



Středoškolská technika 2015

**Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na
ČVUT**

Aplikace metod využívajících iontové svazky k modifikaci slitiny Ti6Al4V

Antonín Valášek

První soukromé jazykové gymnázium

Brandlova 875, Hradec Králové

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedl všechny prameny, ze kterých jsem vycházel.

.....

V Hradci Králové dne 26. ledna 2015

Antonín Valášek

Poděkování

Děkuji všem lidem, kteří přispěli radou nebo pomocí k úspěšnému ukončení této práce. Jmenovitě bych velmi rád poděkoval vedoucí práce Mgr. Markétě Řehákové Ph.D. a Ing. Petru Vlčákovi za poskytnutí cenných informací a možnost pracovat v laboratořích fakulty strojní ČVUT v Praze

V Hradci Králové dne 26. ledna 2015

Antonín Valášek

Anotace práce v českém jazyce

Valášek, A. Aplikace metod využívajících iontové svazky k modifikaci slitiny Ti6Al4V. Nové Město nad Metují, 2015. Práce soutěže Tvořivá klávesnice na Prvním soukromém jazykovém gymnáziu v Hradci Králové. Vedoucí práce Markéta Řeháková. 51s.

Předkládaná práce se zabývá povrchovými úpravami využívajících iontové a elektronové svazky. V práci jsou vyhodnoceny výsledky povrchových úprav slitiny Ti6Al4V metodou IBAD. Hlavním důvodem úprav je snaha o zlepšení vlastností slitiny Ti6Al4V. Na základě experimentů bylo dokázáno, že upravované materiály získaly výrazně lepší kluzné vlastnosti. Dále pak jsou publikovány výsledky jiných vlastností, jako je chemické složení, fázové složení, pružnost nebo tvrdost materiálu. Experimentální část obsahuje několik grafů, které dokazují změnu vlastností upravované slitiny a celkové vyhodnocení výsledků před a po úpravě. Povrchové úpravy jsou studovány s vysokým potenciálem aplikace ve zdravotnictví, například pro úpravu funkčních částí kloubních implantátů. Se znalostmi z této práce můžeme určit, zda by mohl upravovaný materiál sloužit k vývoji nových kloubních implantátů, které by mohly mít menší vliv na přirozené orgány člověka, nebyly by pro tělo nebezpečné a mohly by být schopny stát se odolnými proti značnému opotřebení, přičemž by se docílilo delší životnosti implantovaného materiálu.

Klíčová slova: Povrchové úpravy, IBAD, titanová slitina, mikrostruktura, kluzné vlastnosti

Annotation

Valášek, A. Application of methods using ion beams to modify Ti6Al4V alloy. Nové Město nad Metují, 2015. Thesis competition Tvořivá klávesnice at First Private Language Grammar School of Hradec Králové. Thesis Supervisor Markéta Řeháková. 51p.

This thesis is focused on modifying surface properties using ion and electron beams. There are evaluated results of surface modifications of Ti6Al4V alloy by IBAD method in this thesis. The main cause of surface modifying is effort to improve properties of the alloy. Based on the experiments was proven that modified materials gained significantly better coefficient of friction. Further there are published results of other properties as chemical composition, phase composition, elasticity or hardness of the material. Experimental part contents several graphs that show change evaluation of the results before and after treatment. Surface treatments are studied with a high potential of application in health, for example for treatment of joint implants. We can say if modified material could be good for a development of new joint implants, which could have lower impact on human organs, would not be dangerous for human body and could be resistant towards wear thanks to the results of this thesis. This fact could guarantee longer vitality of the implanted material.

Keywords: Surface treatments, IBAD, titan alloy, microstructure, coefficient of friction

Obsah

1	Úvod a cíl práce	8
2	Teoretická část	10
2.1	Charakteristika slitiny a typy mikrostruktur slitiny Titanu Ti6Al4V	10
2.1.1	Charakteristika slitiny titanu Ti6Al4V	10
2.1.2	mikrostruktury titanové slitiny Ti6Al4V	11
2.1.3	Využití slitiny Ti6Al4V	12
2.2	Vybrané metody povrchových úprav.....	13
2.2.1	Iontová implantace	13
2.2.2	Metoda IBM	14
2.2.3	Metoda IBAD.....	16
2.2.4	Charakteristika metody IBAD.....	16
2.2.5	Dělení metody IBAD	16
2.2.6	Výhody a nevýhody metody IBAD.....	20
2.3	Vybrané obecné vlastnosti porovnávané před a po úpravě materiálu	21
2.3.1	chemické složení	21
2.3.2	Fázové složení a fázová analýza	22
2.3.3	Tření a koeficient tření	22
2.3.4	Morfologie povrchu	23
2.3.5	Indentační tvrdost a pokusy indentační tvrdostí.....	23
2.4	Řezání vodním paprskem a jeho výhody a nevýhody.....	25
2.4.1	Základní informace o řezání vodním paprskem.....	25
2.4.2	Výhody řezání vodním paprskem	25
2.4.3	Nevýhody řezání vodním paprskem.....	25

3	Postupy experimentální fáze	27
3.1	Příprava vzorků před depozicí	27
3.1.1	Dělení vzorků na jednotlivé kotouče.....	27
3.1.2	Leštění a čištění vzorků.....	28
3.1.3	Odmaštění vzorků	29
3.2	Postup experimentální práce	30
3.3	Metody a použitá diagnostická zařízení vyšetřovaných vlastností, definice zařízení a parametry.....	31
3.3.1	Chemické složení	31
3.3.2	Fázová analýza	31
3.3.3	Ramanova spektroskopie	32
3.3.4	Tvrдость	32
3.3.5	Kluzné Vlastnosti	33
3.3.6	Morfologie povrchu	34
4	Výsledky analýz povrchových vlastností	35
4.1	Morfologie povrchu	35
4.2	Chemické složení.....	37
4.3	Ramanova spektra.....	38
4.4	Fázová analýza.....	39
4.5	Tvrдость.....	40
4.6	Kluzné Vlastnosti.....	41
5	Diskuze.....	42
6	Závěr	43
	Seznam použité literatury	44
	Seznam obrázků.....	45
	Seznam grafů.....	46
	Seznam tabulek.....	46
	Seznam příloh.....	47

1 Úvod a cíl práce

Povrchové úpravy jsou ve společnosti známy a používány již přes 40 let. Těmto metodám je celosvětově věnována stále větší pozornost. Zájem o tyto metody je i v České republice, kde je zatím malý počet míst sloužících jako laboratoře pro povrchové úpravy. Modifikace povrchových vlastností může být jednou z cest jak ekonomicky dosáhnout požadovaných vlastností u již dostupných materiálů namísto vývoje nových. Modifikace využívající iontové svazky se rozšířily především do elektrotechniky[1]. Jejich hlavní využití je v polovodičovém průmyslu. Ve strojírenství, kde nejsou techniky tak rozšířené, mohou mít velký potenciál. Chrání je, jak před mechanickým či chemickým poškozením[2]. Dále jsou určeny pro zlepšení vlastností materiálu proti vlhkosti, žáru a korozi. Povrchové úpravy mají také estetickou činnost, uplatňuje se jejich barva, čitelnost i struktura.

Existuje již mnoho metod pro povrchové úpravy, volba druhu povrchové úpravy souvisí především s účelem prostoru a ploch, na které jsou metody aplikovány, dále s materiálem a kvalitou materiálu. K modifikaci povrchových vrstev a vytváření povlaků slouží několik metod. Metody lze rozdělit do dvou skupin: metody modifikace vlastností povrchů a metody vytvářející povlaky. Nadále můžeme každou metodu dělit na klasickou a moderní. S klasickými metodami se můžeme setkat v tradičních řemeslech třeba na stavbě, mezi tyto metody patří například cementování nebo nitridace. Jako moderní depoziční metody jsou považovány procesy PVD (Physical Vapour Deposition) a CVD (Chemical Vapour Deposition), Iontová implantace, metoda IBAD (Ion Beam assisted mixing) nebo metoda IBM (Ion Beam Mixing).

Cílem práce je navržení povrchové úpravy za účelem zlepšení tribomechanických vlastností titanového materiálu.

1. Návrh povrchové úpravy.
2. Provedení povrchové úpravy.
3. Měření povrchových vlastností.
4. Vyhodnocení povrchových vlastností

V práci jsem porovnal tribomechanické vlastnosti před a po úpravě materiálu. Ve výsledcích práce jsou zahrnuty tyto vlastnosti:

- kluzné vlastnosti - měřené metodou pin on disk
- tvrdost - měřeno nanoindentací
- chemické složení - měřené metodou GDOS
- Ramanova spektra – měřeno Ramanovým mikroskopem
- fázová analýza – měřeno rentgenovou difrakcí

2 Teoretická část

2.1 Charakteristika slitiny a typy mikrostruktur slitiny Titanu Ti6Al4V

2.1.1 Charakteristika slitiny titanu Ti6Al4V

Slitina Ti6Al4V je také často nazývána jako Titan Grade 5 ELI TITAN nebo Grade 23 je v současnosti nejpoužívanější titanovou slitinou pro biomedicínské aplikace. Nejprve byla tato slitina vyvinuta pro kosmický průmysl. Díky jejím vlastnostem se však nadále rozšířila do automobilového průmyslu, do letectví, biomedicíny a dalších průmyslových oblastí[1]. Toto napomohlo rozvinutí této slitiny, která je teď díky škále použití dostupným konstrukčním materiálem. Vlastnosti titanové slitiny se odvíjejí od chemického složení, struktury a termomechanického zpracování. Slitina obsahuje obě alotropické formy titanu α i β (alfa-beta). Fáze α má hexagonální krystalovou strukturu, zatímco β fáze, která se vyskytuje nad tranzitní teplotou, má strukturu kubickou tělesně středěnou. Tranzitní teplota fázové přeměny je pro čistý titan 883 °C. Tato teplota se však mění v závislosti množství příměsí. Al, O, N jsou prvky, které dokážou stabilizovat teploty, nazýváme je tedy α stabilizátory[1]. β stabilizátory snižují teplotu transformace, jsou jimi například V, Ta, Nb.

Tabulka 1: Chemické složení, mechanické a fyzikální vlastnosti slitiny

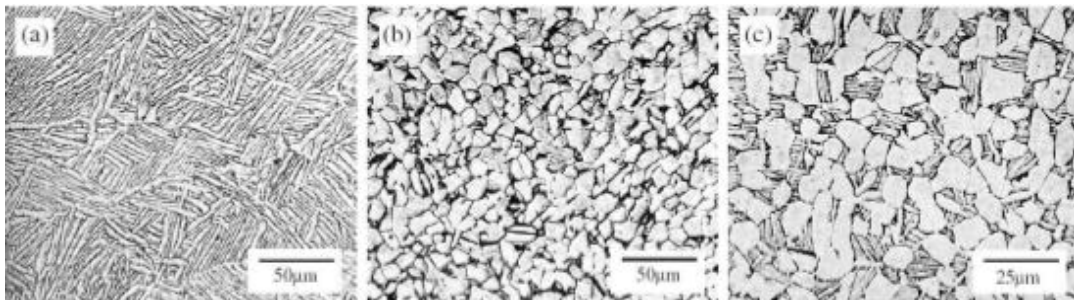
Chemické složení [hm. %] slitiny Ti-6Al-4V							
Al	V	N	C	H	Fe	O	Ti
5,5-6,75	3,5-4,5	max. 0,05	max. 0,08	max. 0,01	max. 0,3	max. 0,2	zbytek
Mechanické vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V							
Stav	Rm [MPa]	Rp _{0,2} [Mpa]	A ₅ [%]	E [GPa]	Tvrdość HV		
žiháný	990	900	30	100	min. 36		
kalený	1050-1200	750-1000	2-25	90-110	min. 39		
vytvrzovaný	1100-1250	1025-1150	2-5	110-115	min. 41		
Fyzikální vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V							
Hustota ρ [kg.m ⁻³]	Teplotní součinitel délkové roztažnosti 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			

2.1.2 mikrostruktury titanové slitiny Ti6Al4V

Od obsahu jednotlivých fází se odvíjejí základní typy Ti slitin.

1. Slitiny legované pouze α stabilizátory, které mají pouze α fázi se označují jako α slitiny.
2. S obsahem β stabilizátorů (1-2)% je ve struktuře obsažena také β fáze (5 - 10)%. Takové slitiny se označují jako pseudo α slitiny.
3. S vyšším obsahem β stabilizátorů a s obsahem (10-30) % β fáze se slitiny označují $\alpha + \beta$.
4. Ještě vyšší obsah β stabilizujících prvků může vést například v důsledku rychlého ochlazování ke stabilizaci ještě vyššího podílu β fáze. U takových slitin se používá označení metastabilní β slitiny, jejichž struktura se procesem stárnutí může změnit na $\alpha + \beta$. (disertační práce)

Slitina Ti6Al4V je titanová slitina $\alpha + \beta$ a její struktura může být ovlivněna tepelným zpracováním. [1] Pomocí kontrolování teploty žhání, rychlosti ochlazování a teploty stárnutí lze dosáhnout lamelové, rovnoosé a bimodální struktury (obrázek č. 1).



**Obrázek 1: tři různé mikrostruktury slitiny Ti6Al4V a) lamelární
b)rovnoosá c) bimodální**

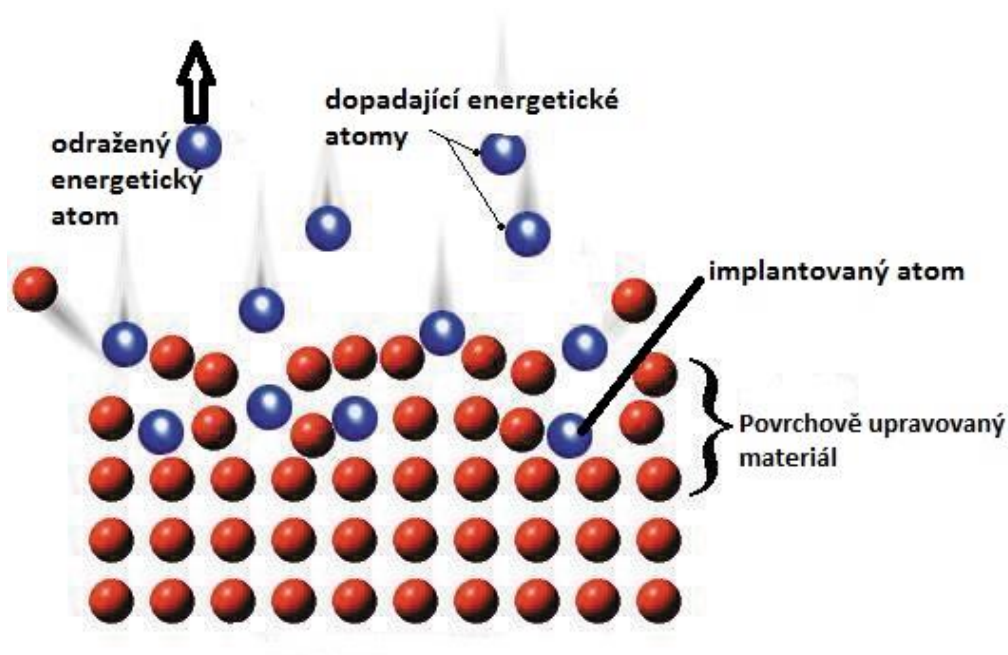
- (a) Lamelární mikrostruktura má horší mechanické vlastnosti, ale vyznačuje se vyšší žárupevností a lepší lomovou houževnatostí, což je dáno značným větvením trhlin při jejich šíření. Zvýšení únavové pevnosti může být dosaženo zjemněním zrna.
- (b) Rovnoosá mikrostruktura se vyznačuje dobrou tvárností, únavovou a pevností, ale relativně nízkou lomovou houževnatostí.
- (c) Bimodální mikrostruktura je kombinace mikrostruktur lamelární a rovnoosé. Vykazuje nejvyšší únavovou pevnost.

2.1.3 Využití slitiny Ti6Al4V

Z tabulky č. vyplývá, že slitiny Ti6Al4V mají obecně velkou tvrdost a vcelku nízkou měrnou hmotnost. Proto se tyto slitiny dostaly do běžného používání v mnoha odvětvích našeho života. Velkou zásluhu má v leteckém či automobilním průmyslu. Jejich odolnost vůči vysokým teplotám je využita při výrobě motorů a turbín. Kromě toho mají velice dobrou korozní odolnost. Ta je dána především několika nanometry tenkou oxidovou vrstvou chemicky stálého oxidu titanu, která se v prostředí vytváří okamžitě na povrchu. Tato tenká vrstva společně s adhezí je dobrá ochrana i v některých agresivních podmínkách jako jsou třeba roztoky chloridu. V lidském těle se slitina chová neutrálně, a proto se tato slitina používá i v lékařství. Vyrábějí se z ní například kostní implantáty (zubní, kloubní), různé dlahy nebo šrouby. V kluzném kontaktu však slitina Ti6Al4V vykazuje velké tření a opotřebení, což má velký vliv na životnost součástky. Produkty by kromě toho mohly také vykazovat nechtěné reakce těla. Pro tuto vadu se používají povrchové úpravy, vhodná povrchová úprava by měla vylepšit špatné tribologické vlastnosti, to vede k prodloužení životnosti součástí. Účinnou variantou by byly povrchové úpravy využívající nanosení uhlíkové vrstvičky, tedy kluzného povrchu. Uhlík by mohl zvýšit korozní odolnost a zamezit případnému šíření iontů vanadu a hliníku, které jsou v jistých reakcích pro lidské tělo nevhodné. [3]

2.2.1 Iontová implantace

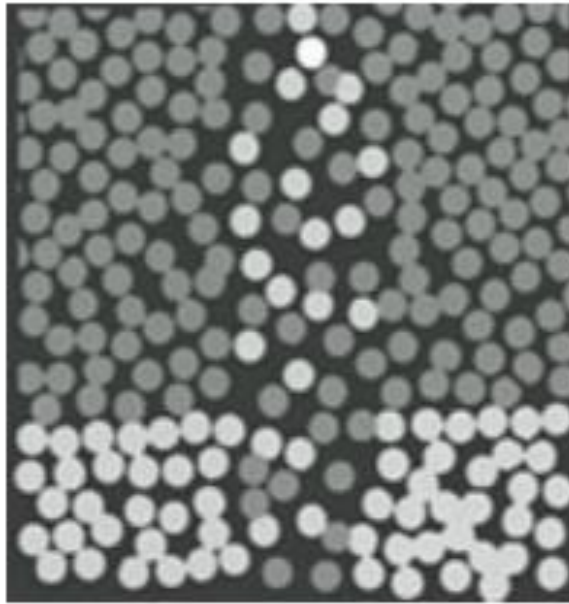
Iontová implantace neboli interakce urychlených iontů s pevnou látkou se nachází na rozhraní jaderné fyziky a fyziky pevných látek. Urychlené atomy dopadají na povrch materiálu (terče). Při dopadu se část energetických atomů, tedy iontů, odrazí od povrchu materiálu a část pronikne do povrchových a podpovrchových vrstev. Při dopadu iontů na povrch se také nějaké ionty vyřadí (rozpráší). Atomy, které proniknou hlouběji do povrchové vrstvy, následně ztrácejí svoji energii a zabudovávají se tak do struktury pevné látky. [2] Celková délka dráhy, kterou iont proletí, od místa vniku do pevné látky do místa jeho zabudování, se nazývá dosah iontu R (range). Experimentální stanovení takto definovaného dosahu je prakticky nemožné. Pro aplikaci iontové implantace má především význam veličina R_p (range projected), která se zavádí jako projekce dosahu R do směru počáteční rychlosti iontu. [3]



Obrázek 2: Iontová implantace

2.2.2 Metoda IBM

Ion Beam Mixing (IBM) je podobně jako iontová implantace metoda povrchové úpravy, která do materiálu zavádí cizí atomy. Iontová aplikace využívá energetické atomy iontového svazku jako dopantu, na rozdíl od IBM, která používá implantované iontové svazky jako prostředek pro dosažení jiných cizích atomů do povrchových a podpovrchových vrstev. Míchání iontovým svazkem se dá provádět sekvenčně nebo simultánně použitím iontové implantace nebo povlakování. Můžeme tedy u metody IBM rozlišovat dva typy: 1. statický mód, 2. Dynamický mód. Ve statickém módu (sekvenční IBM), který znázorňuje obrázek č. 4, na povrch substrátu nanese některou PVD depoziční technikou tenká vrstva materiálu o tloušťce řádově jednotky až desítky nanometrů. Takto upravený substrát je následně vystaven iontovému bombardu. Při iontovém ozáření se uplatňují, stejně jako při iontové implantaci, kolizní procesy a dochází k předávání energie atomům dříve nanesené tenké vrstvy. V důsledku toho se atomy výrazně přeskupují a za předpokladu, že mají dostatečnou energii, mohou pronikat z nanesené vrstvy do substrátu. Na rozhraní povlak substrát se tak mohou atomy vzájemně mísit. Dochází k částečnému odprašování nanesené vrstvy, k jejímu mísení se substrátem a k pronikání energetických atomů do materiálu. Na substrátu se vytváří nový povrch. Povrchové vrstvy nových modifikovaných vlastností nemají žádné ostré rozhraní a pozvolna přecházejí v původní složení a strukturu materiálu substrátu. Pracuje-li metoda IBM v dynamickém módu (simultánní IBM), pak depozice tenké vrstvy probíhá za současného ozařování povrchu energetickými atomy. Depozice se často provádí napařováním prostřednictvím elektronového svazku. Atomy napařovaného materiálu kondenzují na povrchu součásti. Pro realizaci simultánní metody IBM je nutné vhodně zvolit vzájemný poměr hustot toků bombardujících a deponovaných atomů. V případě, kdy hustota toku deponovaných atomů by byla příliš vysoká, docházelo by k nukleaci zárodků, vytváření ostrůvků a růstu povlaku, o čemž bude v souvislosti s metodou IBAD pojednáno v kapitole 3.3. Modifikací povrchových vrstev metodou IBM by mělo primárně docházet pouze k mísení atomů „povlaku“ (dopujícího prvku) s atomy substrátu, nikoli k tvorbě povlaku, jeho modifikaci nebo gradientnímu rozhraní povlak substrát. [2]



Obrázek 3: Princip metody IBM

Procesy, které probíhají při míchání iontovým svazkem, jsou iniciovány interakcemi energetických atomů s pevnou látkou. Nazývají se balistické a jsou úměrné energii E , fluenci Φ a hmotnosti energetických atomů (iontů) M_1 . Iontového míchání je proporcionální $\Phi^{1/2}$ [7]. Množství promísených atomů Q na rozhraní mezi dvěma různými materiály je možné vyjádřit vztahem [1]

$$Q = \left[\Phi \left(\frac{dE}{dx} \right)_j \right]^{1/2} ,$$

Kde $(dE/dx)_j$ vyjadřuje jaderné energetické ztráty. Intenzita fluence (hustota toku dopadajících energetických atomů) s jednotkou $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ je během iontového míchání udržována na konstantní hodnotě. Fluence je pak úměrná délce trvání procesu t . To naznačuje, že iontové míchání je také proporcionální $t^{1/2}$. Časová proporcionalita je podobná proporcionalitě pozorované u tepelně aktivované difuze, což vede k závěru, že míchání iontovým svazkem je proces s trendem podobným difuzi. [1]

2.2.3 Metoda IBAD

2.2.4 Charakteristika metody IBAD

Již od počátku zkoumání povrchových úprav byla schopnost dopravy iontů a změna složení materiálu velice sledována. Možnost řízení energie, fluence a směru bombardování částic motivovala zkombinování PVD technik s Iontovým bombardem. Kombinace metody PVD s bombardem iontových svazků se nejčastěji označuje jako IBAD (Ion Beam Asisted Mixing – depozice doprovázena bombardem iontových svazků). Název tohoto typu povrchové úpravy se však často uvádí jako ion asisted coating (IAC), Ion asisted deposition (IAD), ion vapor deposition (IVD) , ion beam enhanced deposition (IBED), nebo dynamic recoil mixing (DRM) [3]

2.2.5 Dělení metody IBAD

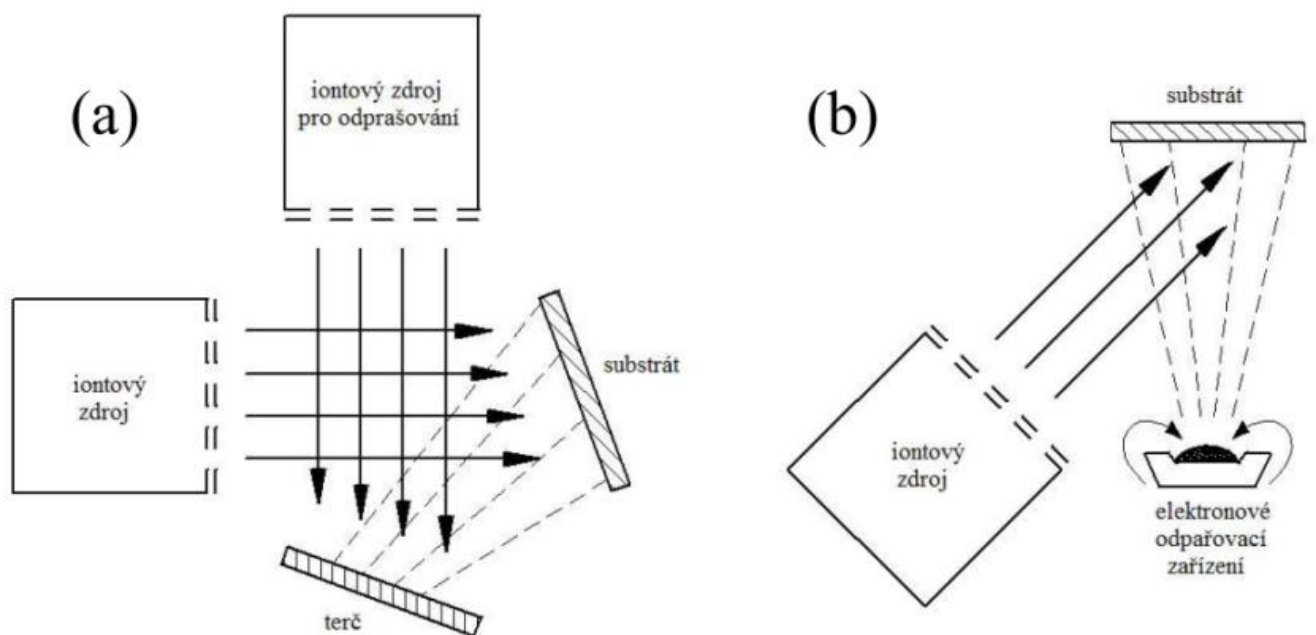
Metoda IBAD se člení na statický a dynamický mód. To je důsledek dvou možností, které se užívají, podle toho, zda probíhá iontové ozařování povrchu souběžně nebo následně po depozici tenké vrstvy, rozdělujeme je tedy na tzv. simultánní nebo sekvenční IBAD. Oba módy úpravy IBAD jsou analogickými módy metody IBM popsané v odstavci 3.2 s tím, že u metody IBAD jde především o vytvoření povlaku. Dále můžeme dělit tuto metodu podle velikosti energie energetických částic vyobrazené v tabulce č. [2]

Tabulka 2: Dělení metody IBAD podle velikosti energie energetických částic

Dělení podle velikosti energie energetických částic		
<i>velikost</i>	<i>označení</i>	<i>název v aj</i>
1. do 2 keV	LE IBAD	Low Energy Ion Beam Mixing
2. desítky - stovky keV	HE IBAD	High Energy Ion Beam Mixing
<i>název v čj</i>		
1.	depozice podporovaná nízkoenergetickým iontovým	
2.	depozice podporovaná vysokoenergetickým iontovým svazkem	

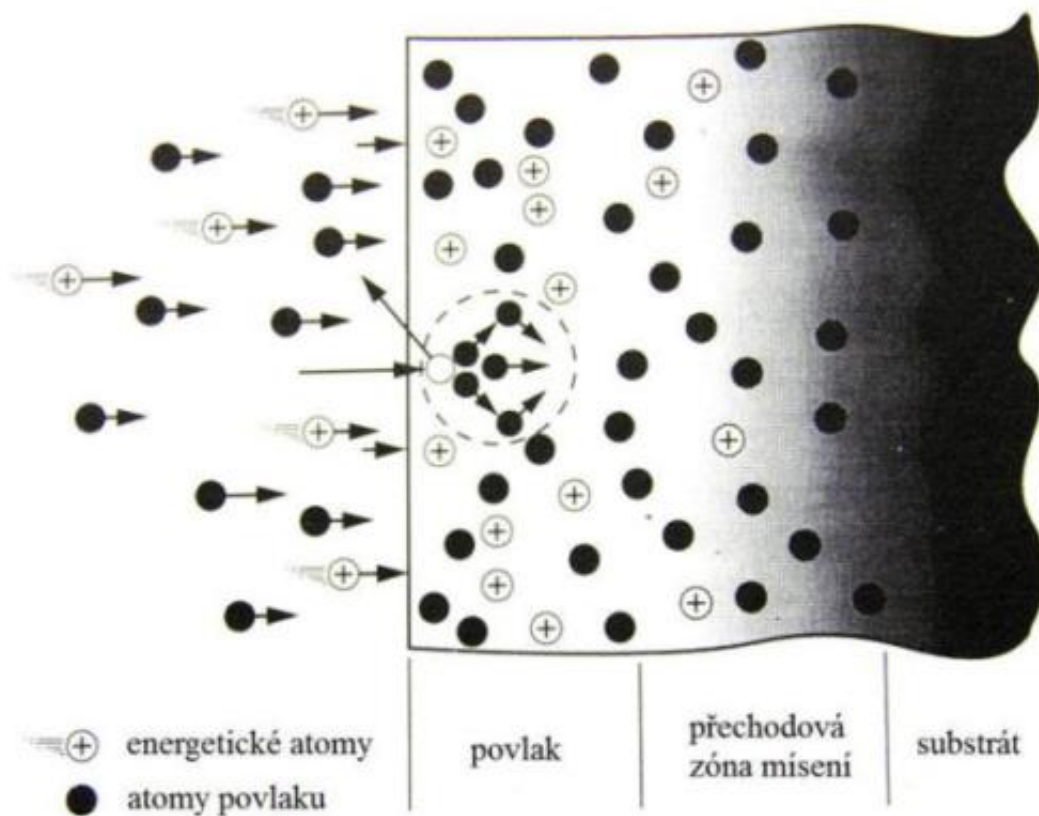
2.2.5.1 Výroba povlaku

Vytváření povlaku je prováděno metodou PVD, většinou oprašováním nebo odpařováním. Energetické atomy jsou většinou dodávány širokouhlým iontovým zdrojem o nižších energiích než u iontové implantace, většinou (0,2 až 2) keV s poměrně velkou hustotou jontového proudu. [1] Uspořádání metody IBAD je znázorněno na obr. č. 4. Umístění depozičního a iontového zdroje klade při vložení do vakuového prostředí jisté nároky. V případě, kdy je k úpravě povrchu použito elektronové dělo, mělo by být umístěno v jisté vzdálenosti od iontového zdroje, uvádí se, že bezpečná vzdálenost je 20 – 30 cm, porušení této zásady by mohlo vést k ovlivňování iontového svazku silným magnetickým polem.



Obrázek 4: Uspořádání metody IBAD; (a) *depozice povlaku odprašováním*, (b) *depozice povlaku napařováním*

Iontový svazek má v metodě IBAD několik funkcí. Jednou z nich je leptání. Iontové leptání se nanáší před samotnou depozicí a je vhodné pro zlepšení adheze. Iontové leptání je jev, při kterém je z povrchu upravovaného materiálu odstraněna kontaminovaná vrstva vytvořená atmosférou nebo předchozím zpracováním. Na počátku samotné depozice dynamického módu IBAD, kdy je deponovaná vrstva tenká mají energetické atomy energii pro mísení s povrchem povlaku a se substrátem procesem IBM. V případě, kdy dosáhne deponovaná vrstva velké tloušťky k mísení energetických atomů, nedochází a dodávaná energie se použije k uspořádání atomů vznikajícího povlaku. Interakce deponovaných atomů povlaku s energetickými atomy a substrátem v procesu IBAD je schematicky zobrazen na obr. č. 5. [2]



Obrázek 5: Schéma procesu IBAD

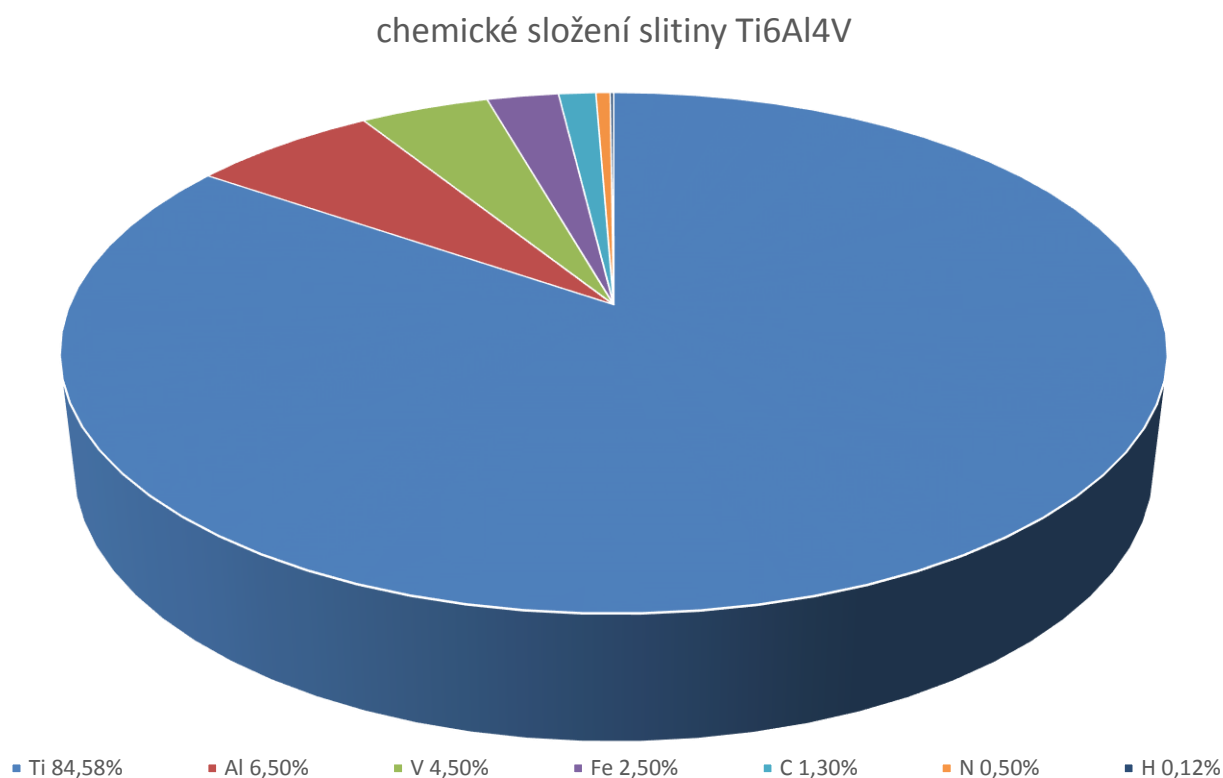
2.2.6 Výhody a nevýhody metody IBAD

Metoda IBAD má velkou absenci rozhraní mezi povlakem a substrátem, využívá mísení atomů IBM v rozhraní povlak / substrát, což má velmi dobrý vliv na zvýšení adheze materiálu. Dále pak při metodě IBAD můžeme regulovat koncentraci mísení energetických atomů, tedy koncentraci povlaku. Zhušťovat modifikovaný materiál pomocí předávání energie implantovaných atomů, docílíme tím zvýšenou hustotu materiálu. Metoda IBAD má však také několik omezení, jako je nerovnovážnost implantovaných atomů díky dodávání energie do atomů, které pak narušují rovnoměrné rozložení atomů v povlaku a dochází k napjatosti. Technologie zpracování povrchu je drahá, jsou zde vysoké náklady na pořízení, ale i na údržbu, která není jednoduchá a potřebuje kvalifikovanou obsluhu. [2]

2.3 Vybrané obecné vlastnosti porovnávané před a po úpravě materiálu

2.3.1 chemické složení

Chemické složení vyjadřuje druh a zastoupení atomů v dané látce. Pomocí tohoto údaje nelze jednoznačně identifikovat látku, protože nepopisuje strukturu dané látky. Slitina Ti6Al4V je tvořena především z atomů titanu. Je v ní však zastoupení dalších prvků, jako je hliník, vanad, železo, uhlík, dusík nebo vodík. Slitina Ti6Al4V má snížený obsah intersticiálních prvků, jako je uhlík a kyslík, což zapříčiňuje vynikající korozní odolnost, pevnost a tažnost slitiny. [1]



graf 1: Chemické složení slitiny Ti6Al4V, znázorněno v hmotnostních procentech

2.3.2 Fázové složení a fázová analýza

Fázové složení určuje atomovou a molekulární strukturu látky. K určení fázového složení se využívá takzvaná fázová analýza, která se dělí na kvalitativní a kvantitativní. Kvalitativní určuje, z jakých látek je materiál tvořen, zatímco kvantitativní určuje zastoupení jednotlivých látek v materiálu. [4]

2.3.3 Tření a koeficient tření

2.3.3.1 Tření

Tření je jev, který vzniká při dotyku dvou těles v pohybu. Tření s kapalnými nebo plynnými tělesy se označuje jako odpor tření. Při každém tření existuje třecí síla, která působí vždy proti pohybu. Práce, která je potřebná k překonání třecí síly se mění v teplo. Těleso může vykonat pohyb pouze, lze-li překonat sílu třecí práci. Tření se dělí na statické, při kterém jde o přechod z klidu do pohybu a na dynamické, které se koná při pohybu. Kdyby byla dvě tělesa s vyleštěnými a pečlivě očištěnými kovovými povrchy uvedena do styku ve velmi dobrém vakuu, nemohla by po sobě klouzat. Naopak, okamžitě by k sobě přilnula (byla by svařena za studena) tak těsně, že by vytvořila jediná kovový kus. Existují speciálně leštěné strojnické bloky, které k sobě i ve vzduchu mohou přilnout tak pevně, že je lze oddělit jen kroucením. Těsného kontaktu atom-atom obvykle nelze docílit tak snadno. I vysoce leštěný kovový povrch má daleko k tomu, aby byl rovinný v atomovém měřítku. Běžné povrchy jsou navíc znečištěny vrstvami oxidů a jiných nečistot, které možnost svaření za studena zhoršují. Dva povrchy, které jsou k sobě přiloženy, se stýkají pouze nejvyššími výběžky. Skutečná mikroskopická dotyková plocha je mnohem menší než zdánlivá makroskopická styčná plocha, dokonce až 10^4 krát. Přesto se povrchy mohou k sobě svařit v mnoha stykových bodech. Snažíme-li se potom vnější silou docílit vzájemného skluzu těles podél jejich povrchů, způsobují tyto svary vznik statického tření. [4]

2.3.3.2 *Koeficient tření*

Závislost na materiálu a jakosti styčných ploch se vyjadřuje koeficientem tření neboli součinitelem smykového tření. Hodnota součinitele smykového tření se určuje měřením a je uvedena ve fyzikálních tabulkách. Liší se pro různé látky i různé druhy styčných ploch, např. drsných, hladkých a namazaných. U tření musíme hledět také na rychlost pohybu materiálů, s vyšší rychlostí se koeficient mění. [4]

2.3.4 *Morfologie povrchu*

Morfologie povrchu uvádí, jak vypadá povrch tělesa. Zajímá se vnější stavbou těles a zkoumá jejich tvar, nikoli funkci. Při aplikaci metod IBAD a dalších se tvar tělesa porovnává před a po upravení, přičemž dochází k zajímavým údajům, protože povrch je jednou z nejhlavnějších důvodů úpravy materiálů. Každý materiál má charakteristický povrch, a spojením dvou různých materiálů se díky iontové implantaci povrch „nového“ materiálu mění. [5]

2.3.5 *Indentační tvrdost a pokusy indentační tvrdostí*

2.3.5.1 *Instrumentovaná indentace*

Instrumentovaná indentace, neboli nanoindentace se stala velmi důležitou, speciálně v případě vývoje tenkých vrstev a pokročilých materiálů s různými mikro- a nanostrukturami, jelikož umožňuje vyhodnocení mechanických vlastností ve velmi malé škále (desítky nebo stovky nanometrů). Aby bylo možné získat správné výsledky i pro tak malé vtisky, používá se často místo Vickersova indentoru, trojstranný Berkovichův indentor z důvodu jeho téměř ideálního geometrickému tvaru. [6]

2.3.5.2 pokusy indentační tvrdosti

Pokusy pro indentační tvrdost se většinou používají v mechanice, za účelem stanovení tvrdosti materiálu vůči deformaci. Pokusy mohou být zhotoveny makroskopicky a mikroskopicky. Mezi těmito metodami je rozdíl v užitých měřítkách. [7]



Obrázek 6: Příklad přístroje pro určení indentační tvrdosti

2.4 Řezání vodním paprskem a jeho výhody a nevýhody

2.4.1 Základní informace o řezání vodním paprskem

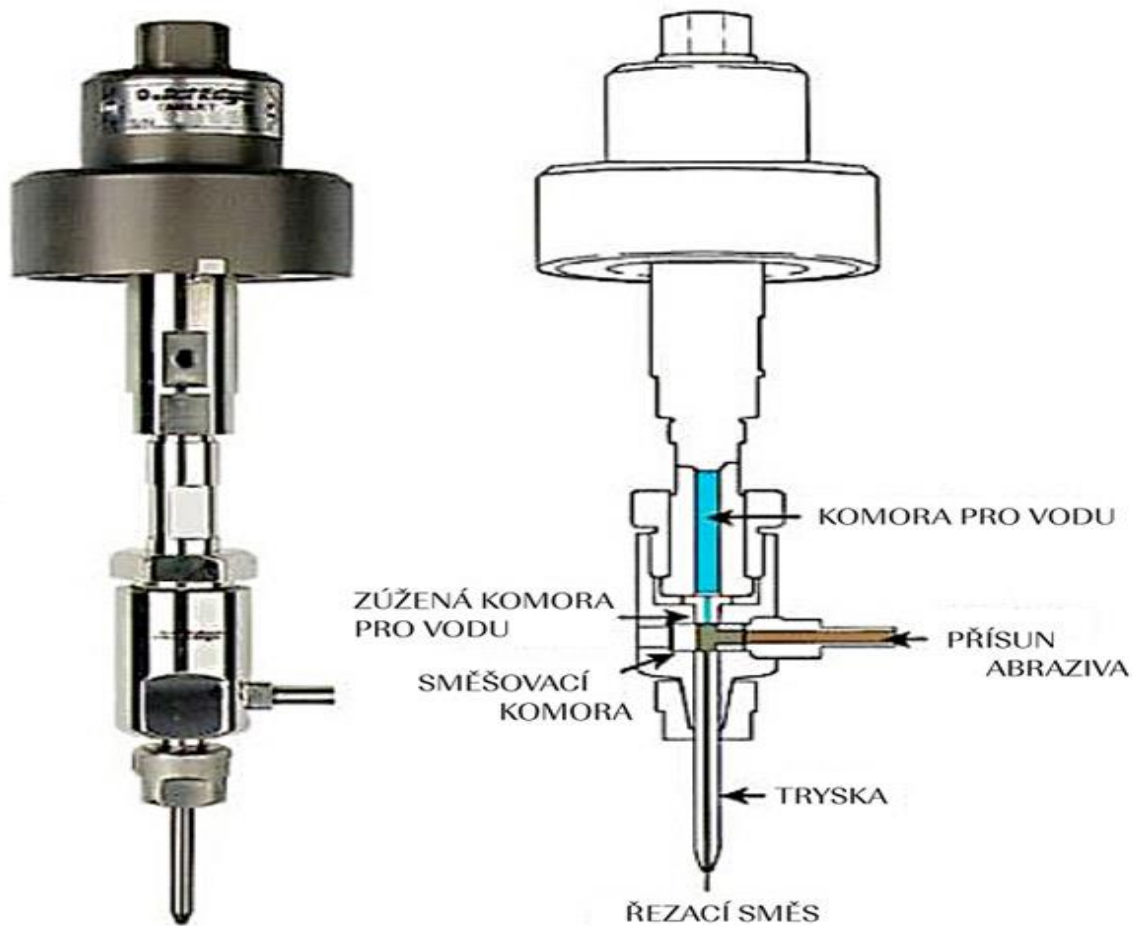
Řezání vodním paprskem je moderní, kvalitní a ekologická metoda obrábění široké palety materiálů. Vysokotlaké zařízení umožňuje stlačit vodu až na 4150 bar, ve směšovací komoře do vodního proudu přimísit abrazivní materiál a tuto směs prohnat tryskou světlosti jeden milimetr. Takto vytvořený vodní paprsek má pak dostatek energie, aby dokázal provádět řezy i v materiálech s velmi vysokou pevností, dále ve velmi měkkých, křehkých i houževnatých materiálech. Pohyb paprsku na souřadnicovém stole je řízen počítačem, čímž je umožněna velmi vysoká přesnost a opakovatelnost tvarových řezů. [7]

2.4.2 Výhody řezání vodním paprskem

Mezi hlavní výhody řezání vodním paprskem patří fakt, že při řezání se nestýká řezaný materiál s nástrojem, nedochází k tepelnému namáhání materiálu a ke vzniku vnitřního pnutí, řezy lze provádět v těsné blízkosti hrany materiálu a minimalizovat tak odpad, nedochází ke vzniku mikrotrhlin v okolí řezu, vodním paprskem lze řezat i materiály měkké a lepkavé nebo droplivé a křehké, nedochází k chemickému ovlivnění řezaného materiálu, výsledkem je kvalitní řez bez otřepů, je dosahována vysoká přesnost řezu, neporušení povrchové úpravy materiálu (leštění, broušení...), příznivá cena. [7]

2.4.3 Nevýhody řezání vodním paprskem

Při řezání vodním paprskem se však objevují nevýhoda, jako je nevyhnutelný kontakt s vodou kovové materiály nutno vhodně ošetřit delší vysoušení u nasákových materiálů možnost změny barvy či znečištění některých materiálů. Dále je při řezání vodním paprskem velký rozptyl vodního paprsku, při řezání tělesa o větším průměru vznikají jistě rýhy. [7] Čím větší je řezané těleso, tím dále musí být od nástroje a čím je vzdálenost mezi materiálem a nástrojem větší, tím je větší rozptyl paprsku, což zapříčiňuje nehladký řez tělesa a vznik již zmíněných rýh a větší hrubost.



Obrázek 7: Princip řezání vodním paprskem

3 Postupy experimentální fáze

3.1 Příprava vzorků před depozicí

3.1.1 Dělení vzorků na jednotlivé kotouče

Vzorky ve tvaru kotouče o průměru 20 mm a výšce 6 mm byly nařezány z tyčového polotovaru ze slitiny Ti6Al4V. Dělení materiálu bylo provedeno vodním paprskem. Vzorky měly po rozřezání průměrnou drsnost Ra 3,8 μm a plocha řezu byla nepravidelná, jak je patrné z obrázku č. 8.



Obrázek 8: Povrch kotouče slitiny Ti6Al4V před leštěním

3.1.2 Leštění a čištění vzorků

Vzorky byly čištěny a broušeny na leštičce Voenix beta od firmy Buehler. Leštění probíhá ve třech krocích, nejdříve brusným papírem SiC o zrnitosti 4000 a poté na plátně trident diamantovou suspenzí o zrnitosti 1 μm . Konečnou operací je dolešťování na plátně nanocloth koloidním silikátem o zrnitosti 0,06 μm . Vzorky byly vyleštěny na konečnou drsnost $R_a \leq 0,02 \mu\text{m}$. Výsledek je vyobrazen na obrázku č. 9.



Obrázek 9: Leštička Voenix beta



Obrázek 10: Povrch kotouče po leštění.

3.1.3 Odmaštění vzorků

Vyleštěné a vyčištěné vzorky byly také odmašťovány v ultrazvukové vaně Elmasonic S 30 H od výrobce Elma. Proces odmašťování se dělí na dva kroky, první krok probíhal v lázni acetonu po dobu dvaceti minut. Poté následoval oplach v izopropylalkoholu, znovu na dvacet minut.



Obrázek 11: Ultrazvuková vana Elmasonic

3.2 Postup experimentální práce

Po výrobě, leštění a odmaštění byly vzorky vloženy do aparatury. Cílový tlak byl stanoven na $1 \cdot 10^{-6}$ milibaru. Po vyčerpání na tento tlak se zapnula rotace vzorků, následně byl použit iontový zdroj, díky kterému se povrch uhlíkového materiálu začal odprašovat. Odprašovaný materiál se pomocí elektronových svazků začal napařovat na upravovanou slitinu Ti6Al4V, přičemž došlo k zvětšení tloušťky, napařovaného materiálu, o $40 \mu\text{m}$. Tato změna byla změřena pomocí měřiče tloušťky, založeným na principu změny rezonanční frekvence křemenného krystalu, v důsledku změny tloušťky napařovaného filmu. Takto připravený materiál byl následně upravován vysoko-energetickým svazkem dusíkových iontů s energií 90 keV. Proudová hustota byla $2 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ po dosažení fluence $1 \cdot 10^{17} \cdot \text{cm}^{-2}$. V této práci jsou zveřejněny výsledky analýz chemického složení, morfologie povrchu, fázové analýzy, tvrdosti a koeficientu tření.



Obrázek 12: Zařízení pro realizaci metody IBAD

3.3 Metody a použitá diagnostická zařízení vyšetřovaných vlastností, definice zařízení a parametry

3.3.1 Chemické složení

U vzorků bylo vyšetřováno chemické složení povrchových vrstev metodou RBS. Metoda RBS je nedestruktivní analytická technika, která je hojně využívána pro studium tenkých, řádově nm, vrstev až po multi-vrstevnaté systémy o tloušťce desítek μm .

3.3.2 Fázová analýza

U vzorků bylo vyšetřováno fázové složení na práškovém difraktometru. K měření fázové analýzy na vzorcích byl použit horizontální práškový difraktometr PANalytical XPert PRO s kobaltovou anodou – vlnová délka 0.1789 nm. Úhel dopadu paprsku byl 1° .



Obrázek 13: Difraktometr PANalytical X'Pert PRO

3.3.3 Ramanova spektroskopie

Na vzorcích byly dále analyzovány Ramanova spektra. Byl použit Ramanův mikroskop Renishaw RM 1000. Ramanova spektra buzena nepolarizovaným světlem argonového laseru s vlnovou délkou 514,5 nm. Paprsek byl fokusovaný do průměru $4 \cdot 10^{-6}$ m a výkon na vzorek byl $1 \cdot 10^{-3}$ W.



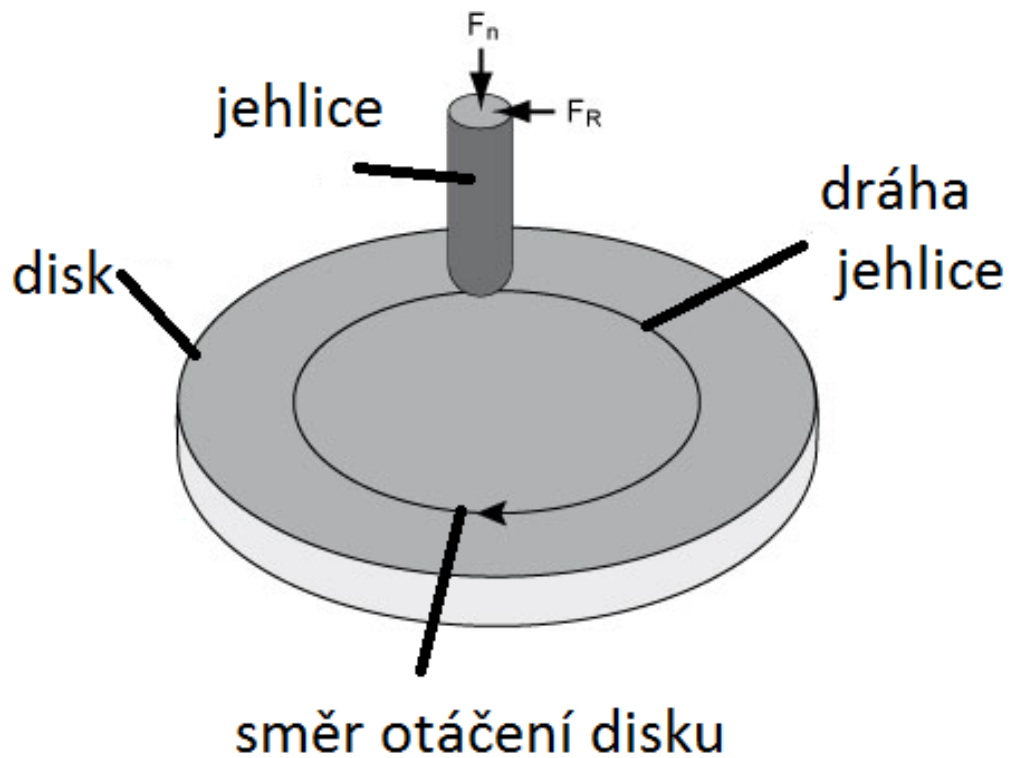
Obrázek 14: Ramanův mikroskop Renishaw RM 1000

3.3.4 Tvrdost

Měření povrchové vrstvy bylo měřeno Nanoindentační metodou na zařízení Hysitron TI 950 TriboIndenter. Indentorem byl trojboký jehlan s vrcholovým úhlem $142,3^\circ$. Pro hloubkové profily indentační tvrdosti byl použit mód partial unloading. Maximální normálové zatížení bylo $5000 \mu\text{N}$. Na vzorku provedeno 12 indentů v matici 3×4 .

3.3.5 Kluzné Vlastnosti

Charakterizované koeficientem tření. Kluzné vlastnosti byly zkoumány na zařízení Pin-on-Disk. Normativní zatížení bylo 2N. Lineární rychlost byla $6\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Poloměr pinu byl 2mm, při laboratorní teplotě 23 °C.



Obrázek 15: Schéma metody Pin-on-Disk - měření kluzných vlastností

3.3.6 Morfologie povrchu

Morfologie povrchu byla analyzována pomocí mikroskopu atomových sil AFM. Pomocí tohoto mikroskopu můžeme jednoduše zjistit morfologii povrchu pevných látek. AFM může zobrazovat pouze povrch vzorků, nikoliv jejich objemovou strukturu.

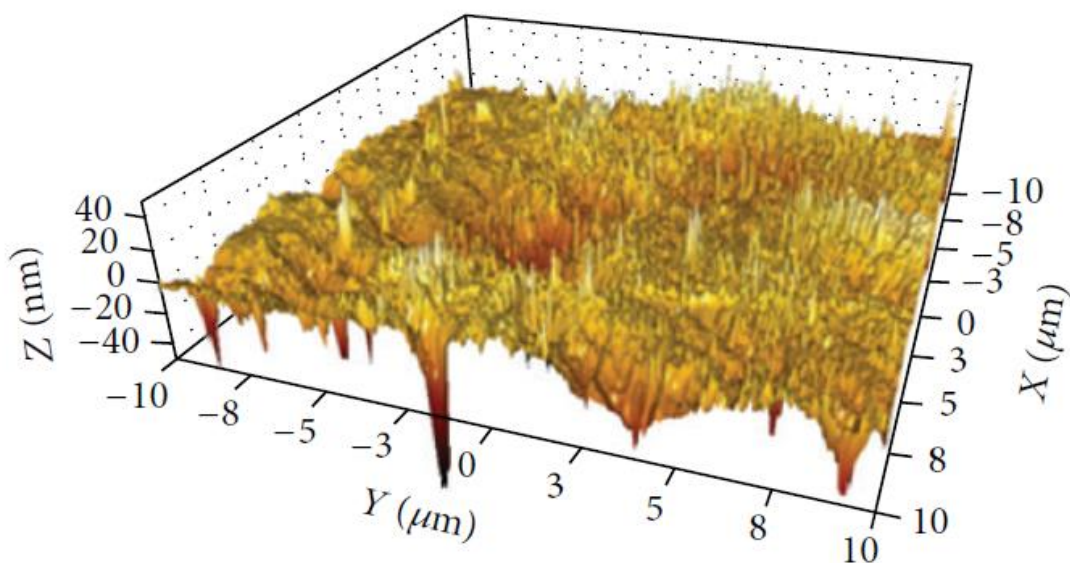


Obrázek 16: Mikroskop atomových sil

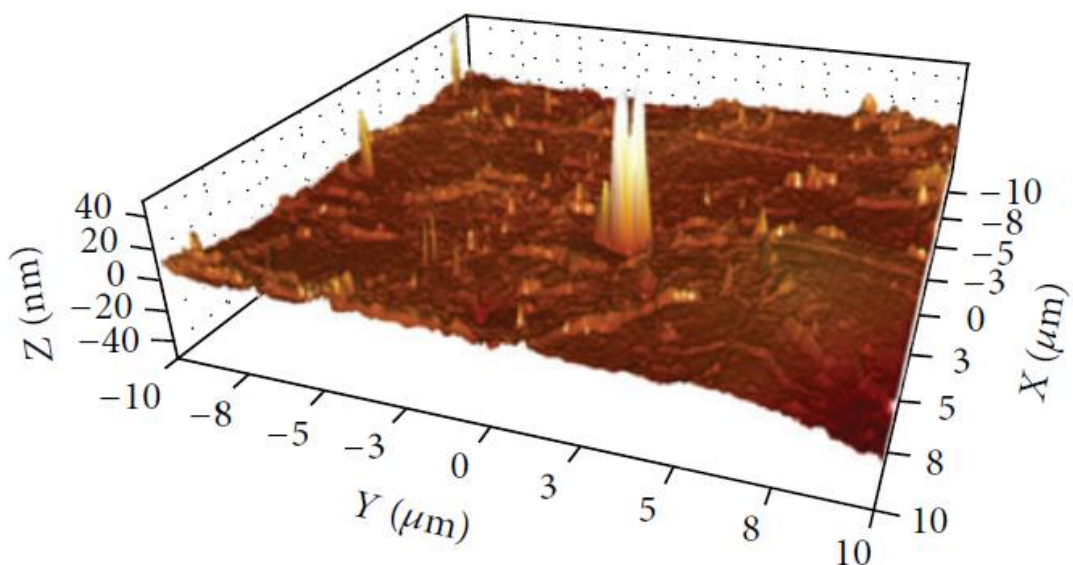
4 Výsledky analýz povrchových vlastností

4.1 Morfologie povrchu

AFM snímky povrchu

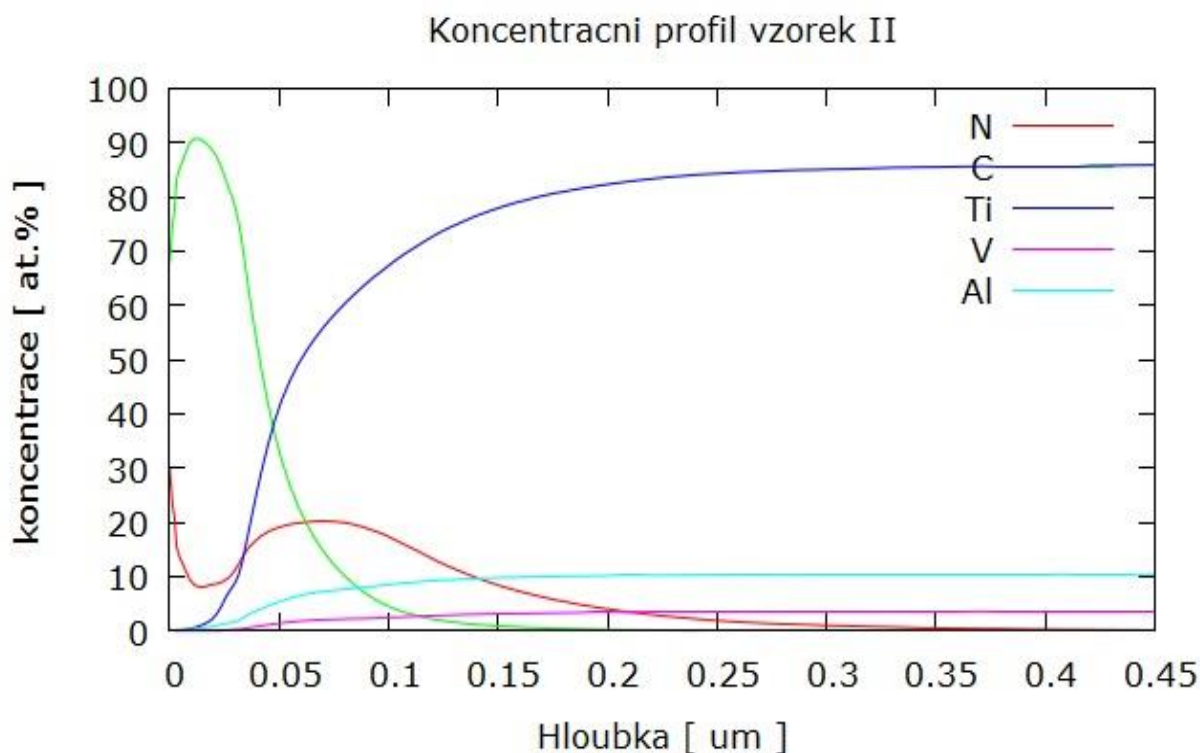


Graf 2: Nemodifikovaný substrát – typická morfologie povrchu po leštění



Graf 3: Modifikovaný povrch – patrné vyhlazení povrchu

Na grafu č. 3, povrchu nemodifikovaného vzorku je vidět povrch po broušení a leštění materiálu. Jsou zde vidět zjevné vytrhané částičky materiálu, oproti obrázku č. 17, na kterém je vidět značné vyhlazení povrchu. I přes nanoměřítko dochází k vyhlazení povrchu.



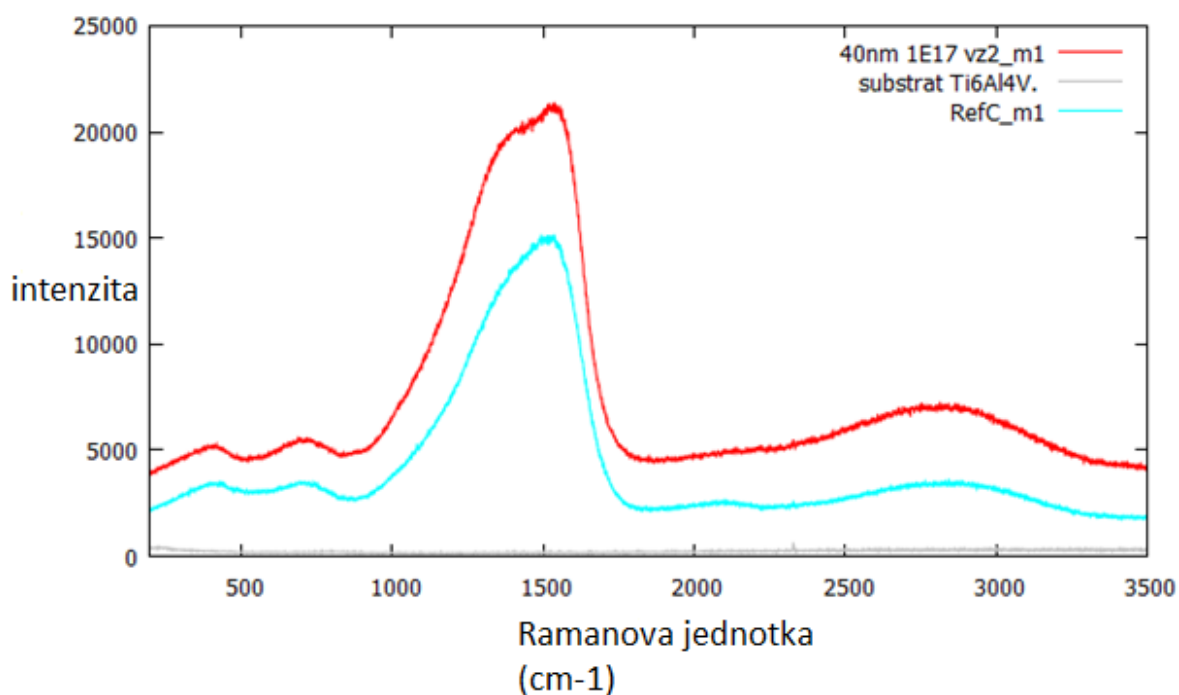
Graf 4: Chemické složení povrchové oblasti modifikovaného materiálu v at. %

Grafická závislost jednotlivých prvků v závislosti na hloubce. V grafu jsou zobrazeny atomová procenta jednotlivých prvků na povrchu upravovaného materiálu. Implantovaný uhlík, zobrazený zeleně, dosahuje na samotném povrchu přibližně 70 at. %. V hloubce 0.01 um dosahuje obsazení dusíku až 92 at. %. V hloubce 0.05 um je zastoupení uhlíku značně pokleslé, činí přibližně 35 at. %. Dále pak v hloubce 0.1 um je zastoupení přibližně 5 at. %, V hloubce 0.175 um zastoupení uhlíku mizí.

Titan, zobrazen fialově, má v nemodifikovaném vzorku zastoupení 87 at. %. Na povrchu modifikovaného materiálu ovšem není obsazen vůbec. V hloubce 0.015 um se v materiálu již nachází titan a jeho atomové zastoupení prudce roste. V hloubce 0.2 um je atomová hmotnost na 85 at. %.

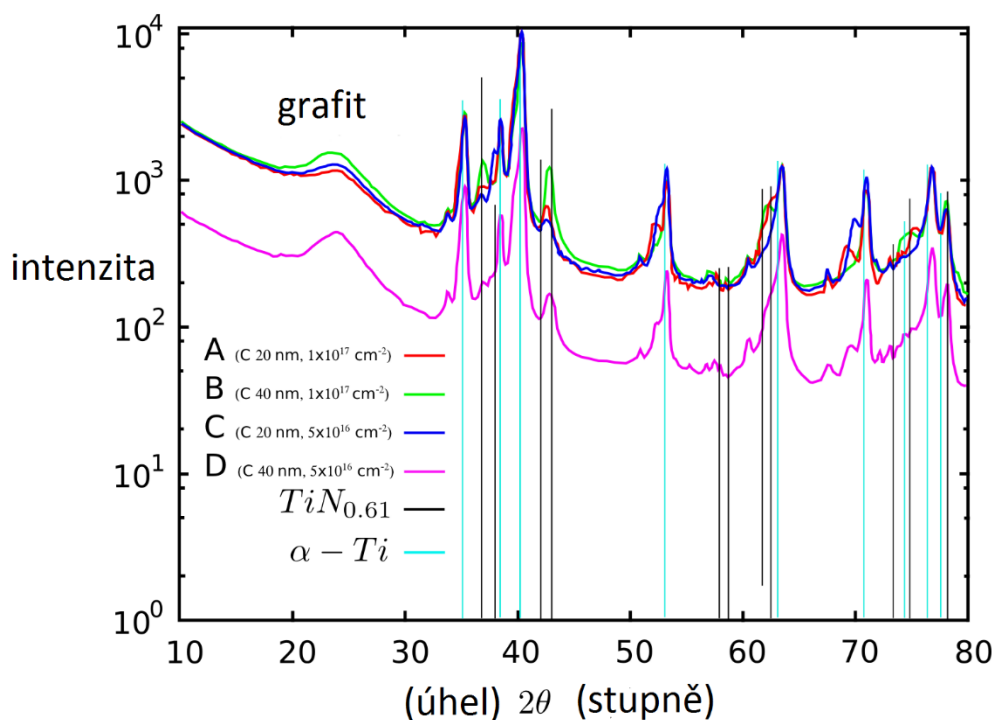
V grafu je dále zobrazeno zastoupení dusíku, hliníku a vanadu v závislosti na hloubce.

4.3 Ramanova spektra



Graf 5: Vazebné stavy uhlíkových atomů

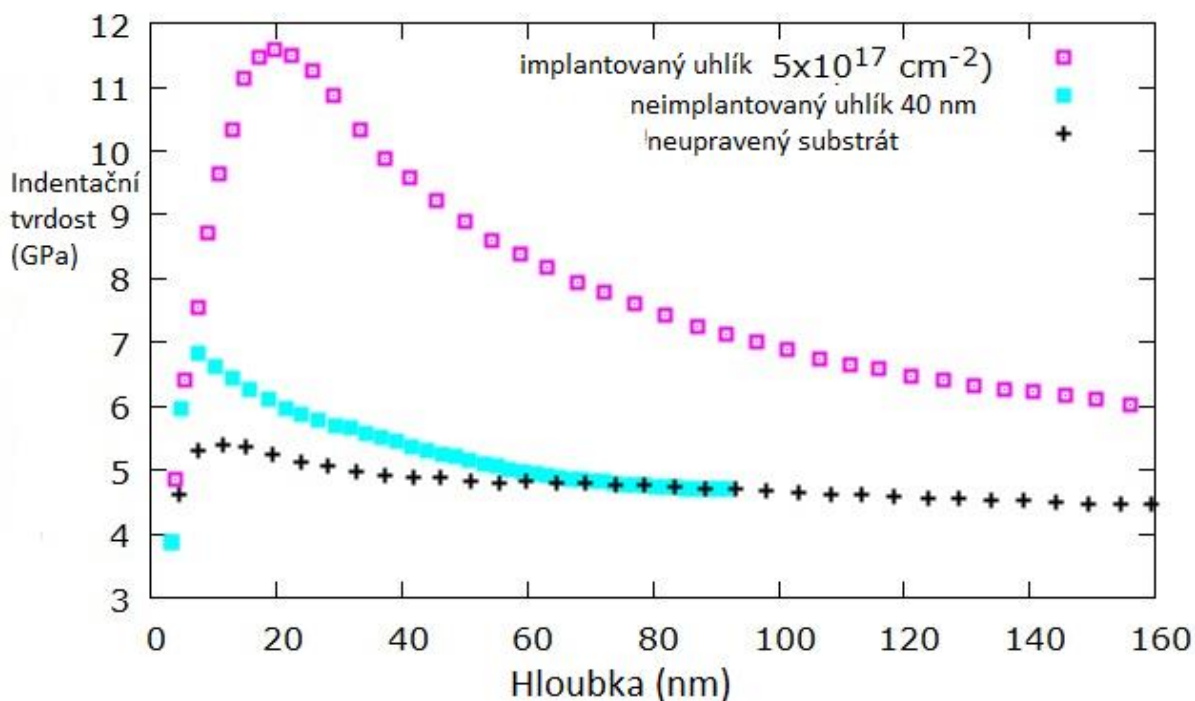
Vazebné stavy uhlíkových atomů byly vyšetřovány Ramanovou spektroskopií, sp^3 , sp^2 . Grafitické povlaky jsou charakterizovány sp^2 konfiguracemi. Diamantové povlaky jsou charakterizovány sp^3 konfiguracemi. V grafu jsou zobrazena Ramanova spektra modifikovaného materiálu červeně a nemodifikovaného materiálu modře. Elektronový bombard přispěl ke zvýšení množství sp^3 vazebných konfigurací atomů uhlíku, což indikuje výraznější maximum s polohou na vlnitosti přibližně 1350. Diamantové vazby sp^3 jsou tedy znázorněny na zrnitosti přibližně 1350 a grafitové vazby na zrnitosti 1600.



Graf 6: Difrakční spektrum modifikovaného vzorku

Rentgenovou difrakcí byla změřena difrakční spektra (graf č. 6). Porovnáním s databází byla zjištěna alfa fáze titanové slitiny a TiN fáze ($TiN_{0.61}$). Nízké, široké maximum s polohou 2θ (úhel), vypovídá o grafitu v amorfní formě. V důsledku pronikání rentgenového záření do hloubky přibližně 1 μm nemusela být zaznamenána karbidická fáze na úzkém rozhraní vytvořené mixingem neboli mísením.

4.5 Tvrdost



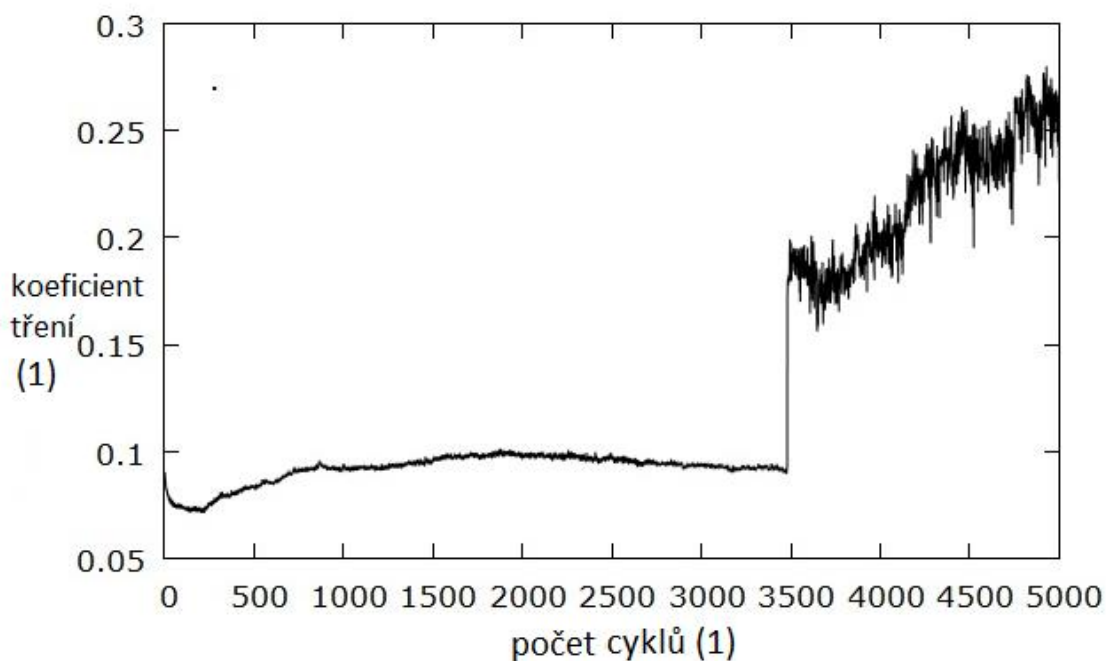
Graf 7: Závislost indentační tvrdosti na hloubce

Na grafu č. 7 je porovnání profilů indentační tvrdosti neupraveného substrátu, vzorku pokrytým uhlíkovým filmem bez iontové implantace a modifikovaného vzorku.

Tabulka 3: Maximální indentační tvrdost

	Neupravovaný substrát	vzorek napařený filmem bez implantace	modifikovaný vzorek
Max. indentační tvrdost	5,5 Gpa	6,9 Gpa	11,8 Gpa
hloubka, v které byla hodnota naměřena	10 nm	8 nm	20 nm

V tabulce č. 3 jsou uvedeny maximální indentační tvrdosti a hloubka, ve které byly uvedené hodnoty naměřeny. Napařením uhlíkového filmu na substrát došlo o zvýšení indentační tvrdosti o 1,4 GPa. Po implantaci získal vzorek napařený uhlíkovým filmem tvrdost 11,8 GPa, došlo tedy k zvýšení tvrdosti o dalších 4,9 GPa. Celkově se maximální indentační tvrdost zvýšila o 6,3 GPa, tedy o více než o 50 %.



Graf 8: Závislost koeficientu tření na počtu cyklů

Kluzné vlastnosti jsou charakterizovány koeficientem tření. Výsledky prezentované na grafu č. 8 ukazují, že povrch vykazuje extrémně nízký koeficient tření. Koeficient tření se v průběhu testu ustálil na hodnotě přibližně 0,09.

Po 3500 cyklech došlo k strmému nárůstu koeficientu tření na hodnotu přibližně 0,3. Tento nárůst byl vyvolán porušením uhlíkového filmu.

Tabulka 4: Koeficient tření nemodifikovaného materiálu

Počet cyklů	500
Koeficient tření	0.6

V tabulce č. 4 můžeme vidět koeficient tření po 500 cyklech, jeho hodnota, po fázi záběhu, je 0.6, tedy dvakrát větší než je tomu tak u modifikovaného materiálu.

5 Diskuze

Analýza chemického složení ukázala na povrchu zbytkový uhlíkový povlak. Z průběhu koncentračních profilů zkeslených kráterovým efektem lze usuzovat, že došlo k mísení uhlíkových atomů na rozhraní. Karbidická fáze nebyla fázovou analýzou prokázána, proto by bylo vhodné udělat doplňující analýzu, například XPS (analýza povrchů). Modifikovaný povrch vykazuje, oproti neupravovaného materiálu, výrazné zvýšení indentační tvrdosti. Toto zvýšení je způsobeno několika vlivy:

1. Tvorbou tvrdých fází nitridu (potvrzuje fázová analýza).
2. Zvýšením sp³ diamantových vazebných konfigurací uhlíkových atomů (Ramanova spektra).

Modifikovaný povrch vykazuje výborné kluzné vlastnosti (0,09). Tyto vlastnosti jsou způsobeny zbytkovým uhlíkem v amorfni podobě na povrchu, jak ukazují výsledky chemického složení a fázové analýzy. Po porušení vrstvy amorfniho uhlíku dochází ke zvýšení koeficientu tření na hodnotu 0,3. To ukazuje finální snížení koeficientu tření oproti neupravovanému povrchu o 50%. Toto snížení koeficientu tření může být způsobeno sekundárními efekty zbytkové uhlíkové vrstvy, ale také v důsledku promísení atomů na rozhraní. Z tohoto důvodu budou provedeny analýzy ostatních vzorků, upravovaných při jiných parametrech.

Experimentálně i prakticky byly studovány modifikace povrchových vlastností slitiny Ti6Al4V. Zvolenou metodou IBAD byl zkoumán typ povlaku připravený v sekvenčním uspořádáním. Na substrát byl nanesen tenký uhlíkový film, který byl následně bombardován vysokoenergetickými dusíkovými ionty o různé fluenci při zvýšené teplotě. V rámci typu modifikace byl měněn zvolený parametr (fluence, druh energetických atomů, implantace při nízké a zvýšené teplotě). Na základě korelace výsledků provedených analýz byly učiněny závěry o vlivu zvolených parametrů na vyšetřované vlastnosti modifikovaného povrchu, za daných podmínek přípravy. Tato metoda je vhodná pro přípravu nových syntetických materiálů. Náročná optimalizace podmínek depozice, vzhledem k množství regulovatelných parametrů, a paprskový charakter této metody omezují její širší uplatnění v průmyslovém prostředí. Metody IBAD mohou mít širší potenciální využití jak v materiálovém výzkumu, tak při rozvíjení této metody do technického prostředí. Bylo dosaženo určených cílů.

Seznam použité literatury

- [1] NASTASI, M., MAYER, J. W. HIRVONEN, J. K.: Ion-solid interactions: Fundamentals and applications, Cambridge University Press 1996, 540 s.
- [2] VLČÁK Petr. Studium variant metody IBAD pro modifikaci povrchových vlastností titanové slitiny. Praha, 2012. Disertační práce. ČVUT. Vedoucí práce prof. Ing. František Černý, DrSc.
- [3] Shockley, 1957, Nastasi, M., Mayer, J. W. Hirvonen, 1999
- [4] Králová. Magda Smykové tření: Fyzika v pozadí Mgr. Králová, Magda. [online]. [cit. 2014-12-29]. Dostupné z: http://techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=53ed6c61h&key=116
- [5] Doerner MF, Nix WD ,metoda pro interpretaci dat z hloubky - sensing odsazení nástrojů. Journal of Materials Research, vol. 1, 1986
- [6] Fischer - Cripps AC, IBIS Handbook of nanoindentační (Fischer - Cripps Laboratories Pty Ltd., Austrálie, 2005), str. 60.
- [7] Kallus, Ing. Petr. Řezání vodním paprskem [online]. [cit. 2015-01-02]. Dostupné z: <http://www.rezeme-vodou.cz/rezani-vodnim-paprskem.php>
- [8] Maxwell, J. A., Teesdale, W. J., and Campbell, J. L., Nucl. Instr. and Meth. B 95, 407-421 (1995).

Seznam obrázků

Obrázek 1: tři různé mikrostruktury slitiny Ti6Al4V a) lamelární b) rovnoosá c) bimodální [2]	11
Obrázek 2: Iontová implantace	13
Obrázek 3: Princip metody IBM [2]	15
Obrázek 4: Uspořádání metody IBAD; (a) depozice povlaku odprašováním, (b) depozice povlaku napařováním [2]	18
Obrázek 5: Schéma procesu IBAD [2]	19
Obrázek 6: Přístroj pro určení indentační tvrdosti ¹	24
Obrázek 7: Princip řezání vodním paprskem ²	26
Obrázek 8: Povrch kotouče slitiny Ti6Al4V před leštěním	27
Obrázek 9: Povrch kotouče po leštění	28
Obrázek 10: Leštička Voenix beta ³	28
Obrázek 11: Ultrazvuková vana Elmasonic	29
Obrázek 12: Zařízení pro realizaci metody IBAD	30
Obrázek 13: Difraktometr PANalytical X'Pert PRO	31
Obrázek 14: Ramanův mikroskop Renishaw RM 1000 ⁴	32
Obrázek 15: Schéma metody Pin-on-Disk - měření kluzných vlastností	33
Obrázek 16: Mikroskop atomových sil ⁵	34

Všechny obrázky bez uvedeného zdroje jsou mé vlastní.

¹ <http://www.directindustry.com/prod/leco/indentation-hardness-testers-114499-1153211.html>

² <http://www.pkit.cz/rezani-vodnim-paprskem.php>

³ <http://www.intechopen.com/books/special-issues-on-magnesium-alloys/estimation-of-carbon-coatings-manufactured-on-magnesium-alloys>

⁴ http://www.univie.ac.at/Mineralogie/forschung_engl.htm

⁵ <http://bioimaging.dbi.udel.edu/afm-catalyst>

Seznam grafů

Graf 1: Chemické složení slitiny Ti6Al4V v hmotnostních procentech.....	21
Graf 2: Nemodifikovaný substrát – typická morfologie povrchu po leštění	35
Graf 3: Modifikovaný povrch – patrné vyhlazení povrchu	35
Graf 4: Chemické složení povrchové oblasti modifikovaného materiálu v at. %	37
Graf 5: Vazebné stavy uhlíkových atomů.....	38
Graf 6: Difrakční spektrum modifikovaného vzorku	39
Graf 7: Závislost indentační tvrdosti na hloubce	40
Graf 8: Závislost koeficientu tření na počtu cyklů	41

Všechny použité grafy v této práci jsou mé vlastní.

Seznam tabulek

Tabulka 1: Chemické složení, mechanické a fyzikální vlastnosti slitiny Ti6Al4V ⁶	10
Tabulka 2: Dělení metody IBAD podle velikosti energie energetických částic.....	17
Tabulka 3: Maximální indentační tvrdost.....	40
Tabulka 4: Koeficient tření nemodifikovaného materiálu	41

Všechny tabulky bez uvedeného zdroje jsou mé vlastní.

⁶ https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52653

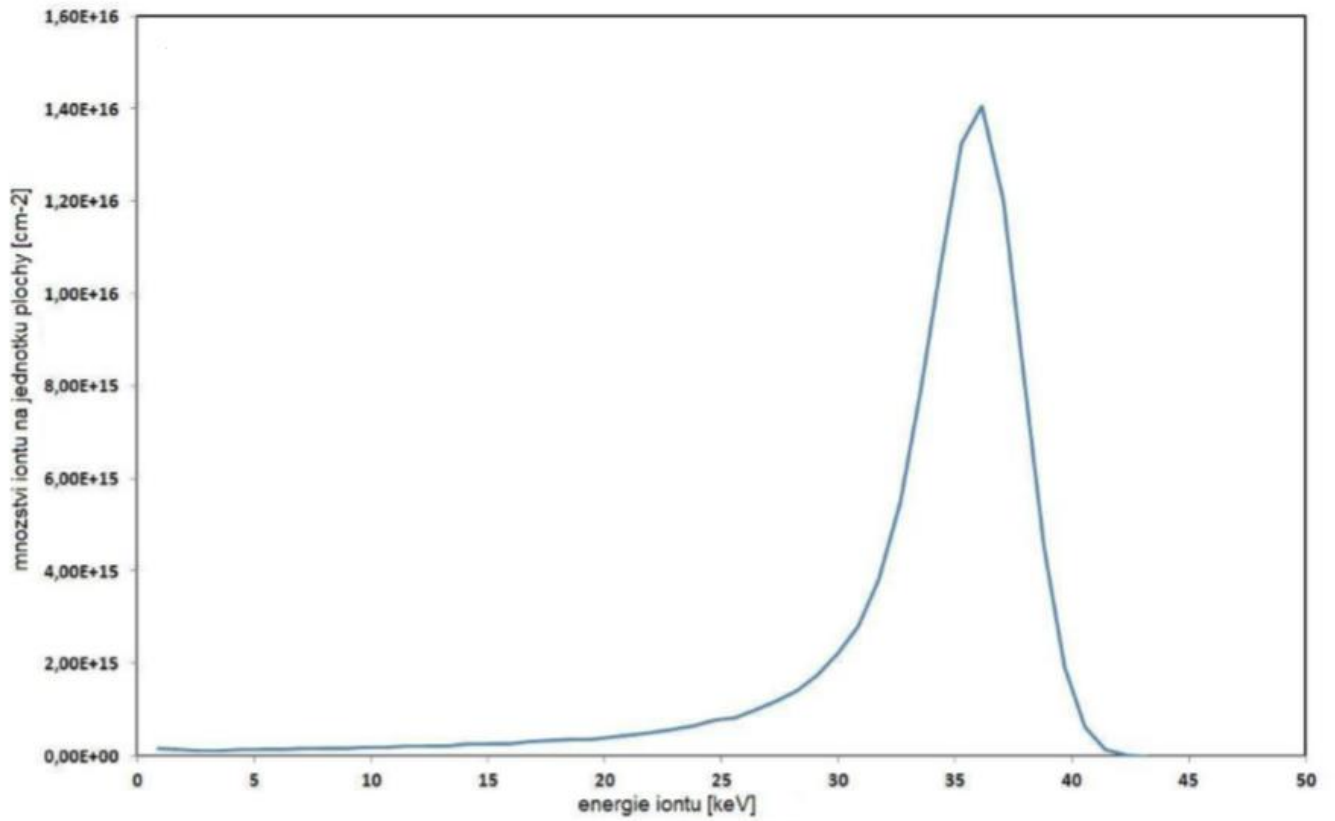
Seznam příloh

Příloha A: Stimulované rozložení iontů implantovaných do substrátu Ti po průletu tenkou uhlíkovou vrstvou	48
Příloha B: Vakuová komora přístroje pro modifikaci povrchu. (IBAD)	48
Příloha C: Uhlíkový materiál, připraven na napařování.	48

Všechny přílohy jsou mé vlastní.

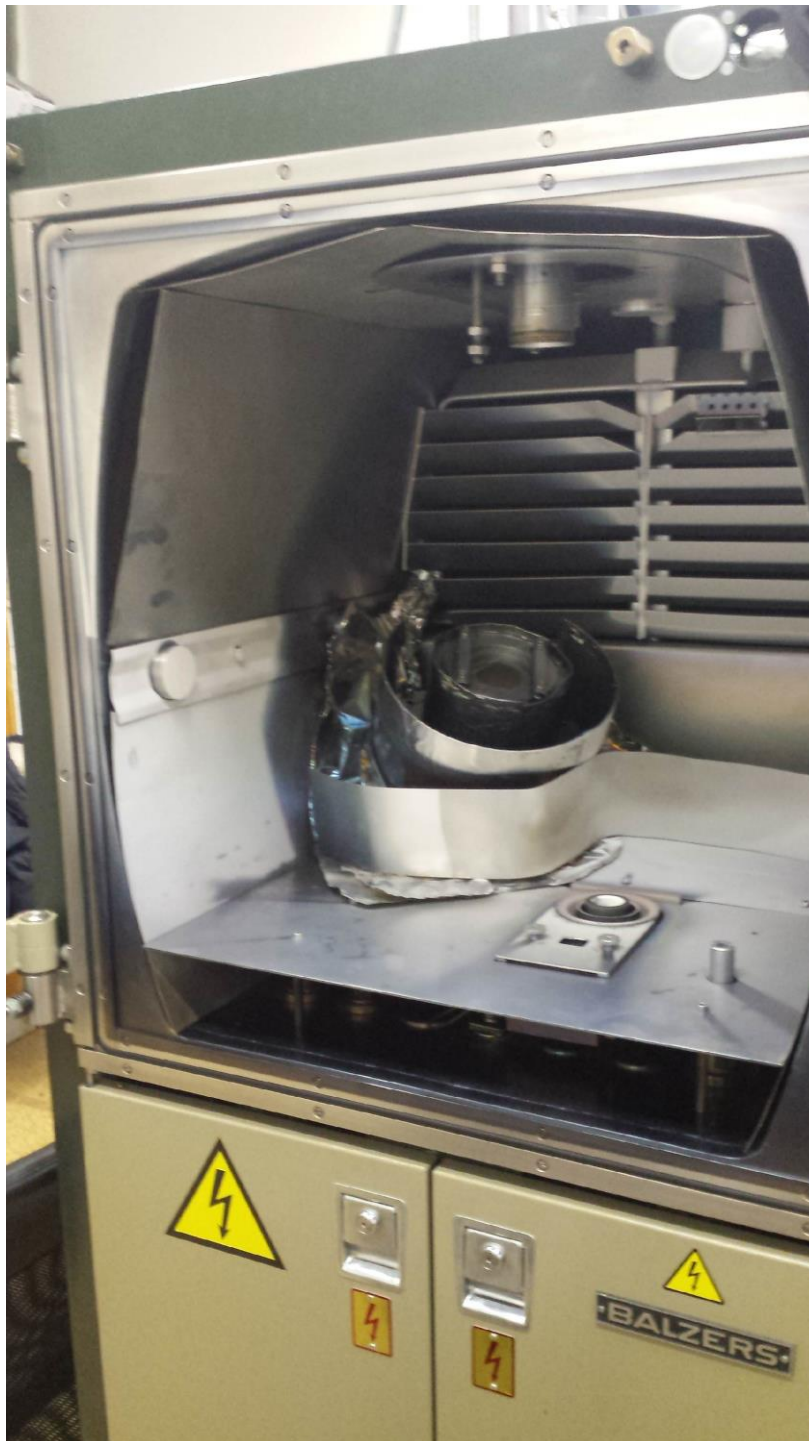
Příloha A

Stimulované rozložení energií dusíkových iontů implantovaných do substrátu z Ti po průletu tenkou uhlíkovou vrstvou 40 nm.



Příloha A: Stimulované rozložení iontů implantovaných do substrátu Ti po průletu tenkou uhlíkovou vrstvou

Příloha B



Příloha B: Vakuová komora přístroje pro modifikaci povrchu. (IBAD)

Příloha C

Uhlíkový materiál, připraven na depozici



Příloha C: Uhlíkový materiál, připraven na napařování.