



Zvlákňovací elektroda pro výrobu směsového nanovláknenného materiálu

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Jiří Souček**
Vedoucí práce: Ing. Jan Valtera, Ph.D.





Spinning electrode for production of mixed nanofiber material

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering
Author: **Jiří Souček**
Supervisor: Ing. Jan Valtera, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří Souček**

Osobní číslo: **S14000160**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojní inženýrství**

Název tématu: **Zvlákňovací elektroda pro výrobu směsového nanovláknenného materiálu**

Zadávací katedra: **Katedra textilních a jednoúčelových strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte rešerši známých způsobů výroby nanovláken.
2. Proveďte analýzu elektrostatického pole zvlákňovací elektrody pro výrobu bi-komponentního nanovláknenného materiálu.
3. Navrhněte a konstrukčně zpracujte upnutí elektrody do zkušebního zvlákňovacího zařízení.
4. Experimentálně ověřte funkčnost navržené elektrody při zvlákňovacím procesu a výsledky zhodnoťte.

Rozsah grafických prací: výkresová dokumentace

Rozsah pracovní zprávy: 30 stran formát A4

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

[1] BAŤKA, Ondřej. *Zařízení na výrobu jádrové příze*. Liberec, 2015. Diplomová práce, Technická Univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra textilních a jednoúčelových strojů.

[2] MIHÁLIK, Matěj. *Analýza a optimalizace zvlákňovací hlavy*. Liberec, 2013. Bakalářská práce. Technická Univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra textilních a jednoúčelových strojů.

[3] Manuál komerčního softwaru Autodesk Multiphysics Simulation.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Valtera, Ph.D.

Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Martin Bílek, Ph.D.

Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Datum zadání bakalářské práce: 10. listopadu 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 4. července 2017

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. března 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Janu Valterovi, Ph.D. za vedení této bakalářské práce, cenné rady, věcné připomínky a pomoc s přípravou experimentů. Dále bych chtěl poděkovat celé katedře KST za pomoc při všech otázkách a také za možnost pracovat na tomto jedinečném projektu. Poté bych chtěl poděkovat katedře KNT za pomoc při experimentech a analýze vzorků. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a své partnerce za podporu a trpělivost.

Abstrakt

Tato bakalářská se zabývá konstrukcí nového druhu elektrody pro výrobu směšového nanovláknenného materiálu, užitím technologie zvlákňování pomocí střídavého elektrického napětí, neboli AC elektrosponingu. V rámci práce byla vypracována rešerše známých způsobů výroby nanovláknenných materiálů. Následně byl zpracován konstrukční návrh nového druhu elektrody. V průběhu návrhu byly zpracovány analýzy elektrického pole v programu Autodesk Simulation Mechanical 2015. Analýzy byly zaměřeny především na rozložení elektrické intenzity ve zvlákňovací oblasti, což je jeden z hlavních parametrů elektrod. Dále bylo provedeno konstrukční zpracování upínacího přípravku elektrody, který umožňuje zvlákňování dvou různých polymerních roztoků současně. Funkčnost navržené elektrody byla laboratorně testována při zvlákňovacím procesu a vytvořený nanovláknenný materiál byl podroben analýze pomocí elektronové mikroskopie.

Klíčová slova: elektrické pole, intenzita, nanovláknna, AC elektrosponing, zvlákňovací elektroda

Abstact

This bachelor's thesis deals with construction of a new type of electrode for production of mixed nanofiber material by AC electrospinning. Background research was realized in course of this thesis. Subsequently the design of this new type of electrode was processed. During the designing process analyses of electric field were carried out in software Autodesk Simulation Mechanical 2015. These analyses of electric field were focused on distribution of electric intensity in the spinning area, which is one of the main parameters of spinning electrodes. Furthermore a fixing device of the electrode was designed, which allows spinning of two different polymer solutions simultaneously. Functionality of designed electrode was tested in laboratory during spinning process and fabricated nanofibrous material was analyzed by electron microscopy.

Key words: electric field, intensity, nanofibers, AC electrospinning, spinning electrode.

Obsah

1.	Úvod.....	10
2.	Technologie výroby nanovláken	11
2.1.	Electrospinning	11
2.2.	Dloužení (Drawing)	11
2.3.	Fázová separace (Phase-separation)	11
2.4.	Samooorganizování (Self-assembly)	12
2.5.	Template synthesis.....	12
2.6.	Foukání taveniny (Melt-blowing).....	12
2.7.	Forcespinning.....	13
3.	Fyzikální principy electrospinningu.....	14
4.	DC electrospinning	15
4.1.	Elektrody pro DC electrospinning.....	16
4.1.1.	Trysková elektroda.....	16
4.1.2.	Válečková elektroda.....	17
4.1.3.	Kotoučová elektroda	18
4.1.4.	Drátková elektroda	18
5.	AC electrospinning	18
5.1.	Elektrody pro AC electrospinning.....	19
5.1.1.	Kuželová elektroda.....	20
5.1.2.	Kuželová elektroda s rezervoárem	20
5.1.3.	Kulová elektroda	21
6.	Způsoby výroby kompozitních nanovláken	21
6.1.	Zvlákňování směsí	21
6.2.	Zvlákňování pomocí dvou elektrod	22
6.3.	Zvlákňování ze dvou vrstev roztoků.....	22
7.	Návrh nového druhu elektrody.....	23
7.1.	Tok polymerních roztoků elektrodou	24
7.2.	Návrh uložení elektrody.....	25

7.3.	Středění	27
7.4.	Korónový prstenec a kryt.....	28
7.5.	Návrh zvlákňovací oblasti	28
8.	Analýzy elektrického pole.....	30
8.1.	Srovnání okrajových podmínek	33
9.	Testy funkčnosti	34
9.1.	Měření korokamerou.....	34
9.2.	Prověřování toku polymerních roztoků	35
9.3.	Testy zvlákňovacího procesu.....	35
9.4.	Měření kritických napětí	36
10.	Ověření matematických modelů	37
10.1.	Tvorba polymerních hladin v modelu.....	38
10.2.	Ověřovací analýzy elektrického pole.....	39
10.2.1.	Oblouková okrajová podmínka	39
10.2.2.	Ekvidistantní okrajová podmínka.....	39
11.	Testy s různými polymerními roztoky	41
12.	Analýza vyrobeného materiálu	42
13.	Závěr	44
	Zdroje	45
	Seznam příloh.....	47

1. Úvod

Nanovlákná jsou vlákna o průměru menším než $1\ \mu\text{m}$. Průměry nanovláken, které se dnes běžně vyrábí, se pohybují v desítkách až stovkách nanometrů. Nanovlákná si své postavení získávají díky svým unikátním vlastnostem, jako jsou malé rozměry, vysoká měrná plocha a vynikající mechanické vlastnosti.

Technický vývoj je vždy poháněn objevem nových materiálů, způsobem jejich výroby a zpracování. Nové materiály mohou změnit i několik odvětví techniky najednou. Slibným materiálem jsou bezpochyby nanovlákná, která již nacházejí své uplatnění v mnoha odvětvích např. lékařství, filtraci, optice, elektronice a v mnohých dalších.

Technologie výroby materiálů je jednou z nejdůležitějších aspektů při jejich užití, protože určuje cenu a dostupnost materiálů. Pro průmyslově aplikovatelnou výrobní technologii je nutné zajistit homogenitu vlastností materiálu a dostatečnou produktivitu výroby, aby byl materiál cenově dostupný. Nejpoužívanější technologií pro výrobu nanovláknenného materiálu je zvlákňování pomocí elektrického pole (electrospinning). Tato technologie rozlišuje dva různé přístupy, kterými jsou užití stejnosměrného nebo střídavého napětí. V současné době je nejrozšířenější technologií zvlákňování pomocí stejnosměrného napětí (DC electrospinning), kterou využívá i první průmyslový stroj na výrobu nanovláken „Nanospider“. Technologie zvlákňování pomocí střídavého elektrického napětí (AC electrospinning), která je předmětem této práce, byla vynalezena na Technické univerzitě v Liberci v roce 2012 a v případě vhodných polymerních roztoků dosahuje až o řád vyšší produktivity než její předchůdce DC electrospinning.

Úkolem této bakalářské práce je návrh, zpracování konstrukční dokumentace a experimentální ověření funkce nového typu elektrody pro výrobu směšového nanovláknenného materiálu pro technologii zvlákňování pomocí střídavého elektrického proudu (AC electrospinning). Směšový nanovláknenný materiál může otevřít nové možnosti použití především v lékařství. Návrh je proveden na základě simulace elektrického pole metodou konečných prvků v programech Autodesk Simulation Mechanical 2015.

2. Technologie výroby nanovláken

Technologií výroby nanovláken existuje celá řada. Základem tvorby vláken je síla, která vlákna vydlužuje z polymeru, a této síly může být dosaženo různými fyzikálními jevy. Nanovlákná jsou vyráběna z polymerních roztoků nebo přímo z jejich tavenin. Při zvlákňování se makromolekuly polymeru přeskupují a vytváří velmi tenká vlákna, která jsou poté zachycována na kolektoru.

2.1. Electrospinning

Electrospinning je nejrozšířenějších technologií pro výrobu nanomateriálů. Hlavní výhodou této technologie je velké množství zpracovatelných materiálů. Tato metoda využívá k výrobě nanovláken účinky elektrického pole. Elektrické pole je vytvořeno pomocí vysokého napětí stejnosměrného (DC electrospinning) nebo střídavého (AC electrospinning). Vzhledem k tomu, že tato práce je věnována především electrospinningu pomocí střídavého napětí, jsou fyzikální principy electrospinningu, DC elektrospinningu a AC elektrospinningu podobněji popsány v samostatných kapitolách. Nyní se podíváme na ostatní metody zvlákňování nanovláken.

2.2. Dloužení (Drawing)

Jedná se o nejjednodušší technologii pro výrobu jednotlivých nanovláken, užívanou obvykle laboratorně. Při této metodě se na podkladový substrát vytvoří milimetrová kapka polymerního roztoku, ke které je na kontakt přiblížena mikropipeta. Následným zpětným pohybem pipety definovanou rychlostí je z kapky vytahováno malé množství polymerního roztoku. Z roztoku se během pohybu vypařuje rozpouštědlo a tím je utvářeno vlákno. Výsledná struktura nanovlákná velmi závisí na přesném složení materiálu, rychlosti tažení a rychlosti vypařování rozpouštědla. [1] Výhodou této metody jsou nízké nároky na výrobní zařízení. Je tedy ideální pro výzkum vlastností a potenciálního využití zkoumaných nanovlákených materiálů ve formě jednotlivých vláken.

2.3. Fázová separace (Phase-separation)

Při fázové separaci je připravován polymerní gel zchlazením polymerního roztoku na nízkou teplotu. Gel je poté smíchán s destilovanou vodou, čímž se zamění rozpouštědla

a původní rozpouštědlo je odsáno pomocí filtračního papíru. Nakonec následuje mražení a sušení. Výsledkem je nanovláknenná struktura. Tato technologie se používá pouze v laboratorních podmínkách. [2]

2.4. Samoorganizování (Self-assembly)

Při procesu samoorganizování se vytváří nanovláknna z jednodušších molekul. Molekuly jsou rozmístěny soustředně, aby se mezi nimi vytvořily vazby. Následně jsou vytaženy podél jejich společné osy, čímž se utvoří nanovláknno. Hlavním mechanismem této metody jsou mezimolekulární síly, které formují z menších molekul polymery, což definuje výsledný tvar makromolekulárního vlákna. [3]

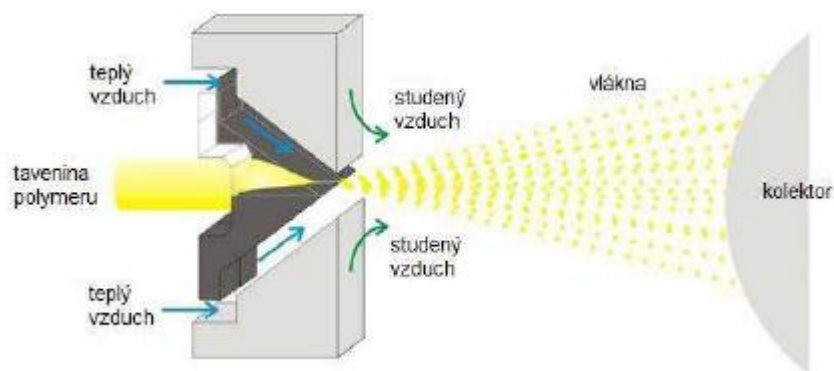
2.5. Template synthesis

Při této technologii jsou nanovláknna formována množstvím kruhových pórů na nanoporézní membráně. Vláknna se utvářejí oxidační polymerizací dosaženou elektrochemicky nebo chemicky. [2]

Polymerní roztok je protlačovaný přes nanoporézní membránu, za kterou dojde k reakci s polymerizačním roztokem a utvoří se nanovláknna. Průměr nanovláken je závislý na průměru pórů membrány. [3]

2.6. Foukání taveniny (Melt-blowing)

Schéma této technologie je na obr. 2.1. Melt-blowing je jednoduchý proces vytvářející vlákna přímo z taveniny. Roztavený polymer je protlačován skrz úzkou štěrbinu, kolem které proudí stlačený horký vzduch. Tavenina je vlivem aerodynamického tření unášena vzduchem. Poté je ochlazována a vznikají z ní nanovláknna, která jsou zpravidla sbírána na rotujícím dopravníkovém kolektoru. [4]



Obr. 2.1 Princip technologie melt-blowing [5]

Tato metoda nepotřebuje ke svému provozu žádná rozpouštědla a má také vysokou produktivitu až $1,5 \text{ kg/m hod.}$ [6]. Její nevýhodou je složitá operace se stlačeným horkým vzduchem.

2.7. Forcespinning

Tato technologie využívá k dloužení nanovláken odstředivou sílu. Odstředivá síla vzniká vysokými otáčkami rotoru (spinneru), který se otáčí kolem vertikální osy. Uvnitř spinneru je rezervoár na polymerní roztok nebo taveninu. Vlivem odstředivé síly je polymerní roztok nebo tavenina z nádržky vytlačována skrz trysky. Zvlákňovací trysky mají vnitřní průměr menším než 1 mm a jsou umístěné v radiálním směru. Vlákna jsou zachycována na páskové nebo vertikální tyčové kolektory, které jsou umístěny do kruhu okolo rotujícího spinneru. [7]



Obr. 2.2 Princip forcespinningu [8]

Forcespinning má vysokou produktivitu a je tedy do jisté míry konkurentem zvlákňování pomocí elektrického proudu v průmyslovém užití. Hlavní výhodou této technologie je absence zdroje vysokého napětí či stlačeného vzduchu.

3. Fyzikální principy electrospinningu

Electrospinning je elektro-hydrodynamický proces, při kterém se dlouží nanovlákna pomocí elektrické síly. Tento proces je aplikovatelný pouze na polymery v kapalném skupenství ve formě taveniny nebo polymerního roztoku. Vlastnosti roztoku mají velký vliv na proces zvlákňování a na výslednou morfologii vzniklého materiálu. Elektrické vlastnosti, povrchové napětí, viskozita roztoku, rozpustnost polymerů a rychlost vypařování rozpouštědla určují možnosti dloužení polymerního roztoku. [3]

Kromě vlastností roztoků ovlivňují dloužící se nanovlákna také parametry elektrického pole, které vzniká ve zvlákňovacím prostoru. Elektrická síla mezi dvěma bodovými náboji je dle Coulombova zákona:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_p d^2}$$

Kde F je síla elektrického pole, q je elektrický náboj, ϵ_p je absolutní permitivita prostředí mezi náboji a d je vzdálenost mezi náboji. Tento zákon platí pouze pro bodové náboje. Ve většině praktických aplikacích jsou použita elektrická pole v okolí prostorových ploch. Elektrická síla může být popsána také intenzitou elektrického pole.

$$F = qE$$

Kde E je intenzita elektrického pole. Pro intenzitu elektrického pole v okolí bodového náboje lze napsat vztah:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_p d^2}$$

Elektrické pole lze také popsat pomocí jeho energie. Potenciál elektrického pole je definován jako práce potřebná k přesunutí testovacího náboje z referenčního bodu do bodu v prostoru. Potenciál elektrického pole je tedy:

$$\phi = \frac{W}{q}$$

Kde ϕ je potenciál elektrického pole, W je práce a q je testovací náboj. Napětí mezi dvěma body v prostoru je definováno jako rozdíl elektrických potenciálů.

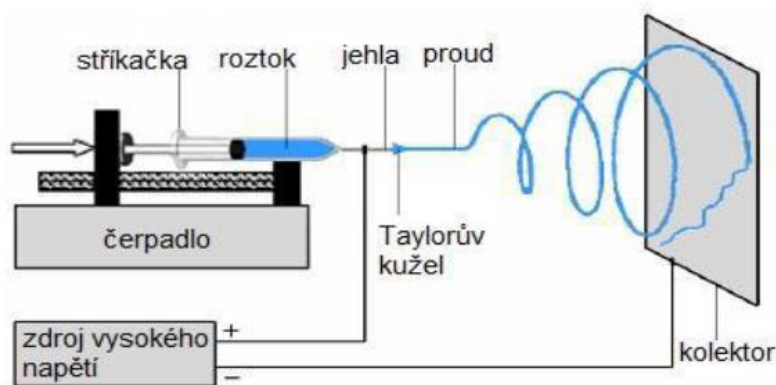
$$U = \phi_1 - \phi_2$$

Elektrické pole v okolí dvou bodových nábojů se snadněji popíše pomocí Coulombova zákona, nicméně v případě interakcí více nábojů je vhodnější použít k popisu interakcí potenciál elektrického pole.

Elektrické pole je při electrospinningu tvořeno vysokým stejnosměrným nebo střídavým napětím. Silné elektrické pole působí na kapku nebo vrstvu polymerního roztoku, ve kterém se přeskupují elektrické náboje. Polymerní roztok je po překročení kritické hodnoty intenzity elektrického pole destabilizován a na jeho povrchu se vytvoří Taylorovy kužely, které se následně přetvoří na trysky, z nichž se dlouží nanovlákná.

4. DC elektrospinning

DC elektrospinnig, nebo také elektrostatické zvlákňování, je technologie využívající k vydloužení nanovlákná elektrostatické pole vytvořené vysokým stejnosměrným napětím mezi kladně nabitou elektrodou a záporně nabitým kolektorem (obr. 4.1). Povrch kapaliny je vlivem elektrického pole destabilizován. Na povrchu vytvoří tzv. Taylorův kužel, ze kterého se dlouží vlákna. Vlákna se vlivem gradientu intenzity přesouvají ke kolektoru, kde jsou zachycována. Cestou ke kolektoru se z vláken vypařuje rozpouštědlo.



Obr. 4.1 Princip DC elektrospinningu [9]

Tento proces má své počátky ve studiích elektrického pole z 19. století. Poprvé byl patentován v roce 1902, nicméně až v roce 1934 se začalo uvažovat o jeho využití k produkci vláken. Byl to Taylor, který ve své práci teoreticky popsal vliv elektrického pole na malý objem tekutiny. [10]

Zařízení pro DC elektrospinning se skládá ze čtyř základních částí: zdroje vysokého stejnosměrného napětí, elektrody, kolektoru a systému dopravy polymeru. Zdroj je

nákladná záležitost. Pořizovací náklady pro tuto technologii jsou vysoké ve srovnání s forcespinningem. Napětí při procesu zvlákňování se pohybuje od jednotek až po desítky kilovoltů.

Na proces zvlákňování má vliv mnoho faktorů: typ elektrody, vzdálenost elektrody a kolektoru, hodnota použitého napětí a v neposlední řadě složení a materiálové vlastnosti polymerního roztoku. Elektroda je důležitou částí zvlákňovacího zařízení, proto se jí budeme dále věnovat.

4.1. Elektrody pro DC electrospinning

Elektroda je základní částí při zvlákňování pomocí elektrického proudu. Na kvalitním konstrukčním zpracování závisí mnoho parametrů vytvořených vláken, jako jsou průměr vláken nebo produktivita procesu. Při DC electrospinningu se využívá mnoho typů elektrod, které budou popsány dále.

4.1.1. Trysková elektroda

Trysková nebo také kapilární elektroda je nejstarší elektrodou používanou pro DC electrospinning. Jedná se o trubičku o malém průměru (obr. 4.2). Polymerní roztok je přiváděn vnitřní dutinou trubičky, přičemž na jejím konci dochází ke zvlákňování. Zásadní nevýhodou této elektrody je nízká produktivita, jelikož na konci elektrody se vytvoří pouze jedna tryska, ze které se dlouží vlákna.

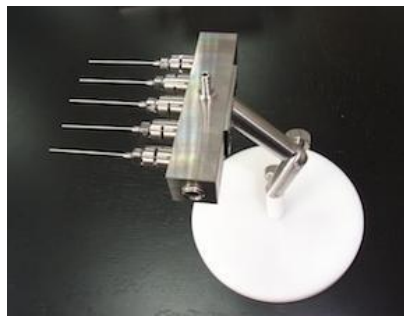


Obr. 4.2 Trysková elektroda [5]

K vylepšení produktivity elektrody byly vyvíjeny vícetryskové elektrody (obr. 4.3 a 4.4), na kterých je několik trysek umístěno blízko u sebe. Trysky mohou být uspořádávány do matice nebo lineárně vedle sebe. Problematická je správná volba vzdálenosti mezi tryskami. Příliš malá vzdálenost vede k vzájemnému nepříznivému ovlivňování.



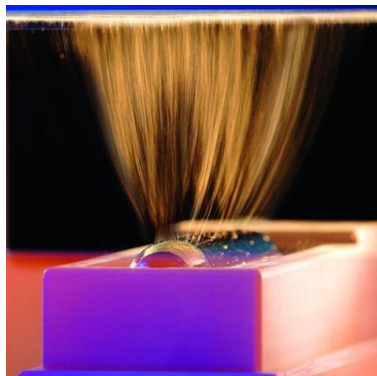
Obr. 4.3 Více trysek v různých uspořádáních [9]



Obr. 4.4 Více trysek v lineárním uspořádání [8]

4.1.2. Válečková elektroda

Zásadní průlom v technologii elektrospinningu nastal v roce 2005, ve kterém byla na Katedře netkaných textilií Technické university v Liberci vyvinuta technologie bezjehlového zvlákňování. Technologie vychází z poznatku, že Taylorův kužel se může vytvářet samoorganizací i na volné hladině polymerního roztoku. To vede ke značnému zvýšení produktivity zvlákňovacího procesu. Tento objev vedl k vývoji nového druhu elektrody. Válečková elektroda je složena z rotujícího válečku, který se brodí vaničkou s polymerním roztokem. Vlivem otáčení válečku ulpívá na povrchu vrstva polymerního roztoku, který je zvlákněn, jakmile dosáhne dostatečné vzdálenosti od hladiny ve vaničce (obr. 4.5). [11]



Obr. 4.5 Válečková elektroda [12]

Vývoj této elektrody vedl k prvnímu komerčnímu zařízení na výrobu nanovláken pomocí elektrospinningu pod značkou Nanospider™. Tento přístroj je vyvíjen společností Elmarco ve spolupráci s Technickou univerzitou v Liberci.

4.1.3. Kotoučová elektroda

Tento druh elektrody je velice podobný elektrodě válečkové a je výsledkem snahy o další optimalizaci válečkové elektrody. Výhoda této elektrody spočívá ve vyšší intenzitě elektrického pole v místě zvlákňování, neboť mezi zvlákňovacím místem a hladinou v rezervoáru je větší vzdálenost.

4.1.4. Drátková elektroda

Drátková elektroda je nejmodernějším druhem elektrody pro zvlákňování pomocí stejnosměrného elektrického proudu. Jedná se o drátek, který je převíjen mezi dvěma cívkami. Během procesu je drátek v jednom místě smáčen polymerním roztokem a následně je vytvořeno elektrické pole mezi ním a kolektorem.

5. AC elektrospinning

AC elektrospinning neboli zvlákňování pomocí střídavého elektrického napětí byl vyvinut z DC elektrospinningu. Princip je velmi podobný, u obou metod se používá ke zvlákňování účinků elektrického pole. Elektrické pole u této technologie vzniká vlivem časového průběhu vysokého napětí. Okolí elektrody se střídavě nabíjí a vybíjí a tím se utváří tzv. virtuální elektroda. Elektrické pole tedy vzniká mezi hmotnou a virtuální elektrodou. [13]

Metoda zvlákňování pomocí střídavého elektrického napětí využívá poznatky o zvlákňování z volné hladiny polymerního roztoku. Nanovlákná se po utvoření pohybují ve směru gradientu elektrického pole. Nanovlákná se utvářejí ve všech směrech do okolí elektrody, jelikož virtuální elektroda kompletně obklopuje hmotnou elektrodu. Vytvořená vlákna se následně vlivem elektrického větru uskupují do tzv. vlečky. Při pozorování procesu bylo zjištěno, že nanovlákná se ve vzdálenosti do cca 3 – 4 cm stále vůči sobě přeskupují. Dále se již mezi sebou nepřeskupují a pohybují se ve formě vlečky vlivem tzv. elektrického větru. Na základě tohoto pozorování se předpokládá, že virtuální elektroda se nachází právě ve vzdálenosti 3 – 4 cm od elektrody. Vlákna pohybující se vzhůru jsou zachytávána na kolektor, který nemusí být elektricky nabitý, což je výhoda proti stejnosměrnému způsobu. Navíc AC- elektrospinning je přibližně o řád produktivnější než DC-elektrospinning. [13]

Některá nanovlákna se po vzniku nepřipojí k vlečce, což je velký rozdíl proti DC elektrospinningu, kde se všechna vlákna pohybují přímo ke kolektoru. Tato oddělená vlákna dopadají zpět na elektrodu a do jejího okolí a tím může docházet k zanášení povrchu elektrody a přerušení stabilního zvlákňovacího procesu. Elektrody pro AC elektrospinning využívají samočisticího efektu vnějšího povrchu elektrody, kdy je na elektrodu dopravováno větší množství polymerního roztoku, než je k zvlákňovacímu procesu zapotřebí. Zbylý roztok stéká po elektrodě a zabraňuje usazování nanovláken na jejím povrchu, protože vlákna, která dopadnou zpátky na elektrodu, se opět rozpustí v roztoku. Samočisticí efekt má za následek větší nároky na množství polymerního roztoku, který je nutný pro provoz.

Zařízení na výrobu nanovláken pomocí AC electrospinningu se skládá z podobných částí jako zařízení pro DC elektrospinning, kterými jsou zdroj vysokého napětí, elektroda a zařízení k zachycování nanovláken. Nanovlákna mohou být zachycována buď na kolektor, nebo např. přímo na jádrovou přízi. [14] Touto metodou se tedy otevírají nové možnosti uplatnění nanovláknenných materiálů. Zdroj vysokého napětí se používá nastavitelný s rozpětím výstupního napětí mezi 16 – 36 kV. Zdroj ovlivňuje mnoho parametrů zvlákňovacího procesu např. produktivitu, průměr vyrobených vláken nebo velikost zvlákňovací plochy.

Elektroda také ovlivňuje mnoho parametrů výsledného materiálu. Užívá se nejčastěji elektrod rotačně symetrických. Na okrajích elektrod je obvykle maximum elektrické intenzity. Elektroda je kritickou částí pro zvlákňovací přístroj a proto se druhům elektrod budeme věnovat v další části práce.

5.1. Elektrody pro AC elektrospinning

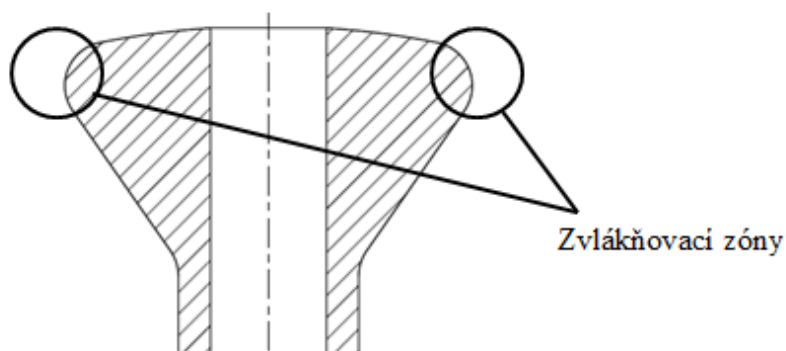
Elektrody pro AC elektrospinning jsou popsány v patentové přihlášce podané Technickou univerzitou v Liberci číslo spisu PV 2015-928, která v době psaní práce ještě nebyla zveřejněna. Elektrody se skládají ze dvou základních částí, kterými jsou zvlákňovací hlava a stopka. Stopka slouží k dopravě polymerního roztoku na hlavu. Stopka elektrody je obvykle tenkostěnná trubička o co nejmenším průměru k minimalizaci ztrát z nabíjení velkého okolního prostoru. Hlava je funkční částí elektrody. Na hlavě dochází k samotnému zvlákňování nanovláken. Elektrody využívají samočisticího efektu popsaného výše. Konvenčně používané způsoby dopravy

polymerního roztoku pro laboratorní zařízení jsou dávkovací čerpadla a peristaltické pumpy. Polymerní roztok se do elektrody dopravuje pomocí peristaltických pump podobných těm, které se používají ve zdravotnictví. Konstrukcí peristaltické pumpy je dáno, že proud roztoku dodávaného pumpou pulzuje. Polymerní roztoky mají vysokou viskozitu, což je příčinou mnoha problémů při dopravě a přeplavování elektrody.

Produktivita a průměr vláken vyrobených elektrodou je závislý na rozložení elektrické intenzity na povrch elektrody. Intenzita elektrického pole je přímo úměrná napájecímu napětí a dále závisí na prostorové křivosti elektrody.

5.1.1. Kuželová elektroda

Kuželová elektroda je základní konfigurací elektrody pro AC elektrospining. Jak již název napovídá, elektroda se skládá z trubičky a hlavy kuželovitého tvaru se zaoblenou hranou. Polymerní roztok protéká trubičkou a vyvěrá na povrch elektrody, kde se volně pohybuje směrem ke zvlákňovacím zónám, na kterých se roztok zvlákňuje. Schéma kuželové elektrody s vyznačenými zvlákňovacími zónami je na obr. 5.1. Zvlákňování započne ve zvlákňovací zóně, tedy v místě zaoblené hrany kužele. Tato skutečnost souvisí s rozložením intenzity elektrického pole v okolí elektrody. Intenzita elektrického pole má své maximum právě v místě zaoblené hrany elektrody. Proto zde započne zvlákňování jako první, jelikož dojde k překročení kritické intenzity polymerního roztoku. Technologie AC elektrospinningu byla a je testována právě na této elektrodě.

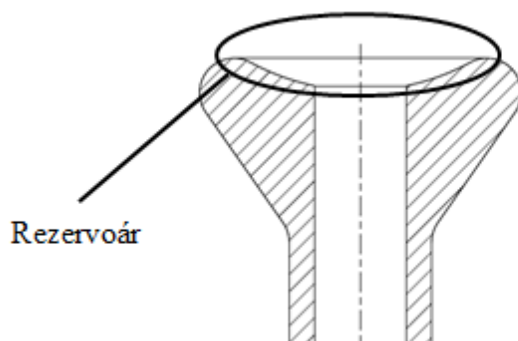


Obr. 5.1 Schéma kuželové elektrody

5.1.2. Kuželová elektroda s rezervoárem

Kuželová elektroda s rezervoárem je výsledkem snahy o vylepšení dopravy polymerního roztoku (obr. 5.2). Rozdíl je v tom, že na vrchu elektrody je vytvořen malý rezervoár polymerního roztoku, čímž se vytvoří větší povrch, který je zaplavený

polymerem a usnadňuje tím zaplavení celé elektrody a správný průběh přeplavování elektrody během zvlákňovacího procesu.



Obr. 5.2 Schéma kuželové elektrody s rezervoárem

5.1.3. Kulová elektroda

Kulová elektroda byla navržena s cílem rovnoměrného rozložení intenzity elektrického pole na celém pracovním povrchu hlavy elektrody. Rovnoměrné rozložení intenzity elektrického pole má za následek přibližně stejné podmínky pro zvlákňování na celém povrchu elektrody. Což vede k vytvoření nanovláken stejné kvality. [15]

6. Způsoby výroby kompozitních nanovláken

Tato práce se zabývá konstrukčním zpracováním nového druhu elektrody pro výrobu kompozitního nanovláknenného materiálu. Následující kapitola se proto věnuje vybraným metodám používaným k výrobě kompozitních nanomateriálů. Zahrnuty jsou zde pouze způsoby užívající k výrobě nanovláken elektrospinningu a to jak DC tak AC. Kompozitní nanomateriály se vyrábějí i pomocí jiných technologií, které nejsou pro účely této práce stěžejní.

6.1. Zvlákňování směsí

Vytvoření nanovláknenných kompozitů je možné zvlákňováním směsí. Do polymerního roztoku se přidá aditivum nebo případně další polymer. Všechny složky směsi tedy musí být rozpustné ve stejném rozpouštědle a vzájemně spolu nereagovat. Tuto směs posléze zvlákníme na jedné elektrodě. Během procesu nemusí vzniknout vazby mezi jednotlivými složkami směsi a zároveň může dojít k nechtěnému vyloučení některé ze složek během zvlákňování. Procentuální zastoupení složek ve výsledném materiálu nelze ovlivnit jinak než jeho hmotnostním podílem ve směsi. [16]

Sestavy jehlových elektrod nelze u AC elektrospinningu použít z důvodu vzájemného ovlivňování elektrod. Pokud jsou elektrody při AC elektrospinningu příliš blízko u sebe, tak se zásadně ovlivňují a snižuje se celkový výkon procesu.

6.2. Zvlákňování pomocí dvou elektrod

Tato metoda je použitelná pouze pro DC elektrospinning. Nanovlákná se při této metodě vytváří ze dvou jehlových elektrod. Elektrody jsou umístěny vedle sebe a mohou se vzájemně ovlivňovat, podobně jako u výše zmíněné více tryskové elektrody. Polymerní roztoky jsou odděleny a nijak se nemísí. Krátce po zvlákňování mezi sebou nanovlákná kolidují a utváří tak jedinečnou strukturu. [17]

6.3. Zvlákňování ze dvou vrstev roztoků

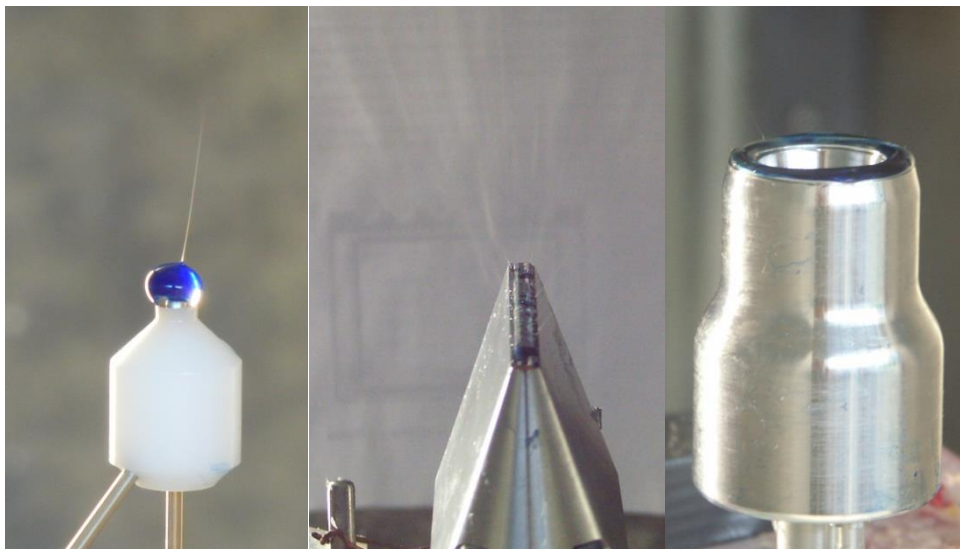
Bikomponentní nanovlákná lze vyrobit ze dvou různých roztoků na jedné elektrodě. Materiály mohou být ve vláknu uspořádány např. vedle sebe (side-by-side), koaxiálně tedy ve formě pláště-obal. [2]

Vlákná typu side-by-side se vyrábějí DC elektrospinningem a to na jehlové elektrodě. Existují dva různé přístupy. Jehlová elektroda se dvěma kapilárními kanály, jimiž jsou oba roztoky vedeny a do kontaktu se dostanou až na konci elektrody. Druhou možností je užití micro-fluidního zařízení, ve kterém se oba polymerní roztoky dostanou do kontaktu a pokračují společně bez výrazného promíchání až ke konci jehlové elektrody. [18]

Koaxiální nanovlákná lze přirovnat k elektrickému vedení. Skládají se z vnitřního jádrového materiálu a vnějšího obalu. Toho se docílí zvlákňováním ze dvou vrstev roztoku na sobě. Obal je obvykle tvořen polymerním materiálem. Jádro může být tvořeno jiným polymerním materiálem nebo tekutinami obsahujícími léčiva, buňky, nanočástice, DNA nebo růstové faktory. [19]

Koaxiální nanovlákná je možné vyrábět jak DC tak AC elektrospinningem. Konfigurace obou způsobů je rozdílná. Při DC elektrospinningu lze koaxiální nanovlákná vyrábět na několika druzích elektrod: jehlové, šterbinové a válcové (obr. 6.1). Při AC elektrospinningu má elektroda zcela jiný tvar. Zvlákňovací hlava se

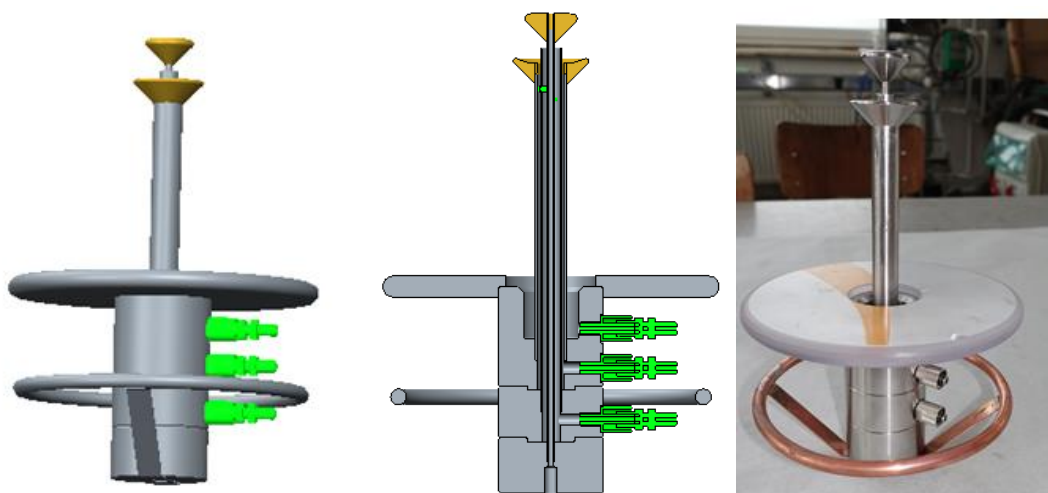
skládá ze dvou disků, které upravují přeplavovací efekt elektrody tak, aby se vytvořila dvojvrstva roztoku. [20]



Obr. 6.1 Druhy koaxiálních elektrod, vlevo jehlová, uprostřed štěrbinová a vpravo válcová [20]

7. Návrh nového druhu elektrody

Jak již bylo popsáno výše, úkolem této práce je návrh nové elektrody pro výrobu směsového nanovláknenného materiálu technologií AC elektrospinningu. Předpokladem je, že tato elektroda umožňuje zvláknovat dva různé polymery, aniž by se smíchaly, čímž bude možné zvláknování polymerů nemísitelných. Při návrhu elektrody byla použita koncepce z již zmiňované patentové přihlášky KTS TUL číslo spisu PV 2015-928. Elektroda byla konstrukčně zpracovávána v programu Creo Parametric 2.0. CAD model a vyrobený funkční vzorek navržené elektrody je na obr. 7.1.



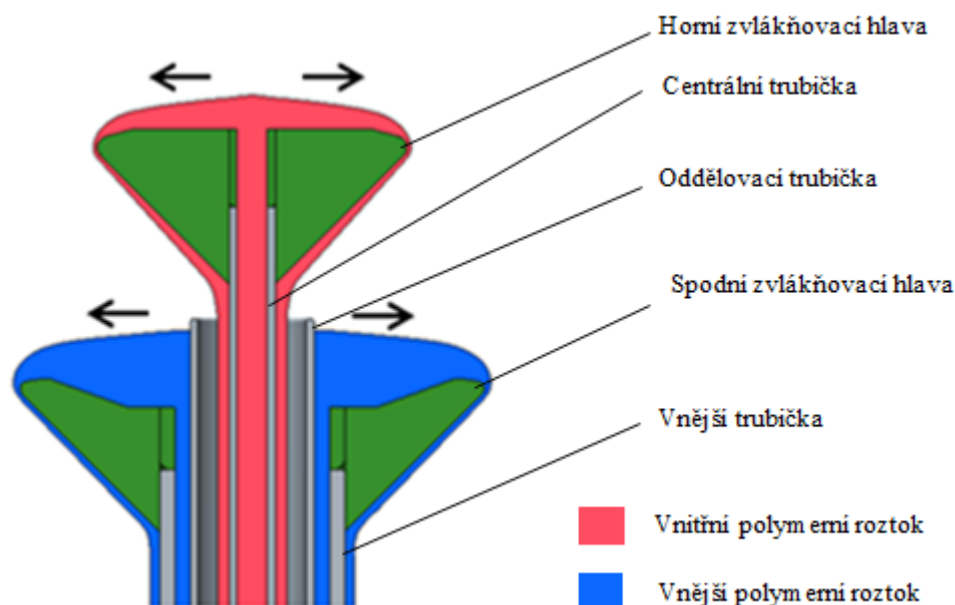
Obr. 7.1 Vlevo CAD model elektrody, uprostřed v řezu a vpravo zkonstruovaná elektroda

Konstrukční návrh elektrody je rozdělen na několik částí: **zvlákňovací hlavy**, na kterých se zvlákňují polymery, **stopky**, na kterých jsou zvlákňovací hlavy uloženy a slouží k dopravě a oddělení jednotlivých polymerů, a **uložení trubiček**, přes které se připojuje elektroda ke zdroji vysokého napětí.

Při návrhu elektrody byl kladen důraz na několik kritických vlastností: nemísitelnost polymerních roztoků, údržbu elektrody a rozložení intenzit elektrického pole ve zvlákňovací oblasti. Aby bylo možné na elektrodě zvlákňovat různé druhy polymerních roztoků, byly zvlákňovací hlavy navrženy vyměnitelné. Výměna hlav elektrody umožňuje změnu rozložení intenzity elektrického pole, která ovlivňuje zvlákňovitost polymerů, průměr a množství vytvořených vláken.

7.1. Tok polymerních roztoků elektrodou

Polymerní roztoky jsou do elektrody dodávány pomocí peristaltických čerpadel a na hlavu elektrody přiváděny přes stopku elektrody. Stopka elektrody je složená ze tří souosých trubiček. Tok polymerního roztoku je patrný na obr. 7.2. První roztok je dopravován na zvlákňovací hlavu centrální trubičkou. Dále je přeplavován přes horní zvlákňovací hlavu a stéká po vnější ploše centrální trubičky. Zde je odsáván pomocí peristaltické pumpy. Druhý polymerní roztok je dopravován na spodní hlavu mezikružím mezi oddělovací a vnější trubičkou. Poté je přeplavován přes spodní zvlákňovací hlavu a stéká po vnější ploše vnější trubičky do rezervoáru, ze kterého je odsáván pomocí další peristaltické pumpy. K provozu elektrody je tedy zapotřebí čtyř peristaltických pump.



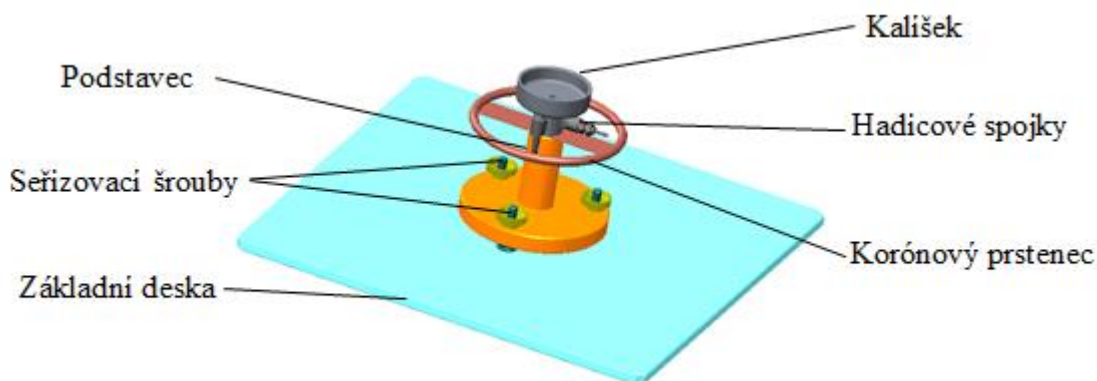
Obr. 7.2 Tok polymerních roztoků elektrodou

Trubičky elektrody mají nejmenší možné průměry, aby byly eliminovány elektrické ztráty způsobené nabíjením velkého okolního prostoru. Centrální trubička byla zvolena s nejmenším rozměrem $3 \times 0,5 \text{ mm}$ ($D \times t$). Oddělovací trubička byla navržena na základě pokusu, při kterém bylo ověřeno, do jakého rozměru oddělovací trubičky je schopen polymerní roztok bezpečně zatéct, aniž by se přeléval přes horní hranu oddělovací trubičky. Pokus ukázal nutnost radiální mezery alespoň dva milimetry mezi vnější plochou centrální trubičky a vnitřní plochou oddělovací trubičky. Oddělovací trubička byla proto zvolena o rozměru $8 \times 0,5 \text{ mm}$. Vnější trubička byla zvolena, tak aby byl vytvořen potřebný kanál mezi oddělovací a vnější trubičkou. Byla zvolena trubička o rozměru $12 \times 1 \text{ mm}$. Všechny trubičky byly vyrobeny z nerezové oceli z důvodu potřebné chemické odolnosti. Byly volené tažené trubičky v přesném provedení. Svařované trubičky jsou z důvodu velkých rozměrových tolerancí nevhodné.

7.2. Návrh uložení elektrody

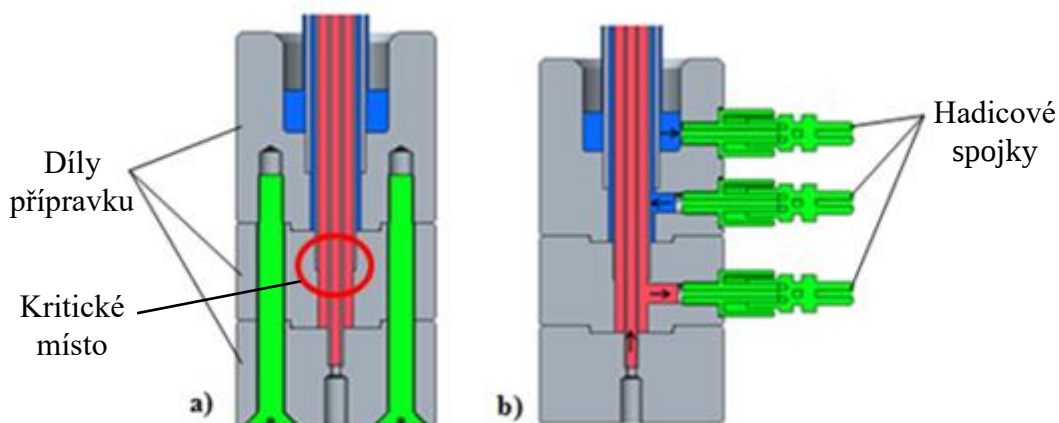
Elektroda byla navržena tak, aby bylo možné provádět její tetování na zkušebním zvlákňovacím zařízení, kterým je katedra KTS vybavena. Toto zařízení již obsahuje přípravek pro upínání elektrod. CAD model přípravku k upínání elektrody je na obr. 7.3. Přípravek k upínání elektrod je tvořen podstavcem, měděným korónovým prstencem a nerezovým kalíškem pro přívod a odvod polymerního roztoku. Podstavec obsahuje seřizovací šrouby k seřízení polohy osy hlav elektrody. Přípravek se připojuje

ke zdroji elektrického napětí přes pružinu umístěnou ve střední části přípravku. Měděný prstenec, také nazývaný korónový prstenec, brání korónovému výboji ve svém okolí. Nerezový kalíšek má vstup a výstup pro polymerní roztok. Vtokový kanál je veden středem kalíšku. Výtokový kanál je umístěn na okraji kalíšku a slouží k odsávání přeplaveného polymerního roztoku, který stekl po stopce. Pro potřeby dávkování nové elektrody je nutné zajistit oddělený přívod a odvod dvou různých polymerních roztoků. Z tohoto důvodu byla navržena další část uložení elektrody.



Obr. 7.3 Model upínacího přípravku pro upnutí elektrody

Byl navržen třídílný přípravek válcového tvaru se třemi radiálně orientovanými kanály polymerních roztoků (obr. 7.4a a 7.4b). Jeden kanál slouží jako vstup a zbylé dva jako výstupy polymerních roztoků. Druhý vstup se nachází v ose sestavy a slouží také k upínání přípravku do zkušebního zařízení. Roztoky se přivádějí plastovými trubičkami, k jejich připojení se využívají průmyslové hadicové spojky s velikostí závitu M5. Pro trubičky bylo použito přechodné uložení k zajištění snadného vyčištění a těsnosti trubiček v uložení. Souosost dílů přípravku je zajištěna osazením na každém dílu přípravku. Celý přípravek je smontován pomocí dvojice šroubů se zápusťnou hlavou M5×50. Umístění šroubů umožňuje vzájemné natočení dílů přípravku o 180°. Stažení šroubů zajišťuje dostatečnou těsnost.

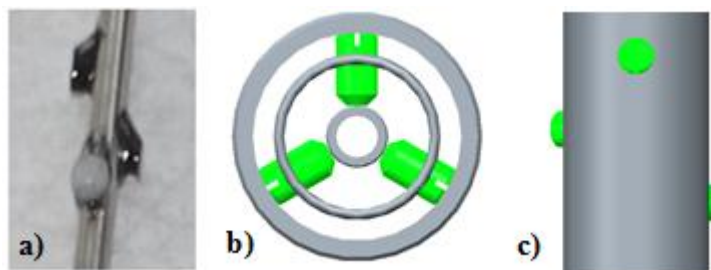


Obr. 7.4 Přípravek uložení trubiček

V uložení oddělovací trubičky musí být správně zvolené tolerance, aby těsnila a zamezovala mísení polymerních roztoků. Na obr. 7.4a je vyznačeno kritické místo uložení oddělovací trubičky.

7.3. Středění

Středění elektrody je její velice důležitou součástí, protože zajišťuje správnost toku polymerního roztoku. Prvotní způsob středění byl realizován pomocí lepidla tzv. tekutého kovu, které je po zatvrdnutí obrobitelné. Na obou vnitřních trubičkách byly vytvořeny tři kapky v různých výškách, abychom co nejméně bránili průtoku roztoku. Kapky byly vytvrzeny a následně obrobeny pro dosažení potřebného uložení do vnitřní plochy vedlejší trubičky s minimální vůlí (Obr 7.5a). Tento způsob středění se ukázal jako funkční, ale po dlouhodobém styku s polymerními rozpouštědly došlo k jeho odlepení.



Obr. 7.5 Středění trubiček

Následně byl proto navržen nový způsob středění pomocí tří stavěcích šroubů M2, které byly zašroubovány radiálně do střední oddělovací trubičky tak, aby spolu

v půdorysu svíraly úhel 120° a každý byl umístěn do jiné výšky (obr. 7.5b a 7.5c). Tento způsob středění se ukázal funkční.

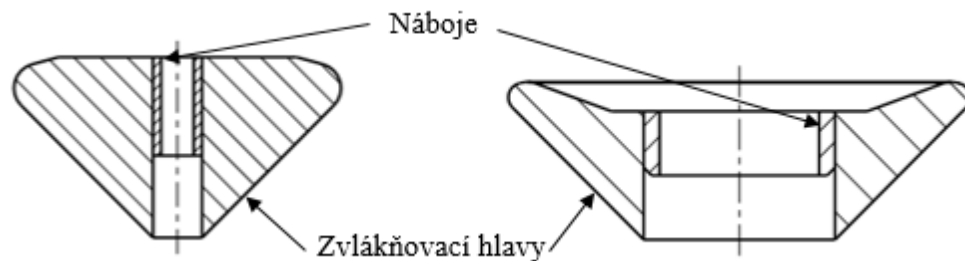
7.4. Korónový prstenec a kryt

Dalšími součástmi, které byly k elektrodě navrženy, jsou plastový kryt a korónový prstenec. Korónový prstenec zabraňuje ve svém okolí nežádoucím korónovým výbojům. Korónový výboj je nepříznivý efekt vysokého napětí, který vzniká v místech s velkou křivostí povrchu. Tento výboj ionizuje vzduch v okolí, čímž vzniká ozón a elektrické ztráty. Korónový prstenec byl zkonstruován jako kruh z měděného drátu o průměru 6 mm, ke kterému je připájený měděný plíšek, přes který se prstenec připojuje k sestavě. Plastový kryt byl navržen jako kruhová součást s otvorem a osazením uprostřed, která se pokládá na vršek upínacího přípravku a brání dopadání vláken na hadicové spojky a měl by také bránit hoření korónového výboje.

7.5. Návrh zvlákňovací oblasti

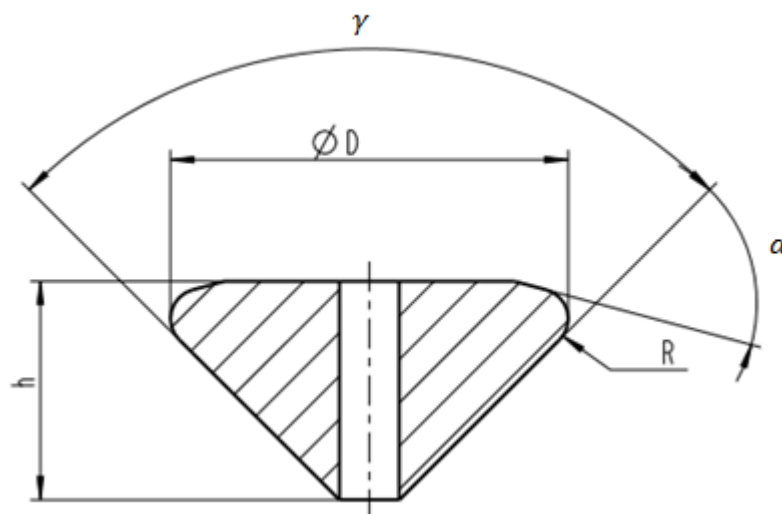
Ve zvlákňovací oblasti se nachází dvě zvlákňovací hlavy elektrody a horní čelo oddělovací trubičky. Návrh zvlákňovacích hlav, byl inspirován kuželovými elektrodami. Při návrhu zvlákňovací oblasti byla věnována velká pozornost rozložení intenzity elektrického pole. Byly navrženy dvě sady zvlákňovacích hlav, tak aby bylo možné na elektrodě zvlákňovat různé druhy polymerních roztoků. Horní čelo oddělovací trubičky je kritickým místem návrhu. Toto místo je jediné ve zvlákňovací oblasti, které není přeplavené polymerním roztokem, proto zde může docházet k usazování nanovláken a následnému narušení zvlákňovacího procesu. Zároveň čelo oddělovací trubičky brání mísení polymerních roztoků ve zvlákňovací oblasti.

Schéma zvlákňovacích hlav s nižší intenzitou je na obr. 7.6. Vzhledem ke složitosti geometrie a dosažení přesnosti výrobků byly hlavy vyráběny na CNC stroji. Návrh respektuje výrobní možnosti stroje, proto jsou všechny zvlákňovací hlavy navrženy dvoudílné. Hlava se skládá z náboje a samotné hlavy. Náboj je v hlavě zalisován, aby zachovával geometrii zvlákňovací oblasti. Spodní čelo náboje slouží jako dosedací plocha pro nasazení na stopku elektrody.



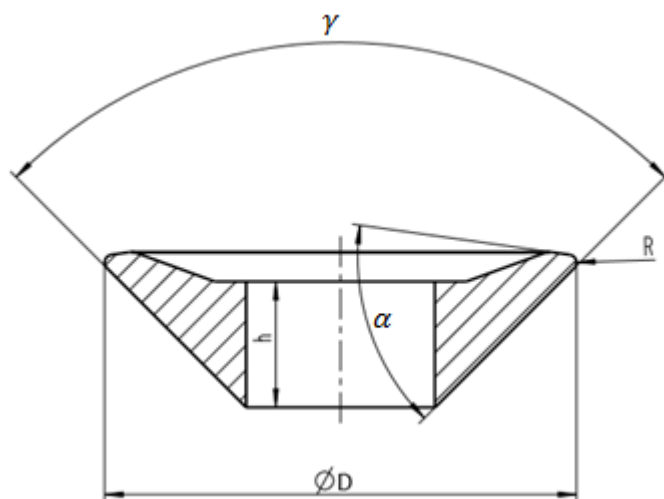
Obr. 7.6 Skica sestav hlav elektrody

Na obr. 7.7 je geometrie horní hlavy. Vrcholový úhel všech hlav γ elektrody byl zvolen 90° . Takto zvolený vrcholový úhel zabraňuje skapávání polymerního roztoku během zvlákňovacího procesu. Intenzita elektrického pole je závislá na prostorové křivosti elektrody. Křivost zvlákňovacích zón hlav byla ovlivňována pomocí tří základních parametrů: maximálního průměru elektrody D , zvlákňovacího úhlu α a poloměru zaoblení hrany R . Výška hlavy elektrody byla volena tak, aby umožňovala vytvoření zvolené geometrie.



Obr. 7.7 Geometrie horní hlavy elektrody

Geometrie spodní hlavy elektrody je na obr. 7.8. Křivost ve zvlákňovací zóně spodní hlavy je ovlivňována stejnými parametry jako u horní elektrody. Rezervoár na elektrodě byl vytvořen tak, aby nenarušoval zvlákňovací zónu.



Obr. 7.8 Geometrie spodní hlavy elektrody

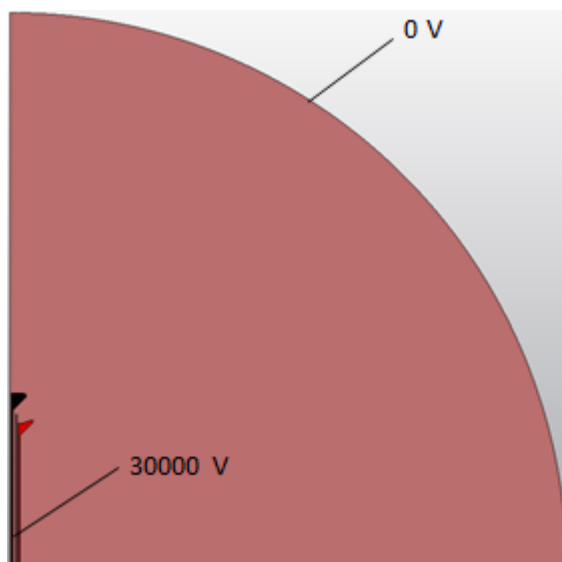
Jelikož se jedná o první pokus o výrobu takového druhu elektrody na světě, byly hlavy v sadě navrhovány tak, aby měly přibližně stejnou intenzitu elektrického pole ve zvlákňovacích zónách. Sady hlav byly navrženy s rozdílnou intenzitou elektrického pole. Rozdíl intenzity mezi sadami je přibližně 1000 V/mm . Ve zvlákňovací oblasti bylo nutné zajistit nemísitelnost roztoků. Hrana oddělovací trubičky byla navržena tak, aby zabráňovala přetékání roztoků. Druhá vlastnost, kterou musela oddělovací trubička splňovat, byla výrazně nižší intenzita elektrického pole, aby nebyl narušen zvlákňovací proces.

Byla provedena série analýz elektrického pole metodou konečných prvků, aby bylo dosaženo výše popsaných vlastností a na základě analýz byly provedeny úpravy geometrie zvlákňovací oblasti.

8. Analýzy elektrického pole

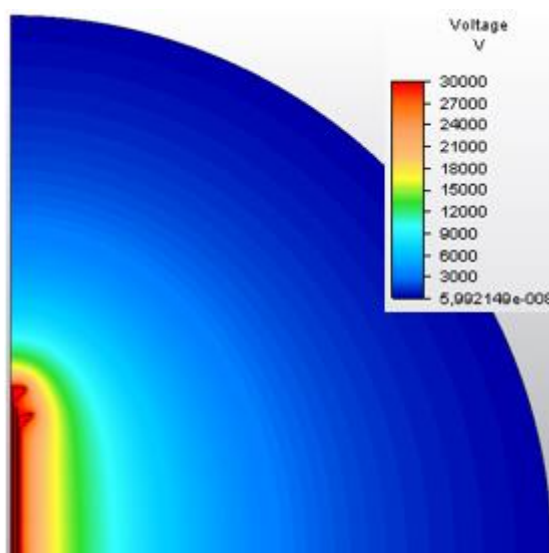
Analýzy elektrického pole byly provedeny v programu Autodesk Simulation Mechanical. Pro tyto analýzy byl použit model elektrostatického pole, jehož chyba je pro frekvenci střídavého napětí 50 Hz zanedbatelná. Na obr. 8.1 je schéma vytvořeného rotačně symetrického modelu. Navržená geometrie elektrody byla umístěna do čtvrtkruhového okolí o poloměru 350 mm . Tato geometrie byla importována do programu nepřímou metodou pomocí souboru formátu DXF. Sít' modelu byla vygenerována pomocí automatického generátoru sítě. Sít' byla ve zvlákňovacích zónách zahuštěna pro dosažení vyšší přesnosti výsledků tak, aby ukazatel preciznosti výsledků

byl nižší než 0,02. Na geometrii elektrod bylo aplikováno povrchové napětí 30 kV při vysoké elektrické tuhosti, tedy napětí zdroje. Okrajová podmínka okolí je problematickým faktorem analýz elektrického pole. Při prvotních návrhových analýzách bylo vytvořeno čtvrtkruhové okolí, na které bylo aplikováno povrchové napětí 0 V, při vysoké elektrické tuhosti, tedy jakoby byla uzemněná.



Obr. 8.1 Model pro simulace elektrického pole

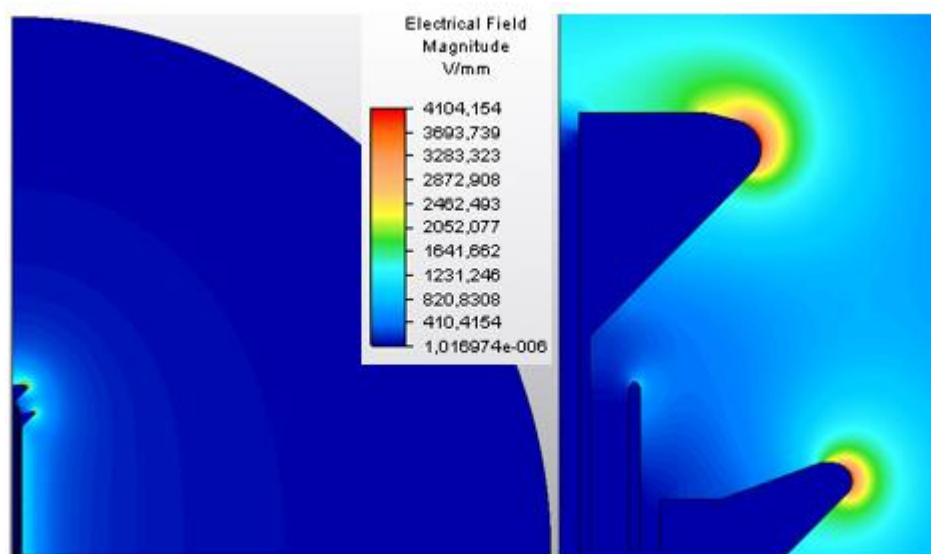
Na obr. 8.2 je rozložení elektrického napětí v okolí elektrody. Napětí je rozloženo v okolí elektrody do specifického ekvidistantního tvaru.



Obr. 8.2 Výsledné rozložení elektrického napětí

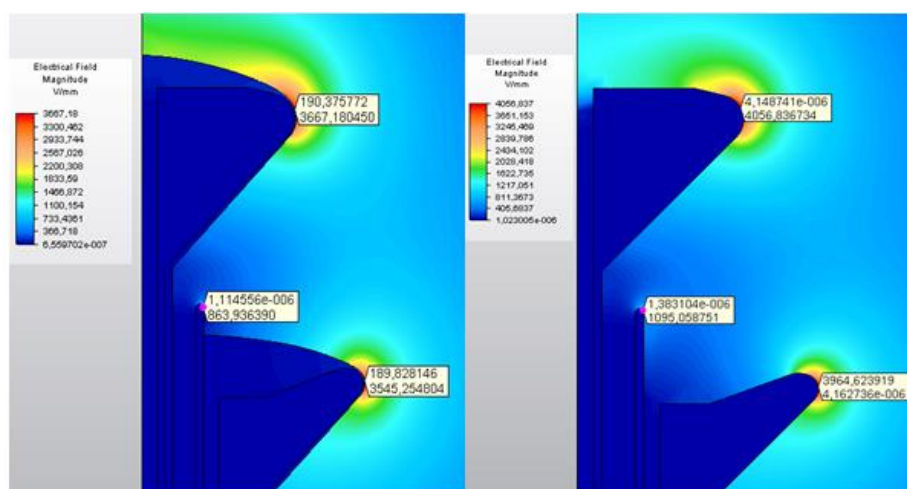
Rozložení intenzity elektrického pole je na obr. 8.3. Maximální hodnoty intenzity elektrického pole jsou ve zvláknovacích zónách hlav. Intenzita na vrcholu oddělovací

trubičky je výrazně nižší než ve zvlákňovacích oblastech hlav elektrody, což zabraňuje vzniku nanovláken a také jejich usazování v tomto místě.



Obr. 8.3 Výsledné rozložení intenzity elektrického pole

V rámci analýz elektrického pole byly vyzkoušeny dva přístupy: bez polymerních hladin a s polymerními hladinami. Polymerní hladiny byly odhadnuty a vytvořeny pomocí spojitě křivky. Z obr. 8.4 je jasně patrné, že v modelu s hladinou kapaliny se pouze sníží elektrická intenzita, nicméně rozdíl mezi jednotlivými hlavami zůstane přibližně stejný. Z toho důvodu byl při návrhových simulacích použit model bez polymerních hladin roztoků, jelikož tvorba hladiny polymerních roztoků a její následné zpracování v simulaci bylo časově velmi náročné.



Obr. 8.4 Srovnání analýz elektrického pole

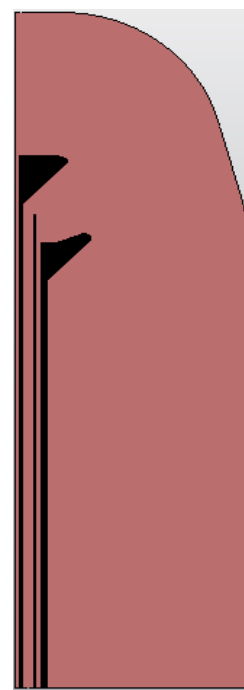
Výsledky analýz elektrického pole jsou v tabulce 1. Rozdíl mezi hlavami v rámci sady je minimální, do 100 V/mm . Konfigurace elektrody s kombinací hlav z různých sad mají rozdíl mezi maximálními hodnotami intenzity přibližně 1000 V/mm .

Tabulka 1 Rozložení intenzity elektrického pole na elektrodě

konfigurace elektrody	Intenzita horní hlavy [V/mm]	Intenzita spodní hlavy [V/mm]	Rozdíl intenzit na hlavách elektrod [V/mm]
sada s nižší intenzitou elektrického pole	4104	4045	59
sada s vyšší intenzitou elektrického pole	5222	5129	93
Horní hlava s nižší intenzitou, spodní hlava s vyšší intenzitou	4058	5051	993
Horní hlava s vyšší intenzitou, spodní hlava s nižší intenzitou	5184	3994	1190

8.1. Srovnání okrajových podmínek

V dostupné literatuře není přesně specifikováno, jaký tvar okrajové podmínky je správný pro analýzy nestacionárního elektrického pole a jaké parametry by mělo mít okolí elektrody. Dle hypotézy uvedené Mikešem a Lukášem [13] se virtuální elektroda nachází ve vzdálenosti $30 - 40 \text{ mm}$ od povrchu elektrody. Z toho důvodu byly provedeny kontrolní analýzy elektrického pole s upraveným okolím. To bylo vytvořeno jako upravená ekvidistanční plocha kolem elektrody ve vzdálenosti 30 mm . Tato ekvidistanční okrajová podmínka byla odhadnuta na základě rozložení napětí v okolí elektrody při předchozích analýzách (obr. 8.2). Tvar spojitě okrajové podmínky je na obr. 8.5. Na takto vytvořenou okrajovou podmínku bylo aplikováno stejné povrchové napětí jako v předchozích analýzách, tedy napětí 0 V při vysoké elektrické tuhosti. Maximální hodnoty intenzity elektrického pole ve zvláknovacích oblastech hlav elektrody jsou uvedeny v tabulce 2. Intenzita elektrického pole horní a spodní elektrody se v rámci sady liší maximálně v řádech jednotek procent u obou okrajových podmínek.



Obr. 8.5 Tvar okrajové podmínky

Tabulka 2 Intenzita elektrického pole zvlákňovacích hlav

konfigurace elektrody	kruhová podmínka		ekvidistanční podmínka	
	Intenzita horní hlavy [V/mm]	Intenzita spodní hlavy [V/mm]	Intenzita horní hlavy [V/mm]	Intenzita spodní hlavy [V/mm]
sada s nižší intenzitou elektrického pole	4104	4045	6269	6498
sada s vyšší intenzitou elektrického pole	5222	5129	7991	8099
Horní hlava s nižší intenzitou, spodní hlava s vyšší intenzitou	3987	4947	6229	8048
Horní hlava s vyšší intenzitou, spodní hlava s nižší intenzitou	5184	3994	8064	6541

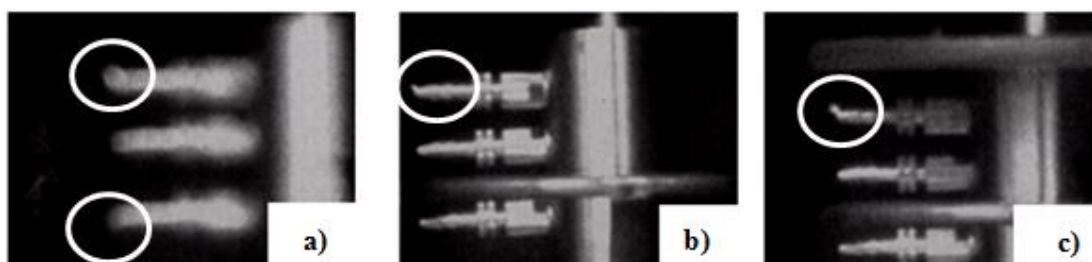
Velikost intenzity elektrického pole se v ekvidistanční okrajové podmínce výrazně zvýšila. Zvýšily se rozdíly mezi zvlákňovacími oblastmi. Tyto skutečnosti byly očekávaným výsledkem změny tvaru okrajové podmínky. V případě správnosti výsledků analýz s ekvidistanční okrajovou podmínkou by zvlákňovací proces mohl probíhat při nižších napětích.

9. Testy funkčnosti

Funkční testy námi zkonstruované a vyrobené elektrody byly provedeny na testovacím zvlákňovacím zařízení. Byly testovány základní parametry zvlákňovací elektrody: přítomnost korónových výbojů na elektrodě, tok polymerních roztoků a zvlákňovací proces. Přípravy peristaltických pump pro experimenty s polymerními roztoky jsou časově náročné. Z toho důvodu by bylo vhodné změnit způsob dopravy polymerních roztoků do elektrody. Během testování byly odhaleny určité nedostatky návrhu, z nichž některé byly odstraněny úpravami elektrody.

9.1. Měření korokamerou

Korokamera, nebo též UV-kamera, je zařízení, které je schopné zobrazit, zda v daném místě probíhá korónový výboj. Při našich měřeních byla použita korokamera CoroCam 6N. Měření bylo nutné provádět při provozním napětí. Na displeji korokamery se korónový výboj zobrazuje plamínkovým útvarem. Na obr. 9.1 je vidět průběh měření korokamerou.



Obr. 9.1 Měření korokamerou

Korónový výboj byl zaznamenán při napětí vyšším než 28 kV. obr. 9.1a ukazuje, že při absenci korónového prstence probíhá výboj na konci horní a spodní spojky. Na obr. 9.1b je vidět, že po přidání korónového prstence ustal výboj na spodní spojnici. Korónový výboj i přes přidání krytu stále hoří na konci horní spojky, což je vidět na obr. 9.1c. Bylo by vhodné přidat ještě jeden korónový prstenec do horní části přípravku. Po připojení hadic s vodivými polymery jsou okolní podmínky změny a výboj hořet přestane, protože se náboj rozšíří na plastové trubičky. Z toho důvodu nebyl další korónový prstenec přidán.

9.2. Prověřování toku polymerních roztoků

Tok polymerních roztoků byl zajišťován pomocí čtyř individuálních peristaltických pump. První dvě pumpy byly použity k dopravě roztoků na zvlákňovací hlavy a druhé dvě pumpy k jejich odsávání z elektrody zpět do rezervoáru. Ke zkouškám toku roztoků, byly využity dva roztoky PVB (polyvinylbutyral) v etanolu o hmotnostní koncentraci 10 %, přičemž jeden z roztoků byl obarven berlínskou modří a druhý byl čirý. Roztoky byly po dobu 10 minut volně přeplavovány přes hlavy elektrod. Po uplynutí času nebyla pozorována znatelná změna barvy čirého roztoku. Poté byly ještě prováděny pokusy se zvlákňováním a roztoky stále nejevily změnu barvy, čímž byla prokázána nemísitelnost roztoků uvnitř upínacího přípravku a správná volba tolerancí v uložení trubiček. Roztoky se během zkoušek nemísily ani v oblasti zvlákňovacích hlav.

9.3. Testy zvlákňovacího procesu

Zvlákňovací proces byl prověřován nejdříve s jedním roztokem 10% PVB. Nejprve bylo testováno, zda lze zvlákňovat na každé zvlákňovací hlavě zvlášť a následně bylo vyzkoušeno zvlákňování ze dvou hlav najednou. Tento pokus byl úspěšný. Nanovlákn se vytvářela na každé hlavě elektrody zvlášť a následně i na všech konfiguracích

navržené elektrody. Během zavádění polymerních roztoků na hlavy elektrod se ukázalo, že navržený vrcholový úhel kuželů zvlákňovacích hlav je citlivý na smáčivost a může dojít k nežádoucímu skápnutí roztoku. Po zavedení polymerních roztoků již ke skapávání nedocházelo.

9.4. Měření kritických napětí

Po ověření funkčnosti elektrody se stejným polymerním roztokem byla provedena měření kritických napětí. V rámci tohoto měření byla změřena napětí startovací a napětí minimální. Startovací napětí je napětí, při kterém na elektrodě začne zvlákňovací proces. Toto napětí je vždy vyšší než napětí, při kterém může zvlákňovací proces následně probíhat. Na počátku zvlákňovacího procesu je tedy nutné překonat určitou kritickou mez napětí. Minimální napětí je hodnota, při které zvlákňovací proces na elektrodě ustane. Pro opětovné započetí zvlákňovacího procesu je nutné opět překonat kritickou hodnotu napětí.

Měření bylo provedeno s 10% roztokem polyvinylbutyralu v etanolu, při teplotě 23°C a relativní vzdušné vlhkosti 37 %. Elektrické napětí bylo měřeno pomocí voltmetru zabudovaného do testovacího zařízení. Průběh měření konfigurace elektrody s oběma hlavami o vysoké intenzitě je v tabulce 3. Výsledky měření ostatních konfigurací elektrody jsou uvedeny v příloze.

Tabulka 3 Kritická napětí elektrody s hlavami o vysoké intenzitě elektrického pole

číslo měření	Startovní napětí [kV]	Minimální napětí horní hlava[kV]	Minimální napětí horní hlava [kV]
1	30,5	16,8	23,5
2	30,45	16,8	22,7
3	30,5	16,8	23,3
4	28	16,8	23,1
5	28,3	16,9	23,5
6	28,45	16,88	23,1
7	28,2	16,7	23,2
8	28,4	16,75	23,2
9	28,2	16,4	22,9
10	24	16,75	23,4
průměr	28,5	16,76	23,19
směrodatná odchylka	1,80	0,13	0,24

Tímto způsobem byly měřeny všechny kombinace dvojic hlav. V tabulce 4 jsou výsledky měření všech kombinací zvlákňovacích hlav. Startovací napětí bylo pro obě hlavy vždy stejné i v případech, kdy byly použity kombinace hlav z různých sad. Oproti tomu minimální napětí byla vždy rozdílná pro testované hlavy.

Tabulka 4 Kritická napětí všech kombinací hlav elektrod

		Startovací napětí [kV]	Minimální napětí horní hlava[kV]	Minimální napětí horní hlava [kV]
sada s vyšší intenzitou elektrického pole	průměr	28,5	16,8	23,2
	směr. odch.	1,80	0,13	0,24
Horní hlava s nižší intenzitou spodní hlava s vyšší intenzitou	průměr	33,4	18,1	23,3
	směr. odch.	1,05	0,41	0,48
Horní hlava s vyšší intenzitou spodní hlava s nižší intenzitou	průměr	29,6	17,2	23,2
	směr. odch.	0,87	0,38	0,26
sada s nižší intenzitou elektrického pole	průměr	33,9	18,1	24,2
	směr. odch.	0,17	0,22	0,19

Výsledky těchto testů jsou velmi zajímavé. Nejzajímavější výsledky byly naměřeny při měření konfigurace horní hlavy s nižší intenzitou a spodní hlavy s vyšší intenzitou. U této konfigurace byla minimální hodnota elektrického napětí horní elektrody vždy nižší, než na spodní elektrodě s vyšší intenzitou.

10. Ověření matematických modelů

Jak bylo popsáno výše, geometrie hlav elektrod byla navržena na základě analýz elektrického pole. Výrazným problémem těchto analýz je, neznámost správné okrajové podmínky v okolí elektrody.

Pro průběh zvlákňovacího procesu je nutná alespoň minimální velikost intenzity elektrického pole. V [21] je uveden výpočet minimální hodnoty intenzity elektrického pole k průběhu zvlákňovacího procesu jako:

$$E_c = \sqrt[4]{\frac{4\gamma\rho g}{\varepsilon^2}}$$

Kde γ odpovídá povrchovému napětí roztoku, ρ je hustota polymerního roztoku, g je tíhové zrychlení a ε je permitivita vzduchu. Tato hodnota intenzity by měla odpovídat minimálnímu kritickému napětí uvedenému v kapitole 8.4. Během těchto měření byly pořízeny snímky hlav s hladinami polymerních roztoků před zvlákňováním a během zvlákňovacího procesu. Byla změřena hustota a povrchové napětí použitého roztoku. Hustota byla měřena sadou hustoměrů s různými rozsahy. Hodnota hustoty byla změřena na $\rho = 820 \text{ kg/m}^3$ pomocí hustoměru s rozsahem $850 - 720 \text{ kg/m}^3$. Povrchové napětí bylo měřeno bublinkovou metodou pomocí přístroje Krüss BP50. Měření bylo opakováno desetkrát. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5 Naměřené hodnoty povrchového napětí

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
Povrchové napětí [mN/m]	40,6	40,5	40,7	40,8	41,6	42	39,9	41,4	42,2	42,5	41,2

Tyto naměřené hodnoty byly dosazeny do vztahu pro kritickou intenzitu elektrického pole a byla vypočtena hodnota $E_c = 2021 \text{ V/mm}$.

10.1. Tvorba polymerních hladin v modelu

Geometrie hladin polymerních roztoků na jednotlivých hlavách byly vytvořeny pomocí fotografií pořízených během měření kritických napětí. Fotografie každé konfigurace byly zmenšeny tak, aby rozměrově odpovídaly velikosti CAD modelu v programu Creo. Polymerní hladiny byly obkresleny pomocí spojitě křivky. Tvorbu hladin polymerních roztoků je nutné provádět manuálně, čímž jsou do modelu vneseny chyby. Nelze zaručit přesné a opakovatelné přenesení informace z fotografie do modelu hladiny.

10.2. Ověřovací analýzy elektrického pole

Geometrie elektrody s takto vytvořenou hladinou polymerního roztoku byly umístěny do stejných okrajových podmínek jako v návrhových analýzách. Na geometrii elektrod bylo zavedeno povrchové napětí odpovídající minimálnímu kritickému napětí, které bylo změřeno při měření kritických napětí.

10.2.1. Oblouková okrajová podmínka

Výsledky ověřovacích analýz jsou uvedeny v tabulce 6. Z tabulky je patrné, že intenzity elektrického pole pro aplikované minimální kritické napětí spodní elektrody jsou nižší než intenzita kritická. Rozdíl vypočtené kritické intenzity a výsledné hodnoty na horní hlavě získané ze simulací se liší v řádech jednotek procent, kromě sady s nižší intenzitou.

Pro minimální kritická napětí spodní hlavy elektrody hodnoty intenzity neodpovídají vypočtené hodnotě kritické intenzity E_c . Nejpravděpodobnější příčinou této skutečnosti je optická deformace obrazu při pořizování fotografií, jelikož obě hladiny polymerních roztoků byly obkresleny ze stejné fotografie.

Tabulka 6 Intenzity elektrického pole pro obloukovou okrajovou podmínku

Konfigurace	Minimální kritické napětí pro horní hlavu elektrody		Minimální kritické napětí pro spodní hlavu elektrody	
	Intenzita horní hlavy [V/mm]	Intenzita spodní hlavy [V/mm]	Intenzita horní hlavy [V/mm]	Intenzita spodní hlavy [V/mm]
sada s vyšší intenzitou elektrického pole	1958	1709	2454	2363
Horní hlava s nižší intenzitou, spodní hlava s vyšší intenzitou	1930	2130	2485	2742
Horní hlava s vyšší intenzitou, spodní hlava s nižší intenzitou	1966	1690	2653	2280
sada s nižší intenzitou elektrického pole	1836	1754	2454	2363

10.2.2. Ekvidistanční okrajová podmínka

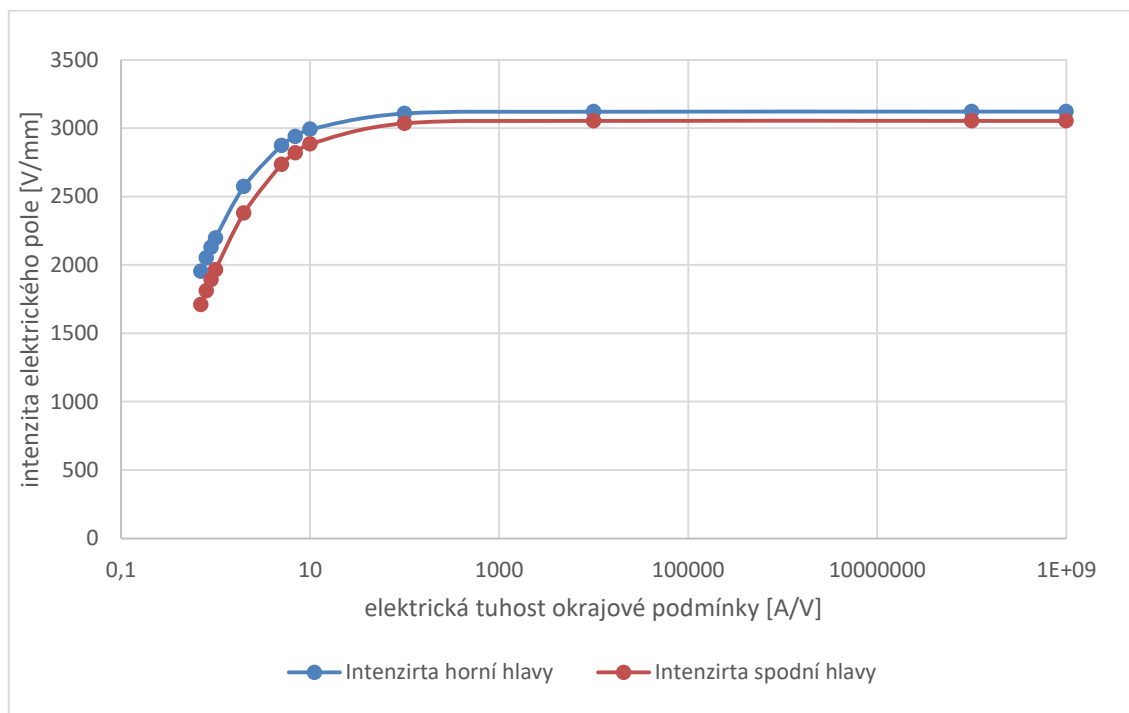
Problémem ekvidistanční okrajové podmínky je její tvar a elektrická tuhost. Tvar ekvidistanční okrajové podmínky zůstal pro všechny konfigurace elektrody stejný (obr. 8.5). Parametrem, kterým se budeme dále zabývat, je elektrická tuhost. Byla

vypracována série analýz elektrického pole s rozdílnou hodnotou elektrické tuhosti. Během těchto analýz bylo jako zdrojové napětí použito minimální kritické napětí horní zvlákňovací hlavy. Výsledné hodnoty intenzity elektrického pole pro sadu s nižší intenzitou jsou v tabulce 7. Závislost intenzity elektrického pole zvlákňovacích hlav sady s nižší intenzitou na elektrické tuhosti okrajové podmínky je na grafu 1.

Tabulka 7 Intenzity elektrického pole v závislosti na elektrické tuhosti ekvidistanční okrajové podmínky

Elektrická tuhost [A/V]	0,7	0,8	0,9	1	2	5	7	10	10^2	10^4	10^8	10^9
Intenzita horní hlavy [V/mm]	1953	2050	2128	2197	2572	2873	2939	2991	3107	3120	3121	3121
Intenzita spodní hlavy [V/mm]	1710	1811	1892	1965	2378	2735	2818	2884	3035	3053	3053	3053

Graf 1 Závislost intenzity elektrického pole na elektrické tuhosti ekvidistanční okrajové podmínky



Tabulky a grafy ostatních konfigurací jsou v přílohách. Při hodnotách elektrické tuhosti okolí v rozmezí 0,7 – 0,9 A/V byly výsledné hodnoty intenzity elektrického pole na horních hlavách elektrody přibližně rovny nebo byly nižší než vypočtená kritická intenzita.

11. Testy s různými polymerními roztoky

Při dalších testech již byly používány dva druhy různých polymerních roztoků. Tyto testy ukázaly limity aplikovatelnosti námi navržené elektrody.

Při prvních testech s různými polymerními roztoky byl použit 10% roztok PVB (polyvinylbutyral) v etanolu a 10% roztok PVA (polyvinylalkohol) ve vodě obarvený berlínskou modří. Polyvinylbutyral je polymerní látka rozpustná v etanolu, pokud ale přijde do kontaktu s vodou, tak se utvoří bílá sraženina. Polyvinylalkohol je naopak rozpustný ve vodě a při kontaktu s etanolem dochází k jeho sražení.

Tato dvojice roztoků byla zvlákňována pomocí různých konfigurací zvlákňovacích hlav. Při přeplavování obou roztoků bez zvlákňování nebyl pozorován výskyt sraženin v žádném z použitých roztoků. Vizuálně bylo ověřeno, že zvlákňovací proces probíhá na obou hlavách elektrody, což můžeme vidět na obr. 10.1. Také je vidět, že na hladině vnější elektrody se formuje velké množství částic. Částice následně zanesly hadicové spojky a zvlákňovací proces musel být přerušen. Naše hypotéza pro tento jev je, že tyto částice vznikají vlivem intenzivního odpařování nevhodných rozpouštědel v okolí elektrody. Nanovláknina při těchto pokusech byla zachycována na rotačním kolektoru. Odebrané vzorky vytvořeného materiálu byly podrobeny další analýze.



Obr. 11.1 Zvlákňování s polymerními roztoky PVB (na horní hlavě) a PVA (na spodní hlavě)

Při dalších testech byla použita jiná kombinace polymerních roztoků. Další pokusy byly provedeny s kombinací polymerních látek rozpustných ve stejných rozpouštědlech. Opět byl použit 10% roztok PVB v etanolu obarvený berlínskou modří v kombinaci s 22,5% roztokem PVAC (polyvinylacetát). S touto kombinací roztoků probíhal zvlákňovací proces bez problémů. Na obr. 10.2 je zřetelně patrné, že nanovlákná se utvářejí na obou hlavách elektrody. Zvlákňovací proces bezproblémově probíhal po 20 minut. Při testování byly opět odebrány vzorky vyrobeného nanovláknenného materiálu, které byly podrobeny další analýze.



Obr. 11.2 Zvlákňování polymerních roztoků PVAC (horní hlava) a PVB (spodní hlava)

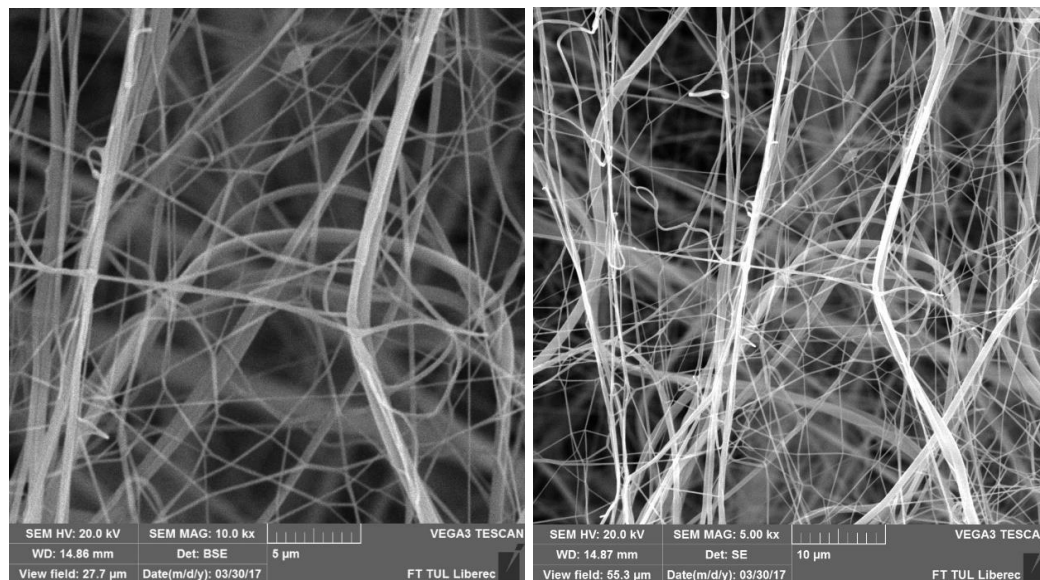
12. Analýza vyrobeného materiálu

Vzorky vyrobeného materiálu, které jsme při pokusech získali, byly podrobeny analýze pomocí elektronové mikroskopie SEM, která byla provedena kolegy z Katedry netkaných textilií.

Berlínská modř, která byla vždy přidána do jednoho z polymerních roztoků, měla umožnit rozlišitelnost různých materiálů při pořizování snímků. Snímky z elektronové mikroskopie však neprokázaly přítomnost dvou různých polymerních vláken. Předpokládá se, že množství použitého barviva nebylo pro prokazatelné zjištění dvou materiálů dostatečné.

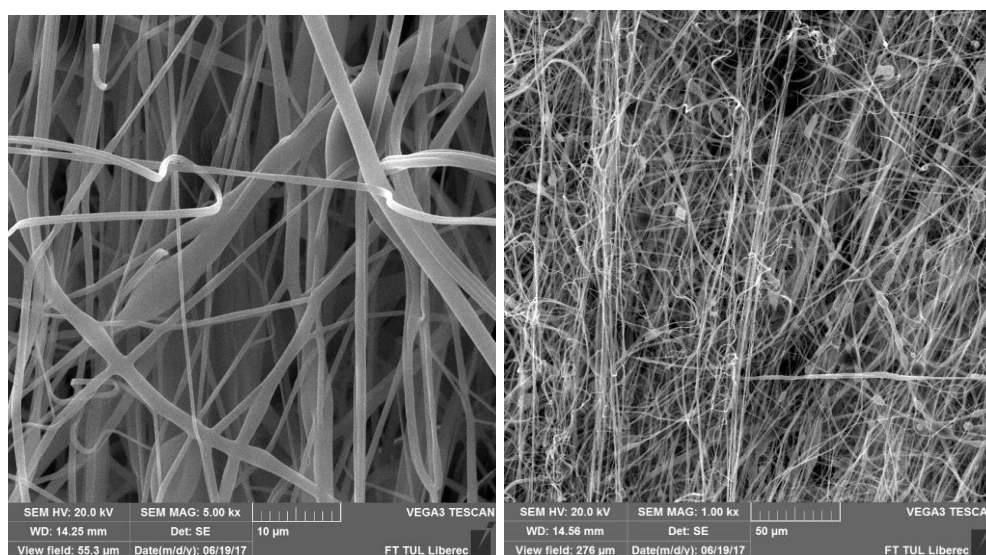
Na obr. 11.1 jsou snímky ze SEM elektronové mikroskopie materiálu vzniklého při zvlákňování roztoků PVB a PVA. Ze snímků je patrné, že ve vzorku se vyskytují vlákna

velice jemná a druhá s výrazně větším průměrem, což nasvědčuje tomu, že vlákna jsou z různých materiálů. Průměr jemnějších nanovláken se pohybuje přibližně v rozmezí 150 – 250 *nm* a průměr hrubších nanovláken je v rozmezí cca 400 – 700 *nm*.



Obr. 12.1 Snímky vzorku ze zvlákňování polymerních roztoků PVA a PVB

Snímky materiálu získaného při zvlákňování roztoků PVAC a PVB je na obr. 11.2. Na snímcích můžeme opět vidět nanovlákná s různými průměry. Uprostřed nanovláken jsou viditelné globuloidní útvary. Jemnější vlákna mají průměr pohybující se přibližně v rozmezí 400 – 700 *nm*. Průměr hrubších vláken se pohybuje v rozmezí cca 900 – 1100 *nm*, což je na hranici 1 μm . Průměry vláken byly měřeny ze snímků pomocí programu ImageJ.



Obr. 12.2 Snímky vzorku ze zvlákňování polymerních roztoků PVAC a PVB

13. Závěr

Úkolem této bakalářské práce byl návrh, zpracování výkresové dokumentace a laboratorní testování nového druhu elektrody pro výrobu směsového nanovláknenného materiálu. Bylo prokázáno, že nově zkonstruovaná elektroda umožňuje zvlákňovat dva různé polymerní roztoky při stejném napětí, což ukazuje správnost návrhu geometrie zvlákňovacích hlav. Elektroda neumožňuje dlouhodobě zvlákňovat dvojici polymerů, jejichž rozpouštědla při zvlákňování způsobují sražení na povrchu jednoho z polymerů (aniž by byly roztoky v kontaktu). Elektroda umožňuje zvlákňování dvojic polymerních roztoků s vhodnými rozpouštědly. Při testech s vhodnou kombinací polymerních roztoků, byla schopna dlouhodobě pracovat při produktivitě nanovláken $0,5 \text{ g/min}$.

Při experimentech bylo také zjištěno, že navržený vrcholový úhel kuželů zvlákňovacích hlav je citlivý na smáčivost a může dojít k nežádoucímu skápnutí roztoku, především při zavádění polymerních roztoků. Pro snadnější obsluhu navrženého zařízení by bylo proto vhodné zajistit vyšší smáčivost přepřavovaného povrchu, nebo optimalizovat geometrii elektrody pro snazší přepřavení roztoku. Další vhodnou úpravou by byla změna způsobu dopravy polymerních roztoků, jelikož příprava peristaltických pum a propojovacích hadic je velice náročná.

Byla úspěšně navržena zvlákňovací elektroda pro výrobu směsového nanovláknenného materiálu metodou AC elektrospinningu. Elektroda umožňuje výrobu nových druhů materiálů. Možné užití těchto materiálů bude pravděpodobně nalezeno v oblasti medicíny. Při experimentech byla elektroda úspěšně provozována bez nutnosti jakéhokoli zásahu po dobu 20 minut, kdy byl vypotřebován veškerý polymer.

Zdroje

- [1] BAJÁKOVÁ, Jana, CHALOUPEK, Jiří a LUKÁŠ, David. „Drawing“- the Production of Individual Nanofibers by Experimental Method. *Nanocon 2011*. [Online] 2011. [Citace:30. 3. 2017.] http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/nanocon_11/lists/papers/1140.pdf.
- [2] RAJKISHORE, Nayak, a další. Recent advances in nanofibre fabrication. *Textile Research Journal*. [Online] 19. 10 2011. [Citace: 30. 3 2017.] <http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0040517511424524>.
- [3] RAMAKRISHNA, Seeram. *An introduction to electrospinning and nanofibers*. New Jersey : World Scientific, 2005. ISBN 981-256-454-3.
- [4] ELLISON, Christopher a PHATAK, Alhad. Melt blown nanofibers: Fiber diameter distributions. *ScienceDirect*. [Online] 10. 4 2007. [Citace: 31. 3 2017.] <https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/689/course/section/777/1-s2.0-S0032386107003540-main.pdf>.
- [5] BAŤKA, Ondřej. *Zařízení na výrobu jádrové příze*. Liberec : Diplomová práce, Technická Univerzita v Liberci, 2015.
- [6] BRANG, James, WILKIE, Arnold a HAGGARD, Jeff. *Method and apparatus for production of meltblown nanofibers*. US20080023888 A1 USA, 31. 1 2008.
- [7] LOZANO, Karen a SARKAR, Kamalaksha. *Superfine fiber creating spinneret and uses thereof*. US8721319 B2 USA, 14. 5 2014.
- [8] HÜBNER, Kamil. *Analýza a optimalizace zařízení na výrobu nanovláken (bakalářská práce)*. Liberec : Technická universita Liberec, 2012.
- [9] MIHÁLIK, Matěj. *Analýza a optimalizace zvláknovací hlavy*. (bakalářská práce) Liberec : Technická universita Liberec, 2013.
- [10] MITCHELL, Geoffrey . *Electrospinning: principles, practice and possibilities*. Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2015.
- [11] JIRSAK, Oldrich, a další. *Method of nanofibres production from a polymer solution using electrostatic spinning and a device for carrying out the method*. WO2005024101 Česká republika, 8. 9 2004.
- [12] ELMARCO s.r.o. ELMARCO s.r.o. [Online] [Citace: 5. 4 2017.] <http://www.elmarco.cz>.
- [13]. MIKEŠ, Petr a LUKÁŠ, David. *Fyzikální principy tvorby nanovláken I*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2015. 55-073-15.
- [14] BERAN, Jaroslav, a další. *Lineární vlákenný útvar s pláštěm z polymerních nanovláken obalujícím nosný lineární útvar tvořící jádro, způsob a zařízení k jeho výrobě*. 306428 Česká republika, 5. 6 2015. zařízení.
- [15] BAŤKA, Ondřej, BERAN, Jaroslav a STRNAD, Michal. *ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THE BALL SHAPED ELECTRODE DESIGNED FOR THE AC-ELECTROSPINNING*. Brno : Technická universita v Liberci, 2016. PB42.
- [16] TEO, Wee-Eong a RAMAKRISHNA, Seeram . Electrospun nanofibers as a platform for multifunctional, hierarchically organized. *Composites Science and Technology*. [Online] 1. 12 2008. [Citace: 21. 4 2017.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353809001651>.

- [17] TIJING, Leonard, a další. Two-Nozzle Electrospinning Fabrication of Bicomponent and Bimodal. *IASEM*. [Online] 26. 8 2012. [Citace: 20. 4 2017.] http://www.i-asem.org/publication_conf/acem12/M3E-2.pdf.
- [18] LIN, Tong, HONGXIA, Wang a XUNGAI, Wang. Self-crimping bicomponent nanofibres electrospun from polyacrylonitrile and elastomeric polyurethane. *Deakin Research Online*. [Online] 2005. [Citace: 21. 4 2017.] <http://dro.deakin.edu.au/view/DU:30003009>.
- [19] VYSLOUŽILOVÁ, Lucie, a další. Design of coaxial needleless electrospinning electr. *Applied Mechanics and Materials*. [Online] 1. 12 2014. [Citace: 21. 4 2017.] <http://citeseerx.ist.psu.edu>.
- [20] SKŘIVÁNEK, Josef. *Design of electrode for coaxial electrospinning*. Brno : Technical university of Liberec, 2016.
- [21] VALTERA, Jan, a další. *Protrusion of the Rod Electrode in the Electrospinning Process*. [<http://dx.doi.org/10.1155/2015/301636>] Liberec : Technical University of Liberec, 2015. 301636.
- [22] POKORNY, P a další. *Effective AC needleless and collectorless electrospinning for yarn production*. místo neznámé : Physical chemistry chemical physics, 2014. Sv. 16. 26816-26522.

Seznam příloh

A	Tabulky naměřených hodnot kritických napětí.....	48
B	Tabulky vypočtených hodnot kritických intenzit elektrického pole.....	50
C	Grafy závislostí intenzity elektrického pole na elektrické tuhosti ekvidistantní okrajové podmínky	51
D	Obsah DC-ROM	53
E	Výkresová dokumentace	

Příloha A Tabulky naměřených hodnot kritických napětí

Tabulka 8 Kritická napětí elektrody s hlavami o nízké intenzitě elektrického pole

číslo měření	Startovní napětí [kV]	Minimální napětí horní hlava[kV]	Minimální napětí horní hlava [kV]
1	33,8	18,6	24,2
2	33,5	18,1	24,2
3	33,7	17,9	24,3
4	33,85	18	24,15
5	33,9	18	24,4
6	34	18,3	24,4
7	33,9	18	24,1
8	33,9	18,1	24,1
9	34,2	18,3	24,6
10	33,9	17,8	23,9
průměr	33,9	18,1	24,2
směrodatná odchylka	0,2	0,2	0,2

Tabulka 9 Kritická napětí elektrody s horní hlavou o vysoké a spodní hlavou o nízké intenzitě elektrického pole

číslo měření	Startovní napětí [kV]	Minimální napětí horní hlava[kV]	Minimální napětí horní hlava [kV]
1	30,3	17,15	23,1
2	30,8	16,8	23,7
3	30,5	17,1	22,8
4	29,7	17,8	23,3
5	28,9	16,6	23,3
6	28,2	17,8	23,3
7	30,5	17,25	23
8	28,6	17,4	23,2
9	29	16,8	23,4
10	29,2	17,08	22,8
průměr	29,6	17,2	23,2
směrodatná odchylka	0,9	0,4	0,3

Tabulka 10 Kritická napětí elektrody s horní hlavou o nízké a spodní hlavou o vysoké intenzitě elektrického pole

číslo měření	Startovní napětí [kV]	Minimální napětí horní hlava [kV]	Minimální napětí horní hlava [kV]
1	33,4	18,3	23,6
2	34,1	17,5	23,5
3	34,5	18,2	23,4
4	31,1	18,2	22,1
5	31,8	18,2	23,7
6	33,5	18,7	23,7
7	33,9	18,4	23,5
8	34	17,3	23,4
9	34	18,4	22,8
10	34,1	17,8	23
průměr	33,4	18,1	23,3
směrodatná odchylka	1,0	0,4	0,5

Příloha B Tabulky vypočtených hodnot kritických intenzit elektrického pole

Tabulka 11 Intenzita elektrického pole v závislosti na elektrické tuhosti ekvidistantní okrajové podmínky pro sadu s vyšší intenzitou elektrického pole

Elektrická tuhost [A/V]	0,8	0,9	1	2	5	7	10	10 ²	10 ⁴	10 ⁸	10 ⁹
Intenzita horní hlavy [V/mm]	2036	2117	2186	2567	2875	2943	2997	3117	3131	3131	3131
Intenzita spodní hlavy [V/mm]	1716	1793	1861	2249	2584	2658	2723	2866	2871	2871	2871

Tabulka 12 Intenzita elektrického pole v závislosti na elektrické tuhosti ekvidistantní okrajové podmínky pro horní hlavu s vyšší a spodní hlavu s nižší intenzitou elektrického pole

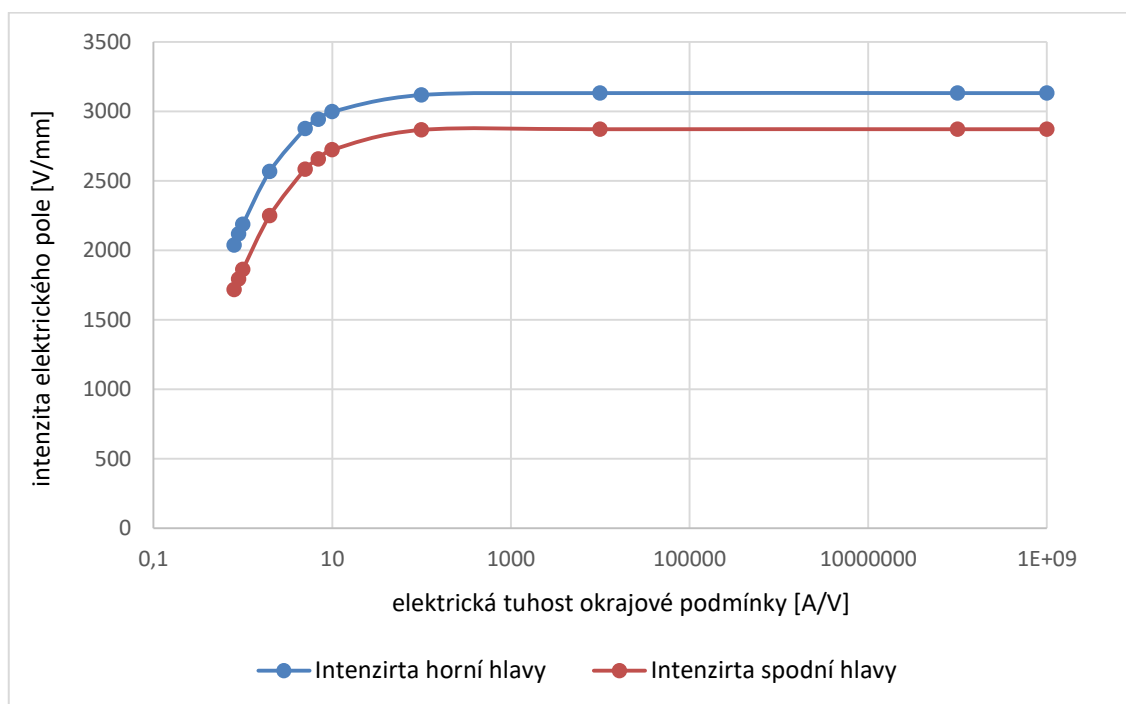
Elektrická tuhost [A/V]	0,7	0,8	0,9	1	2	5	7	10	10 ²	10 ⁴	10 ⁸	10 ⁹
Intenzita horní hlavy [V/mm]	1977	2070	2149	2217	2589	2884	2949	3000	3114	3127	3127	3127
Intenzita spodní hlavy [V/mm]	1616	1706	1782	1845	2225	2547	2922	2682	2817	2833	2834	2834

Tabulka 13 Intenzita elektrického pole v závislosti na elektrické tuhosti ekvidistantní okrajové podmínky pro horní hlavu s nižší a spodní hlavu s vyšší intenzitou elektrického pole

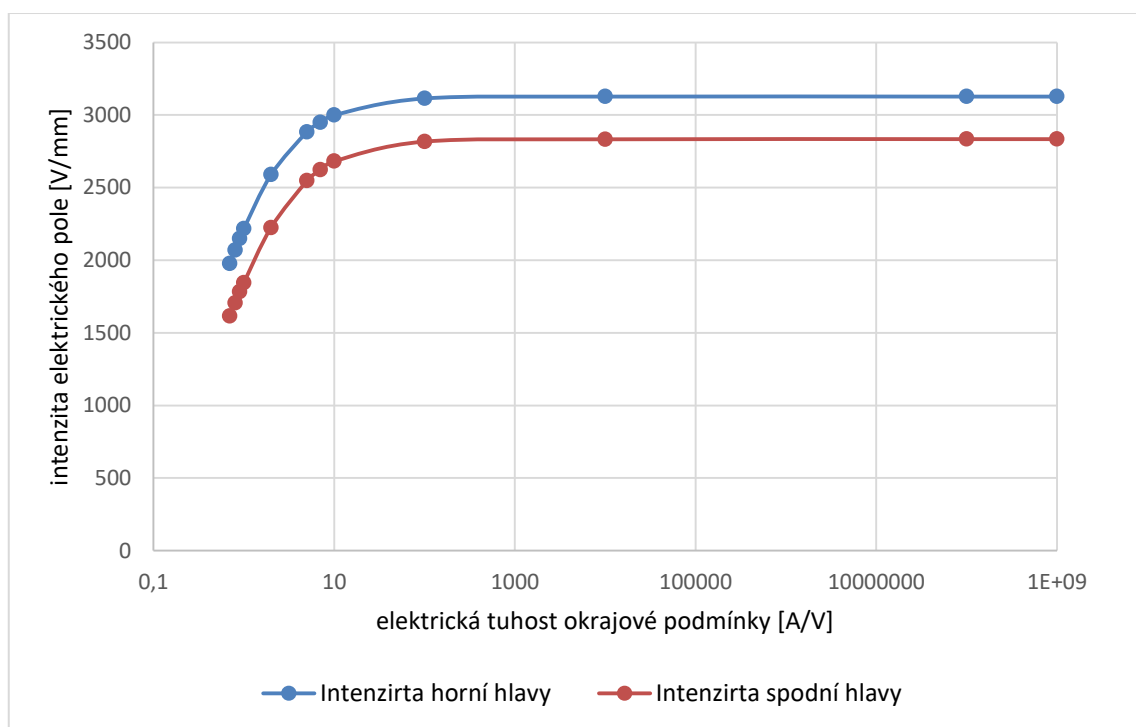
Elektrická tuhost [A/V]	0,8	0,9	1	2	5	7	10	10 ²	10 ⁴	10 ⁸	10 ⁹
Intenzita horní hlavy [V/mm]	2005	2082	2150	2505	2822	2896	2949	3036	3058	3058	3058
Intenzita spodní hlavy [V/mm]	2126	2222	2306	2789	3206	3303	3381	3559	3580	3580	3580

Příloha C Grafy závislostí intenzity elektrického pole na elektrické tuhosti ekvidistantní okrajové podmínky

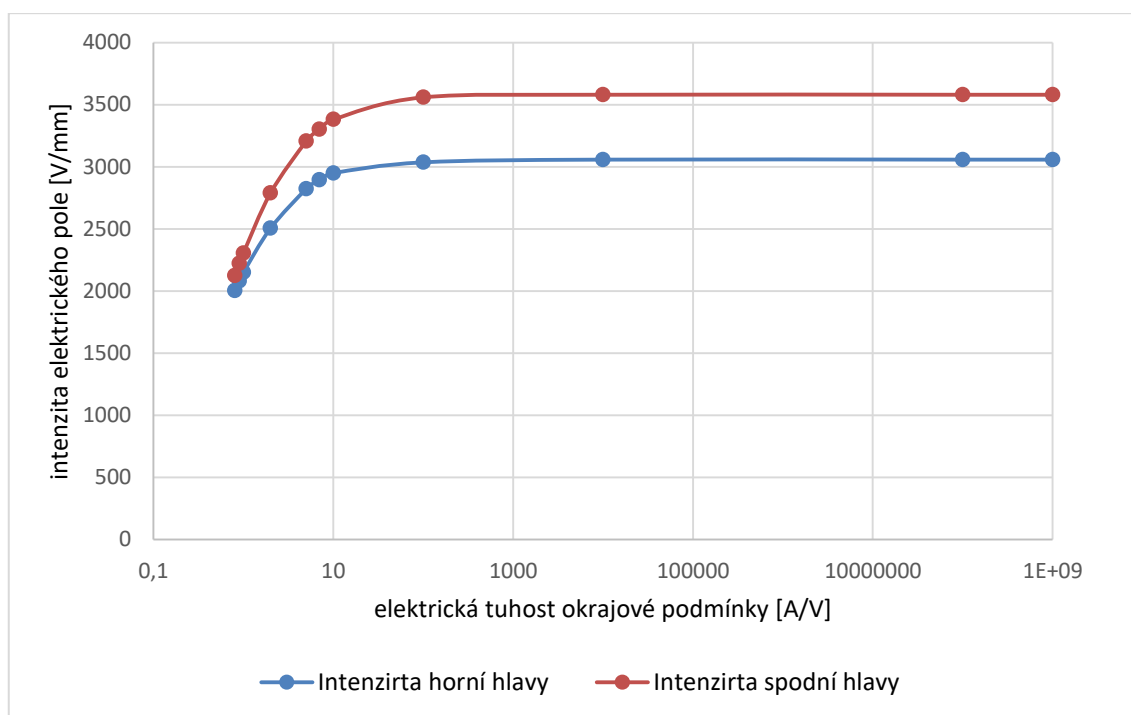
Graf 2 Závislost intenzity elektrického pole na elektrické tuhosti ekvidistantní okrajové podmínky pro sadu s vyšší intenzitou elektrického pole



Graf 3 Závislost intenzity elektrického pole na elektrické tuhosti ekvidistantní okrajové podmínky pro horní hlavu s vyšší a spodní hlavu s nižší intenzitou elektrického pole



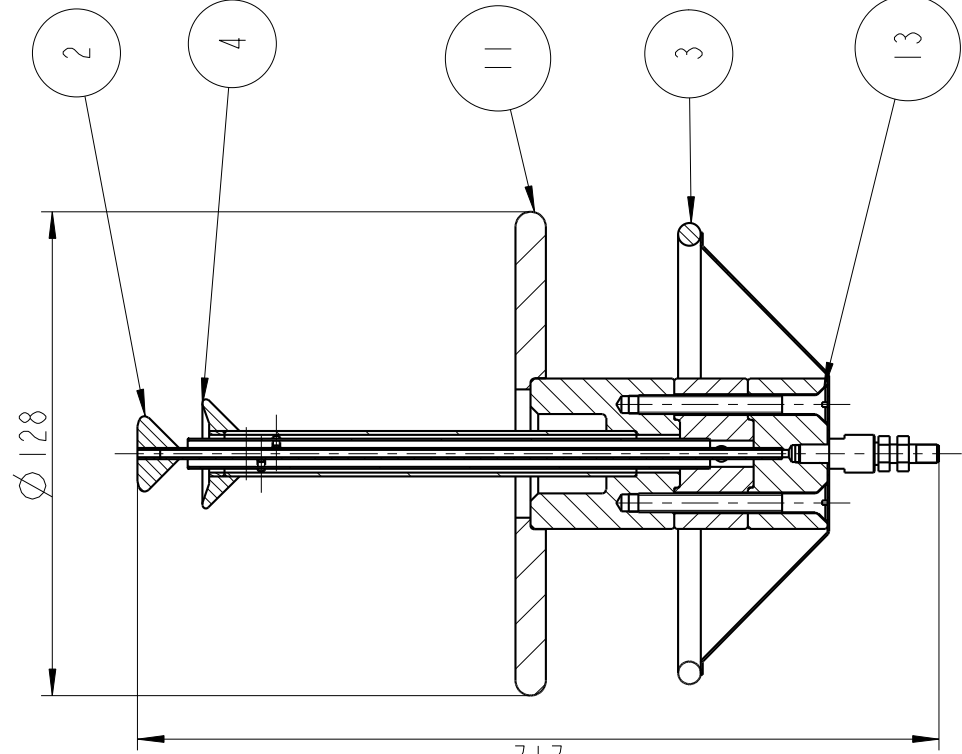
Graf 4 Závislost intenzity elektrického pole na elektrické tuhosti ekvidistanční okrajové podmínky pro horní hlavu s nižší i a spodní hlavu s vyšší intenzitou elektrického pole



Příloha D Obsah CD ROM

- Text bakalářské práce
 - bakalarska_prace_2017_Jiri_Soucek.pdf
 - bakalarska_prace_2017_Jiri_Soucek.docx
 - kopie_zadani_bakalarske_prace_2017_Jiri_Soucek.pdf
- Výkresová dokumentace

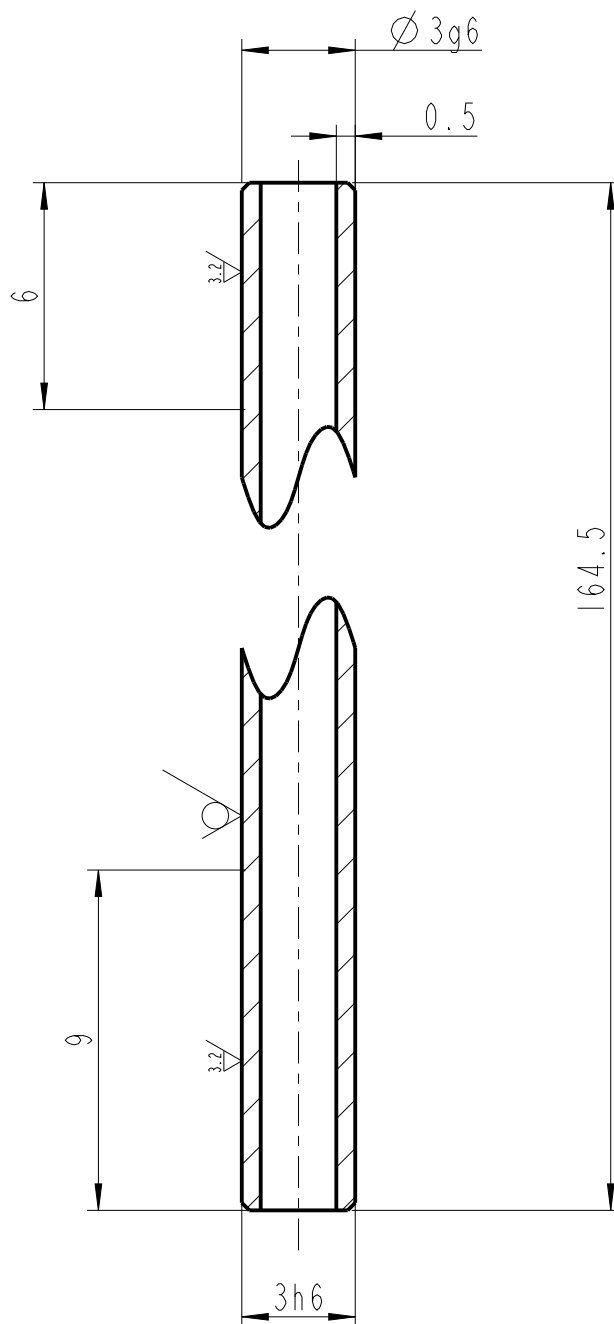
Příloha E Výkresová dokumentace



ODK.	OZNACENÍ VÝKRES LUER_SPOJKA	POLOTOVAR MATERIAL	CÍS. ZASOBNÍKU POZNAMKA	MN. JED.
1	-	-	-	4 KS.
2	BP2016_1_00_ELE_VNITRNI_3000 BP2016_1_00	-	-	1 KS.
3	BP2016_3_00_KOR_PRSTENEC_S BP2016_3_00	-	-	1 KS.
4	BP2016_2A_00_ELE_VNEJSI_3000 BP2016_2A_00	-	-	1 KS.
5	BP2016_0_04_DRZAK_VNI_VSTUP BP2016_0_04	40 CSN 42 7510 CSN 17 024	-	1 KS.
6	BP2016_0_05_DRZAK_VNI_VYSTUP BP2016_0_05	40 CSN 42 7510 CSN 17 024	-	1 KS.
7	BP2016_0_06_DRZAK_VNEJSI BP2016_0_06	40 CSN 42 7510 CSN 17 024	-	1 KS.
8	BP2016_0_03_ELE_VNEJSI_STOPKA BP2016_0_03	Ø 12x1 DIN 2462 CSN 17 024	-	1 KS.
9	BP2016_0_01_ELE_VNITRNI_STOPKA BP2016_0_01	Ø 3x0.5 DIN 2462 CSN 17 024	-	1 KS.
10	BP2016_0_02_TRUBICKA_VLOZ BP2016_0_02	Ø 8x0.5 DIN 2462 CSN 17 024	-	1 KS.
11	BP2016_0_07_KRYT BP2016_0_07	DESKA 8 POLYKARBONAT	-	1 KS.
12	CERVIK_M2X3_5-CSN-EN-24766			3 KS.
13	SROUB_IMBUS_ZAPUSTNY_M5X50			2 KS.

Roz. - Polot.		-	Mater.	-	Tr. odp	-	Přesnost ISO 2768-mK Tolerovaní ISO 80/IS	
C. hm		0.000	Hr. hm.					
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI www.tul.cz								
Změna	Datum	Index	Podpisy					
Název	Navrh	SOUČEK						
Kreslil	Překoušel	Technolog						
Normaliz.	Schválil	Datum						
29-06-2016								

✓ (3.2 /)



NEKOTOVANA SRAZENI 0.2x45°

Roz. -Polot.		Ø 3x170		Ø 3x0.5 DIN 2462			Presnost ISO 2768-mK	
		c)		Mater.	CSN 17 024	Tr. odp	-	
		b)		C. hm	0.000	Hr. hm.		
		a)						
Zmena		Datum	Index	Podpisy				
Meritko	Pocet kusu	Navrh	 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI www.tul.cz					
5:1	1 Ks	Kreslil						Soucek
		Prezkoušel						
C. seznamu		Technolog						
C. sestavy	-	Normaliz.						
Stary vykr.		Schválil	Valtera	Název BP2016_0_01_ELE_VNITRNI_STOPKA				
Novy vykr.		Datum	02-11-2016					Cis. vykresu BP2016_0_01



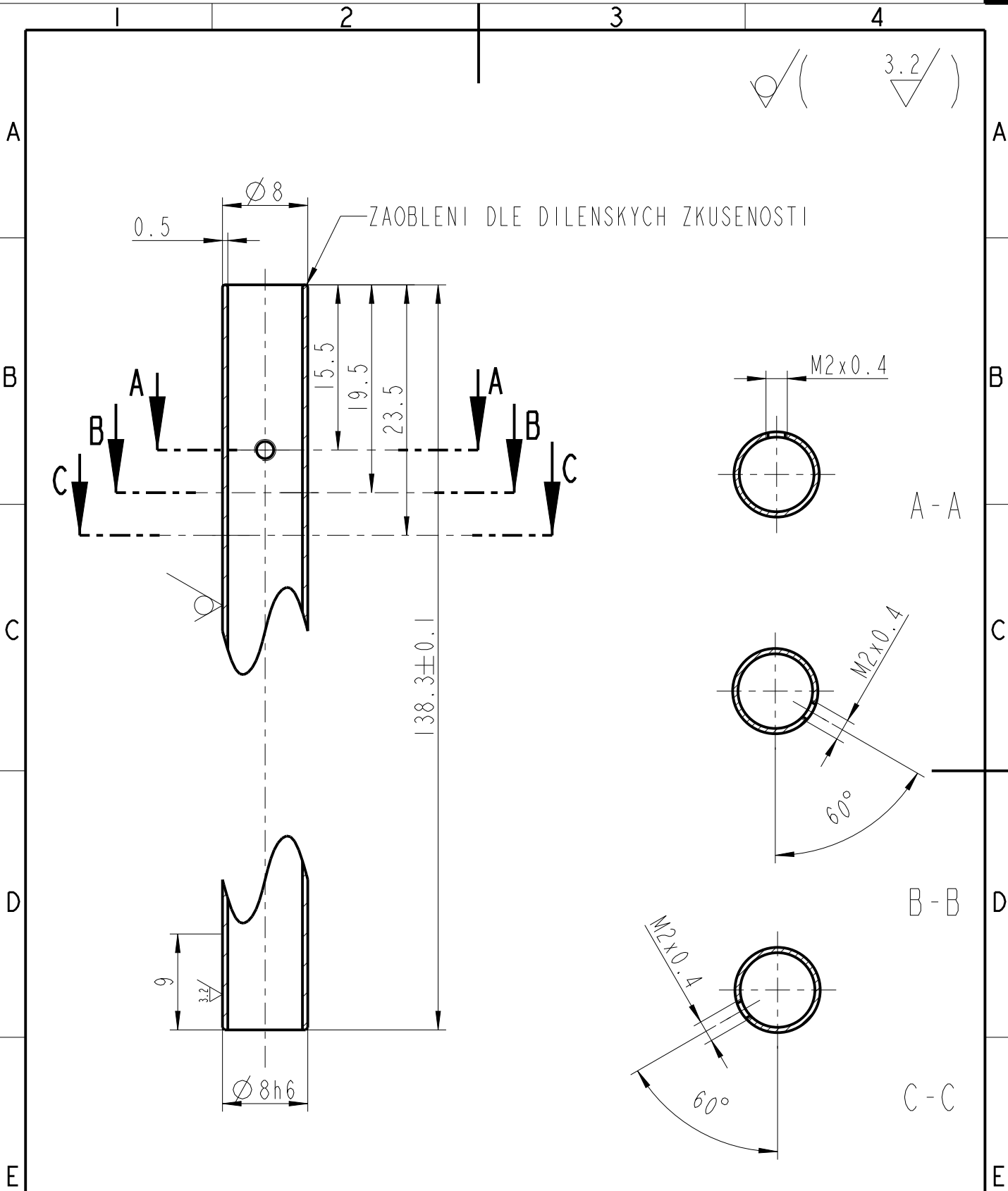
list 1

listul

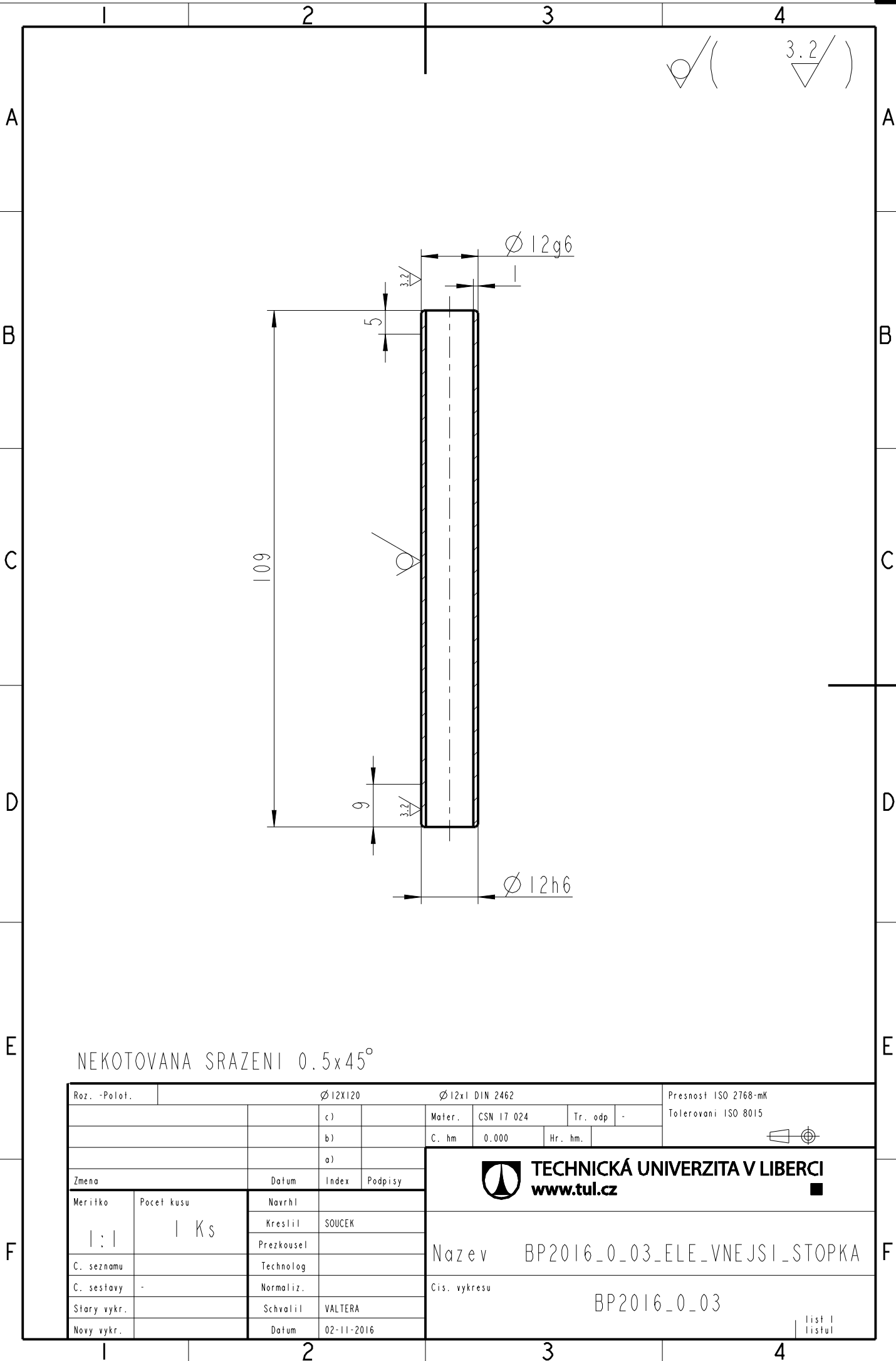
Nazev BP2016_0_01_ELE_VNITRNI_STOPKA

Cis. vykresu BP2016_0_01

list 1
listul



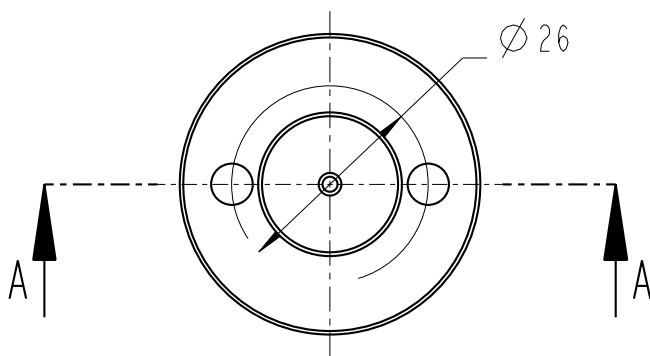
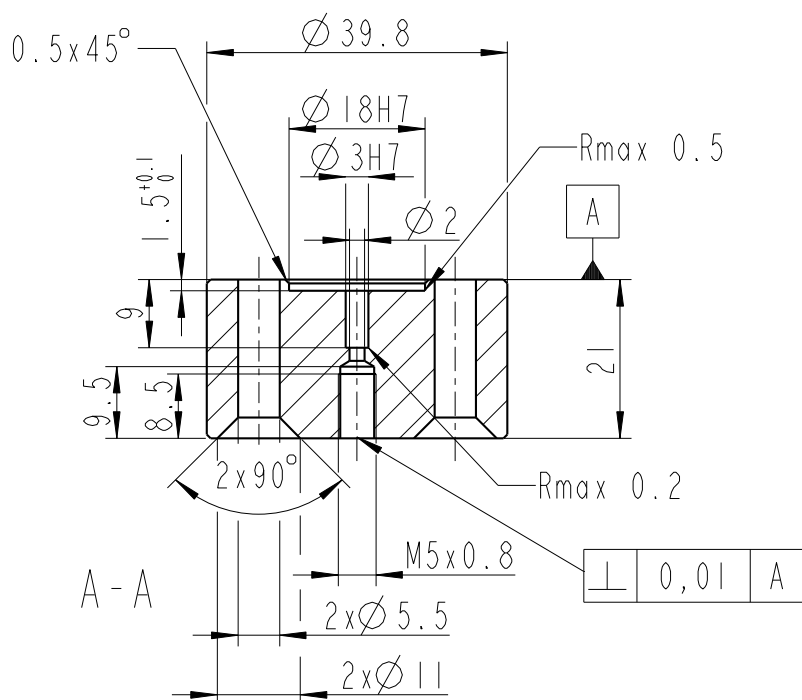
Roz. - Polot.		Ø8x140		Ø8x0.5 DIN 2462			Presnost ISO 2768-mK	
		c)		Mater.	CSN 17 024	Tr. odp	-	Tolerovani ISO 8015
		b)		C. hm	0.000	Hr. hm.		
		a)						
Zmena		Datum	Index	Podpisy				
Meritko 2:1	Pocet kusu 1 Ks	Navrhl						
		Kreslil	SOUCEK					
		Prezkousel						
C. seznamu		Technolog						
C. sestavy	-	Normaliz.						
Stary vykr.		Schvalil	VALTERA					
Novy vykr.		Datum	02-11-2016					
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI www.tul.cz								
Název				BP2016_0_02_TRUBICKA_VLOZ				
Cis. vykresu				BP2016_0_02				
list 1 listul								



Roz. -Polot.		Ø 12x120		Ø 12x1 DIN 2462			Presnost ISO 2768-mK							
		c)		Mater.	CSN 17 024	Tr. odp	-	Tolerovani ISO 8015						
		b)		C. hm	0.000	Hr. hm.								
		a)												
Zmena		Datum	Index	Podpisy										
Meritko	Pocet kusu	Navrh	 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI www.tul.cz 											
1:1	1 Ks	Kreslil							SOUCEK					
		Prezkoušel												
C. seznamu		Technolog	Název BP2016_0_03_ELE_VNEJSI_STOPKA											
C. sestavy	-	Normaliz.							Cis. vykresu BP2016_0_03					
Stary vykr.		Schválil												
Novy vykr.		Datum	02-11-2016											
				list 1 listul										

list 1
listul

3.2 / ()



NEKOTOVANA SRAZENI 0.5x45°

Roz. -Polot.		Ø 40X22		Ø 40 CSN 42 7510			Presnost ISO 2768-mK		
		c)		Mater.	CSN 17 024	Tr. odp	-	Tolerovani ISO 8015	
		b)		C. hm	0.000	Hr. hm.			
		a)							
Zmena		Datum	Index	Podpisy					
Meritko	Pocet kusu	Navrh	 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI www.tul.cz 						
1:1	1 ks	Kreslil							SOUCEK
		Prezkoušel							
C. seznamu		Technolog	Název BP2016_0_04_DRZAK_VNI_VSTUP						
C. sestavy	-	Normaliz.							
Stary vykr.		Schválil							VALTERA
Novy vykr.		Datum	02-11-2016	Cis. vykresu BP2016_0_04					
				list 1 listul					

list 1
listul

Roz. - Poloh.		40X21		40 CSN 42 7510				Presnosti ISO 2768-mK	
		c)		Mater.		CSN 17 024		Tr. odp -	
		b)		C. hm		0.000		Hr. hm.	
		a)							
Zmena		Datum		Index		Podpisy			
Meritko		Pocet kusu		Navrh					
2:1		1 Ks		Kreslil		SOUCEK			
C. seznamu				Prezkousel					
C. sestavy		-		Technolog					
Stary vykr.				Normaliz.					
Novy vykr.				Schvalil		VALTERA			
		Datum		02-11-2016					

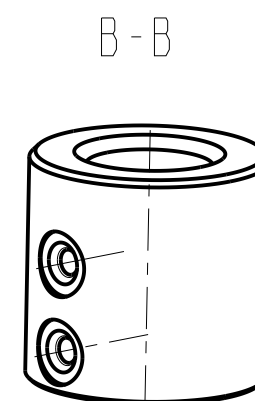
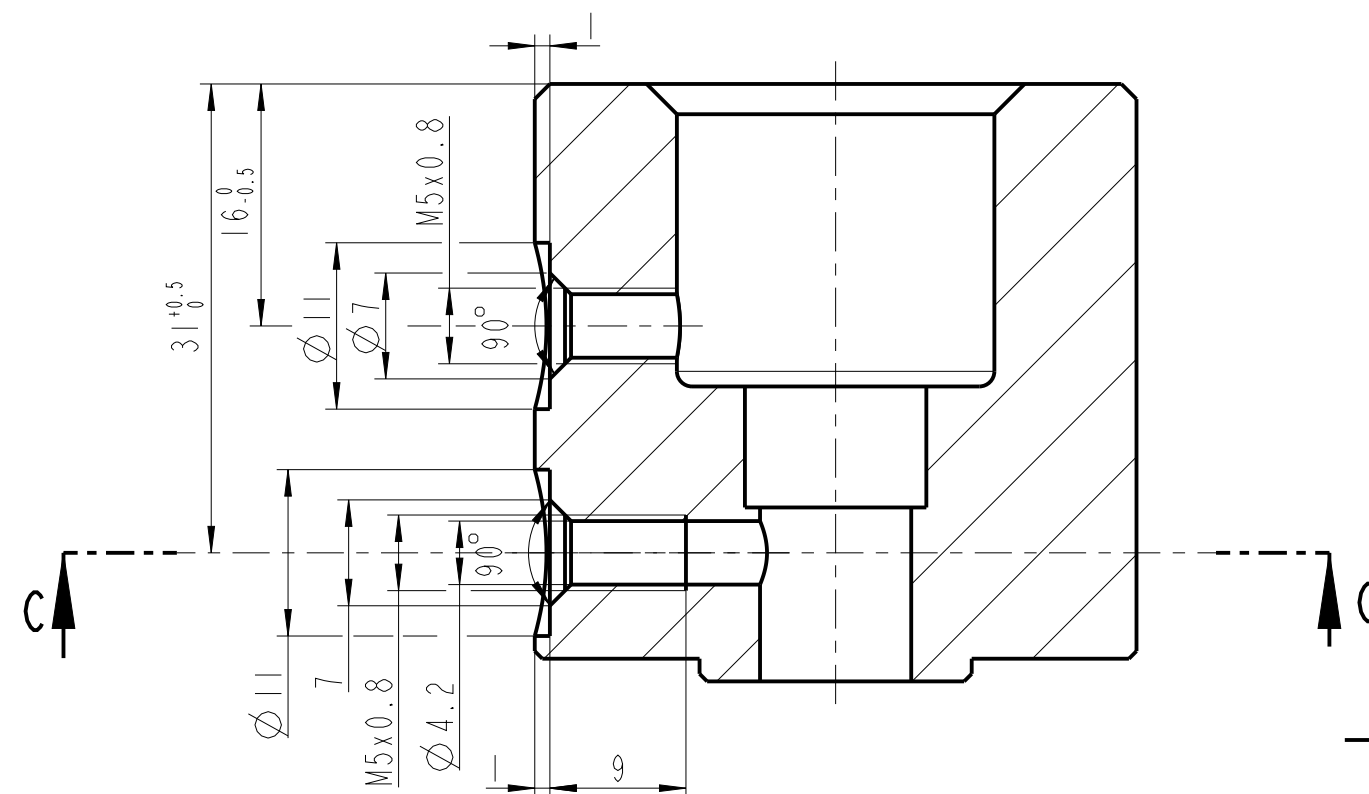
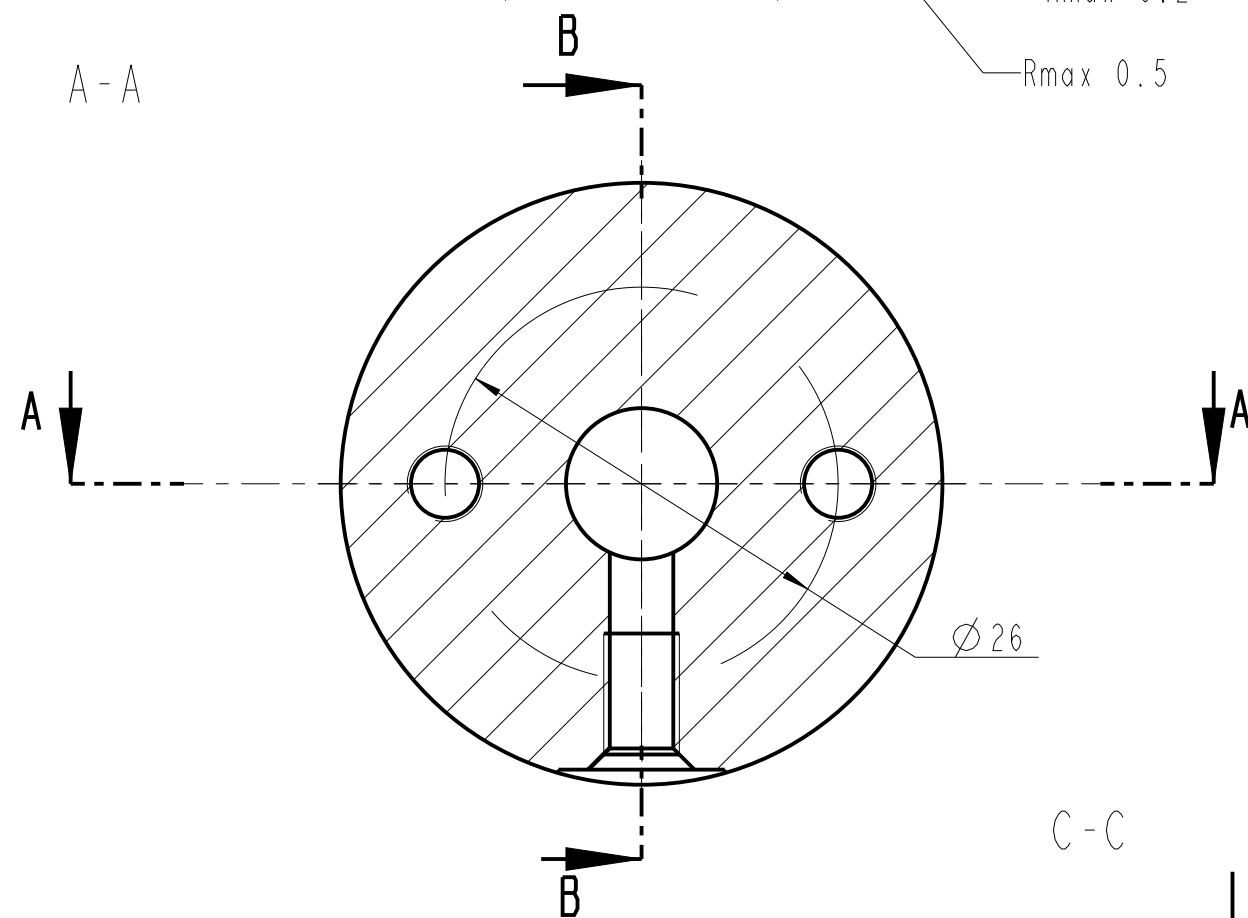
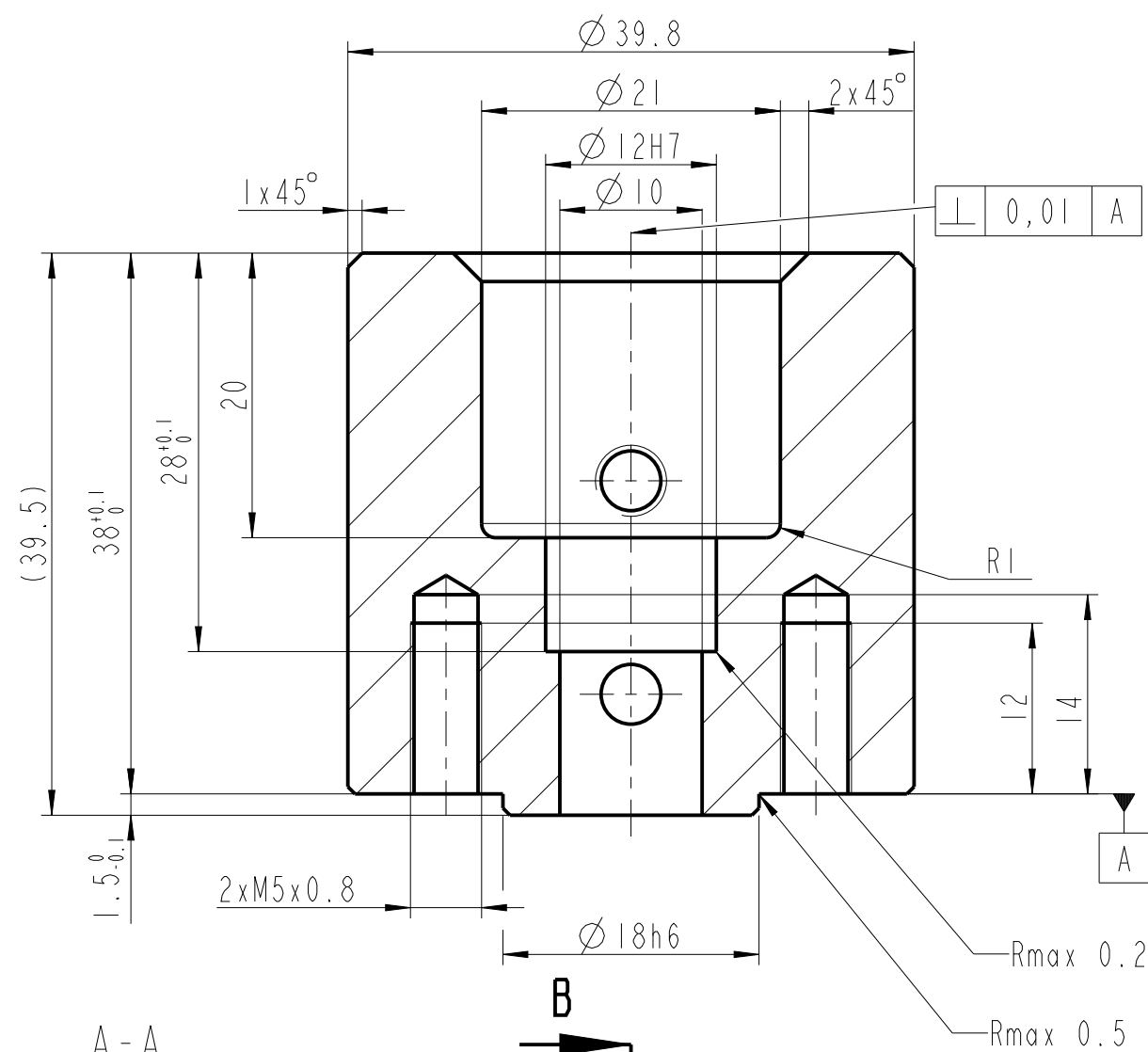


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
www.tul.cz

Nazev	BP2016_0_05-DRZAK-VNI-VYSTU
Cis. vykresu	BP2016_0_05

list 1

listul



NEKOTOVANA SRAZENI $0.5 \times 45^\circ$

Roz. - Polot.		$\varnothing 40 \times 40$		$\varnothing 40$ CSN 42 7510		Presnost ISO 2768-mK	
		c)		Mater. CSN 17 024		Tr. odp. -	
		b)		C. hm. 0.000		Hr. hm.	
		a)					
Zmena		Datum		Index		Podpisy	
Meritko		Pocet kusu		Navrhl			
2:1		1 Ks		Kreslil		SOUCEK	
C. seznamu				Prezkousel			
C. sestavy				Technolog			
Stary vykr.				Normaliz.			
Novy vykr.				Schvalil		VALTERA	
				Datum		16-11-2016	

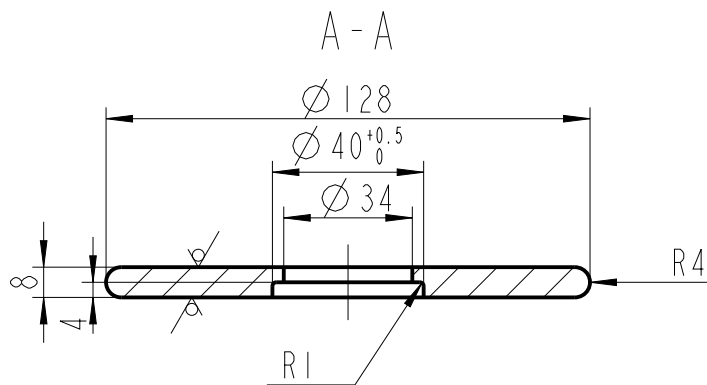
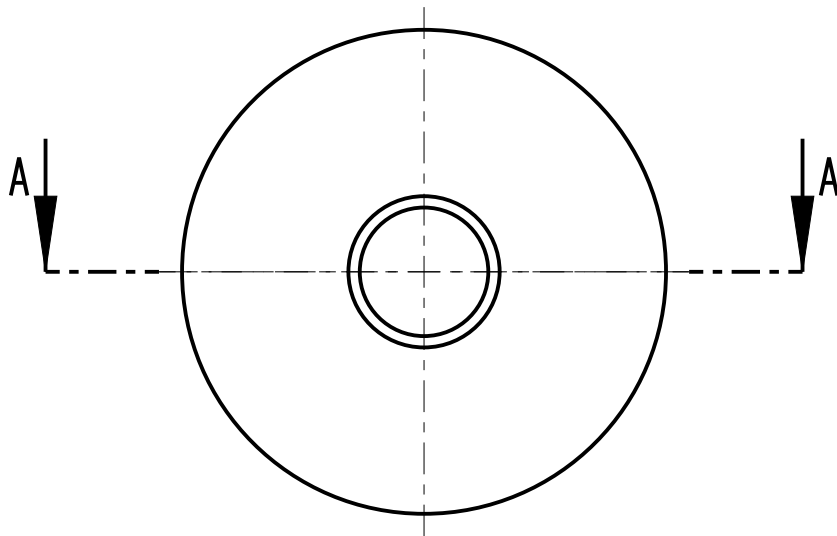
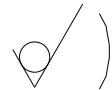
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
www.tul.cz

Nazev BP2016_0_06_DRZAK_VNEJSI

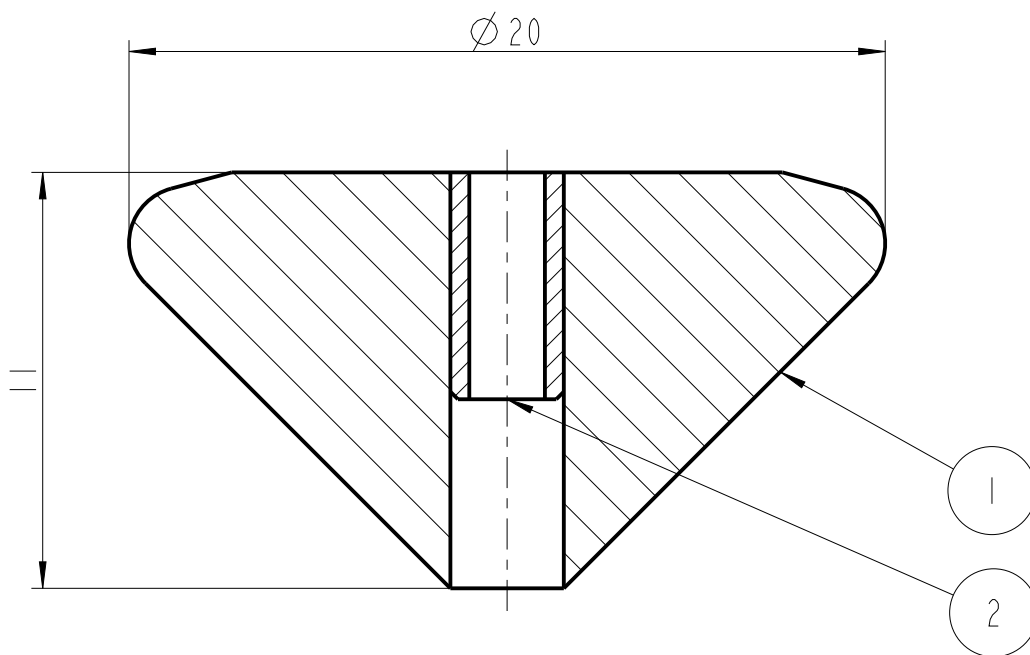
Cis. vykresu BP2016_0_06

list 1
listul

3.2 / (



Roz. - Polot.		130x130				DESKA 8				Presnost ISO 2768-mK			
		c)				Mater.		POLYKARBONAT		Tr. odp		-	
		b)				C. hm		0.000		Hr. hm.			
		a)											
Zmena		Datum		Index		Podpisy		 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI www.tul.cz					
Meritko		Pocet kusu		Navrhl									
1:2		1 ks		Kreslil		SOUCEK							
C. seznamu				Prezkoušel									
C. sestavy		-		Technolog									
Stary vykr.				Normaliz.				Nazev					
Novy vykr.				Schválil		VALTERA		Cis. vykresu					
				Datum		02-11-2016		BP2016_0_07_KRYT					
								BP2016_0_07					
								list 1 listul					



ODK.	OZNACENÍ	POLOTOVAR	CIS. ZASOBNÍKU	MN.
	VYKRES	MATERIAL	POZNAMKA	JED.
1	BP2016_1_01_ELE_VNI_HLA_3000	Ø 22 DIN 671	-	I
	BP2016_1_01	CSN 17 024	-	KS.
2	BP2016_1_02_ELE_VLOZ_VNI_3000	Ø 3.5 DIN 671	-	I
	BP2016_1_02	CSN 17 024	-	KS.

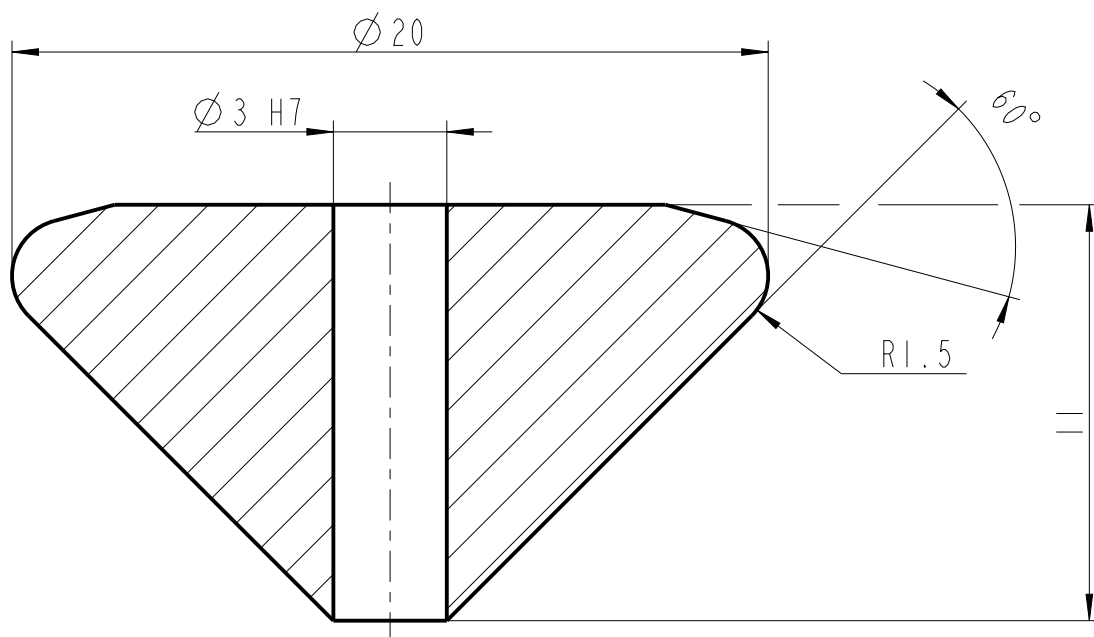
Roz. - Polot.				Presnost ISO 2768-mK	
				Tolerovani ISO 8015	
		c)		Mater.	-
		b)		C. hm	0.000
		a)		Hr. hm.	
Zmena		Datum	Index	Podpisy	
Meritko	Pocet kusu	Navrhl			
5:1	1 Ks	Kreslil	SOUCEK		
C. seznamu		Prezkousel			
C. sestavy	-	Technolog			
Stary vykr.		Normaliz.			
Novy vykr.		Schvalil	VALTERA		
		Datum	23-9-2016		


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
www.tul.cz

Nazev	BP2016_1_00_ELE_VNITRNI_3000
Cis. vykresu	BP2016_1_00

list 1
listul

3.2 / ()

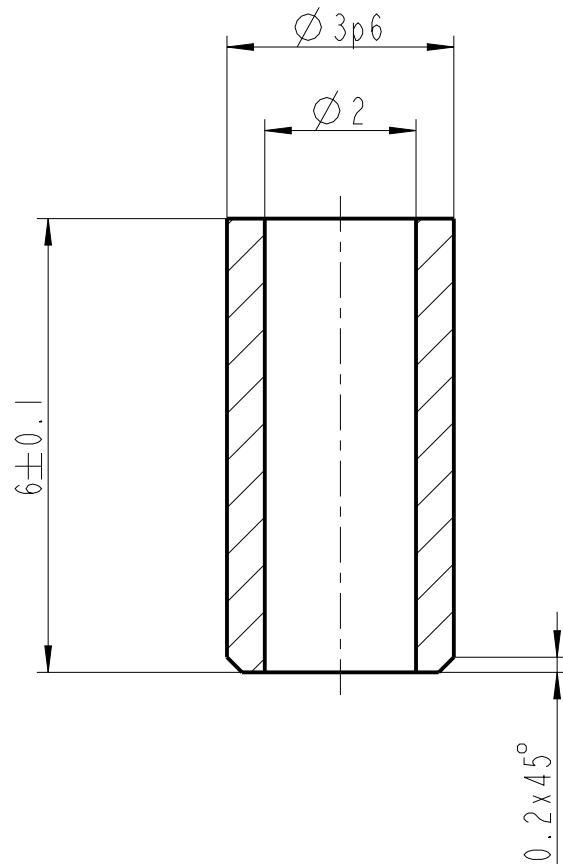


ILUSTRACNI VYKRES, VYROBENO NA STROJI CNC

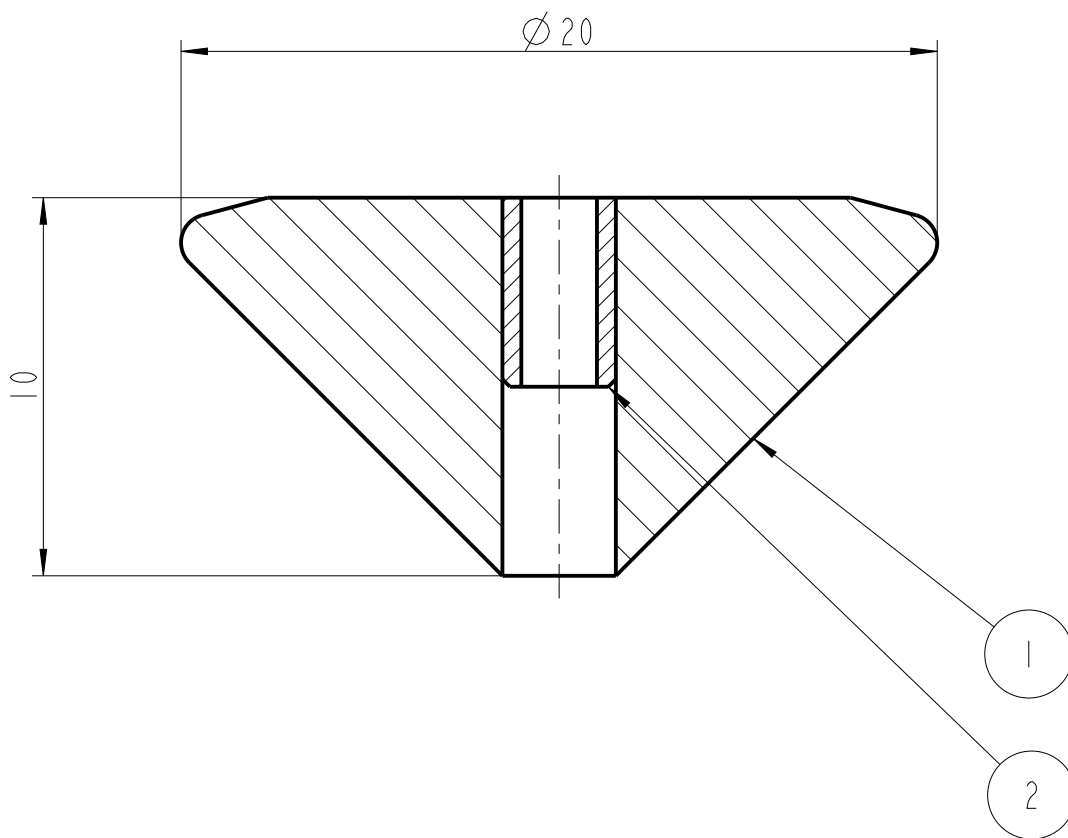
Roz. - Polot.		Ø 22x15		Ø 22 DIN671		Presnost ISO 2768-mK	
		c)		Mater.	CSN 17 024	Tr. odp	-
		b)		C. hm	0.000	Hr. hm.	
		a)					
Zmena		Datum	Index	Podpisy			
Meritko	Pocet kusu	Navrh		 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI www.tul.cz			
5:1	1 Ks	Kreslil SOUCEK					
C. seznamu		Prezkousel		Nazev BP2016_I_01_ELE_VNI_HLA_3000			
C. sestavy	-	Technolog		Cis. vykresu			
Stary vykr.		Normaliz.		BP2016_I_01			
Novy vykr.		Schvalil VALTERA					
		Datum		23-11-2016			

list 1
listul

3.2 / ()



Roz. - Polot.		Ø 3 x 10				Ø 3.5 DIN 671				Presnost ISO 2768-mK			
		c)		Mater.		CSN 17 024		Tr. odp		-		Tolerovani ISO 8015	
		b)		C. hm		0.000		Hr. hm.					
		a)											
Zmena		Datum		Index		Podpisy		TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI www.tul.cz					
Meritko		Pocet kusu		Navrhl									
10:1		1 Ks		Kreslil		SOUCEK							
C. seznamu				Prezkousel									
C. sestavy		-		Technolog									
Stary vykr.				Normaliz.				Naze v BP2016_1_02_ELE_VLOZ_VNI_3000					
Novy vykr.				Schvalil		VALTERA		Cis. vykresu BP2016_1_02					
				Datum		23-9-16		list 1 listul					



ODK.	OZNACENÍ VYKRES	POLOTOVAR MATERIAL	CIS. ZASOBNÍKU POZNAMKA	MN. JED.
1	BP2016_1_01B_ELE_VNI_HLA_4000	Ø 22 DIN 671	-	I
	BP_1_01B	CSN 17 024	-	KS.
2	BP2016_IB_02_ELE_VLOZ_VNIT_4000	Ø 3.5 DIN 671	-	I
	BP2016_IB_02	CSN 17 024	-	KS.

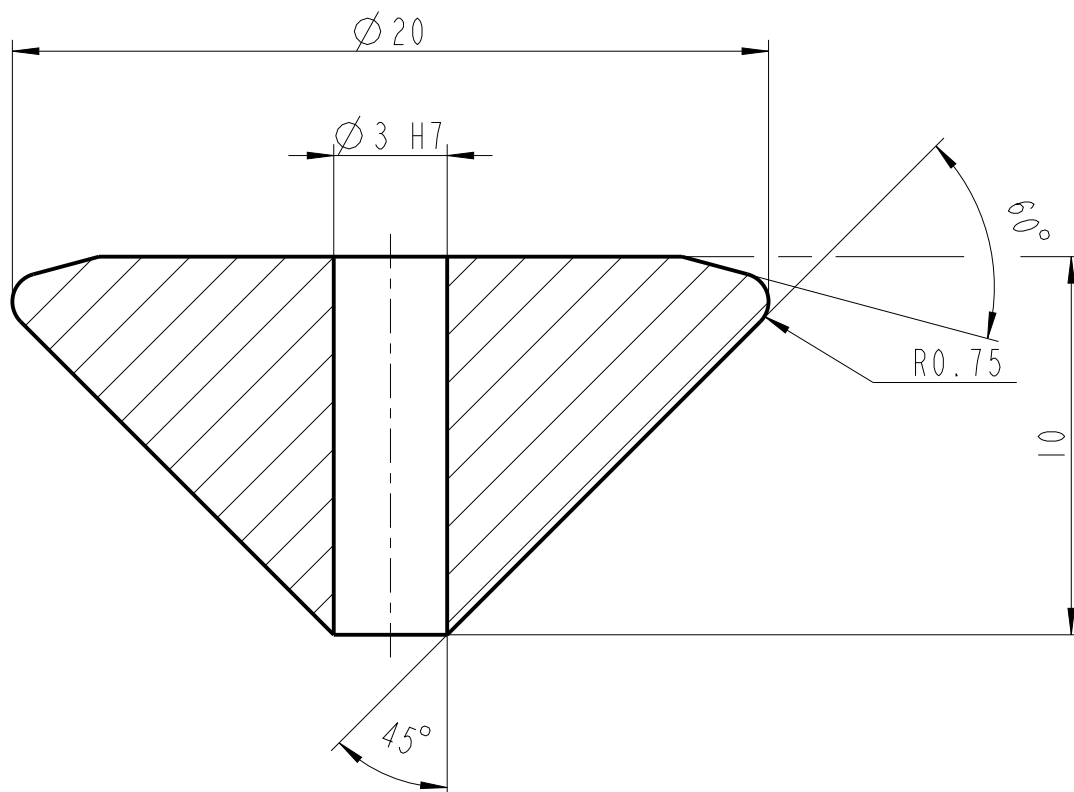
Roz. - Polot.				Presnost ISO 2768-mK	
				Tolerovani ISO 8015	
		c)		Mater.	-
		b)		C. hm	0.000
		a)		Hr. hm.	
Zmena		Datum	Index	Podpisy	
Meritko	Pocet kusu	Navrhl			
5:1	1 Ks	Kreslil	SOUCEK		
C. seznamu		Prezkousel			
C. sestavy	-	Technolog			
Stary vykr.		Normaliz.			
Novy vykr.		Schvalil	VALTERA		
		Datum	23-9-2016		


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
www.tul.cz

Nazev	BP2016_1_00_ELE_VNITRNI_4000
Cis. vykresu	BP2016_1_00

list 1
 listul

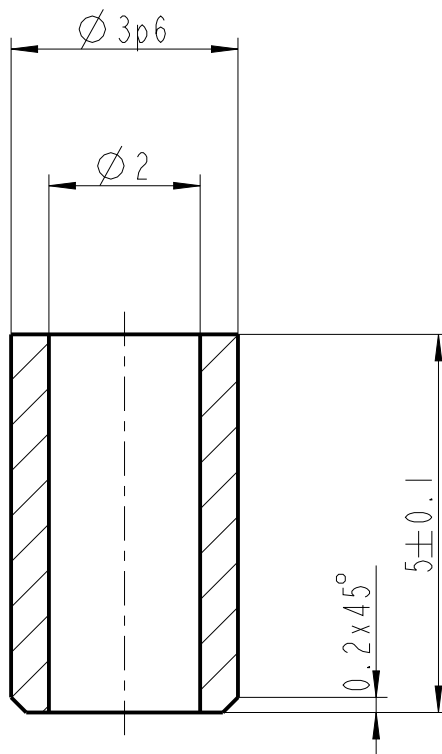
3.2 / ()



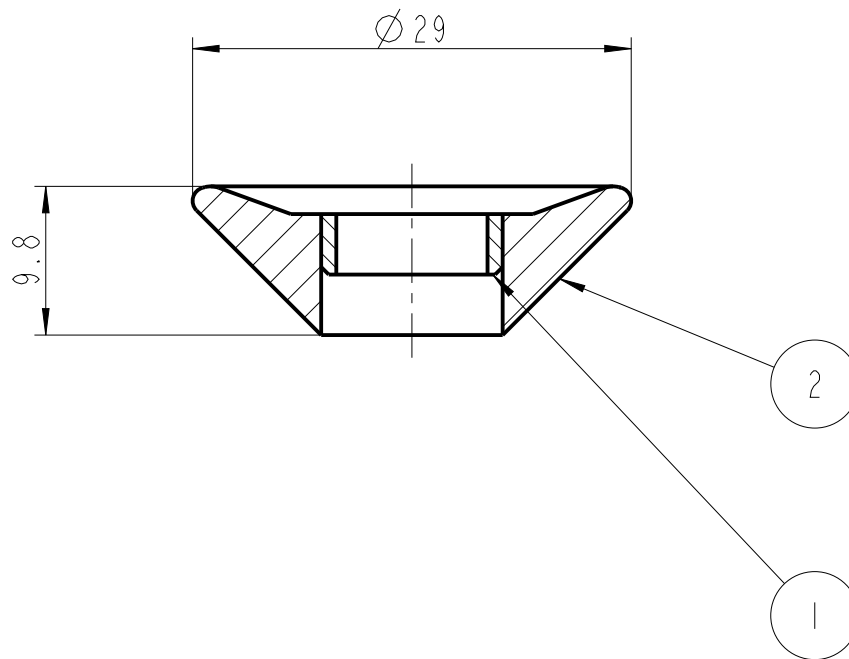
ILUSTACNI VYKRES, VYROBENO NA STROJI CNC

Roz. - Polot.		Ø 22 x 15				Ø 22 DIN 671				Presnost ISO 2768-mK	
		c)		Mater.		CSN 17 024		Tr. odp		Tolerovani ISO 8015	
		b)		C. hm		0.000		Hr. hm.			
		a)									
Zmena		Datum		Index		Podpisy		 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI www.tul.cz			
Meritko		Pocet kusu		Navrhl							
5:1		1 Ks		Kreslil		SOUCEK					
C. seznamu				Prezkoušel							
C. sestavy		-		Technolog							
Stary vykr.				Normaliz.				Název BP2016_I_01B_ELE_VNI_HLA_4000			
Novy vykr.				Schválil		VALTERA		Cis. vykresu BP_I_01B			
		Datum		23-11-2016				list 1 listul			

3.2 / ()



Roz. - Polot.		Ø 3 x 5		Ø 3.5 DIN 671		Presnost ISO 2768-mK			
		c)		Mater.	CSN 17 024	Tr. odp	-		
		b)		C. hm	0.000	Hr. hm.			
		a)							
Zmena		Datum	Index	Podpisy					
Meritko	pocet kusu	Navrh		 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI www.tul.cz					
10:1	1 Ks	Kreslil						SOUCEK	
		Prezkoušel							
C. seznamu		Technolog		Název BP2016_IB_02_ELE_VLOZ_VNIT_4000					
C. sestavy	-	Normaliz.		Cis. vykresu					
Stary vykr.		Schválil		BP2016_IB_02					
Novy vykr.		Datum		list 1 listu 1					
		23-11-2016							



ODK.	OZNACENÍ	POLOTOVAR	CIS. ZASOBNÍKU	MN.
	VYKRES	MATERIAL	POZNAMKA	JED.
1	BP2016_2_02_ELE_VLOZKA_VNE	Ø 14x2 DIN 2463	-	I
	BP2016_2_02	CSN 17 024	-	KS.
2	BP2016_2A_01_ELE_VNE_HLA_3000	Ø 32 DIN 671	-	I
	BP2016_2A_01	CSN 17 024	-	KS.

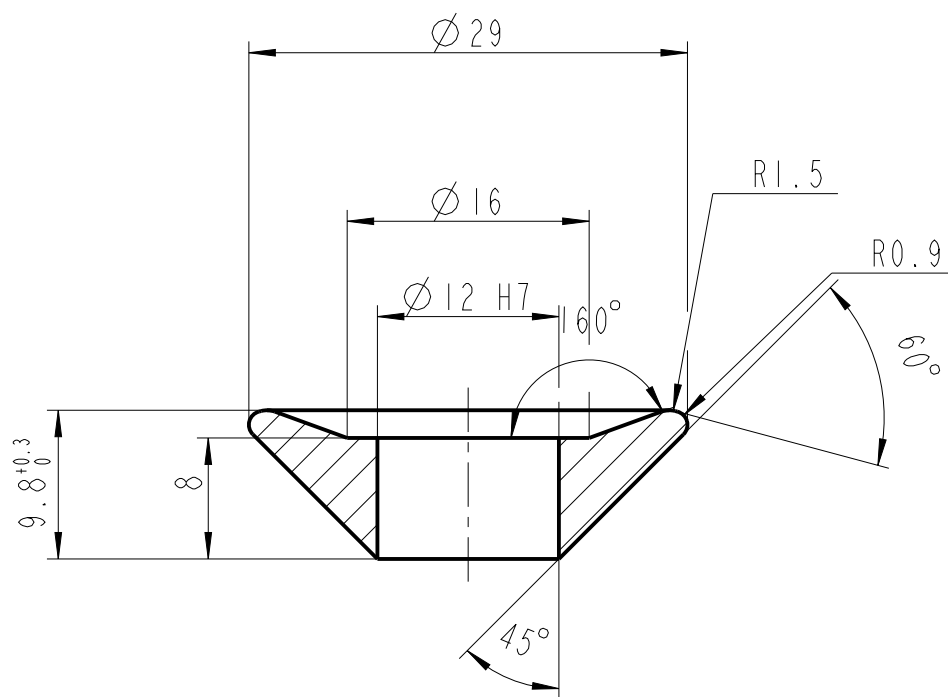
Roz. - Polot.				Presnost ISO 2768-mK	
				Tolerovani ISO 8015	
		c)		Mater.	-
		b)		C. hm	0.000
		a)		Hr. hm.	
Zmena		Datum	Index	Podpisy	
Meritko	Pozn.	Navrhl			
2:1	I Ks	Kreslil	SOUCEK		
C. seznamu		Prezkoušel			
C. sestavy	-	Technolog			
Stary vykr.		Normaliz.			
Novy vykr.		Schválil	VAITERA		
		Datum	23-9-2016		


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
www.tul.cz

Název	BP2016_2A_00_ELE_VNEJSI_3000
Cis. vykresu	BP2016_2A_00

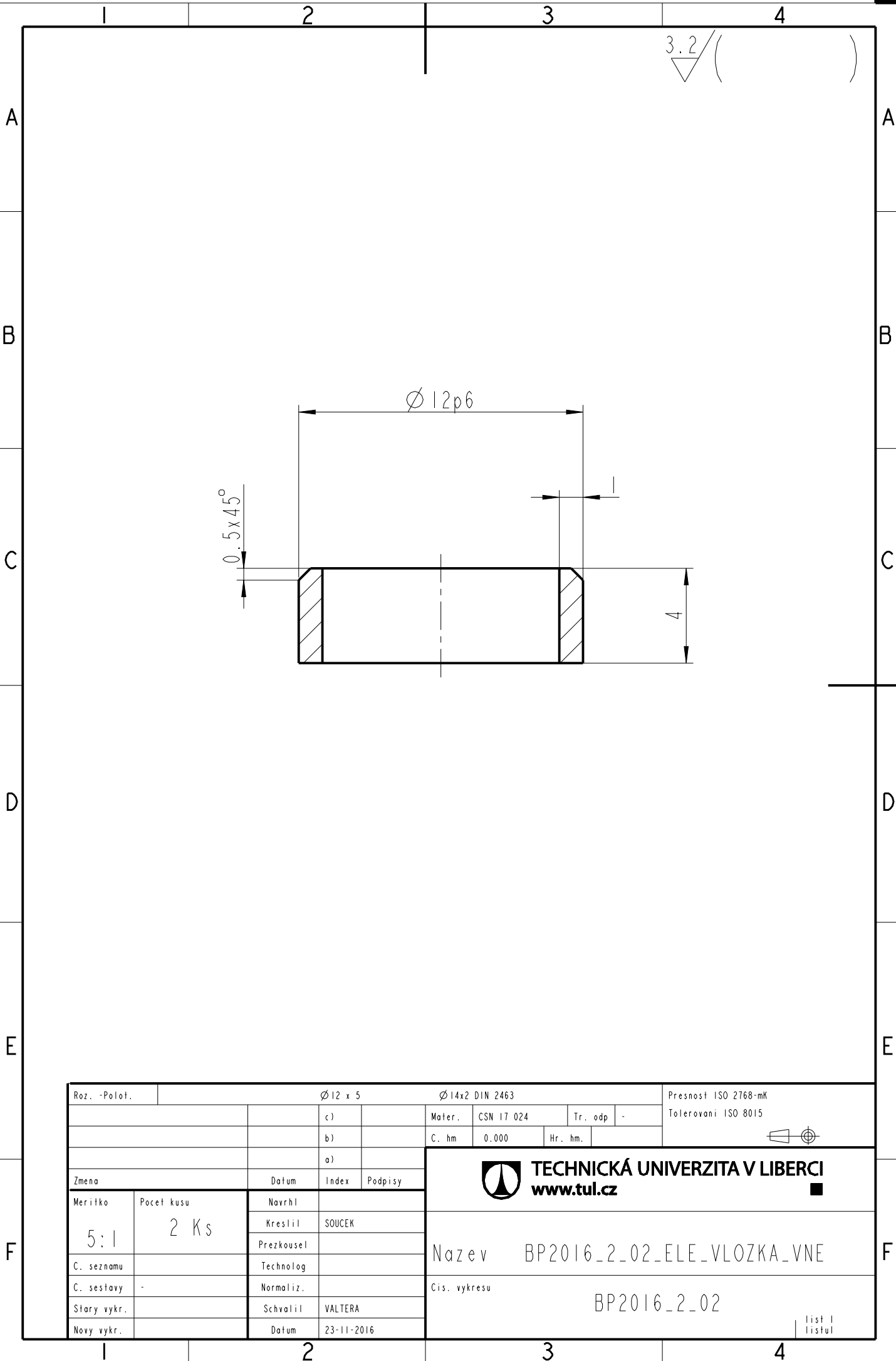
list 1
 listul

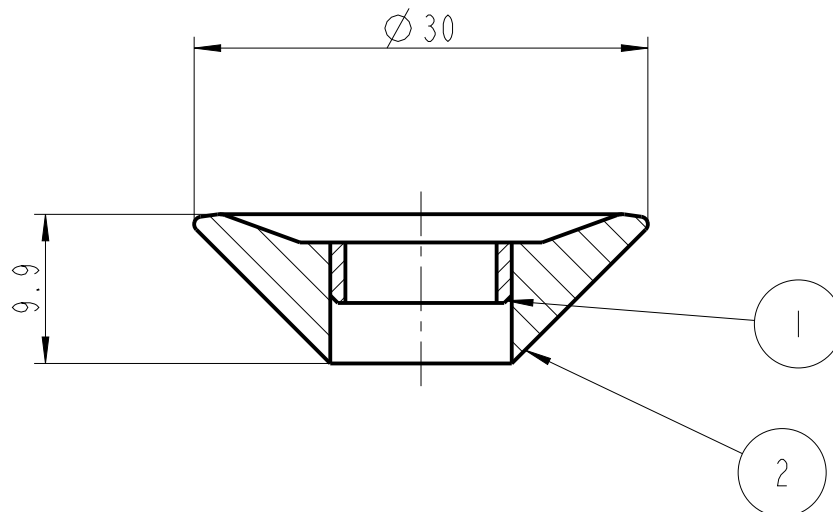
3.2 / ()



ILUSTRACNI VYKRES, VYROBENO NA STROJI CNC

Roz. - Polot.		Ø 32 x 15		Ø 32 DIN671		Presnost ISO 2768-mK			
		c)		Mater.	CSN 17 024	Tr. odp.	-		
		b)		C. hm	0.000	Hr. hm.			
		a)							
Zmena		Datum	Index	Podpisy					
Meritko	Pocet kusu	Navrhl		 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI www.tul.cz					
2:1	1 Ks	Kreslil						SOUCEK	
		Prezkousel							
C. seznamu		Technolog		Naze v					
C. sestavy	-	Normaliz.		BP2016_2A_01_ELE_VNE_HLA_3000					
Stary vykr.		Schvalil		Cis. vykresu					
Novy vykr.		Datum		BP2016_2A_01					
		23-11-2016		list 1 listul					





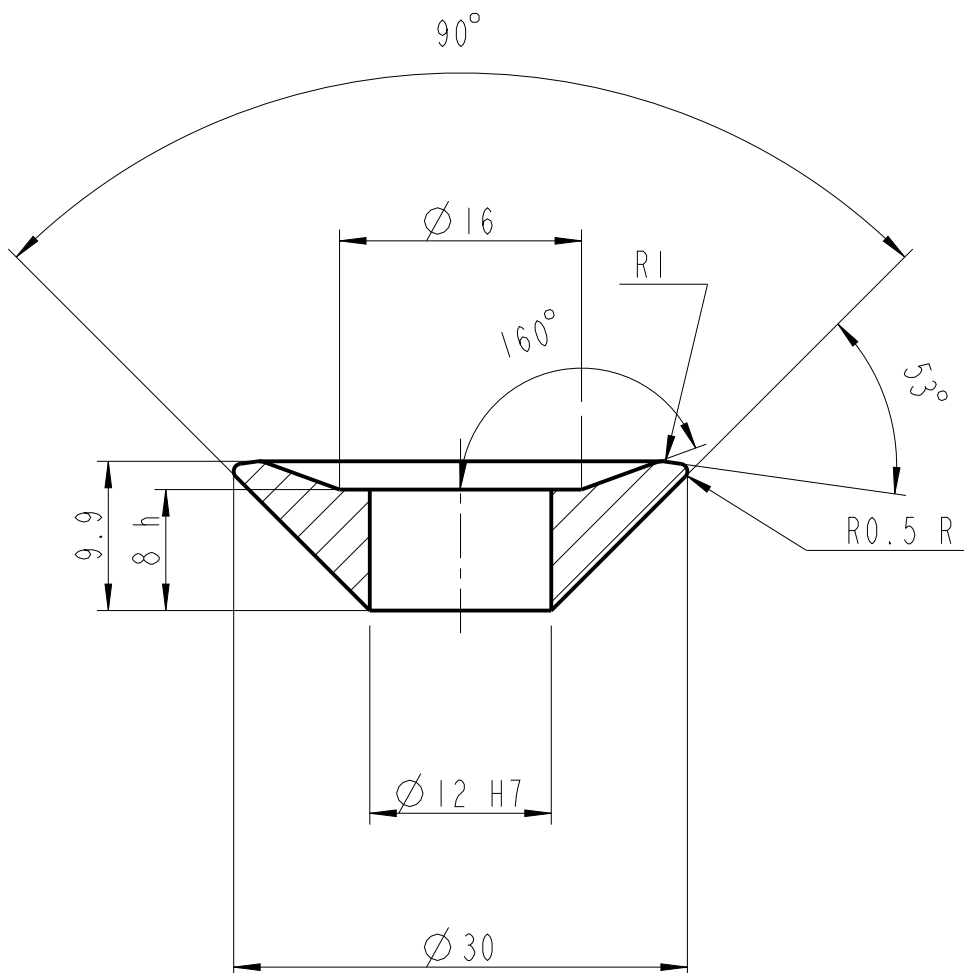
ODK.	OZNACENÍ VYKRES	POLOTOVAR MATERIAL	CIS. ZASOBNÍKU POZNAMKA	MN. JED.
1	BP2016_2_02_ELE_VLOZKA_VNE BP2016_2_02	Ø 14x2 DIN 2463 CSN 17 024	-	1 KS.
2	BP2016_2B_01_ELE_VNE_HLA_4000 BP2016_2B_01	Ø 32 DIN 671 CSN 17 024	-	1 KS.

Roz. - Polot.				Presnost ISO 2768-mK Tolerovani ISO 8015	
		c)		Mater.	-
		b)		C. hm	0.000
		a)		Hr. hm.	
Zmena		Datum	Index	Podpisy	
Meritko	Pocet kusu	Navrhl			
2:1	1 Ks	Kreslil	SOUCEK		
C. seznamu		Prezkousel			
C. sestavy	-	Technolog			
Stary vykr.		Normaliz.			
Novy vykr.		Schvalil	VALTERA		
		Datum	23-9-2016		


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
www.tul.cz

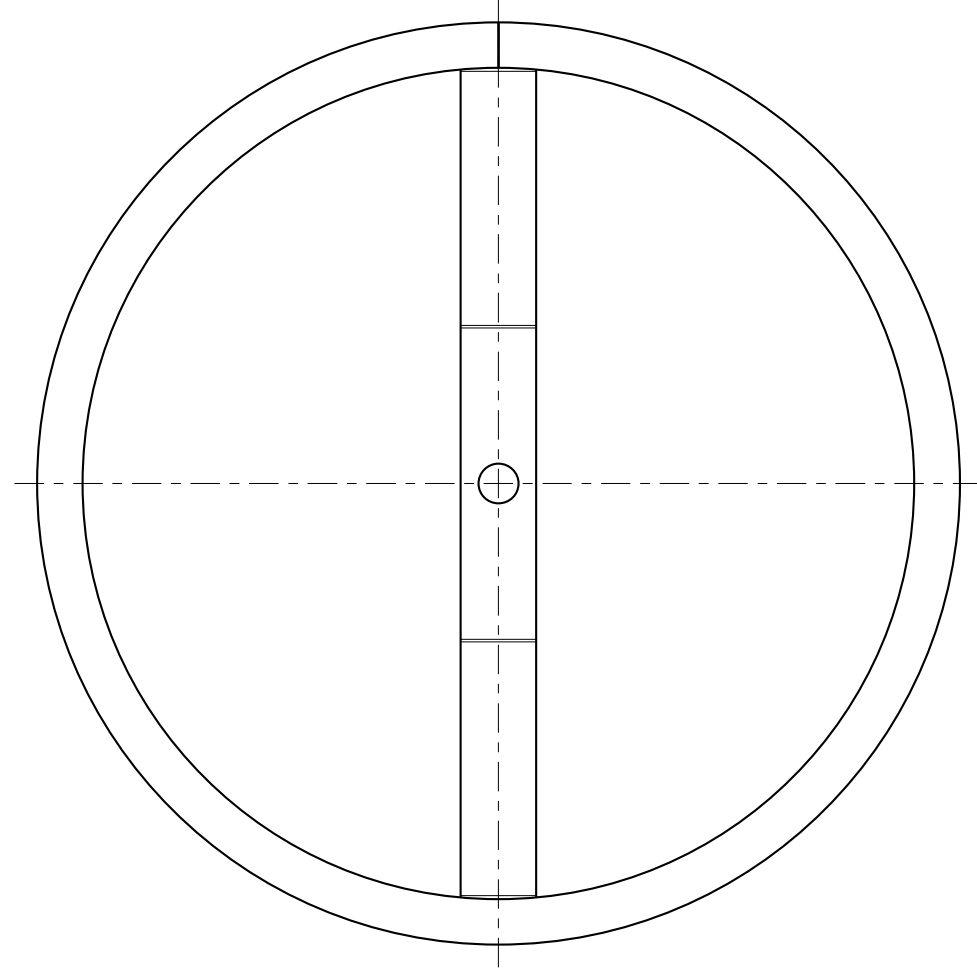
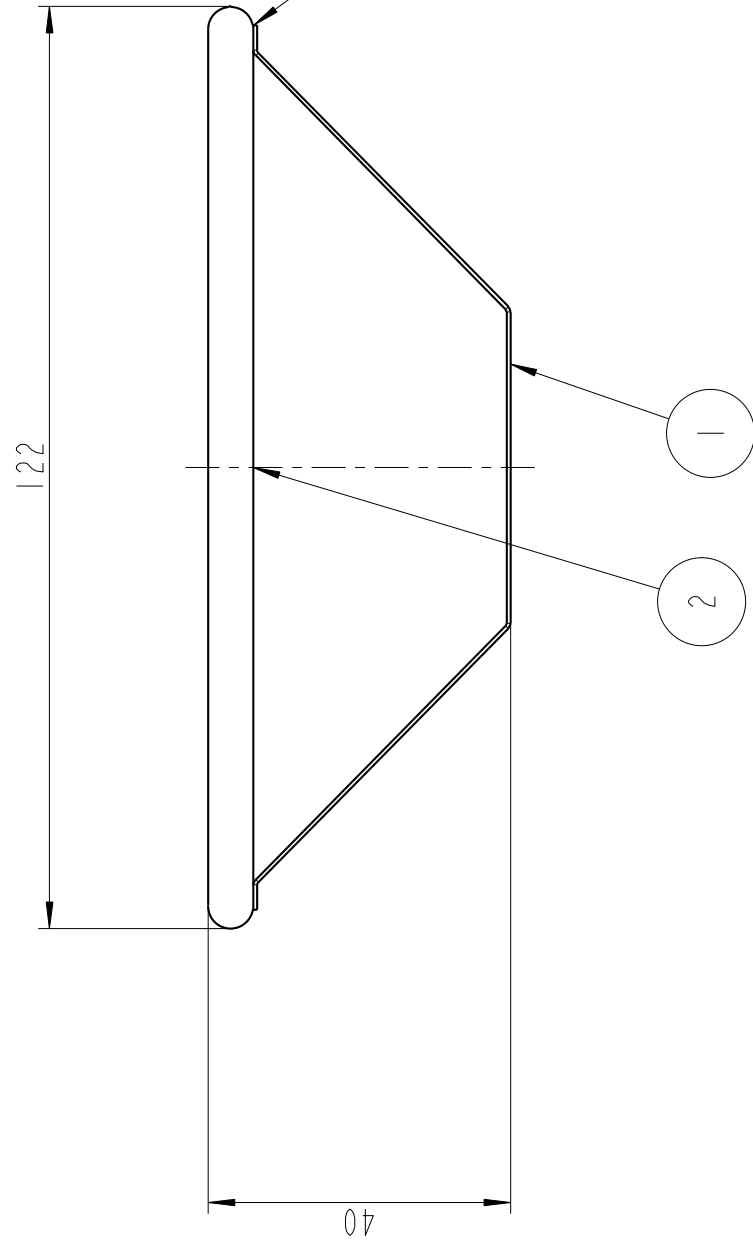
Nazev	BP2016_2B_00_ELE_VNEJSI_4000
Cis. vykresu	BP2016_2B_00

list 1
listul



ILUSTRACNI VYKRES, VYROBENO NA STROJI CNC

Roz. - Polot.		Ø 32 X15		Ø 32 DIN671		Presnost ISO 2768-mK	
		c)		Mater.	CSN 17 024	Tr. odp	-
		b)		C. hm	0.000	Hr. hm.	
		a)					
Zmena		Datum	Index	Podpisy			
Meritko	Pocet kusu	Navrhl		 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI www.tul.cz			
2:1	1 Ks	Kreslil					
C. seznamu		Prezkousel		Nazev BP2016_2B_01_ELE_VNE_HLA_4000			
C. sestavy	-	Technolog					
Stary vykr.		Normaliz.		BP2016_2B_01			
Novy vykr.		Schvalil					
		Datum		listul			
		23-11-2016					



—PAJENY SPOJ DLE DILENSKYCH ZKUSENOSTI

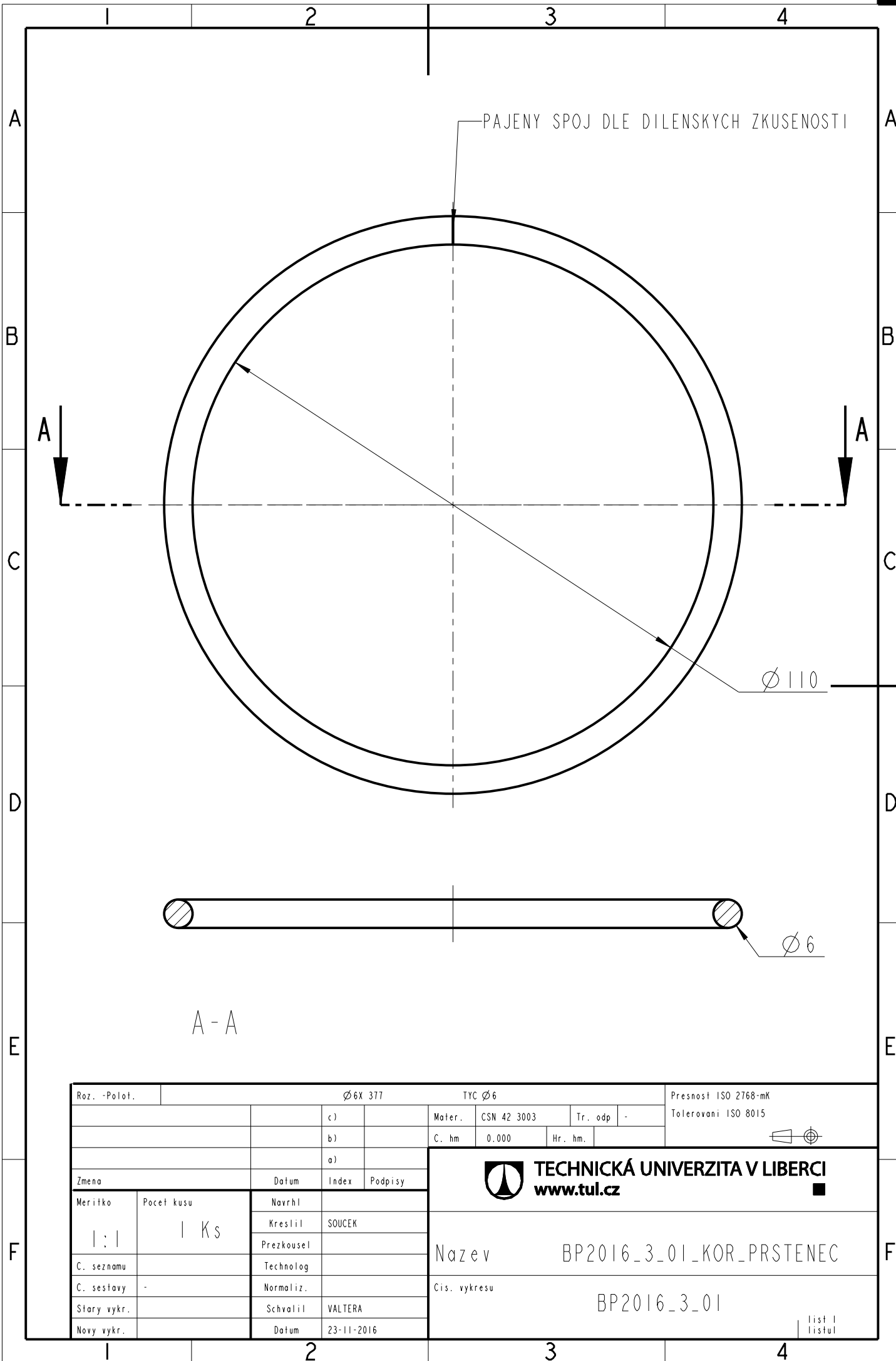
ODK.	OZNACENI VYKRES	POLOTOVAR	CIS. ZASOBNIKU POZNAMKA	MN. JED.
1	BP2016_3_02_PLECH_KORONA BP2016_3_02	P 0,5 CSN EN 1652 CSN 42 3003	-	1
2	BP2016_3_01_KOR_PRSTENEC BP2016_3_01	TVC Ø6 CSN 42 3003	-	1 KS. KS.

Rož. - Polol.						Presnosti ISO 2768-mK	
		c)		Mater.	-	Tr. odp	-
		b)		C. hm	0.000	Hr. hm.	

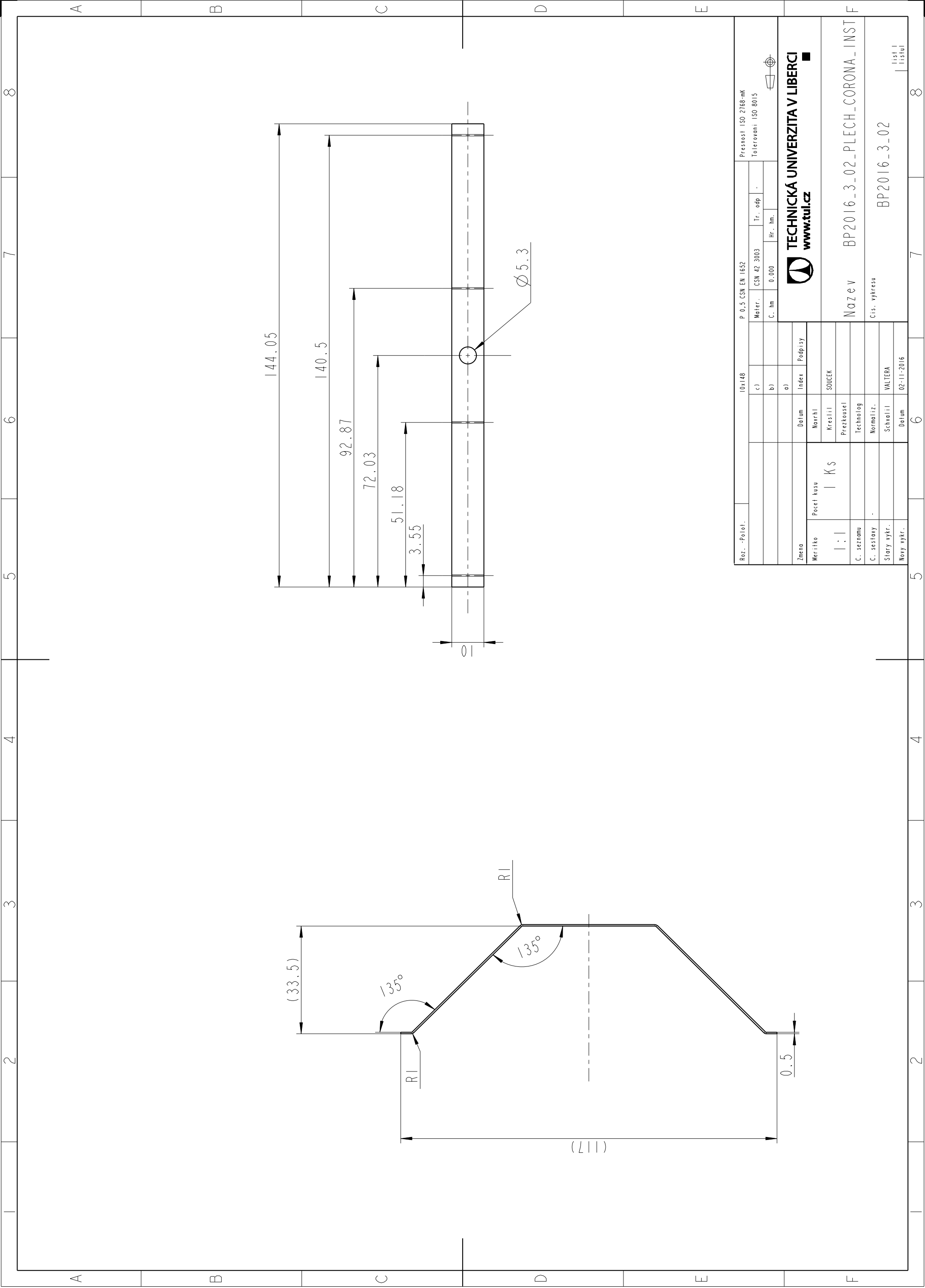
	a)		
Zmena	Datum	Index	Podpis y


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
[**www.tul.cz**](http://www.tul.cz)

Meritko	Pocet KS	Navrh	SOUCEK	Název BP2016_3_00_KOR_PRSTENEC_S
...	KS	Kreslil		
		Prezkousel		
C. seznamu		Technolog		
C. sestavy	-	Normaliz.		
Stary vykr.		Schválil	VALTERA	Cis. vykresu BP2016_3_00
Novy vykr.		Datum	16-11-2016	list 1 listul



Roz. - Polot.		Ø 6X 377		TYC Ø 6		Presnost ISO 2768-mK	
		c)		Mater.	CSN 42 3003	Tr. odp	-
		b)		C. hm	0.000	Hr. hm.	
		a)					
Zmena		Datum	Index	Podpisy			
Meritko	Pocet kusu	Navrhl					
1:1	1 Ks	Kreslil	SOUCEK				
C. seznamu		Prezkousel					
C. sestavy	-	Technolog					
Stary vykr.		Normaliz.					
Novy vykr.		Schvalil	VALTERA				
		Datum	23-11-2016				
				 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI www.tul.cz			
				Název BP2016_3_01_KOR_PRSTENEC Cis. vykresu BP2016_3_01			
				list 1 listul			



Roz. -Polot.		10x148				P 0,5 CSN EN 1652				Presnost ISO 2768-mK Tolerovani ISO 8015	
			c)			Mater.	CSN 42 3003	Tr. odp	-		
			b)			C. hm	0,000	Hf. hm.			
			a)								
Zmena			Datum		Podpisy						
			Navrh		SOUCEK						
Meritko		Pocet kusu		I K S							
I : I						Kreslil					
						Prezkousel					
C. seznamu						Technolog					
C. sestavy						Normaliz.					
Stary vykr.						VALTERA					
Novy vykr.				Datum		02-11-2016					

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI			
		www.tul.cz	
Název		BP2016_3_02_PLECH_CORONA_INST	
Čís. výkresu		BP2016_3_02	
Líst I		Líst I	