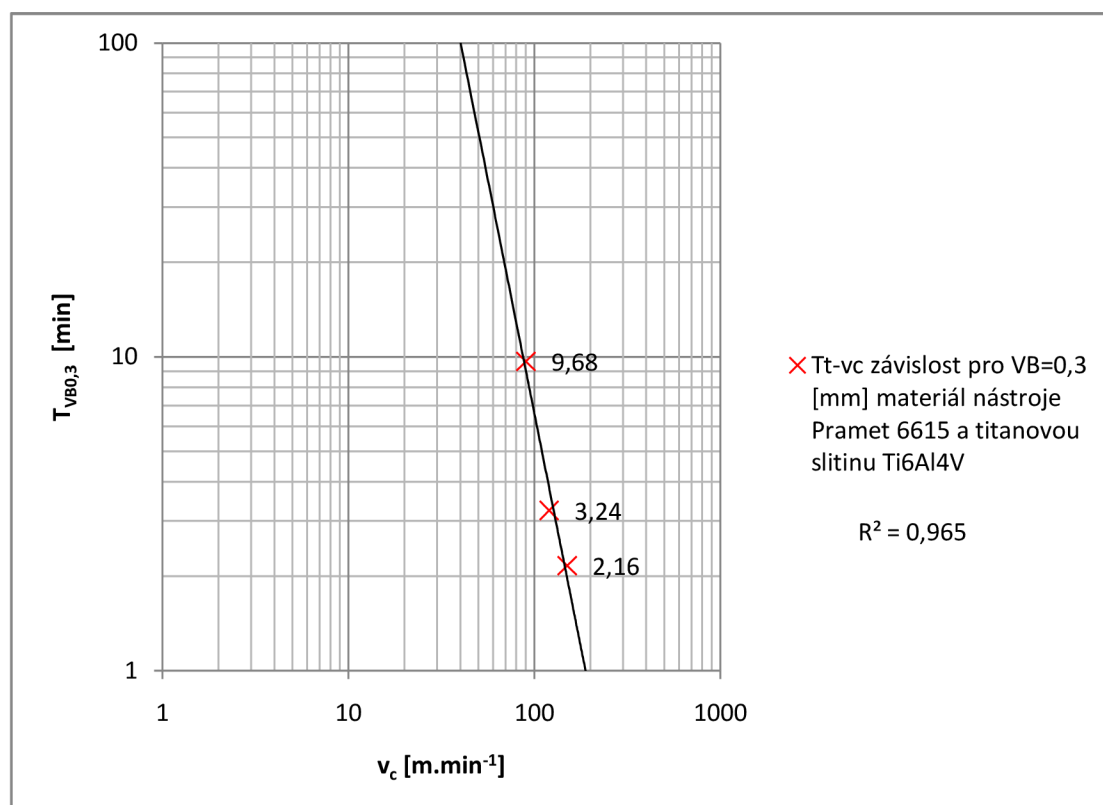
T_t - v_c závislost pro nástrojový materiál Pramet 6615 a titanovou slitinu Ti6Al4V

Tab. 19 T_t - v_c závislost Pramet 6615

T _t -v _c závislost pro VB=0,3 [mm] materiál nástroje Pramet 6615 a titanovou slitinu Ti6Al4V			
Řezná rychlost v _c [m.min ⁻¹]	90	120	150
Trvanlivost T _{VB0,3} [min] pro kritérium opotřebení VB=0,3[mm]	9,68	3,24	2,16



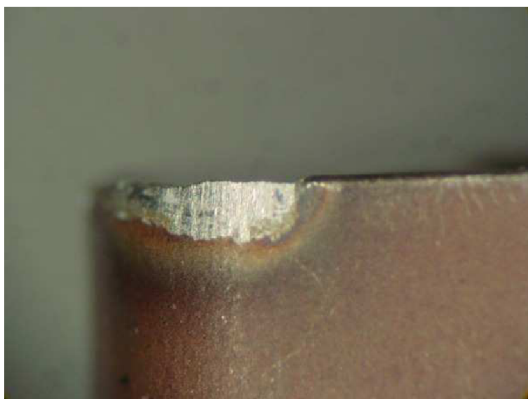
Obr. 60 Uspořádání experimentálního pracoviště.



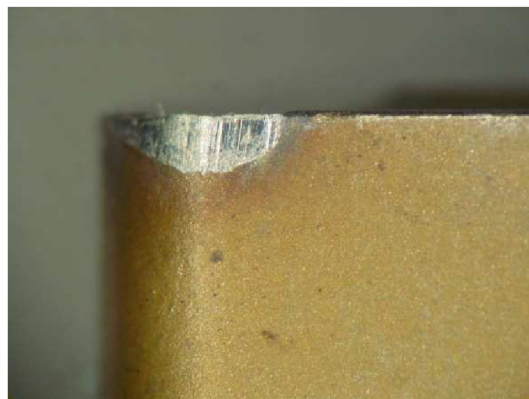
Obr. 61 T_t - v_c závislost materiálu nástroje Pramet 6615 a titanovou slitinu Ti6Al4V.

Opotřebení hřbetů každé destičky po provedení zkoušek je znázorněno na obrázcích 62-66. Na posledním obrázku (obr. 66) je znázorněna úplná degradace břitové destičky Pramet 6615 po třech minutách obrábění Ti6Al4V řeznou rychlostí $v_c = 150$ [m.min⁻¹]; $f_n = 0,1$ [mm.ot⁻¹]; $a_p = 0,5$ [mm], kde je dobře patrná destrukce břitu na hřbetě.

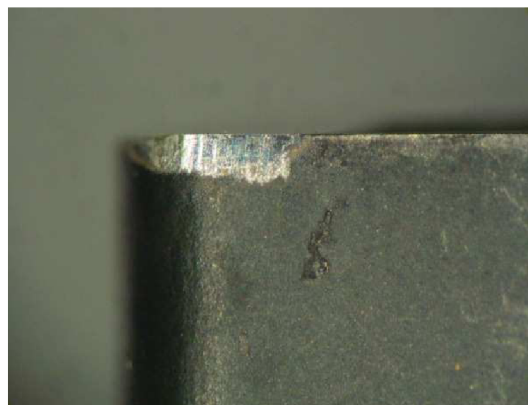
Hřbetní opotřebení břitových destiček



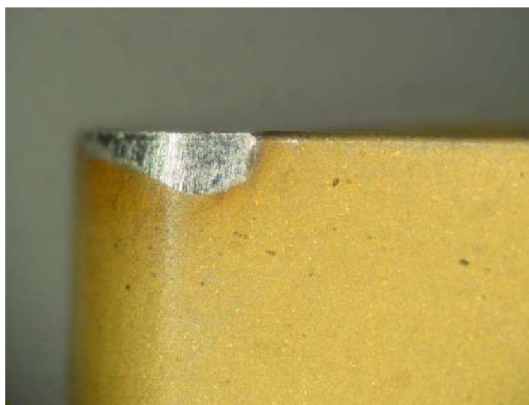
Obr. 62 Opotřebení Widia TN 7715.



Obr. 63 Opotřebení Pramet 9230.



Obr. 64 Opotřebení Pramet 6615.



Obr. 65 Opotřebení Sumitomo AC15.



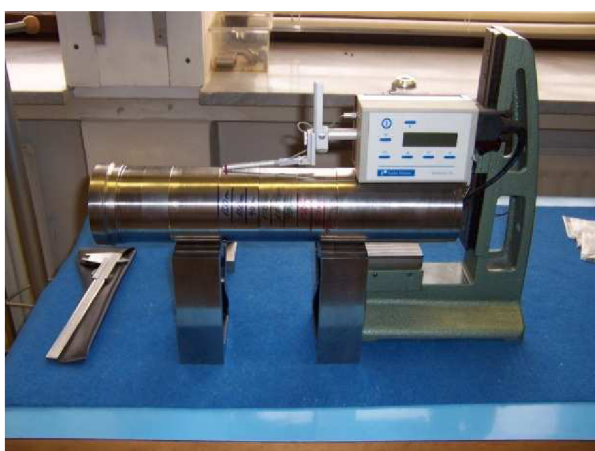
Obr. 66 Destrukce břitu Pramet 6615.

Destrukce břitu na hřbetě (úplná degradace) VBD Pramet 6615 při $v_c = 150$ [m.min⁻¹] nastala již po třech minutách (viz. obr. 66).

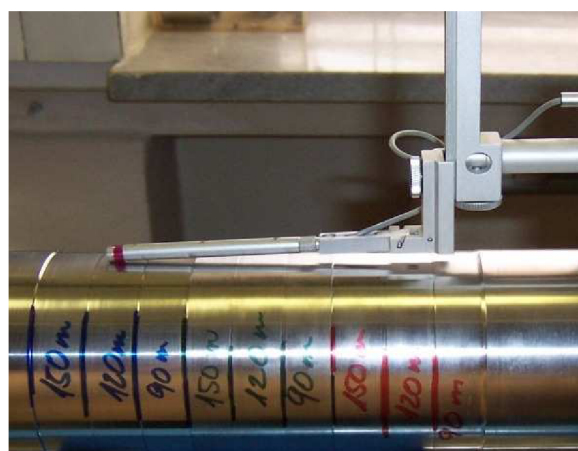
4.2 Drsnost obrobeného povrchu titanové slitiny Ti6Al4V

Po provedení zkoušek opotřebení byl zkoušený materiál upraven pro měření drsnosti (viz. obr. 68), a to tak že se obrobilo devět ploch po 15 mm vždy novým nepoužitým břitem břitových destiček, které byly vyhodnoceny jako vhodné k obrábění Ti6Al4V. Řezné podmínky byly použity stejné jako při experimentu pro každou ze tří břitových destiček, tedy $f_n = 0,1$ [mm.ot⁻¹]; $a_p = 0,5$ [mm]; $v_c = 90; 120; 150$ [m.min⁻¹].

Měření drsnosti bylo provedeno na kontaktním profilometru Surfronic +3 od firmy Taylor Hobson (viz. obr. 67).



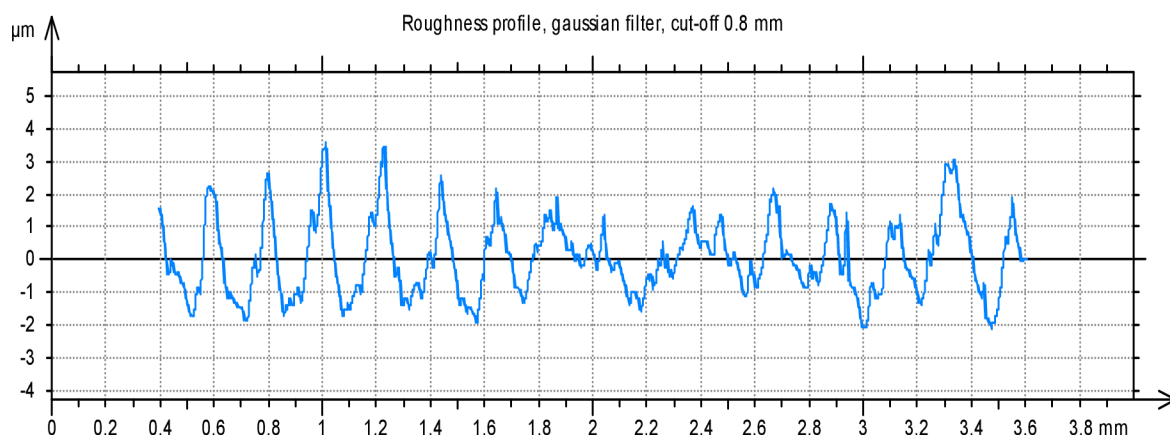
Obr. 67 Vlastní měření drsnosti povrchu.



Obr. 68 Detail výkyvného ramena s hrotem.

4.2.1 Dosažené výsledky měření drsnosti Ti6Al4V

1) Pramet 9230 (ISO 513 P30, M25), $f_n = 0,1$ [mm]; $a_p = 0,5$ [mm]; $v_c = 150$ [m.min⁻¹]



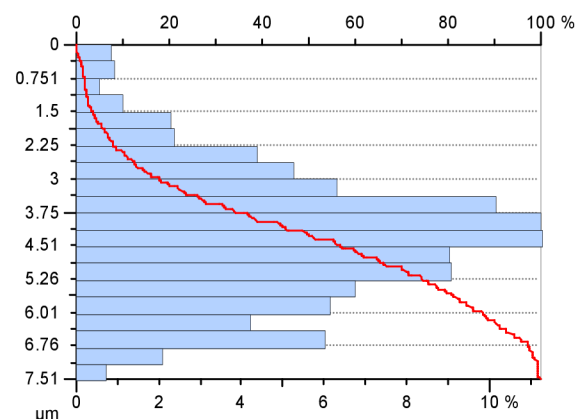
Obr. 69 Profil 1 měřeného povrchu 2D.

Parameters calculated on the profile Profile

* Parameters calculated by mean of all the sampling lengthes.
 * A microroughness filtering is used, with a ratio of 2.5 μm .

Roughness Parameters, Gaussian filter, 0.8 mm

Ra = 0.884 μm
 Rq = 1.08 μm



Obr. 70 Výstup měření 1.

Obr. 71 Křivka hustoty pravděpodobnosti 1.

Na obrázku 69 je vidět záznam 2D profilu měřeného povrchu, výstupem měření drsnosti byly hodnoty Ra a Rq (viz. obr. 70). Navíc byla pořízena křivka rozložení hustoty pravděpodobnosti (viz. obr. 71) jako obalová křivka modrých vodorovných sloupců a nosná křivka (znázorněna červenou čarou). Záznamy z měření drsností povrchu dalších obrobených ploch jsou zobrazeny v příloze č. 1. V tabulce 20 jsou uvedeny průměrné hodnoty drsností všech obrobených ploch.

Tab. 20 Naměřené hodnoty drsností obrobené plochy na Ti6Al4V

Parametr drsnosti povrchu		Ra [μm]			Rq [μm]		
Řezná rychlost v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]		150	120	90	150	120	90
Nástrojový materiál	Widia TN7115 (P15, K)	1,678	1,746	1,532	1,986	2,137	1,784
	Pramet 9230 (P30, M25, K)	0,987	1,076	0,828	1,274	1,341	1,117
	Pramet 6615 (P15, K10)	2,216	1,387	0,767	2,646	1,892	0,976

Hodnoty uvedené v tabulce 20 jsou aritmetickým průměrem parametrů Ra a Rq z pěti opakovaných měření. Z naměřených hodnot je patrné, že obrobený povrch vykazuje nejmenší drsnost při obrábění břitovou destičkou Pramet 6615, a to nejnižší zkoušenou řeznou rychlostí $v_c = 90$ [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]. Při vyšších řezných rychlostech se kvalita povrchu zhoršuje. Při obrábění nástrojovými materiály Widia TN7115 a Pramet 9230 je drsnost nejdříve nižší, se stoupající řeznou rychlostí se zvyšuje a potom opět klesá. To může být zapříčiněno i chvěním vřetena stroje.

4.3 Intermetalická slitina TiAl

K dalším zkouškám byl použit vzorek intermetalické titanové slitiny Ti46Al7Nb0,7Cr0,1Si0,2Ni, která se používá jako materiál na odlitky turbínových kol turbokompresorů u některých typů automobilů. Její chemické složení je uvedené v tabulce 11. Pro obrábění této slitiny byla použita břitová destička, která vykazovala nejmenší opotřebení v předešlých zkouškách, tedy Pramet 6615 (P15,K10).

4.3.1 Obecné podmínky zkoušek

Obráběný materiál

Obráběným materiálem byla titanová slitina Ti46Al7Nb0,7Cr0,1Si0,2Ni, jejíž mikrostruktura je vyobrazena na obrázku 26. Rozměr opracovávaného polotovaru byl ϕ 66,1 – 53mm.

Upnutí obrobku

Obrobek byl upnut v univerzálním tříčelistovém sklíčidle bez podpory.

Obráběcí stroj

Zkoušky byly prováděny na univerzálním hrotovém soustruhu SV18RD s plynulou regulací otáček, výrobce TOS Trenčín, výrobní číslo 218100820g, rok výroby 1982. Pro přesné měření otáček byl použit univerzální čítač BM 520.

Řezné podmínky

Řezná rychlost byla na základě doporučení v literatuře (viz. zdroj 1) zvolena desetkrát nižší než pro standardní titanové slitiny. Hodnoty řezné rychlosti 15- 25 [m.min⁻¹] jsou podle této literatury hraničními doporučenými hodnotami pro optimální trvanlivost a řezný výkon. Posuv a hloubka řezu zůstala zachována z předchozího měření (viz. tab. 21).

Tab. 21 Řezné podmínky pro intermetalickou slitinu titanu

Řezné podmínky	Jednotka	Hodnota
řezná rychlost v_c	[m.min ⁻¹]	15
řezná rychlost v_c	[m.min ⁻¹]	25
Posuv na otáčku f_n	[mm.ot ⁻¹]	0,1
hloubka řezu a_p	[mm]	0,5
chlazení	-	bez chlazení

Měření šířky opotřebení na hřbetě VB

Pro odečítání hodnoty šířky opotřebení na hřbetě břitových destiček byl použit optický mikroskop BK OSAN s mikrometrickými šrouby umožňujícími pohyb stolu mikroskopu v příčném a v podélném směru, výrobce CARL ZEISS, rok výroby 1978.

Charakteristika použitých nástrojových materiálů

Při zkouškách byl použit nástrojové materiál 6615 od firmy Pramet Tools a.s. (ISO 513 P15). Nožový držák PLCNR 2020 K12 KT551 s vyměnitelnou břitovou destičkou CNMG 120408 E-M. Nožový držák byl při provádění zkoušek nastaven tak, aby úhel nastavení hlavního ostří břitové destičky byl $\kappa_r = 90^\circ$.

4.3.2 Dosažené výsledky měření

Zkoušky opotřebení

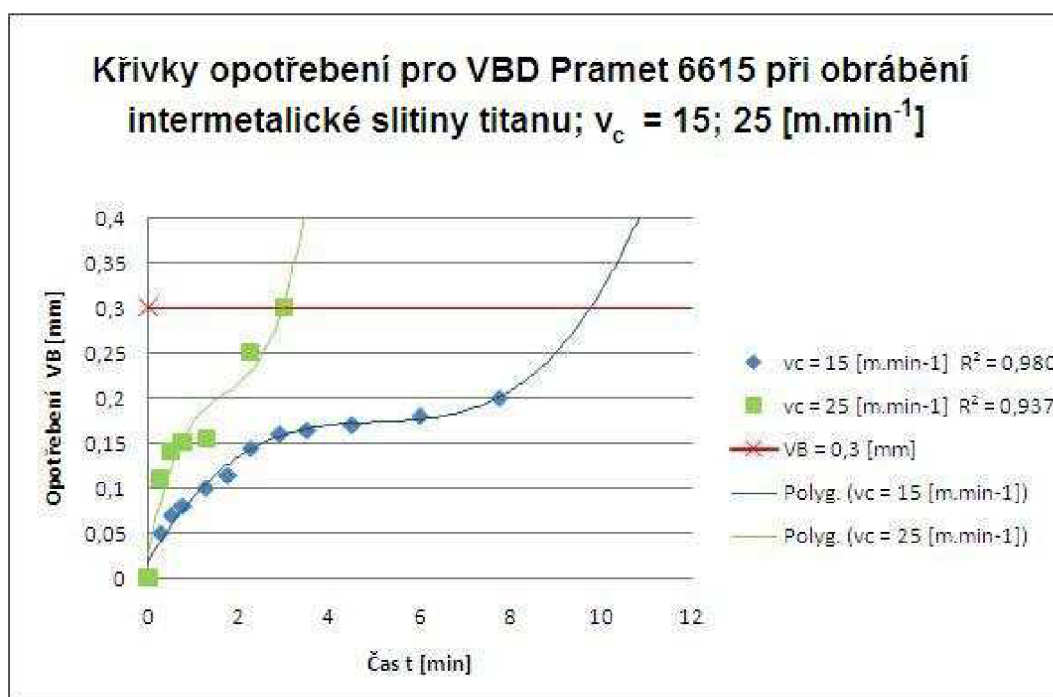
Provedením zkoušek a následným měřením opotřebení na hřbetě byly získány hodnoty opotřebení uvedené v tabulkách 22 a 23. Tyto hodnoty byly následně vyneseny do grafu a zpracovány křivky opotřebení (viz. obr. 72). Z grafu byly na vodorovné ose odečteny trvanlivosti pro obě řezné rychlosti a zaznamenány v tabulce 24. Následně byl zpracován sloupcový diagram trvanlivosti nástroje pro obě řezné rychlosti (viz. obr. 73).

Tab. 22 Hřbetní opotřebení VBD Pramet 6615 při v_c 15 [m.min⁻¹]

Řezné podmínky	Hodnoty hřbetního opotřebení VB při obrábění intermetalické slitiny nástrojovým materiálem Pramet 6615 (P15, K10)											
	měření č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$v_c = 15$ [m.min ⁻¹]	t [min]	0,25	0,5	0,75	1,25	1,75	2,25	2,9	3,5	4,5	6	7,75
$a_p = 0,5$ [mm]	VB [mm]	0,05	0,07	0,08	0,1	0,115	0,145	0,16	0,165	0,17	0,18	0,20
$f_n = 0,1$ [mm]												

Tab. 23 Hřbetní opotřebení VBD Pramet 6615 při v_c 25 [m.min⁻¹]

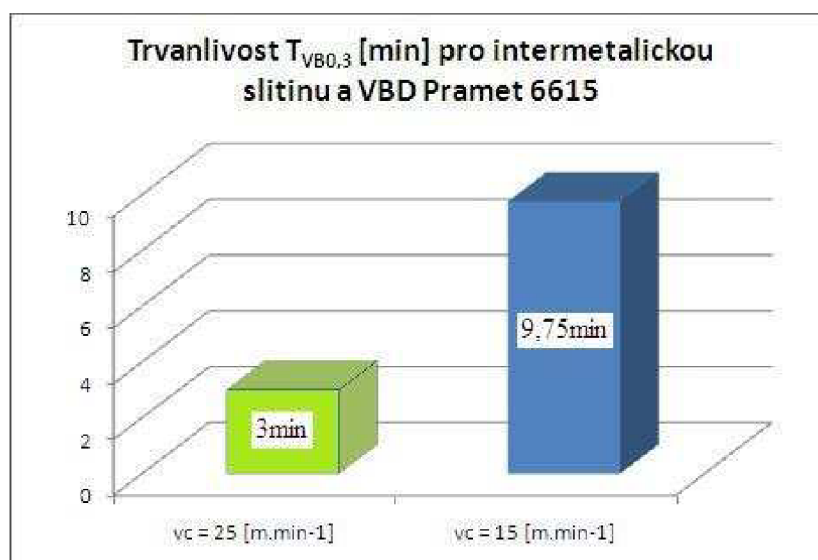
Řezné podmínky	Hodnoty hřbetního opotřebení VB při obrábění intermetalické slitiny nástrojovým materiálem Pramet 6615 (P15, K10)						
	měření č.	1	2	3	4	5	6
$v_c = 25$ [m.min ⁻¹]	t [min]	0,25	0,5	0,75	1,28	2,25	3
$a_p = 0,5$ [mm]	VB [mm]	0,11	0,14	0,15	0,155	0,25	0,3
$f_n = 0,1$ [mm]							



Obr. 72 Křivky opotřebení VBD Pramet 6615 při obrábění intermetalické slitiny titanu.

Tab. 24 Trvanlivost nástroje Pramet 6615 při obrábění intermetalické slitiny

Řezná rychlost $v_c \text{ [m}\cdot\text{min}^{-1}]$	Trvanlivost $T_{VB0,3} \text{ [min]}$
25	3
15	9,75

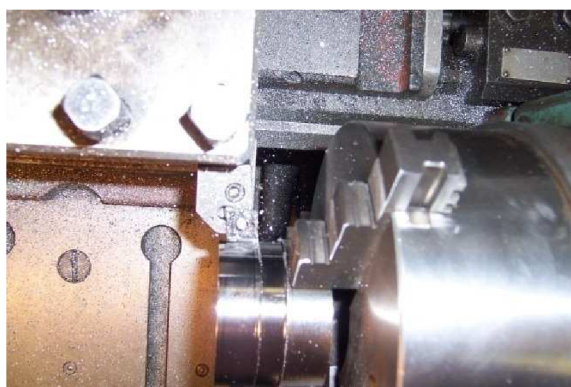


Obr. 73 Sloupkový diagram trvanlivosti nástroje při obrábění intermetalické slitiny.

Z průběhu křivek opotřebení se nechá usuzovat, že i malá změna řezné rychlosti má při obrábění intermetalických slitin významný vliv na opotřebení řezných materiálů. Přestože zkoušený slinutý karbid typu P15, K10 (dle ISO 513) není vyloženě určen pro obrábění exotických slitin, jako jsou slitiny titanu, hliníku a niklu, vykázal zkoušený nástrojový materiál 6615 od firmy Pramet Tools a.s. velice dobré vlastnosti při obrábění nižší řeznou rychlostí $15 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$, kdy po téměř osmi minutách obrábění vykazoval hřbetní opotřebení břitu pouhých $0,20 \text{ mm}$. Bohužel vzhledem k nedostatku zkoušeného materiálu nemohla být tato zkouška dokončena až do požadovaného kritériálního opotřebení $VB = 0,3 \text{ mm}$. Proto je křivka opotřebení v grafu rychlostní charakteristiky (viz. obr. 72) aproximována polynomem třetího stupně, kdy opotřebení na hřbetě VB dosáhne své kritériální hodnoty přibližně v desáté minutě obrábění.



Obr. 74 Zkouška intermetalické Ti-slitiny.



Obr. 75 Drobná tříška internet. Ti-slitiny.

Po čele nástroje Pramet 6615 odchází drobná tříška obráběného materiálu $\text{Ti}_{46}\text{Al}_{17}\text{Nb}_0,7\text{Cr}_0,1\text{Si}_0,2\text{Ni}$

Dále je potřeba zdůraznit, že zkoušený materiál vzorku je zbytkem vtokového kanálu, který vznikl při odlévání do skořepin. Proto je na něm možné pozorovat značnou nehomogenitu materiálu, kdy se v něm náhodně vyskytují poruchy materiálu- trhliny či bubliny. Tyto poruchy mohly zapříčinit ne zcela kontinuální řez při obrábění, což se mohlo negativně projevit na opotřebení nástroje.

Z vlastního pozorování není možné doporučit zvyšování řezné rychlosti při obrábění těchto slitin. Lze tak soudit na základě faktu, že při pokusu o zkušební orovnění náběhu osazení destičkou ze slinutého karbidu typu P20 (dle ISO 513) od firmy Pramet Tools byla zvolena řezná rychlost $70 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a tento nástroj okamžitě zkolaboval.

Hřbetní opotřebení břitových destiček Pramet 6615Obr. 76 Opotřebení při $v_c = 15$ [m.min⁻¹].Obr. 77 Opotřebení při $v_c = 25$ [m.min⁻¹].**4.4 Drsnost obrobeného povrchu titanové slitiny Ti46Al7Nb0,7Cr0,1Si0,2Ni**

Po provedení zkoušek opotřebení byly na obou plochách intermetalické slitiny provedeny zkoušky drsnosti povrchu, a to na ploše obrobené řeznou rychlostí $v_c = 15$ [m.min⁻¹], posuvu $f_n = 0,1$ [mm.ot.⁻¹] a hloubce řezu $a_p = 0,5$ [mm] a na ploše obrobenou řeznou rychlostí $v_c = 25$ [m.min⁻¹], za jinak stejných podmínek. Drsnost byla měřena mimo výše zmíněné poruchy materiálu, aby nedošlo ke zkreslení naměřených hodnot.

Měřicí přístroj

Pro měření drsnosti povrchu byl použit kontaktní profilometr typu Form Talysurf Intra, výrobní číslo 112-2936-02 S.N.126, od firmy Taylor Hobson (viz. obr. 78).



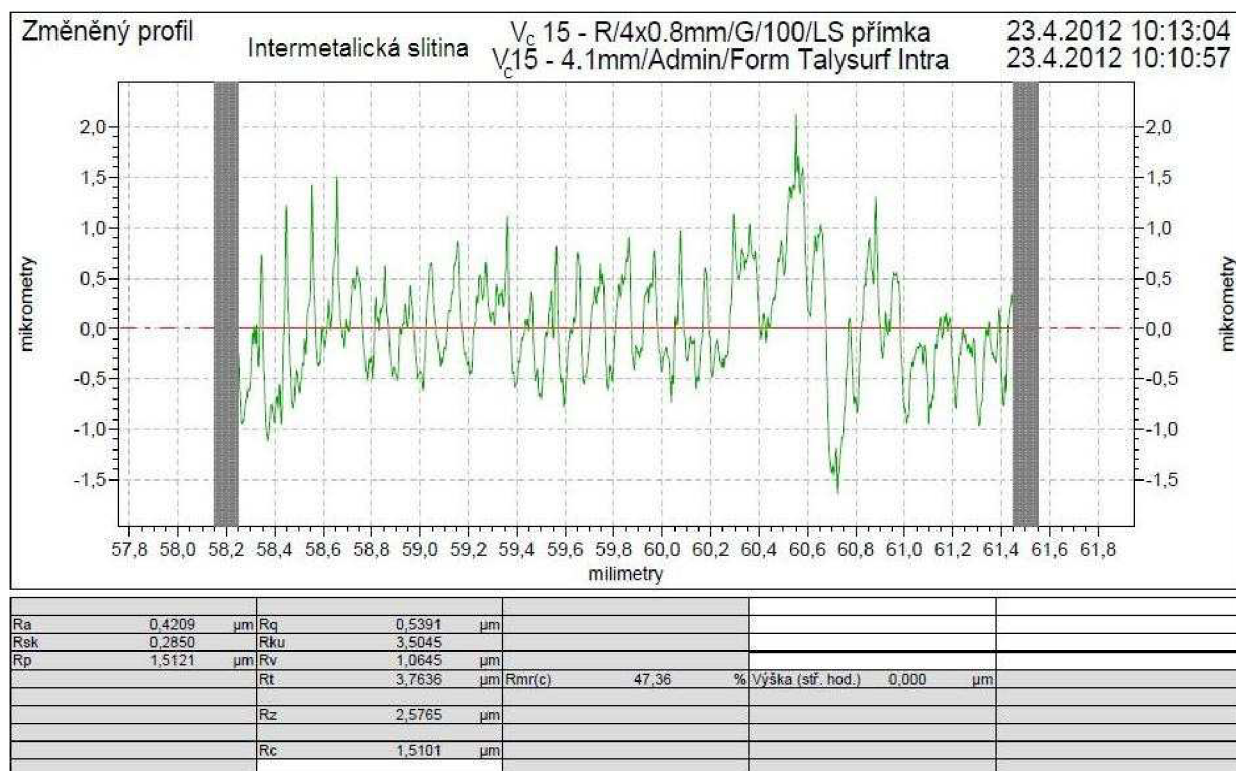
Obr. 78 Měření drsnosti povrchu.



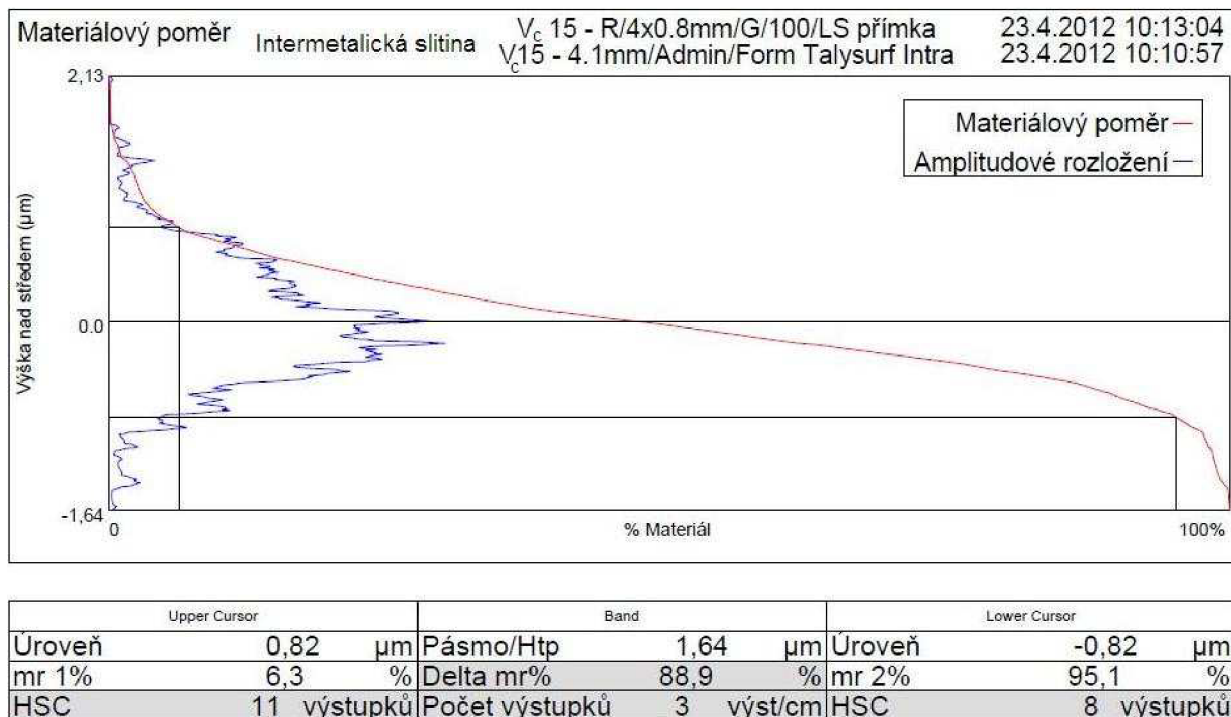
Obr. 79 Výkyvné rameno s hrotem.

4.4.1 Dosažené výsledky měření drsnosti na intermetalické slitině

1) Pramet 6615 (ISO 513 P15, K10), $f_n = 0,1$ [mm]; $a_p = 0,5$ [mm]; $v_c = 15$ [m.min⁻¹]



Obr. 80 Profil měřeného povrchu obroběného řeznou rychlostí 15 [m.min⁻¹].



Obr. 81 Materiálový poměr- křivka hustoty pravděpodobnosti a nosná křivka $v_c = 15$ [m.min⁻¹].

Na obrázku 80 je vidět 2D profil měřeného povrchu a pod ním výstup měření s naměřenými hodnotami drsnosti. Materiálový poměr je potom na obrázku 81, kde modrá křivka znázorňuje křivku hustoty pravděpodobnosti a červená nosnou křivku. Záznam z druhého měření na ploše obrobené rychlostí $v_c = 25 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ je potom v příloze 2. Průměrné hodnoty drsnosti, šikmosti a špičatosti jsou uvedeny v tabulce 25.

Tab. 25 Tabulka naměřených hodnot drsností na intermetalické slitině

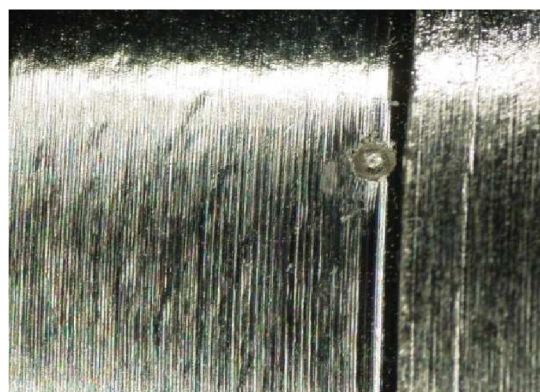
Řezná rychlost	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Rsk [μm]	Rku [μm]
$v_c = 15 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$	0,475	0,609	2,887	-0,057	3,273
$v_c = 25 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$	0,684	0,894	4,675	-0,441	4,551

V tabulce 25 jsou uvedené základní charakteristiky drsnosti, které jsou průměrnými hodnotami z pěti provedených měření pro obě obrobené plochy. Z naměřených hodnot drsností je patrné, že povrch obrobeného materiálu je kvalitnější při zvolené nižší řezné rychlosti, tedy $v_c = 15 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$. Tomu nasvědčuje i křivka rozložení hustoty pravděpodobnosti, která se rozkládá téměř symetricky kolem nulové čáry a limitně se tak přibližuje normálnímu rozdělení. Drsnosti naměřené na ploše obrobené vyšší řeznou rychlostí, tedy $v_c = 25 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$, jsou o něco vyšší a křivka rozložení hustoty pravděpodobnosti je posunuta více směrem k povrchu součásti. To nasvědčuje tomu, že se v povrchové vrstvě materiálu mohou vyskytovat hlubší mikrotrhliny, které se mohou stát místy iniciace trhliny a součást se stává více náchylnou ke křehkému porušení a k porušení únavou.

Detail obrobených ploch intermetalické slitiny (zvětšení 5x)



Obr. 82 Povrch obrobený řeznou rychlostí $v_c = 15 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$.



Obr. 83 Povrch obrobený řeznou rychlostí $v_c = 25 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$.

Na obrázcích 82 a 83 je dobře patrná nehomogenita povrchu (důlky), což je způsobeno porézností obráběného materiálu.

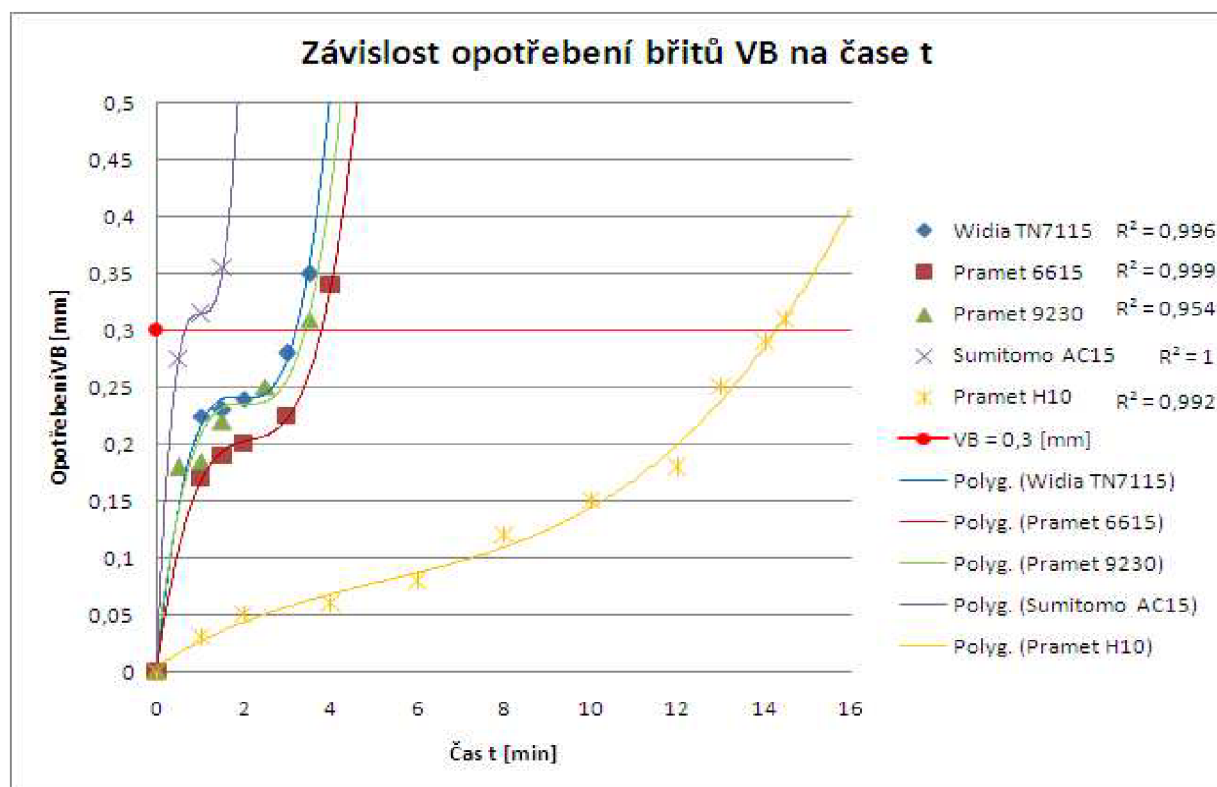
5 DISKUZE

5.1 Porovnání výsledků měření s literaturou (viz. literární zdroj [22])

Ve výše zmíněné literatuře je uvedeno, že při obrábění titanové slitiny VT6 (Ti6Al4V) bylo dosaženo nejlepšího výsledku při použití nepovlakovaného slinutého karbidu H10 (dle ISO 513) od firmy Pramet Tools a.s. Naměřené hodnoty opotřebení VB jsou uvedeny v tabulce 26. Dále se v ní uvádí, že je to tak díky tomu, že slinutý karbid typu H neobsahuje ve svém složení žádnou složku, která by obsahovala titan (TiC, TiCN, TiN...). Slinuté karbidy typu H jsou primárně určeny k obrábění korozivzdorných ocelí a jsou na bázi karbidu wolframu, kde pojivem je kobalt (WC+Co). Při shodných řezných podmínkách bylo se slinutým karbidem H10 dosaženo kritériálního hřbetního opotřebení VB = 0,3 [mm] až po 14,3 [min]. Srovnání výsledků měření je znázorněno v grafu (viz. obr. 84).

Tab. 26 Tabulka naměřených hodnot opotřebení hřbetu SK H10 při obrábění Ti6Al4V [22]

čas t [min]	1	2	4	6	8	10	12	13	14	14,5
Pramet H10	0,03	0,05	0,06	0,08	0,12	0,15	0,18	0,25	0,29	0,31

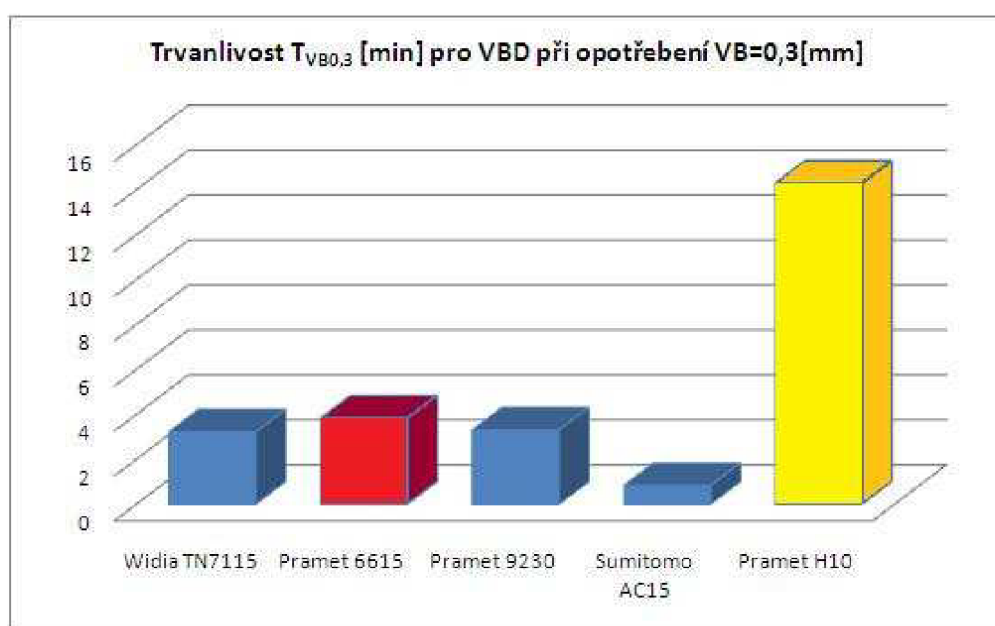


Obr. 84 Graf porovnání výsledků měření se slinutým karbidem H10.

V tabulce 27 jsou uvedeny hodnoty trvanlivostí jednotlivých nástrojů pro kritérium opotřebení $VB = 0,3$ [mm]. Žlutou barvou je zvýrazněna trvanlivost nepovlakovaného SK typu H10 (dle ISO 513), se kterým byly porovnávány výsledky měření. Následně byl zpracován sloupcový diagram trvanlivostí pro jednotlivé břitové destičky (viz. obr. 85).

Tab. 27 Trvanlivosti nástrojových materiálů

VB 0,3 [mm]	$T_{VB0,3}$ [min]
Widia TN7115	3,21
Pramet 6615	3,83
Pramet 9230	3,29
Sumitomo AC15	0,82
Pramet H10	14,3



Obr. 85 Porovnání trvanlivostí zkoušených nástrojů.

Z porovnání výsledků měření je zřejmé, že nejpříznivější trvanlivost vykazuje slinutý karbid typu H10, který neobsahuje žádnou sloučeninu titanu. Pro obrábění titanových slitin je tedy nejvhodnější ze zkoušených materiálů, protože se u něj při obrábění neprojevuje afinita titanu obsaženého v obrobku k titanu vázanému ve formě sloučenin (TiC , TiN , $TiCN...$), které obsahují všechny ostatní testované materiály.

5.2 Doporučení

Z provedených experimentů je možné jednoznačně doporučit pro obrábění titanu a jeho slitin všechny nepovlakované nástrojové materiály, které ve svém složení neobsahují titan. Například tedy slinuté karbidy typu K10 – K20, N, H (dle ISO 513 viz. tab. 28) včetně H10. Dále je možné použít karbidy typu S, které jsou určeny k obrábění exotických kovů (např. titanových slitin, niklu a žáruvzdorných ocelí...) konkrétně například karbid typu S od firmy Sumitomo Electric s interním označením AC510U s povlakem typu Super ZX (viz. obr. 51), u kterého výrobce udává, že je vhodný přímo pro obrábění Ti6Al4V v rozsahu řezných rychlostí $v_c = 30-70$ [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]; posuvu $f = 0,1$ [$\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$]; hloubce řezu $0,3-5$ [mm], který může vykazovat trvanlivost do opotřebení $VB = 0,3$ [mm] až $T_{VB0,3} = 30$ [min] [28].

V současnosti se například při dokončování lopatek leteckých turbín používají k obrábění nepovlakované SK typu S (dle ISO 513). Jedná se o jednostranné VBD s ostrou hranou a pozitivní geometrií jak čela, tak hřbetu, kde povrch čela je pro lepší schopnost odvádění třísek dokončován broušením a následným letěním. Při použití systémů Jet Line přívodu tlakové chladicí kapaliny, např. Jet Stream Tooling nebo Jet HPC, dosahuje trvanlivost bříty takových destiček přibližně $10-15$ [min] do kritéria opotřebení $VB = 0,15$ [mm] v závislosti na zvolených řezných podmínkách a obráběném materiálu.

Tab. 28 Druhy slinutých karbidů a jejich použití dle ISO 513 [8,18,19,20]

Slinutý karbid (dle ISO 513)	Primární použití	Chemické složení
P	uhlíkové oceli	WC+TiC (+TaC/NbC)+Co
M	korozivzdorné oceli	WC+TiC+TaC/NbC+Cr ₃ C ₂ +Co
K	litiny	WC (+TaC/NbC)+Co
S	žárupevné a žáruvzdorné superslitiny	WC+TaC (+SiC+Cr ₃ C ₂ +TiC)+Co
N	hliník a jiné neželezné kovy	WC+TaC/NbC (+TiC+TiN+VC+Fe ₃ C)+Co
H	tvrdé a kalené materiály	WC+Co

5.3 Hodnocení

Do budoucna je potřeba pokračovat v ověřování trvanlivosti různých nástrojů při obrábění titanových slitin a větší pozornost zaměřit na intermetalické slitiny typu γ TiAl. Získané poznatky bude možné využít především v automobilové a letecké technice, a to z hlediska využití těchto výsledků pro hodnocení integrity povrchu součástí, pracujících za extrémních podmínek zatěžování.

ZÁVĚR

Titan je moderní konstrukční materiál, který se vyznačuje specifickými vlastnostmi, a ty musí být respektovány nejen při jeho zpracování, ale i ve výrobě samotných součástí a jejich následném provozu. To se výrazně projevuje v oboru nanotechnologie a při jeho využívání jako biomateriálu v kontaktu s lidskou tkání.

Cílem experimentů bylo porovnat jednotlivé druhy slinutých karbidů při obrábění titanové slitiny Ti6Al4V a intermetalické slitiny. Těmto slitinám typu γ Ti-Al je v současné době věnována velká pozornost, protože se jedná o relativně nový materiál, který představuje výrazné změny oproti běžným titanovým slitinám. Konkrétní výsledky byly zpracovány v experimentální části. Jedná se zejména o křivky hřbetního opotřebení, sloupkové diagramy trvanlivosti nástrojů, hodnoty drsností obrobených ploch R_a a R_q , křivky rozložení hustoty pravděpodobnosti a nosné křivky. Tyto výsledky byly porovnány s jinými pracemi a ukázalo se, že odpovídají výsledkům dosahovaným na jiných pracovištích.

Zkoušky popsané a hodnocené v této zprávě byly provedeny při podélném soustružení nástroji ze slinutých karbidů. Ty měly ukázat, jak se mění opotřebení nástroje a jak se mění drsnost obrobeného povrchu. Na základě získaných výsledků je možné doporučit slinuté karbidy, které jsou vhodné pro opracování titanu a jeho slitin a při určitých řezných podmínkách predikovat vlastnosti obrobené plochy.

Současný vývoj ukazuje, že titanové slitiny mají veškeré předpoklady k tomu, aby se jejich využití dále rozšiřovalo a že bude i nadále nutné studovat a prohlubovat poznatky o jejich chování v moderní výrobě.

Shrnutí dosažených výsledků:

- vliv obráběného materiálu na opotřebení a trvanlivost nástroje byl ve všech případech prokázán,
- při nižší řezné rychlosti $v_c = 90$ [m.min⁻¹] vykázala testovaná destička Pramet 6615 při obrábění slitiny Ti6Al4V uspokojivé výsledky jak z hlediska trvanlivosti (10min), tak z hlediska naměřené drsnosti $R_a = 0,8$ [μ m],
- tato destička vykázala výborné vlastnosti při obrábění intermetalické slitiny řeznou rychlostí $v_c = 15$ [m.min⁻¹], kdy vykazuje trvanlivost $T = 10$ [min] a drsnost $R_a 0,5$ [μ m] s optimálním rozložením materiálového poměru,
- výsledky experimentálního měření se shodují s výsledky dosaženými na jiných pracovištích,
- je potřeba provádět další technologické zkoušky a zaměřit se především na intermetalické slitiny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ASPINWALL, D. K. a A. L. MANTLE. The machining of gamma-TiAl intermetallic alloys. *CIRP ANNALS-MANUFACTURING TECHNOLOGY*. Birmingham, 2005, s. 99-104. WOS: 000230322000024. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60059-6. Dostupné z: www.webofknowledge.com
2. BUMBÁLEK, Bohumil. *Výběr řezných materiálů a optimálních řezných podmínek pro obrábění niklových a titanových slitin: Shrnutí dosavadních zkušeností*. Brno, 1992. Technická zpráva. Vojenská akademie Brno, Katedra materiálů a technologie speciální výroby. Vedoucí práce Vojtěch Hrubý.
3. BUMBÁLEK, Bohumil, Petr VALA a Zdeněk NOVÁK. *Vlastnosti povrchové vrstvy slitiny titanu VT6 a VT8*. Brno, září 1988. Technická zpráva. Výzkumný ústav 070 brno. Vedoucí práce Bohumil Bumbálek.
4. BUMBÁLEK, Bohumil, Petr VALA, Jiří KALA a Zdeněk NOVÁK. *Vliv dokončovacích operací a změn v povrchové vrstvě na únavové vlastnosti vzorků ze slitiny VT8*. Brno, prosinec 1991. Technická zpráva. Výzkumný ústav 070 Brno. Vedoucí práce Bohumil Bumbálek.
5. FÜRbacher, Ivan. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: základní dílo aktuální stav duben 2004 - včetně 23. doplňku*. Praha: Dashöfer, 1998.
6. GREGER, M., M. ČERNÝ, L. KANDER a J. KLIBER. Structure and properties of Titanium for dental implants. *Metalurgija*. 2009, roč. 48, č. 4, s. 249-252. ISSN 0543-5846. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/76079>
7. HORVÁTH, Evžen. Povlakování a životnost nástroje. *MM Průmyslové spektrum*. 2010, roč. 2010, č. 12, s. 18. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovani-a-zivotnost-nastroje.html>
8. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
9. MICHENKA, Vít a Milan GOTTWALD. Diagnostika mechanických vlastností vzorků na bázi Al slitin zpracovaných SPD technologií. *Nanocon 2009*. Rožnov pod Radhoštěm, 2009, s. 9. Dostupné z: http://www.nanocon.cz/files/proceedings/nanocon_09/Lists/Papers/017.pdf
10. MIKOVEC, Miroslav et al. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury SNTL, 1963, 315 s. Redakce strojírenské literatury.
11. MOLINARI, A., C. MUSQUAR a G. SUTTER. Adiabatic shear banding in high speed machining of Ti-6Al-4V: Experiments and modeling. *International Journal of Plasticity*. 2002, roč. 18, č. 4, s. 443-459. ISSN 0749-6419/02/\$. PII: S0749-6419(01)00003-1. Dostupné z: www.elsevier.com/locate/ijplas
12. PÍŠEK, František, L. JENÍČEK, P. RYŠ a M. CENEK. *Nauka o materiálu I: Nauka o kovech 3. svazek Neželezné kovy*. Druhé zcela přepracované a rozšířené. Praha: Academia, nakladatelství Československé akademie věd, 1973, 596 s.

13. PODRÁBSKÝ, Tomáš, Karel NĚMEC a Martin JULIŠ. *Neželezné kovy a jejich slitiny I: doplnění a rozšíření přednášky "Strojírenské materiály" z předmětu BUM*. Brno, 2006, 40 s. [vid. 2012-03-17]. Dostupné z: www.klubi.com/download/skola/bum2009/9_nezel_kovy_A.ppt
14. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.
15. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-283-1.
16. RIBERIO, M.V., M.R.V. MOREIRA a J.R. FERREIRA. Optimizationoftitaniumalloy (6Al-4V) machining. *JournalofMaterialsProcessing Technology*. 2003, č. 143, s. 458-463. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00457-6. Dostupné z: www.elsevier.com/locate/jmatprotec
17. RUSZ, Stanislav. *Využití vícenásobné plastické deformace pro dosažení velmi jemnozrnné struktury: inaugurační přednáška*. Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1160-X. Dostupné z: http://www.novenekonvencnitechologie.cz/vsb/stranky/2/file/velmijemnozrnnych_materiálu.ppt. Habilitační a inaugurační spisy sv 33. VŠB- Technická univerzita Ostrava.
18. SANDWIK COROMANT AB. *Technická příručka obrábění: soustružení- frézování- vrtání- vyvrtávání- upínání nástrojů*. Elanders, 2005.
19. SECO TOOLS AB. *Soustružení: Katalog a technický průvodce 2012*. Elanders, 2011.
20. SUMITOMO ELECTRIC. *Hlavní katalog 2009/2010: Druhy řezných materiálů*. 2009. Dostupné z: <http://www.tgs.cz/cs/ke-stazeni/nastroje.ep/>
21. TETSUI, Toshimitsu. Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles. *Materials Science and Engineering*. Nagasaki, A 329-331 (2002) 582-588. PII: S0921-5093(01)011584-2. Dostupné z: www.elsevier.com/locate/msea
22. VALÁŠEK, Petr. *Jakost povrchové vrstvy titanových slitin po obrábění*. Brno 2004. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 68 s. Vedoucí práce: prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.
23. VASILKO, Karol. *Obrábanie titánu a jeho zliatin*. Prešov: Fakulta výrobných technológií Technickej univerzity v Košiciach, so sídlem v Prešove, 2001, 120 s. ISBN 80-7099-195-2.
24. VELÁSQUEZ, B. BOLLE, P. CHEVRIER, G. GEANDIER a A. TIDU. Metallurgical study on chips obtained by high speed machining of a Ti-6 wt.%Al-4 wt.%V alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2006, s. 469-474. ISSN 0921-5093. DOI: 10.1016/j.msea.2006.10.090. Dostupné z: www.elsevier.com/locate/msea
25. WISSUWA, Eckhard a Stefan SCHOLZE. Povlakované nástroje zaručují vyšší hospodárnost. *MM Průmyslové spektrum: Trendy Obrábění*. 2011, č. 5, s. 22. 110512. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovane-nastroje-zarucuji-vyssi-hospodarnost.htm>

26. ZEMČÍK, Ladislav a Antonín DLOUHÝ. Metalurgie intermetalických slitin typu gama TiAl. *Metal 2003*. Hradec nad Moravicí, 2003, s. 6. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2003/sbornik/papers/160.pdf>
27. Ilmenite. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2005 [vid. 2012-03-17]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Ilmenite>
28. Iscar Jet hpc. ISCARWEB. *You Tube* [online]. 1.6.2010 [vid. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.youtube.com/watch?v=booTdXA30is>
29. Multimediální podklady pro studium struktur kovových materiálů: Příprava a hodnocení materiálografických vzorků. *Http://ime.fme.vutbr.cz* [online]. 2010 [vid. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory>
30. Rutil. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2007 [vid. 2012-03-17]. Dostupné z: <http://de.wikipedia.org/wiki/Rutil>
31. Strategická výzkumná agenda: České technologické platformy pro udržitelnou chemii. In: *Suschem.cz* [online]. 31.3.2010 [vid. 2012-03-14]. Dostupné z: http://suschem.cz/index.php?option=com_rokdownloads&view=file&Itemid=6&id=20%3Avasuschem20100331v3{=cs
32. Titan: prvek. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2007 [vid. 2012-03-17]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Titan_%28prvek%29

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Seznam zkratek:

Zkratka	Popis
BCC	krychlová prostorově středěná mřížka (Body Cubic Centered)
(CP)Ti	chemicky čistý titan (Comercial Pure Titanium)
CVD	chemickou cestou nanesený povlak (Chemical Vapour Deposition)
ČR	Česká Republika
ECAP	úhlové kanálové protlačování (Equal Channel Angular Pressing)
HCP	šesterečná (hexagonální) mřížka
HSC	vysokorychlostní řezání (High Speed Cutting)
HSM	vysokorychlostní obrábění (High Speed Machining)
HV	tvrdost podle Vickerse
JET HPC	vysokotlaké chlazení Jet High Pressure Coolant
KNB	kubický nitrid boru
(N)Ti	nanostrukturovaný titan (Nano Titanium)
PKD	polykrystalický diamant
PVD	fyzikální cestou nanesený povlak (Physical Vapour Deposition)
SK	slinutý karbid
VBD	vyměnitelná břitová destička
VT3-1	sovětské označení pro žárupevnou vytvrditelnou titanovou slitinu
VT6	sovětské označení pro titanovou slitinu Ti6Al4V

Seznam symbolů:

Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	tažnost
A ₅	[%]	tažnost při prodloužení o 5%
BUE	[]	tvorba nárůstků (Built Up Edge)
D _d	[mm]	průměr taženého drátu
E	[GPa]	modul pružnosti
H	[J ² .m ⁻⁴ .s ⁻¹ .K ⁻²]	koeficient pohlcování tepla
KT	[mm]	kráterové opotřebení na čele (výmoly)
R ²	[]	hodnota spolehlivosti spojnice trendu
R _a	[μm]	střední aritmetická úchylka drsnosti
R _{eL}	[MPa]	dolní mez kluzu
R _{ku}	[μm]	špičatost

Symbol	Jednotka	Popis
R _m	[MPa]	mez pevnosti
R _{max}	[μm]	přibližná očekávaná hodnota drsnosti
R _{p0,2}	[MPa]	smluvní mez kluzu
R _q	[μm]	střední geometrická (kvadratická) úchylka drsnosti
R _{sk}	[μm]	šikmost (skewness)
R _Z	[μm]	největší výška profilu
T	[min]	trvanlivost
T _{max}	[°C]	maximální provozní teplota
T _{VB0,3}	[min]	trvanlivost pro kritérium opotřebení VB = [0,3 mm]
VB	[mm]	opotřebení na hřbetě
a	[m ² .s ⁻¹]	koeficient vedení tepla
a _p	[mm]	hloubka řezu
c _p	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita
d	[mm]	střední průměr zrna
f _n	[mm.ot ⁻¹]	posuv na otáčku
h _D	[mm]	hloubka odřezávané vrstvy
h _{Dc}	[mm]	tloušťka třísky
k _y	[N.m ^{-3/2}]	materiálová konstanta
r _ε	[mm]	poloměr špičky nástroje
t	[min]	čas
v _c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
α	[K ⁻¹]	koeficient lineární tepelné roztažnosti
α ₀	[°]	úhel hřbetu
γ	[]	stupeň plastické deformace
γ ₀	[°]	úhel čela
γ̇	[s ⁻¹]	deformační rychlost
κ _r	[°]	nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
λ _e	[MS.m ⁻¹]	konduktivita
λ _t	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	tepelná vodivost
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota (měrná hmotnost)
φ	[°]	úhel roviny maximálních smykových napětí
φ	[°]	úhel mezi kanály u ECAP
ψ	[°]	úhel vymežující oblouk zakřivení u ECAP

SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A PŘÍLOH

Seznam obrázků:

1. Obecné schéma řezání, podle [11]
2. Povrchová vrstva obrobku [4]
3. Pásma ovlivnění povrchové vrstvy obrobené plochy [4]
4. Rutil [12]
5. Ilmenit [13]
6. TiO_2 „titanová běloba“ [14]
7. Překrystalizace čistého titanu z α fáze na β fázi při 882°C , podle [15]
8. Krystaly čistého titanu [14]
9. Mechanické vlastnosti titanu v závislosti na teplotě [16]
10. Počáteční mikrostruktura (CP)Ti (podélný směr) [9]
11. Počáteční mikrostruktura (CP)Ti (příčný směr) [9]
12. Mikrostruktura (CP)Ti po válcování za studena (podélný směr) [9]
13. Mikrostruktura (CP)Ti po válcování za studena (příčný směr) [9]
14. Vliv teploty na měrnou mez kluzu titanových slitin ve srovnání se slitinami jiných kovů [8]
15. Fázové diagramy titanových slitin a) α slitiny, b) β slitiny, c) β slitiny s eutektoidní přeměnou, podle [17]
16. Rovnovážný diagram Ti-Al, podle [17]
17. Průběh tvrdosti v oblasti výskytu Ti_3Al , podle [17]
18. Pevnostní charakteristiky některých titanových slitin za zvýšených teplot [17]
19. Rovnoosá struktura $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ [19]
20. Lamelární struktura $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ [3]
21. Struktura $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ po tváření [15]
22. Widmannstättenova jehlicovitá struktura $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ jehlice β (světlé) ve fázi α (tmavé) [15]
23. Odlitek turbínového kola z intermetalické TiAl slitiny- praskliny v oblasti kořene lopatky vlivem termoelastických napětí, vznikajících mezi odlitkem a keramickou formou v průběhu chladnutí [19]
24. Mitsubishi Lancer [21]
25. Turbokompresor
26. Odlitek turbínového kola
27. Mikrostruktura odlitku z TiAl slitiny $\text{Ti-48Al-2Cr-2Nb-1B}$ (praskliny uvnitř rovnoosých zrn γ) [19]
28. Struktura testovaného TiAl materiálu $\text{Ti-46Al-7Nb-0,7Cr-0,1Si-0,2Ni}$ [21]
29. Schéma metody ECAP s naznačením přetvoření materiálu, podle [22]
30. Dělená zápustka se ze zalomeným kanálem [21]
31. Ukázka ECAP vzorků, podle [22]
32. Mikrostruktura (N)Ti po ECAP (2 průchody v podélném směru) [9]

33. Mikrostruktura (N)Ti po ECAP (2 průchody v příčném směru) [9]
34. Mikrostruktura (N)Ti po ECAP (10 průchodů) [9]
35. Mechanický a tepelný účinek vyvolaný obráběním, podle [3]
36. Mechanismus tvorby třísky u Ti6Al4V a detail smykového pásma [31]
37. Utváření kořene třísky slitiny Ti6Al4V při $v_c = 60$ [m.min⁻¹] a $f = 0,15$ [mm.ot⁻¹] [3]
38. Morfologie třísky Ti6Al4V při $v_c = 60$ [m.min⁻¹] a $f = 0,2$ [mm.ot⁻¹] [3]
39. Vznik stlačení a hloubka deformace, podle [3]
40. Obecné znázornění průběhu plastické deformace γ a deformační rychlosti $\dot{\gamma}$ při řezání
41. Pokles tvrdosti v povrchové vrstvě při soustružení Ti6Al4V, podle [3]
42. Struktura slitiny Ti6Al4V- precipitace fází v podpovrchové vrstvě [3]
43. Povrch slitiny Ti7Al4Mo dokončený balotínováním [3]
44. Závislost drsnosti na délce řezu [25]
45. Vliv poloměru špičky nástroje na drsnost [27]
46. Teplotní pole při obrábění titanové slitiny a uhlíkové oceli, podle [29]
47. Hřbetní opotřebení VB [27]
48. Čelní opotřebení KT [27]
49. Plastická deformace bříty [27]
50. Tvorba nárůstku BUE [27]
51. Povlak „Super ZX“ [28]
52. Technologie chlazení čela tlakovou kapalinou Jet Stream Tooling [26]
53. Technologie chlazení čela i hřbetu nože tlakovou kapalinou JET HPC [24]
54. Porovnání technologie JET HPC s konvenčním chlazením [24]
55. Pohled do mikroskopu při měření šířky opotřebení
56. Tříska titanové slitiny Ti6Al4V
57. Křivky opotřebení zkoušených nástrojových materiálů
58. Sloupkový diagram trvanlivosti zkoušených VBD
59. Křivky opotřebení VBD Pramet 6615 při obrábění titanové slitiny Ti6Al4V
60. Uspořádání experimentálního pracoviště
61. T_t - v_c závislost materiálu nástroje Pramet 6615 a titanovou slitinu Ti6Al4V
62. Opotřebení Widia TN 7715
63. Opotřebení Pramet 9230
64. Opotřebení Pramet 6615
65. Opotřebení Sumitomo AC15
66. Destrukce bříty Pramet 6615
67. Vlastní měření drsnosti povrchu
68. Detail výkyvného ramena s hrotem
69. Profil 1 měřeného povrchu 2D
70. Výstup měření 1
71. Křivka hustoty pravděpodobnosti 1
72. Křivky opotřebení VBD Pramet 6615 při obrábění intermetalické slitiny titanu
73. Sloupkový diagram trvanlivosti nástroje při obrábění intermetalické slitiny
74. Zkouška intermetalické Ti-slitiny

75. Drobná tříška intermet. Ti-slityny
76. Opotřebenění při $v_c = 15$ [m.min⁻¹]
77. Opotřebenění při $v_c = 25$ [m.min⁻¹]
78. Měření drsnosti povrchu
79. Výkyvné rameno s hrotem
80. Profil měřeného povrchu obrobeného řeznou rychlostí 15 [m.min⁻¹]
81. Materiálový poměr- křivka hustoty pravděpodobnosti a nosná křivka $v_c = 15$ [m.min⁻¹]
82. Povrch obrobený řeznou rychlostí $v_c = 15$ [m.min⁻¹]
83. Povrch obrobený řeznou rychlostí $v_c = 25$ [m.min⁻¹]
84. Graf porovnání výsledků měření se slinutým karbidem H10
85. Porovnání trvanlivostí zkoušených nástrojů

Seznam tabulek:

- Tab. 1 Teploty tavení a rekystalizace titanu [5]
- Tab. 2 Chemické složení komerčně čistého titanu (CP)Ti s čistotou 99,87% [6]
- Tab. 3 Mechanické vlastnosti čistého titanu (CP)Ti [5,6,23]
- Tab. 4 Fyzikální vlastnosti čistého titanu (CP)Ti [23]
- Tab. 5 Mechanické vlastnosti některých α slitin [5,15]
- Tab. 6 Mechanické vlastnosti některých pseudo α slitin [5,15]
- Tab. 7 Mechanické vlastnosti slitiny typu β : Ti-3Al-13V-11Cr [5]
- Tab. 8 Mechanické vlastnosti některých dvoufázových slitin [5,15]
- Tab. 9 Chemické složení; mechanické a fyzikální vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V [5,15]
- Tab. 10 Tepelné zpracování slitiny Ti6Al4V [5]
- Tab. 11 Chemické složení slitiny Ti-46Al-7Nb-0,7Cr-0,1Si-0,2Ni [21]
- Tab. 12 Vlastnosti nano- titanu ve srovnání s komerčně čistým titanem [6]
- Tab. 13 Doporučené řezné podmínky pro obrábění titanových slitin [18]
- Tab. 14 Použité řezné podmínky při soustružení titanové slitiny Ti6Al4V
- Tab. 15 Charakteristika použitých nástrojových materiálů
- Tab. 16 Naměřené hodnoty hřbetního opotřebenění
- Tab. 17 Hodnoty trvanlivosti VBD
- Tab. 18 Hodnoty hřbetního opotřebenění VBD Pramet 6615 při obrábění titanové slitiny Ti6Al4V
- Tab. 19 T_t - v_c závislost Pramet 6615
- Tab. 20 Naměřené hodnoty drsností obrobené plochy na Ti6Al4V
- Tab. 21 Řezné podmínky pro intermetalickou slitinu titanu
- Tab. 22 Hřbetní opotřebenění VBD Pramet 6615 při v_c 15 [m.min⁻¹]

Tab. 23 Hřbetní opotřebení VBD Pramet 6615 při v_c 25 [m.min⁻¹]

Tab. 24 Trvanlivost nástroje Pramet 6615 při obrábění intermetalické slitiny

Tab. 25 Tabulka naměřených hodnot drsností na intermetalické slitině

Tab. 26 Tabulka naměřených hodnot opotřebení hřbetu SK H10 při obrábění Ti6Al4V [22]

Tab. 27 Trvanlivosti nástrojových materiálů

Tab. 28 Druhy slinutých karbidů a jejich použití dle ISO 513 [8,18,19,20]

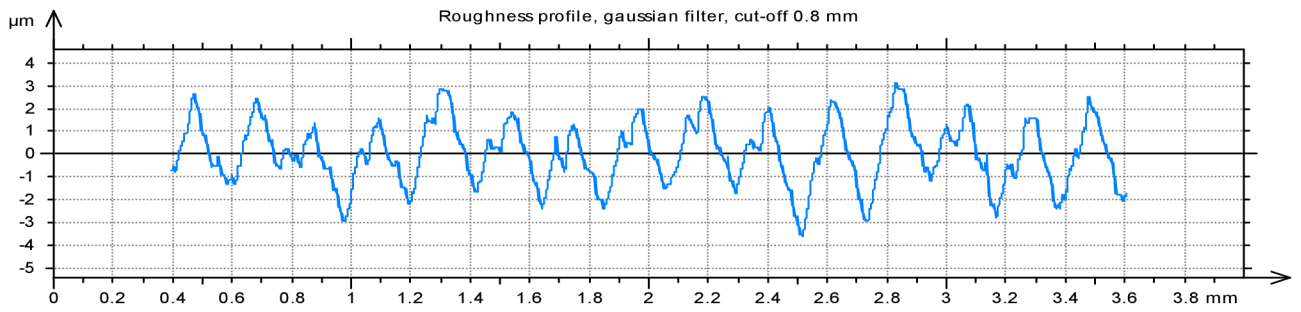
Seznam příloh:

Příloha 1 Záznamy z měření drsnosti povrchu na slitině Ti6Al4V

Příloha 2 Záznam z měření drsnosti povrchu na intermetalické slitině

PŘÍLOHA Č.1: Záznamy z měření drsnosti povrchu na slitině Ti6Al4V

2) Pramet 9230 (ISO 513 P30, M25), $f = 0,1$ [mm]; $a_p = 0,5$ [mm]; $v_c = 120$ [m.min⁻¹]



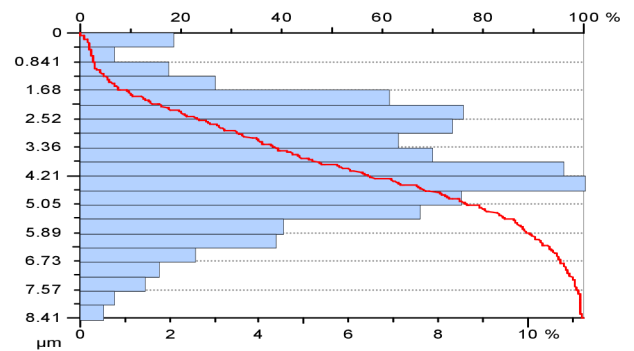
Profil 2 měřeného povrchu 2D

Parameters calculated on the profile Profile

* Parameters calculated by mean of all the sampling lengths.
* A microroughness filtering is used, with a ratio of 2.5 µm.

Roughness Parameters, Gaussian filter, 0.8 mm

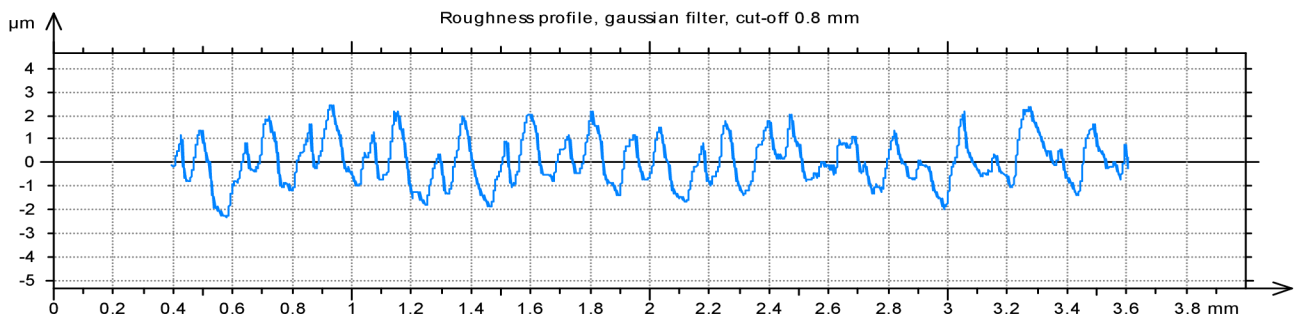
Ra = 1.08 µm
Rq = 1.33 µm



Výstup měření 2

Křivka hustoty pravděpodobnosti 2

3) Pramet 9230 (ISO 513 P30, M25), $f = 0,1$ [mm]; $a_p = 0,5$ [mm]; $v_c = 90$ [m.min⁻¹]



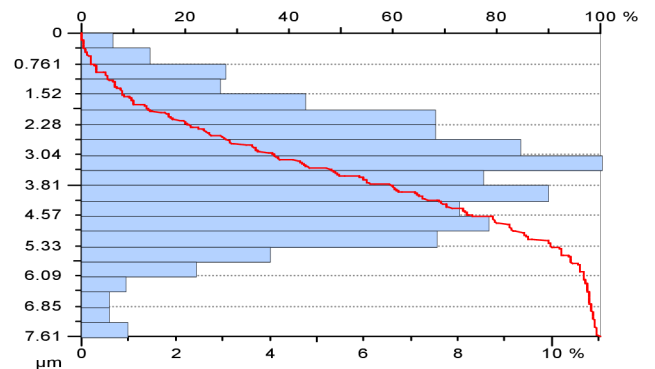
Profil 3 měřeného povrchu 2D

Parameters calculated on the profile Profile

* Parameters calculated by mean of all the sampling lengths.
* A microroughness filtering is used, with a ratio of 2.5 µm.

Roughness Parameters, Gaussian filter, 0.8 mm

Ra = 0.841 µm
Rq = 1.01 µm

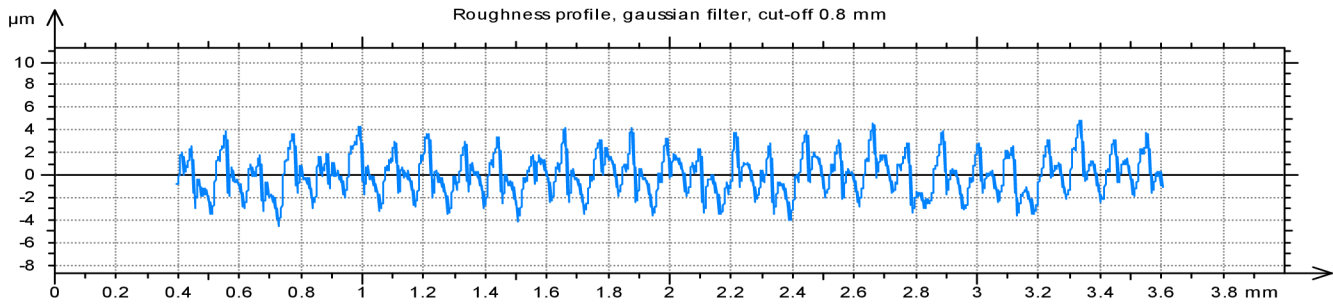


Výstup měření 3

Křivka hustoty pravděpodobnosti 3

PŘÍLOHA Č.1: Záznamy z měření drsnosti povrchu na slitině Ti6Al4V

4) Widia TN 7115 (ISO 513 P15), $f = 0,1$ [mm]; $a_p = 0,5$ [mm]; $v_c = 150$ [m.min⁻¹]



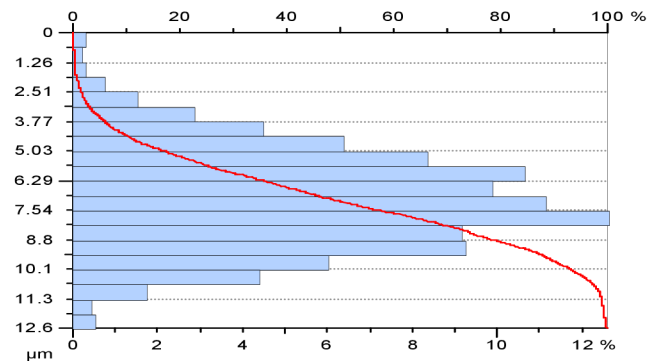
Profil 4 měřeného povrchu 2D

Parameters calculated on the profile Profile

* Parameters calculated by mean of all the sampling lengths.
* A microroughness filtering is used, with a ratio of 2.5 µm.

Roughness Parameters, Gaussian filter, 0.8 mm

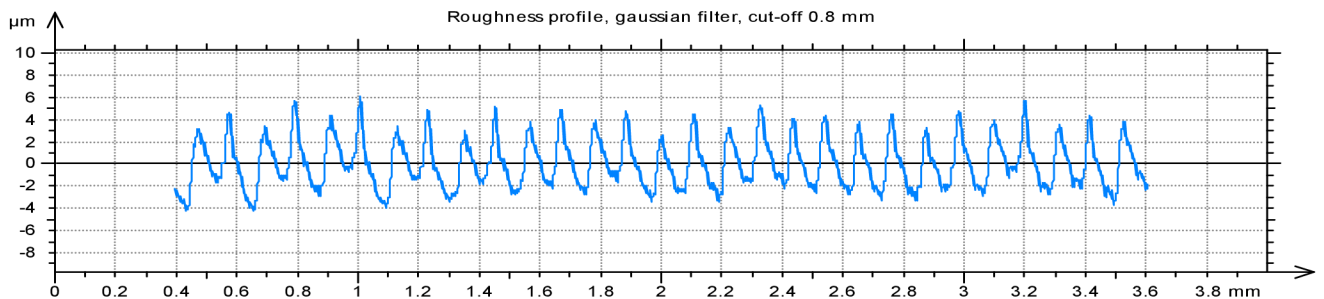
Ra = 1.42 µm
Rq = 1.76 µm



Výstup měření 4

Křivka hustoty pravděpodobnosti 4

5) Widia TN 7115 (ISO 513 P15), $f = 0,1$ [mm]; $a_p = 0,5$ [mm]; $v_c = 120$ [m.min⁻¹]



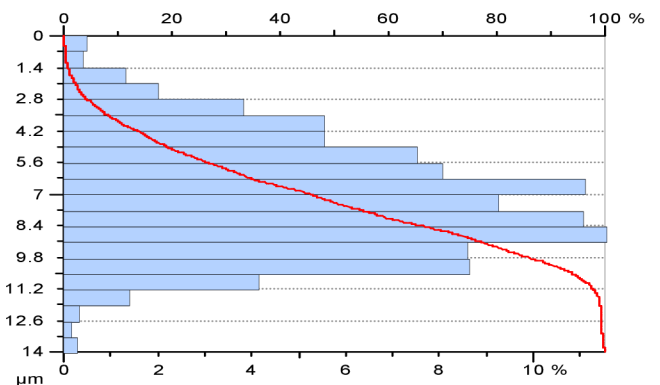
Profil 5 měřeného povrchu 2D

Parameters calculated on the profile Profile

* Parameters calculated by mean of all the sampling lengths.
* A microroughness filtering is used, with a ratio of 2.5 µm.

Roughness Parameters, Gaussian filter, 0.8 mm

Ra = 1.8 µm
Rq = 2.18 µm

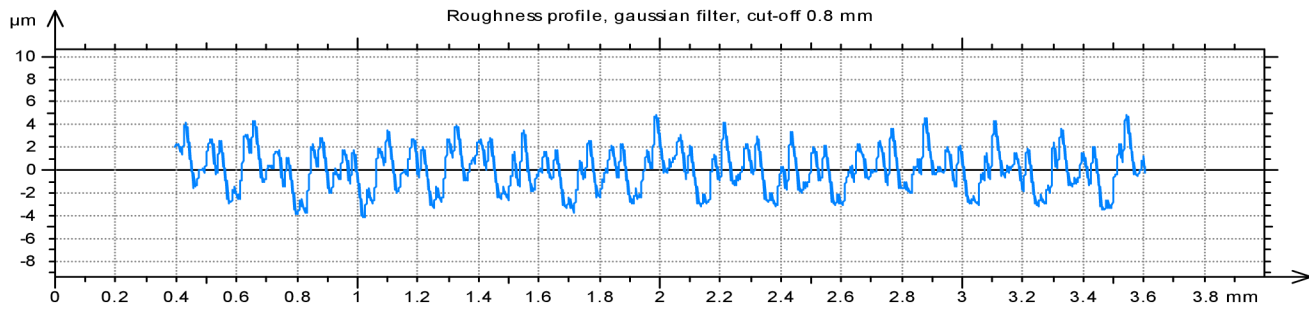


Výstup měření 5

Křivka hustoty pravděpodobnosti 5

PŘÍLOHA Č.1: Záznamy z měření drsnosti povrchu na slitině Ti6Al4V

6) Widia TN 7115 (ISO 513 P15), $f = 0,1$ [mm]; $a_p = 0,5$ [mm]; $v_c = 90$ [m.min⁻¹]



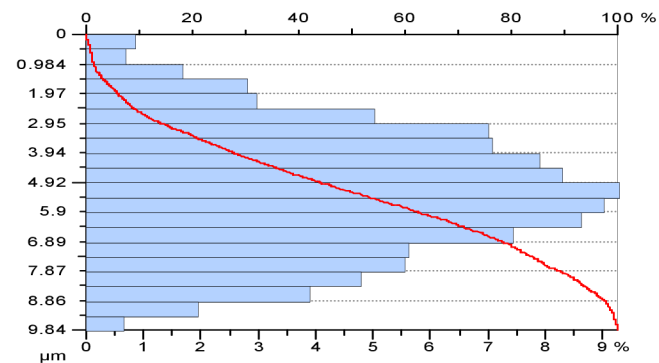
Profil 6 měřeného povrchu 2D

Parameters calculated on the profile Profile

* Parameters calculated by mean of all the sampling lengths.
* A microroughness filtering is used, with a ratio of 2.5 µm.

Roughness Parameters, Gaussian filter, 0.8 mm

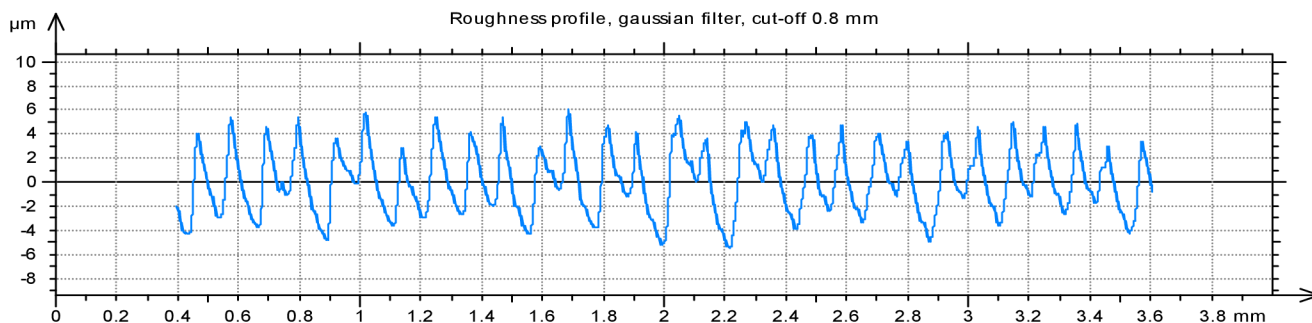
Ra = 1.53 µm
Rq = 1.85 µm



Výstup měření 6

Křivka hustoty pravděpodobnosti 6

7) Pramet 6615 (ISO 513 P15, K10), $f = 0,1$ [mm]; $a_p = 0,5$ [mm]; $v_c = 150$ [m.min⁻¹]



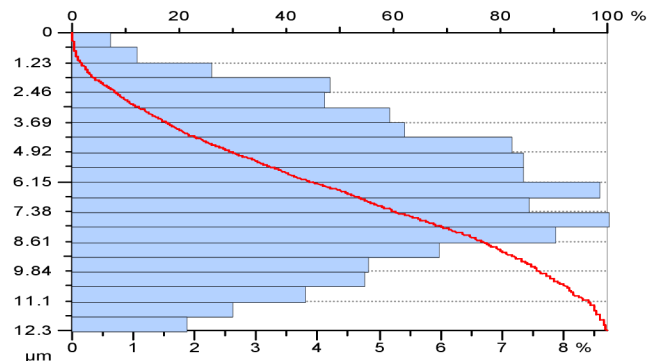
Profil 7 měřeného povrchu 2D

Parameters calculated on the profile Profile

* Parameters calculated by mean of all the sampling lengths.
* A microroughness filtering is used, with a ratio of 2.5 µm.

Roughness Parameters, Gaussian filter, 0.8 mm

Ra = 2.24 µm
Rq = 2.66 µm

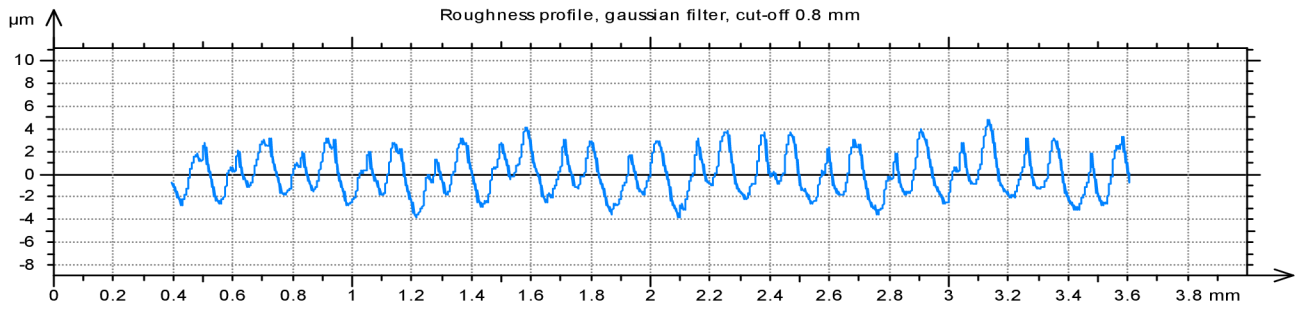


Výstup měření 7

Křivka hustoty pravděpodobnosti 7

PŘÍLOHA Č.1: Záznamy z měření drsnosti povrchu na slitině Ti6Al4V

8) Pramet 6615 (ISO 513 P15, K10), $f = 0,1$ [mm]; $a_p = 0,5$ [mm]; $v_c = 120$ [m.min⁻¹]



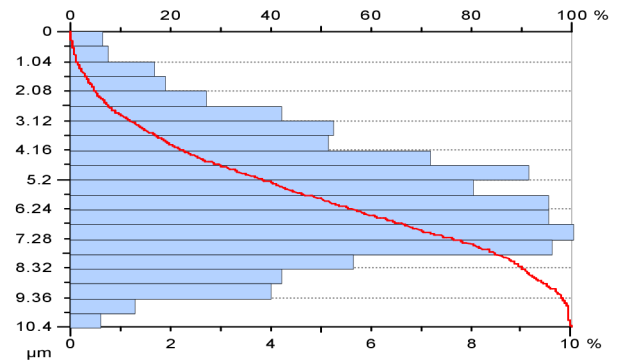
Profil 8 měřeného povrchu 2D

Parameters calculated on the profile Profile

* Parameters calculated by mean of all the sampling lengths.
 * A microroughness filtering is used, with a ratio of 2.5 µm.

Roughness Parameters, Gaussian filter, 0.8 mm

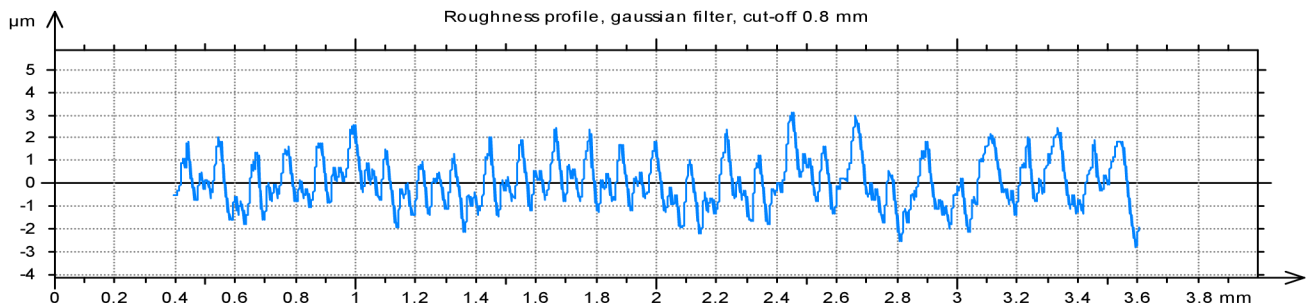
Ra = 1.5 µm
 Rq = 1.8 µm



Výstup měření 8

Křivka hustoty pravděpodobnosti 8

9) Pramet 6615 (ISO 513 P15, K10), $f = 0,1$ [mm]; $a_p = 0,5$ [mm]; $v_c = 90$ [m.min⁻¹]



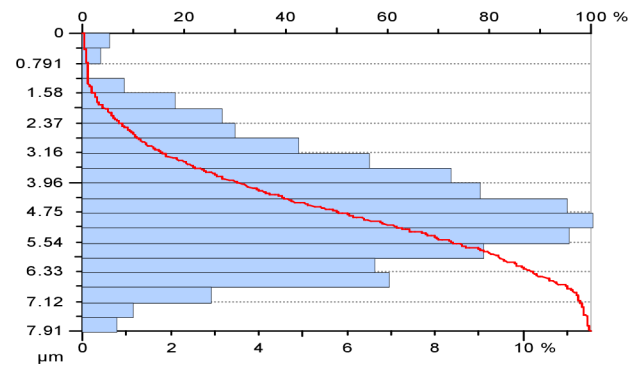
Profil 9 měřeného povrchu 2D

Parameters calculated on the profile Profile

* Parameters calculated by mean of all the sampling lengths.
 * A microroughness filtering is used, with a ratio of 2.5 µm.

Roughness Parameters, Gaussian filter, 0.8 mm

Ra = 0.798 µm
 Rq = 0.998 µm

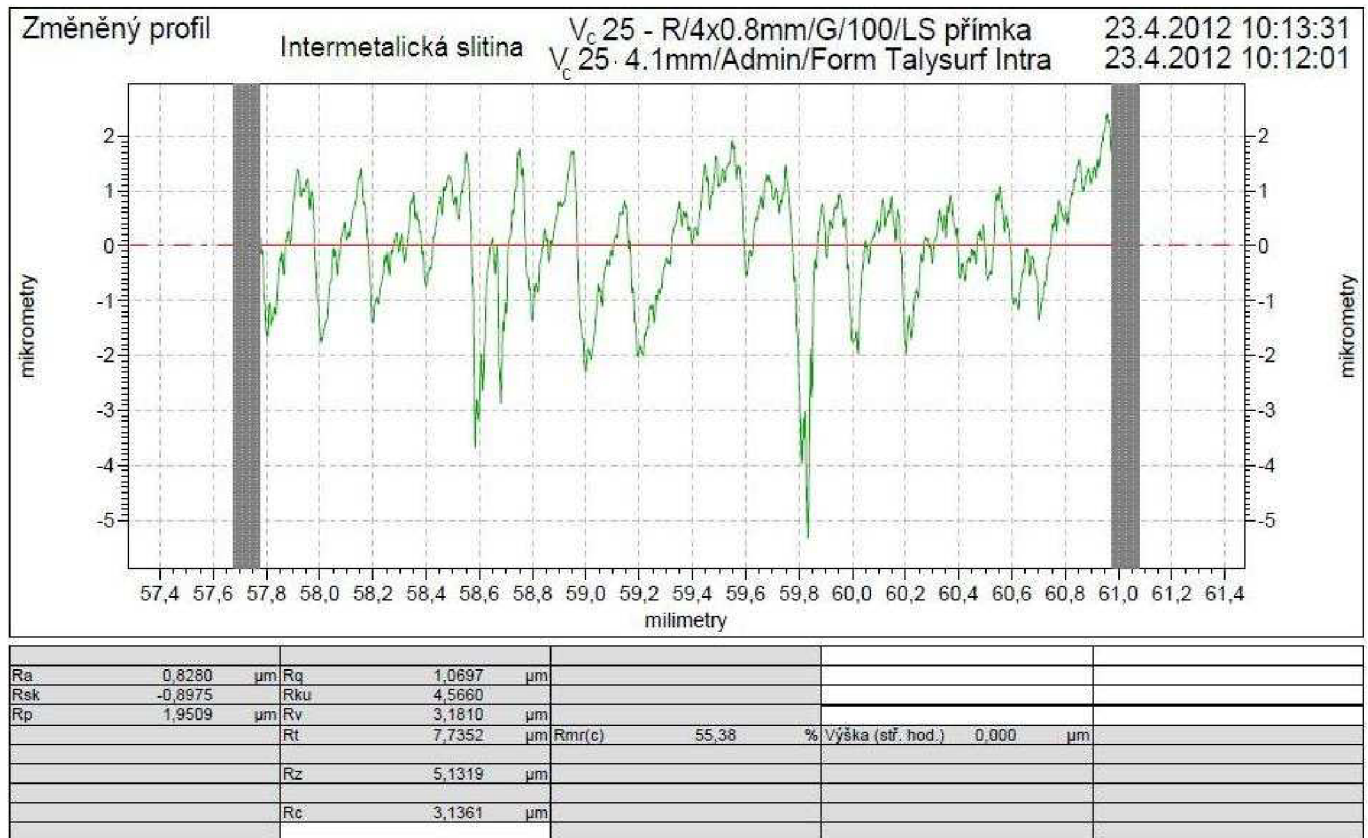


Výstup měření 9

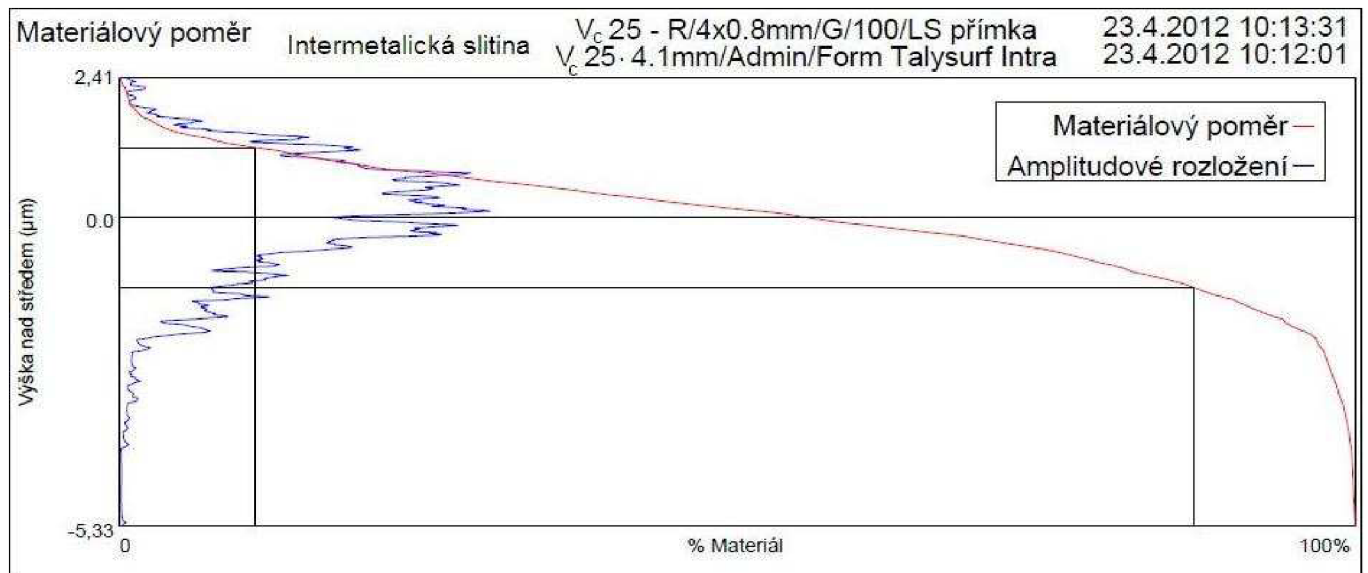
Křivka hustoty pravděpodobnosti 9

PŘÍLOHA Č.2: Záznam z měření drsnosti povrchu na intermetalické slitině

2) Pramet 6615 (ISO 513 P15, K10), $f = 0,1$ [mm]; $a_p = 0,5$ [mm]; $v_c = 25$ [m.min⁻¹]



Profil měřeného povrchu obrobeneho řeznou rychlostí 25 [m.min⁻¹]



Upper Cursor		Band		Lower Cursor	
Uroveň	1,20 μm	Pásmo/Htp	2,41 μm	Uroveň	-1,21 μm
mr 1%	11,0 %	Delta mr%	75,8 %	mr 2%	86,8 %
HSC	9 výstupků	Počet výstupků	19 výst/cm	HSC	14 výstupků

Materiálový poměr- křivka hustoty pravděpodobnosti a nosná křivka $v_c = 25$ [m.min⁻¹]