

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

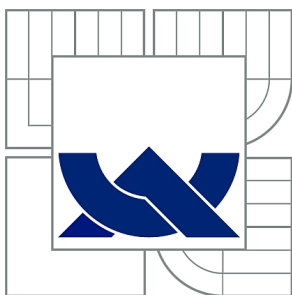
RASTROVACÍ TUNELOVÁ MIKROSKOPIE STM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

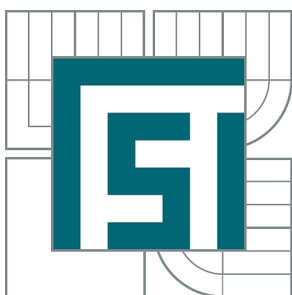
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ MICHELE

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

RASTROVACÍ TUNELOVÁ MIKROSKOPIE STM

SCANNING TUNNELING MICROSCOPY STM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ MICHELE

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. STANISLAV PRŮŠA, Ph.D.

BRNO 2010

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou STM mikroskopie. Byl zprovozněn komerční Nanosurf easyScan2 STM mikroskop a byla vypracována metodika přípravy hrotů pomocí stříhání PtIr drátu a leptání W drátu.

KLÍČOVÁ SLOVA

STM, rastrovací, tunelová, mikroskopie, hrot

ABSTRACT

The work deals with STM microscopy. The commercial Nanosurf easyScan2 STM microscope was activated and methodology of STM tip preparation by PtIr wire cutting and W wire etching was established.

KEYWORDS

STM, scanning, tunneling, microscopy, tip

MICHELE, O.: *Rastrovací tunelová mikroskopie STM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 23s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Stanislav Průša, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Rastrovací tunelová mikroskopie STM“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

Rád bych poděkoval všem kteří se, přímo či nepřímo, podíleli na vzniku této práce. V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Stanislavu Průšovi Ph.D. za cenné rady a vstřícnost při řešení problémů. Také chci poděkovat Ing. Davidu Škodovi za neocenitelnou pomoc při leptání hrotů a prof. RNDr. Petru Dubovi CSc. za pomoc s teoretickou částí práce. Můj velký dík patří mé rodině, za podporu při studiu.

OBSAH

1	Úvod	8
2	Teoretická část	9
2.1	Fyzikální princip STM	9
2.2	Technická realizace STM	11
3	Praktická část	12
3.1	Oživení mikroskopu	12
3.2	Příprava hrotů	12
3.2.1	Štípání hrotů	12
3.2.2	Leptání hrotů	13
3.2.3	Pozorování hrotů v SEM	14
3.3	Měření na STM mikroskopu	15
4	Závěr	21
	Literatura	22
	Výkresy paletky pro pozorování hrotů	23

1 ÚVOD

První STM mikroskop byl sestaven v roce 1981 Heinrichem Rohrerem a Gerdem Binnigem [1]. Jejich původním záměrem bylo provést lokální spektroskopii na oblasti o průměru menším než 100\AA . Tuto myšlenku rozšířili a výsledkem byl rastrovací tunelový mikroskop. Za jeho sestavení získali v roce 1986 Nobelovu cenu za fyziku.

Mým hlavním cílem bylo popsat základní princip STM mikroskopu, ukázat metody přípravy hrotů pro STM mikroskop a oživit STM mikroskop Nanosurf easyScan2. Tento komerční přístroj je využíván při praktické experimentální činnosti studentů bakalářského stupně studia Fyzikálního inženýrství na ÚFI FSI VUT v Brně. Jedním z hlavních parametrů ovlivňujících výsledky měření je kvalita hrotu. Věnoval jsem se přípravě hrotů dvěma různými způsoby a popsal jsem výhody a nevýhody obou metod tak, aby mohly sloužit jako pomůcka při přípravě kvalitních hrotů.

Moji práci jsem rozdělil do několika částí. V první popisuji fyzikální principy, kterých mikroskop využívá, a technické řešení mikroskopu. Dále se věnuji jednotlivým faktorům, které ovlivňují měření. Popisuji způsoby, jak se s nimi vypořádat.

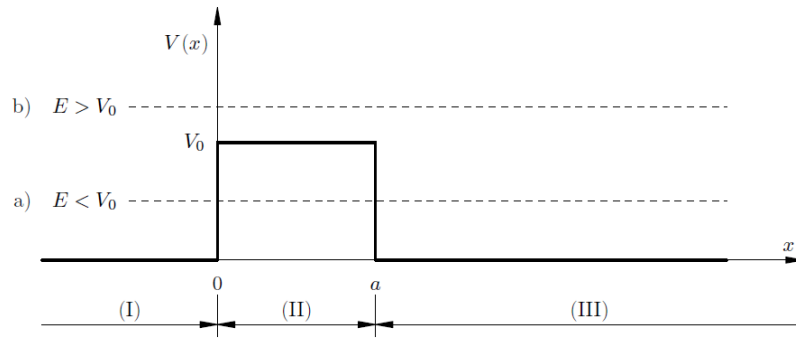
Druhá část pojednává o dvou způsobech přípravy hrotů: štípání a elektrochemické leptání. Popisuji postup, jakým jsem hroty připravoval a diskutuji, jaké výhody dané metody mají. Tato část obsahuje příklady mnou vyrobených hrotů a jejich popis. V závěru kapitoly prezentuji několik obrázků, naměřených STM mikroskopem na kalibrační mřížce.

V závěru práce shrnuji získané poznatky a výsledky.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Fyzikální princip STM

Fyzikální princip, na kterém je STM založen, je tunelový jev. Odvození závislosti tunelovacího proudu na šířce bariéry je provrženo podle [2]. Elektron s energií nižší, než je výška potenciálové bariéry, má jistou pravděpodobnost, že tuto bariéru "překoná". Hustota pravděpodobnosti jeho výskytu za bariérou je nenulová. V modelu přichází elektron zleva na potenciálovou bariéru konečné výšky a má menší energii, než je výška bariéry. Uvažujme jednu dimenzi (obr. 2.1 případ a)). Stacionární



Obr. 2.1: Potenciálová bariéra výšky V_0 a šířky a . Převzato z [2]

Schrödingerova rovnice pro oblasti (I) a (III) má tvar:

$$\frac{d^2 \varphi_{I,III}(x)}{dx^2} + \frac{2mE}{\hbar^2} \varphi_{I,III}(x) = 0 \quad \text{pro } x < 0 \text{ a } x > a \quad (2.1)$$

a pro oblast bariéry je

$$\frac{d^2 \varphi_{I,III}(x)}{dx^2} + \frac{2m(E - V_0)}{\hbar^2} \varphi_{I,III}(x) = 0 \quad \text{pro } 0 < x < a \quad (2.2)$$

V případě STM mikroskopu je $E < V_0$ a obecné řešení Schrödingerovy rovnice (2.1) a (2.2) je

$$\varphi_{(I)}(x) = Ae^{ikx} + Be^{-ikx} \quad \text{pro } x < 0, \quad (2.3)$$

$$\varphi_{(II)}(x) = Ce^{-\alpha x} + De^{\alpha x} \quad \text{pro } 0 < x < a, \quad (2.4)$$

$$\varphi_{(III)}(x) = Fe^{ikx} + Ge^{-ikx} \quad \text{pro } x > a, \quad (2.5)$$

kde

$$k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} > 0 \quad \text{a} \quad \alpha = \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar} > 0. \quad (2.6)$$

Uvažujme částici přicházející zleva. Vpravo od bariéry může být pouze prošlá vlna, proto $G = 0$. Konstanty A, B, C, D, F určíme z podmínek spojitosti funkce $\varphi(x)$ a její první derivace $d\varphi(x)/dx$ v bodech $x = 0$ a $x = a$:

$$\varphi_{(I)}(0) = \varphi_{(II)}(0); \quad \left. \frac{d\varphi_{(I)}(x)}{dx} \right|_{x=0} = \left. \frac{d\varphi_{(II)}(x)}{dx} \right|_{x=0}, \quad (2.7)$$

$$\varphi_{(I)}(a) = \varphi_{(II)}(a); \quad \left. \frac{d\varphi_{(I)}(x)}{dx} \right|_{x=a} = \left. \frac{d\varphi_{(II)}(x)}{dx} \right|_{x=a}, \quad (2.8)$$

Dosazením (2.3, 2.4, 2.5) do těchto podmínek a s využitím $G = 0$ získáme soustavu čtyř rovnic pro konstanty A, B, C, D, F :

$$A + B = C + D, \quad (2.9)$$

$$ik(A - B) = -\alpha(C - D), \quad (2.10)$$

$$Ce^{-\alpha a} + De^{\alpha a} = Fe^{ika}, \quad (2.11)$$

$$-\alpha(Ce^{-\alpha a} - De^{\alpha a}) = ikFe^{ika}. \quad (2.12)$$

Odtud vyjádříme koeficienty B, C, D a F pomocí známé amplitudy A dopadající vlny:

$$B = \frac{A[e^{(ik-\alpha)a}(k - i\alpha)^2 - e^{(ik+\alpha)a}(k^2 + \alpha^2)]}{e^{(ik-\alpha)a}(\alpha^2 - 2ik\alpha + k^2) + e^{(ik+\alpha)a}(\alpha - ik)^2}, \quad (2.13)$$

$$C = \frac{-2kAe^{(ik+\alpha)a}(k - i\alpha)}{e^{(ik-\alpha)a}(\alpha^2 - 2ik\alpha + k^2) + e^{(ik+\alpha)a}(\alpha - ik)^2}, \quad (2.14)$$

$$D = \frac{2kAe^{(ik-\alpha)a}(k - i\alpha)}{e^{(ik-\alpha)a}(\alpha^2 - 2ik\alpha + k^2) + e^{(ik+\alpha)a}(\alpha - ik)^2}, \quad (2.15)$$

$$F = \frac{-4ikA\alpha}{e^{(ik-\alpha)a}(\alpha^2 - 2ik\alpha + k^2) + e^{(ik+\alpha)a}(\alpha - ik)^2}. \quad (2.16)$$

V našem případě je podstatná pravděpodobnost výskytu částice na pravém okraji bariéry v závislosti na její šířce a . Provedeme kvalitativní analýzu $\varphi_{(II)}(a)$ a budeme se zabývat pouze výrazy obsahujícími šířku bariéry a .

$$\varphi_{(II)}(a) = Ce^{-\alpha a} + De^{(\alpha a)} \frac{e^{\alpha a}}{e^{\alpha a}} e^{-\alpha a} + \frac{e^{-\alpha a}}{e^{\alpha a}} e^{\alpha a} = 2e^{-\alpha a} \quad (2.17)$$

Pravděpodobnost výskytu elektronu na konci bariéry v závislosti na a je dána jako $|\varphi_{(II)}(a)|^2$, což po dosazení z 2.17 dává výslednou úměrnost

$$|\varphi_{(II)}(a)|^2 = |e^{-\alpha a}|^2 = e^{-2\alpha a}. \quad (2.18)$$

Tunelový proud je náboj (počet elementárních nábojů - elektronů) prošlý bariérou za jednotku času. Má tedy stejnou závislost na její šířce jako pravděpodobnost výskytu elektronu za bariérou. Tento výsledek lze najít například v [3].

2.2 Technická realizace STM

STM je metodou umožňující vytvořit topografický obraz povrchu v atomárním rozlišení. Zařízení využívá tunelového jevu pro určení vzdálenosti hrotu od povrchu vzorku. Vzorky pro STM musí být vodivé, s malými nerovnostmi. Mikroskop rastruje nad povrchem velmi ostrým vodivým hrotem ve vzdálenosti řádu Å a pomocí tunelového proudu určuje vzdálenost od povrchu. Většina mikroskopů může pracovat ve dvou módech: mód konstantní výšky a mód konstantního proudu. V módu konstantního proudu, (constant current mode) je hrot udržován pomocí elektrické zpětné vazby v konstantní výšce nad povrchem vzorku. Topografie povrchu je poté rekonstruována z polohy hrotu ve všech třech osách. V módu konstantní výšky rastruje hrot nad povrchem vzorku v jedné výšce, osa z zůstává fixována. Topografie je rekonstruována z x -ové a y -ové polohy hrotu, z -ová souřadnice je přepočítána z tunelovacího proudu. Výhodou módu konstantního proudu je jeho větší rozsah v ose z a podstatně menší nebezpečí nabourání do vzorku během měření, nevýhodou je složitější nastavení a nižší rastrovací rychlost. Mód konstantní výšky je velmi náchylný na nerovnosti povrchu, je zde nebezpečí naražení a navíc, vzhledem k exponenciálnímu poklesu tunelovacího proudu se šířkou bariéry, má velmi malý rozsah v ose z . Jeho výhodou je podstatně vyšší rastrovací rychlost, čímž je vhodnější pro měření v atomárním rozlišení [1]. Vzhledem k minimálním rozměrům nejmenších pozorovatelných objektů je třeba zajistit velmi jemné polohování hrotu. Posuv hrotu zajišťuje piezokeramika, která dokáže realizovat posuv v řádu ($10^{-11} - 10^{-12}$)m. Její nevýhodou je nelineární chování a možnost "přestřelit" rozsah při vysokých rastrovacích rychlostech. Výhodou je možnost přímého elektronického ovládání. Aby bylo možné pozorovat velmi malé objekty, tedy i atomy, je třeba velmi ostrých hrotů. V ideálním případě by se interakce se vzorkem měl účastnit pouze jeden atom na vrcholu hrotu. Hrotům pro STM mikroskopy se věnuji v praktické části práce. Vzhledem k tomu, že hrot rastruje řádově 10 Å nad povrchem a vzhledem k rozlišením, kterých je možné dosáhnout, jsou jedním z největších problémů vibrace. Jejich odtlumení je řešeno většinou kombinací mechanického a magnetického tlumení. Při atomárním rozlišení je třeba brát v úvahu i teplotní drift atomů. Změna teploty o 0,1°C způsobuje změnu délky kovového držáku vzorku v řádu desítek nm [4]. Pro lepší výsledky je vhodné provádět měření ve vakuu, ale velmi dobrých výsledků je možné dosáhnout i v atmosféře.

3 PRAKTICKÁ ČÁST

V této části popíši postup při vlastním oživení STM mikroskopu Nanosurf easyScan2, jeho základní funkce a parametry. Dále zde uvádím dva různé postupy, které jsem použil při přípravě hrotů pro mikroskop. Diskutuji také výhody a nevýhody jednotlivých postupů a popisuji kvalitu vyrobených hrotů.

3.1 Oživení mikroskopu

Prvním úkolem praktické části bylo zprovoznit STM mikroskop. Vlastní oživení mikroskopu proběhlo bez problémů podle manuálu [4]. Podstatně větší problémy se vyskytly při nastavování parametrů měření. Mikroskop sice byl schopen pořizovat obrázky, ale bylo velmi problematické přiblížit se hrotem ke vzorku. V této fázi jsem používal pouze štípané PtIr hroty. Problém s přibližováním hrotu se podařilo částečně odstranit důkladným vyčištěním mikroskopu, vzorku a příslušenství. Během testování leptaných hrotů bylo problematické jak přiblížení, tak vlastní měření. Toto pravděpodobně souviselo s nastavením kontrolní smyčky mikroskopu a poškozením kalibrační mřížky. Vlastnímu měření na mikroskopu se budu věnovat v kapitole 3.3.

3.2 Příprava hrotů

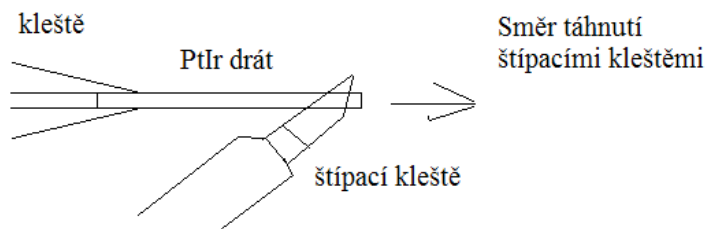
V rámci méjí bakalářské práce jsem vyráběl hroty pro STM mikroskop dvěma způsoby. Prvním bylo štípání PtIr drátu o průměru 0,25mm. Tento způsob je popsán v manuálu mikroskopu Nanosurf easyScan2. Druhou použitou metodou bylo elektrochemické leptání wolframového drátu.

3.2.1 Štípání hrotů

Příprava hrotů pro STM mikroskop štípáním drátu je velmi jednoduchou metodou, kterou lze připravit kvalitní hroty, schopné pořizovat topografické obrázky povrchu v atomárním rozlišení [4]. Hlavními výhodami tohoto postupu jsou jeho nenáročnost na vybavení a rychlost přípravy hrotu. Nevýhodou je, že parametry hrotů takto vyrobených se značně liší a nelze příliš předpovědět jejich kvalitu, postup nedává konzistentní výsledky. Dalším problémem je tvar hrotu jako celku. Při stříhání hrotů je možno dosáhnout velmi ostrého konce, nelze však kontrolovat celkový tvar hrotu. Je zde proto nebezpečí, že hrot bude mít příliš tupý úhel a bude tak na některých místech vzorku při měření docházet k výskytu artefaktů. Podobným problémem může být vytvoření dvou či více rovnocenných hrotů na jednom drátu, což opět vede k výskytu artefaktů a deformaci výsledného obrazu. Může se také stát, že

hrotem bude příliš tenký a dlouhý otřep, který může během měření začít oscilovat a tím znemožnit měření.

Přípravu hrotu touto metodou nejlépe vystihuje následující obrázek (3.1) Pouhé



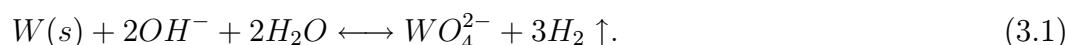
Obr. 3.1: Postup při štípání hrotu.

uštípnutí drátu zpravidla nevede k dobrým výsledkům. Optimální je naštípnout drát zhruba do poloviny průřezu, a poté jej utrhnout, spíše než uštípnout. Tímto postupem dojde k vytvoření jednoho či více velmi ostrých otřepů na konci drátu. Nejdelší poté slouží jako skenovací hrot. Několik příkladů štípaných hrotů je na obrázku(3.2). Obrázek a) ukazuje nepovedený hrot. Při jeho utržení pravděpodobně nedošlo k ideálnímu kluzu a hrot je tak v podstatě nepoužitelný. Na obrázku b) je dobrý hrot, má optimální celkový tvar, je velmi ostrý a nejsou zde žádné vedlejší výčnělky, které by mohly při měření působit potíže. Na obrázku c) je vidět hrot s jedním velmi ostrým a tenkým otřepem. Toto je případ hrotu, který by se mohl zdát díky úzkému tvaru a velmi ostré špičce jako ideální pro měření ve velkém rozlišení. Pro tato měření je však třeba, například z důvodu omezení teplotního driftu, zvolit vyšší rastrovací rychlost, což zvyšuje nebezpečí vzniku oscilací u takto úzkého a dlouhého hrotu. Na obrázku d) je vidět poměrně kvalitní hrot, ale vzhledem k vedlejšímu hrotu je zde nebezpečí tvorby artefaktů, tunelování může probíhat přes oba hroty a tím zkreslovat měření.

3.2.2 Leptání hrotů

Druhá metoda, kterou jsem použil pro výrobu hrotů pro STM mikroskop je elektrochemické leptání. V mém případě se konkrétně jednalo o takzvanou konvenční statickou metodu. Při leptání hrotů jsem čerpal informace z [5] a [6].

Wolframový drát o průměru 0,25mm jsem leptal ve 2 molárním vodném roztoku KOH při napětí 1,5V-5V. Chemická reakce je popsána rovnicí



Kolmo uštipnutý drát jsem ponořil do roztoku KOH a nastavil napětí na 5V. Leptací proud nesmí překročit 15mA, k této hodnotě se blíží na počátku leptání, v dalším průběhu se pohybuje zpravidla pod hodnotou 3mA [5]. Při tomto napětí jsem leptal drát až byla odleptána zhruba polovina jeho průměru. Poté jsem napětí snížil na 2,5V, čímž jsem snížil rychlost leptání. Při tomto napětí jsem hrot leptal do doby, než se na jeho konci vytvořila kapička. Tuto jsem doleptával při napětí 1,5V. Ve chvíli, kdy kapka na konci hrotu odpadla jsem leptání ukončil vypnutím zdroje a drát z roztoku vyjmul. Následně jsem odstříhl konec drátu s hrotem a omyl jej destilovanou vodou [5]. Při odpadnutí kapky dojde ke smyku atomových rovin a vytvoření velmi ostré špičky, poloměr křivosti je řádově (10-1000)nm.

Hloubka ponoření hrotu do roztoku odpovídala zhruba dvěma průměrům drátu. Při menším ponoření byla kapka na konci drátu příliš malá, aby bylo možno postřehnout její odpadnutí, popřípadě se vůbec nevytvořila a došlo k přeleptání hrotu. Při větším ponoření byla kapka příliš velká a hrot nebyl dostatečně ostrý, popřípadě odpadla část hrotu, ale vlastní kapka zůstává na hrotu a tento je nepoužitelný. Zkoušel jsem také různě měnit nastavení napětí během leptání, ale hodnoty převzaté z [5] se ukázaly jako nejlepší, pouze při doleptávání kapičky jsem ke konci používal menšího napětí, aby nedošlo k přeleptání.

Na obrázku 3.3 jsou příklady leptaných wolframových hrotů. Na obrázku a) je přeleptaný hrot. Tento hrot byl na začátku příliš málo ponořen a kapka na konci hrotu byla příliš malá, nebo se vůbec nevytvořila. Proto nebylo možné ukončit leptání ve správnou chvíli a hrot je tupý s širokým koncem. Na obrázku b) je vidět hrot, který byl na začátku leptání příliš ponořen. Během leptání z jeho špičky odpadl odleptaný kousek, který ale nebyla ta kapka, jejíž odpadnutí tvoří špičku hrotu. Tato zůstala nedoleptána. Ačkoli hrot má na svém konci poměrně ostrou špičku, je velmi dlouhý a úzký. Je proto nepoužitelný ze stejných důvodů, jako hrot stříhaný na obrázku 3.2 c). Obrázky c) a d) jsou příkladem ideálního hrotu. Jedná se o jeden hrot zobrazený ve dvou různých zvětšeních. Celkově má hrot velmi strmý tvar, což je dobré pro jeho stabilitu, a jeho špička je velmi ostrá, poloměr hrotu je přibližně 30nm.

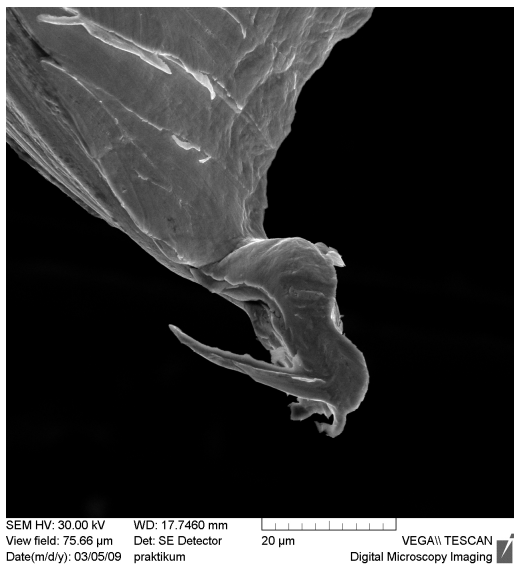
3.2.3 Pozorování hrotů v SEM

Každý hrot, který jsem vytvořil, jsem pozoroval v elektronovém mikroskopu. Sledoval jsem, jak způsob jeho přípravy ovlivňuje jeho kvalitu. Porovnával jsem parametry leptaných a stříhaných hrotů a rozdíl mezi hroty připravovanými stejnou metodou. Zkoumal jsem například vliv různé rychlosti leptání na hrot nebo vliv způsobu ustřižení.

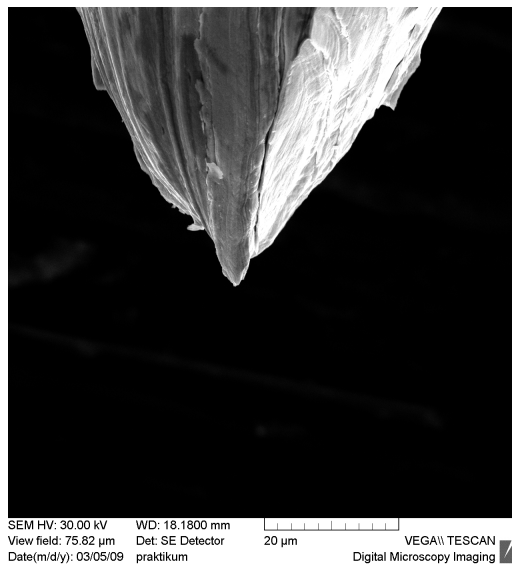
Při měření hrotů během zprovoznování mikroskopu jsem používal standartní paletku pro mikroskop a hroty na ni pokládal. Toto mělo však za následek poškození několika hrotů. Pro další měření hrotů, zejména leptaných, jsem navrhnul jednoduchou paletku vycházející z klasické. Je navržena tak, aby se do ní dal hrot jednoduše upnout (obr 3.4). Navržená paletka je z duralu, její výkresová dokumentace je v příloze. Paletka výrazně usnadnila manipulaci s hroty při měření v SEM mikroskopu a minimalizovala riziko poškození hrotů.

3.3 Měření na STM mikroskopu

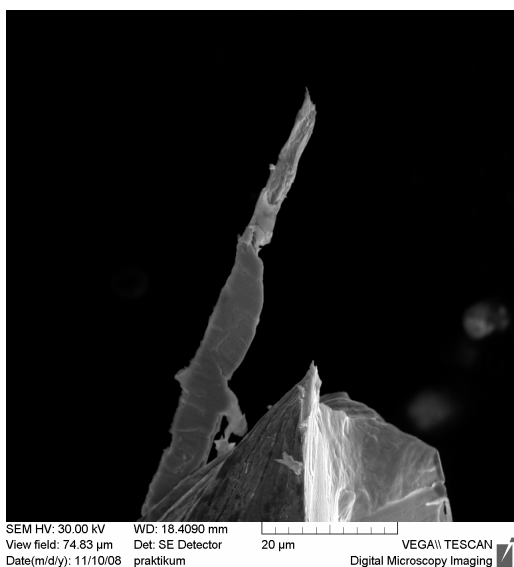
Poslední částí mojí bakalářské práce bylo měření na STM mikroskopu. Cílem bylo otestovat připravené hroty. Tato část se ukázala jako nejobtížnější. Tovární nastavení mikroskopu a řídicí smyčky bylo optimalizováno pro PtIr hroty a i pro tyto nefungovalo spolehlivě. U leptaných hrotů jsem dosahoval mnohdy lepších výsledků u hrotů s tupějším koncem. Mikroskop navíc hlásil náraz hrotu do vzorku, i když po kontrole v SEM mikroskopu jsem nezjistil žádné poškození. Kromě nastavení parametrů mikroskopu se jako další příčina potíží s přibližováním ukázala čistota držáku vzorku a také vzorku samotného. Jako vzorek jsem používal kalibrační mřížku s periodou $160 \times 160 \text{ nm}^2$. Byl to jediný vzorek, u kterého se mi podařilo udělat obrázek topografie povrchu. Při měření jsem používal pouze mód s konstantním proudem, nepodařilo se mi pořídit obraz topografie v módu konstantní výšky. Oblast vzorku, ve které obvykle mikroskop provede přiblížení byla po několika nárazech hrotu značně poškozena. Mikroskop poté často při přiblížení narazil na poškozenou oblast a měření se nezdařilo. Znečištění povrchu vzorku tyto nesnáze ještě umocňovalo. Na obrázku (3.5) jsou vidět některé skeny z STM mikroskopu. Na obr. a) je obrázek v základním přiblížení pořízený leptaným hrotem. Je zde patrné, že hrot nebyl příliš kvalitní, mřížka je zkreslená. Na obr. b) je obrázek pořízený kvalitnějším leptaným hrotem, při větším přiblížení. Obrázky c) a d) jsou pořízeny stříhanými hroty. obr. c) je jeden z prvních snímků, který se mi podařilo získat. Obrázek d) je pořízen kvalitním ustříhnutým hrotem. Na závěr jsem změřil uhlíkovou mřížku SEM mikroskopem, abych měl představu, jak vypadá změřená overenou metodou a jaký je rozsah jejího poškození a znečištění obr. (3.6). Na obrázku c) je mřížka ve velkém přiblížení. Na obr. a) jsou nečistoty usazené na povrchu vzorku. obr. b) ukazuje díru po silném nárazu hrotu. Na obr. d) je vidět rýha po hrotu, který narazil do vzorku během rastrování.



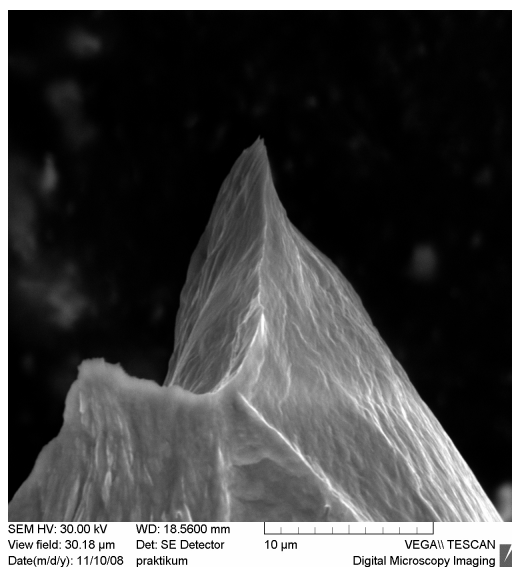
(a)



(b)

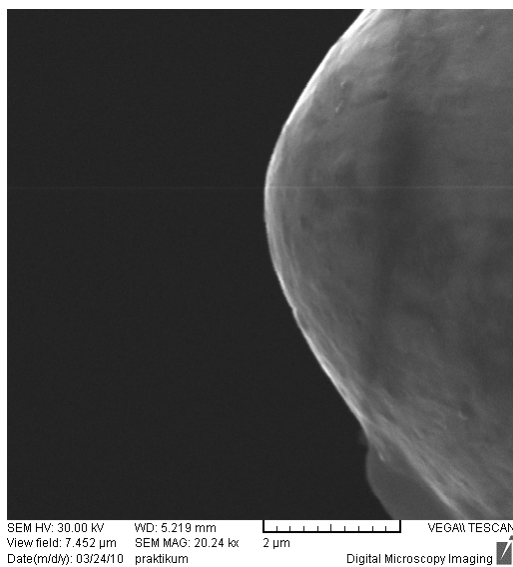


(c)

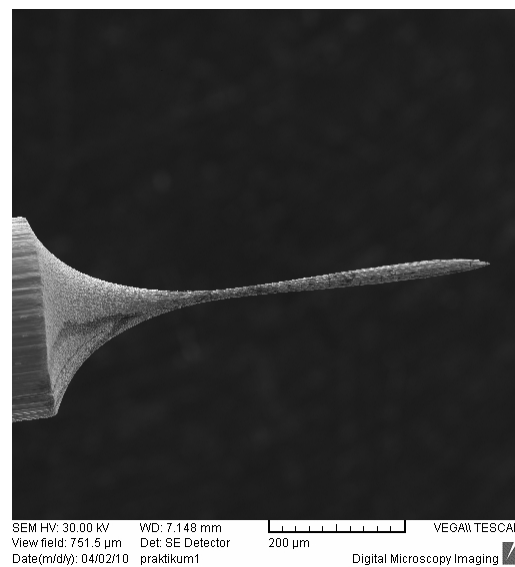


(d)

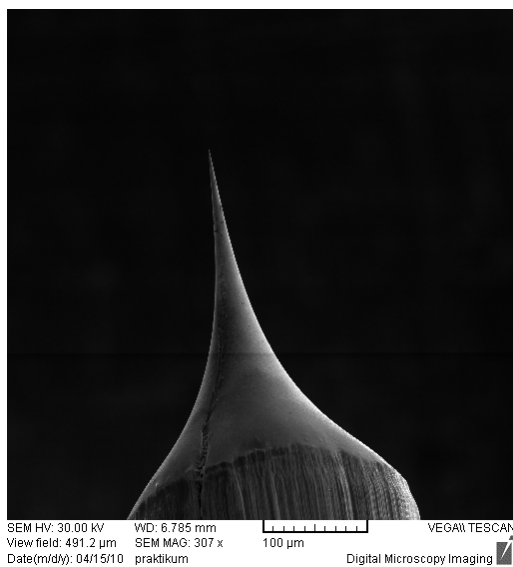
Obr. 3.2: Stříhané PtIr hroty pozorované rastrovacím elektronovým mikroskopem VEGA TESCAN. Na obr. a) je nepovedený hrot, na obr. b) je dobrý hrot, na obr. c) je hrot s příliš velkým otřepem a na obr d) je dvojhrot.



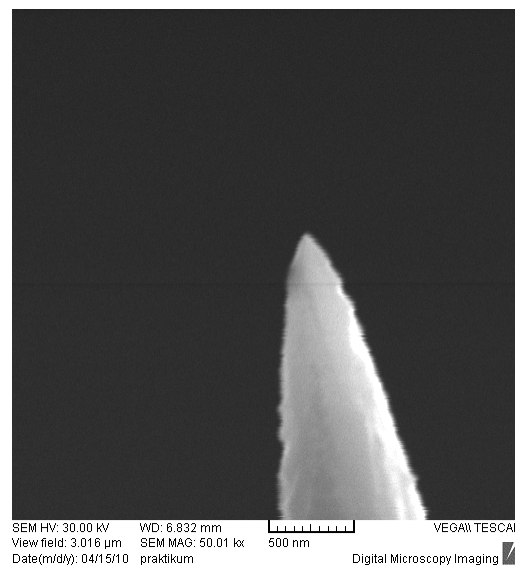
(a)



(b)

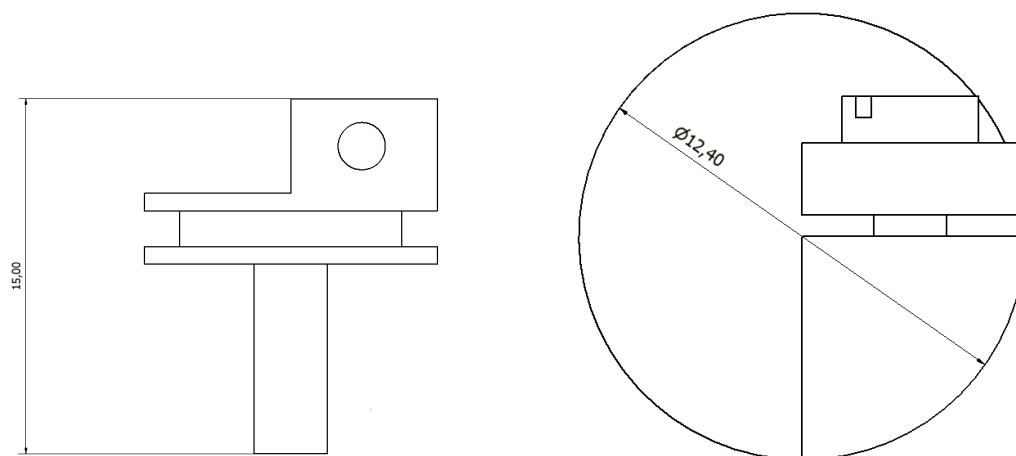


(c)

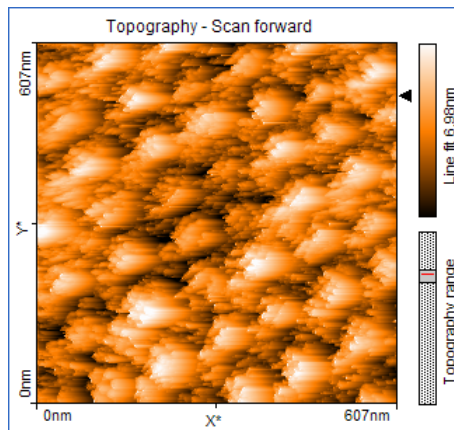


(d)

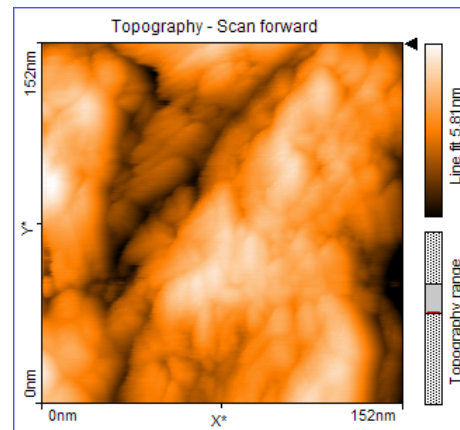
Obr. 3.3: Leptané W hroty pozorované rastrovacím elektronovým mikroskopem VEGA TESCANA. Na obr. a) je konec přeleptaného hrotu, na obr. b) je celkový pohled na nedoleptaný hrot se zřetelnou kapkou na konci, která měla být odleptána. Na obr. c) je celkový pohled na dobrý leptaný hrot a na obr. d) je detail konce hrotu na obr. c).



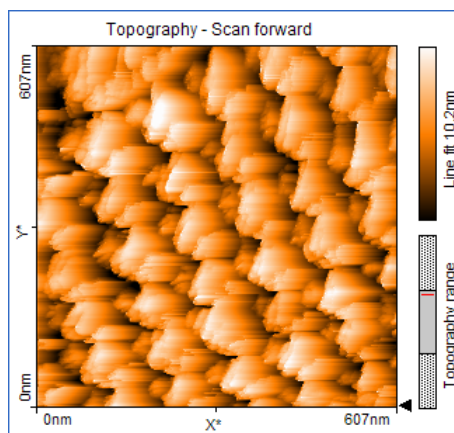
Obr. 3.4: Paletka pro pozorování hrotů v SEM, pohled z boku a shora. Rozměry udány v milimetrech.



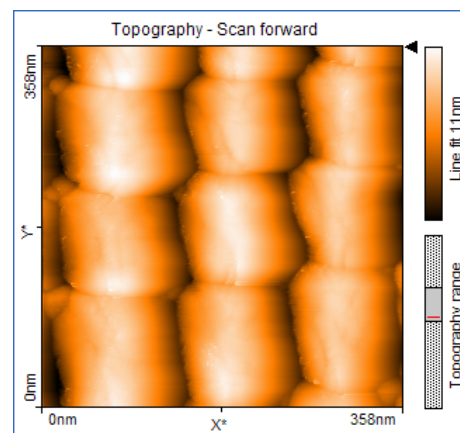
(a)



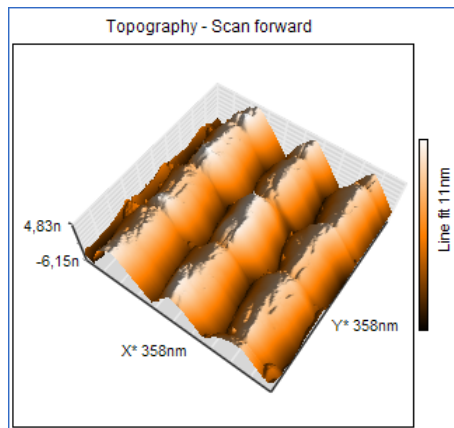
(b)



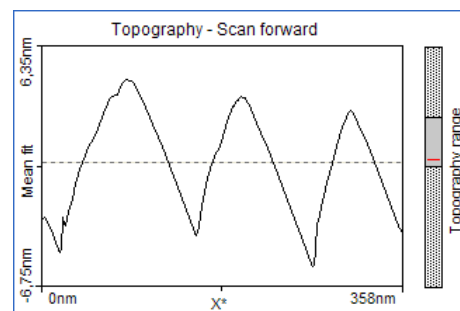
(c)



(d)

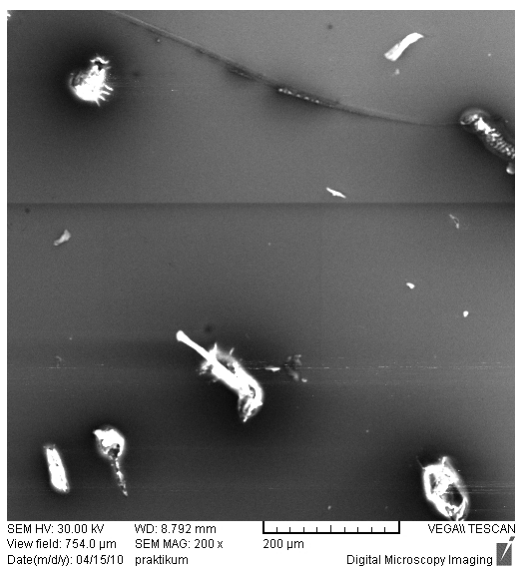


(e)

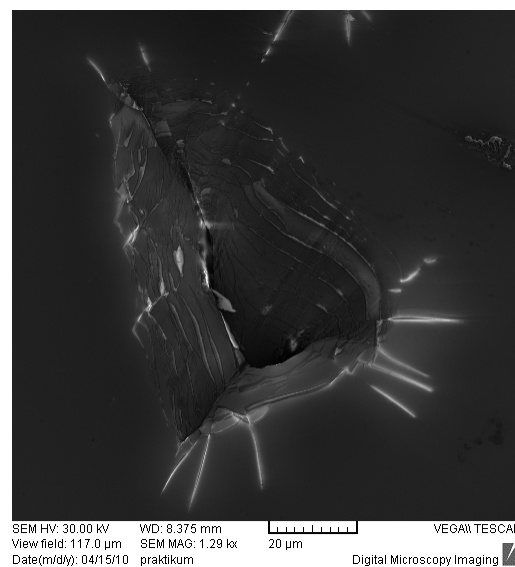


(f)

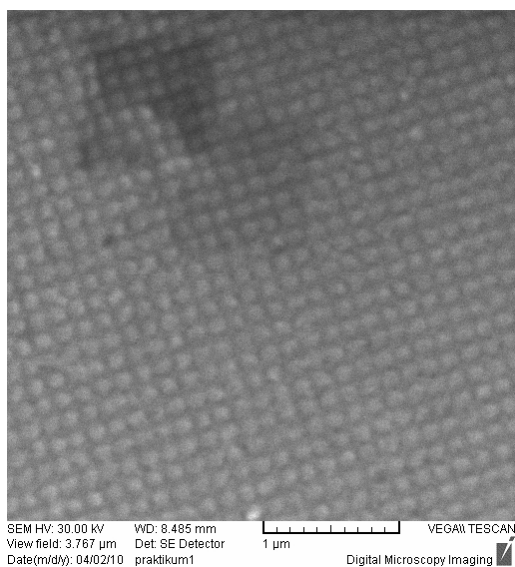
Obr. 3.5: Scany z STM. Obrázky a) a b) ukazují výsledky s leptaným hrotem, obrázky c) a d) s hrotem stříhaným. Na obrázku e) je 3D vizualizace obr. d) a na obr. f) je vidět graf průběhu rastrování v jednom řádku. Na všech obrázcích je měřeným vzorkem kalibrační mřížka, předpětí (tip voltage) je 50mV, všechny skeny jsou provedeny v módu konstantní výšky.



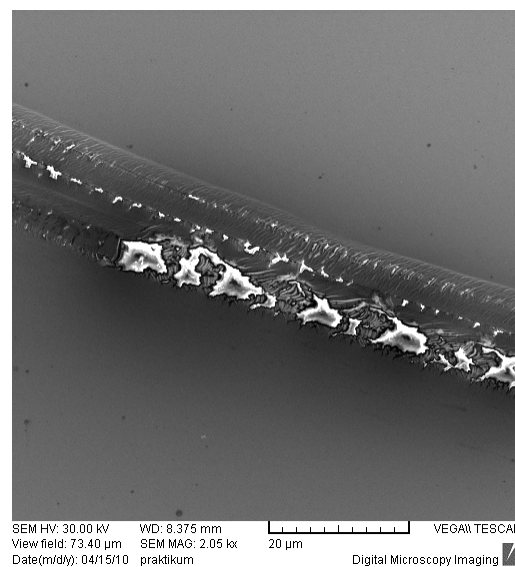
(a)



(b)



(c)



(d)

Obr. 3.6: Uhlíková mřížka snímaná rastrovacím elektronovým mikroskopem VEGA TESCAN. Na obr. a) jsou prachové částice usazené na povrchu mřížky, na obr. b) je stopa po nárazu hrotu do mřížky, na obr. c) je nepoškozená část mřížky ve velkém přiblížení a na obr. d) je stopa po hrotu, který narazil do povrchu během rastrování.

4 ZÁVĚR

V práci jsem se zabýval STM mikroskopií a přípravou hrotů pro STM mikroskop.

V teoretické části práce jsem popsal fyzikální princip, na kterém je STM mikroskop založen. Popsal jsem problém tunelování elektronu přes potenciálovou bariéru konečné výšky a ukázal jsem, proč tunelový proud exponenciálně klesá se vzdáleností od vzorku.

Ve druhé části jsem se zabýval problematikou oživení komerčního STM mikroskopu a popsal jsem dva způsoby přípravy hrotů pro tento mikroskop. Rozebral jsem výhody a nevýhody obou postupů a popsal několik vyrobených hrotů, jejich kvalitu a zdůvodnil jejich vhodnost či nevhodnost pro použití v mikroskopu. Také jsem zde ukázal několik výstupů ze samotného STM mikroskopu.

LITERATURA

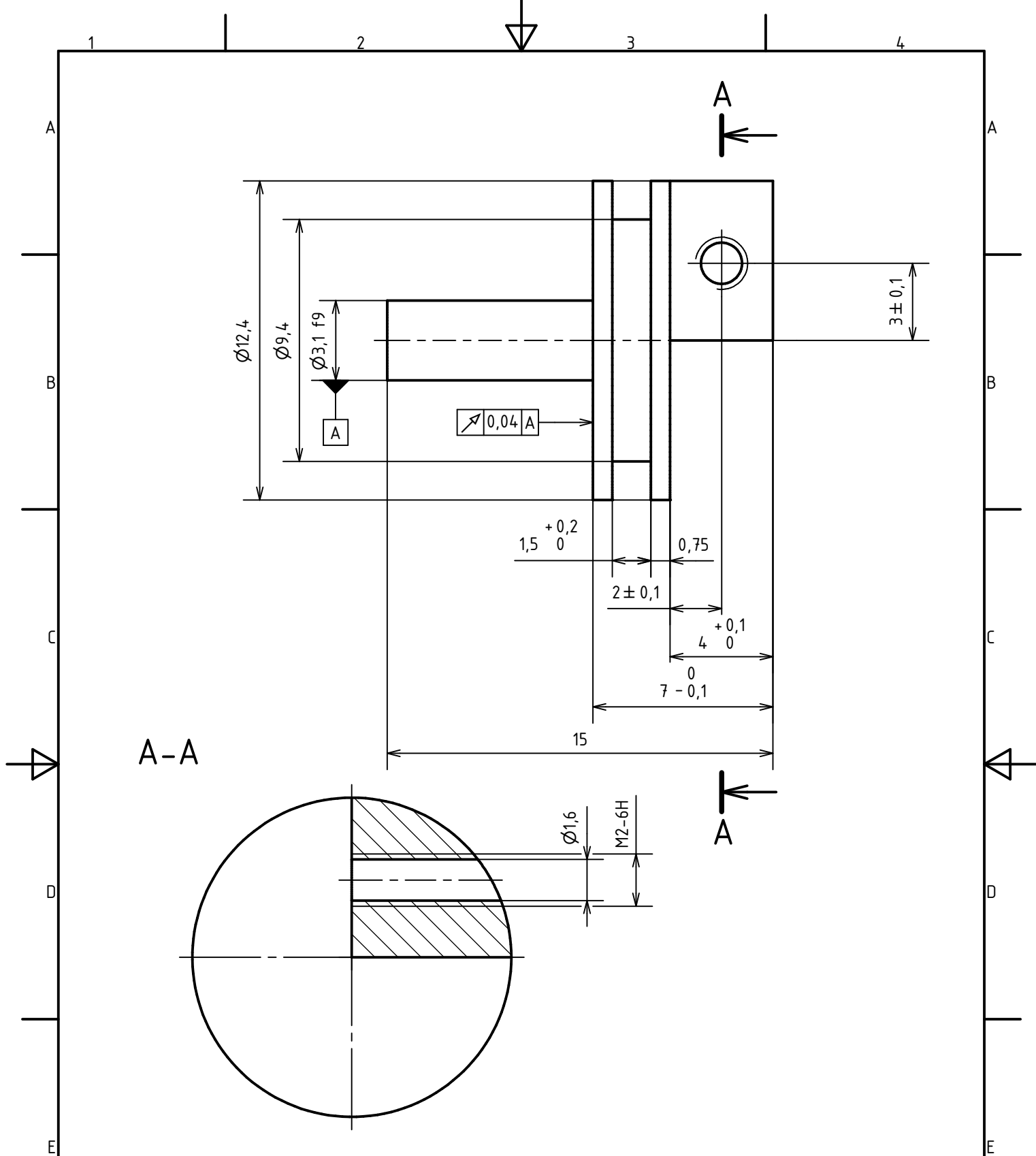
Seznam citovaných zdrojů

- [1] MEYER, E.; HUG, H. J.; BENEWITZ, R.: *Scanning Probe Microscopy*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004.
- [2] DUB, P.; SPOUSTA, J.; ZLÁMAL, J.: *Kvantová mechanik*,. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav Fyzikálního inženýrství. 2005.
- [3] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.: *Fyzika*. Vysoké učení technické v Brně – Nakladatelství VUTIUM a PROMETHEUS Praha, 2006. s. 1047.
- [4] NANOSURF AG: *easyScan Operating instructions v 1.6*, SWITZERLAND, 2007.
- [5] ŠKODA, D.: *Vývoj a testování UHV-kompatibilního mikroskopu AFM/STM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2001. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
- [6] SHÁNĚL, O.: *Vývoj a aplikace metod zařízení pro studium lokálních vlastností nanostruktur*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.

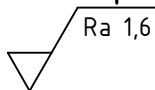
Seznam dalších použitých zdrojů, které nejsou v textu odkazovány

- [7] REIMER, L.: *Scanning Electron Microscopy*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokio, 1985.

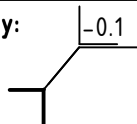
VÝKRESY PALETKY PRO POZOROVÁNÍ HROTŮ



Struktura povrchu:



Hrany:



Měřítko

5:1

Přesnost

ISO 2768-mK

Tolerování

ISO 8015

Promítání



Materiál EN AW-2030 T3

Polotovár $\varnothing 14-20$ ČSN EN 754-1

Hmotnost 0,002 kg

Druh dokumentu VÝKRES SOUČÁSTI

Kreslil ONDŘEJ MICHELE

Schválil

Datum vydání 20.3.2010

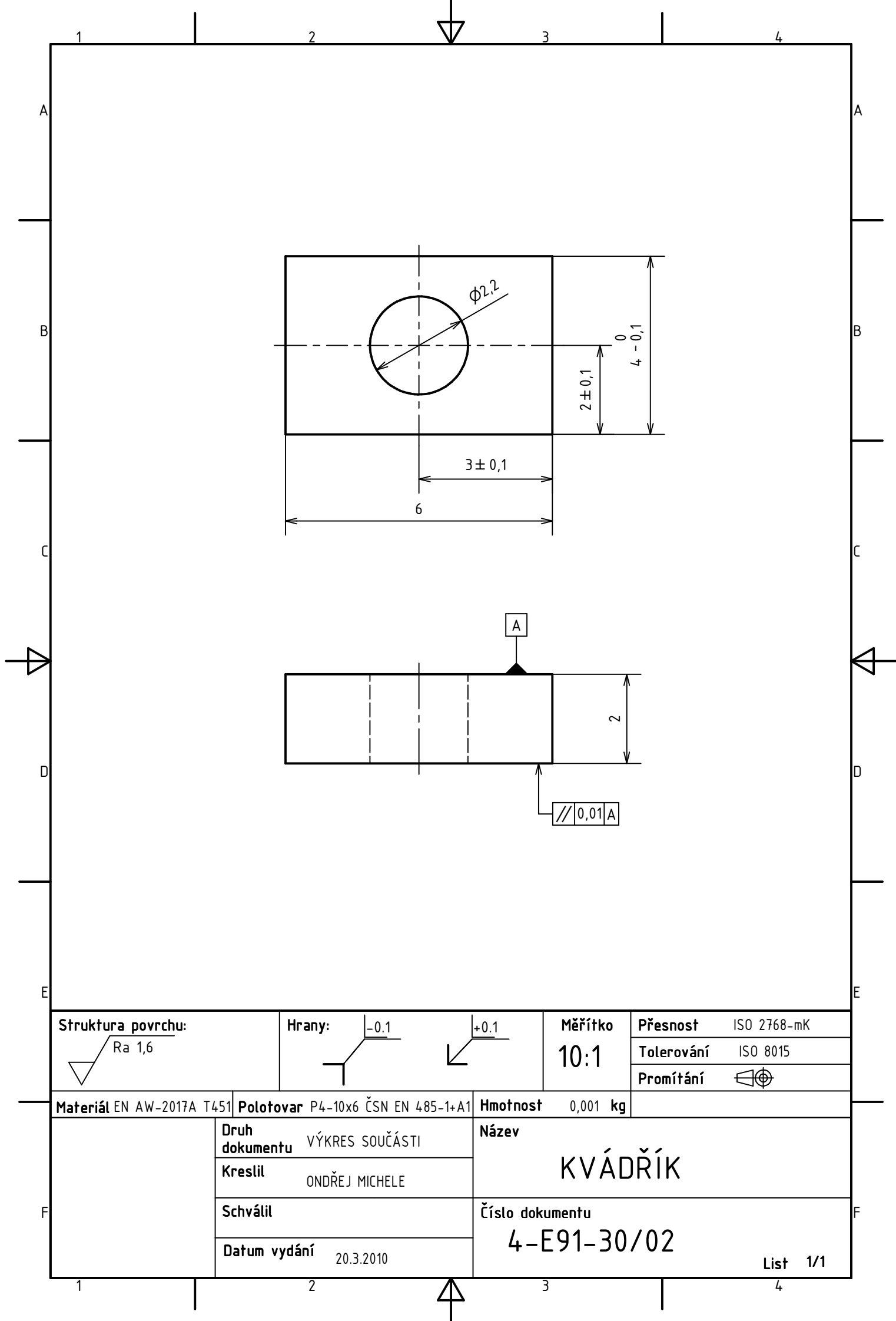
Název

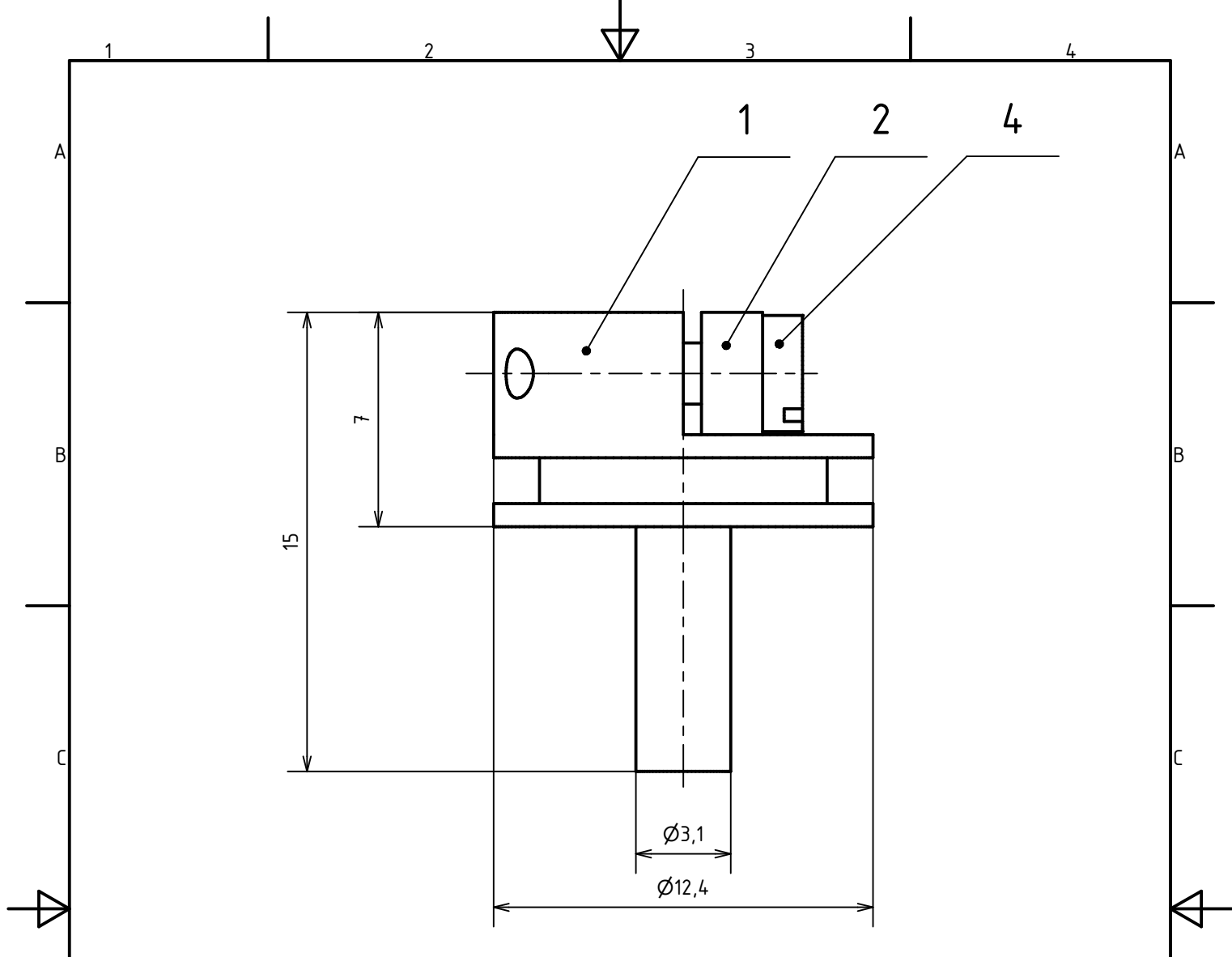
TĚLO PALETKY

Číslo dokumentu


4-E91-30/01

List 1/1





4	ŠROUB M2x7		0,001	kg	1
	ČSN EN ISO 1207				
3					
2	KVÁDŘÍK	P4-10x6 ČSN EN 485-1+A1	0,001	kg	1
	4-E91-30/02	EN AW-2017A T451			
1	TĚLO PALETKY	Ø14-20 ČSN EN 754-1	0,002	kg	1
	4-E91-30/01	EN AW-2030 T3			
Číslo polož.	Název - označení	Polotovár	Hmot.	J	Množ.
	Výkres - norma	Materiál			

Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko 5:1	Přesnost
					Tolerování
					Promítání 
Materiál	Polotovár		Hmotnost	0,004 kg	
	Druh dokumentu VÝKRES SESTAVY		Název PALETKA		
	Kreslil ONDŘEJ MICHELE				
	Schválil		Číslo dokumentu 4-E91-30/00		
	Datum vydání 20.3.2010				
					List 1/1