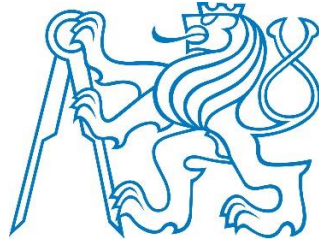


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní



Bakalářská práce

Experimentální zařízení pro hodnocení odolnosti
náběžných hran lopatek

Jakub Antoš

Anotace:

V této práci je stručně popsán turboprotulový motor GE H80, jehož lopatky z rotoru 1. stupně axiálního kompresoru jsou předmětem testování odolnosti náběžné hrany. Dále je zmapována problematika porušování lopatek v provozu s důrazem na poškození způsobené cizorodou částicí. Pro testování odolnosti náběžných hran je navrženo experimentální zařízení a vytvořen jeho 3D model. Výstupem modelu jsou výrobní výkresy, návrh materiálů a technologie výroby všech součástí. Dále je popsána metoda testování lopatek na daném zařízení a prezentovány výsledky testování.

Abstract:

In this thesis a turboprop engine GE H80 is briefly described, which rotor blades of 1st stage axial compressor are subject to leading edge durability assessment. Furthermore, the issue of damaging leading edges with the emphasis on foreign object damage (FOD) is outlined. For testing of leading edge durability, an experimental device is designed and 3D model of this device is created. The output of the model are technical drawings, concepts of materials and production technologies for all parts. Further a method of testing blades on this device is described and results of this testing are presented.

Klíčová slova:

FOD, turboprotulový motor, lopatka kompresoru, odolnost náběžné hrany, blisk, experiment, Charpyho zkouška

Keywords:

FOD, turboprop engine, compressor blade, leading edge durability, blisk, experiment, Charpy impact test

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Dne

V Praze

.....

Jakub Antoš

Obsah

1. Úvod	4
2. Turbovertulový motor GE H80	5
2.1. Popis motoru	5
2.2. Konstrukce kompresoru	6
3. Způsoby porušování lopatek v provozu	8
3.1. Namáhání lopatek v provozu	8
3.2. FOD (Foreign Object Damage)	9
3.3. Abrasivní opotřebení	9
4. Zařízení pro indentační zkoušku lopatek	10
4.1. Navržený experiment	10
4.2. Upínací zařízení	11
4.2.1. Návrh upínacího zařízení	11
4.2.2. Výroba upínacího zařízení	12
4.3. Indentor	13
4.3.1. Návrh indentoru	13
4.3.2. Výroba indentoru	14
4.4. Úprava ukazatele počáteční výšky kladiva	15
4.5. Upravené Charpyho kladivo	16
4.5.1. 3D model kladiva	16
4.5.2. Finální podoba kladiva	17
5. Použitá metoda měření hloubky záseků	18
6. Experiment	20
6.1. Metodika experimentu	20
6.2. Vyhodnocení experimentu	22
7. Závěr	24
Bibliografie	25
Seznam obrázků	26
Seznam tabulek	27
Seznam příloh	27

1. Úvod

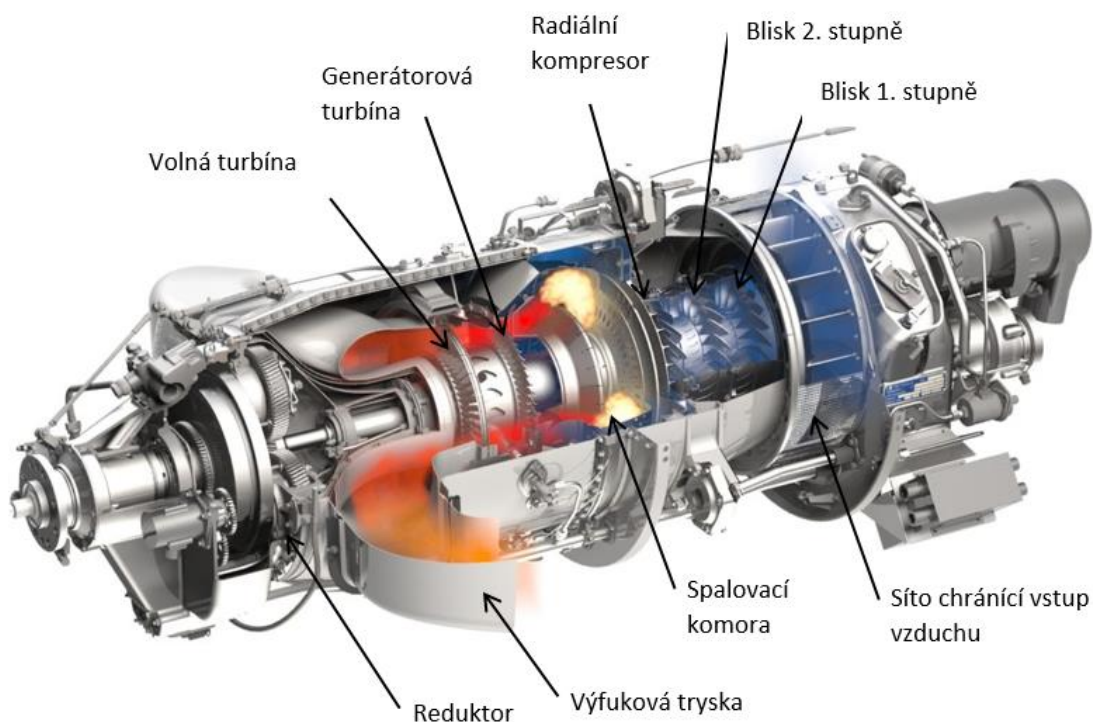
V této práci se budu zabývat návrhem zařízení pro hodnocení odolnosti náběžných hran lopatek a jeho následnou výrobou. Nejprve stručně představím turbovrtulový motor GE H80, jehož lopatky axiálního kompresoru budou předmětem pozdějšího testování. Dále nastíním problematiku porušování lopatek v provozu s důrazem na poškození v důsledku střetu s cizorodou částicí (*Foreign Object Damage*, dále jen FOD), s důsledky tohoto poškození na únavovou pevnost lopatky a tím i celého lopatkového disku (*bladed disc, blisk*). Dále bude popsáno samotné zařízení navržené pro laboratorní simulaci FOD, metodika daného experimentu a stručně též způsob měření velikosti poškození. K zařízení pracujícího na principu Charpyho rázové zkoušky budou navrženy materiály a výrobní technologie a zhotoveny výrobní výkresy.

2. Turbovrtulový motor GE H80

2.1. Popis motoru

Experimentální zařízení bude sloužit pro testování odolnosti lopatek 1. stupně axiálního kompresoru motoru GE H80, který je vyvinutý na základě svého předchůdce M601. Jedná se o turbovrtulový dvouhřídelový motor s obráceným průtokem, kompresorová hřídel má dva stupně axiálního kompresoru a jeden kompresor radiální. [6]

Vzduch je nasáván přes síto a pokračuje přes první a druhý stupeň axiálního kompresoru a dále přes kompresor radiální do spalovací komory. Za spalovací komorou je prstencový rozvaděč spalin a dále dvě turbíny, kde první je součástí hřídele kompresorové a slouží k pohonu celého kompresoru. Druhá tzv. volná turbína je součástí volné hřídele, která přes reduktor pohání samotnou vrtuli. Po výstupu z generátorové části jsou spaliny odvedeny ven z motoru po směru letu a tvoří přídatný tah (cca 5% celkového tahu). [1] [6]



Obr. 1: Turbovrtulový motor GE H80 v řezu [5]

2.2. Konstrukce kompresoru

Osou kompresoru prochází kompresorová hřídel, na které jsou usazené po směru vstupujícího vzduchu rotory prvního a druhého axiální stupně a kolo radiálního kompresoru. Mezi jednotlivými rotory jsou umístěna kola rozváděcích lopatek – statory. Kompresor motoru H80 se tedy skládá ze dvou stupňů axiálních a jednoho stupně radiálního. Oba dva stupně axiálního kompresoru jsou u daného motoru koncipovány jako lopatkový disk (*blade disc*, zkráceně *blisk*), což znamená, že lopatky jsou pevnou součástí disku a nejsou do něho zasazovány jako jednotlivé díly pomocí zámků, jak tomu bylo u předchůdce tohoto motoru M601 [6]. Celkový kompresní poměr celého kompresoru je 7, přičemž dvoustupňový axiální kompresor se na něm podílí zhruba z 30% a zbylých 70% z výsledného kompresního poměru obstarává kompresor radiální. Stlačovaný vzduch se po průchodu kompresorem motoru ohřeje přibližně o 263 °C. Protože v rámci práce budou testovány lopatky blisku prvního stupně axiálního kompresoru, popíši dále tuto součást podrobněji. [6]

Blisk prvního stupně axiálního kompresoru má 21 lopatek vysokých 50 mm. Lopatky jsou v nejširším místě silné 1,45 mm a mají proměnlivou geometrii náběžné hrany (největší poloměr zaoblení náběžné hrany je u kořene lopatky a nejmenší na jejím konci). Blisk je vyráběn soustružením, víceosým frézováním a broušením zápustkového výkovku z dvoufázové titanové slitiny Ti6Al4V (dle WL 3.7164) vyznačující se vysokou mezí pevnosti $R_m = 950 \text{ N/mm}^2$, ale relativně nízkou tvrdostí 270 až 330 HB. Právě nízká tvrdost spolu s velmi ostrou náběžnou hranou zapříčiňují nedostatečnou odolnost proti impaktu cizího objektu. Povrch lopatek je ve stavu po frézování na čisto. [6]



Obr. 2: Model blisku 1. stupně axiálního kompresoru [6]



Obr. 3: Blisk 1. stupně



Obr. 4: Sestava kompresorové hřídele motoru (bez turbíny) [5]

3. Způsoby porušování lopatek v provozu

3.1. Namáhání lopatek v provozu

Pro pochopení porušování lopatek v provozu je nutné nejdříve objasnit, jakým způsobem jsou samotné lopatky namáhány. Každý stupeň kompresoru je tvořen lopatkami statorovými, které slouží k usměrňování nasávaného vzduchu, a lopatkami rotoru, které jsou na rozdíl lopatek statorových namáhány odstředivou silou vlivem rotace rychlostí kolem 36 000 ot/min. Při provozu jsou navíc lopatky rotoru vlivem dynamických sil namáhány kmitáním.

Na takto dynamicky zatěžovaných lopatek časem dojde ke vzniku únavových trhlin. U nijak nenarušené lopatky se únavová trhlina iniciuje vždy v nejvíce dynamicky namáhaném místě, což je u vetknutí lopatky. Zde je nejvyšší hodnota tahového napětí vyvolaného odstředivou silou a zároveň největší namáhání při kmitání lopatky. [2]

Trvanlivost nijak nenarušených lopatek je poměrně přesně určená a podle toho jsou i nařízeny servisní kontroly a maximální životnost blisku. Lopatky jsou kontrolovány vizuálně barevnou luminiscenční defektoskopií, při které dojde k odhalení šířící se trhliny.

Problém nastává, pokud je náběžná hrana lopatky při provozu nějak mechanicky narušena, protože v tomto narušení může dojít k iniciaci únavové trhliny mnohem dříve, než se motor dostane k prohlídce. Můžeme proto říci, že hlavním mechanismem poškozování lopatek je jejich narušení cizorodou částicí, která se dostane do vzduchové cesty.

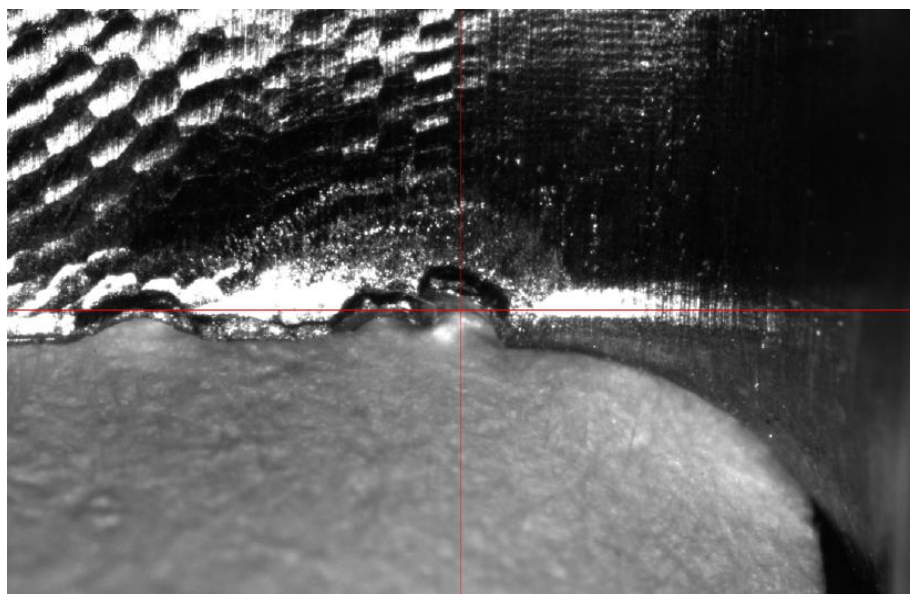
Vstup vzduchu do turbovrtulového motoru je chráněn sítím, které zabraňuje vniknutí objektů větších rozměrů, ovšem nedokáže zabránit nasátí drobných poletavých částic (např. jemného písku). K samotnému poškození náběžné hrany lopatek dochází při interakci cizorodé částice s lopatkami kompresoru (*Foreign Object Damage*, dále jen FOD). Poškozovány jsou všechny rotační i statorové části ve vzduchové cestě.

K FOD dochází zpravidla při vzletu a přistání na nezpevněných letištích, kdy je kolem letounu vířen okolní substrát, který je následně do motoru spolu se vzduchem nasáván, popřípadě při letu v oblastech s vyšší koncentrací polétavých částic (např. pouštní a stepní oblasti). Velikost částic způsobujících FOD se pohybuje od mikroskopických rozměrů až po jednotky milimetrů. Právě velikost částic má hlavní vliv na typ poškození, které způsobí.

Větší pískové částice a drobné kamínky způsobují samotné FOD v náběžných hranách, zatímco jemné částice poškozují abrazivní. [2] [3]

3.2.FOD (Foreign Object Damage)

Větší částice při interakci s náběžnou hranou lopatky kompresoru vytvoří v náběžné hraně zásek až do hloubky v řádech několika desetin milimetru, ojediněle i přes milimetr. Tvary záseku bývají nejčastěji klínovité nebo obloukovité. V okolí záseku je vždy větší či menší oblast plastické deformace, mající v některých případech charakter „vyvalení“ materiálu za zásekem. Čím blíže k vetknutí lopatky zásek vznikne, tím výrazněji zhoršuje její únavovou pevnost. V místě záseku časem dojde k iniciaci únavové trhliny a možnému následnému odtržení lopatky, což může mít fatální důsledky. Tento typ poškození se vyskytuje u všech rotačních i statorových lopatek, ale s největší mírou u 1. stupně axiálního kompresoru, jelikož je první ve vzduchové cestě. [6]



Obr. 5: FOD na náběžné hraně v kritickém místě u kořene lopatky blisku 1. stupně

3.3. Abrazivní opotřebení

Jemné částice nemají dostatečnou energii, aby v náběžné hraně vytvořily zásek. Namísto toho lopatku spolu se vzduchem obtékají a způsobují abrazivní poškození povrchu. Povrch lopatky vlivem obroušování jemným pískem ztrácí svoji kvalitu a celá lopatka se ztenčuje, což má přímý vliv na únavovou pevnost. U lopatek axiálního kompresoru je ovšem toto poškození oproti zásekům způsobovaným většími částicemi zanedbatelné. Naopak u lopatek radiálního kompresoru je abrazivní poškození mnohem významnější. Dochází zde k obroušování hlavně v mezilopátkovém kanálu na tlakové straně lopatky. [6]

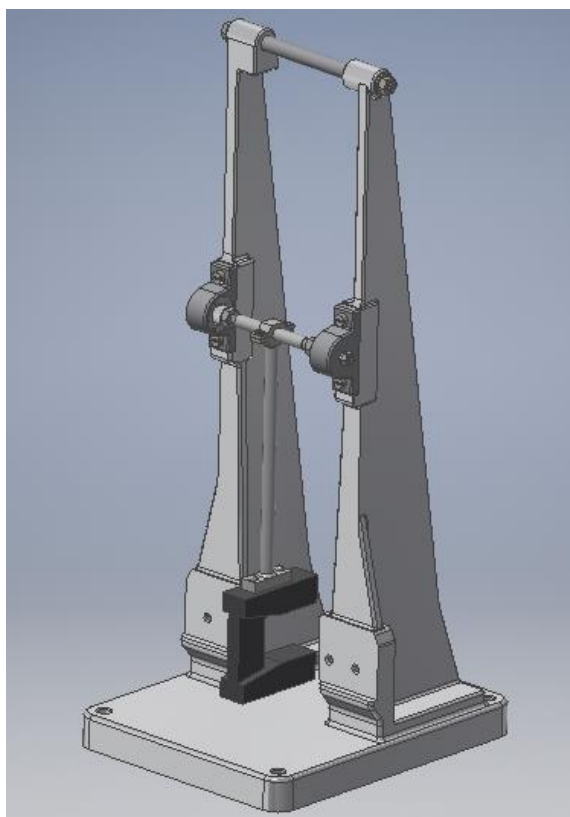
4. Zařízení pro indentační zkoušku lopatek

4.1. Navržený experiment

Bylo rozhodnuto, že jako nejlepší okamžitá varianta zvýšení odolnosti náběžné hrany se jeví její re-design. Lopatky se tedy udělají méně ostré na náběžné hraně, což zvýší odolnost lopatek natolik, aby motory byly dále schopny operovat i ve ztížených podmínkách oblastí s vysokou hustotou polétavých částic a z nezpevněných letištních ploch. Změněná geometrie náběžné hrany bude mít sice negativní vliv na účinnost kompresoru a tím i celého motoru, ale tato změna bude nevýznamně malá.

Poloměr zaoblení je po celé délce náběžné hrany proměnlivý, přičemž největší je u vetknutí a dál ke konci lopatky se snižuje (lopatka je nejostřejší na konci). Cílem nové geometrie náběžné hrany je, aby maximální hloubka záseků byla snížena pod nejvyšší dovolenou mez.

Proto byla zvolena zkouška, při níž bude do náběžné hrany lopatky s novou geometrií vnikat indentor s určitou dopadovou energií a následný zásek v nové náběžné hraně se porovná se zásekem vytvořeným se stejnou dopadovou energií indentoru v lopatce nijak neupravené. Jako výchozí zařízení pro indentační zkoušku bylo tedy zvoleno Charpyho kladivo.



Obr. 6: Model původního Charpyho kladiva (černě původní ocelový beran)

Charpyho kladivo muselo být ovšem upraveno tak, aby vyhovovalo specifickým rozměrům zkoušeného vzorku lopatky. Prvním problémem bylo vyřešit systém upínání jednotlivých lopatek tak, aby byla zajištěna dostatečná tuhost upnutí, stabilita lopatky a opakovatelnost upnutí všech lopatek při samotné zkoušce. Další problém představovala příliš vysoká dopadová energie beranu Charpyho kladiva způsobená jeho vysokou hmotností. Proto musel být původní ocelový beran nahrazen mnohem lehčím duralovým nástavcem, jehož konec byl osazen indentorem z kalené nástrojové oceli. Díky tomu byla výrazně snížena hmotnost a tím i dopadová energie kladiva.

Pro samotné testování musel být nejprve celý blisk rozřezán na stejně velké lopatkové segmenty. Každý segment nesl jednu lopatku a podle tvaru segmentů bylo přesně zhotoveno upínací zařízení (viz kapitola 4.2.), které zajistí vždy stejnou polohu upnutí lopatky při zkoušce a při následném měření záseku.



Obr. 7: Vyříznutý lopatkový segment určený pro zkoušku

4.2. Upínací zařízení

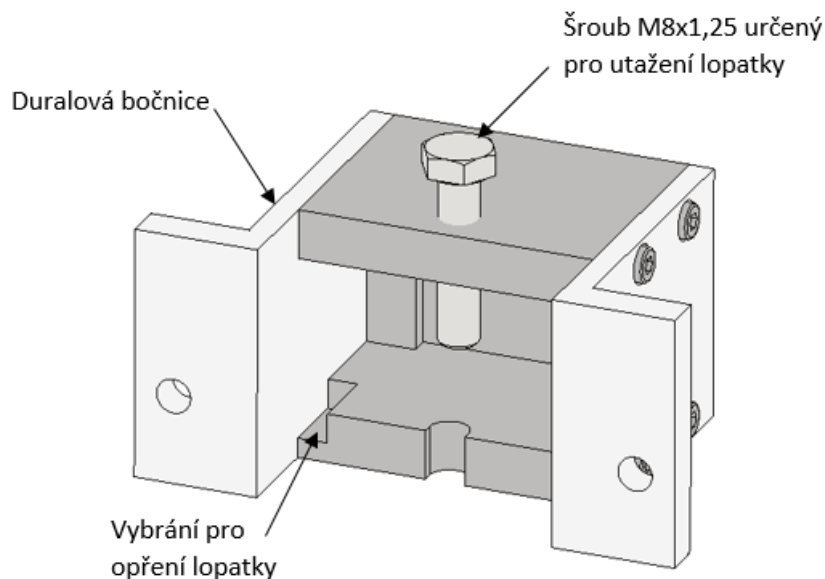
4.2.1. Návrh upínacího zařízení

Při upnutí lopatky bylo nutné zajistit její stabilitu a dostatečnou oporu při nárazu indentoru do náběžné hrany. Byl navržen upínací přípravek profilu „U“ s takovými rozměry, aby se lopatka opírala ve dvou bodech proti zadní stěně a ve dvou bodech proti spodní stěně upínacího přípravku. Lopatka je utažena v dané poloze šroubem, jenž se do lopatky opírá zhruba v jejím středu a tlačí ji proti spodní a zadní stěně profilu. Konec přitlačného šroubu musí být

zabroušen do sférického tvaru, aby se minimalizovala možnost mechanického poškození lopatky šroubem.

Nejprve byl zhotoven plastový model upínky, na kterém došlo k optimalizaci rozměrů tak, aby každá lopatka po dotažení šroubu dosedala bez problému do stejné polohy. Jako materiál upínacího přípravku byla navržena nástrojová ocel, která měla být po obrobení zakalena kvůli odolnosti proti otláčení v místech dotyku lopatky.

Následně bylo nutno vytvořit systém uchycení upínacího zařízení do samotného Charpyho kladiva s ohledem na dostatečnou tuhost upnutí proti rázům kladiva. To bylo provedeno pomocí dvou bočnic ve tvaru „L“, které se přišroubovali k bokům upínky a poté se celý přípravek dvěma šrouby připevnil zepředu na obrobené dosedací plochy Charpyho kladiva standardně určené pro opření zkušební vzorku. Délky bočnic byly zvoleny tak, aby indentor při impaktu vnikal do upnuté lopatky souběžně s její náběžnou hranou a co nejlépe se tedy přibližoval reálnému poškození v provozu. Jako materiál bočnic byl navržen hliník a to hlavně z důvodu snazší obrobitelnosti.



Obr. 8: Návrhový 3D model upínacího přípravku (půlkruhové zafrézování v dolní části tělesa je místo, kam bude proti náběžné hraně upnuté lopatky dopadat indentor)

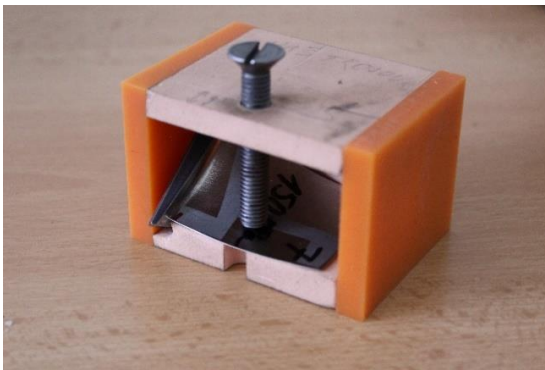
4.2.2. Výroba upínacího zařízení

Samotná upínací přípravek byl vyroben frézováním z bloku o rozměrech 69x62x50 mm chromové ledeburitické oceli 19 436 (ČSN 42 0002). Z důvodu hloubky odebíraného materiálu a jeho horší obrobitelnosti se jednalo o náročnější obráběcí proces a frézování probíhalo na NC

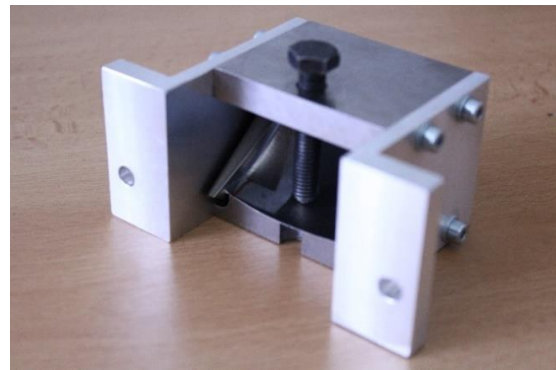
frézce s intenzivním chlazením. Poté byly na bocích vyvrtány otvory pro šrouby a v nich vyřezány závity.

Následně proběhlo ještě několik drobných úprav dosedacích plošek pro lopatku tak, aby dobře seděla a vždy dosedla do sejné polohy. Od plánovaného zakalení bylo nakonec upuštěno, jelikož tvrdost i nezakalené upínky se jevila jako dostačující pro odolání otláčení od měkčí titanové slitiny upnutých lopatek.

Obě bočnice nebyly vyrobeny z hliníku, ale z duralu vzhledem k jeho dostatečným zásobám na dílně. Byly vyrobeny z bloků o odpovídajících rozměrech frézováním a následným vyvrtáním otvorů pro šrouby.



Obr. 10: Plastový model upínacího přípravku s upnutou lopatkou



Obr. 9: : Konečná podoba upínacího přípravku s upnutou lopatkou

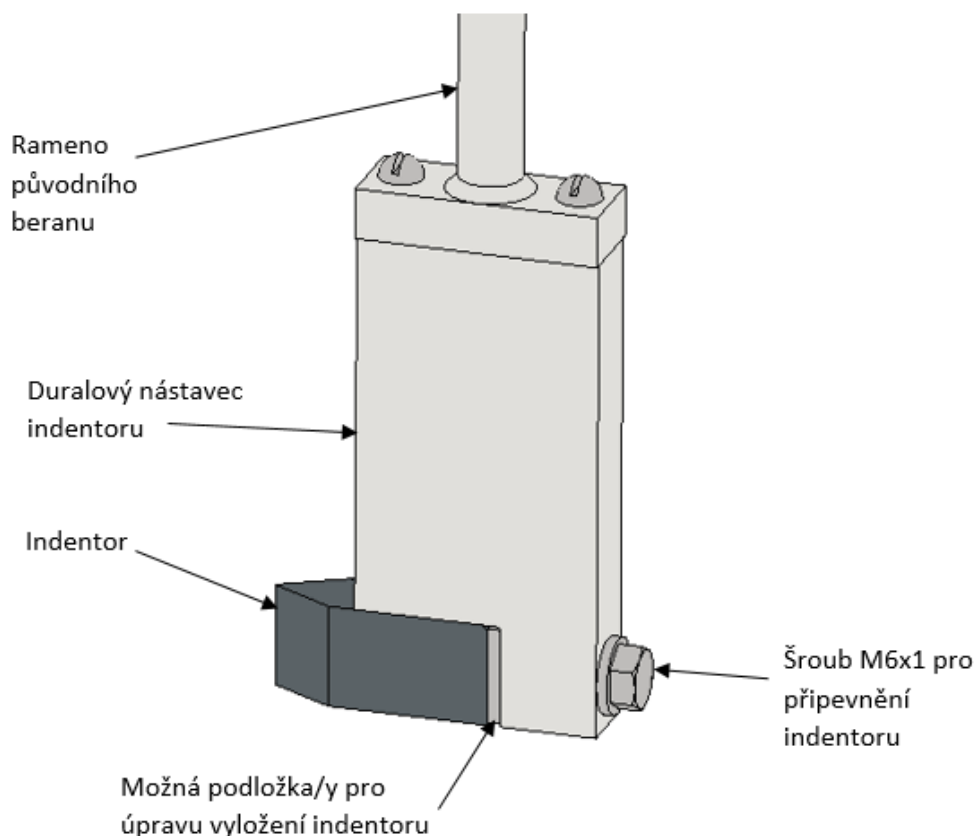
4.3. Indentor

4.3.1. Návrh indentoru

První návrhy indentoru předpokládaly zachování původního beranu Charpyho kladiva, do kterého by se upnulo samotné těleso indentoru. Nakonec bylo ovšem rozhodnuto o odstranění původního beranu kvůli jeho příliš vysoké hmotnosti a nahrazení mnohem lehčím hliníkovým nástavcem, na kterém bude indentor přišroubován.

Jedinými určujícími rozměry indentoru byly úhel jeho ostří a poloměr zaoblení břitu. Na základě nejčastějšího tvaru reálných záseků z provozu byl zvolen úhel ostří 60° a poloměr zaoblení břitu 0,2 mm. Jako materiál byla navrhována kalená a popuštěná nástrojová ocel.

Dále bylo nutno vyrobit nástavec ramena kladiva, který rameno prodlouží tak, aby ostří indentoru bylo právě proti náběžné hraně lopatky. Nástavec byl navrhnout jako hliníkový, o délce 76 mm a obdélníkového průřezu 38x12 mm. K rameni kladiva je přišroubován dvěma šrouby a na jeho dolním konci je osazení, ve kterém se opírá přišroubovaný indentor.



Obr. 11: 3D model nástavce s indentorem

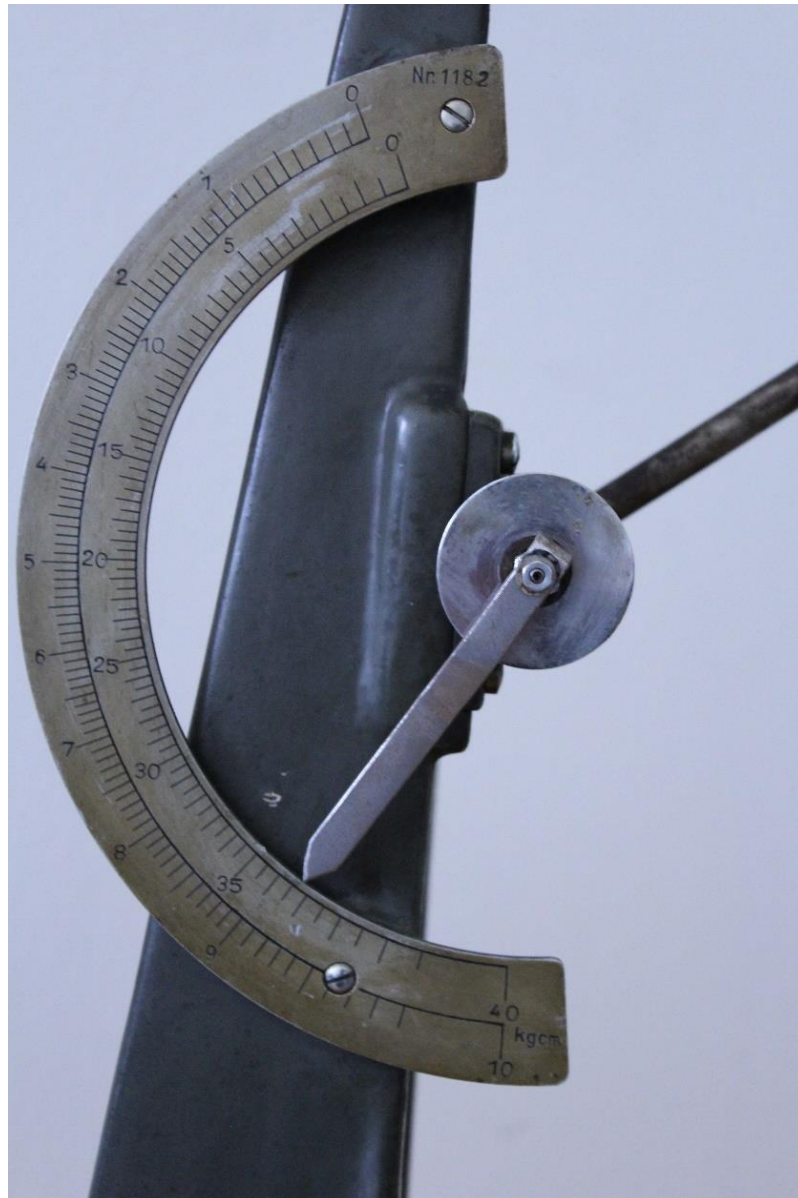
4.3.2. Výroba indentoru

Indentor byl vyroben frézováním ze stejného materiálu jako těleso upínacího přípravku, tedy chromová ledeburitická ocel pro práci za studena 19 436 (dle ČSN 42 0002). Nejprve byl vyfrézován tvar indentoru s klínem úhlu 60°, poté vyvrtána díra pro závit a následně vyřezán samotný závit. Jediným problémem při výrobě bylo řezání závitu do nástrojové oceli. Závit byl opatrně ručně vyřezán s vydatným mazáním řezným olejem. Následně byl indenter zakalen a popuštěn. Ledeburitická nástrojová ocel má obsah uhlíku téměř 2% a má proto tendenci k výraznému okujení. Vzhledem k vysoké finanční náročnosti vakuového kalení byla namísto toho použita chránící barva Condursal 1000, která brání okujení a na povrchu zanechá pouze tmavou submikronovou vrstvu oxidu. Rádus břitu 0,2 mm byl vyroben ručně a to postupným zabrušováním na jemném brusném kameni a kontrolováním velikosti poloměru mikroskopem. Dále byl indenter zakalen a popuštěn.

Nástavec indentoru byl vyroben z duralu hlavně kvůli co nejnižší hmotnosti, dostatečné pevnosti a také z důvodu dostupnosti duralu na dílně.

4.4. Úprava ukazatele počáteční výšky kladiva

Dalším krokem úpravy Charpyho kladiva byla úprava ukazatele dopadové výšky. Ten se stává z úhломěrného pravítka přišroubovaného na bok rámu kladiva, a samotné ručičky ukazatele, která ovšem na Charpyho kladivě chyběla. Proto byla z plechového pásku vytvořena ručička nová, která byla přišroubována k ose ramene kladiva v takovém úhlu, aby při pozici kladiva v dolní úvratí (tj. při nárazu do lopatky) ukazovala na pozici „0“.



Obr. 12: Číselník kladiva s nově vyrobenou ručičkou

4.5.Upravené Charpyho kladivo

4.5.1. 3D model kladiva

Model kladiva byl vytvořen v CAD programu Autodesk Inventor Professional 2016



Obr. 13: 3D Model upraveného Charpyho kladiva (vyhlazený metodou sledování paprsku)

4.5.2. Finální podoba kladiva

Na následujících obrázcích je vidět konečná podoba upraveného Charpyho kladiva. Zařízení na obrázku níže již absolvovalo indentační zkoušku, která proběhla hladce a jejíž výsledky budou dále v této práci prezentovány.

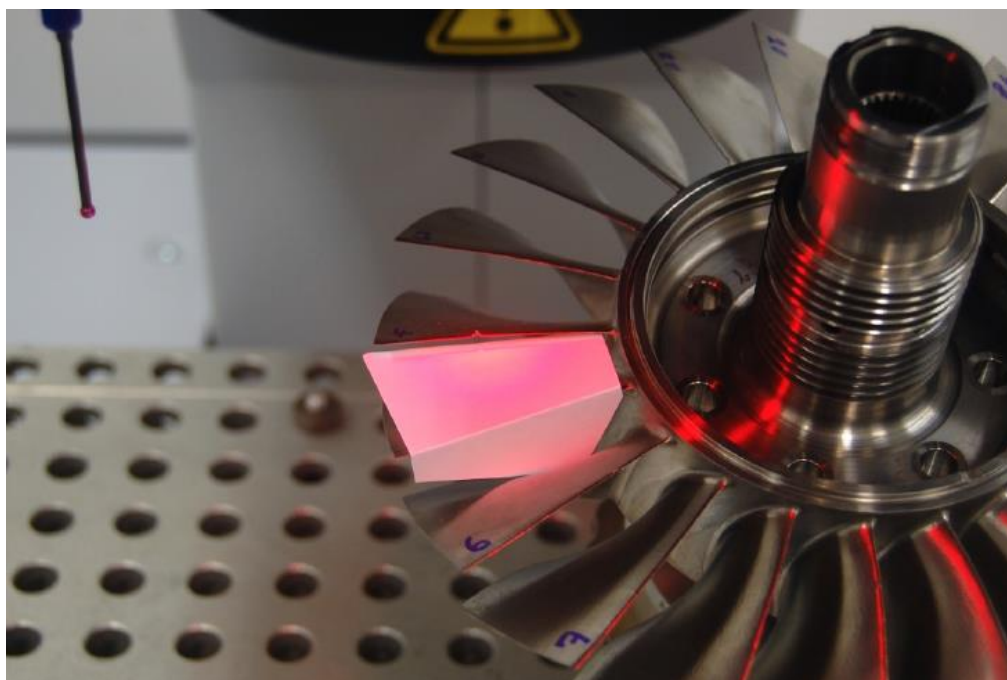


Obr. 14: Upravené Charpyho kladivo připravené na indentační zkoušku lopatky

5. Použitá metoda měření hloubky záseků

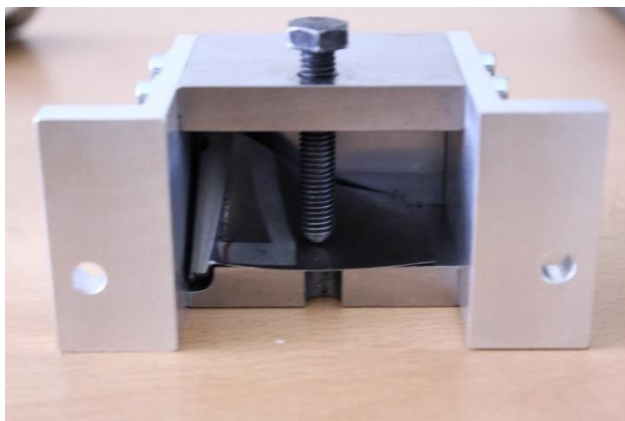
Pro měření hloubky záseků v náběžných hranách lopatek byl použit multisenzorový souřadnicový měřicí stroj O-INSPECT 322 od firmy Carl Zeiss. Byly použity dva způsoby měření: jeden pro měření reálného poškození na blisku a druhý pro měření uměle vytvořených záseků na jednotlivých lopatkových segmentech.

Při měření reálného poškození z provozu byl celý blisk nasazen na trn z plastu skloněný pod úhlem 25°, na kterém byl manuálně natáčen do dané polohy, aby mohla být změřena poškození na každé lopatce. Samotné měření poškození probíhalo opticky, dotyková sonda byla použita pouze při měření celého blisku k zavedení souřadného systému a následnému určení osy rotoru. Mohly tak být měřeny nejen rozměry poškození, ale také vzdálenost poškození od osy rotace.

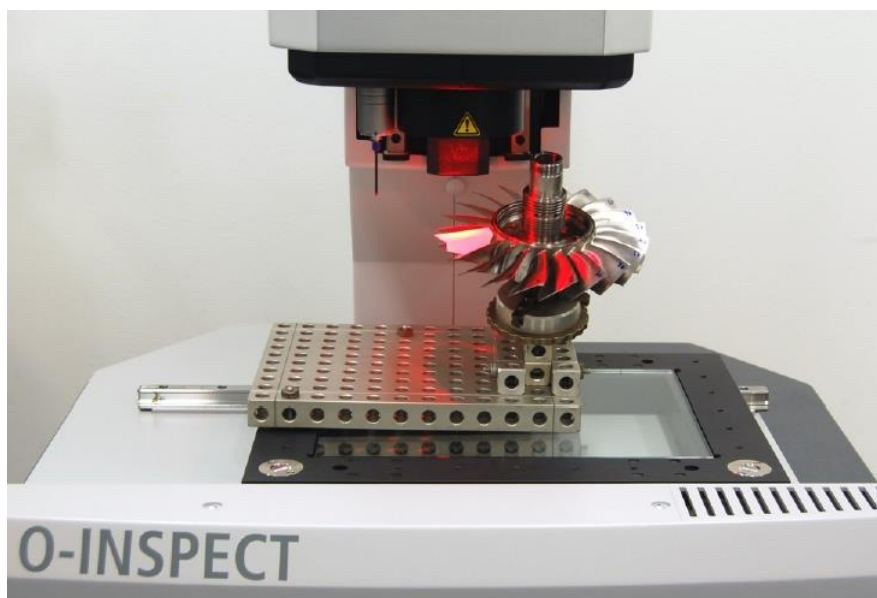


Obr. 15: Upnutí celého blisku na plastovém trnu při měření poškození z provozu (papír pod měřenou lopatkou slouží jako odrazová plocha pro horní osvit) [7]

Při měření záseků z indentoru byly jednotlivé lopatky vždy upnuty do upínacího zařízení, ve kterém byly upnuty i při samotné indentační zkoušce a v této upínce měřeny (viz obr. 16). Byla tak zajištěna vždy stejná poloha měřeného místa pro spolehlivou opakovatelnost měření.



Obr. 16: Takto byly upnuty pro měření na přístroji O-INSPECT jednotlivé lopatkové segmenty



Obr. 17: Multisenzorový souřadnicový měřicí přístroj O-INSPECT 322 při měření poškození lopatek blisku (poškození z provozu) [7]

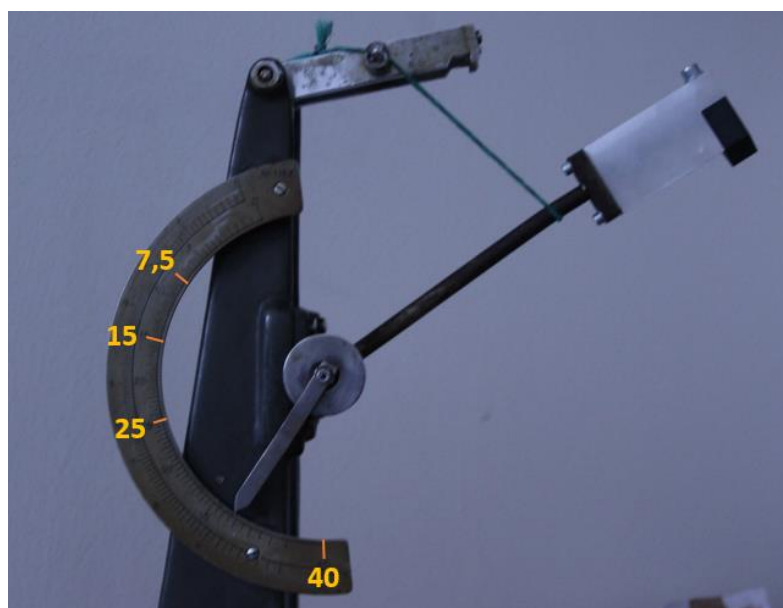
6. Experiment

6.1. Metodika experimentu

Po dokončení všech úprav na kladivu bylo provedeno několik testovacích seků s různou dopadovou energií. Po změření hloubky jednotlivých zkušebních záseků v náběžných hranách bylo rozhodnuto, že seky budou provedeny ze čtyř různých počátečních výšek indentoru (energetických hladin). Nejnižší výška seku a tedy nejnižší energetická hladina byla zvolena tak, aby hloubka seku na neupravené (ostré) lopatce byla přibližně 0,2 mm. Zbývající tři energetické hladiny byly zvoleny pro přibližné hloubky záseku 0,4; 0,7 a 1 mm. Bylo provedeno několik seků z daných výšek a hloubky záseků byly orientačně změřeny na mikroskopu.

Tab. 1: Přibližné hloubky zkušebních seků na neupravené lopatce při dané dopadové výšce

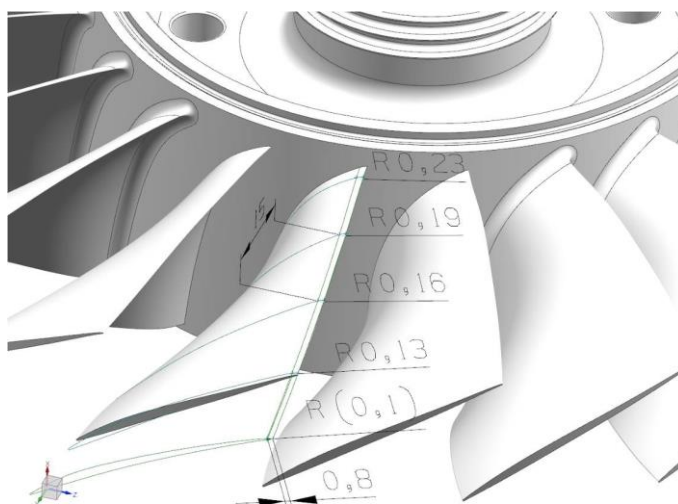
Zvolená dopadová výška [čísla na úhlovém pravítku kladiva]	Přibližná hloubka záseku na ostré (neupravené) lopatce [mm]
7,5	0,2
15	0,4
25	0,7
40	1



Obr. 18: Vyznačené dopadové výšky kladiva (stupnice není lineární)

Vzhledem k výsledkům zkušebních seků a dostupnému počtu lopatek bylo rozhodnuto, že v každé dopadové výšce budou otestovány 4 lopatky s novou geometrií náběžné hrany a 4 lopatky s původní geometrií (neupravené). Bude tedy potřeba 16 lopatek původních a 16 lopatek upravených.

Nová geometrie náběžné hrany lopatek byla zhotovena ručně zámečnickem podle zadání zadavatele (viz obr. 19). Nejprve byla náběžná hrana orýsována ve vzdálenosti 0,8 mm od kraje. Tato oblast byla následně jehlovým pilníkem odbroušena a pomocí pilníku a jemného smirkového papíru dobroušen požadovaný poloměr zaoblení náběžné hrany.



Obr. 19: Zadání nové geometrie náběžné hrany

Při samotném testování se začalo nejprve od nejnižší energetické hladiny, tedy z výšky značené číslem 7,5, a postupně se pokračovalo přes výšky 15 a 25 až do nejvyšší hladiny, označené číslem 40. Ještě před samotným testováním musely být správně dotaženy matice osy kladiva tak, aby se rameno nepohybovalo s příliš velkou vůlí a současně, aby jejich přílišné utažení kladivo netlumilo. Při samotné zkoušce muselo být po každém dopadu kladivo zachyceno obsluhou, aby po odrazu od lopatky do ní znovu nenarazilo a neznehodnotilo provedený zásek, popřípadě vlivem malé boční vůle v ose ramene nedopadlo vedle vytvořeného seku a nevytvořilo sek další. Po každém seku se kontrolovalo ostří indentoru, jestli se z důvodu křehkosti daného materiálu nevyštípl jeho ostří, k čemuž ovšem nedošlo. Po otestování byly lopatky opticky změřeny na stroji O-INSPECT (viz kap. 5.) a celý experiment byl následně vyhodnocen.

6.2. Vyhodnocení experimentu

Po změření všech lopatek vyšlo najevo, o kolik se zvýšila odolnost lopatek s novou geometrií náběžné hrany oproti lopatkám původním. Můžeme konstatovat, že odolnost proti menším částicím (seky z menší výšky) se zvýšila přibližně o 36%, což je o něco výrazněji než odolnost proti větším částicím (seky z největší výšky), která se zvýšila o 25%. Ke zmenšení dalších sledovaných rozměrů poškození, což byla šířka seku a plasticky ovlivněná oblast, nedošlo s takovou měrou jako u hloubky seku.

Tab. 2: Výsledky měření – průměrné hodnoty seků ¹

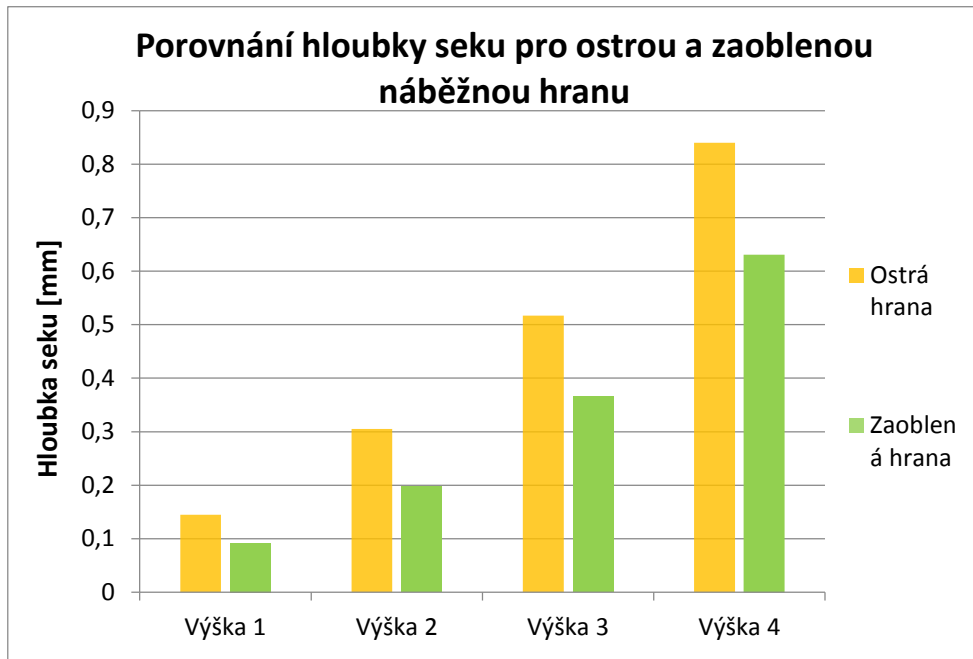
Průměrné rozměry seků (ze 4 lopatek) na jednotlivých výškách dopadu				
		Ostrá hrana (výrobní stav)	Rádus (zaoblená zámečnický)	Procentuální změna veličiny
Výška 1 (7,5)	Hloubka seku [mm]	0,145	0,092	36,6%
	Šířka seku [mm]	0,466	0,374	19,7%
	Ovlivněná zóna [mm]	0,41	0,417	-1,7%
Výška 2 (15)	Hloubka seku [mm]	0,305	0,198	35,1%
	Šířka seku [mm]	0,632	0,515	18,5%
	Ovlivněná zóna [mm]	0,589	0,5709	3,1%
Výška 3 (25)	Hloubka seku [mm]	0,517	0,366	29,2%
	Šířka seku [mm]	0,851	0,681	20,0%
	Ovlivněná zóna [mm]	0,846	0,703	16,9%
Výška 4 (40)	Hloubka seku [mm]	0,84	0,63	25,0%
	Šířka seku [mm]	1,028	0,968	5,8%
	Ovlivněná zóna [mm]	1,004	0,949	5,5%

Z výsledků je také patrné, že hloubky seků z jednotlivých výšek dopadu byly o něco menší (zhruba o 30 %) než se předpokládalo na základě několika zkušebních seků, což ovšem pro výsledky experimenty nemělo žádný vliv. Nutné je zmínit, že zásek byl na lopatce prováděn vždy v jejím středu a nikoliv v kritickém místě u jejího vetknutí, kde je poloměr zaoblení náběžné hrany největší a lze zde tedy očekávat větší odolnost proti impaktu. Jak vyplývá z tabulky 2 a z následujících grafů, lze, co se týče zvýšení odolnosti proti FOD, změnu geometrie náběžné hrany považovat z hlediska okamžité zvýšení odolnosti za úspěšnou metodu.

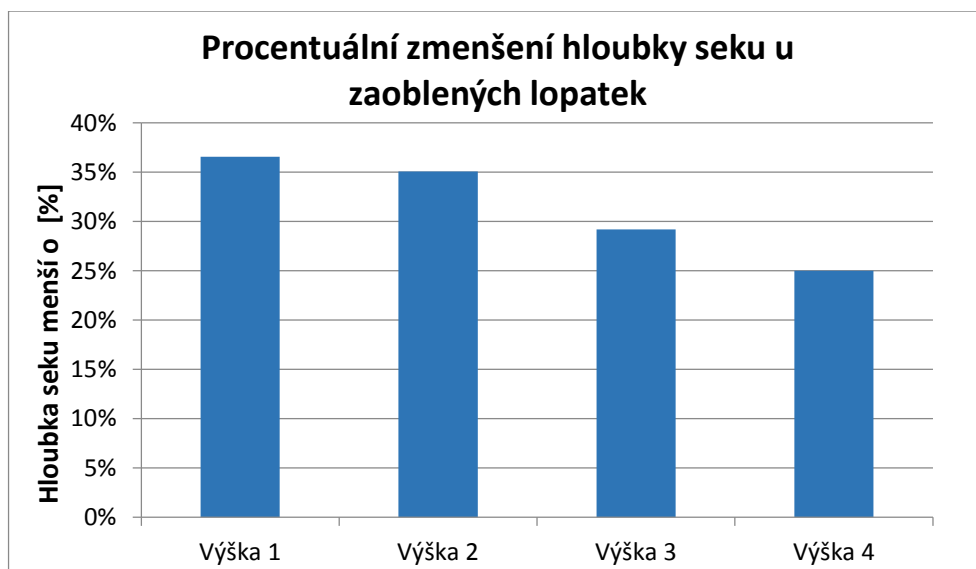
¹ Výchozí tabulky s jednotlivými výsledky každé měřené lopatky viz příloha A

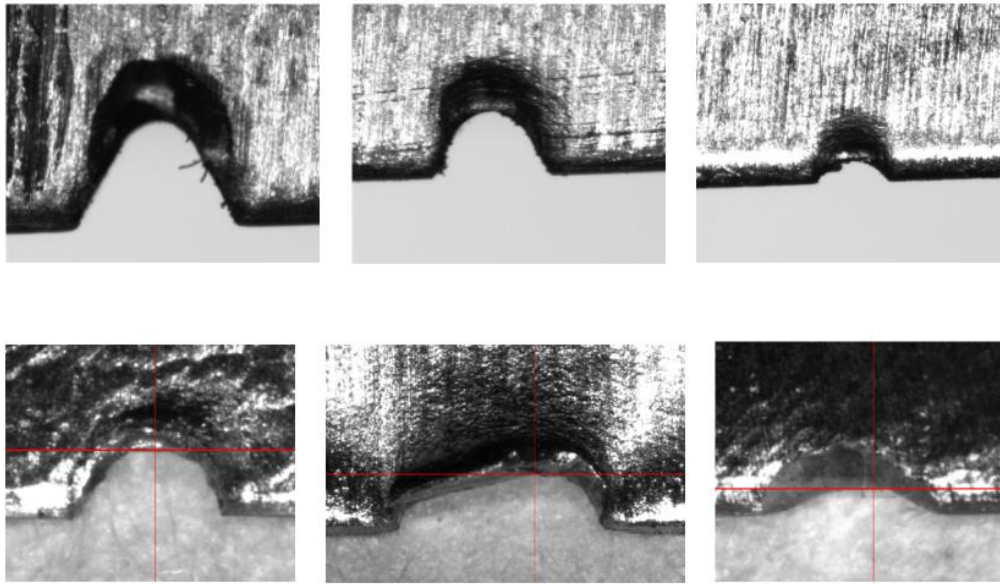
Vzhledem k tomu, že poloměr zaoblění skutečného poškození FOD se pohybuje mezi 0,1 a 0,6 mm a poloměr ostří indentoru byl změřen na 0,21 mm, můžeme říci, že použitý tvar špičky indentoru simuluje poškození „ostřejší“ částicí, která proniká hlouběji, než reálná poškození (viz obr. 20) a proto výsledné zvýšení odolnosti náběžné hrany bude v provozu ještě o něco vyšší než cca 30% nárůst odolnosti prokázaný tímto experimentem.

Tab. 3: Graf porovnání hloubky seku pro původní a novou geometrii náběžné hrany



Tab. 4: Graf procentuálního zmenšení hloubky seku u zaoblených lopatek





Obr. 20: Porovnání záseků ze zkoušky (nahore) se skutečným FOD (dole)

7. Závěr

Úvodem práce jsem se stručně věnoval popisu motoru GE H80 se zaměřením na jeho kompresorovou část, hlavně blisk 1. axiálního stupně, který je nejvíce vystavován poškození způsobovaným vniknutím cizorodých částic do sání motoru, takzvanému FOD. Nastínil jsem problematiku dynamického zatěžování lopatek blisku v provozu a vlivu FOD na únavovou pevnost lopatek.

Dále jsem popsal navrženou laboratorní metodu testování odolnosti náběžných hran lopatek a způsob, jakým byla tato metoda provedena v praxi. Vytvořil jsem 3D model Charpyho kladiva, které bylo pro tento experiment použito, a jako výstup z modelu výkresovou dokumentaci pro výrobu potřebných součástí. Navrhl jsem materiály a technologii výroby jednotlivých dílců a dále jsem popsal specifika jejich výroby.

V návaznosti na zkompletování upraveného Charpyho kladiva v předešlé části práce jsem dále objasnil metodiku, jakou byla zkouška provedena, způsob, jakým byla měřena a vyhodnocována poškození způsobená jak reálným provozem na blisku jako celku, tak poškození jednotlivých lopatkových segmentů simulované při našem experimentu. Nakonec jsem prezentoval souhrnné výsledky experimentu, které lze hodnotit jako pozitivní, neboť pouhou změnou geometrie náběžné hrany lopatek bylo dosaženo téměř třetinového snížení průměrné hloubky záseku.

Bibliografie

- [1] SFORZA, P. M. *Theory of aerospace propulsion*. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann, c2012. Elsevier aerospace engineering series. ISBN 1856179125.
- [2] NICHOLAS, T. *High cycle fatigue: a mechanics of materials perspective*. Oxford: Elsevier, 2006. ISBN 9780080446912.
- [3] BIRKBACK, J.C. *Effects of FOD on the Fatigue Crack Initiation of Ballistically Impacted Ti6Al4V Simulated Engine Blades*. Dayton (OH), 2002. Disertační práce. School of Engineering, University of Dayton.
- [4] WITEK, Lucjan, Arkadiusz BEDNARZ a Feliks STACHOWICZ. Fatigue analysis of compressor blade with simulated foreign object damage. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2015, **58**, 229-237 [cit. 2016-07-11]. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.09.002. ISSN 13506307. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630715300911>
- [5] An Inside Look At GE's Prague Turboprop Engine Plant. (1). [online]. 3.9.2015 [cit. 2016-07-11]. Dostupné z: <http://www.gereports.com/post/128245393585/czech-this-out-an-inside-look-at-ges-prague/>
- [6] PITRMUC, Zdeněk, Vlado GERGELY a Jindřich ZIEGELHEIM. *Zpráva o analýze dílů kompresoru*. Praha, 2015.
- [7] BERÁNEK, Libor. *Měření poškození blisku 1. stupně motoru H80 na náběžných hranách lopatek - souhrn všech protokolů: Výzkumná zpráva o výsledcích plnění projektu TAČR EPSILON TH01011405 Zvyšování životnosti a možnosti oprav lopatkových dílů kompresoru z Ti6Al4V v turbovrtulových motorech*. Praha, 2015.

Seznam obrázků

Obr. 1: Turbovrtulový motor GE H80 v řezu [5]	5
Obr. 2: Model blisku 1. stupně axiálního kompresoru [6]	6
Obr. 3: Blisk 1. stupně	7
Obr. 4: Sestava kompresorové hřídele motoru (bez turbíny) [5]	7
Obr. 5: FOD na náběžné hraně v kritickém místě u kořene lopatky blisku 1. stupně	9
Obr. 6: Model původního Charpyho kladiva (černě původní ocelový beran)	10
Obr. 7: Vyříznutý lopatkový segment určený pro zkoušku	11
Obr. 8: Návrhový 3D model upínacího přípravku (půlkruhové zafrézování v dolní části tělesa je místo, kam bude proti náběžné hraně upnuté lopatky dopadat indentor)	12
Obr. 9: : Konečná podoba upínacího přípravku s upnutou lopatkou	13
Obr. 10: Plastový model upínacího přípravku s upnutou lopatkou	13
Obr. 11: 3D model nástavce s indentorem	14
Obr. 12: Číselník kladiva s nově vyrobenou ručičkou	15
Obr. 13: 3D Model upraveného Charpyho kladiva (vyhlazený metodou sledování paprsku)	16
Obr. 14: Upravené Charpyho kladivo připravené na indentační zkoušku lopatky	17
Obr. 15: Upnutí celého blisku na plastovém trnu při měření poškození z provozu (papír pod měřenou lopatkou slouží jako odrazová plocha pro horní osvit) [6]	18
Obr. 16: Takto byly upnuty pro měření na přístroji O-INSPECT jednotlivé lopatkové segmenty	19
Obr. 17 : Multisenzorový souřadnicový měřicí přístroj O-INSPECT 322 při měření poškození lopatek blisku (poškození z provozu) [6]	19
Obr. 18: Vyznačené dopadové výšky kladiva (stupnice není lineární)	20
Obr. 19: Zadání nové geometrie náběžné hrany	21
Obr. 20: Porovnání záseků ze zkoušky (nahore) se skutečným FOD (dole)	24

Seznam tabulek

Tab. 1: Přibližné hloubky zkušebních seků na neupravené lopatce při dané dopadové výšce _____	22
Tab. 2: Výsledky měření [8] _____	24
Tab. 3: Graf porovnání hloubky seku pro původní a novou geometrii náběžné hrany [8] _____	25
Tab. 4: Graf procentuálního zmenšení hloubky seku u zaoblených lopatek [8] _____	25

Seznam příloh

Příloha A: Tabulky výsledků měření
Příloha B: Výrobní výkres upínacího hranolu
Příloha C: Výrobní výkres nástavce indentoru
Příloha D: Výrobní výkres levé bočnice
Příloha E: Výrobní výkres pravé bočnice
Příloha F: Výrobní výkres indentoru

Příloha A: Tabulky výsledků měření

Tabulka změřených rozměrů seku neupravených (ostrých) lopatek

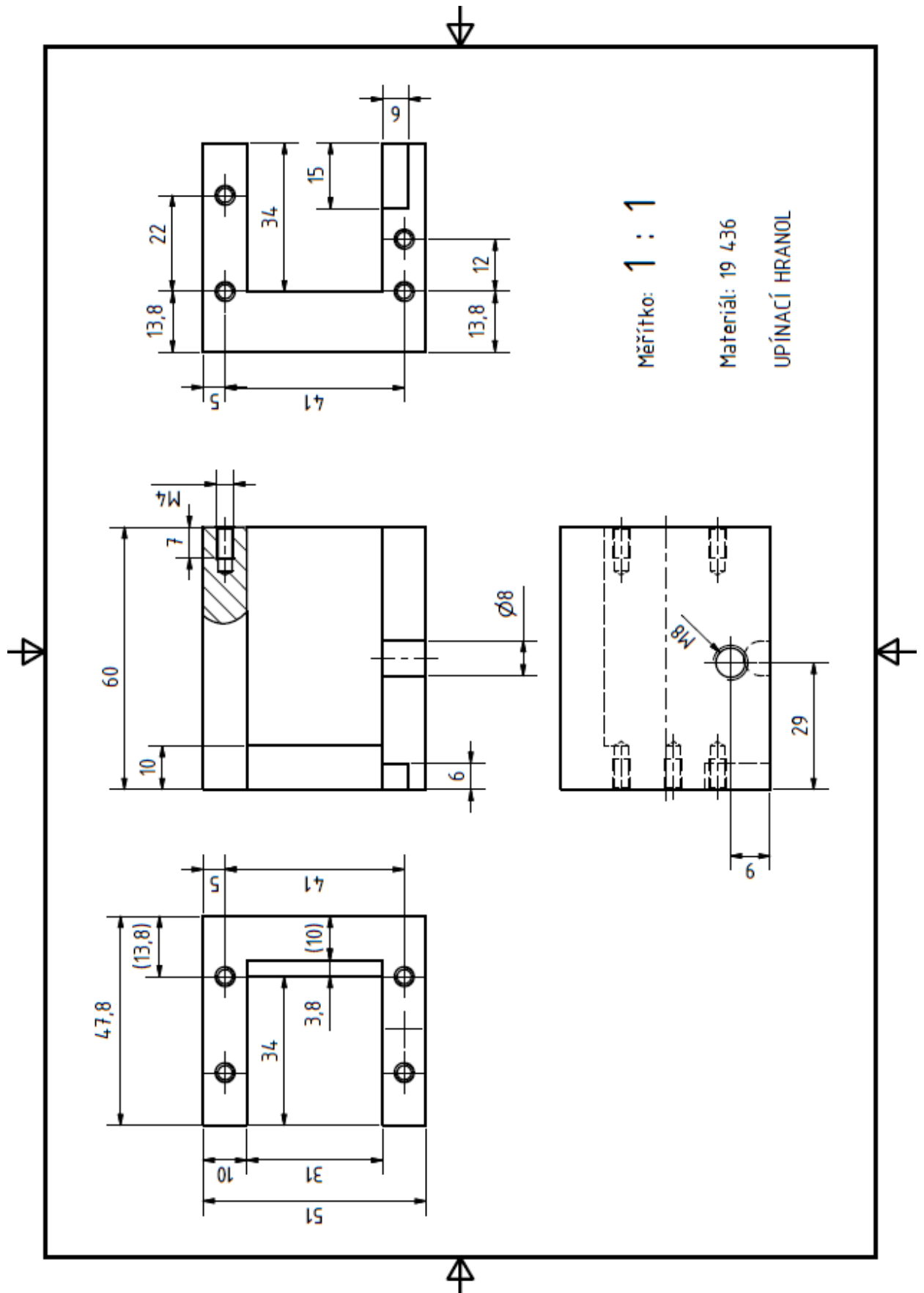
	č. lopatky	Předpokládaná přibližná hloubka záseku na ostré hraně [mm]	měřené hodnoty		
			hloubka záseku	šířka záseku	ovlivněná zóna
OSTRÁ (neupravená lopatka)	3/3	0,2	0,1717	0,4825	0,4021
	1/19		0,1323	0,4608	0,4404
	3/12		0,1506	0,4572	0,3558
	3/14		0,1449	0,4641	0,4429
	---	∅	0,1499	0,4662	0,4103
	3/5	0,4	0,3023	0,6235	0,5562
	3/19		0,3457	0,6746	0,6387
	3/16		0,2746	0,5943	0,5782
	3/21		0,2974	0,6335	0,5841
	---	∅	0,305	0,6315	0,5893
	3/13	0,7	0,525	0,853	0,7846
	3/6		0,4899	0,8238	0,8118
	1/5		0,5198	0,859	0,9551
	3/17		0,5333	0,8695	0,8326
	---	∅	0,517	0,8513	0,846
	3/9	1	0,81	1,2139	1,2653
	3/10		0,87	1,2377	1,2446
	3/18		0,82	1,2023	1,153
	1/12		0,15	0,4572	0,3558
	---	∅	0,66	1,0278	1,0047

Pozn.: Červeně označená hodnota nebyla do průměru zahrnuta, protože se výrazně odchylovala od ostatních hodnot (špatně provedený zásek)

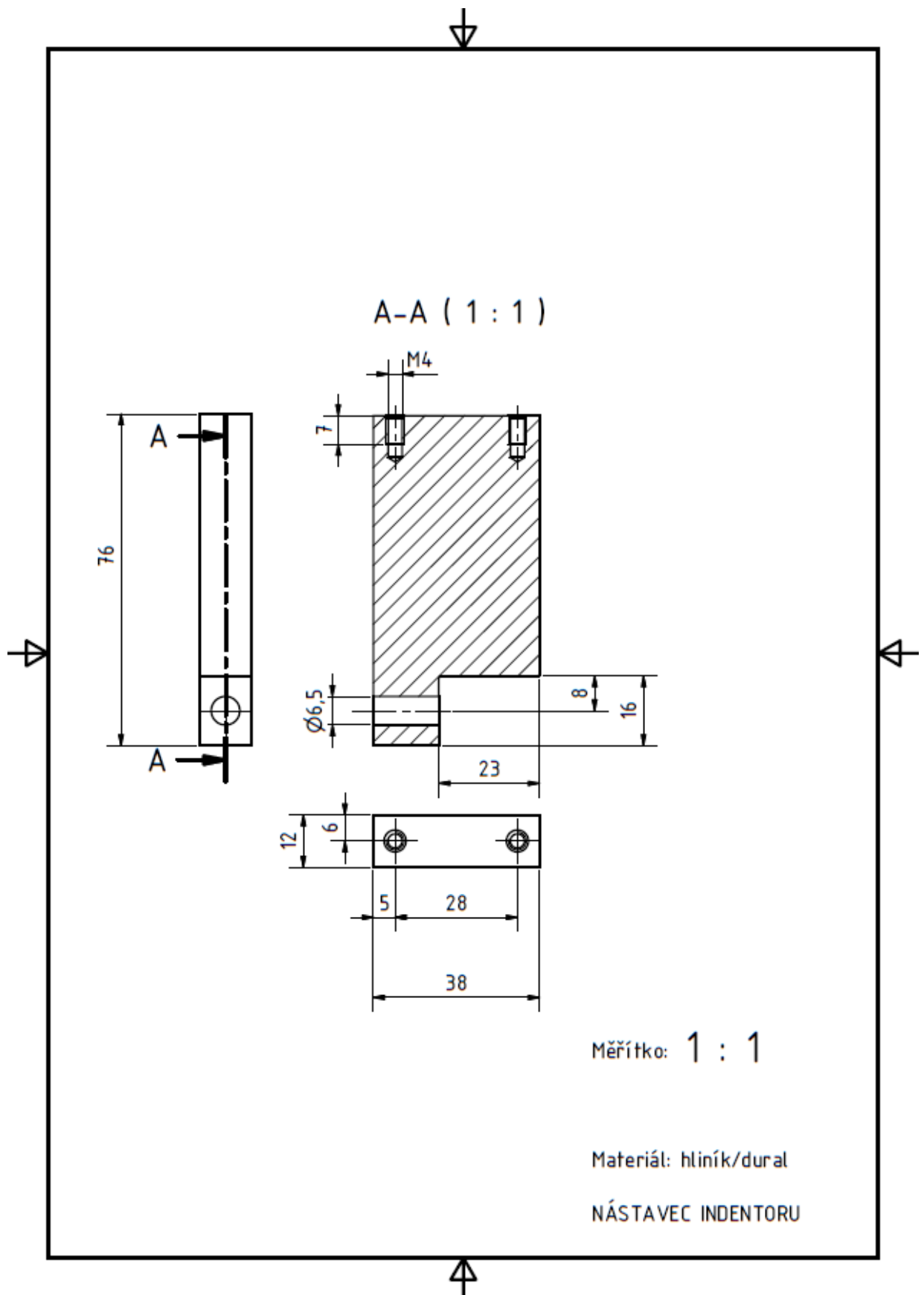
Tabulka změřených rozměrů seků upravených lopatek

	č. lopatky	Předpokládaná přibližná hloubka záseku na ostré hraně [mm]	měřené hodnoty		
			hloubka záseku	šířka záseku	ovlivněná zóna
RÁDIUS (upravená lopatka)	2/1	0,2	0,0873	0,3895	0,4158
	2/6		0,0827	0,3342	0,4092
	2/5		0,1083	0,3839	0,4089
	2/17		0,0912	0,3877	0,435
	---	∅	0,0924	0,3738	0,4172
	2/16	0,4	0,1866	0,4951	0,5659
	2/12		0,1963	0,5132	0,5735
	2/10		0,1854	0,52	0,5733
	1/20		0,2226	0,5319	0,571
	---	∅	0,1977	0,5151	0,5709
	1/4	0,7	0,4234	0,7179	0,7563
	1/6		0,385	0,6852	0,6956
	3/8		0,3332	0,6687	0,7331
	3/20		0,3232	0,65	0,6269
	---	∅	0,3662	0,6805	0,703
	2/13	1	0,5966	0,9291	0,9053
	1/8		0,6766	1,0131	0,9956
	1/2		0,6872	1,0156	1,0695
	3/7		0,5613	0,9125	0,8266
	---	∅	0,6304	0,9676	0,9493

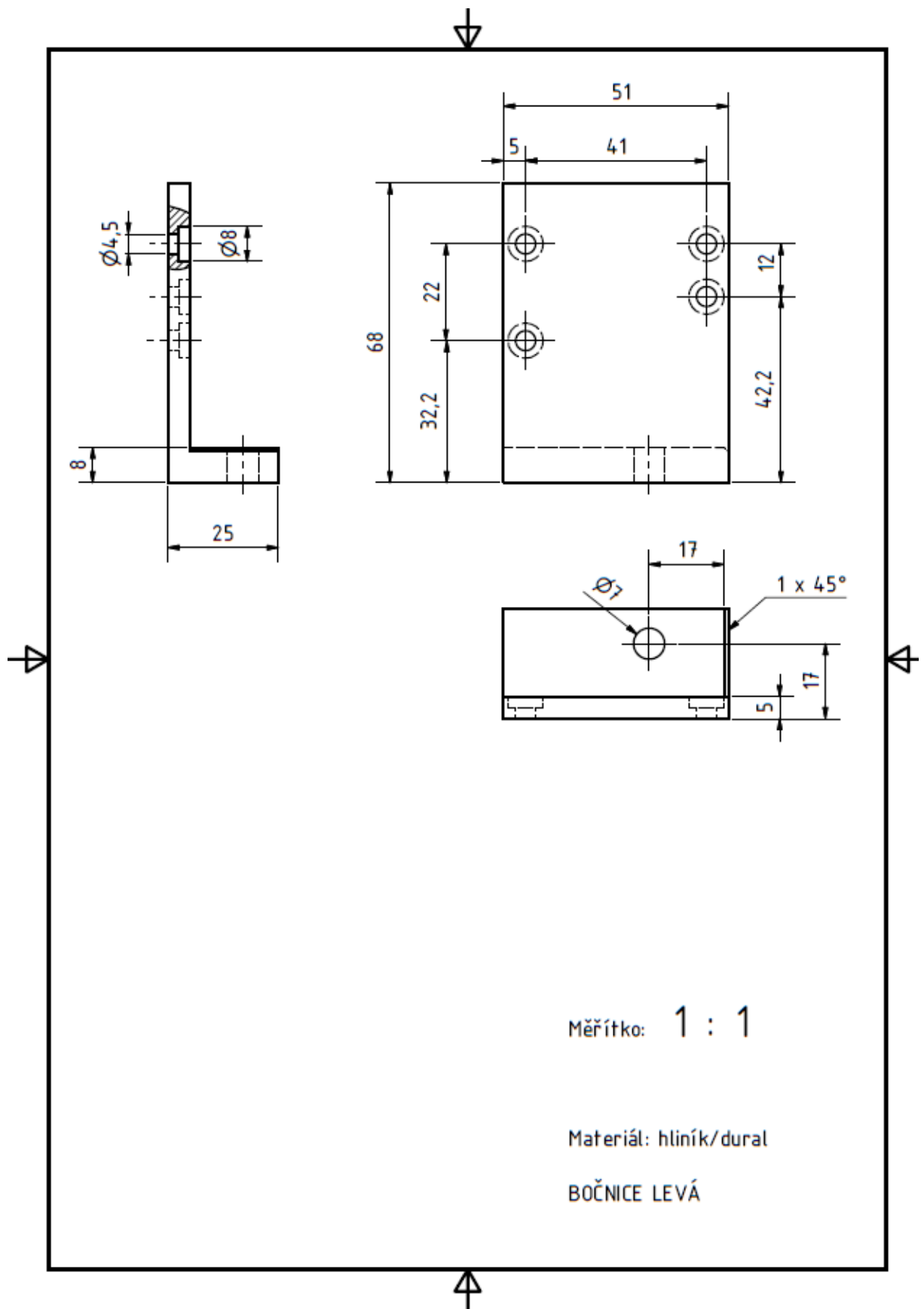
Příloha B: Výrobní výkres upínacího hranolu



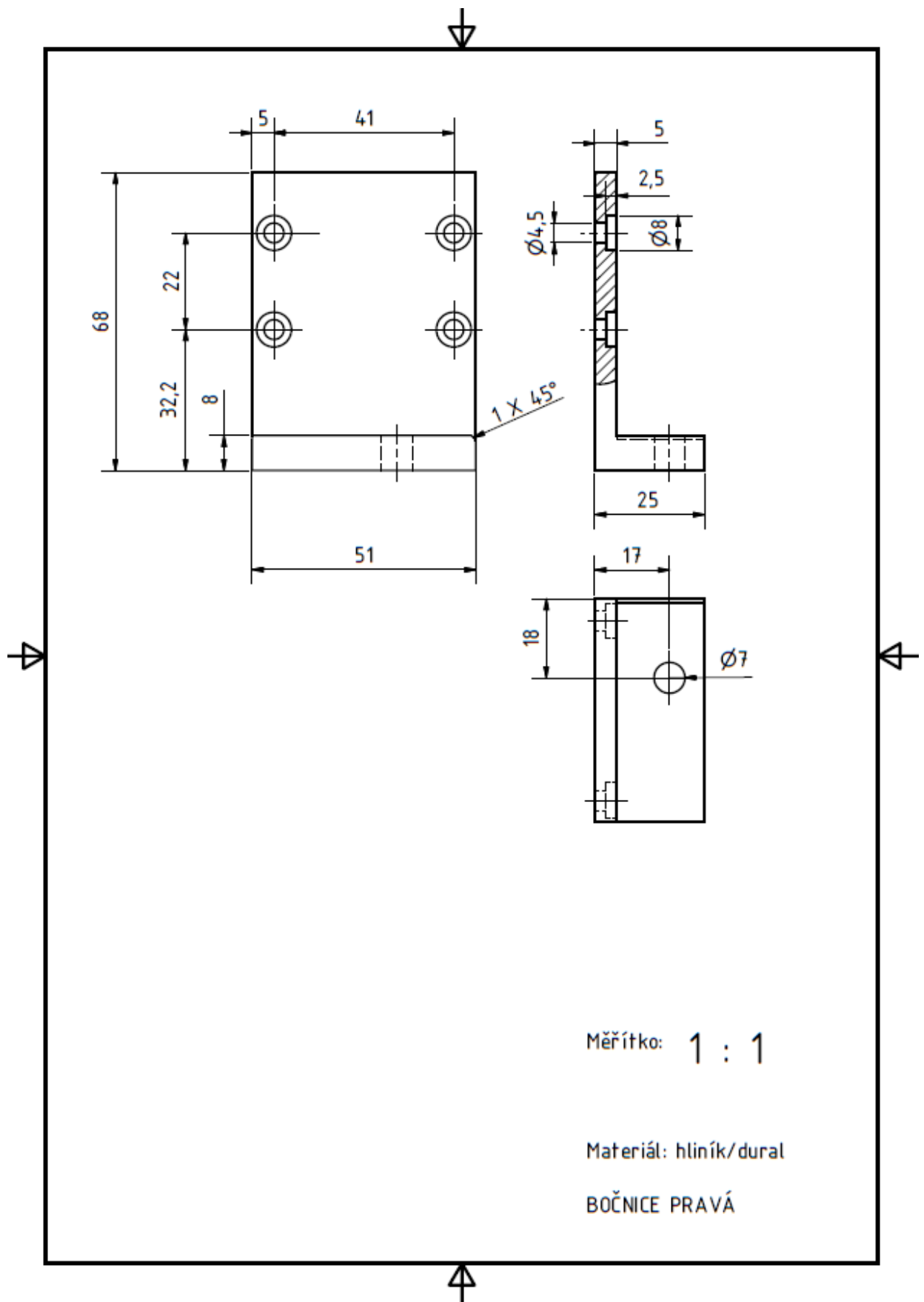
Příloha C: Výrobní výkres nástavce indentoru



Příloha D: Výrobní výkres levé bočnice



Příloha E: Výrobní výkres pravé bočnice



Příloha F: Výrobní výkres indentoru

