
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE

**NÁVRH A VÝROBA PŘÍPRAVKU PRO UCHYCENÍ ÚNAVOVÝCH
TĚLES PŘI POKROČILÝCH ZPŮSOBECH DOKONČOVÁNÍ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Aleš Címr

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc

Akademický rok: 2018/2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci „Návrh a výroba přípravku pro uchycení únavových těles při pokročilých způsobech dokončování“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce s použitím podkladů a informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu citované literatury na konci práce.

V Praze dne 19. července 2019

.....

Bc. Aleš Cimr

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Pitrmucovi za odborné vedení, pomoc, ochotu, připomínky, cenné rady a čas, který mi věnoval při zpracování této práce. Dále bych tímto chtěl vyjádřit poděkování své rodině a blízkým přátelům, kteří mě během studia vytrvale podporovali.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Cimr** Jméno: **Aleš** Osobní číslo: **408915**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh a výroba přípravku pro uchycení únavových těles při pokročilých způsobech dokončování

Název diplomové práce anglicky:

Design and manufacturing of clamping fixture for fatigue test bars during advanced finishing technologies

Pokyny pro vypracování:

- 1) Přehled dokončovacích metod
- 2) Přehled geometrií únavových těles
- 3) Návrh přípravku pro vybranou geometrii zkušební tělesa
- 4) Tvorba výkresové dokumentace
- 5) Protypová výroba

Seznam doporučené literatury:

- 1) ASTM, ISO, DIN, ČSN normy pro zkušební tělesa
- 2) POSPÍCHAL, Jaroslav. Technické kreslení. 4., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN isbn:978-80-0105-595-3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **19.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____



Ing. Zdeněk Pitrmuc
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

17.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Anotace

Diplomová práce se zabývá dokončovacími technologiemi obrábění a jejich vlivem na únavové vlastnosti materiálů používaných na rotační součásti leteckých motorů. Jednotlivé technologie jsou nejprve rozděleny podle principu a následně podrobněji popsány. Dále jsou analyzovány technické normy pro zkoušení kovů, z nichž jsou vybrána běžně používaná zkušební tělesa a vytvořen jejich přehled. Praktická část je věnována návrhu přípravku k uchycení zkušebních těles za účelem ověření vlivu dokončovacích operací na vysokocyklovou únavu, dále tvorbě výkresové a výrobní dokumentace a samotné prototypové výrobě.

Klíčová slova: Dokončovací metody obrábění, obrábění, leštění, výrobní postup, konstrukce přípravku, zkušební tělesa, vysokocyklová únava

Annotation

The diploma thesis is concerned in part finishing technologies and their influence on fatigue properties of materials used on rotary components of aircraft engines. The particular technologies are at first divided according to the principle and then described in detail. Subsequently, technical standards describing metals testing are analyzed, from which the commonly used test specimens are chosen and their overview is created. The practical part is devoted to the design of the fixture for fixation of test specimens for the purpose of verification the effect of finishing technologies on high-cycle fatigue, and also creation of drawing and production documentation and prototype production itself.

Key words: Part finishing technologies, machining, polishing, production process, design of the fixture, test specimens, high-cycle fatigue

Obsah

1.	Úvod	1
2.	Dokončovací metody obrábění	2
2.1.	Dokončovací metody s úběrem materiálu	2
2.1.1.	Jemné obrábění	3
2.1.2.	Broušení	4
2.1.3.	Honování	6
2.1.4.	Superfinišování	8
2.1.5.	Lapování	10
2.1.6.	Leštění	12
2.1.7.	Omílání	12
2.2.	Dokončovací metody bez úběru materiálu	14
2.2.1.	Vyhlazování	14
2.2.2.	Válečkování a kuličkování	15
2.2.3.	Kalibrování	16
2.2.4.	Tryskání	16
2.2.5.	Vibrační zpevňování	17
2.2.6.	Shot peening	17
2.2.7.	Laser peening	18
2.3.	Nekonvenční metody obrábění	19
2.3.1.	Elektroerozivní obrábění	20
2.3.2.	Obrábění laserem	22
2.3.3.	Elektrochemické broušení, lapování, honování a leštění	23
2.3.4.	Chemické obrábění	24
2.3.5.	Ultrazvukové obrábění	24
2.4.	Srovnání vybraných metod	25
3.	Přehled geometrií zkušebních těles	27
3.1.	Zkušební tělesa dle normy ČSN EN ISO 6892-1	28
3.1.1.	Zkušební tělesa pro plechy, pásy a ploché výrobky o tloušťce 0,1-3,0 mm	29
3.1.2.	Zkušební tělesa pro dráty, tyče a profily o průměru nebo tloušťce do 4 mm	30
3.1.3.	Zkušební tělesa pro plechy, pásy a ploché výrobky o tloušťce větší než 3 mm a dráty, tyče a profily o minimálním průměru nebo tloušťce 4 mm	31
3.2.	Zkušební tělesa dle normy ČSN EN 2002-001	34
3.2.1.	Zkušební tělesa pro plechy a pásy s tloušťkou menší nebo rovnou 8 mm	35

3.2.2.	Neobráběná zkušební tělesa pro tyče, dráty a průřezy o průměru nebo tloušťce menší nebo rovno 8 mm	36
3.2.3.	Obráběná zkušební tělesa pro tyče, dráty, průřezy a desky o průměru nebo tloušťce větší než 8 mm a pro výkovky a odlitky.....	36
3.3.	Zkušební tělesa dle normy ASTM E606/E606M	37
3.4.	Zkušební tělesa dle normy ASTM E8/E8M	38
4.	Praktická část	43
4.1.	Princip experimentu.....	43
4.1.1.	Únava materiálu	43
4.2.	Konstrukce vybraného zkušebního tělesa.....	44
4.3.	Definice požadavků na přípravky	45
4.4.	Návrh přípravku pro vybranou geometrii zkušebního tělesa.....	46
4.4.1.	Volba materiálu	46
4.4.2.	Konstrukční návrhy	46
4.4.3.	Konstrukční návrh maskování závitu.....	47
4.4.4.	Varianta přípravku 1	48
4.4.5.	Varianta přípravku 2	49
4.4.6.	Varianta přípravku 3	50
4.4.7.	Tvorba výkresové dokumentace	52
4.5.	Prototypová výroba.....	56
4.5.1.	Rámcový technologický postup	57
4.5.2.	Použité stroje.....	57
4.5.3.	Použité nástroje.....	58
4.5.4.	Výroba krycího pouzdra	61
4.5.5.	Výroba upínacího pouzdra.....	62
4.5.6.	Výroba upínací desky.....	64
4.5.7.	Výroba opěrné desky	65
5.	Závěr.....	67
6.	Seznam použitých zdrojů.....	69
7.	Seznam obrázků.....	74
8.	Seznam tabulek.....	76
9.	Přílohy.....	77

1. Úvod

V současné době zároveň se zvyšováním produktivity výroby rostou i požadavky na kvalitu strojů a nástrojů, a tedy zejména požadavky na kvalitu a životnost jednotlivých vyráběných dílů. Jedním z mnoha činitelů, které právě kvalitu a životnost dílů ovlivňují, je kvalita povrchové vrstvy, jež je nejvíce exponovaná. Tato problematika je velmi významná ve všech průmyslových odvětvích, avšak v leteckém průmyslu ji řadíme mezi nejzásadnější. Zejména u dynamicky namáhaných dílů podstatným způsobem ovlivňuje spolehlivost, životnost, a tedy i bezpečnost. Touto oblastí se zabývají i největší výrobci turboturboletkových motorů v České republice. Ve spolupráci s Fakultou strojní ČVUT v Praze vyvíjí a aplikují dokončovací technologie, které vedou nejen ke zvýšení životnosti, ale i ke snížení spotřeby a emisí, zlepšení výkonových ukazatelů a redukcí nákladů. Jednou z vyvíjených technologií je strojní leštění dílů kompresoru, který jedním neboli rotory stlačuje vzduch, jenž následně proudí do spalovacího prostoru motoru.

Diplomová práce vznikla za účelem ověření vlivu dokončovací operace leštění na vysokocyklovou únavu. V první části práce jsou rozděleny a popsány jednotlivé dokončovací metody obrábění, které by mohly být aplikovány při výrobě dílů a součástí leteckého motoru. Jsou uvedeny mechanismy operací a dosahované parametry vzniklého povrchu. Dále jsou rozebírány jak české, tak zahraniční technické normy, které se věnují problematice zkoušení materiálů. Popisují zkušební metody, podmínky realizace a testovací tělesa. V teoretické části práce je pozornost věnována převážně používaným zkušebním tělesům a je vytvořen přehled jejich geometrií.

V praktické části práce je popsán princip experimentu pro ověření vlivu operace na vysokocyklovou únavu. Pro vybranou konstrukci zkušebního tělesa jsou v závislosti na technických a ekonomických požadavcích vytvořeny různé varianty přípravků, které zajišťují jejich upnutí v lešticím stroji. V poslední části je detailně rozebírána prototypová výroba těchto dílů včetně technologického postupu a zkonstruování.

2. Dokončovací metody obrábění

Cílem dokončovacího obrábění je zvýšení jakosti obráběného povrchu a zlepšení mechanických a fyzikálních vlastností. Tímto technologickým procesem dosahujeme konečné přesnosti rozměrů, tvarů a polohy. Cílem je dosáhnout požadované mikrogeometrie a kvality povrchové vrstvy (parametry drsnosti a vlnitosti, struktura, zbytková pnutí, vady). Mezi důležité mechanické a fyzikální vlastnosti patří zejména tvrdost, zpevnění, odolnost proti korozi a otěru, únavové vlastnosti, třecí vlastnosti apod. V neposlední řadě jsou požadavky na vzhled povrchu, jeho lesk, matný reliéf apod. [1].

Při dokončovacím obrábění dochází k odebrání třísek malých průřezů a tím k působení malých rezných sil. Z toho plyne malá deformace obrobku, nástroje i stroje a dosažení vysoce přesné plochy s vynikajícími parametry drsnosti (obvykle $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$) [3].

Všechny výše uvedené vlastnosti však žádná z technologií nedokáže splnit v plné míře. Je nutné volit vhodnou metodu nebo kombinaci obráběcích metod s ohledem na předpokládanou funkci povrchu nebo součásti, provozní spolehlivost a životnost. Dosažení požadované jakosti a integrity povrchové vrstvy je realizováno těmito dvěma základními principy, nebo jejich kombinací [1]:

- a) Obrobením přídavku na dokončení,
- b) přetvářením povrchové vrstvy – plastickou deformací.

Dělení dokončovacích metod obrábění

Dokončovací metody obrábění můžeme podle základního principu úpravy povrchové vrstvy rozdělit na metody s úběrem materiálu, bez úběru materiálu a nekonvenční metody, jak je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1: Rozdělení dokončovacích metod obrábění

Metody s úběrem materiálu	Jemné obrábění, broušení, honování, superfinišování, lapování, leštění, tryskání, omílání
Metody bez úběru materiálu	Vyhlazování, válečkování, kalibrování, tryskání, vibrační zpevňování, kuličkování, balotínování
Nekonvenční metody	Elektrotepelné, elektrochemické, chemické a abrazivní metody

2.1. Dokončovací metody s úběrem materiálu

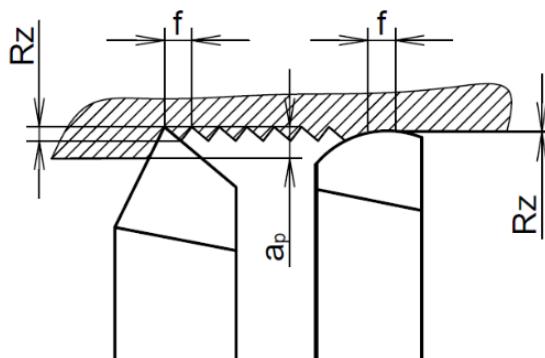
Základním předpokladem metod s úběrem materiálu je odebrání přídavku na dokončování při šetrných podmínkách obrábění, a to s minimálním tepelným ovlivněním nově se tvořící povrchové

vrstvy. Přídavek na dokončení by měl být minimální, ale zároveň takový, aby zajistil odebrání předchozí povrchové vrstvy, která mohla být narušena předchozími technologickými procesy. Na povrchu obráběného materiálu by mohly být například trhliny, tvarové či rozměrové deformace nebo další vady. Vlivem tepelného zpracování, upnutí, řeznými silami a chemickou reakcí s prostředím by mohlo dojít i ke změně struktury a přítomnosti zbytkových tahových pnutí. Výsledný výkon je posuzován podle vytvořené plochy s požadovanými vlastnostmi, za jednotku času [1].

2.1.1. Jemné obrábění

Metoda je v principu stejná jako klasické obrábění, ale využívá se jiných řezných podmínek a jiných nástrojů. Tato metoda vyžaduje velkou tuhost obráběcí soustavy. Pro dosažení běžných hodnot drsnosti ($R_a = 0,4\text{--}0,8 \mu\text{m}$) a přesnosti rozměrů (IT 5–6) lze využít většiny základních výrobních metod, a to za předpokladu úběru poslední vrstvy malými průřezy třísek, malého posuvu a hloubky řezu nebo využitím hladicích nástrojů [1][2].

K obrábění se využívá destiček diamantových nebo ze slinutých karbidů s kvalitním břitem r_n , malým úhlem nastavení vedlejšího ostří (1° až 2°), případně velkého poloměru špičky (50–200 mm, i více) [1][2]. Jak je uvedeno na obrázku 1, lze provádět výrobní a dokončovací operaci najednou. U soustružení se jedná o použití dvou noží za sebou; u frézování se využívá hladicího zubu nebo destičky frézy, širokého hladicího nože při hoblování, kalibrovacího zubu výstružníku nebo protahováku apod. [1].



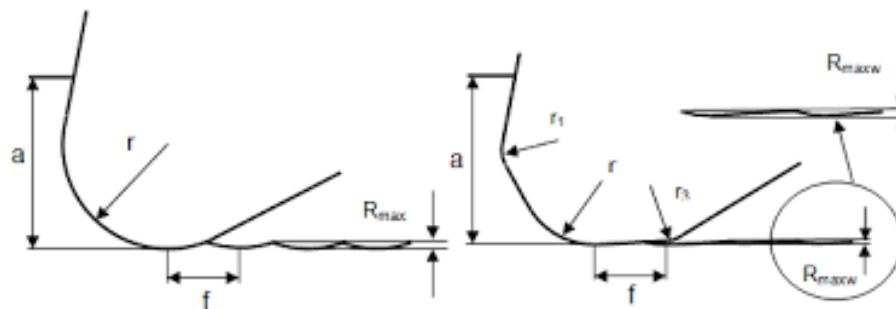
Obrázek 1: Jemné obrábění dvěma noži [1]

Při hrubovacích operacích je požadován co největší objem odebraného základního materiálu za jednotku času, zatímco při obrábění na čisto a zejména při jemném obrábění, je dáván důraz především na dodržení předepsaných parametrů obráběné plochy, kterými jsou drsnost povrchu R_a a přesnost rozměrů IT. Běžné hodnoty těchto parametrů jsou uvedeny v tabulce 2 [3].

Ta bulka 2: Dosahované hodnoty přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu při soustružení [3][4]

Způsob obrábění		Stupeň přesnosti IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
		Střední hodnota	Rozsah	Střední hodnota	Rozsah
Hrubování		13	11–14	25,0	12,5–50,0
Na čisto		10	9–11	3,2	1,6–12,5
Jemné soustružení	Nástroj ze slinutého karbidu	8	7–8	0,8	0,4–1,6
	Nástroj z diamantu nebo polykrystalický kubický nitrid boru	6	5–6	0,4	0,2–0,8

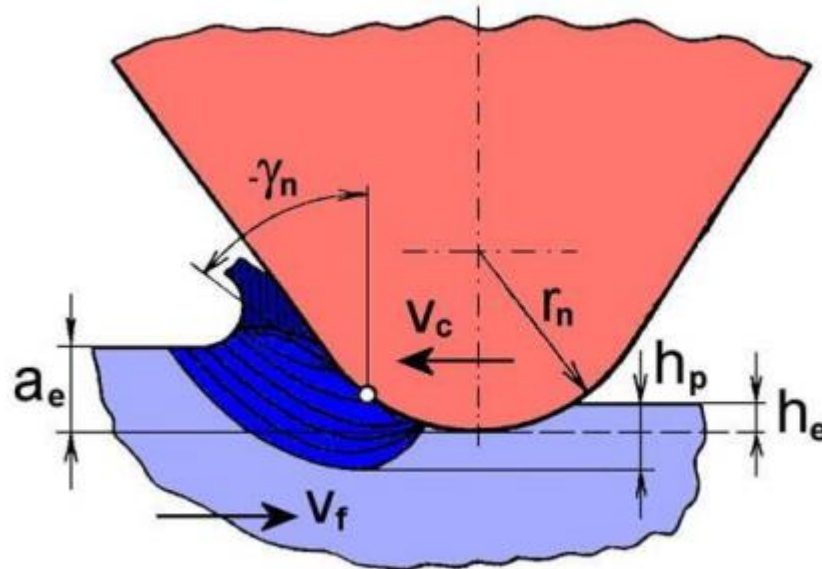
Dalším možným způsobem, jak dosáhnout vyšší jakosti obrobeneho povrchu při zachování, případně ještě zvýšení řezných podmínek, je použití upravené geometrie břitu. Například technologie WG („Wiper geometry“), jejíž princip je znázorněn na obrázku 2. Těsně za rádiusem špičky je malé koncové ostří, které zhlazuje vrcholky úzkých drážek na povrchu obrobku vzniklých po obráběcím nástroji. Použitím geometrie wiper lze získat nižší hodnoty drsností povrchu vytvořeného při vysokých řezných rychlostech, než při použití břitu s geometrií konvenční. Pomocí této úpravy lze tedy dosáhnout vyšší jakosti povrchu Ra i při náročnějších řezných podmínkách, zároveň ale dochází ke zvyšování řezného odporu. Geometrie wiper není vhodná na složitější tvarové plochy [5][6].



Obrázek 2: Vlevo – konvenční geometrie vyměnitelné břitové destičky, vpravo – geometrie wiper [7]

2.1.2. Broušení

Broušení je dokončovací metoda obrábění brusným nástrojem, který je charakteristický malými, nepravidelně rozloženými zrny s různým převýšením povrchu. Řezná geometrie těchto břitů tedy není přesně definována. Úhel čela zrna γ_0 je zpravidla negativní a poloměr ostří r_n je 5 až 40 μm . Úhly při záběru zrna jsou znázorněny na obrázku 3. Zrna nepravidelně rozložená po celém povrchu nástroje odebírají velké množství třísek velmi malého průřezu [1][4].



Obrázek 3: Úhly při záběru zrna: γ_n – úhel čela, r_n – poloměr ostří, v_c – řezná rychlost, v_f – rychlost posuvu, a_e – hloubka řezu, h_e – vrstva ovlivněná elastickou deformací, h_p – vrstva ovlivněná plastickou deformací [8]

Řezné rychlosti dosahují hodnot 20 až 200 $m \cdot s^{-1}$ a jsou příčinou vzniku vysokých teplot dosahujících až tisíců stupňů Celsia a vysokého měrného řezného odporu 30 až 60 GPa [1]. S těmito parametry roste úhel roviny stříhu, snižuje se primární plastická deformace v oblasti tvorby třísky a tím se snižuje i pěchování třísky. Tento proces vede ke snížení třecí síly a ke snížení času kontaktu třísky a řezného klínu. Díky tomu se snižuje tepelné ovlivnění nástroje i obrobku a následně tedy i vliv na vlastnosti nově vytvořeného povrchu. Operace se vyznačuje vysokou přesností (dosahované hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3), správností geometrického tvaru a velmi dobrou jakostí povrchu. Používá se k hrubování i dokončování velmi tvrdých materiálů, jinými technologiemi neobrobitelných [1][4].

Tabulka 3: Dosahované hodnoty přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu při broušení [4]

Způsob obrábění		Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
		střední hodnota	rozsah	střední hodnota	rozsah
Vnější rotační plochy	Hrubování	10	9–11	1,6	0,80–3,20
	Na čisto	5	5–6	0,4	0,20–0,60
	Jemné	4	3–5	0,2	0,05–0,40
Vnitřní rotační plochy	Hrubování	9	9–11	1,6	1,60–3,20
	Na čisto	7	5–7	0,8	0,40–1,60
	Jemné	5	3–6	0,2	0,05–0,40
Rovinné plochy	Hrubování	10	9–11	1,6	1,60–3,20
	Na čisto	7	5–7	0,8	0,40–1,60
	Jemné	5	3–6	0,2	0,05–0,40

Broušením je možné obrábět plochy vnější i vnitřní rotační, rovinné i tvarové. Proces probíhá celistvým, složeným nebo tvarovým brousícím kotoučem, brousícím pásem a dalšími způsoby. Při broušení kotoučem může docházet k odebrání materiálu obvodem, čelem nebo oběma plochami současně při vnější nebo vnitřní vzájemné poloze nástroje a obrobku. Podle hlavního pohybu posuvu stolu, vzhledem k brousícímu kotouči, lze rozlišit broušení axiální, tangenciální, radiální, obvodové a čelní zapichovací [1][4].

Brousící nástroje jsou tvořeny náhodně umístěnými zrny, které tvoří řezné klíny a jsou spojeny pojivem držícím brusná zrna dohromady. Ve volných místech se nacházejí póry, jež plní funkci zubových mezer plnicích se třískami. Brusné nástroje se dále dělí podle druhu brusného materiálu, zrnitosti, tvrdosti, struktury a druhu pojiva. Brusné materiály se rozdělují na přírodní a syntetické. Nejčastěji se používají granát, smírek, pazourek, **oxid hlinitý**, **karbidy křemíku**, karbidy boru nebo **polykrystalický kubický nitrid boru**, přírodní i **umělý diamant** [3][8].

2.1.3. Honování

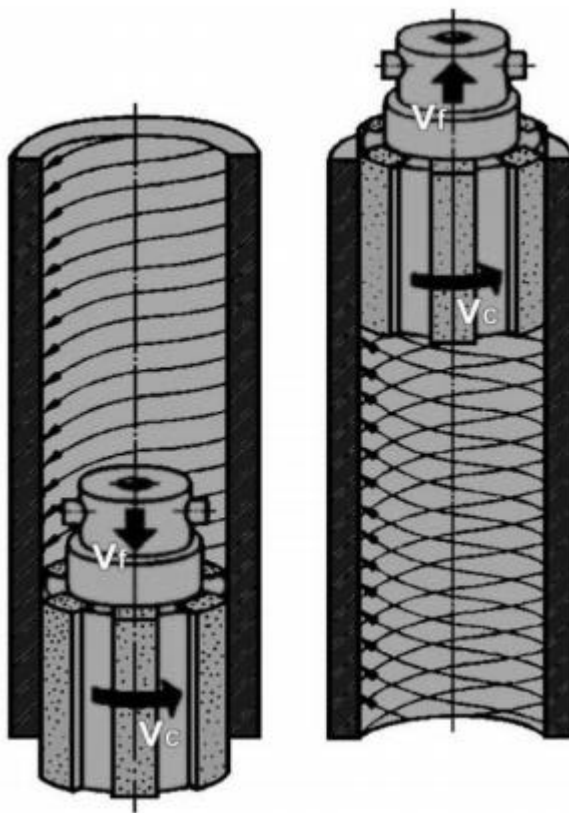
Dokončování honováním je metoda obrábění povrchu, při které se využívá jemného brusiva pevně vázaného v honovacích kamenech, které jsou upnuty na vnějším průměru honovací hlavy. Používá se k dokončování vnitřních i vnějších válcových ploch, nejčastěji na hydraulické a pneumatické brzdové válce, válce spalovacích motorů, bubny, pouzdra, ložiska vřeten atd. Touto metodou lze obrábět průchozí i neprůchozí válcové díry s drážkami různých tvarů a velikostí, pomocí přídavného zařízení i kuželové díry, je možné opravit osovou křivost děr, ovalitu, soudkovitost, kuželovitost a dosáhnout vysoce jakostního povrchu s přesným geometrickým tvarem. Tabulka 4 uvádí hodnoty přesností rozměrů a drsností povrchu. Honovat je možné v podstatě všechny materiály, kalené i nekalené oceli, litiny, slitiny neželezných kovů, slinuté karbidy i plochy opatřené tvrdým povlakem [4][9].

Tabulka 4: Dosahované hodnoty přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu při honování [4]

Způsob obrábění	Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
	střední hodnota	rozsah	střední hodnota	rozsah
Hrubování	7	6–8	0,4	0,20–0,80
Na čisto	6	5–7	0,2	0,10–0,20
Jemné	4	3–5	0,1	0,05–0,10

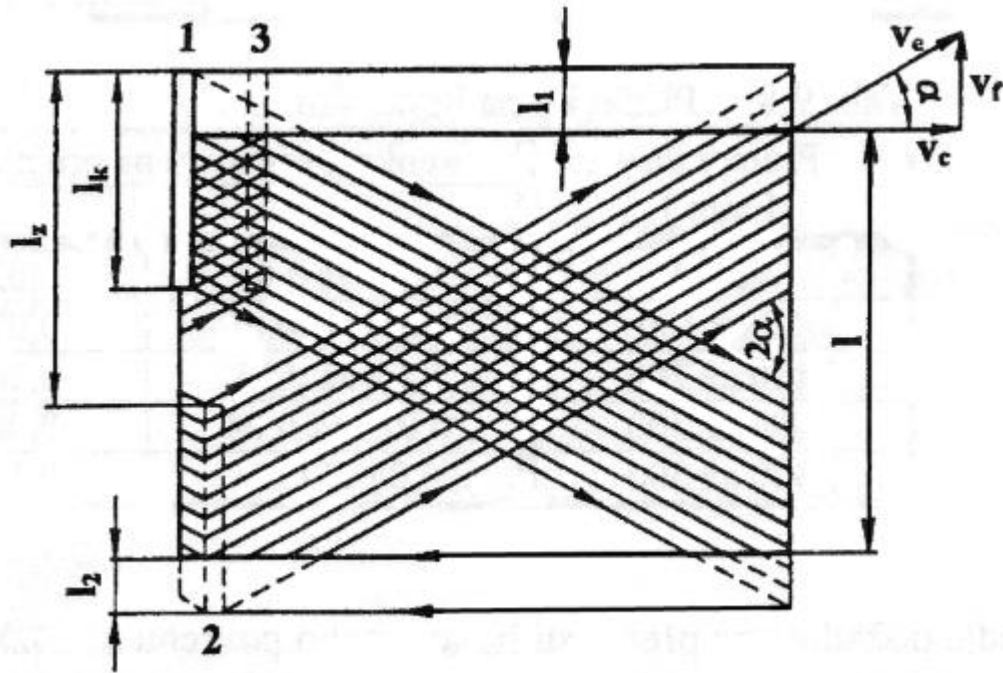
Podstatou metody je stálé přitlačování honovacích kamenů k dokončované ploše tlakem 0,2 až 1,5 MPa při použití řezných kapalin na bázi oleje nebo kyseliny olejové. Honovací nástroj,

případně i obrobek vykonává současně otáčivý a vratný přímočarý pohyb. Výsledkem tohoto procesu jsou dráhy překrývající se šroubovice jako na obrázku 4 [1][4].



Obrázek 4: Princip honování a vznik šroubovice; v_c – obvodová rychlost (řezná), v_f – axiální rychlost (posuvu) [10]

Průběh honování ovlivňuje úhel křížení stop, který je dán poměrem rychlosti obvodové v_c (20 až 80 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) a rychlosti axiální v_f (4 až 20 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$). Princip je znázorněn na obrázku 5. Délka zdvihu musí přebíhat okraje otvoru o třetinu své délky, aby nedocházelo ke vzniku kuželovitosti, konvexní nebo konkávní odchylky (soudkovitosti) [1].



Obrázek 5: Kinematika honovacího procesu – rozvínutá plocha; 1 – počáteční poloha kamene, 2 – poloha kamene v dolní úvratí, 3 – poloha kamene po jednom zdvihu, v_c – řezná rychlost, v_r – rychlost posuvu, v_e – celková rychlost řezného pohybu, α – úhel křížení stop, l_k – délka kamenů, l_z – zdvih honovací hlavy, $l_{1,2}$ – délka přeběhů [4]

Způsoby honování lze rozdělit podle několika kritérií [3]:

- Dle tvaru obráběné plochy: vnitřní, vnější rovinné,
- dle pracovního režimu: klasické, elektrolytické, vibrační
- dle použití: jednostupňové, dvoustupňové.

Konstrukce honovací hlavy je určena jejím použitím, počtem kamenů, rozložením a rozměry. Pomocí polohy kuželů umožňuje mechanické rozpínání kamenů, které jsou upevněny v ocelových lištách. Kameny se vyrábějí z karbidů křemíku, oxidů hliníku, grafitu, syntetického diamantu, nebo polykrystalického kubického nitridu boru [3].

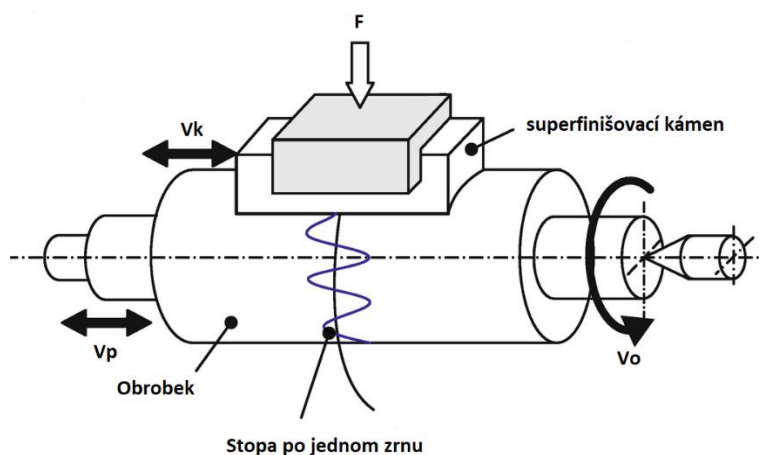
2.1.4. Superfinašování

Superfinašování je vysoce produktivní metoda obrábění vnitřních i vnějších rotačních, tvarových a rovinných ploch. Využívá jemnozrnných brousících kamenů pohybujících se kombinací kmitavého, otáčivého a přímočarého pohybu [1]. Samotná operace je velmi krátká, trvá 20 až 60 s. Zlepšuje kvalitu obrobeného povrchu, snižuje drsnost, ale neodstraní tvarové nepřesnosti, tedy kruhovitost a válcovitost. Orientační hodnoty parametrů jsou uvedeny v tabulce 5. Použití je vhodné na zlepšení parametrů drsnosti povrchu a zvýšení životnosti součástky [3].

Ta bulka 5: Dosahované hodnoty přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu při superfinišování [4]

Způsob obrábění	Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
	střední hodnota	rozsah	střední hodnota	rozsah
Na čisto	4	3–5	0,2	0,050–0,400
Jemné	3	2–4	0,1	0,025–0,100

Řezný pohyb je dán superpozicí přímočarého posuvného a rotačního pohybu součásti o rychlosti v_o (10 až 80 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) a kmitavého pohybu nástroje. Princip superfinišování je znázorněn na obrázku 6. Superfinišovací kameny kmitají s frekvencí 5 až 60 Hz při amplitudě 2 až 6 mm kolmo na směr pohybu součásti [1]. Kombinací těchto pohybů dochází k dobrému odstraňování třísek z místa řezu z důvodu velkého množství obrábějících zrn a časté změny místa úběru zrna. Kameny přizpůsobené tvaru obráběné plochy jsou na dokončovanou plochu přitlačovány hydraulicky nebo mechanicky tlakem o velikost 0,1 až 0,4 MPa při působení řezné emulze (obvykle směsi petroleje a oleje). Použitím různých hodnot výše zmíněných parametrů lze průběh superfinišovací operace ovlivňovat a provádět jej ve dvou fázích – hrubovací a leštící. Při fázi hrubovací, kdy je úhel křížení drah velký (90°), se zrna snadno zařezávají a krátké třísky se snadno odplavují. Obrobený povrch má dobrou jakost a je matný. Při leštění úhel křížení drah dosahuje nižších hodnot (20°). Zrna plastickou mikrodeformací zahlazují nerovnosti a již neřežou. Výsledný povrch je charakteristický vysokým leskem [1][3].



Obrázek 6: Schéma s uperfinišování; F – přitlačná síla stroje, V_k – rychlost kmitavého pohybu, V_p – rychlost posuvu, V_o – obvodová rychlost obrobku [11]

Superfinišovací nástroj je tvořen vhodným držákem s mechanicky připojenými nebo přilepenými brusnými kameny, které mohou mít tvar hranolu, válce nebo misky. Jako brusivo je využito syntetického korundu Al_2O_3 , karbidu křemíku SiC, syntetického diamantu, nebo polykrystalického kubického nitridu boru [3].

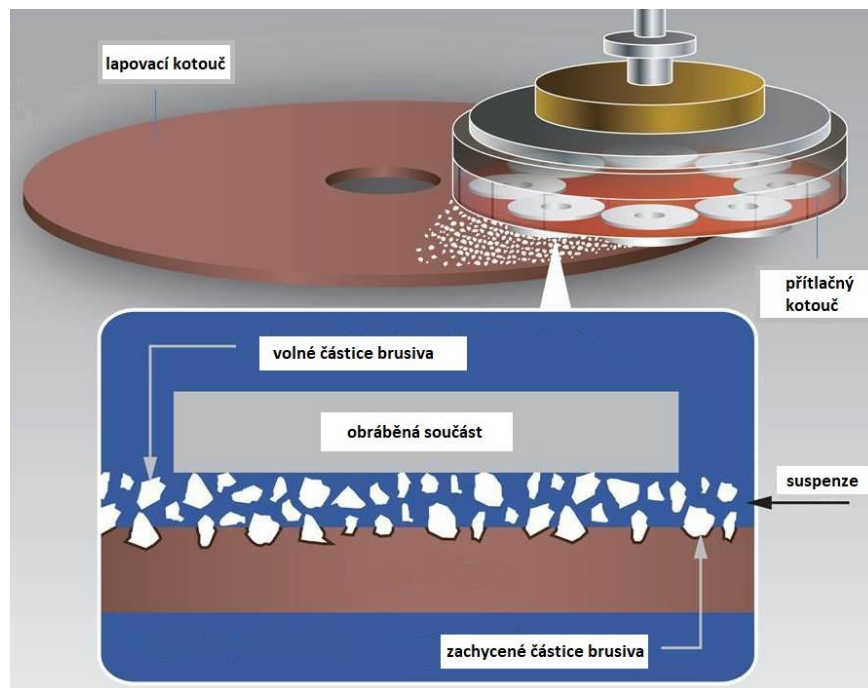
2.1.5. Lapování

Nejvyšších hodnot přesností rozměrů, správného geometrického tvaru a nejnižších drsností lze dosáhnout dokončovací operací zvanou lapování. Tabulka 6 uvádí dosažitelné hodnoty. Úběru materiálu dochází převážně prostřednictvím zrn volného brusiva, jež jsou mezi nástroj a obrobek přiváděny kapalinou, nebo měkkou pastou. Princip lapování je znázorněn na obrázku 7. Brousicí zrna jsou rozpořívána lapovacím nástrojem a odřezávají mikronerovnosti povrchu obrobku. Taktéž dochází k plastické deformaci nedokonalostí povrchu. Celý tento proces vede ke zlepšení kvality povrchu, snížení drsnosti a do určité míry i zlepšení geometrického tvaru obrobků. Lapování je vhodnou metodou dokončování rovinných i tvarových ploch, vnitřních, vnějších, kuželových i válcových ploch, závitů, ozubení, motorových součástí automobilů, ploch měřidel apod. [1].

Tabulka 6: Dosažované hodnoty přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu při lapování [4]

Způsob obrábění		Stupeň přesnosti IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
		střední hodnota	rozsah	střední hodnota	rozsah
Vnější rotační plochy	Na čisto	4	3–4	0,10	0,050–0,200
	Jemné	2	1–2	0,05	0,012–0,050
Vnitřní rotační plochy	Na čisto	4	3–5	0,20	0,010–0,400
	Jemné	3	1–3	0,05	0,012–0,050
Rovinné plochy	Na čisto	4	3–5	0,20	0,100–0,400
	Jemné	3	1–3	0,05	0,012–0,050

Podle charakteru úběru materiálu lze rozlišit proces lapování na fázi hrubovací a na velmi jemné obrábění. Regulací rychlosti pracovního pohybu, přtlakem nástroje a viskozitou nosného média je možné upravovat vzájemný poměr těchto fází a tím leštit povrch materiálu [1].



Obrázek 7: Princip lapování [12]

Způsoby lapování lze dále rozlišovat:

- a) Podle pohonu nástroje: ruční a strojní,
- b) podle principu úběru materiálu: mechanické, chemicko-mechanické, elektrolytické [3].

Nástroje pro lapování mají negativní tvar lapované plochy, dle které je také můžeme rozdělit na:

- a) Desky a kotouče – použití na rovinné plochy; pro hrubovací operace mají vytvořené drážky nebo rýhy.
- b) Pevná a stavitelná pouzdra – obvyklé použití na vnější rotační plochy.
- c) Pevné a rozpínací trny – použití na vnitřní rotační plochy; na činných částech je vytvořena šroubovice, která tvoří zásobník lapovacího prostředku [3].

Výroba lapovacích nástrojů se nejčastěji realizuje z měkkých materiálů, jemnozrnné perlitické litiny, měkké oceli, mědi, olova nebo plastických hmot umožňujících zamáčknutí brusiva do činné části. Kalená ocel nebo tvrdě chromované materiály se používají obvykle jen na velmi jemné obrábění. Jako brusivo se využívá umělý korund Al_2O_3 , karbid křemíku SiC , karbid boru B_4C , polykrystalický kubický nitrid boru nebo diamantové prášky. Pro velmi jemné lapování lze použít také oxid chrómu Cr_2O_3 nebo oxidu vápenato-hořečnatého $CaMgCO_3$. Lapovací pasty a emulze mají různá složení, nejčastěji je nositelem volného brusiva petrolej s přídavkem oleje, kyseliny olejové, stearinové apod. Pro jemné lapování se také může použít benzín, nafta nebo líh [1].

2.1.6. Leštění

Leštění je dokončovací operace, při které se již nepožadují vysoké nároky na přesnost rozměru, ale dochází k úpravě povrchu převážně z důvodu vzhledu. Úběr materiálu je minimální, dochází spíše k odstranění stop po předchozích operacích, dosažení drsnosti $Ra = 0,01-0,10 \mu\text{m}$, odstranění nečistot, oxidů a dalších chemických sloučenin [1] [29].

Leštění lze provádět třemi základními principy:

- a) Mechanické leštění: Materiál obrobku je odebírán brusnými zrnými pevně uchycenými v leštícím nástroji, nebo volně rozptýlenými mezi nástrojem a obrobkem.
- b) Chemické leštění: K úběru materiálu dochází chemickou reakcí mezi roztokem a povrchem obrobku.
- c) Elektrochemické leštění: Vrcholky nerovností jsou rozpouštěny elektrochemicky, přičemž obráběná součást je anodou ponořenou do elektrolytu mezi vhodně umístěné katody [3].

Obvykle dochází k odstraňování vrcholků nerovností hrubováním brousícími zrnými, jemným leštěním volně rozptýlenými zrnými v kapalině nebo pastě a doleštěním přitlakem textilního kotouče nebo pásu bez brusiva. Působením vysoké rychlosti a tření dochází k zahřátí a plastické deformaci vrcholků nerovností [1].

U tvarově složitých a členitých součástí v sériové a hromadné výrobě se využívá chemického leštění. Mezi výhody tohoto principu patří jednoduchost zařízení a rychlost procesu, ale je nutné pracovat s chemikáliemi a pravidelně regenerovat roztok. Elektrochemické leštění se využívá pro zlepšení vzhledu povrchu součástí, nářadí a nádobí, nebo před další povrchovou úpravou [3].

Pro leštění se využívá nejrůznějších provedení nástrojů podle tvaru upravované plochy:

- a) Kotouče – lamelové a vrstvené z textilních tkanin, umělých vláken, žíní, gumy, kovových drátů, jehel apod.,
- b) kartáče, prstence, válce nebo textilní pásy s tvarovou opěrkou [1].

S ohledem na materiál a požadovanou jakost povrchu se používají brousící zrna z nejrůznějších brousících materiálů a v různých zrnitostech [1].

2.1.7. Omílání

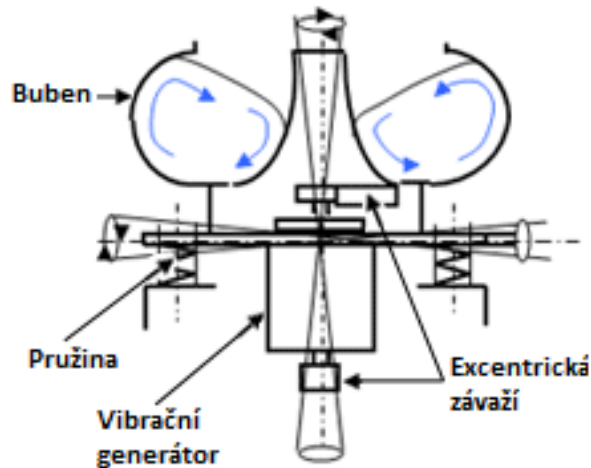
Omílání je jedna z nejproduktivnějších dokončovacích metod obrábění. Jedná se o speciální proces úpravy povrchu velkého počtu součástí, při kterém dochází k úběru materiálu třením a nárazy

mezi leštícím médiem a obrobky. Celá směs se uvádí do vzájemného pohybu otáčením nebo vibracemi strojního zařízení [3].

Účinek celého procesu závisí na tvaru a pohybu omílacího bubnu, tvaru, pohybu, velikosti a materiálu brusných částic, vlastnostech obráběného materiálu, jeho velikosti, hmotnosti a tvaru ploch. Omílání může probíhat za sucha nebo s přivedením kapaliny s aditivou k urychlení procesu a zabránění vzniku koroze. Proces může probíhat přerušovaně, kontinuálně i v automatickém cyklu. Využívá se různé zrnitosti abrazivních částic a různých tvarů a velikostí omílacích nástrojů. Bubny mohou být kruhového, šestihranného, osmihranného průřezu, tvaru válce, kužele, hranolu, zvonu, kulové úseče nebo mohou být tvořeny kombinacemi těchto geometrických útvarů. Vnitřní část válce může obsahovat přepážky, upínací přípravky apod. Rotační pohyb může být realizován v různě nakloněné poloze osy, excentricky, sféricky s plynulým, přerušovaným nebo vratným charakterem. Podle výchozího stavu součásti a požadované jakosti povrchu lze proces rozdělit do několika fází: Čištění, broušení, leštění, doleštění a zpevnění [1].

Při omílání se používají abrazivní materiály z oxidů křemíku, hliníku, porcelánu, kalené ocelové kuličky, drcená žula, litinová drť, úlomky keramiky, vídeňské vápno, odřezky kůže, dřevěné piliny a další. Pracovní kapalina je založena na bázi chloridu nebo nitridu sodného s přidáním dalších kapalin jako jsou fosforečnan sodný, oxid chromový, kyselina sírová, uhličitan sodný, voda, vodní sklo a další [3].

Tato dokončovací technologie má několik modifikací, mezi které patří vibrační, rotační a odstředivé omílání. Princip vibračního omílání je znázorněn na obrázku 8. Dokončování omíláním dále nezlepšuje přesnost rozměrů ani přesnost tvaru, ale obrobený povrch dosahuje nízké drsnosti $R_a = 0,1\text{--}0,4 \mu\text{m}$ [28].



Obrázek 8: Vibrační omílání [29]

2.2. Dokončovací metody bez úběru materiálu

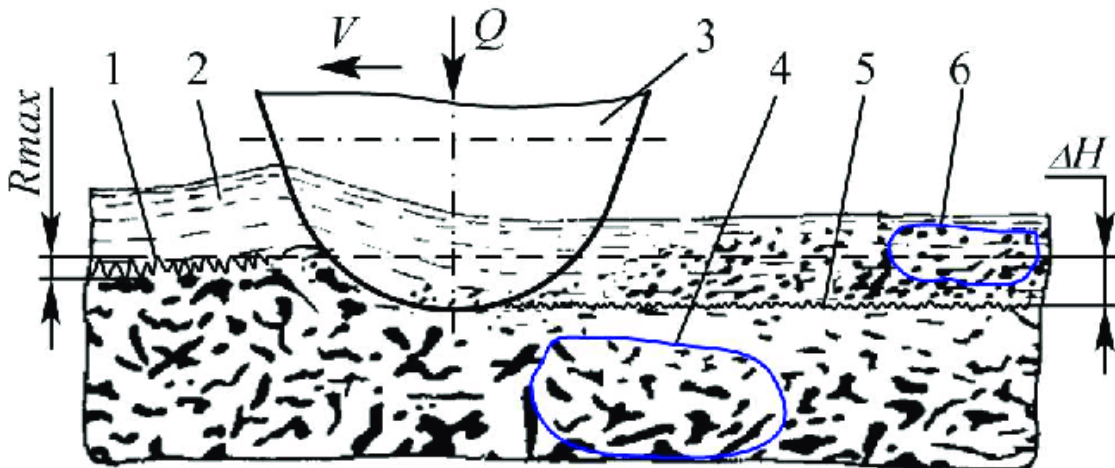
Dokončovací metody bez úběru materiálu se vyznačují úpravou povrchové vrstvy plastickou deformací, která může zasahovat do hloubky až několika desetin milimetru. Plastická deformace za tepla, například při závěrečné fázi leštění, má sice za následek snadnější odstranění vrcholků nerovností a dosažení vysokého lesku povrchu, ale zároveň může vyvolat tahová pnutí a strukturní změny v povrchové vrstvě, čímž roste pravděpodobnost vzniku trhlin a snížení životnosti součásti. Pokud plastická deformace probíhá za studena, dochází ke zpevnění, vyvolání tlakových zbytkových pnutí a zlepšení drsnosti povrchu. Vyvolání tlakových zbytkových pnutí snižuje nebo i odstraňuje vliv předcházejících operací a zlepšuje mechanické vlastnosti. Takto opracovaná součást má vyšší únavovou pevnost, zvýšenou odolnost proti korozi, otěru, tvrdost a vyznačuje se vyšší životností. Mezi nejrozšířenější metody dokončování bez úběru materiálu patří vyhlazování, válečkování, kalibrování, tryskání nebo kuličkování [1][3].

2.2.1. Vyhlažování

Vyhlažování je základní a také nejjednodušší metodou dokončování bez úběru materiálu. Principem této metody je vytvoření tlakového a smykového napětí přitlačováním pevného tváředho elementu při vzájemném pohybu. Na obrázku 9 je znázorněn princip vyhlazování. Nástroj je tvořen upínací částí z konstrukční oceli a pracovním tělesem, které může mít různé tvary vhodné k vyhlazování rotačních a rovinných ploch. Výsledné hodnoty drsnosti povrchu a hloubky jeho zpevnění jsou ovlivněny tvarem a materiálem tváředho tělesa, přitlačnou silou (80 až 1000 N), rychlostí pohybu (40 až 100 m·min⁻¹), posuvem (0,02 až 0,10 mm·ot⁻¹), opakovaným přejezdem, chlazením

a mazáním. Výsledné hodnoty je ale nutné pro každý materiál, rozměr a tvar dokončovaného povrchu ověřit [1].

Na výrobu vyhlazovacích tělísek se často používá kalená nástrojová nebo rychlořezná ocel, sli nutý karbid, spékáný korund, polykrystalický kubický nitrid boru nebo syntetický diamant [1].



Obrázek 9: Princip vyhlazování povrchu šedé litiny; 1 – povrch před hlazením, 2 – chladičí a mazací kapalina, 3 – pracovní těleso, 4 – grafitové částice v intermetalické fázi, 5 – povrch po hlazení, 6 – grafitové částice odcházející s kapalinou [13]

2.2.2. Válečkování a kuličkování

Dokončovací metoda válečkování, respektive kuličkování, je proces, při kterém se odvaluje otočné tvářecí těleso po upravovaném povrchu součásti. Působením tlaku na nástroj dochází k plastické deformaci, jež, oproti ostatním způsobům, zasahuje i do větších hloubek obrobku. To přináší zlepšení mechanických vlastností, zvýšení pevnosti a zlepšení únavové odolnosti při dynamickém zatížení. Rovněž lze dosáhnout vyšší přesnosti rozměrů, mikrogeometrie povrchu a nižší drsnosti. Tuto metodu je možné aplikovat na vnitřní i vnější rotační, rovinné i tvarové plochy, drážky, zápichy, závity a jiné strojní součásti [1][4][14].

Válečkování a kuličkování se obvykle aplikuje na obrobené povrchy s drsností menší než $R_a = 3,2 \mu\text{m}$ a na tvárné materiály s pevností do 1250 MPa a minimální tažností 8%. Výsledné vlastnosti povrchu jsou ovlivněny velikostí přitlačné síly, konstrukcí a materiálem nástroje, způsobem válečkování, rychlostí pohybu, posuvem, přídavkem, výchozí drsností, počtem opakovaných přejezdů, mazací a chladičí emulzí. Dokončovací metodou se změní rozměr součásti o 0,01 až 0,03 mm. Lze dosáhnout stupně přesnosti IT6 až IT8 a drsnosti povrchu $R_a = 0,1\text{--}0,4 \mu\text{m}$ [4][14].

Způsoby technologie lze rozdělit na zapichovací, podélné, příčné, šikmé, statické s konstantní nebo plynule proměnnou silou a dynamické [1].

Na válečkovací tělesa se využívají kalené nástrojové oceli, rychlořezné oceli, slinuté karbidy apod. Válečkovací nástroje je také možné upravit například diamantovou ploškou. V těle nástroje rotují pracovní tělesa vlivem odvalování nástroje nebo obrábku a mohou mít tvar válce, kužele nebo kuličky. Tvářecí elementy mohou být souosé s tělem nástroje nebo mohou jejich osy svírat úhel 4° až 10° [1][3][14][15].

2.2.3. Kalibrování

Princip této metody spočívá ve vyvolání plastické deformace přímočarým pohybem tvářecích elementů – smykem. Rozměr nástroje je větší pro úpravu vnitřních ploch, respektive menší na plochy vnější. Tvářecím tělesem může být kulička, speciální trn, objímka nebo hladící zuby protahovacích a protlačovacích nástrojů. V obvyklých případech je pohyb realizován hydraulicky nebo mechanicky, pro vnitřní plochy lze využít i rázu tlakové kapaliny nebo výbuchu [1].

V závislosti na vlastnostech obráběného materiálu, tvaru nástroje, výchozích rozměrech, drsnosti povrchu, rychlosti pohybu, použitém mazivu, a tuhosti soustavy lze kalibrováním dosáhnout zpřesnění rozměrů až na hodnoty IT4. Zároveň dochází ke snížení drsnosti $R_a = 0,005\text{--}0,400 \mu\text{m}$ a zpevnění povrchové vrstvy do hloubky $0,05\text{--}0,20 \text{ mm}$ [1].

2.2.4. Tryskání

Působením volných částic neabrazivního materiálu dopadajícího vysokou rychlostí (až $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) na povrch součásti dochází k vyvolání plastické deformace, zlepšení drsnosti povrchu a zpevnění. V závislosti na požadovaných výsledných parametrech povrchu, vzdálenosti trysky a velikosti částic, se volí pracovní tlak nosného média v rozmezí $0,1$ až 20 MPa . Směs vody, vzduchu a částic dopadá na opracovávanou plochu pod úhlem 50° až 80° [1].

Používané pracovní částice mají různé tvary a velikosti. Používají se například ocelové kuličky, broky z bílé tvrzené litiny, sekaný ocelový drát, skleněné kuličky apod. [1]

Změna drsnosti je závislá na vstupních naměřených parametrech a může se vlivem tryskání snížit i zvýšit. Snižováním tlaku a postupným přetryskáním částicemi větších rozměrů lze dosáhnout nejlepších hodnot drsnosti, až $R_a = 0,1 \mu\text{m}$. Hloubka zpevnění se pohybuje mezi hodnotami $0,05\text{--}0,50 \text{ mm}$. Přesnost rozměrů a tvarů se tryskáním nezlepší [1].

Použitím jiných parametrů tryskání a jiného abraziva ovšem lze dosáhnout úběru materiálu. Proces probíhá bez tepelného ovlivnění. Dochází k částečnému zpevnění a mění se drsnost povrchu ($R_a = 0,1\text{--}0,8 \mu\text{m}$). Výslednou drsnost a odebrané množství materiálu ovlivňují tyto parametry [1]:

- a) Druh a zrnitost brusiva,

- b) tlak nosného média (0,1 až 10 MPa),
- c) vzdálenost trysky od povrchu (20 až 100 mm),
- d) úhel sklonu trysky (10° až 45°)
- e) doba působení a rychlost vzájemného pohybu trysky a součásti,
- f) počet opakovaných průchodů,
- g) překrytí stop a způsob pohybu tryskou.

Na tryskání s úběrem materiálu se jako abrazivum využívá tříděný křemičitý písek, tříděná zrna brousícího materiálu, litinová nebo ocelová drť a jemné třísky [1].

2.2.5. Vibrační zpevňování

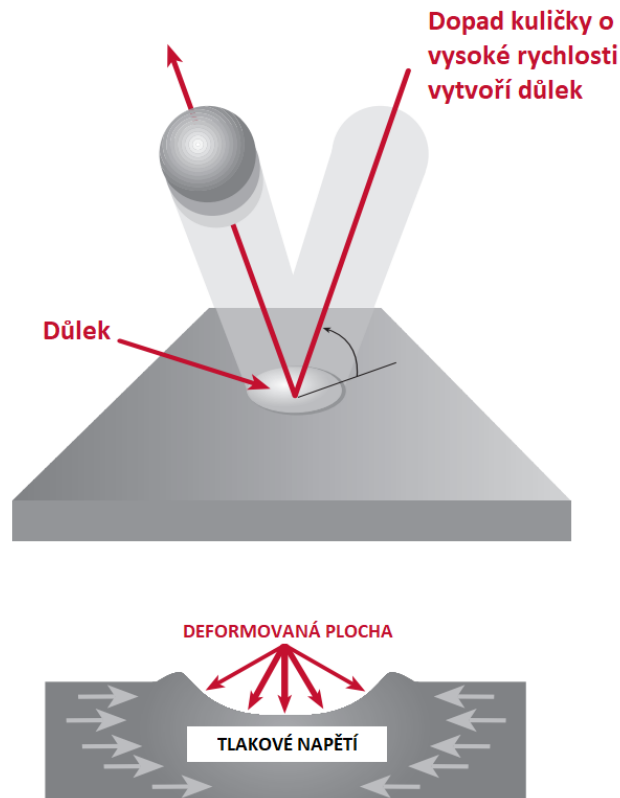
Při této dokončovací metodě dochází k mechanickému nebo ultrazvukovému vyvolání vibrací, které urychlují tvářecí částice a tím způsobí plastickou deformaci povrchové vrstvy [1].

K mechanickému vyvolání vibrací dochází kmitavým pohybem součásti umístěné ve speciálním zařízení. Pohyb je udělován ve třech osách, případně za současně rotace kolem osy a proměnnou rychlostí. Vektor výsledného zrychlení pracovních tělísek by měl směřovat kolmo k tvářené ploše. Používají se ocelové nebo litinové kuličky o co největší hmotnosti, jejich průměr je však limitován poloměrem přechodů mezi plochami. Ultrazvukem vyvolané vibrace dosahují vysokých frekvencí až 30 kHz. Buď pevný nástroj tvoří nástavec zdroje ultrazvukových kmitů a opírá se o upravovaný povrch, nebo je obrobek pevně upnutý v zásypu ocelových kuliček a vibrace jsou jimi přenášeny z nástavců na stěnách zařízení [1].

2.2.6. Shot peening

Shot peening, řízené kuličkování, patří k nepostradatelným metodám dokončování ve všech průmyslových oborech. Nejvýznamnější vliv má nejen v kosmickém a leteckém průmyslu na bezpečnost a životnost dílů. Vyvolává zbytková tlaková napětí zvyšující odolnost proti únavovým poruchám a opotřebení, korozi a mezikrystalovou korozi, vodíkovému praskání, snížení pórovitosti atd. Zlepšují tedy funkční charakteristiky a prodlužují životnost kritických dílů [16][17][19].

Jedná se o zvláštní druh tryskání, při kterém malé sférické částice řízeně dopadají na opracováváný povrch. Princip kuličkování je znázorněn na obrázku 10. Každá částice, která narazí do povrchu kovu svou vysokou kinetickou energií, vytvoří důlek. Překrytím jednotlivých důlku vznikne souvislá zpevněná vrstva. V povrchové vrstvě vznikají velmi vysoká zbytková tlaková napětí, která zamezují vzniku již zmiňovaných poruch a eliminují vliv koncentrátorů napětí, tedy vrubů apod. [18][20].



Obrázek 10: Princip řízeného kuličkování [18]

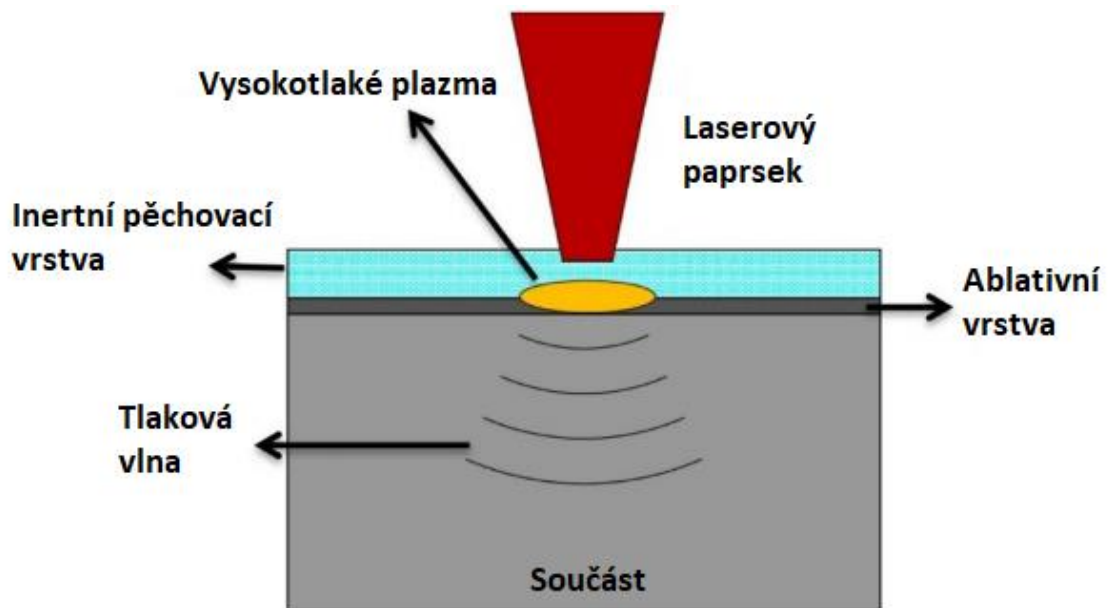
Médium používané při procesu se skládá z malých kuliček z kalené uhlíkové nebo nerezové oceli, sekaného drátu. Využit lze také keramických nebo skleněných částic, poté se této technologii říká balotinvání. Používané pracovní elementy musí být kontrolovány a upraveny do téměř kulatého tvaru a musí mít tvrdost stejnou nebo vyšší než upravovaný povrch, neboť tato tvrdost ovlivňuje velikost tlakového napětí. Intenzita zpevnění se měří pomocí Almen pásků a největší vliv na něj a na drsnost povrchu má doba expozice, průměr kuličky a provozní tlak tryskacího zařízení [18][21].

2.2.7. Laser peening

Tato technologie se využívá u dílů, které vyžadují ještě větší vylepšení odolnosti proti opotřebení a únavě, než je možné dosáhnout metodou shot peening. Někdy nemusí docházet k vytvoření dostatečných reziduálních tlakových napětí a vytvoření požadovaného zpevnění kritických částí. Z tohoto pohledu je technologie „laserového“ tryskání značně účinnější a lze dosáhnout zpevnění povrchu až desetkrát hlouběji [22].

Principem této metody je vytvoření rázové vlny vyvolané laserovými pulsy dopadajícími na opracovávanou součást. Tyto vlny povrch dílu deformují a vnášejí do něj zbytková tlaková napětí, která jsou na povrchu nejvyšší a zmenšují se směrem k jádru. Hloubka zpevnění může být až o řád vyšší oproti

ostatním technologiím. Celý princip je znázorněn na obrázku 11. Na povrchu součásti je nanесena ablační vrstva z hliníku, mědi, olova, vinylu, zinku nebo černé barvy. Tato vrstva absorbuje energii laserového paprsku a tak zabrání tavení. Intenzita laserové energie způsobí vytvoření plazmatu, které je zadržováno na povrchu součásti inertní vrstvou z vody, křemenu nebo skla a způsobuje vytvoření tlakové vlny. Plastická deformace nastane, když napětí rázové vlny překročí mez pevnosti materiálu součásti [23].



Obrázek 11: Princip metody laser peening [23]

2.3. Nekonvenční metody obrábění

Dokončovací metody obrábění materiálu, které v převážné míře nevyužívají mechanického úběru třísek, lze souhrnně označit jako nekonvenční. Jsou založeny na fyzikálním, chemickém, nebo fyzikálně-chemickém principu. Základní rozdělení metod je uvedeno v tabulce 7. Výhodou těchto metod je skutečnost, že obrobiteľnost je limitována převážně fyzikálními vlastnostmi a chemickým složením, na rozdíl od klasických, které mají obrobiteľnost materiálu limitovanou mechanickými vlastnostmi, zejména pevností a tvrdostí. Vzhledem k principům úběru materiálu je obrobiteľnost dále dána tepelnou a elektrickou vodivostí, teplotou tání, odolností proti elektrické a chemické korozi a vzájemnou vazbou atomů a molekul. Z těchto důvodů je výhodné nekonvenční metody využívat pro obrábění těžkoobrobiteľných materiálů [1][24][25].

Tabulka 7: Rozdělení nekonvenčních metod obrábění [1][24]

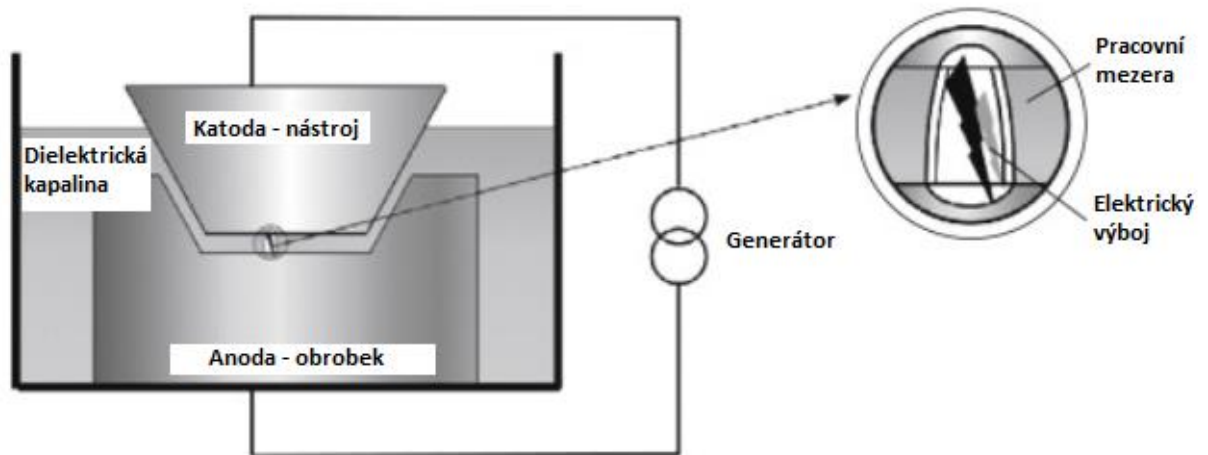
Elektro-tepelné principy	Elektroerozivní obrábění, obrábění paprsky koncentrované energie fotonů, elektronů, iontů, plazmatu
Elektrochemický princip	Elektrochemické obrábění
Chemický princip	Chemické obrábění
Mechanické principy	Obrábění ultrazvukem, vodním paprskem, proudem brusiva

Elektro-tepelné metody jsou založeny na principu zahřátí malé plochy povrchu součásti značnou koncentrací energie na vysokou teplotu a odtavování a odpařování částic materiálu. Podstatou elektrochemických metod je využití elektrického proudu působícího v kapalném vodiči, elektrolytu. Chemické technologie obrábění využívají odběru malých tloušťek materiálu z obrobků velkých plošných rozměrů a složitých tvarů chemickou reakcí mezi částicemi součásti a chemickou látkou. Nekonenční mechanické metody obrábění využívají abrazivního účinku proudící kapaliny nebo směsi kapaliny a brusiva a působení kavitace eroze [1][24][25].

Mezi základní důvody zavádění a rozšiřování nekonvenčních metod obrábění patří rostoucí nároky na konstrukci strojních součástí, použití žárupevných, žáruvzdorných a vysokopevnostních materiálů; tvarová složitost součástí, tvářecích a slévacích nástrojů a forem, řezných nástrojů; požadavky na přesnost výroby drobných součástí; požadavky na produktivitu a zavedení automatizace; možnost současně s výrobou tvaru měnit i vlastnosti povrchové vrstvy [1][4].

2.3.1. Elektroerozivní obrábění

Základem úběru materiálu u této technologie je elektrická eroze, při které dochází k odebrání částic materiálu účinkem tepelného a tlakového působení elektrických výbojů. Princip metody je na obrázku 12. Jedná se o elektrotepelný proces, při kterém je obrobek nejčastěji zapojen jako anoda a společně s nástrojovou katodou je ponořen do dielektrika, nejčastěji kapaliny s velkým elektrickým odporem. Lze tedy opracovávat pouze elektricky vodivé materiály. Povrchová vrstva obrobku taje a odpařuje se vlivem vysoké koncentrace energie dosahující hodnot 10^5 až 10^7 W·mm⁻². Zároveň dochází k odpařování dielektrika, vznikající bubliny praskají a tímto vzniklé dynamické síly v místě náboje odebírají částice materiálu [24][25].



Obrázek 12: Princip elektroerozivního obrábění [26]

Minimálního opotřebení nástroje, maximálního úběru materiálu obrobku, tvarové přesnosti a drsnosti plochy při požadované produktivitě lze dosáhnout správnou volbou parametrů. Zejména volbou vhodné polarity, nastavením vhodných elektrických parametrů, četností výbojů, volbou materiálu nástroje a použitím správného dielektrika [25].

Mezi nejdůležitější funkce dielektrika patří izolace elektrod, ohraničení místa výboje, zabránění usazení a odstranění odebraných částic materiálu a odvod tepla z pracovního prostředí. Z tohoto plynou požadavky na vlastnosti kapaliny, zejména na dostatečný elektrický odpor, aby průrazem dielektrika vznikl výboj, vhodnou viskozitu a smáčivost, přijatelný bod vzplanutí, hygienické a ekologické požadavky, nízké náklady apod. [25].

Materiál na nástrojovou elektrodu se volí dle požadavků na jakost povrchu, přesnost rozměrů, výkon obrábění, a v neposlední řadě na náklady na její výrobu. Materiály na nástrojové elektrody musí disponovat dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí, vysokou tepelnou kapacitou, vysokým bodem tání a bodem varu, odolností proti erozi, dostatečnými mechanickými vlastnostmi, stálostí tvarů a malou tepelnou roztažností. Používají se zejména kovové a nekovové materiály jako jsou např. slitiny wolframu, hliníku, mědi, mosaz nebo grafit, dále se používají kombinace těchto materiálů, například kompozice grafitu a mědi [25].

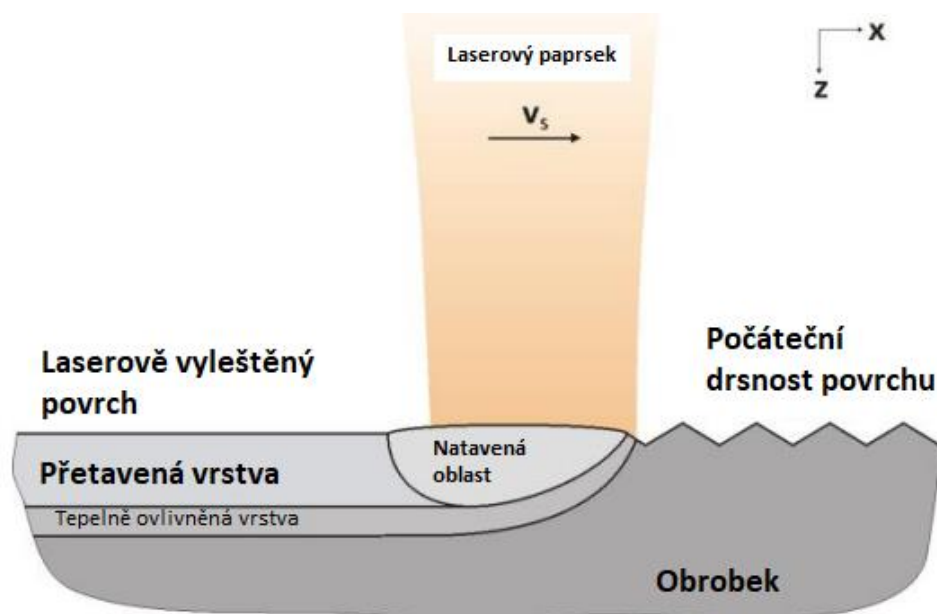
Anodomechanické obrábění také patří k elektroerozivním metodám, ale z hlediska odebrání materiálu by mohlo patřit i do elektro-chemických metod. Zařazení je závislé zejména na energetických parametrech. Použitím vyšších hodnot napětí a proudu dochází k úběru materiálu elektro-tepelným způsobem (elektroerozivní obrábění). Naopak při nastavení nižších parametrů se jedná o elektro-chemickou metodu. Anodomechanický proces probíhá za vysokých teplot v pracovním prostoru zaplaveném kapalinou, která plní funkci izolátoru a odvádí teplo. Otáčivým pohybem nástroje dochází

k narušení izolační vrstvy a vzniku elektrického výboje a natavení povrchu součásti. Zároveň dochází k elektrochemickému rozpouštění v důsledku elektrolýzy. Při broušení a leštění touto metodou dosahujeme výsledné drsnosti $R_a = 0,1\text{--}3,2 \mu\text{m}$ v závislosti na zvolených parametrech procesu, druhu elektrolytu, teplotě tavení a tepelné vodivosti obráběného kovu. K nejvíce používaným pracovním médii patří vodní sklo a vodní roztok tetraboritanu sodného [4].

2.3.2. Obrábění laserem

Princip metody je založen na transformaci světelné energie na tepelnou. Při interakci opticky soustředěného paprsku laseru s povrchem se materiál obrobku ohřívá, taje a odpařuje. Soustředí-li se energie paprsku laseru o průměru světelné stopy $0,01 \text{ mm}$, tedy na plochu řádu 10^{-4} mm^2 , při běžném výkonu laseru $0,5 \text{ až } 30 \text{ kW}$, získáme hustotu výkonu řádově $10^8 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$. Tato hodnota je jinými technologiemi nedosažitelná. Teplota, která se při procesu vyvine, dosahuje řádu až $10^4 \text{ }^\circ\text{C}$. Metoda se využívá na velmi těžko obrobitelné materiály, výrobu otvorů malých průměrů, značení a popisování, leštění [1][24].

Dokončování povrchů laserem se provádí působením paprsku tangenciálně na rotující obrobek, kdy dojde k zahlazení nerovností po předchozím obrábění. Další možností je proces leštění, který využívá pulzních laserů s dobou trvání paprsku v nanosekundách až femtosekundách. Princip metody je znázorněn na obrázku 13. Touto aplikací dochází k opakovanému přetavení tenké povrchové vrstvy menší než $80 \mu\text{m}$. Lze tak dosáhnout drsnosti povrchu $R_a = 0,1\text{--}0,2 \mu\text{m}$ bez vzniku pórů, trhlin nebo jiných vad [27].



Obrázek 13: Princip laserového leštění [27]

2.3.3. Elektrochemické broušení, lapování, honování a leštění

Elektrochemické obrábění je velmi progresivní technologie beztržiskového řízeného obrábění elektricky vodivých materiálů. Proces probíhá elektrolýzou, při které prochází stejnosměrný proud elektrolytem, obráběná plocha anody se rozpouští a nabývá stejného tvaru jako má tvar nástroje – katody. Rychlost rozpouštění kovu je dána vzdáleností pracovní mezery mezi elektrodami a proudovou hustotou při pracovním napětí. Látkový přenos probíhá zejména konvekcí, difuzí a migrací kationtů v elektrolytu, které se slučují s anionty kovu anody a rozpouští ji. Množství elektrochemicky rozpuštěného kovu je dáno Faradayovými zákony, teorií elektrolytů a termodynamikou galvanických článků [25].

Podle Faradayových zákonů platí [25]:

I. zákon: Množství látky uvolněné nebo chemicky přeměněné na elektrodách je přímo úměrné množství prošlého náboje.

II. zákon: Prochází-li stejný proud po stejnou dobu různými elektrolyty, je množství vyloučených látek úměrné jejich chemickým ekvivalentům.

Elektrolyt zajišťuje vedení elektrického proudu, určuje podmínky rozpouštění anody, z pracovního prostoru odvádí teplo a produkty vzniklé chemickými reakcemi. Množství odvedeného tepla závisí na součiniteli tepelné vodivosti elektrolytu, hustotě, průřezu pracovní mezery, rychlosti proudění elektrolytu a jeho teplotě. Jako elektrolyty se používají chemické sloučeniny iontového charakteru, například NaCl, NaNO₃, NaOH, HCl a další, podle obráběného materiálu [25]

Elektrochemické obrábění se používá na hloubení tvarů a dutin, otvorů malých průměrů odstraňování otřepů, dělení materiálu, ale také na broušení, lapování, honování a leštění [25].

Při **elektrochemickém broušení** je materiál obrobku z větší části (80–90 %) odebrán anodickým rozpouštěním. Mechanický brusný kotouč z obráběného povrchu spíše odstraňuje oxidační vrstvy. Dle velikosti zrn je dána pracovní mezera a elektrolyt je přiváděn do středu kotouče, ze kterého se vlivem odstředivé síly dostává na stykovou plochu. Nejpoužívanější je brousící nástroj z niklu nebo bronzu se zrny diamantu. Touto metodou se často brousí slinuté karbidy a lze dosáhnout vysoce jakostní vrstvy bez pnutí a vzniku trhlinek. Hodnoty drsnosti Ra dosahují 0,012 až 0,250 μm, při rychlosti úběru 1,5 mm·min⁻¹. Princip **elektrolytického lapování** je stejný, ale používají se kotouče z oceli nebo litiny a brousící zrna jsou přiváděny do pracovního prostoru elektrolytem. Dosahované parametry drsnosti jsou 0,2 až 0,5 μm [1][25].

Z klasického způsobu **honování** vychází princip **elektrochemický**. K honovací hlavě připojené na záporný pól stejnosměrného napětí jsou upevněny nevodivé lišty. Obráběná součást je izolována od rámu stroje a připojena na pól kladný. Pracovní kameny se používají se zrna karbidu křemíku, oxidu hliníku a diamantu v kovové vazbě. Na výsledné parametry procesu má největší vliv velikost a stabilita pracovní mezery a správná disperze elektrolytu. Oproti klasickému způsobu honování je tato metoda až šestkrát účinnější [25].

Základním principem **elektrochemického leštění** je anodické rozpouštění vrcholů a nerovností povrchu součásti ponořené v elektrolytu za působení stejnosměrného elektrického proudu. Nástrojová elektroda (katoda) musí být nerozpustná v elektrolytu a její plocha musí být větší než plocha obrobku, tedy anody. Na obráběném materiálu se v průběhu leštění vytváří vrstva rozpuštěných produktů, jež ulpívají v prohlubních. V místech vrcholů je hustota proudu vyšší a proto dochází k intenzivnějšímu rozpouštění a zahlazení nerovností. Množství rozpuštěného materiálu je závislé na hustotě proudu, složení a teplotě lázně, umístění obrobku v elektrolytu a druhu materiálu. Elektrochemickým leštěním lze dosáhnout rychlosti úběru $0,5$ až $0,8 \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Drsnost je závislá na vstupních hodnotě. Obecně lze říci, že je možné dosáhnout 40 až 50 % původní hodnoty Ra [4][25].

2.3.4. Chemické obrábění

Principem chemického obrábění je řízené odleptání povrchové vrstvy součásti chemickou reakcí mezi obráběným materiálem a chemickou látkou, nejčastěji kyselinou nebo hydroxidem. Odleptávané vrstvy mají tloušťku od několika setin milimetru do několika milimetrů. S výhodou se tedy metoda využívá při úběru malých tlouštěk materiálu z velkoplošných, složitých součástí. Leptání se provádí ponořením obráběného dílu do leptacího roztoku, neobráběná místa je nutné maskovat pomocí polyvinylových nebo polyamidových pryskyřic a laků. Nejlépe se touto metodou obrábějí litiny hliníku, hořčíku a titanu. V závislosti na parametrech procesu jako je rychlost leptání nebo hloubka vrstvy, lze na obráběném materiálu získat povrch s drsností až $Ra = 0,4 \mu\text{m}$ [4][25].

2.3.5. Ultrazvukové obrábění

Podstatou metody ultrazvukového obrábění je řízené přivedení abrazivního materiálu mezi obrobek a rozkmitaný nástroj. Vysokou frekvencí rozkmitaná zrna narážejí a pronikají do povrchu materiálu a rozrušují jej. V případě použití řízeného přitlačování nástroje k obrobku danou silou a rychlostí dochází k překopírování tvaru nástroje do obrobku. Pracovní nástroj je v podélném směru rozkmitán na ultrazvukovou frekvenci o hodnotě 18 až 25 kHz, která je tlumena viskozitou přiváděné kapaliny s abrazivem. K největší intenzitě úběru materiálu dochází v rovinách kolmých na směr kmitání nástroje, současně však může docházet k posuvnému pohybu a abrazi otěrem [25].

Na výrobu nástrojů se používá konstrukční ocel, korozivzdorná ocel, měď a mosaz a mají tvar obráběné plochy. Jako abrazivní materiál se používají částice diamantu, polykrystalického nitridu boru, karbidy boru a křemíku nebo oxidy hliníku při koncentraci 30 až 40 % [25].

Ultrazvukové obrábění se používá na řezání, hloubení tvarů a otvorů a broušení rovinných ploch součástí z tvrdých a křehkých materiálů jako jsou sklo, křemík, ferity, germanium, keramika, grafit, kevlar nebo slinuté karbidy. Plastické materiály jsou touto metodou v podstatě neobrobitelné [25].

Výkon obrábění ovlivňuje především amplituda kmitání, přítlak a tvar nástroje, zrnitost brusných zrn a viskozita pracovní kapaliny. Hodnoty přesnosti rozměrů dosahují 0,02 až 0,05 mm, výsledná drsnost povrchu Ra je v rozmezí 0,3 až 1,6 μm [25].

2.4. Srovnání vybraných metod

Ke srovnání dokončovacích metod obrábění a jejich výběru lze využít velké množství parametrů v závislosti na požadavcích na výslednou drsnost, stupeň přesnosti rozměrů, přesnost geometrického tvaru, integritu povrchu apod. Výběr metody je také závislý na vstupních parametrech obráběné plochy, tvaru, rozměrech, materiálu, době přípravy, provozních nákladech a dalších kritériích. Pro názornost je v tabulce 8 uvedeno srovnání dosahovaných hodnot drsnosti při aplikaci jednotlivých metod.

Tabulka 8: Srovnání dosahovaných drsností vybraných dokončovacích metod obrábění [1][4][24][30]

Způsob obrábění	Drsnost povrchu Ra [μm]
Jemné soustružení	0,200–1,600
Broušení	0,050–0,400
Honování	0,050–0,100
Superfinišování	0,025–0,100
Lapování	0,012–0,050
Leštění	0,010–0,100
Omílání	0,100–0,400
Vyhlazování	0,100–0,400
Válečkování, kuličkování	0,100–0,400
Kalibrování	0,005–0,400
Tryskání	0,100–0,400
Elektroerozivní obrábění	0,100–3,200
Laserové obrábění	0,100–0,200
Elektrochemické obrábění	0,012–0,250
Chemické obrábění	0,100–0,400
Ultrazvukové obrábění	0,300–1,600

Při výrobě rotačních dílů leteckých motorů lze využít pouze některé technologie dokončovacího obrábění, a to z různých důvodů, například z hlediska její kinematiky, požadované drsnosti, stupně přesnosti, hloubky zpevnění, ekologie a v neposlední řadě nákladů celého procesu. Kupříkladu elektrochemickým leštěním lze získat vynikající parametry drsnosti, avšak je nutné pracovat s chemickými látkami, které je náročné likvidovat a je nutné dodržovat bezpečnostní předpisy pro nakládání s nimi. Tato technologie oproti ostatním navíc nezaručuje tak velké zpevnění. Vlivem probíhajících reakcí v roztoku dochází k rozkladu sloučenin a uvolňování molekul vodíku, které následně mohou způsobit vodíkovou křehkost. V současné době se lopatky a další součásti leteckých motorů brousí převážně ručně, což je velmi náročné z hlediska objemu nákladů, a to z důvodu časové náročnosti nebo počtu dobrých dílů a zmetků. Na tuto činnost je potřeba vysoce kvalifikovaného, zkušeného brusiče, který dokáže zajistit, aby nedocházelo ke kolísání kvality výsledné vrstvy (drsnosti povrchu, přesnosti rozměrů a tvaru). V neposlední řadě je třeba brát v úvahu, že směr broušení vůči směru zatěžování zkušebního tělesa nebo směru namáhání dílu je u této technologie stěžejní.

3. Přehled geometrií zkušebních těles

Technické normy ať už evropské, mezinárodní nebo národní definují požadavky na vhodnost výrobku, procesu nebo služby pro dané využití při specifických podmínkách. Slouží jako referenční úroveň a stanovují výchozí postuláty na kvalitu, bezpečnost, slučitelnost, zaměnitelnost, ochranu zdraví, ochranu životního prostředí. Zajišťují racionální výrobu, chrání spotřebitele i výrobce a podporují vztahy mezi jakostí a náklady, výrobky a službami apod. V současné době jsou technické normy s výjimkou veřejných zakázek pouze kvalifikovaná doporučení a nejsou tedy závazná. V České republice jsou normy vydávány Úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví [31].

Jednotlivé druhy norem jsou odlišné podle obsahu určujícího účel jejich použití. Rozlišujeme normy terminologické, základní, zkušební, bezpečnostní, řízení jakosti, výrobků, postupů apod. Původní české technické normy se vytvářejí pouze v případě, že neexistují normy evropské nebo mezinárodní. Přibližně 90 % z celkové roční produkce je tedy přejetých a to překladem, převzetím originálu, nebo schválením k přímému používání [31].

Normy zabývající se problematikou geometrie zkušebních těles jsou například ČSN EN ISO 6892-1 *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*, ČSN ISO 12108 *Kovové materiály – Zkoušení únavy – Metoda růstu únavové trhliny*. Americká norma ASTM A370 *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, německá norma DIN 50125 *Testing of metallic materials – Tensile test pieces* a další. Tyto technické normy se zabývají prováděním technologických zkoušek materiálů a definují vlastnosti, které mohou být z dané zkoušky určeny. Spočívají v tomto případě v deformaci zkušební tělesa předepsaným způsobem a intenzitou zatížení za účelem stanovení nebo verifikace mechanických vlastností, které jsou normou definovány [32][33][34].

V závislosti na tvaru a rozměrech kovového výrobku jsou odebírána zkušební tělesa daných tvarů a rozměrů. Materiál by měl být odebírán z polotovaru nebo ze součásti, případně z obojího, z přesně definovaného místa, které je dáno technickou normou ČSN EN ISO 377. Tímto způsobem lze zaručit získání reprezentativních vlastností, požadovaných při aplikaci materiálu a jeho konečném použití. Obvykle se zkušební tělesa získávají obráběním vzorku z výrobku, výlisku nebo odlitku. Výrobky konstantního příčného průřezu jako jsou profily, tyče nebo dráty a taktéž zkušební tělesa z litin a neželezných slitin lze ale použít bez předchozího obrobení. Ke zkoušení jsou vhodné kruhové, čtvercové, obdélníkové a prstencové průřezy zkušebních těles, nicméně ve zvláštních případech lze použít i průřezy jiných tvarů [32][37][38][39].

V případě použití obrobených zkušebních těles musí být mezi upínacími konci a zkoušenou délkou plynulý přechod, jehož rozměry mohou být důležité. V případě, že nejsou zavedeny normou, je doporučeno, aby byly definovány v materiálové specifikaci. Upnutí probíhá pomocí upínacích konců, které mohou být libovolně přizpůsobeny podle čelistí zkušebního stroje. Osa zkušebního tělesa se vždy musí shodovat s osou zatížení. Zkoušená délka L_c , nebo volná délka mezi čelistmi u vzorků bez přechodového poloměru musí být vždy větší než počáteční měřená délka L_0 [32][37].

Neobrobená zkušební tělesa musí mít takovou volnou délku mezi čelistmi, aby značky vyznačující měřenou délku byly v přiměřené vzdálenosti od čelistí. Litá zkušební tělesa musí mít přechodový poloměr, který by měl být definován v příslušné normě [32][37].

Nesprávnou přípravou zkušebních vzorků často dochází k ovlivnění vlastností materiálu a tím ke zkreslení výsledků zkoušek. U plochých těles dochází stříhem nebo ražbou k deformačnímu zpevnění, což může vést k významným změnám materiálových vlastností, především meze kluzu. Doporučuje se tedy takto ovlivněné plochy frézovat nebo brousit. U obráběcích operací se doporučuje používat nástroje ze slinutých karbidů typu K bez povlaku a využít intenzivního chlazení. Příklad na dokončování musí být minimálně 0,25 mm a odebírá se ve třech třískách – 0,13 mm, 0,07 mm, 0,05 mm. Poslední dokončovací operací je leštění a mělo by být prováděno ve směru osy obrobku. Všechna zkušební tělesa tedy musí být zbavena otřepů, zářezů, drážek, hran, lokálního přehřátí a jiných stop po předchozí obráběcí operaci. V případě zjišťování vlivu specifického faktoru nebo vlastnosti, například povrchové úpravy, však tato doporučení neplatí. Ve všech případech by ale tyto odchylky měly být zaznamenány ve zkušebním protokolu [32][37][38][39].

3.1. Zkušební tělesa dle normy ČSN EN ISO 6892-1

Technická norma specifikuje princip zkoušení kovových materiálů tahem při pokojové teplotě, definuje zkušební tělesa a stanovuje mechanické vlastnosti, které lze metodou získat.

Zkušební tělesa lze rozdělit na poměrná a nepoměrná, podle vztahu mezi počáteční délkou L_0 a průřezovou plochou S_0 . Upřednostňují se zkušební tělesa poměrná, tedy ta, která mají mezi těmito hodnotami přímý vztah vyjádřený rovnicí (1) [32].

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0} \quad (1)$$

Kde [32]: L_0 je počáteční délka v mm,

S_0 je počáteční plocha průřezu v mm^2 ,

k je součinitel proporcionality, mezinárodní přijatá hodnota je $k = 5,65$.

Počáteční měřená délka musí být minimálně 15 mm. V případě, že je počáteční plocha průřezu příliš malá, lze použít vyšší hodnotu součinitele proporcionality, přednostně $k = 11,3$, nebo využít nepoměrné zkušební těleso. U těchto zkušebních těles není dána závislost mezi počáteční měřenou délkou a plochou [32].

Hlavní druhy zkušebních těles jsou definovány podle typu výrobku a jeho rozměrů. Pro tenké výrobky jako jsou plechy, pásy a ploché výrobky o tloušťce 0,1–3,0 mm se používají zkušební tělesa obdélníkového průřezu. Pro dráty, tyče a profily o průměru nebo tloušťce do 4,0 mm se používají neobrobené vzorky s kruhovým, čtvercovým nebo šestihranným průřezem. Stejně průřezy zkušebních těles se obvykle používají i pro plechy a ploché výrobky o tloušťce větší než 3,0 mm a dráty, tyče a profily o minimálním průměru nebo tloušťce 4 mm, avšak zkušební těleso musí být obrobeno [32].

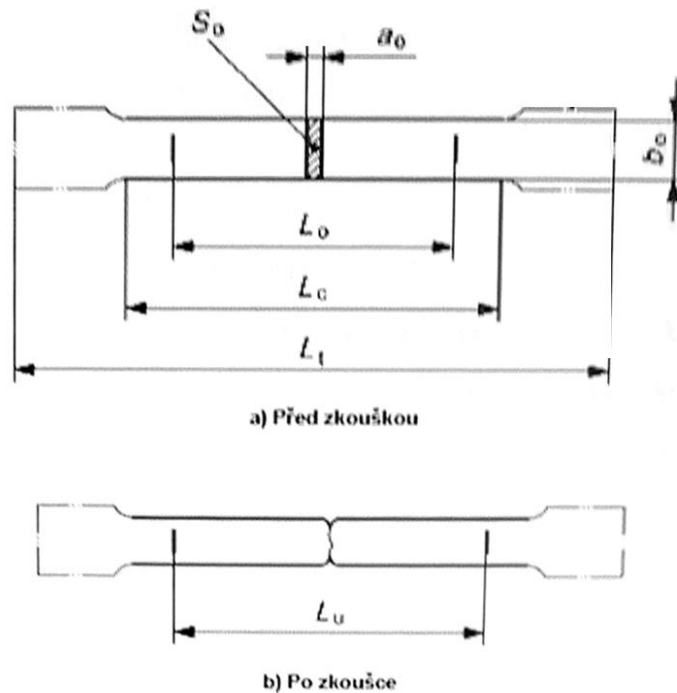
3.1.1. Zkušební tělesa pro plechy, pásy a ploché výrobky o tloušťce 0,1-3,0 mm

Zkušební tělesa se obvykle vyrábějí s upínacími konci o šířce $\geq 1,2 \cdot b_0$, kde b_0 je počáteční šířka a zkoušená délka vzorku musí přecházet přechodovou křivkou o minimálním poloměru 20 mm. V tabulce 9 jsou uvedeny rozměry pro tři obecně používané geometrie nepoměrných zkušebních těles. Při měření vzorků je nutné dodržet mezní úchytky tvaru. U zkušebních těles, která mají rovnoběžné strany o šířce menší než 20 mm, se musí počáteční délka L_0 rovnat 50 mm. Volná délka mezi čelistmi (v milimetrech) odpovídá rovnici (2). Počáteční plocha průřezu S_0 (v mm^2) se vypočítá z naměřených rozměrů zkušebního tělesa s přesností minimálně $\pm 2 \%$. Tvar zkušebního tělesa je znázorněn na obrázku 14 [32].

$$\text{Volná délka mezi čelistmi} = L_0 + 3 \cdot b_0 \tag{2}$$

Tabulka 9: Rozměry zkušebních těles z kapitoly 3.1.1. [32]

Šířka b_0 [mm]	Počáteční délka L_0 [mm]	Zkoušená délka L_c [mm]		Volná délka mezi čelistmi u zkušebních těles s rovnoběžnými stranami [mm]
		Minimální	Doporučená	
$12,5 \pm 1,0$	50	57	75	87,5
$20,0 \pm 1,0$	80	90	120	140,0
$25,0 \pm 1,0$	50	60	-	-



Obrázek 14: Zkušební těleso pravoúhlého průřezu dle normy ČSN EN ISO 6892-1 [32]

3.1.2. Zkušební tělesa pro dráty, tyče a profily o průměru nebo tloušťce do 4 mm

Zkušební těleso je obvykle neobrobeným vzorkem výrobku s počáteční měřenou délkou $L_0 = 200 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ nebo $L_0 = 100 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Vzdálenost mezi čelistmi stroje musí odpovídat rovnici (2) pro výpočet volné délky mezi čelistmi, zároveň však musí být větší než $L_c + 20 \text{ mm}$. Počáteční průřezová plocha S_0 se stanoví z rovnice (3) s přesností $\pm 1 \%$ nebo lepší. Geometrie zkušebního tělesa je vyznačena na obrázku 15 [32].

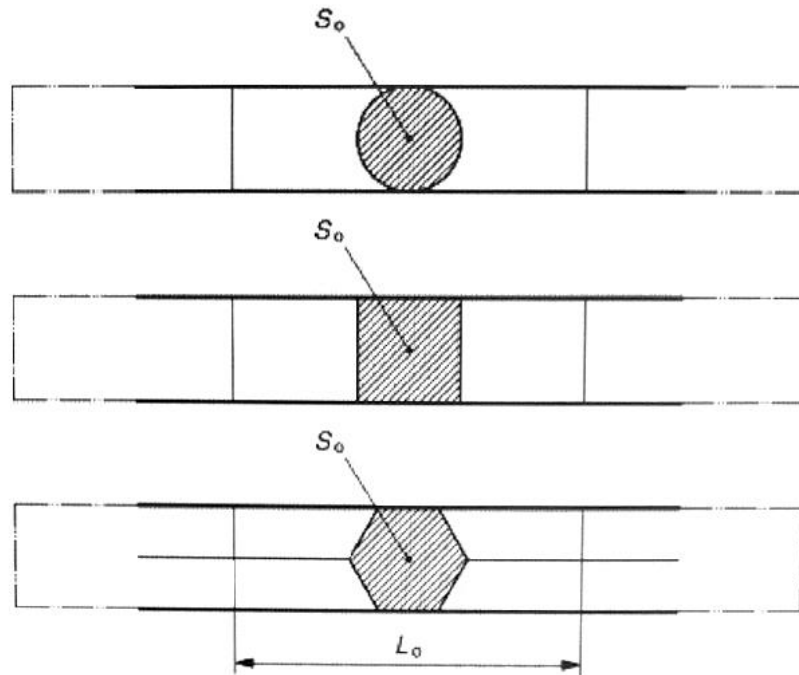
$$S_0 = \frac{1000 \cdot m}{\rho \cdot L_t} \quad (3)$$

Kde [32]: S_0 je plocha průřezu v mm^2 ,

m je hmotnost zkušebního tělesa v g,

L_t je celková délka zkušebního tělesa v mm,

ρ je měrná hmotnost materiálu v $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$.



Obrázek 15: Geometrie neobrobených zkušebních těles dle normy ČSN EN ISO 6892-1 [32]

3.1.3. Zkušební tělesa pro plechy, pásy a ploché výrobky o tloušťce větší než 3 mm a dráty, tyče a profily o minimálním průměru nebo tloušťce 4 mm

Obvykle se používají obrobená zkušební tělesa s přechodovým poloměrem a jakýmkoli vhodným tvarem upínací části. Geometrie zkušebních těles je vykreslena na obrázku 16. Minimální přechodové poloměry musí dle této normy odpovídat třem čtvrtinám průměru zkoušené délky d_0 u válcových těles, nebo 12 mm u těles ostatních. Zkoušená délka L_c u obrobených válcových těles musí odpovídat rovnici (4), u poměrných těles jiných průřezů rovnici (5) a nepoměrných těles rovnici (6). V případě neobrobených těles musí být volná délka mezi čelistmi stroje vzdálená od značek vymezujících měřenou délku alespoň $\sqrt{S_0}$ [32].

$$L_c = L_0 + \frac{d_0}{2} \tag{4}$$

$$L_c = L_0 + 1,5 \cdot \sqrt{S_0} \tag{5}$$

$$L_c = L_0 + \frac{b_0}{2} \tag{6}$$

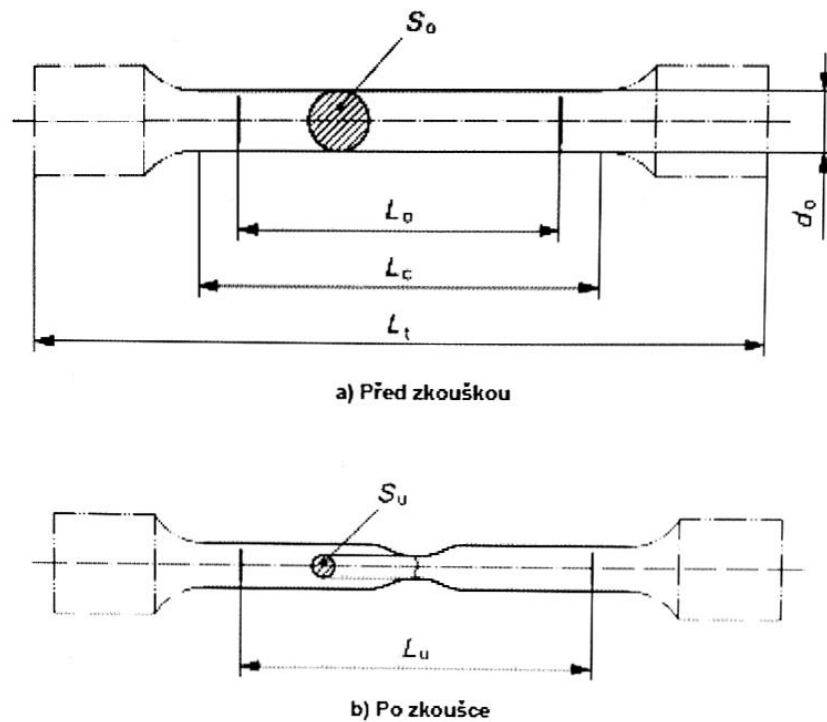
Kde [32]: L_c je zkoušená délka v mm,

L_0 je počáteční měřená délka v mm,

d_0 je počáteční průměr v mm,

S_0 je plocha počátečního průřezu v mm^2 ,

b_0 je počáteční šířka v mm.



Obrázek 16: Geometrie obrobených zkušebních těles dle normy ČSN EN ISO 6892-1 [32]

Norma doporučuje, aby zkušební vzorky měly přednostně jednu řadu rozměrů uvedenou v tabulce 10 pro tělesa kruhového průřezu a v tabulce 11 pro ostatní průřezy. K výpočtu počáteční plochy kruhového a obdélníkového průřezu zkušebních těles lze použít jmenovité rozměry, pro ostatní průřezy je nutné měřit vhodné rozměry s chybou maximálně $\pm 0,5\%$ [32].

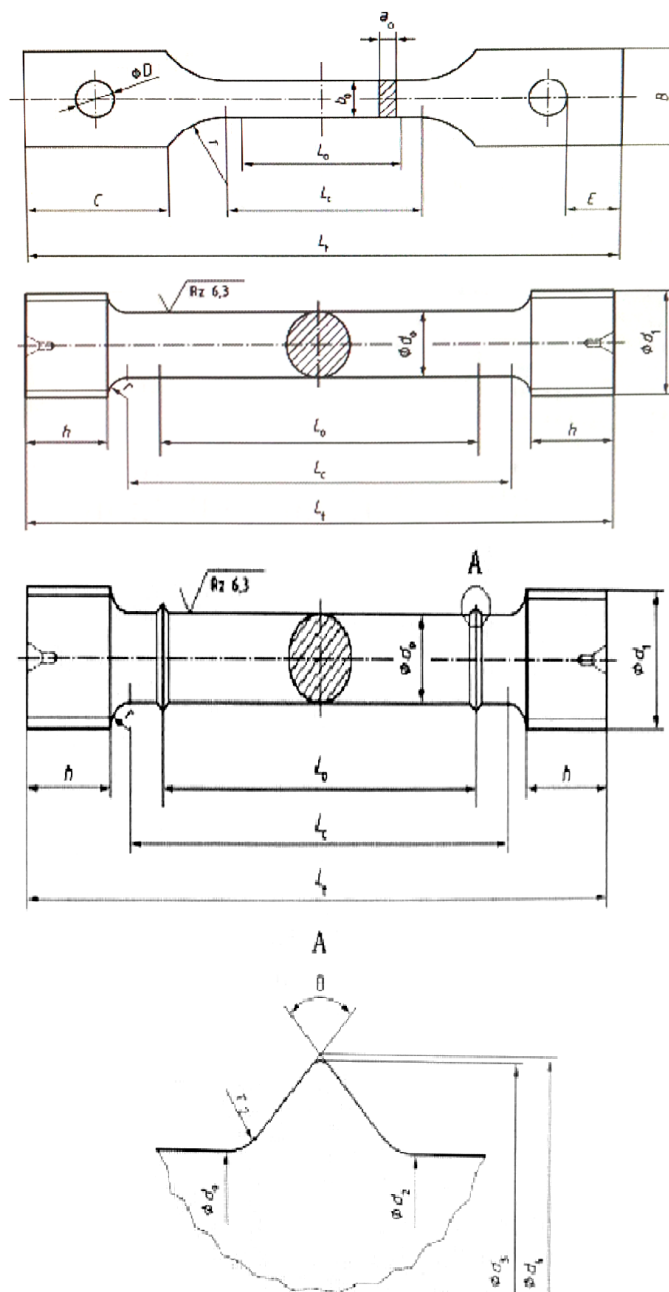
Tabulka 10: Rozměry zkušebních těles kruhového průřezu z kapitoly 3.1.3 [32]

Součinitel proporcionality k	Průměr d [mm]	Počáteční měřená délka L_0 [mm]	Zkoušená délka L_c [mm]
5,65	20	100	110
	14	70	77
	10	50	55
	5	25	28

Tabulka 11: Rozměry zkušebních těles ostatních průřezů z kapitoly 3.1.3 [32]

Šířka b_0 [mm]	Počáteční délka L_0 [mm]	Minimální zkoušená délka L_c [mm]	Přibližná celková délka L_t [mm]
$40,0 \pm 0,7$	200	220,0	450
$25,0 \pm 0,7$	200	212,5	450
$20,0 \pm 0,5$	80	90,0	300

Norma ČSN EN ISO 6892-2 se zabývá stejnou problematikou, ale definuje podmínky zkoušky a požadavky na zkušební tělesa při zvýšené teplotě. Obdobně norma ČSN EN ISO 6892-3 se zabývá podmínkami za nízké teploty. Obecně lze všechny požadavky na zkušební tělesa vyplývající z normy ČSN EN ISO 6892-1 aplikovat i při zkouškách při zvýšené, respektive snížené teplotě. Doporučuje se ale využít jiných upínacích systémů, protože frikční upínání pomocí klínových nebo rovnoběžných čelistí může být problematické, nebo i nepoužitelné. Pro plechy, pásy a ploché výrobky je dobré využít čepů nebo tvarově odpovídajícího osazení. Zkušební tělesa pro dráty, tyče nebo profily je vhodné osazovat závit. Vhodné tvary zkušebních těles jsou znázorněny na obrázku 17 [35][36].



Obrázek 17: Zkušební tělesa s tvarovými upínacími konci dle normy ČSN EN ISO 6892-2 [35]

3.2. Zkušební tělesa dle normy ČSN EN 2002-001

Technická norma, zařazená do kategorie letectví a kosmonautika, stanovuje podmínky pro zkoušku tahem při okolní teplotě. Podle typu výrobků a jeho rozměrů jsou definovány jednotlivé hlavní druhy zkušebních těles takto:

- a) Zkušební tělesa pro plechy a pásy s tloušťkou menší nebo rovnou 8 mm,

- b) neobráběná zkušební tělesa pro tyče, dráty a průřezy o průměru nebo tloušťce menší nebo rovné 8 mm,
- c) obráběná zkušební tělesa pro tyče, dráty, průřezy a desky o průměru nebo tloušťce větší než 8 mm a pro výkovky a odlitky [37].

Povrchová úprava zkoušené délky L_c by u všech zkušebních těles měla dosahovat hodnot R_a vyšších než $0,8 \mu\text{m}$ [37].

3.2.1. Zkušební tělesa pro plechy a pásy s tloušťkou menší nebo rovnou 8 mm

Obvykle se používají zkušební tělesa, která mají upínací konce širší, než je šířka zkoušené délky. Tento rozměr upínací části by měl být minimálně 20 mm, ale neměl by přesahovat hodnotu 40 mm. Zkoušená délka L_c zkušební tyče by měla být napojena na upínací konec přechodovým poloměrem o minimálním rozměru $r = 12 \text{ mm}$. U zkušebních těles, která mají rovnoběžné strany a šířku menší než 20 mm, je možné použít stejnou šířku v upínací části i v části zkoušené délky [37].

Hodnota zkoušené délky L_c tělesa by měla odpovídat rovnici (6). V případě, že není dostatek materiálu, se délka vypočítá dle rovnice (7). V případě použití zkušební tyče s rovnoběžnými stranami a šířce menší než 20 mm, neuvádí-li norma výrobku jinak, musí počáteční měřená délka L_0 odpovídat čtyřnásobku počáteční šířky. V tomto případě volná délka mezi čelistmi odpovídá vypočítané hodnotě dle rovnice (2).

V tabulce 12 jsou uvedeny čtyři základní typy geometrií zkušebních těles. Počáteční plocha průřezu S_0 se musí počítat z rozměrů přímo měřeného vzorku, nebo je možné ji vypočítat dle vztahu (1) [37].

$$L_c = L_0 + 2 \cdot b_0 \quad (7)$$

Tabulka 12: Rozměry zkušebních těles z kapitoly 3.2.1. [37]

Šířka b_0 [mm]	Počáteční délka L_0 [mm]	Minimální zkoušená délka L_c [mm]	Minimální volná délka mezi čelistmi u zkušebních těles s rovnoběžnými stranami [mm]
20,0	80	90,0	140,5
12,5	50	57,0	87,5
6,0	24	27,0	42,0
3,0	12	13,5	18,0

3.2.2. Neobráběná zkušební tělesa pro tyče, dráty a průřezy o průměru nebo tloušťce menší nebo rovno 8 mm

Pokud není v normě výrobku specifikováno jinak, měla by neobrobená zkušební tělesa mít počáteční měřenou délku $L_0 = 50$ mm, vzdálenost mezi upínacími čelistmi zkušebního zařízení by měla odpovídat délce $L_0 + 50$ mm. U zkušebních těles o malém průměru, jako jsou například dráty, by měla tato hodnota odpovídat délce L_0 [37].

3.2.3. Obráběná zkušební tělesa pro tyče, dráty, průřezy a desky o průměru nebo tloušťce větší než 8 mm a pro výkovky a odlitky

Obvykle se zkušební těleso obrábí s upínacími konci propojenými se zkoušenou délkou přechodovými poloměry, které nabývají hodnot $0,8 \cdot d_0$ v případě válcových zkušebních tyčí, nebo hodnoty $2 \cdot b_0$ u tyčí ostatních průřezů [37].

Minimální zkoušená délka tělesa by u vzorků s kruhovým průřezem měla vycházet z preferované rovnice (8), případně rovnice (4). U zkušebních těles prizmatického průřezu se preferuje výpočet podle rovnice (9), ale lze použít i vztah (5). Preferované rozměry poměrných zkušebních těles jsou uvedeny v tabulce 13 [37].

$$L_c = L_0 + 2 \cdot d_0 \quad (8)$$

$$L_c = L_0 + 2 \cdot \sqrt{S_0} \quad (9)$$

Tabulka 13: Rozměry zkušebních těles z kapitoly 3.2.3. [37]

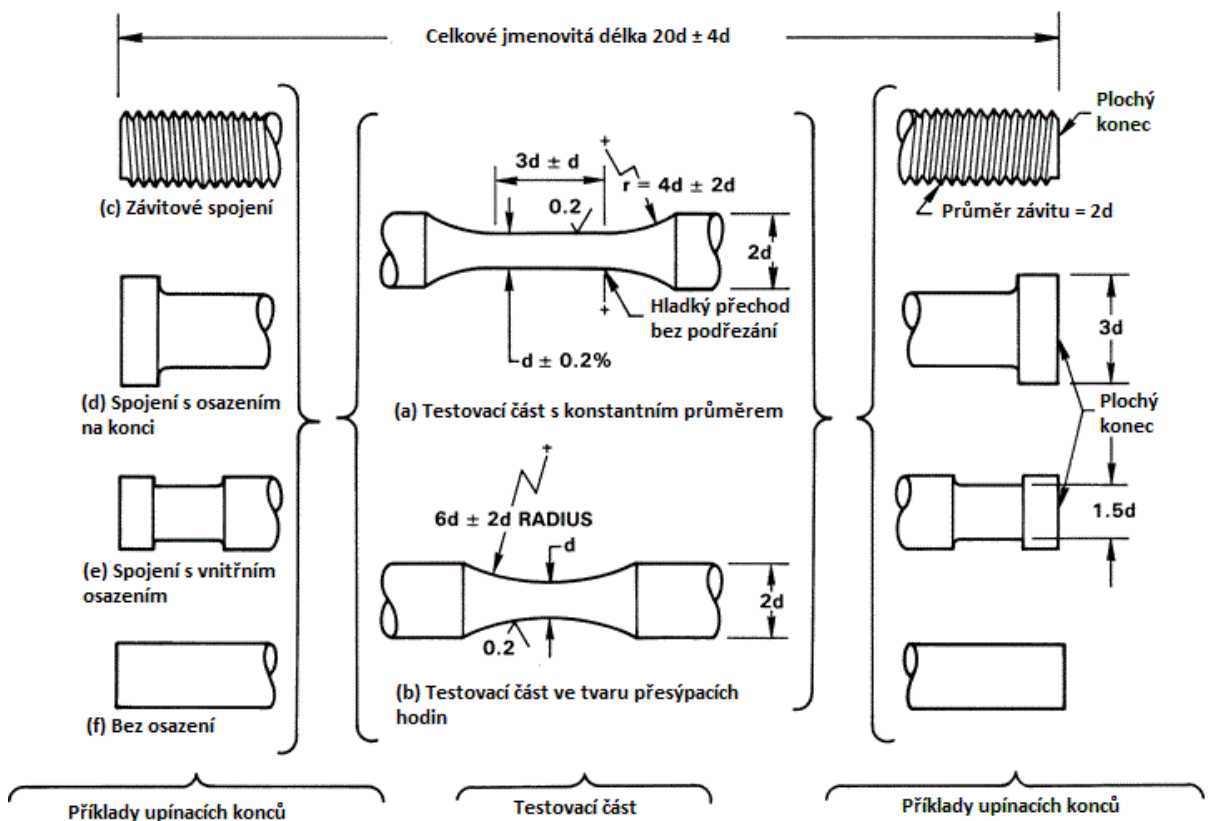
Průměr d_0 [mm]	Počáteční plocha průřezu S_0 [mm ²]	Počáteční měřená délka L_0 [mm]	Zkoušená délka L_c [mm]	Minimální přechodový poloměr r [mm]
20	314,2	100	140	16
10	78,5	50	70	8
5	19,6	25	35	4

Z této normy vychází norma ČSN EN 2002-002, která definuje požadavky a parametry pro zkoušení materiálů při zvýšené teplotě. Konstrukce zkušebních těles je však totožná [37].

3.3. Zkušební tělesa dle normy ASTM E606/E606M

Americká technická norma ASTM E606/E606M popisuje zkušební metodu pro stanovení únavových vlastností pomocí zkušebních vzorků vystavených jednosměrným silám. Norma je zaměřena na únavové zkoušky prováděné v rámci výzkumu a vývoje materiálů, konstruování nových dílů, proces a kontrolu kvality, výkon produktu a další [38].

Zkušební tělesa mají dva základní tvary testovací části – s konstantním průměrem nebo ve tvaru „přesýpacích hodin“. Základní specifikace tvaru zkušebního tělesa jsou vyobrazeny na obrázku 18. Minimální průměr d u těchto vzorků měl být 6,35 mm a ostatní rozměry jsou jeho násobky. Lze použít i zkušební tělesa jiných rozměrů, ale rychlost růstu trhliny, velikost zrna a další parametry poté nelze přímo srovnávat s výsledky zkoušek z doporučených vzorků [38].

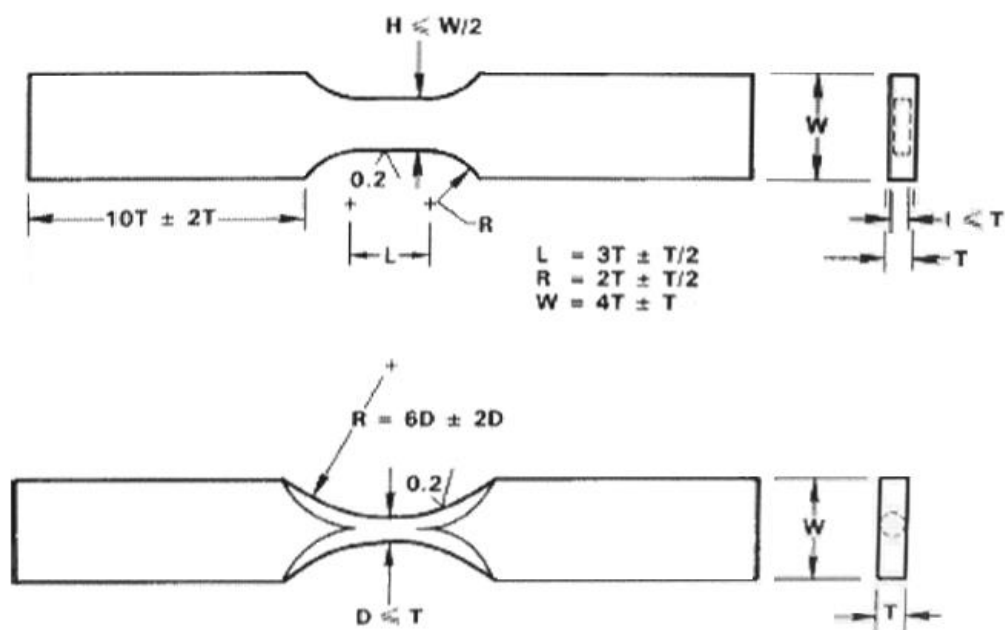


Obrázek 18: Základní konfigurace zkušebních těles dle ASTM E606/E606M [38]

Konstrukce upínacích částí zkušebních těles je primárně závislá na preferenci uživatele, nicméně na obrázku jsou uvedeny doporučované, běžně užívané konfigurace, které jsou tvořeny závitovým spojením, spojením s osazením na konci tyče, s vnitřním osazením nebo bez osazení. U zkušebních těles s konstantním průměrem zkoušené části je nutné zajistit, aby přechodový poloměr r , byl dostatečně velký a nedocházelo k vytvoření koncentrátoru napětí ve formě vrubu [38].

Dle velikosti zatěžovacího napětí se volí konstrukce testovací části zkušebního kusu. Primárně by se měly používat vzorky s konstantním průměrem zkoušené části. V případě použití těles s testovací částí ve tvaru „přesýpacích hodin“ se doporučuje zvolit poměr mezi přechodovým poloměrem a poloměrem zkoušené části vzorku 12:1, avšak lze použít různé hodnoty od 8:1 až po 16:1. Nižší poměry poloměrů mohou zvyšovat koncentraci napětí a tím ovlivnit únavovou životnost, vyšší poměry omezují odolnost vzorku proti vzpříčení [38].

Pro zkušební tělesa z plechů o tloušťce menší než 6 mm se využívá speciální geometrie vzorku s pravoúhlým průřezem a jiných upínacích konců. Typická konstrukce vzorků je znázorněna na obrázku 19 [38].



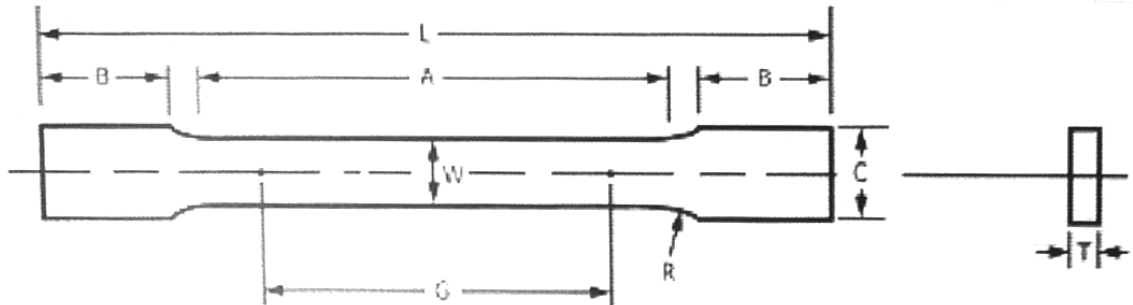
Obrázek 19: Zkušební tělesa z plechu dle ASTM E606/E606M. Na hoře – zkušební těleso s obdélníkovým průřezem, dole – zkušební těleso s kruhovým průřezem [38]

3.4. Zkušební tělesa dle normy ASTM E8/E8M

ASTM E8/E8M je technická norma, která předepisuje zkušební metody týkající se napěťových zkoušek kovových materiálů v jakékoli formě při pokojové teplotě. Zabývá se metodami, pomocí kterých se stanovuje poměrné prodloužení, mez kluzu, mez pevnosti v tahu a další mechanické vlastnosti [39].

Pro zkoušení kovových materiálů ve formě desek o jmenovité tloušťce 5 mm nebo více a plechů, pásů, desek a jiného plochého materiálu o tloušťce 0,13-19 mm se používají ploché zkušební vzorky znázorněné na obrázku 20. Doporučované rozměry jsou uvedeny v tabulce 14. Minimální tloušťka

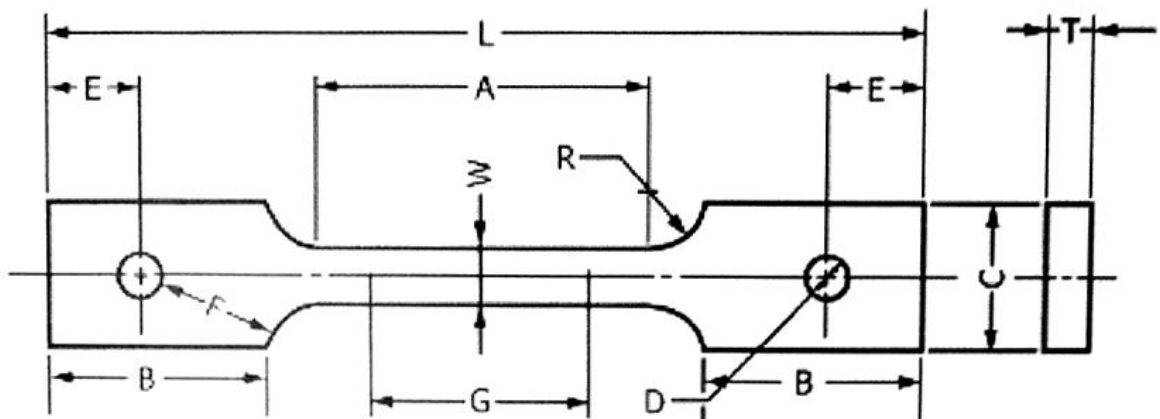
zkušební tělesa o šířce 40 mm musí být 5 mm, pro vzorky o šířce 12,5 mm a 6 mm musí být tloušťka 19 mm a 6 mm. U tenkých plechů a vysokopevnostních materiálů je možné použít upínacích otvorů k zamezení vybočování, geometrie těchto vzorků je znázorněna na obrázku 21. Tabulka 15 uvádí rozměry charakteristického představitele [39].



Obrázek 20: Geometrie zkušebních těles pro ploché materiály dle ASTM E8/E8M [39]

Tabulka 14: Rozměry zkušebních těles pro ploché materiály dle ASTM E8/E8M [39]

	Zkoušená délka G [mm]	Šířka W [mm]	Minimální přechodový poloměr R [mm]	Minimální celková délka L [mm]	Minimální počáteční měřená délka A [mm]	Minimální délka upínací části B [mm]	Šířka upínací části C [mm]
Typ vzorku	Deska	200,0 ± 0,2	40,0 ± 2,0	25,0	450	225	75
	Plech	50,0 ± 0,1	12,5 ± 0,2	12,5	200	57	50
	Ostatní	25,0 ± 0,1	6,0 ± 0,1	6,0	100	32	30

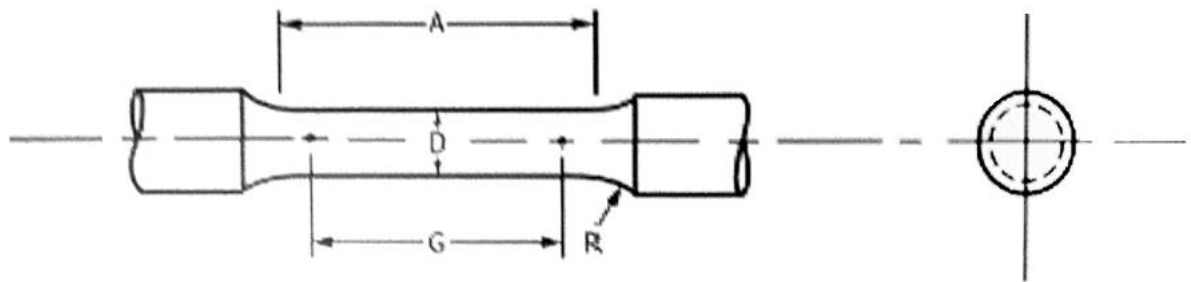


Obrázek 21: Geometrie zkušebních těles pro ploché materiály s využitím upínacích kolíků dle ASTM E8/E8M [39]

Tabulka 15: Rozměry zkušebních těles pro ploché materiály s využitím upínacích kolíků dle ASTM E8/E8M [39]

	Zkušební těleso s upínacími otvory
Zkoušená délka G [mm]	50,0 ± 0,1
Šířka W [mm]	12,5 ± 0,2
Maximální tloušťka T [mm]	16
Minimální přechodový poloměr R [mm]	13
Minimální celková délka L [mm]	200
Minimální počáteční měřená délka A [mm]	57
Minimální délka upínací části B [mm]	50
Šířka upínací části C [mm]	50
Minimální průměr otvoru pro kolík D [mm]	13
Vzdálenost kolíku od hrany E [mm]	40
Vzdálenost kolíku od přechodového poloměru F [mm]	13

Pro tyče, dráty, průřezy a další materiály, ze kterých nelze vyrobit zkušební tělesa podle výše zmiňované geometrie pro ploché materiály, je nutné získat vzorky ve tvaru dle obrázku 22. Nejpoužívanější rozměry jsou uvedeny v tabulce 16, která také uvádí rozměry pro malá, poměrná tělesa. Pro každé takové těleso je nutné, aby zkoušená délka byla čtyřikrát větší než průměr vzorku, jak je uvádí norma E8, respektive pětkrát větší, než je průměr vzorku dle normy E8M [39].

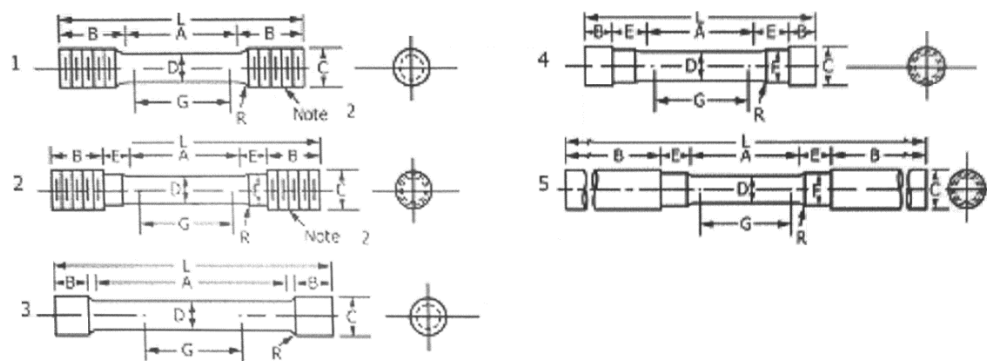


Obrázek 22: Geometrie zkušebních těles pro tyče dle ASTM E8/E8M [39]

Tabulka 16: Rozměry zkušebních těles pro tyče dle ASTM E8/E8M [39]

		Zkoušená délka G [mm]	Průměr D [mm]	Minimální přechodový poloměr R [mm]	Minimální počáteční měřená délka A [mm]
Standardní zkušební tělesa	E8	50,0 ± 0,1	12,5 ± 0,2	10	56
	E8M	62,5 ± 0,1	12,5 ± 0,2	10	75
Zkušební tělesa malých velikostí E8		36,0 ± 0,1	9,0 ± 0,1	8	45
		24,0 ± 0,1	6,0 ± 0,1	6	30
		16,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	4	20
		10,0 ± 0,1	2,5 ± 0,1	2	16
Zkušební tělesa malých velikostí E8M		45,0 ± 0,1	9,0 ± 0,1	8	54
		30,0 ± 0,1	6,0 ± 0,1	6	36
		20,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	4	24
		12,5 ± 0,1	2,5 ± 0,1	2	20

Tvar upínacích konců zkušebního tělesa se volí dle materiálu a tvaru upínacích čelistí stroje tak, aby síly působící na vzorek mohly být aplikovány axiálně. Obrázek 23 znázorňuje vzorky s různými typy upínacích konců, jež jsou vhodné. V tabulce 17 jsou uvedeny rozměry dle technické normy ASTM E8 a ASTM E8M pro nejčastěji využívaná zkušební tělesa [39].



Obrázek 23: Geometrie zkušebních těles pro tyče s využitím tvarových upínacích konců dle ASTM E8/E8M [39]

Tabulka 17: Rozměry zkušebních těles pro tyče s tva rovými upínacími konci dle ASTM E8/E8M [39]

	Zkušební tělesa E8					Zkušební tělesa E8M				
Zkoušená délka G [$\pm 0,1$ mm]	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5
Průměr D [$\pm 0,2$ mm]	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Minimální přechodový poloměr R [mm]	10	10	2	10	10	10	10	2	10	10
Minimální počáteční měřená délka A [mm]	56	56	100	56	56	75	75	75	75	75
Minimální celková délka L [mm]	145	155	155	140	255	145	155	155	140	255
Minimální délka upínací části B [mm]	35	25	20	15	75	35	25	20	15	75
Šířka upínací části C [mm]	20	20	20	22	20	20	20	20	22	20
Vzdálenost kolíku od hrany E [mm]	-	15	-	20	15	-	15	-	20	15
Vzdálenost kolíku od přechodového poloměru F [mm]	-	15	-	15	15	-	15	-	15	15

4. Praktická část

Cílem praktické části práce bylo navrhnutí a vyrobení sestavy přípravku a zkušební tělesa vhodného k ověření vlivu dokončovacích operací na vysokocyklovou únavu materiálů. Získané poznatky by mohly být použity při aplikaci vybrané technologie na reálné, dynamicky namáhané díly turbovrtulového leteckého motoru, jako jsou například rotorové díly, lopatky radiálního a axiálního kompresoru a další komponenty.

Vývoj a aplikace technologií dokončování tvarových ploch vede ke snížení spotřeby a zlepšení výkonových ukazatelů turbovrtulových motorů. Mezi nejdůležitější technické přínosy patří snížení teploty mezi turbínami, zvýšení dynamické životnosti kritických dílů kompresoru a menší ulpívání nečistot, což vede ke zvýšení životnosti, větší úspěšnosti výstupních testů sériových motorů, redukcí nákladů na generální opravy a také snížení emisí [40].

Po analýze dostupných metod dokončování, jako jsou strojní broušení, volné omílání nebo elektrochemické leštění, bylo rozhodnuto provést vývoj a aplikaci technologie strojního leštění SPM. Pro ověření parametrů bylo v rámci této práce navrženo několik variant přípravků. Nejvhodnější z nich byla vybrána a následně vyrobena [40].

4.1. Princip experimentu

Přípravky budou použity na vyhodnocení vysokocyklové únavy dílů kompresoru. Princip spočívá v absolvování únavové zkoušky u zkušebních těles, která budou upnuta pomocí navrhovaného přípravku vertikálně nebo horizontálně a leštěna podle parametrů leštění uvažovaného motorového dílu. Tímto způsobem bude dosaženo stejné jakosti povrchu, drsnosti, přesnosti a hloubky zpevnění. Vyhodnocení bude uskutečněno porovnáním jejich výsledků získaných z Wöhlerovy křivky s Wöhlerovou křivkou standardně dokončovaných dílů. Pro vyhodnocení vysokocyklové únavy, vytvoření jedné únavové křivky a stanovení meze únavy musí být použito nejméně 10 zkušebních tyčí.

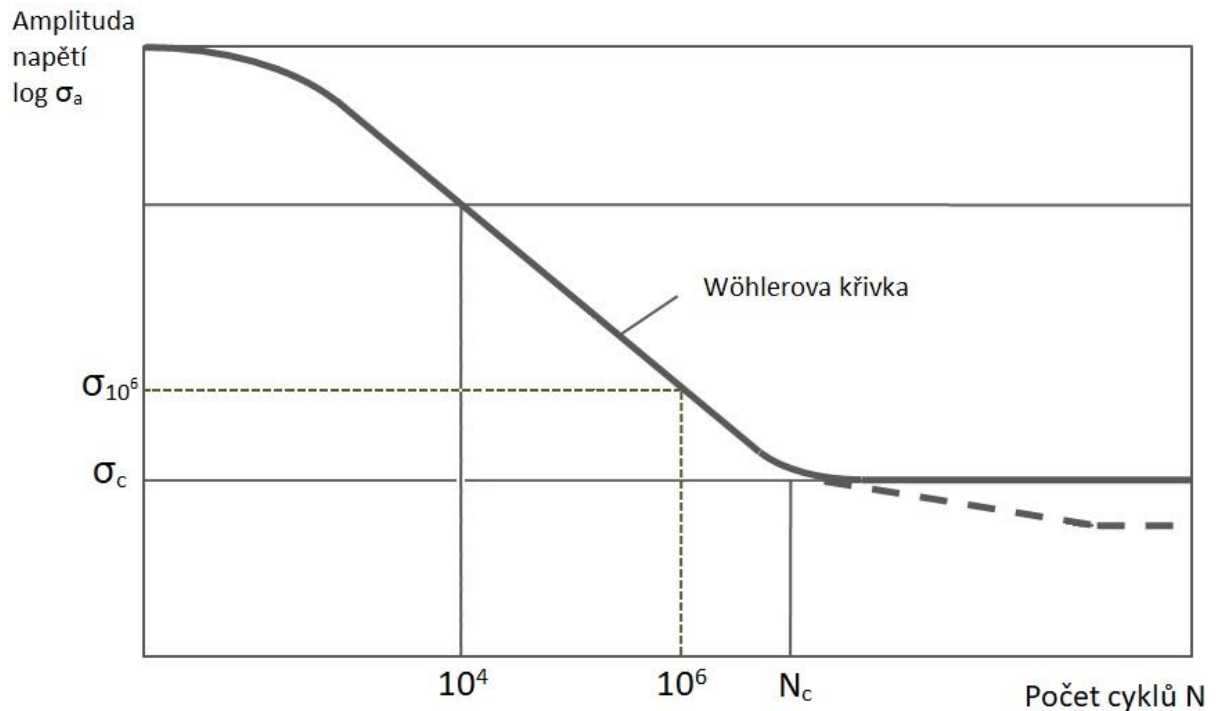
4.1.1. Únava materiálu

Cyklickým namáháním materiálu dochází k jeho únavě, jejíž podstatou jsou nevratné změny stavu a vlastností, způsobené cyklickou plastickou deformací. Opakovaným cyklickým zatěžováním dochází k porušení materiálu při napětích nižších, než je mez pevnosti. Proces únavy lze rozdělit do čtyř stádií [41][42]:

- I. Změna mechanických vlastností v celém objemu materiálu,
- II. lokální deformace v povrchových oblastech a nukleace únavové trhliny,

- III. růst trhliny,
- IV. únavový lom součásti.

Počet cyklů do lomu se tedy určuje experimentálně v závislosti na amplitudě napětí. Tuto závislost znázorňuje Wöhlerova křivka, zachycená na obrázku 24[41].



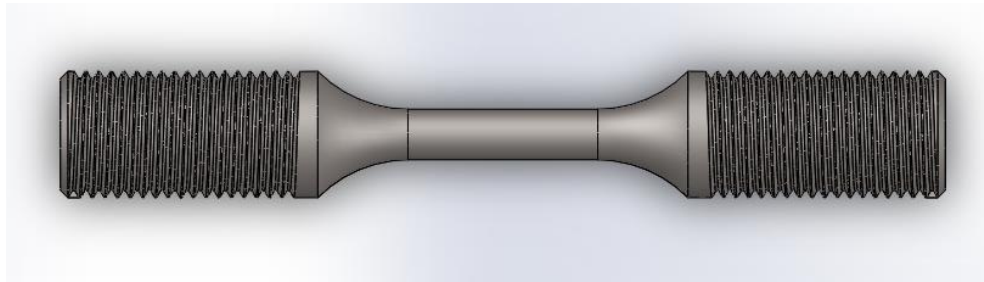
Obrázek 24: Zjednodušená Wöhlerova křivka [43]

Z hlediska počtu cyklů do lomu je možné únavový proces rozdělit na nízkocyklovou únavu, při které dochází k lomu při 10^2 až 10^4 cyklů a vysokocyklovou únavu. Při vysokocyklové únavě dochází k destrukci zkušební vzorku při nižší celkové amplitudě deformace a převládá její elastická složka, naopak pro nízkocyklovou únavu je charakteristická vysoká amplituda s převládající plastickou složkou deformace. Pro součásti pracující v oblasti vysokocyklové únavy se z Wöhlerovy křivky určuje hodnota meze únavy σ_c . Ta vyjadřuje maximální napětí, které materiál vydrží při teoreticky nekonečném počtu cyklů. Prakticky toto napětí vystačí pro 10^7 cyklů. Jedná se o základní charakteristiku vyjadřující odolnost materiálu proti únavovému poškození. Pomocí klesající části křivky lze stanovit časovou mez únavy σ_N pro daný počet cyklů, např. $N = 10^6$ [41][42].

4.2. Konstrukce vybraného zkušební tělesa

Zkušební těleso pro únavové zkoušky bylo navrženo ze slitiny titanu Ti-6Al-4V. Vzorek má konstantní průměr zkoušené části o délce $L = 19,06$ mm s přechodovým poloměrem $R = 12,7$ mm. Upínací části jsou zkonstruovány s jemnými palcovými závity 0,5-20 UNF 3A o délce 22,35 mm. Model

zkušební tělesa je vyobrazen na obrázku 25. Výkres součásti je v příloze této práce. Výroba zkušebních těles musí být uskutečněna při vhodných podmínkách obrábění, aby nedocházelo k tvorbě mikrotrhlin, strukturním změnám, vzniku zbytkových tahových napětí a aby byla zajištěna rozměrová stabilita. Z těchto důvodů je nutné použít v dostatečném množství filtrovanou chladicí kapalinu, obrábět při nízkých rychlostech a zachovat přídavek na dokončení minimálně 0,25 mm, který bude odebrán ve třech třískách. Poslední operaci leštění je nutné provádět ve směru osy obrobku. K výrobě zkušebních těles je vhodné používat nástroje bez povlaku ze slinutého karbidu typu K [32][38][39].



Obrázek 25: Model zkušební tělesa

4.3. Definice požadavků na přípravky

Základní koncepce byla navržena tak, aby se celý přípravek i s několika vzorky vkládal do leštícího zařízení a upnul se pomocí magnetické desky stroje.

Mezi základní parametry tedy patří:

- a) Jednoduchá montáž,
- b) kompatibilita se strojem,
- c) jednoduchá výroba,
- d) nízké náklady,
- e) opakovaná použitelnost.

Z hlediska konstrukce stroje musí přípravek splňovat jeho rozměrové možnosti, být z feromagnetického materiálu a zároveň splňovat požadavky na dostatečnou tuhost celé sestavy pro případ různé variability umístění.

Z konstrukce a povahy vzorku vyplývá, že přípravek musí přesně krýt závity, aby nedocházelo k úběru materiálu a deformaci. Zároveň ale nemůže plnit funkci upínací, protože není z magnetického materiálu.

Z hlediska dokončovací technologie strojního leštění SPM musí přípravek odolávat procesním podmínkám, tedy opakovaně čelit abrazi a mít dostatečné mechanické vlastnosti tak, aby odolal

namáhání v tlaku a ohybu. Aby nedocházelo k chemickým nebo strukturním změnám tělesa, nesmí materiál přípravku reagovat s médiem, prostřednictvím něhož by došlo ke kontaminaci povrchu. Přípravek by měl splňovat variabilitu počtu a umístění vzorku v přístroji.

4.4. Návrh přípravku pro vybranou geometrii zkušebního tělesa

4.4.1. Volba materiálu

Z výše uvedených požadavků vyplývá, že nejdůležitějšími vlastnostmi jsou feromagnetismus, netečnost vůči slitině titanu, mechanické vlastnosti a variabilita. Tyto požadavky splňují korozivzdorné, magnetické oceli.

Při volbě materiálu je také důležité vycházet z konstrukce přípravku a použité technologie výroby. Korozivzdorná ocel patří k materiálům těžko obrobitelným. V případě použití této oceli na výrobu celého přípravku by byla výroba časově i technicky (konstrukčně) náročná a nákladná. Vysoké náklady by byly tvořeny především vysokou spotřebou času a obráběcích nástrojů [44]. Vhodnou variantou se zdálo použití korozivzdorné oceli, např. 17 022, 17 029, 17 145 apod. na upínací desku a technického plastu na uchycení a krytí tělesa. Pro realizaci desky ale byla vybrána uhlíková ocel, protože poptávaný materiál nebyl v požadovaných ani podobných rozměrech žádný z dodavatelů schopen zajistit.

S ohledem na výhody plynoucí z univerzálnosti, relativně nízké ceny, mechanických vlastností a chemické stability, je produkce plastového materiálu velmi rozsáhlá a nepřetržitě roste. Moderní konstrukční plasty se také lépe obrábějí a nehrozí vysoké náklady na obráběcí stroje a nástroje. Mezi jedny z nejpoužívanějších plastů patří polyethylen (PE), polyamid 6 (PA6) nebo polyvinylchlorid (PVC). Tyto plasty se masivně uplatňují v mnoha odvětvích, především ve strojírenství, stavebnictví, elektrotechnice a zdravotnictví [45]. Jako nejvhodnější materiál vzhledem k vysoké pevnosti, otěruvzdornosti, nízké nasákavosti, chemické stálosti a dobré obrobitelnosti byl zvolen polyoxymethylen (POM-C). Vzhledem k dostupnosti materiálů byl ale použit polyamid 6, který má podobné mechanické vlastnosti, ale relativně hůře se obrábí. Spojovací materiál byl použit z korozivzdorné oceli [46].

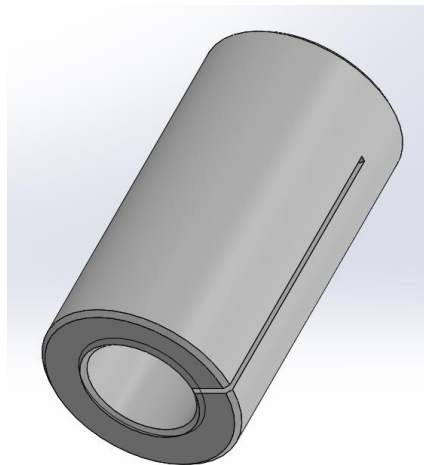
4.4.2. Konstrukční návrhy

V rámci této diplomové práce byly s ohledem na požadované parametry (uvedené v kapitole 4.3 Definice požadavků na přípravky) vytvořeny tři návrhy, z nichž byl vybrán nejvhodnější. Pro každou variantu bylo nutné zkonstruovat pouzdro na zakrytí horní části tělesa, závitů nepoužívaného

k uchycení v přípravku, tak aby nedošlo k úběru materiálu a destrukci funkční části zkušební tělesa. Jednotlivé varianty se tedy liší hlavně způsobem upnutí mezi tělesem a ocelovou deskou.

4.4.3. Konstrukční návrh maskování závitu

Maskování závitu v horní části tělesa bylo provedeno zkonstruováním krycího pouzdra, které je znázorněné na obrázku 26. Jako polotovary pro výrobu byla použita tyč o průměru 30 mm a délce 680 mm z již výše zmiňovaného polyamidu 6. Z důvodu možné variability v počtu leštěných vzorků v jedné dávce bylo nutné vyrobít 15 kusů.



Obrázek 26: Pouzdro na maskování závitu tělesa

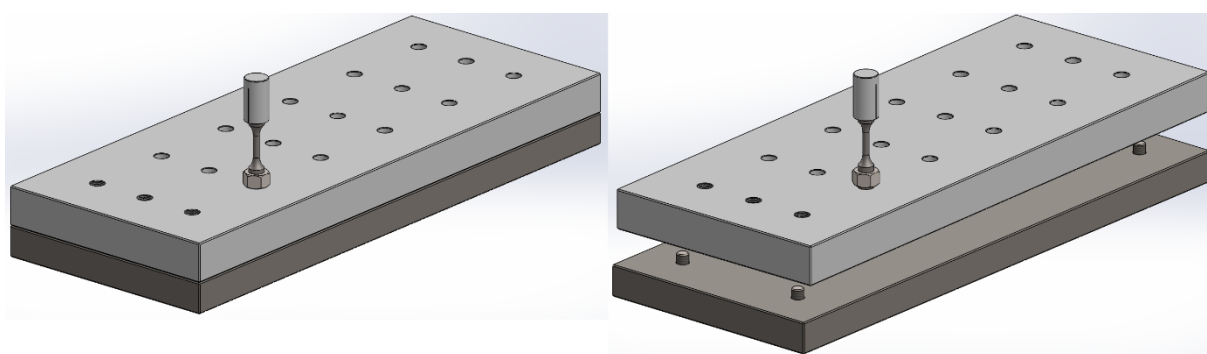
Zkušební těleso bylo navrženo s unifikovaným jemným palcovým závitem 0,5-20 UNF 3A o délce 22,35 mm, který po přepočtu odpovídá jemnému metrickému závitu M 14 x 1,5 x 25 [47]. Přípravek bylo nutné navrhnout tak, aby nedocházelo k samovolnému povolování závitu pouzdra a odkrytí ploch. Z tohoto důvodu byla vyfrézována drážka, která tvoří vůli potřebnou pro sevření závitu sponou. Pomocí tohoto mechanismu dochází ke zvýšení tření a tlaku na závit tělesa a tím zajištění vzájemné polohy zkušební tělesa a pouzdra. Bylo nutné vyfrézovat drážku o šířce pouze 0,6 mm, jinak by mohlo docházet ke kontaktu závitu s měděnými třískami, které mají šířku 0,8 mm. Tato sestava, bez jistící spony, je znázorněna na obrázku 27.



Obrázek 27: Sestava zkušebního tělesa a maskovací pouzdra

4.4.4. Varianta přípravku 1

První varianta přípravku byla složena ze dvou rozebíratelných desek, jak je znázorněno na obrázku 28. Polotovary pro desky byly shodných rozměrů: šířka 205 mm, tloušťka 30 mm a délka 355 mm. Na upínací ocelovou desku o finálních rozměrech 350 x 200 x 24 mm byla pomocí šroubů M 10 x 25 usazena deska z polyamidu, do které by byly vyvrtány otvory s odpovídajícím závitem. Dále do desky byly navrhnuty díry se závity pro uchycení sestavy zkušebního tělesa. Jedná se o vnitřní palcový závit 0,5-20 UNF 3A o délce 30 mm. Zajištění polohy zkušebního tělesa v desce bylo navrženo pomocí pojistné matice M14 x 1,5 jejíž dotažením dojde ke zvýšení silového styku ve spoji a zvýšení tření.



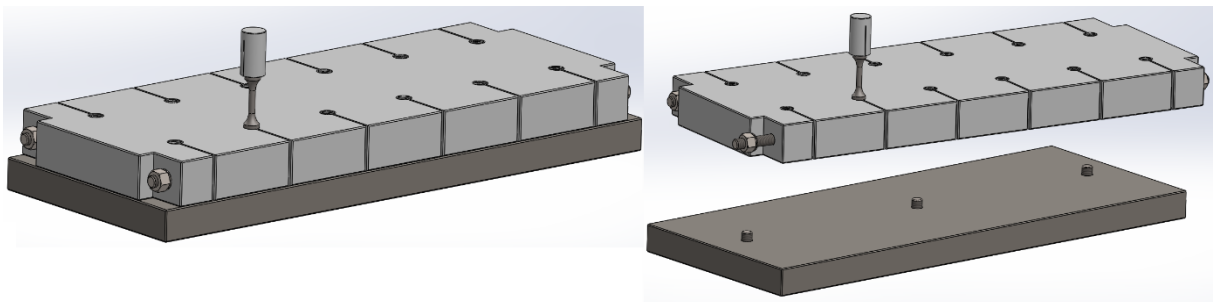
Obrázek 28: Varianta přípravku 1

Tato varianta přípravku by dobře řešila požadavek na upnutí ve stroji, ale využití plastové desky by nebylo dostatečné (z hlediska počtu leštěných kusů při jedné operaci) Působením média při provozu

stroje, velkým silovým působením pojistné matice na šroubový spoja nižší pevností plastu (oproti např. kovovým materiálům) by také mohlo docházet k vytrhávání zkušebních těles z desky.

4.4.5. Varianta přípravku 2

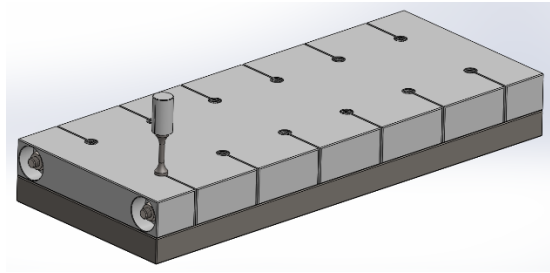
V druhé variantě přípravku bylo k upnutí k magnetické desce stroje využito stejné ocelové podložky, ale z důvodu tuhosti soustavy bylo navrženo jiné rozmístění šroubových spojů upínajících plastovou desku. Na výrobu polymerové desky by byl použit stejný polotovár jako u varianty první. Základní rozměry výsledného obrobku jsou shodné s variantou 1, ale je nutné vyfrézovat kapsy pro užití klíče na šestihrany. Upnutí zkušebních vzorků v tomto návrhu bylo realizováno pomocí závitů tělesa a jeho sevřením materiálem desky pomocí dvou závitových tyčí M 10 x 350. Polyamidová deska má do každého otvoru se závitem proříznutou drážku umožňující sevření. Závitové tyče procházejí od vytvořeného prostoru potřebného pro užití otevřeného klíče na šestihrany, vnitřkem segmentů každé delší strany desky, jak je vykresleno na obrázku 29.



Obrázek 29: Varianta přípravku 2

Závitové tyče u tohoto přípravku nejsou nijak kryty vůči pracovnímu médiu a docházelo by k úběru materiálu, destrukci závitů a ke znemožnění rozebrání přípravku. Z tohoto důvodu byla tato varianta upravena, jak je vyobrazeno na obrázku 30. Vyfrézováním pouze prostoru pro užití zavřeného klíče na šestihrany by došlo k omezení působení média, použitím plastové zástlepy by došlo k úplnému zamezení styku se závitovými tyčemi.

Oproti variantě 1 zde dochází k lepšímu zajištění vzorku. Sevřením zkušební tyče dochází k zajištění polohy podobným způsobem, jako u sestavy zkušebního tělesa s krycí čepičkou. Ovšem využití materiálu plastové desky je opět nízké a výroba přípravku by byla technologicky složitější a časově náročnější.

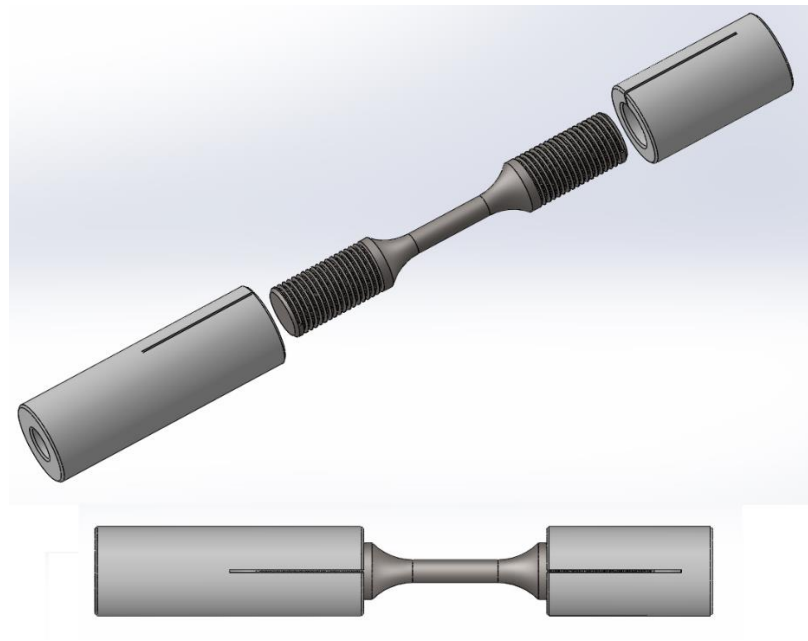


Obrázek 30: Upravený model varianty přípravku 2

Varianty přípravků 1 a 2 jsou nevhodné nejen z důvodu nevyužití velkého množství materiálu tvořícího polyamidovou desku, ale také z důvodu nedostatečné variability. U obou přípravků by nebylo možné umístit zkušební tělesa v pracovním prostoru stroje ve vodorovné poloze. U druhé varianty přípravku by se také mohl opracovávat pouze menší počet kusů na jedno upnutí. V případě použití menšího počtu zkušebních vzorků než umožňuje konstrukce by bylo nutné vyrobít zátky na zakrytí volných pozic. V opačném případě by docházelo k destrukci vyříznutých závitů a zničení přípravku.

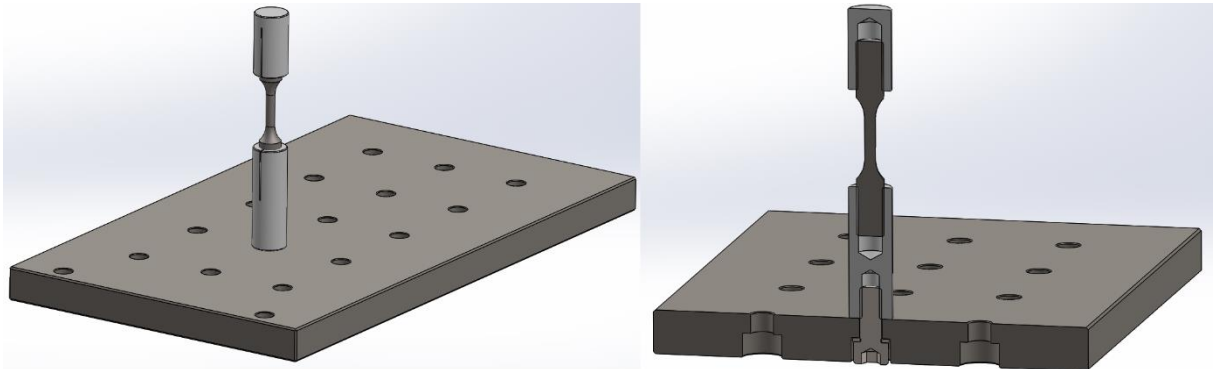
4.4.6. Varianta přípravku 3

U třetí varianty přípravku nebylo uvažováno upnutí zkušebních těles do polyamidové desky, ale bylo využito stejného principu, jako pro maskování závitu pouzdem. Z polyamidové tyče o průměru 30 mm a délce 1070 mm bylo vyrobeno 15 pouzder o délce 60 mm. Pouzdro má z jedné strany díru s palcovým závitem pro uchycení zkušebního tělesa. Z druhé strany je pouzdro vyvložkováno závitovou vložkou V-Coil M10x15, celá sestava je vyobrazena na obrázku 31.



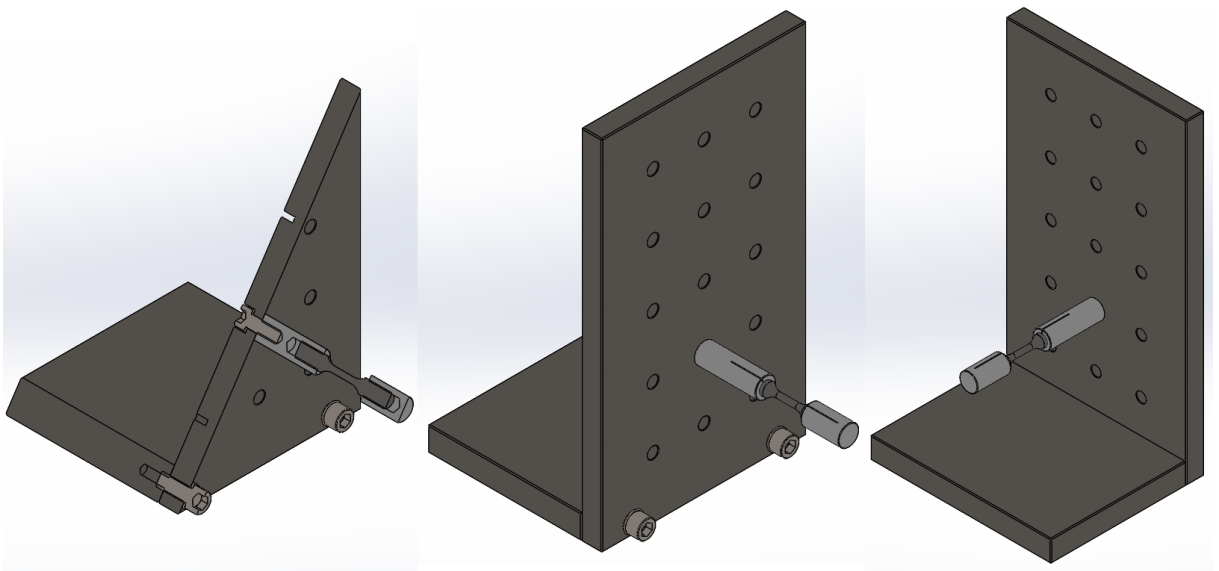
Obrázek 31: Sestava zkušebního vzorku s pouzdry

Upnutí tělesa probíhá pomocí šroubového spoje mezi pouzdrem a ocelovou deskou s vyvrtanými otvory. Tato deska zároveň zajišťuje upnutí v leštícím stroji. Princip této varianty upnutí a krytí závitů je znázorněn na obrázku 32.



Obrázek 32: Varianta přípravku 3

Pro zaručení větší variability v umístění zkušebních těles v pracovním prostoru, zejména umístění vzorků v horizontální poloze, bylo nutné vyrobit opěrnou desku. Z polotovaru z feromagnetické oceli o rozměrech 200 x 30 x 160 mm byla vyfrézována deska, ke které se pomocí šroubů M 12 x 20 kolmo připevní deska upínací, se zkušebními tělesy. V této variantě je možné desku se vzorky přišroubovat z jedné nebo z druhé strany, což umožňuje ovlivnit působení proudícího média na zkušební tělesa. Obě varianty upnutí jsou znázorněny na obrázku 33.



Obrázek 33: Varianta přípravku 3 s možnostmi upnutí zkušebního tělesa v horizontální poloze

Na prototypovou výrobu byla zvolena varianta přípravku 3 a to z důvodu použití vhodného spojení mezi tělesem a upínací deskou, která je feromagnetická a zajišťuje vysokou tuhost celé sestavy stroj – přípravek – obrobek. Rovněž je zaručena poměrně dobrá variabilita v umístění a počtu leštěných

zkušebních těles a není nutné v případě nevyužití všech pozic pro vzorky zakrývat díry. Výroba jednotlivých dílů přípravku je realizována z vhodných a lehce dostupných materiálů, které se bezproblémově obrábí a není potřeba využívat speciálních strojů nebo nástrojů.

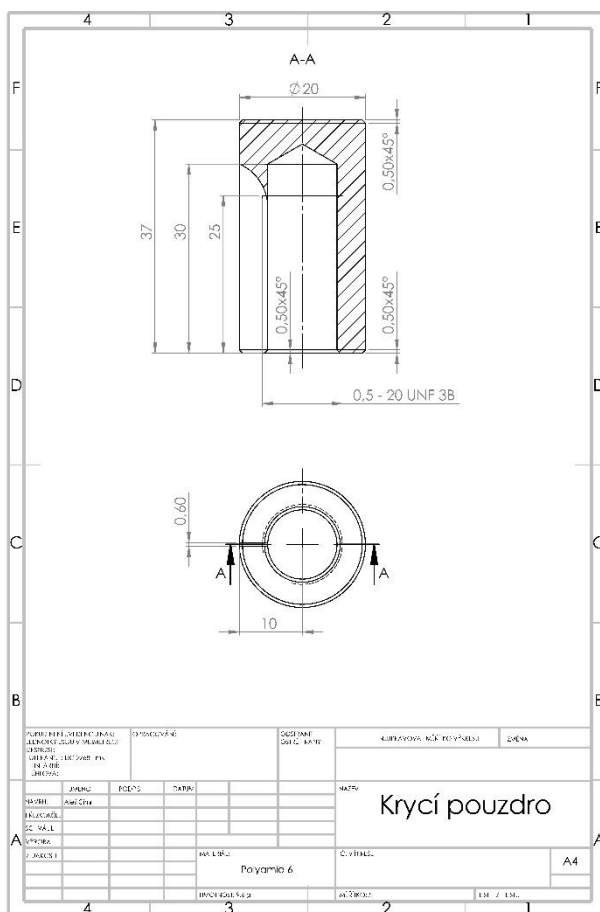
4.4.7. Tvorba výkresové dokumentace

Pro modelování jednotlivých dílů i kompletních sestav bylo použito programu SOLIDWORKS 2017 společnosti DASSAULT SYSTÉMES. Tento program je určen k rychlému konstruování 3D modelů, jejich sestav a 2D výkresů. Nabízí široké spektrum nástrojů pro správu dat, pokročilé vizualizace, odhad nákladů nebo automatizovanou kontrolu výkresů a simulaci a ověřování návrhů [48].

Všechny výkresy vyráběných součástí včetně sestavy a kusovníku jsou v plném rozlišení v příloze této práce.

Krycí pouzdro

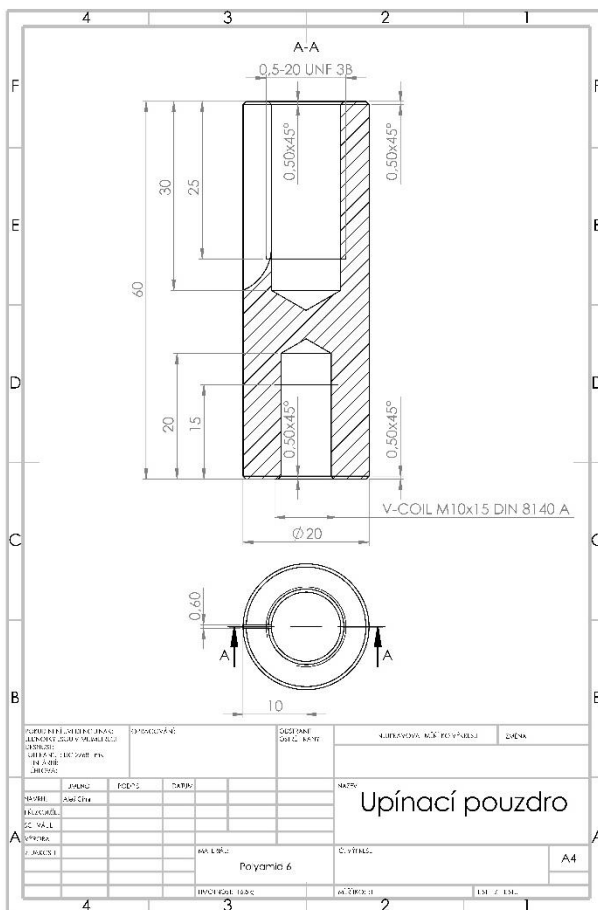
Krycí pouzdro bylo navrženo z polyamidu. Průměr součásti je 20 mm, délka 37 mm. Byl navrhnut vnitřní závit 0,5-20 UNF 3B, který odpovídá jemnému palcovému závitu zkušebního tělesa. Pro navržení vhodných parametrů délky závitu a výběhu bylo nutné palcový závit převést na metrický M 14 x 1,5 x 25. Pro tento závit byla navržena díra o délce 30 mm, krátký výběh vnitřního metrického závitu odpovídá délce 3 mm. Výkres tohoto dílu se všemi rozměry je znázorněn na obrázku 34 [47][49].



Obrázek 34: Výkres krycího pouzdra

Upínací pouzdro

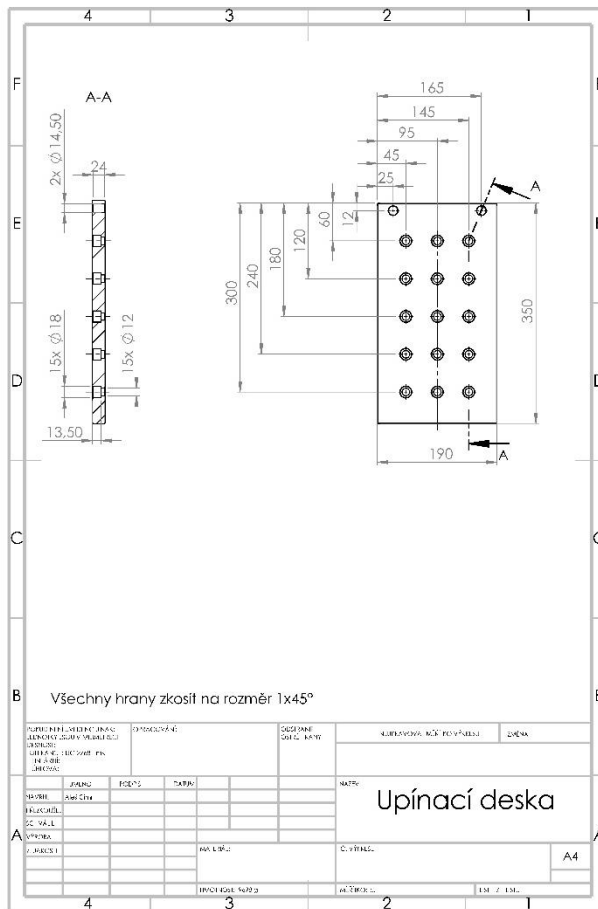
Polyamidové upínací pouzdro o vnějším průměru 20 mm a délce 60 mm, znázorněné na výkrese (obrázek 35), bylo konstruováno s vnitřním závitem (shodným se závitem krycího pouzdra) pro upevnění zkušební tělesa. V ose rotační součásti byla z druhé strany navržena díra o průměru 10,4 mm a délce 20 mm s vložkou V-coil M10 x 15 dle DIN 8140-1.



Obrázek 35: Výkres upínacího pouzdra

Upínací deska

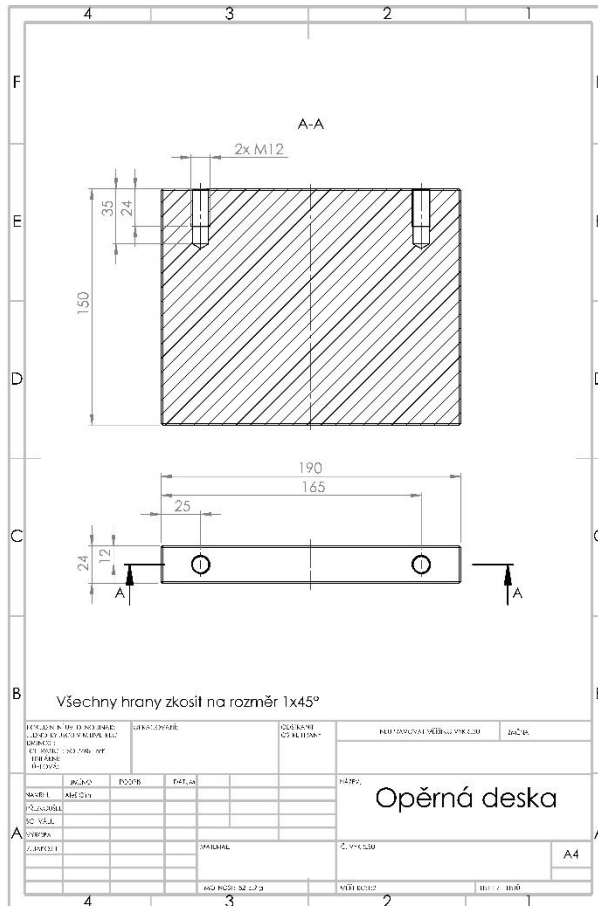
Konstrukčním materiálem pro výrobu upínací desky byla zvolena feromagnetická uhlíková ocel. Tloušťka desky byla navržena 24 mm, délka 350 mm a šířka 190 mm. V desce je konstruováno 15 průchozích děr pro šroub M 10 se zápusťnou hlavou s vnitřním šestihranem. Průměr díry je 12 mm, válcové zhloubení pro zápusťnou hlavu má průměr 18 mm a hloubku 13,5 mm. Dále jsou při spodní, krátké hraně desky navrženy dvě díry pro šrouby M 12, kterými se připevňuje opěrná deska. Tyto díry jsou konstruovány dle hrubé řady jmenovitého průměru závitu a mají tedy průměr 14,5 mm. Na obrázku 36 je výkres součásti se všemi rozměry [47].



Obrázek 36: Výkres upínací desky

Opěrná deska

Pro upnutí zkušebních těles v pracovním prostoru stroje v horizontální poloze bylo nutné navrhnout opěrnou desku, jež se šroubuje kolmoko upínací desce pomocí šroubů M12. Pro tento šroub bylo nutné do desky o rozměrech 190x150x24 mm vyvrtat díru o délce 35 mm s vyříznutým závitem M 12 x 24. Výkres opěrné desky je znázorněn na obrázku 37 [47].



Obrázek 37: Výkres opěrné desky

Sestava přípravku

Přípravek lze sestavit pro leštění zkušebních těles jak ve vertikální, tak v horizontální poloze. Výkresy sestav včetně kusovníků jsou v příloze této práce.

4.5. Prototypová výroba

Prototypová výroba byla realizována na Fakultě strojní ČVUT v Praze, konkrétně v dílnách Ústavu technologie obrábění projektování a metrologie. K výrobě byly použity konvenční i číslicově řízené stroje.

4.5.1. Rámcový technologický postup

V této kapitole jsou uvedeny rámcové technologické postupy. Pouzdra jsou technologicky velmi podobné díly, proto pro ně uvádím jednotný rámcový technologický postup. Tímto způsobem je problematika řešena i u výroby upínací a opěrné desky. Proces výroby jednotlivých dílů je rozepsán v následujících kapitolách, kompletní výrobní postup je také uveden v příloze této práce, včetně fotodokumentace hotových přípravků. Přípravek byl dovybaven nezbytným spojovacím materiálem a nářadím.

Rámcový technologický postup výroby pouzder:

- a) Konvenční soustružení polotovarů – vnější kontury obrobku,
- b) vrtání na konvenčním soustruhu a manuální vyříznutí závitů, u upínacího pouzdra manuální vložkování závitovými vložkami V-coil,
- c) frézování drážky.

Rámcový technologický postup výroby desek:

- a) CNC frézování ploch,
- b) CNC frézou vrtání děr,
- c) sražení hran na konvenční frézce, pomocí frézovací hlavy s úhlem nastavení 45°,
- d) manuální vyříznutí závitů v opěrné desce,
- e) konzervace v oleji a uložení.

4.5.2. Použité stroje

Hrotový soustruh TOS SV 18

Hrotový soustruh TOS SV 18 je univerzální, přesný stroj vhodný k použití v kusové a malosériové výrobě pro výrobu dílů z kovových i nekovových materiálů s širokým rozsahem možností při výrobě závitů [50]. Technické parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 18. Tento konvenční soustruh byl použit na výrobu krycího a upínacího pouzdra.

Tabulka 18: Technické parametry hrotového soustruhu TOS SV 18 [51]

Rozsah otáček vřetena [ot.min⁻¹]	7,5
Výkon [kW]	7,5
Hmotnost stroje [kg]	1780
Max. hmotnost obrobku [kg]	300
Oběžný průměr nad ložem [mm]	380
Oběžný průměr nad suportem [mm]	215
Vzdálenost hrotů [mm]	750

CNC Frézka VMC 500

Na výrobu upínací a opěrné desky byla použita CNC frézka VMC 500. Základ tohoto stroje tvoří lože, po kterém přejíždějí saně v ose Y, na nichž se pohybuje upínací stůl v ose X. Vřeteník pohybující se v ose Z je upnut ve stojanu. Obráběcí centrum má zásobník na 20 nástrojů. Parametry stroje jsou v tabulce 19. Tento stroj je primárně určen pro podmínky malosériové a sériové výroby, umožňuje ruční programování přímo u stroje, úpravu a tvorbu programů a je tedy využitelný i v kusové výrobě. Stroj je vhodný pro obrábění menších, členitých a složitých součástí plochého charakteru. Umožňuje provádění běžných operací, například vrtání, vyvrtávání, vystružování a frézování [52].

Tabulka 19: Technické parametry CNC frézky VMC 500 [52]

Max. otáčky nástroje [ot.min⁻¹]	6000
Výkon [kW]	3,7
Hmotnost stroje [kg]	3800
Max. hmotnost obrobku [kg]	350
Upínací plocha stolu: d x š [mm]	800x500

Univerzální nástrojářská frézka TOS FNGJ 32

NC frézka je vhodná pro kusovou i malosériovou výrobu složitých dílů, zejména měřidel, nástrojů, zápustek, raznic, přípravků apod. Základem frézky je stojan, na kterém se pohybuje vřeteník v ose Y a konzola v osách X a Z kladným, nebo záporným směrem [53]. Pomocí této frézky byly frézovány drážky pouzder a sráženy hrany desek. Tabulka 20 uvádí technické parametry frézky.

Tabulka 20: Technické parametry univerzální frézky TOS FNGJ 32 [53]

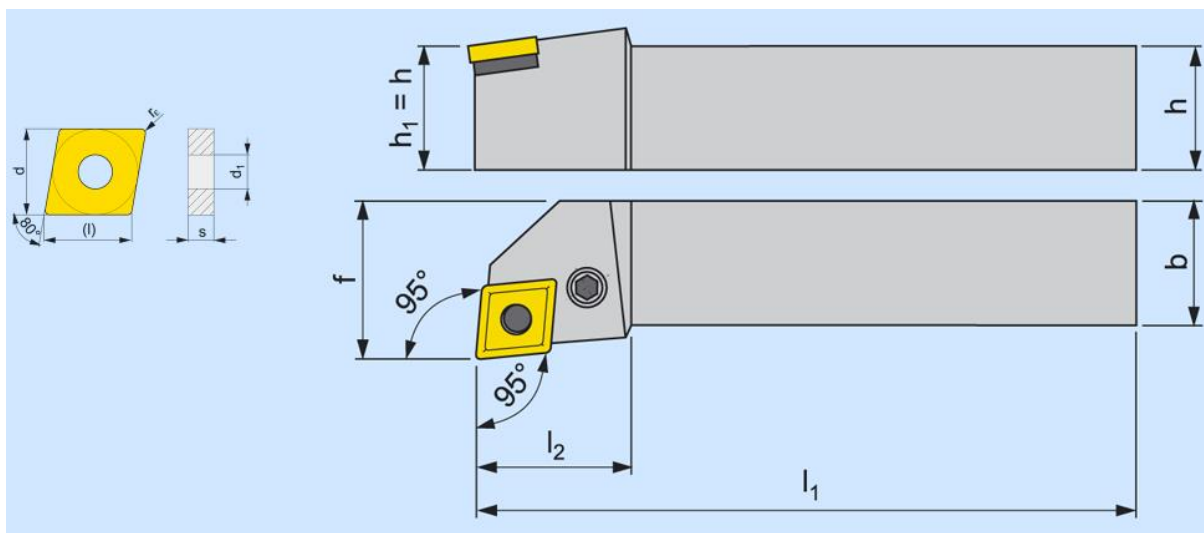
Rozsah otáček vřetena [ot.min⁻¹]	40-2000	
Výkon stroje [kW]	3	
Hmotnost stroje [kg]	1725	
Max. hmotnost obrobku [kg]	300	
Upínací plocha stolu: d x š [mm]	800x400	
Pracovní zdvih [mm]	podélný	600
	příčný	400
	svislý	400
Pracovní posuvy [mm]	podélné	8-400
	příčný	8-400
	svislé	4-200

4.5.3. Použité nástroje

Na soustružení byly použity soustružnické nože od výrobce Pramet Tools. Geometrie je znázorněna na obrázcích 38 a 39. Frézovací operace byly uskutečněny frézovacími hlavami Kennametal. Na frézování drážek byl použit frézovací kotouč Pilana. Vybrané frézy jsou znázorněny na

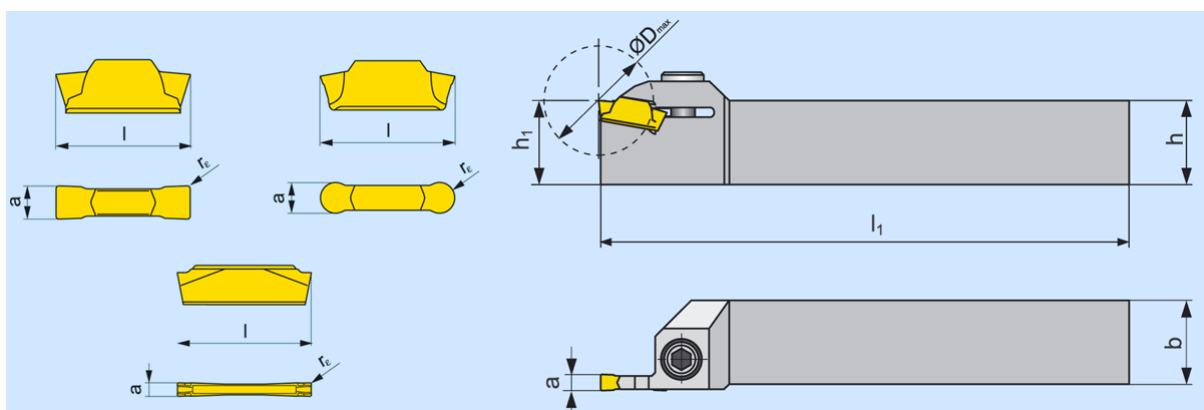
obrázcích 40 a 41. Vrtání bylo provedeno pomocí monolitních vrtáků, karbidové frézy a zahlubníku. Na výrobu závitů byly použity závitníky a vložkovací sada V-coil. Pro přehlednost ve výrobních postupech jsou nástroje označeny N1 až N13.

N1. Hrubovací nůž PCLNR 2020 K12 s vyměnitelnou břitovou destičkou CNMG 120404E-FM T8330



Obrázek 38: Hrubovací nůž; $h = 20$, $b = 20$, $f = 25$, $l_1 = 125$, $l_{2max} = 36$ s vyměnitelnou destičkou; $l = 12,9$, $d = 12,7$, $d_1 = 5,16$, $s = 4,76$, $re = 0,4$ [54]

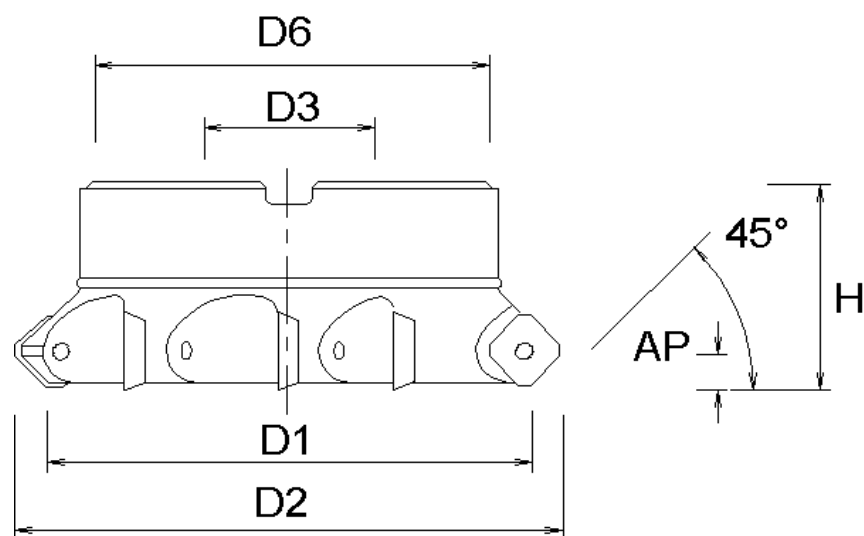
N2. Upichovací nůž GFMR 2020 K0416 s vyměnitelnou břitovou destičkou LCMF 041604-M



Obrázek 39: Upichovací nůž; $h = 20$, $b = 20$, $l_1 = 125$, $a = 4$, $D_{max} = 40$ [54]

N3. Rovinná fréza \varnothing 125 mm KENNAMETAL 125B07RS45SE12F

N4. Rovinná fréza \varnothing 80 mm KENNAMETAL 80B06RS45SE12F



Obrázek 40: Rovinná fréza KENNAMETAL S45SE12F; rozměry pro N3: D1 = 125 mm, D2 = 136 mm, D3 = 40 mm, D6 = 117 mm, H = 63 mm; rozměry pro N4: D1 = 80 mm, D2 = 90 mm, D3 = 27 mm, D6 = 70 mm, H = 50 mm [55]

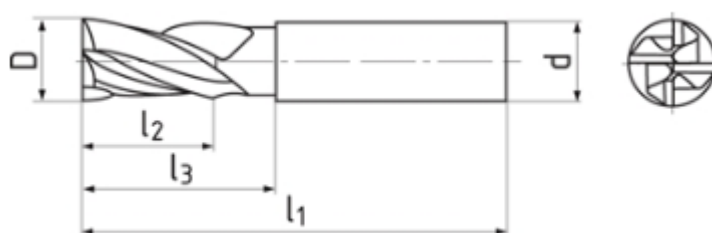
N5. Pilový kotouč na kov PILANA80x0,6 HSS ČSN 22 2910

N6. Válcový vrták DIN 338 RN HSS 11,5 MM

N7. Válcový vrták DIN 338 HSSG 10,4 MM

N8. Válcový vrták DIN 338 HSSG 10,2 MM

N9. Čelní válcová fréza S151602, 2 břity do středu, 40°-42°, typ N, hladká stopka



Obrázek 41: Čelní válcová fréza; D = 12 mm, d = 12 mm, l1 = 83 mm, l2 = 26 mm [56]

N10. Záhlučník CZTOOL 18x10,5 s vodícím čepem, HSS, ČSN 221604

N11. Závitník sadový CZTOOL 0,5-20 UNF 3B DIN 2181

N12. Vložkovací sada V-COIL DIN 8140 A včetně zavaděče a odlamovače čepu

N13. Závitník sadový CZTOOL M 12 HSS ČSN 22 3010

4.5.4. Výroba krycího pouzdra

Výroba krycího pouzdra probíhala z polyamidu 6, na konvenčním soustruhu TOS SV 18. Polotovarem byla tyč o průměru 25 mm a délce 680 mm, která byla upnuta do univerzálního sklíčidla stroje. Nejprve bylo hrubovacím soustružnickým nožem zarovnáno čelo, poté byla obrobena kontura na průměr 20 mm, v délce 40 mm a sražena hrana. Tento proces je znázorněn na obrázku 42. Tělo dílu bylo soustruženo hrubovacím nožem bez výraznějšího přídavku na dokončení, protože u tohoto dílu nebyl žádný požadavek na vysokou přesnost ani drsnost povrchu.



Obrázek 42: Soustružení kontury krycího pouzdra

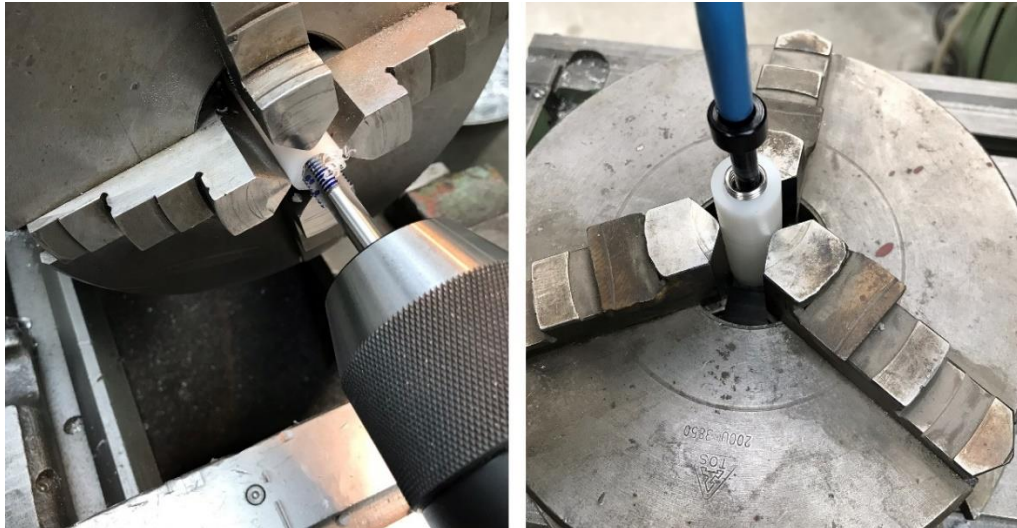
Další operací bylo vyvrtání díry pro palcový závit pomocí nástrojů upnutých v koníku s trnem a sklíčidlem. Tento proces byl realizován předvrtáním středícím vrtákem a následným vrtáním vrtákem o průměru 11,50 mm do hloubky 30 mm. Poslední operací při soustružení bylo upíchnutí součásti o délce 37 mm pomocí upichovacího nože, upnutí z opačné strany, odstranění úpichu a zkosení hrany. Vyříznutí závitu bylo prováděno manuálně pomocí sady závitníků 0,5-20 UNF DIN 2181 v součásti upnuté ve svěráku. Poslední operací při výrobě pouzdra bylo frézování drážky o tloušťce 0,6 mm na konvenční frézce TOS FNGJ 32. Výrobní postup je rozepsán v tabulce 21.

Tabulka 21: Výrobní postup krycího pouzdra

Výrobní postup	Č. VÝKRESU:		SOUČÁST:		KRYCÍ POUZDRO	
	MATERIÁL: Polyamid 6		POLOTOVAR: tyč Ø 30 mm, délka 680 mm		POČET LISTŮ	1
	POČET KUSŮ:	15	VÝR. DÁVKA	15	LIST	1
OPERACE	STROJ	POPIS PRÁCE		NÁSTROJE	ŘEZNÉ PODMÍNKY	
5	TOS SV 18	1. Upnout			$v_c = 60 \text{ m/min}$ $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$ $a_p = 3 \text{ mm}$	
		2. Zarovnat čelo		N1		
		3. Soustružit konturu na Ø 20 mm v délce 40 mm, srazit hranu 0,5x45°		N1		
		4. předvrtat středícím vrtákem, vrtat Ø 11,5 v délce 30 mm		N6		
		5. Upíchnout na délku 37 mm		N2		
10	TOS SV 18	1. Upnout			$v_c = 60 \text{ m/min}$ $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$	
		2. Zarovnat čelo		N1		
		3. Srazit hranu 0,5x45°		N1		
15		1. Upnout		Dílenský svěrák		
		2. Ručně vyříznout závit 0,5-20 UNF 3B		N11		
20	TOS FNGJ 32	1. Upnout			$v_c = 60 \text{ m/min}$ $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$	
		2. Frézovat drážku 0,6 mm		N5		
VYPRACOVAL: Aleš Cimr		KONTROLOVAL:			POZNÁMKY:	
DNE:		DNE:				

4.5.5. Výroba upínacího pouzdra

Z polyamidové tyče o průměru 25 mm a délce 1070 mm bylo na hrotovém soustruhu TOS SV 18 obráběno upínací pouzdro, a to podobným způsobem jako pouzdro krycí. Nejprve došlo k zarovnání čela, obrobení kontury v délce 63 mm na průměr 20 mm a sražení hrany. Následně se provedlo navrtání středícím vrtákem a vyvrtání díry o průměru 11,50 mm a délce 30 mm. V dalším kroku byla součást upíchnuta na délku 60 mm. Následující operací bylo vyvrtání díry o průměru 10,4 mm potřeba k vložkování. Součást byla upnuta do univerzálního sklíčidla z opačné strany. Soustružnickým nožem byl odebrán úpich a zkosena hrana. Poté bylo provedeno navrtání středícím vrtákem a vyvrtání díry o délce 20 mm. Závit M 10 byl vyříznut pomocí závitníků ze sady V-coil. Závitová vložka byla zavedena do součásti upnuté v univerzálním sklíčidle pomocí zavaděče a následně byl odlomen čep. Proces řezání závitu a zavedení vložky je znázorněn na obrázku 43. Jemný palcový závit pro upnutí zkušebního tělesa byl vyříznut pomocí závitníků 0,5-20 UNF DIN 2181, stejným způsobem jako u krycího pouzdra. Tabulka 22 uvádí výrobní postup.



Obrázek 43: Vložování závitu: Vlevo - řezání závitu M 10, vpravo - za vádění vložky

Ta bulka 22: Výrobní postup upínacího pouzdra

Výrobní postup	Č. VÝKRESU:		SOUČÁST:		UPÍNACÍ POUZDRO	
	MATERIÁL: Polyamid 6		POLOTOVAR: tyč Ø 30 mm, délka 1070 mm		POČET LISTŮ	1
	POČET KUSŮ:	15	VÝR. DÁVKA	15	LIST	1
OPERACE	STROJ	POPIS PRÁCE		NÁSTROJE	ŘEZNÉ PODMÍNKY	
5	TOS SV 18	1. Upnout			$v_c = 60 \text{ m/min}$ $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$ $a_p = 3 \text{ mm}$	
		2. Zarovnat čelo		N1		
		3. Soustružit konturu na Ø 20 mm v délce 63 mm, srazit hranu 0,5x45°		N1		
		4. předvrtat středícím vrtákem, vrtat Ø 11,5 v délce 30 mm		N6		
		5. Upíchnout na délku 60 mm		N2		
10	TOS SV 18	1. Upnout			$v_c = 60 \text{ m/min}$ $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$	
		2. Zarovnat čelo		N1		
		3. Předvrtat středícím vrtákem, vrtat Ø 10,4 v délce 20 mm		N7		
		4. Vyříznout závit M10x15		N12		
15		1. Upnout		Dílenský svěrák		
		2. Ručně vyříznout závit 0,5-20 UNF 3B		N11		
		3. Upnout z opačné strany				
		3. Zavést vložku V-COIL M10x15		N12		
20	TOS FNGJ 32	1. Upnout			$v_c = 60 \text{ m/min}$ $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$	
		2. Frézovat drážku 0,6 mm		N5		
VYPRACOVAL: Aleš Cimr		KONTROLOVAL:			POZNÁMKY:	
DNE:		DNE:				

4.5.6. Výroba upínací desky

Polotovarem na výrobu upínací desky byla ocelová deska dlouhá 355 mm, široká 200 mm a vysoká 30 mm. Materiál byl umístěn naplocho ve strojním svěráku CNC frézky VMC 500 a upnut rovnoběžně s osou Y stroje. Nejprve byl nalezen nulový bod, od kterého se následně odečetly souřadnice při ručním programování. Pomocí frézovací hlavy o průměru 125 mm byla obrobena celá plocha a došlo ke zmenšení tloušťky polotovaru o 2 mm. Poté bylo nutné frézovaný materiál upnout stejným způsobem z opačné strany, aby bylo možné dosáhnout požadované tloušťky 24 mm. Po výměně nástrojů a vytvoření programu proběhlo danou frézovací strategií vyvrtání děr a vyfrézování zahloubení pro zápustnou hlavu šroubu. Poslední operace probíhala na univerzální frézce TOS FNGI 32. Deska byla orientována na šířku a upnuta mezi čelisti svěráku. Poté byl opět nalezen nulový bod, od kterého se odečetly souřadnice. Frézovací hlavou s úhlem nastavení 45° byly obrobena hrany na rozměr 1x45°. Tento postup byl opakován za cílem zkosení všech hran součásti. Obrázek 44 zobrazuje proces obrábění hran. Výrobní postup je také popsán v tabulce 23.



Obrázek 44: Frézování hran upínací desky

Ta bulka 23: Výrobní postup upínací desky

Výrobní postup	č. VÝKRESU:		SOUČÁST:		UPÍNACÍ DESKA	
	MATERIÁL: OCEL		POLOTOVAR: deska 355x200x30		POČET LISTŮ	1
	POČET KUSŮ:	1	VÝR. DÁVKA	1	LIST	1
OPERACE	STROJ	POPIS PRÁCE		NÁSTROJE	ŘEZNÉ PODMÍNKY	
5	VMC 500	1. Upnout na výšku			$v_c = 120 \text{ m/min}$ $f_{ot} = 0,35 \text{ mm/ot}$ $a_p = 2 \text{ mm}$	
		2. Frézovat tloušťku o 2 mm		N3		
		3. Upnout z opačné strany a frézovat na rozměr 350 mm		N3		
		4. Upnout na šířku				
		5. Frézovat tloušťku o 2 mm		N3		
		6. Upnout z opačné strany a frézovat na rozměr 190 mm		N3		
10	VMC 500	1. Upnout na plocho			$v_c = 60 \text{ m/min}$ $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$ $a_p = 3 \text{ mm}$	
		2. Frézovat tloušťku o 2 mm		N3		
		3. Upnout stejným způsobem z opačné strany				
		4. Frézovat na tloušťku 24 mm		N3	$v_c = 80 \text{ m/min}$ $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$ vrtat s výplachem po 4 mm	
		5. Vrtat průchozí díry 15x \varnothing 12 mm		N9		
		6. Frézovat průchozí díry 2x \varnothing 14,5 mm		N9		
		7. Zhloubit \varnothing 18 mm o hloubce 13,5 mm		N10		
15	TOS FNGJ 32	1. Upnout			$v_c = 60 \text{ m/min}$ $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$	
		2. Frézovat všechny hrany 1x45°		N4		
VYPRACOVAL: Aleš Cimr		KONTROLOVAL:			POZNÁMKY:	
DNE:		DNE:				

4.5.7. Výroba opěrné desky

Výroba opěrné desky probíhala podobným způsobem jako u desky upínací pomocí CNC frézky. Polotovar ve formě desky měl rozměry 200 x 160 x 30 mm a byl upnut do strojního svěráku. Frézovací hlavou byl nejprve odebírán materiál velké plochy, která se tímto zarovnála a zmenšila svou tloušťku o 2 mm. Poté byl obrobek otočen a stejným způsobem frézován na tloušťku 24 mm. Z důvodu nedokonalé geometrie obvodových ploch bylo nutné nejprve upnout desku za již obrobený povrch a frézovat postupně další rozměry desky. Polotovar bylo nutné následně pootočit o 90° a pomocí horizontálního páčkového úchylkoměru nastavit obrobenou plochu kolmo k upínacímu stolu stroje. Tímto způsobem zarovnaná deska byla ofrézována z jedné a po otočení i z druhé strany na přesný rozměr. V dalším kroku byly zhotoveny dvě díry pro závit M 12 (průměr 10,2 mm, hloubka 35 mm).

Dále byly zkoseny hrany stejným způsobem jako u upínací desky. V poslední operaci byla součást upnuta do svěráku a pomocí sady závitníků M 12 HSS ČSN 22 3010 byly ručně vyříznuty závity. Výroba opěrné desky je popsána ve výrobním postupu, který uvádí tabulka 24.

Tabulka 24: Výrobní postup opěrné desky

Výrobní postup	Č. VÝKRESU:		SOUČÁST:		OPĚRNÁ DESKA	
	MATERIÁL: OCEL		POLOTOVAR: deska 200x160x30		POČET LISTŮ	1
	POČET KUSŮ:	1	VÝR. DÁVKA	1	LIST	1
OPERACE	STROJ	POPIS PRÁCE		NÁSTROJE	ŘEZNÉ PODMÍNKY	
5	VMC 500	1. Upnout na výšku			$v_c = 120 \text{ m/min}$ $f_{ot} = 0,35 \text{ mm/ot}$ $a_p = 2 \text{ mm}$	
		2. Frézovat tloušťku o 2 mm		N3		
		3. Upnout z opačné strany a frézovat na rozměr 190 mm		N3		
		4. Upnout na šířku				
		5. Frézovat tloušťku o 2 mm		N3		
		6. Upnout z opačné strany a frézovat na rozměr 150 mm		N3		
10	VMC 500	1. Upnout na plocho			$v_c = 60 \text{ m/min}$ $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$ $a_p = 3 \text{ mm}$	
		2. Frézovat tloušťku o 2 mm		N3		
		3. Upnout stejným způsobem z opačné strany		N3		
		4. Frézovat na tloušťku 24 mm		N3		
15	VMC 500	1. Upnout na výšku			$v_c = 30 \text{ m/min}$ $f_{ot} = 0,03 \text{ mm/ot}$	
		2. Vrtat 2x díru $\varnothing 10,2 \text{ mm}$, hloubka 35 mm		N8		
20	TOS FNGJ 32	1. Upnout			$v_c = 60 \text{ m/min}$ $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$	
		2. Frézovat všechny hrany $1 \times 45^\circ$		N4		
25		1. Upnout		Dílenský svěrák		
		2. Ručně vyříznout závit		N13		
VYPRACOVAL: Aleš Címr		KONTROLOVAL:			POZNÁMKY:	
DNE:		DNE:				

5. Závěr

Diplomová práce se zabývá dokončovacími metodami obrábění, zkušebními tělesy a možnostmi jejich uchycení ve zkušební stroji. Cílem této práce bylo navrhnout a výroba přípravku pro uchycení únavových zkušebních těles.

V první části práce se pojednává o jednotlivých dokončovacích technologiích obrábění, které jsou rozděleny podle základního principu úpravy povrchové vrstvy. Jednotlivé metody jsou podrobněji popsány, a to včetně uvedení dosahovaných hodnot stupně přesnosti a drsnosti. Dále je zmíněno možné uplatnění metod a používaných materiálů na konstrukci nástrojů.

Další část práce je věnována českým a zahraničním technickým normám. Jsou zpracovány dokumenty, jež se široce zabývají problematikou zkoušení mechanických vlastností materiálů, únavou a životností. Konkrétně se jedná o: zkoušku tahem kovových materiálů při různých teplotách, zkoušku tahem kovových materiálů v letectví a kosmonautice, obecné poznatky pro zkoušku únavy kovových materiálů, stanovení únavových vlastností zkušebních vzorků se zaměřením na únavové zkoušky prováděné v rámci výzkumu a vývoje materiálů a konstruování nových dílů. Z těchto norem jsou vybrána používaná zkušební tělesa a vytvořen jejich přehled. Pro vzorky čtvercového, obdélníkového, kruhového a mnohoúhelníkového průřezu jsou znázorněny jejich geometrie a používané rozměry.

V praktické části diplomové práce byly navrženy tři konstrukční varianty přípravku pro zkušební tělesa vhodné ke stanovení únavových zkoušek. Tyto vzorky byly vyrobeny ze slitiny titanu Ti-6Al-4V. Varianty přípravku byly navrženy na základě požadavků vyplývajících z konstrukce stroje, vzorku a dokončovacích technologií. Důležitým kritériem pro zhotovení byla také jednoduchost montáže, výroby a nízké náklady. Zejména bylo rozhodující vytvořit funkční upevnění zkušebních těles v leštícím zařízení a zajistit, aby nedošlo k poškození závitů. Podstatná dále byla variabilita v počtu a umístění vzorků při jedné leštící operaci. Ze tří navržených variant byla následně vybrána finální, která zajišťovala opracování maximálně patnácti zkušebních vzorků při jednom upnutí, a to buď ve vertikální nebo horizontální poloze. Dále byly vytvořeny výkresy a výrobní dokumentace. Samotná výroba probíhala v prostorách Fakulty strojní ČVUT v Praze, konkrétně v dílnách Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. Na konvenčních i číslicově řízených strojích bylo vyrobeno 15 kusů upínacích a 15 kusů krycích pouzder, které se šroubují na upínací desku. V závislosti na umístění vzorků při leštění je možné upínací desku umístit přímo na magnetickou plochu stroje nebo přišroubovat na opěrnou desku pro jejich horizontální umístění.

Přípravky budou využity pro leštění zkušebních těles a následně pro vyhodnocení vysokocyklové únavy dílů kompresoru. Celý tento proces spočívá ve vyleštění zkušebních vzorků podle parametrů leštění referovaného motorového dílu a tím dosažení stejných parametrů drsnosti a hloubky zpevnění. Pro takto vyleštěná tělesa bude uskutečněna vysokocyklová únavová zkouška a vytvořena Wöhlerova křivka, která bude porovnána s původní křivkou součásti.

Všechny cíle diplomové práce byly splněny. Nicméně pro získání více naměřených dat, porovnání dostupných technologií dokončování a verifikaci zvolení tohoto principu úpravy povrchu by bylo vhodné vyhodnotit vysokocyklovou únavu například také u broušených a kuličkovaných dílů, případně využít jejich vhodnou kombinaci v po sobě následujících výrobních operacích.

6. Seznam použitých zdrojů

- [1] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. 2. přeprac. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [2] ŠPUNDOVÁ, Jana. *DOKONČOVACÍ METODY OBRÁBĚNÍ* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/index.php?odkaz=texty&predmet=STT>
- [3] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. Praha: Scientia, 2000. ISBN 80-7183-207-3.
- [4] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [5] Dokončovací soustružení s použitím cermetových materiálů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010 [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dokoncovaci-soustruzeni-s-pouzitim-cermetovych-materialu.html>
- [6] ESTEVES CORREIA, A. a J. PAULO DAVIM. Surface roughness measurement in turning carbon steel AISI 1045 using wiper inserts. *Measurement* [online]. 2011, 44(5), 1000-1005 [cit. 2019-07-14]. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.01.018. ISSN 02632241. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224111000340>
- [7] SURESH, R, S BASAVARAJAPPA, Vinayak N GAITONDE, GL SAMUEL a J Paulo DAVIM. State-of-the-art research in machinability of hardened steels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* [online]. 2013, 227(2), 191-209 [cit. 2019-07-14]. DOI: 10.1177/0954405412464589. ISSN 0954-4054. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954405412464589>
- [8] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, [2008] [cit. 2019-07-14]. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
- [9] CABANETTES, F., Z. DIMKOVSKI a B.-G. ROSÉN. Roughness variations in cylinder liners induced by honing tools' wear. *Precision Engineering* [online]. 2015, 41, 40-46 [cit. 2019-07-14]. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2015.01.004. ISSN 01416359. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635915000057>
- [10] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Petřkovská LENKA. *Technologie // - 2. díl* [online]. Ostrava [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~cep77/>
- [11] HASHIMOTO, Fukuo, Hitomi YAMAGUCHI, Peter KRAJNIK, Konrad WEGENER, Rahul CHAUDHARI, Hans-Werner HOFFMEISTER a Friedrich KUSTER. Abrasive fine-finishing technology. *CIRP Annals* [online]. 2016, 65(2), 597-620 [cit. 2019-

- 07-14]. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.003. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850616301950>
- [12] Lapping Process : Principle, Types and Advantages. *Mech4study* [online]. 2017 [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <https://www.mech4study.com/2017/05/lapping-process-principle-types-advantages.html>
- [13] NAGORKIN, M N, V P FYODOROV a E V KOVALYOVA. Modeling of process of forming quality parameters for surfaces of parts by diamond burnishing taking into account technological heredity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, 327 [cit. 2019-07-14]. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042071. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/327/i=4/a=042071?key=crossref.3b2821601cadd84079a337afdb43d01e>
- [14] LUCA, Liviu, Sorin NEAGU-VENTZEL a Ioan MARINESCU. Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels. *Precision Engineering* [online]. 2005, 29(2), 253-256 [cit. 2019-07-14]. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2004.02.002. ISSN 01416359. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635904000479>
- [15] Obrábění válečkováním. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004 [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabenivaleckovanim.html>
- [16] Řízené kuličkování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011 [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rizene-kulickovani.html>
- [17] *Povrcháři* [online]. 2009, 2009(7) [cit. 2019-07-14]. ISSN 1802-9833.
- [18] *Shot peening applications* [online]. Ninth edition. New Jersey [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: http://464zwc173g4e34of4m82crnq.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2015/08/MIC_Green_Book_9th_Edition.pdf
- [19] Shot peening. *Curtiss-Wright Surface Technologies* [online]. New Jersey [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <https://cwst.com/shot-peening/overview/>
- [20] *AMSS13165A. Shot Peening of Metal Parts*. Warrendale (Pittsburgh): SAE International, 1997.
- [21] UNAL, Okan. Optimization of shot peening parameters by response surface methodology. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2016, 305, 99-109 [cit. 2019-07-14]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.08.004. ISSN 02578972. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897216306958>
- [22] Laser peening vs. shot peening. *LSP Technologies* [online]. Dublin [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <https://www.lsptechnologies.com/shot-peening-vs-laser-peening.php/>
- [23] GUJBA, Abdullahi a Mamoun MEDRAJ. Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening. *Materials* [online]. 2014, 7(12), 7925-7974 [cit. 2019-07-14]. DOI: 10.3390/ma7127925. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/7/12/7925>

- [24] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [25] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-227-8.
- [26] QIN, Yi, Andrew BROCKETT, Jie ZHAO, Akhtar RAZALI, Yanling MA a Colin HARRISON. *Micromanufacturing Engineering and Technology* [online]. Second Edition. 2011 [cit. 2019-07-14]. ISBN 9780323311496. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323311496/micromanufacturing-engineering-and-technology>
- [27] TEMMLER, André, Edgar WILLENBORG a Konrad WISSENBACH. *Laser Polishing* [online]. 2014 [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/258711397_Laser_Polishing
- [28] HASHIMOTO, Fukuo, Hitomi YAMAGUCHI, Peter KRAJNIK, Konrad WEGENER, Rahul CHAUDHARI, Hans-Werner HOFFMEISTER a Friedrich KUSTER. Abrasive fine-finishing technology. *CIRP Annals* [online]. 2016, 65(2), 597-620 [cit. 2019-07-14]. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.003. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850616301950>
- [29] Barrel Finishing Machines. *Tipton Corp.* [online]. Toyoda [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: http://www.tipton.co.jp/english/va/va01_03.html
- [30] Reducing surface roughness by chemical polishing of additively manufactured 3D printed 316 stainless steel components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2018, , 2895-2900 [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-018-2890-0#citeas>
- [31] Co je to technická norma?. *Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví* [online]. Praha [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/co-je-to-technicka-norma->
- [32] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [33] ASTM A370-18. *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. West Conshohocken (Philadelphia): ASTM International, 2018.
- [34] DIN 50125. *Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2016.
- [35] ČSN EN ISO 6892-2. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 2: Zkušební metoda za zvýšené teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [36] ČSN EN ISO 6892-3. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 3: Zkušební metoda za nízké teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

- [37] ČSN EN 2002-001. *Letectví a kosmonautika - Kovové materiály - Zkušební metody - Část 001: Zkouška tahem při okolní teplotě*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [38] ASTM E606 / E606M - 12. *Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing*. West Conshohocken (Philadelphia): ASTM International, 2012.
- [39] ASTM E8 / E8M - 16A. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken (Philadelphia): ASTM International, 2016.
- [40] PALA, Zdeněk a Libor BERÁNEK. *Zvyšování výkonových parametrů turbovrtulových motorů prostřednictvím vývoje pokročilých technologií dokončování*. Praha, 2018.
- [41] JANOVEC, Jiří, Karel MACEK a Petr ZUNA. *Fyzikální metalurgie*. Praha: ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02935-2.
- [42] KLESNIL, Mirko a Petr LUKÁŠ. *Fatigue of Metallic Materials*. 3rd rev. ed. Prague: Academia, 1992.
- [43] BETRIEBSFESTIGKEIT / ZEITFESTIGKEIT. *CAE Simulation & Solutions* [online]. Wien [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <https://www.cae-sim-sol.com/de/limit-stress-evaluation/betriebsfestigkeit-zeitfestigkeit>
- [44] PITRMUC, Zdeněk a Jiří SOMMER. *Zvyšování výkonových parametrů turbovrtulových motorů prostřednictvím vývoje pokročilých technologií dokončování: Výzkumná zpráva č. 4: Návrh a výroba maskovacích přípravků pro blisk 1. a 2. stupně*. Praha, 2018.
- [45] PATNI, Neha, Pallav SHAH, Shruti AGARWAL a Piyush SINGHAL. Alternate Strategies for Conversion of Waste Plastic to Fuels. *ISRN Renewable Energy* [online]. 2013, 2013, 1-7 [cit. 2019-07-14]. DOI: 10.1155/2013/902053. ISSN 2090-746X. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/archive/2013/902053/>
- [46] *FTP Plastics* [online]. Olomouc, 2007 [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <https://www.ftpplastics.cz/ke-stazeni.html>
- [47] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [48] Balíčky 3D CAD řešení. *Dassault Systemes SolidWorks* [online]. [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <https://www.solidworks.cz/produkty/3d-cad/balicky/>
- [49] POSPÍCHAL, Jaroslav. *Technické kreslení*. 4., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-0105-595-3.
- [50] Hrotový soustruh SV18 RA. *TUMLIKOVO.CZ* [online]. 2010 [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/hrotovy-soustruh-sv18-ra/>
- [51] Hrotový soustruh SV18 RA. *UNEX* [online]. Ostrava [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <http://www.unex.cz/storage/get/184-soustruh-40-sv-18ra-7310055.pdf>
- [52] Manuály obráběcích strojů. *Stachura stroje a zařízení* [online]. [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <http://stachura.cz/manual.htm>
- [53] *INTOS-STROJE* [online]. Zdice [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <http://www.intos-stroje.cz/>

- [54] *PRAMET e-CAT*[online]. [cit. 2019-07-18]. Dostupné z:
<http://ecat.pramet.com/default.aspx>
- [55] *ToolsUnited: Search engine and tool data source* [online]. [cit. 2019-07-18].
Dostupné z: <https://www.toolsunited.com/App?language=cs-CZ>
- [56] *ZPS - FRÉZOVACÍ NÁSTROJE*[online]. [cit. 2019-07-18]. Dostupné z:
<https://www.zps-fn.cz/cz/>

7. Seznam obrázků

Obrázek 1: Jemné obrábění dvěma noži [1]	3
Obrázek 2: Vlevo – konvenční geometrie vyměnitelné břitové destičky, vpravo – geometrie wiper [7]	4
Obrázek 3: Úhly při záběru zrna: γ_n – úhel čela, r_n – poloměr ostří, v_c – řezná rychlost, v_f – rychlost posuvu, a_e – hloubka řezu, h_e – vrstva ovlivněná elastickou deformací, h_p – vrstva ovlivněná plastickou deformací [8].....	5
Obrázek 4: Princip honování a vznik šroubovice; v_c – obvodová rychlost (řezná), v_f – axiální rychlost (posuvu) [10].....	7
Obrázek 5: Kinematika honovacího procesu – rozvinutá plocha; 1 – počáteční poloha kamene, 2 – poloha kamene v dolní úvrti, 3 – poloha kamene po jednom zdvihu, v_c – řezná rychlost, v_f – rychlost posuvu, v_e – celková rychlost řezného pohybu, α – úhel křížení stop, l_k – délka kamenů, l_z – zdvih honovací hlavy, $l_{1,2}$ – délka přeběhů [4].....	8
Obrázek 6: Schéma superfinišování; F – přítlačná síla stroje, V_k – rychlost kmitavého pohybu, V_p – rychlost posuvu, V_o – obvodová rychlost obrobku [11]	9
Obrázek 7: Princip lapování [12]	11
Obrázek 8: Vibrační omílání [29]	14
Obrázek 9: Princip vyhlazování povrchu šedé litiny; 1 – povrch před hlazením, 2 – chladicí a mazací kapalina, 3 – pracovní těleso, 4 – grafitové částice v intermetalické fázi, 5 – povrch po hlazení, 6 – grafitové částice odcházející s kapalinou [13]	15
Obrázek 10: Princip řízeného kuličkování [18].....	18
Obrázek 11: Princip metody laser peening [23].....	19
Obrázek 12: Princip elektroerozivního obrábění [26].....	21
Obrázek 13: Princip laserového leštění [27]	22
Obrázek 14: Zkušební těleso pravoúhlého průřezu dle normy ČSN EN ISO 6892-1 [32].....	30
Obrázek 15: Geometrie neobrobených zkušebních těles dle normy ČSN EN ISO 6892-1 [32]	31
Obrázek 16: Geometrie obrobených zkušebních těles dle normy ČSN EN ISO 6892-1 [32]	32
Obrázek 17: Zkušební tělesa s tvarovými upínacími konci dle normy ČSN EN ISO 6892-2 [35]	34
Obrázek 18: Základní konfigurace zkušebních těles dle ASTM E606/E606M [38]	37
Obrázek 19: Zkušební tělesa z plechu dle ASTM E606/E606M. Nahoře – zkušební těleso s obdélníkovým průřezem, dole – zkušební těleso s kruhovým průřezem [38]	38
Obrázek 20: Geometrie zkušebních těles pro ploché materiály dle ASTM E8/E8M [39]	39
Obrázek 21: Geometrie zkušebních těles pro ploché materiály s využitím upínacích kolíků dle ASTM E8/E8M [39]	39
Obrázek 22: Geometrie zkušebních těles pro tyče dle ASTM E8/E8M [39]	41
Obrázek 23: Geometrie zkušebních těles pro tyče s využitím tvarových upínacích konců dle ASTM E8/E8M [39]	41
Obrázek 24: Zjednodušená Wöhlerova křivka [43]	44
Obrázek 25: Model zkušebního tělesa.....	45
Obrázek 26: Pouzdro na maskování závitů tělesa.....	47
Obrázek 27: Sestava zkušebního tělesa a maskovacího pouzdra	48
Obrázek 28: Varianta přípravku 1.....	48
Obrázek 29: Varianta přípravku 2.....	49
Obrázek 30: Upravený model varianty přípravku 2.....	50
Obrázek 31: Sestava zkušebního vzorku s pouzdry.....	50
Obrázek 32: Varianta přípravku 3.....	51

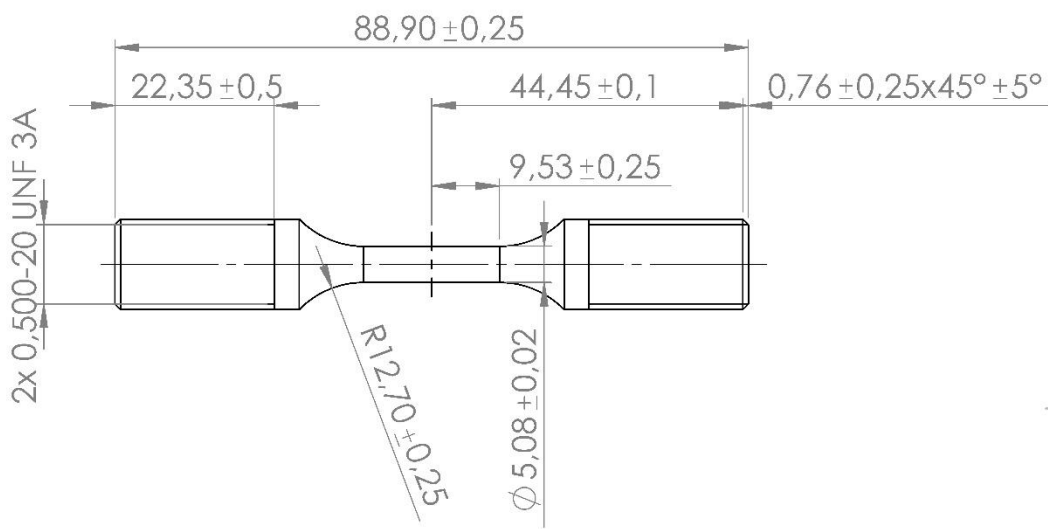
Obrázek 33: Varianta přípravku 3 s možnostmi upnutí zkušebního tělesa v horizontální poloze	51
Obrázek 34: Výkres krycího pouzdra	53
Obrázek 35: Výkres upínacího pouzdra	54
Obrázek 36: Výkres upínací desky	55
Obrázek 37: Výkres opěrné desky	56
Obrázek 38: Hrubovací nůž; $h = 20$, $b = 20$, $f = 25$, $l_1 = 125$, $l_{2max} = 36$ s vyměnitelnou destičkou; $l = 12,9$, $d = 12,7$, $d_1 = 5,16$, $s = 4,76$, $re = 0,4$ [54]	59
Obrázek 39: Upichovací nůž; $h = 20$, $b = 20$, $l_1 = 125$, $a = 4$, $D_{max} = 40$ [54]	59
Obrázek 40: Rovinná fréza KENNAMETALS45SE12F; rozměry pro N3: $D_1 = 125$ mm, $D_2 = 136$ mm, $D_3 = 40$ mm, $D_6 = 117$ mm, $H = 63$ mm; rozměry pro N4: $D_1 = 80$ mm, $D_2 = 90$ mm, $D_3 = 27$ mm, $D_6 = 70$ mm, $H = 50$ mm [55]	60
Obrázek 41: Čelní válcová fréza; $D = 12$ mm, $d = 12$ mm, $l_1 = 83$ mm, $l_2 = 26$ mm [56]	60
Obrázek 42: Soustružení kontury krycího pouzdra	61
Obrázek 43: Vložkování závitu: Vlevo - řezání závitu M 10, vpravo - zavádění vložky	63
Obrázek 44: Frézování hran upínací desky	64

8. Seznam tabulek

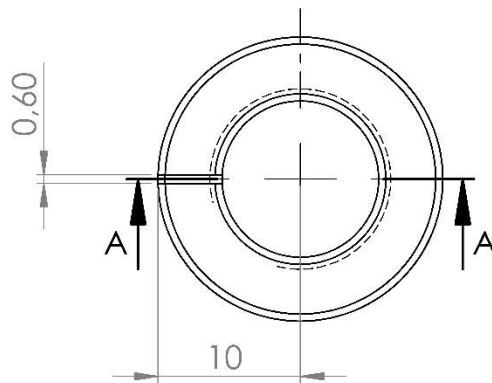
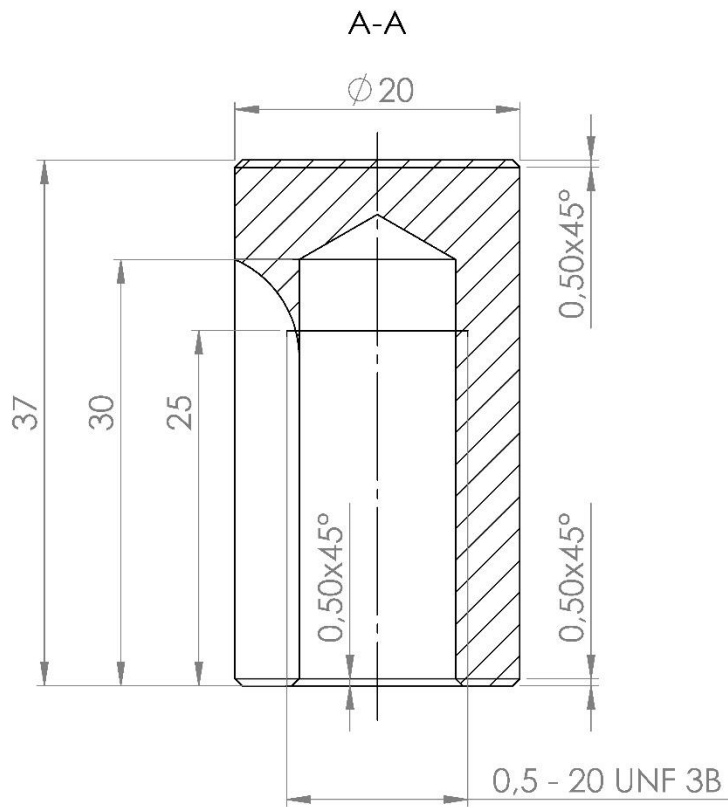
Tabulka 1: Rozdělení dokončovacích metod obrábění.....	2
Tabulka 2: Dosahované hodnoty přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu při soustružení [3][4]	4
Tabulka 3: Dosahované hodnoty přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu při broušení [4]	5
Tabulka 4: Dosahované hodnoty přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu při honování [4].....	6
Tabulka 5: Dosahované hodnoty přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu při superfinišování [4].....	9
Tabulka 6: Dosahované hodnoty přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu při lapování [4].....	10
Tabulka 7: Rozdělení nekonvenčních metod obrábění [1][24].....	20
Tabulka 8: Srovnání dosahovaných drsností vybraných dokončovacích metod obrábění [1][4][24][30]	25
Tabulka 9: Rozměry zkušebních těles z kapitoly 3.1.1. [32]	29
Tabulka 10: Rozměry zkušebních těles kruhového průřezu z kapitoly 3.1.3 [32].....	32
Tabulka 11: Rozměry zkušebních těles ostatních průřezů z kapitoly 3.1.3 [32]	33
Tabulka 12: Rozměry zkušebních těles z kapitoly 3.2.1. [37]	35
Tabulka 13: Rozměry zkušebních těles z kapitoly 3.2.3. [37]	36
Tabulka 14: Rozměry zkušebních těles pro ploché materiály dle ASTM E8/E8M [39]	39
Tabulka 15: Rozměry zkušebních těles pro ploché materiály s využitím upínacích kolíků dle ASTM E8/E8M [39]	40
Tabulka 16: Rozměry zkušebních těles pro tyče dle ASTM E8/E8M [39]	41
Tabulka 17: Rozměry zkušebních těles pro tyče s tvarovými upínacími konci dle ASTM E8/E8M [39] .	42
Tabulka 18: Technické parametry hrotového soustruhu TOS SV 18 [51]	57
Tabulka 19: Technické parametry CNC frézky VMC 500 [52]	58
Tabulka 20: Technické parametry univerzální frézky TOS FNGJ 32 [53]	58
Tabulka 21: Výrobní postup krycího pouzdra	62
Tabulka 22: Výrobní postup upínacího pouzdra	63
Tabulka 23: Výrobní postup upínací desky.....	65
Tabulka 24: Výrobní postup opěrné desky.....	66

9. Přílohy

V příloze této práce jsou postupně uvedeny jednotlivé výkresy - zkušební těleso, součásti přípravku a sestavy s kusovníky. Dále jsou výrobní postupy a fotodokumentace hotových dílů.



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: ISO 2768 - mK LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:	ODSTRANIT OSTŘE HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU	ZMĚNA																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>JMÉNO</th> <th>PODPIS</th> <th>DATUM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NAVRHL</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>PŘEZKOUŠEL</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>SCHVÁLIL</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>VÝROBA</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Z. JAKOSTI</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			JMÉNO	PODPIS	DATUM	NAVRHL			PŘEZKOUŠEL			SCHVÁLIL			VÝROBA			Z. JAKOSTI			NÁZEV: Zkušební těleso		
JMÉNO	PODPIS	DATUM																					
NAVRHL																							
PŘEZKOUŠEL																							
SCHVÁLIL																							
VÝROBA																							
Z. JAKOSTI																							
MATERIÁL: Ti-6Al-4V			Č. VÝKRESU	A4																			
HMOTNOST: 34.4 g			MĚŘÍTKO: 1:1	LIST 1 Z 1 LISTŮ																			



POKUD NEJÍ UVEDENO JINAK:
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
 DRSNOST:
 TOLERANCE: ISO 2768 - mK
 LINEÁRNÍ:
 ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT
 OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

	JMÉNO	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Aleš Cimr		
PŘEZKOUSEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

NÁZEV:

Krycí pouzdro

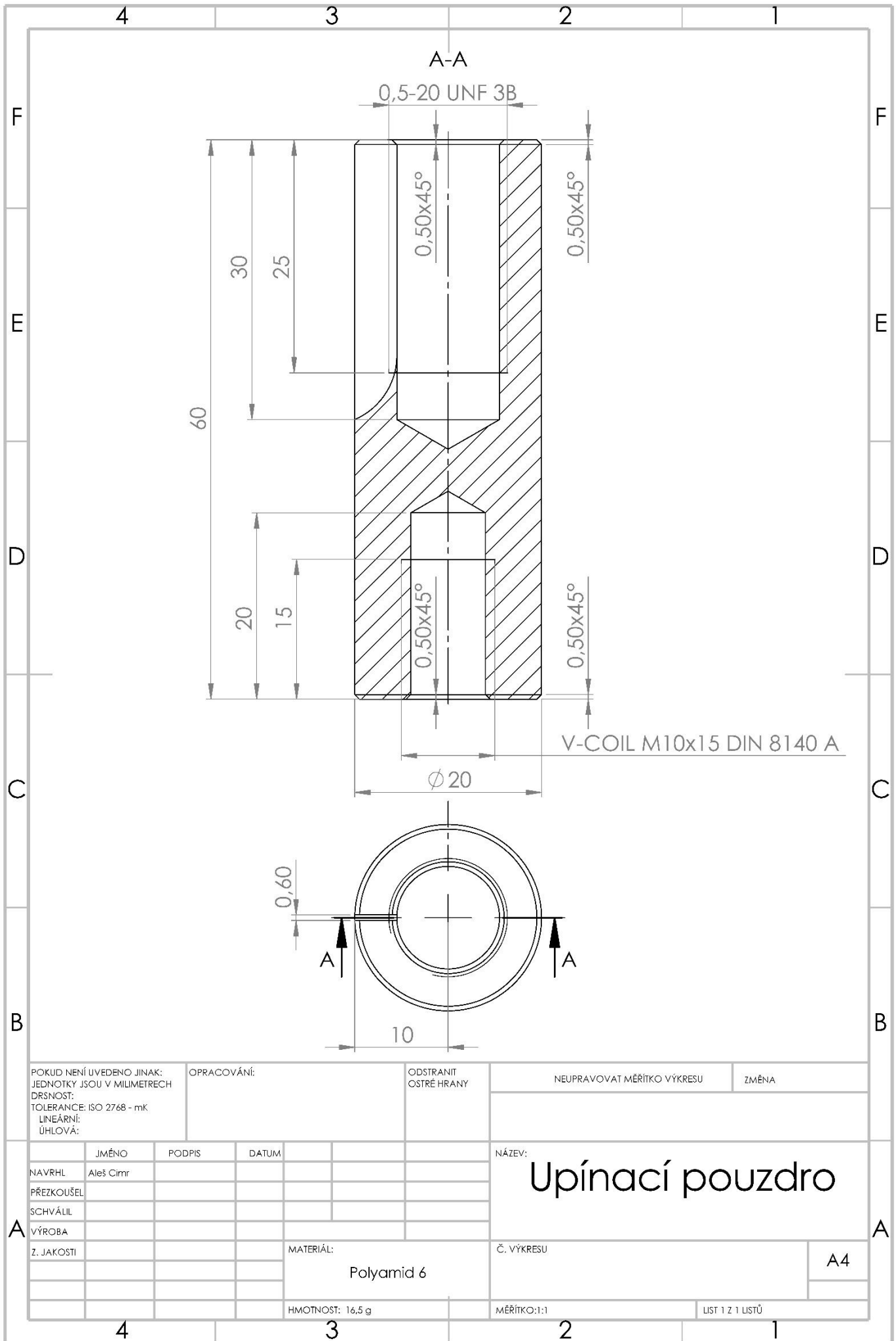
Č. VÝKRESU

A4

HMOTNOST: 9,6 g

MĚŘÍTKO: 2:1

LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NEJÍ UVEDENO JINAK:
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
 DRSNOST:
 TOLERANCE: ISO 2768 - mK
 LINEÁRNÍ:
 ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT
 OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU

ZMĚNA

JMÉNO	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Aleš Cimr	
PŘEZKOUŠEL		
SCHVÁLIL		
VÝROBA		
Z. JAKOSTI		
MATERIÁL:		
Polyamid 6		
HMOTNOST: 16,5 g		

NÁZEV:

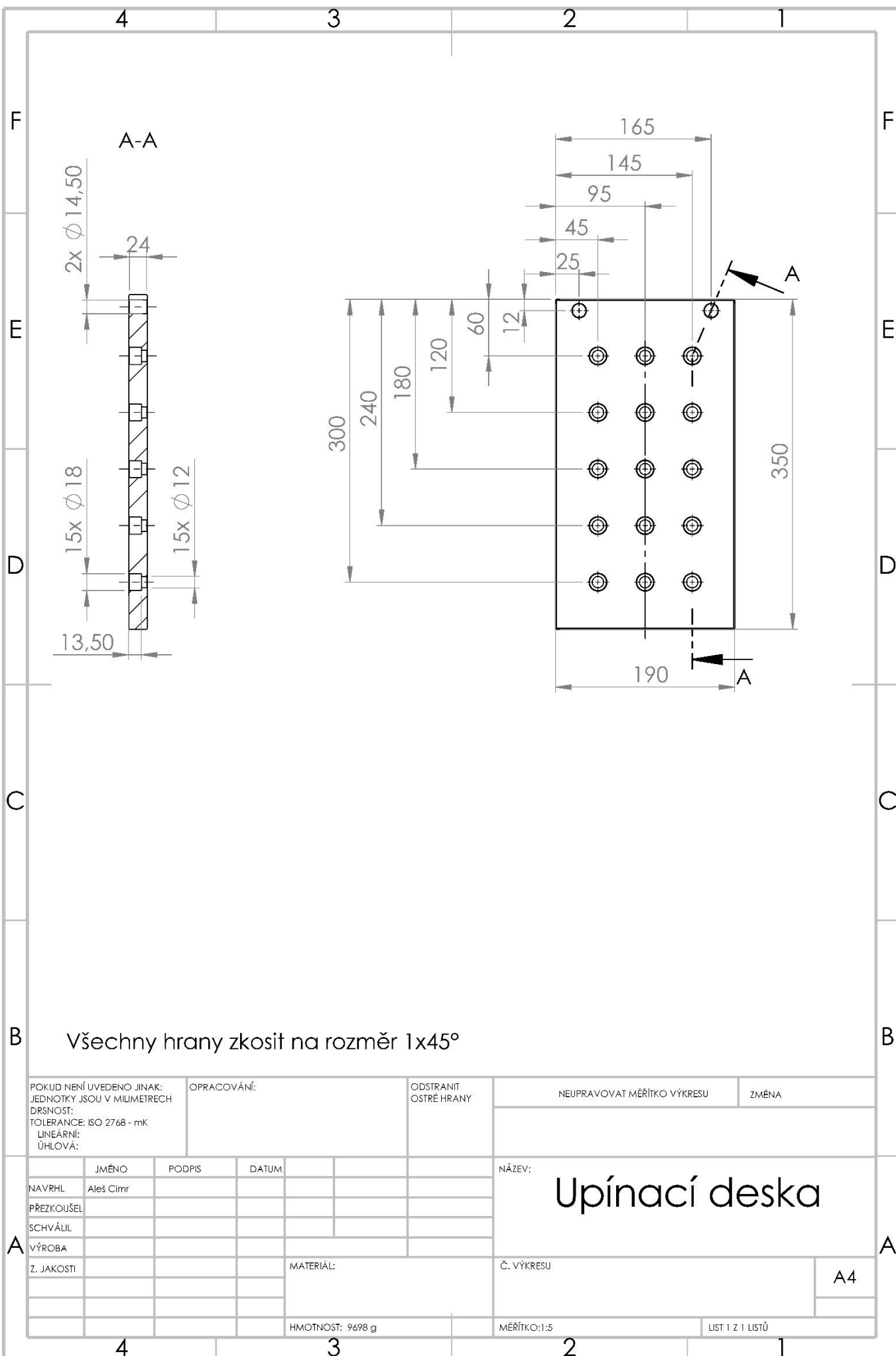
Upínací pouzdro

Č. VÝKRESU

A4

MĚŘITKO: 1:1

LIST 1 Z 1 LISTŮ



Všechny hrany zkosit na rozměr 1x45°

POKUD NEJÍ UVEDENO JINAK:
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
 DRSNOST:
 TOLERANCE: ISO 2768 - mK
 LINEÁRNÍ:
 ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT
 OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

JMÉNO	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Aleš Cimr	
PŘEZKOUŠEL		
SCHVÁLIL		
VÝROBA		
Z. JAKOSTI		

NÁZEV:

Upínací deska

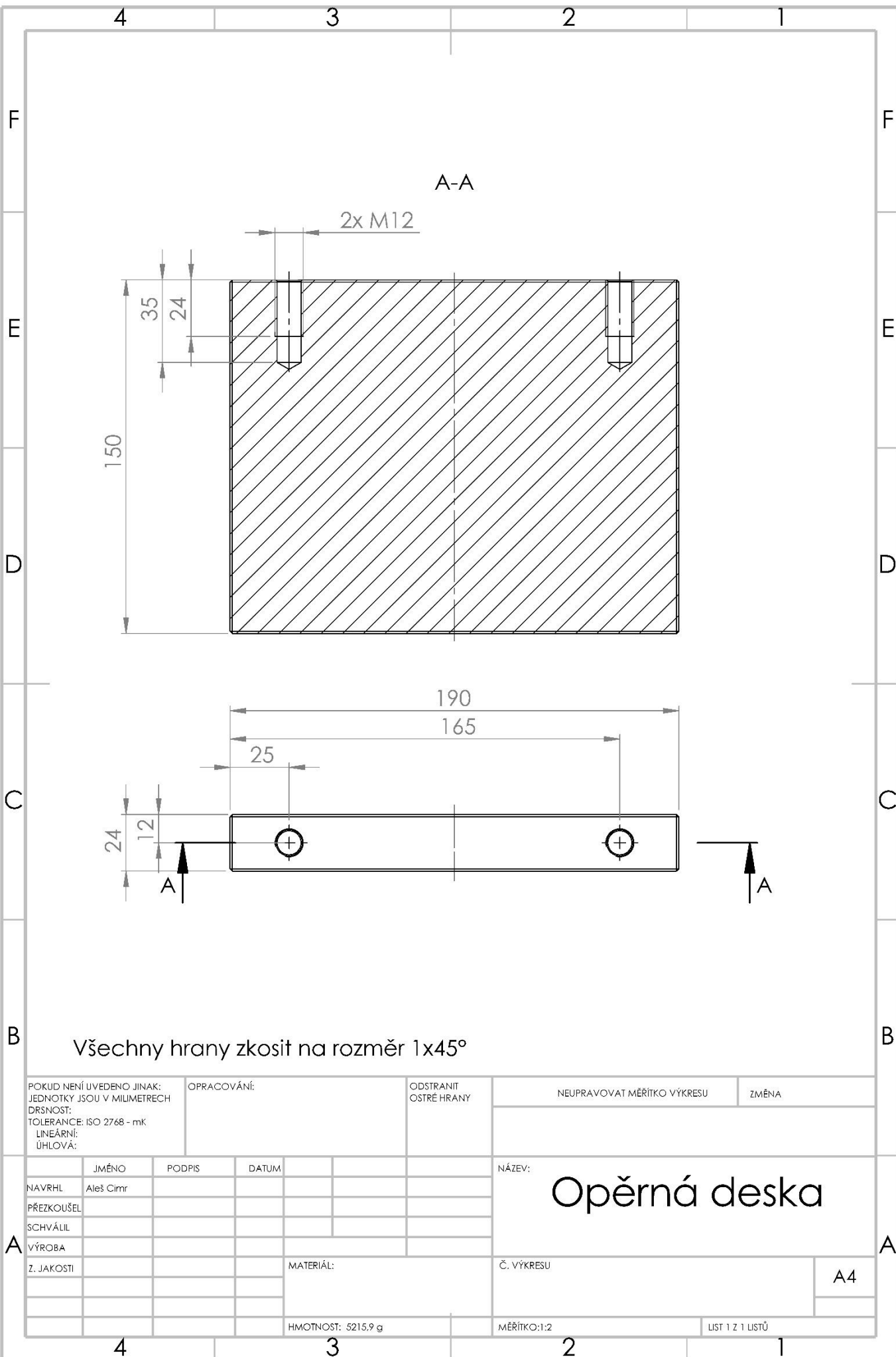
Č. VÝKRESU

A4

HMOTNOST: 9698 g

MĚŘÍTKO: 1:5

LIST 1 Z 1 LISTŮ



Všechny hrany zkosit na rozměr 1x45°

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: ISO 2768 - mK LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:	ODSTRANIT OSTŘE HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU	ZMĚNA
JMÉNO	PODPIS	DATUM	NÁZEV:	<h1>Opěrná deska</h1>	
NAVRHL	Aleš Cimr		Č. VÝKRESU		
PŘEZKOUŠEL					
SCHVÁLIL					
VÝROBA			MATERIÁL:	A4	
Z. JAKOSTI			HMOTNOST: 5215,9 g	MĚŘÍTKO: 1:2	LIST 1 Z 1 LISTŮ

6 5 4 3 2 1

D

D

C

C

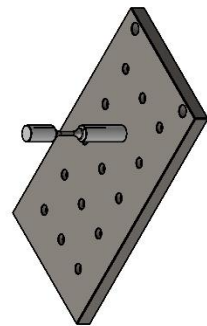
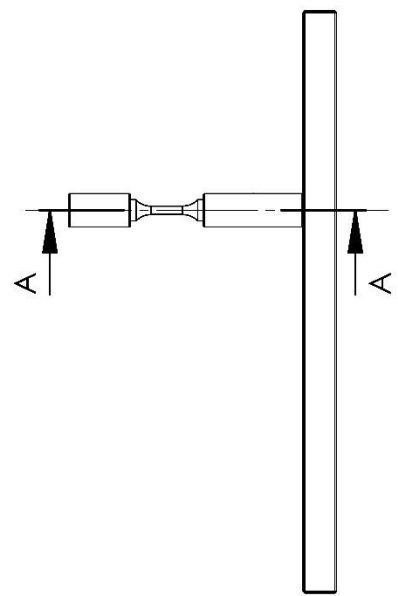
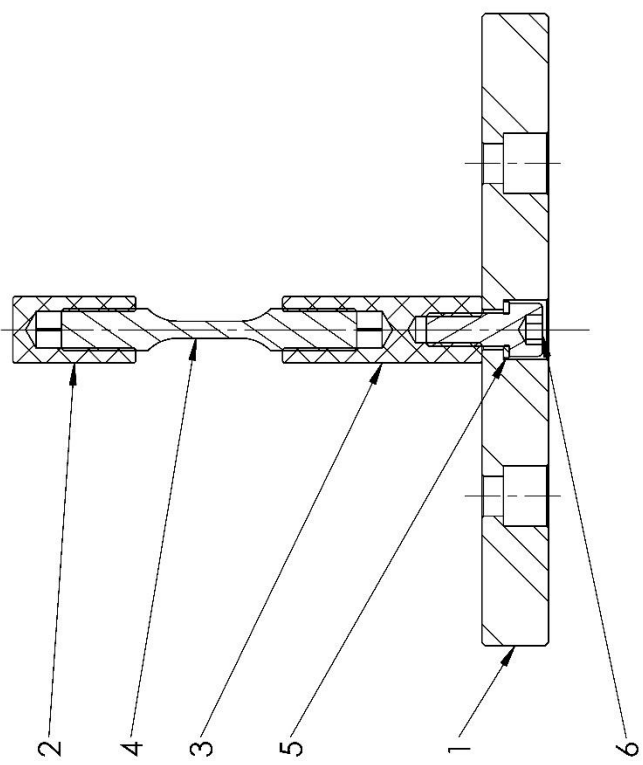
B

B

A

A

A-A
MĚŘÍTKO 1:2



Díly č. 2 a 3 zajistit sponou GBS W1

POKUD NEUVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH TOLERANCE: ISO 2768 - mK LINEARNĚ: ÚHLOVĚ:		OPRACOVÁNÍ: ODSTRANIT OSTRÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU ZMĚNA	
NÁVRAH: Ateš Cimr	JIMĚNO: Ateš Cimr	PODPIS:	DATUM:	NÁZEV: Úpnutí tělesa vertikálně	
PŘEZKOUSEL:	SCHVÁLIL:	VÝROBA:	Z. JAKOSTI:	NÁZEV: Sestava přípravek 1	
MATERIÁL:			Č. VÝKRESU: A4		
HMŮTNOST: 10,905 g			MĚŘÍTKO: 1:5		
LIST 1 Z 1 LISTŮ			LUST 1 Z 1 LISTŮ		

6 5 4 3 2 1

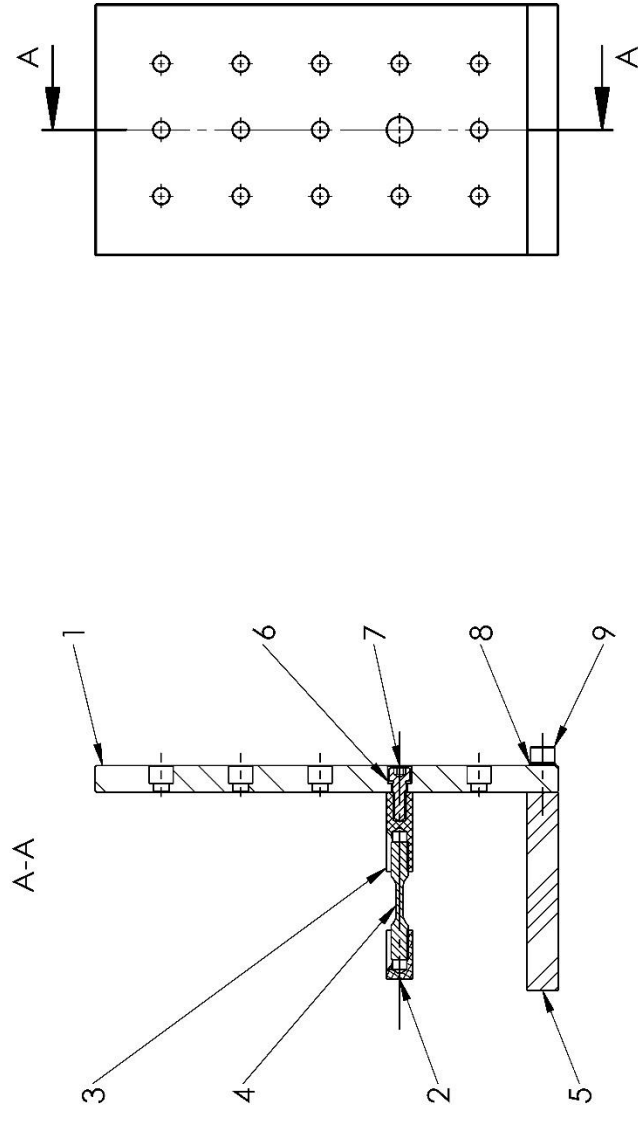
Po- žka	Název	Č. výkresu - č. normy	Hmotnost [kg]	Množ- ství
	Polotovar		Materiál výchozí	
1	Upínací deska			1
		ocel		
2	Krycí pouzdro			15
		Polyamid 6		
3	Upínací pouzdro			15
		Polyamid 6		
4	Zkušební těleso			15
		Ti-6Al-4V		
5	Podložka pružná M10			15
		DIN 127B		
6	Šroub s vnitřním šestihranem M10x25			15
		DIN 912		
7	Spona GBS W1 20-22			30
		korozivzdorná ocel		
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

Index	Změna			Datum		Podpisy	
	Podpis	Datum	Podpis	Datum	C. svitku:		
Vypracov.	Aleš Cimr		Norm. ref.		Mikrofilm		
Skupinař			Přezk.		Sestava		
Technol.			Schválil		Hmotn. [kg]	10,905	

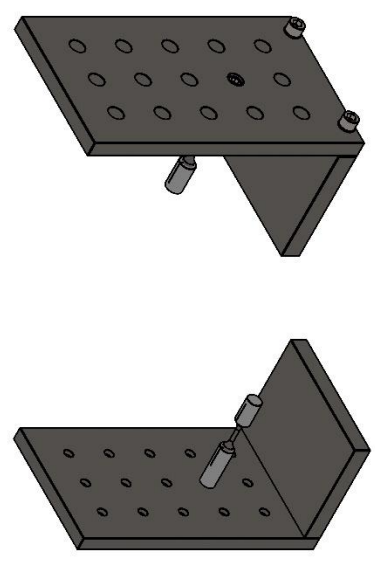
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STROJNÍ	NÁZEV:	Sestava přípravku 1
	ČÍSLO KUSOVNIKU:	
		LIST:

6 5 4 3 2 1

D C B A



Díly č. 2 a 3 zajistit sponou GBS W1
 Díl číslo 5 je možné připevnit i z opačné strany



POKUD NEBUDE DĚNO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
DĚLNOST:		JIMÉNO		OSTŘE HRANY		NÁZEV:		Upnutí tělesa horizontálně	
TOLERANCE: ISO 2768 - mK		ALĚB CÍNNÝ		OSTŘE HRANY		NÁZEV:		Sestava přípravku 2	
LINIARNÍ:		PREZKOÚSEL		OSTŘE HRANY		NÁZEV:		Sestava přípravku 2	
ÚHLOVÁ:		SCHVÁLIL		OSTŘE HRANY		NÁZEV:		Sestava přípravku 2	
		VÝROBA		OSTŘE HRANY		NÁZEV:		Sestava přípravku 2	
		Z. JAKOSTI		OSTŘE HRANY		NÁZEV:		Sestava přípravku 2	
		MATERIÁL:		OSTŘE HRANY		NÁZEV:		Sestava přípravku 2	
		HMOTNOST: 16,121 g		OSTŘE HRANY		NÁZEV:		Sestava přípravku 2	
		MĚŘÍTKO: 1:5		OSTŘE HRANY		NÁZEV:		Sestava přípravku 2	
		LISIČKA: 1		OSTŘE HRANY		NÁZEV:		Sestava přípravku 2	
		LISIČKA: 2		OSTŘE HRANY		NÁZEV:		Sestava přípravku 2	
		LISIČKA: 3		OSTŘE HRANY		NÁZEV:		Sestava přípravku 2	
		LISIČKA: 4		OSTŘE HRANY		NÁZEV:		Sestava přípravku 2	
		LISIČKA: 5		OSTŘE HRANY		NÁZEV:		Sestava přípravku 2	
		LISIČKA: 6		OSTŘE HRANY		NÁZEV:		Sestava přípravku 2	

6 5 4 3 2 1

Po- žka	Název	Č. výkresu - č. normy Materiál výchozí	Hmotnost [kg]	Množ- ství
	Polotovár		Jednotka	
1	Upínací deska	ocel		1
2	Krycí pouzdro	Polyamid 6		15
3	Upínací pouzdro	Polyamid 6		15
4	Zkušební těleso	Ti-6Al-4V		15
5	Opěrná deska	ocel		1
6	Podložka pružná M10	DIN 127B		15
7	Šroub s vnitřním šestihranem M10x25	DIN 912		15
8	Podložka pružná M12	DIN 127B		2
9	Šroub s vnitřním šestihranem M12x35	DIN 912		2
10	Spona GBS W1 20-22	korozivzdorná ocel		30
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

Index	Změna			Datum		Podpisy	
	Podpis	Datum		Podpis	Datum	Č. svitku:	
Vypracov.	Aleš Cimr		Norm. ref.			Mikrofilm	
Skupinař			Přezk.			Sestava	
Technol.			Schválil			Hmotn. [kg]	16,121

<p>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</p> <p>FAKULTA STROJNÍ</p>	NÁZEV:	Sestava přípravku 2
	CÍSLO KUSOVNIKU:	
		LIST:

Výrobní postup pro krycí pouzdro

Výrobní postup		Č. VÝKRESU:	SOUČÁST:		KRYCÍ POUZDRO	
		MATERIÁL: Polyamid 6	POLOTOVAR: tyč Ø 30 mm, délka 680 mm		POČET LISTŮ	1
		POČET KUSŮ:	15	VÝR. DÁVKA	15	LIST
OPERACE	STROJ	POPIS PRÁCE		NÁSTROJE	ŘEZNÉ PODMÍNKY	
5	TOS SV 18	1. Upnout			$v_c = 60 \text{ m/min}$, $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$, $a_p = 3 \text{ mm}$	
		2. Zarovnat čelo		N1		
		3. Soustružit konturu na Ø 20 mm v délce 40 mm, srazit hranu 0,5x45°		N1		
		4. předvrtat středícím vrtákem, vrtat Ø 11,5 v délce 30 mm		N6		
		5. Upíchnout na délku 37 mm		N2		
10	TOS SV 18	1. Upnout			$v_c = 60 \text{ m/min}$, $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$	
		2. Zarovnat čelo		N1		
		3. Srazit hranu 0,5x45°		N1		
15		1. Upnout		Dílenský svěrák		
		2. Ručně vyříznout závit 0,5-20 UNF 3B		N11		
20	TOS FNGJ 32	1. Upnout			$v_c = 60 \text{ m/min}$, $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$	
		2. Frézovat drážku 0,6 mm		N5		
VYPRACOVAL: Aleš Ci mr		KONTROLOVAL:			POZNÁMKY:	
DNE:		DNE:				

Výrobní postup pro upínací pouzdro

Výrobní postup		Č. VÝKRESU:			SOUČÁST:	UPÍNACÍ POUZDRO	
		MATERIÁL: Polyamid 6	POLOTOVAR: tyč Ø 30 mm, délka 1070 mm			POČET LISTŮ	1
		POČET KUSŮ:	15	VÝR. DÁVKA	15	LIST	1
OPERACE	STROJ	POPIS PRÁCE		NÁSTROJE	ŘEZNÉ PODMÍNKY		
5	TOS SV 18	1. Upnout			$v_c = 60 \text{ m/min}$, $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$, $a_p = 3 \text{ mm}$		
		2. Zarovnat čelo		N1			
		3. Soustružit konturu na Ø 20 mm v délce 63 mm, srazit hranu 0,5x45°		N1			
		4. předvrtat středícím vrtákem, vrtat Ø 11,5 v délce 30 mm		N6			
		5. Upíchnout na délku 60 mm		N2			
10	TOS SV 18	1. Upnout			$v_c = 60 \text{ m/min}$, $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$		
		2. Zarovnat čelo		N1			
		3. Předvrtat středícím vrtákem, vrtat Ø 10,4 v délce 20 mm		N7			
		4. Vyříznout závit M10x15		N12			
15		1. Upnout		Dílenský svěrák			
		2. Ručně vyříznout závit 0,5-20 UNF 3B		N11			
		3. Upnout z opačné strany					
		3. Zavést vložku V-COIL M10x15		N12			
20	TOS FNGJ 32	1. Upnout			$v_c = 60 \text{ m/min}$, $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$		
		2. Frézovat drážku 0,6 mm		N5			
VYPRACOVAL: Aleš Cimr		KONTROLOVAL:			POZNÁMKY:		
DNE:		DNE:					

Výrobní postup pro upínací desku

Výrobní postup		Č. VÝKRESU:	SOUČÁST:		UPÍNACÍ DESKA	
		MATERIÁL: OCEL	POLOTOVAR: deska 355x200x30		POČET LISTŮ	1
		POČET KUSŮ:	1	VÝR. DÁVKA	1	LIST
OPERACE	STROJ	POPIS PRÁCE		NÁSTROJE	ŘEZNÉ PODMÍNKY	
5	VMC 500	1. Upnout na výšku			$v_c = 120 \text{ m/min}$, $f_{ot} = 0,35 \text{ mm/ot}$, $a_p = 2 \text{ mm}$	
		2. Frézovat tloušťku o 2 mm		N3		
		3. Upnout z opačné strany a frézovat na rozměr 350 mm		N3		
		4. Upnout na šířku				
		5. Frézovat tloušťku o 2 mm		N3		
		6. Upnout z opačné strany a frézovat na rozměr 190 mm		N3		
10	VMC 500	1. Upnout na plocho			$v_c = 60 \text{ m/min}$, $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$, $a_p = 3 \text{ mm}$	
		2. Frézovat tloušťku o 2 mm		N3		
		3. Upnout stejným způsobem z opačné strany				
		4. Frézovat na tloušťku 24 mm		N3		
		5. Vrtat průchozí díry 15x Ø 12 mm		N9	$v_c = 80 \text{ m/min}$, $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$, vrtat s výplachem po 4 mm	
		6. Frézovat průchozí díry 2x Ø 14,5		N9		
		7. Zhloubit Ø 18 mm o hloubce 13,5 mm		N10		
15	TOS FNGJ 32	1. Upnout			$v_c = 60 \text{ m/min}$, $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$	
		2. Frézovat všechny hrany 1x45°		N4		
VYPRACOVAL: Aleš Címr		KONTROLOVAL:			POZNÁMKY:	
DNE:		DNE:				

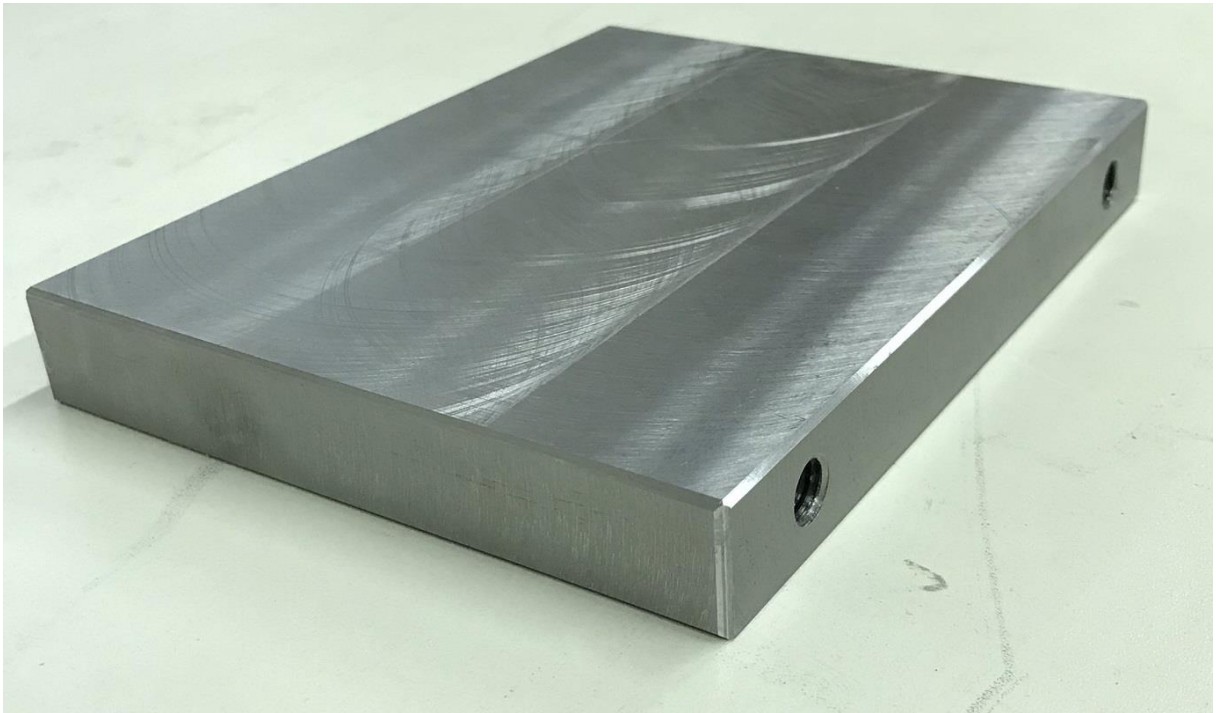
Výrobní postup pro opěrnou desku

Výrobní postup		Č. VÝKRESU:			SOUČÁST:	OPĚRNÁ DESKA	
		MATERIÁL: OCEL	POLOTOVAR: deska 200x160x30			POČET LISTŮ	1
		POČET KUSŮ:	1	VÝR. DÁVKA	1	LIST	1
OPERACE	STROJ	POPIS PRÁCE			NÁSTROJE	ŘEZNÉ PODMÍNKY	
5	VMC 500	1. Upnout na výšku				$v_c = 120 \text{ m/min}$, $f_{ot} = 0,35 \text{ mm/ot}$, $a_p = 2 \text{ mm}$	
		2. Frézovat tloušťku o 2 mm			N3		
		3. Upnout z opačné strany a frézovat na rozměr 190 mm			N3		
		4. Upnout na šířku					
		5. Frézovat tloušťku o 2 mm			N3		
		6. Upnout z opačné strany a frézovat na rozměr 150 mm			N3		
10	VMC 500	1. Upnout na plocho				$v_c = 60 \text{ m/min}$, $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$, $a_p = 3 \text{ mm}$	
		2. Frézovat tloušťku o 2 mm			N3		
		3. Upnout stejným způsobem z opačné strany			N3		
		4. Frézovat na tloušťku 24 mm			N3		
15	VMC 500	1. Upnout na výšku			N8	$v_c = 30 \text{ m/min}$, $f_{ot} = 0,03 \text{ mm/ot}$	
		2. Vrtat 2x díru $\varnothing 10,2 \text{ mm}$, hloubka 35 mm					
20	TOS FNGJ 32	1. Upnout			N4	$v_c = 60 \text{ m/min}$, $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$	
		2. Frézovat všechny hrany $1 \times 45^\circ$					
25		1. Upnout			Dílenský svěrák		
		2. Ručně vyříznout závit			N13		
VYPRACOVAL: Aleš Cimr		KONTROLOVAL:				POZNÁMKY:	
DNE:		DNE:					

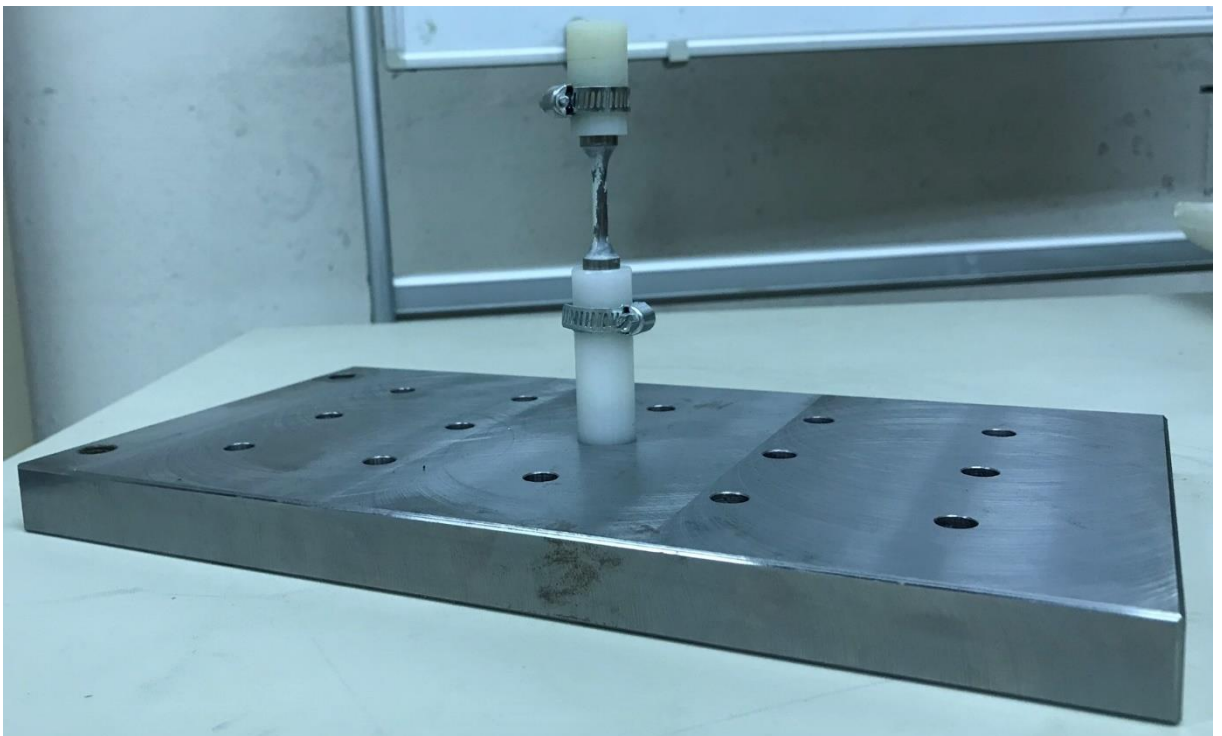
Zkušební těleso a krycí pouzdra



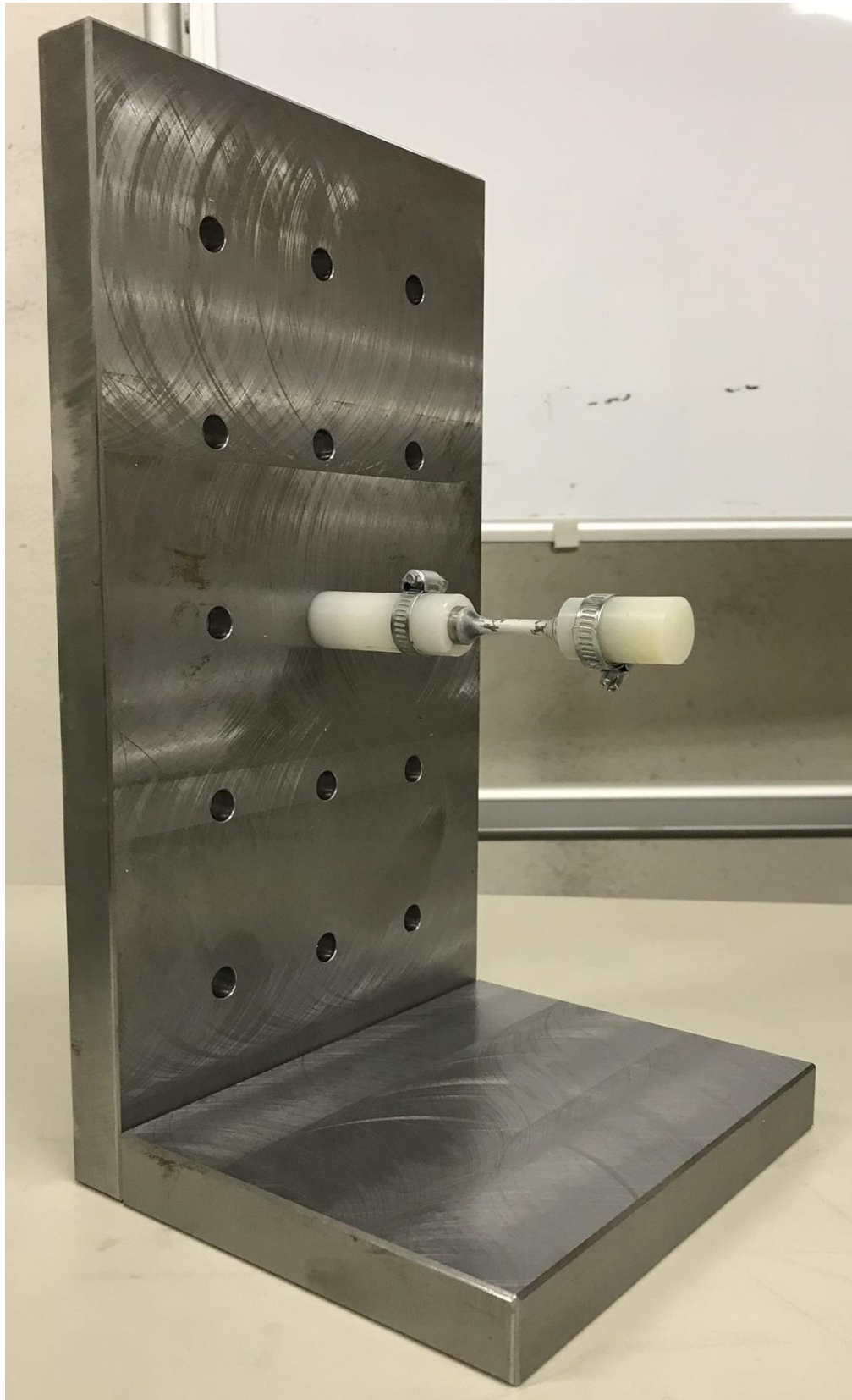
Opěrná deska



Sestava přípravku 1



Sestava přípravku 2



Spojovací materiál v boxu

