



ČVUT

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FAKULTA STROJNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

APLIKACE ÚZKÝCH TRYSEK PRO VYSOKOTLAKÉ TRYSKÁNÍ VODOU

APPLICATION OF NARROW NOZZLES FOR HIGH-PRESSURE WATER BLASTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR:

Author

Bc. Ondřej Lerach

VEDOUCÍ PRÁCE:

Supervisor

Ing. Jan Kudláček, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM:

Study programme

NVI Výrobní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR:

Field of study

N071TVIN Bez specializace

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lerach** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **484005**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Aplikace úzkých trysek pro vysokotlaké tryskání vodou

Název diplomové práce anglicky:

Application of narrow nozzles for high-pressure water blasting

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rozbor problematiky vysokotlakého tryskání vodou
- 2) Problematika čištění úzkých štěrbin ocelových konstrukcí
- 3) Vývoj speciálních trysek pro čištění úzkých štěrbin
- 4) Ověření vhodných trysek pro vysokotlaké tryskání úzkých štěrbin.

Seznam doporučené literatury:

ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering ISBN: 978-0-87170-384-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Kudláček, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

Ing. Jan Kudláček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Kudláčka, Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Podpis autora

Poděkování

Děkuji Ing. Janu Kudláčkovi, Ph.D. a Ing. Kláře Štumarové za cenné rady a konzultace při zpracování této práce. Dále děkuji Josefu Nádvorníkovi za pomoc s výrobou sestav. V neposlední řadě bych rád poděkoval firmě Bintana, s.r.o. za možnost využít jejich zařízení k realizaci experimentálního ověření.

Anotace

Název diplomové práce:	Aplikace úzkých trysek pro vysokotlaké tryskání vodou
Autor práce:	Bc. Ondřej Lerach
Vedoucí práce:	Ing. Jan Kudláček, Ph.D.
Akademický rok:	2022/2023
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Rozsah práce:	75 stránek, 10 tabulek, 29 obrázků
Klíčová slova:	tryskání vodním paprskem, vysokotlaké tryskání, mostní štěrbin, vývoj a výroba trysek, ocelové mostní konstrukce, nýtované konstrukce, úzké trysky

Abstrakt:

Tato práce se zabývá návrhem, výrobou a testováním trysek určených k tryskání úzkých štěrbin, především na mostních konstrukcích, pomocí vysokotlakého paprsku vody. Návrh vychází z průzkumné analýzy na mostních konstrukcích. Hlavním cílem je vytvoření tryskacích sestav, které budou efektivně odstraňovat korozní produkty a nečistoty z vnitřních prostor štěrbin. Součástí práce je i experimentální ověření na testovacích vzorcích.

Annotation

Title of the final thesis:	Application of narrow nozzles for high-pressure water blasting
Author:	Bc. Ondřej Lerach
Supervisor:	Ing. Jan Kudláček, Ph.D.
Academic year:	2022/2023
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Extent:	75 pages, 10 tables, 29 pictures
Keywords:	water jet blasting, high pressure blasting, bridge slots, nozzle development and production, steel bridge structures, riveted bridges, narrow nozzles

Abstract:

This thesis addresses the design, manufacturing, and testing of nozzles for blasting narrow crevices, primarily on bridge structures, by utilizing a high-pressure water jet. The design is informed by an exploratory analysis of bridge structures. The main objective of the design is to produce blasting assemblies that can efficiently eliminate corrosion products and debris from the interior of the crevices. The thesis includes experimental verification on test samples.

OBSAH

1	Úvod.....	9
2	Teoretická část.....	10
2.1	Problematika tryskání úzkých štěrbin	10
2.2	Předúpravy povrchu	11
2.2.1	Chemické předúpravy povrchu	12
2.2.2	Mechanické předúpravy povrchu.....	12
2.3	Tryskání	12
2.3.1	Mechanické tryskání.....	13
2.3.2	Pneumatické tryskání	14
2.3.3	Ostatní způsoby tryskání	16
2.4	Tryskání vodním paprskem	16
2.5	Trysky pro tryskání vodním paprskem	17
2.5.1	Rozdělení dle pracovního tlaku trysek	18
2.5.2	Rozdělení dle systému rozvodu kapaliny [24]:	19
2.5.3	Rozdělení dle způsobu využití:	22
2.6	Výroba děr.....	23
2.6.1	Konvenční metody.....	23
2.6.2	Nekonvenční metody	24
2.7	Standardy pro předúpravy ocelových mostních konstrukcí.....	26
2.7.1	Kvalifikační stupně stavu mostu	26
2.7.2	Životnost ocelových mostních konstrukcí a PKO.....	27
2.7.3	Stupně zarezivění	28
2.7.4	Stupně otryskání.....	29
2.7.5	Stupně kvality otryskání vodním paprskem	29

2.8	Požadavky na přípravu povrchu před nanesením PKO.....	30
3	Experimentální část	32
3.1	Úvod do experimentu	32
3.2	Průzkum mostních konstrukcí	33
3.2.1	Vybrané mostní konstrukce v České republice.....	33
3.2.2	Mostní konstrukce v zahraničí.....	33
3.2.3	Prozkoumané mostní konstrukce a jejich stav	34
3.2.4	Rozměry štěrbin vybraných konstrukcí	35
3.3	Shrnutí poznatků z průzkumné části	37
3.4	Návrh tryskací sestavy.....	38
3.4.1	Počet částí tryskací sestavy	38
3.4.2	Rozměry a tvary trysek	39
3.4.3	Umístění vývodů a jejich počet	41
3.4.4	Tvorba dlouhých děr	43
3.4.5	Těsnost tryskací sestavy	44
3.4.6	Výpočty pro zvolené varianty	45
3.5	Návrh redukční části.....	47
3.5.1	Rozměry a parametry redukční části.....	47
3.6	Materiály použité pro výrobu sestavy	49
3.7	Zkušební vzorky a tryskací zařízení.....	51
3.8	Experimentální tryskání vzorků	52
3.8.1	Tryskání pomocí trysky D14 se čtyřmi vývody.....	52
3.8.2	Tryskání pomocí trysky D8 se čtyřmi vývody.....	56
3.8.3	Tryskání pomocí trysky D14 s přímým vývodem	60
3.8.4	Tryskání pomocí trysky D8 s přímým vývodem	60
3.9	Shrnutí poznatků z experimentálního tryskání.....	61

4	Technicko-ekonomické zhodnocení.....	63
5	Závěr	65
6	Seznam použitých symbolů, zkratk a jednotek	67
7	Seznam tabulek.....	68
8	Seznam obrázků.....	69
9	Seznam příloh	70
10	Zdroje.....	71
11	Přílohy.....	76

1 ÚVOD

Mnoho mostních ocelových konstrukcí z 19. a první poloviny 20. století patří k historickému, kulturnímu a industriálnímu dědictví, které nám zanechaly předchozí generace. Tyto objekty jsou unikátní jak z pohledu konstrukce, tak z hlediska technologie, která byla využita k jejich realizaci. Drtivá většina těchto mostů byla postavena v době, kdy pro ocelové konstrukce nebylo možné využít technologii svařování. Z tohoto důvodu byla využívána technologie nýtování.

Takto staré mosty jsou ve velké míře v nevyhovujícím stavu. Pro jejich historickou a kulturní hodnotu ale není možné, ani žádoucí, všechny zbořit a postavit nové. Původní konstrukce nebyly navrženy pro snadnou údržbu a výměnu protikorozní ochrany, což vede k hledání nových způsobů a postupů umožňující staré, stále sloužící mosty opravovat, renovovat do vyhovující podoby a předejít tak jejich zkáze.

Na mnoha těchto mostech se nacházejí štěrby, které byly vytvořeny technologickým postupem výroby. Tyto štěrby mají různé velikosti, ať už do šířky, tak do délky. Vzhledem k jejich úzkému prostoru je velmi obtížné provádět údržbu nebo výměnu protikorozní ochrany. Některé jsou velice malé, snadno do nich proniká voda a usazují se zde různé nečistoty, které narušují soudržnost protikorozní ochrany a následně urychlují korozní napadení konstrukce.

Základním parametrem pro tvorbu nové protikorozní ochrany je důkladné odstranění všech nečistot, mastnot, korozního napadení a zbytků původní protikorozní ochrany z celé konstrukce, včetně zmíněných štěrbin. V současnosti se za tímto účelem využívá technologie tryskání abrazivem nebo vysokotlakým proudem vody. Tyto technologie představují účinný způsob jak předupravit povrch téměř celé konstrukce. Nicméně, i s těmito technologiemi se nacházejí místa, kde běžně dostupné nástroje nedokážou dostatečně povrch předupravit. Na trhu dostupné trysky v současné době nejsou schopny kvalitně otryskat vnitřní plochy úzkých štěrbin.

Cílem této práce je vyvinout, vyrobit a ověřit nové typy vysokotlakých tryskacích sestav určených k aplikaci do úzkých štěrbin hlavně mostních konstrukcí. Hlavním kvalitativním parametrem je schopnost odstranit korozní produkty a nátěrové systémy na stupeň otryskání Wa 2½.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Problematika tryskání úzkých štěrbin

Mnoho mostních ocelových konstrukcí příhradového typu nacházejících se na našem území bylo vytvořeno v letech 1850-1960. Povětšinou se jedná o architektonické památky nebo industriální dědictví. Na mnoha těchto konstrukcích se nachází podobný konstrukční problém – štěrbin, které byly tvořeny dřívějšími technologickými postupy nýtovaných konstrukcí. Štěrbin jsou dvojího typu, a to průchozí a neprůchozí. Jejich délky se liší podle návrhu konstrukce. Některé jsou v řádu centimetrů, jiné procházejí celou konstrukcí. Stejně jako jejich délky, i hloubky těchto štěrbin jsou různé, nejběžněji od 5 až po 30 cm. V těchto štěrbinách se velice často usazují nečistoty, mastnoty a nežádoucí vlhkost, což následně může zapříčinit vznik korozního napadení. Jelikož se jedná o špatně dostupná místa, konvenční metody, jak pro předúpravy, tak pro nanášení nové PKO, nejsou příliš účinné a tato místa se tak stávají nežádoucími ohnisky koroze po renovaci celého zbytku konstrukce. Tento jev je znázorněn na obr. 1.



Obrázek 1: Koroze na mostní konstrukci

Pro odstranění korozních produktů, nečistot a zbytků původní PKO se v dnešní době převážně využívá pneumatické abrazivní a vysokotlaké tryskání vodním paprskem. Tryskání vodním paprskem je rychlá a velice účinná metoda, jak povrch upravit před následným vytvářením nové PKO. Komerčně dostupná zařízení ale nejsou koncipována pro tryskání do takto malých prostor. Používané vysokotlaké trysky jsou příliš velké nebo nevyhovující pro zajištění dostatečného tryskacího efektu [1].

Většina mostních konstrukcí spadajících do této kategorie byla postavena v druhé polovině 19. až první polovině 20. století. Mají tudíž určitou historickou hodnotu a je nutné na ně brát zvláštní zřetel. Z literatury a dostupných zdrojů vyplývá, že mnoho mostů, bylo opatřeno základním nátěrovým systémem již před montáží do jednoho celku. Tyto nátěry byly nejčastěji na bázi suříku. Díly byly následně na místě opatřeny vrchní vrstvou na bázi lněných olejů a montovány do jedné mostní konstrukce. Pro vnější přístupné části nebývá větší problém odstranit zastaralé nátěrové systémy a vytvořit zcela novou PKO. Problém ale nastává, u již zmíněných úzkých štěrbin, kde se stále nachází zbytky původních nátěrů a korozní produkty, které svým působením ohrožují pevnost a bezpečnost konstrukce [2].

2.2 Předúpravy povrchu

Pod pojmem předúpravy povrchu si lze představit soubor opatření, které je nutno provést na materiálu, před vytvořením protikorozní ochrany. Cílem předúpravy povrchu je materiál upravit tak, aby výsledná povrchová úprava splňovala požadované vlastnosti, a to s nejdelší možnou životností – jako je vzhledová a funkční stálost, dále pak optimální adheze, kryvost a korozní odolnost. Předúpravy povrchu jsou nedílnou a nejdůležitější částí technologického postupu úpravy povrchu. Pokud není předúprava provedena v požadované kvalitě, výsledná úprava nikdy nebude splňovat svůj účel s maximální životností. Pro správnou volbu předúpravy povrchu je nutné znát, pro jaký účel bude materiál používán, aby nedošlo k jeho poškození nebo k vytvoření některého z negativních vlivů [3] [4].

Je zapotřebí počítat i s negativními vlivy, které se mohou objevit v průběhu předúprav, jako například poškození materiálu vodíkem a s tím spojené zkřehnutí. Dále také teplotní změny materiálu, které mohou vyvolat například deformace a změny mechanických vlastností, vnitřní pnutí, které může vést až ke vzniku nežádoucích trhlin. Je třeba dbát i na důkladné

očištění materiálu po předúpravě povrchu. Voda, soli, chemikálie nebo abrazivní částice mohou na povrchu součásti zůstat a mohou vést ke koroznímu napadení [3] [5].

Nečistoty, které se nacházejí na materiálu, se běžně rozdělují na nečistoty vlastní a cizí. Cizí, nebo také ulpěné, nečistoty ulpívají na materiálu pomocí adhezních sil. Jedná se především o prachové a kovové částice, mastnoty, oleje, vodu, zbytky předešlých konzervačních látek, anorganické nečistoty nebo obráběcí emulze. Vlastní nečistoty jsou spojeny s povrchem chemickou vazbou. Do této skupiny se řadí okuje a rez [3] [5].

2.2.1 Chemické předúpravy povrchu

Chemické a elektrochemické předúpravy povrchů jsou procesy, které se provádějí s využitím chemických prostředků neboli činidel, jako jsou odmašťovací roztoky, kyseliny a čisticí prostředky. Nečistoty mohou být k povrchu součásti ulpěny fyzikální adsorpcí, například tukové látky. Další možnost je již zmiňovaná adheze, kam se řadí anorganické nečistoty a kovové částice. Cílem chemické a elektrochemické úpravy je tyto vrstvy narušit a odstranit tím, že činidlo reaguje s nečistotami a naruší jejich vazby s povrchem součásti. Mezi tyto technologie patří odmašťování, odrezování, leštění a moření [3] [4] [6].

2.2.2 Mechanické předúpravy povrchu

Mechanické předúpravy povrchu jsou způsoby zpracování, které nezajišťují přesné tvary a rozměry dle výkresu, ale zaměřují se na vytvoření požadované jakosti a drsnosti povrchu. Jsou určeny především k očištění povrchu od nečistot, jakou jsou okuje, rez, písek, grafit a k dosažení podmínek pro vyhovující přilnavost následných povrchových úprav. V neposlední řadě mají hlavní úlohu ve zvýšení odolnosti vůči korozi, požadovaném vzhledu a zlepšení mechanických vlastností. Mezi tyto způsoby se řadí broušení, leštění, kartáčování, omílání a tryskání. Pro účely práce je v následující kapitole popsána jen technologie tryskání [3] [4].

2.3 Tryskání

Z definice vyplývá, že se jedná o technologii opracování povrchu, při které je pomocí kinetické energie urychlován tryskací materiál a následně usměrněn a hnán proti tryskanému

předmětu. Účelem této technologie je narušení soudržnosti nečistot a základního materiálu. Za nečistoty se považují korozní produkty, staré nátěrové hmoty nebo jiné nečistoty organického a anorganického původu. Potřebnou kinetickou energii je možné získat třemi způsoby – pomocí stlačeného vzduchu, tlakové vody nebo jejich kombinací a v neposlední řadě mechanicky pomocí metacích kol [3] [4].

Pro tryskání může být použit abrazivní materiál v různých formách – zrna, kuličky, drtina, granulát nebo voda. V praxi se kombinuje i tryskání vody s pevným abrazivem. Efektivita tryskání závisí na velikosti, tvaru a hmotnosti jednotlivých druhů abraziv. Pro čištění je vhodné použití ostrých a tvrdých zrn, která rozruší soudržnost nečistot a po dopadu na povrch zanechávají hrubý, kovově čistý povrch. Naopak pokud je cílem dosažení jemného povrchu, používají se kulatá zrna, která zatlačují hrubý povrch do materiálu a zanechávají pouze mělké důlky. V takovém případě je úbytek materiálu téměř zanedbatelný. Typ zvoleného abraziva je nutné zohlednit i při výběru vhodného tryskacího zařízení [4] [6].

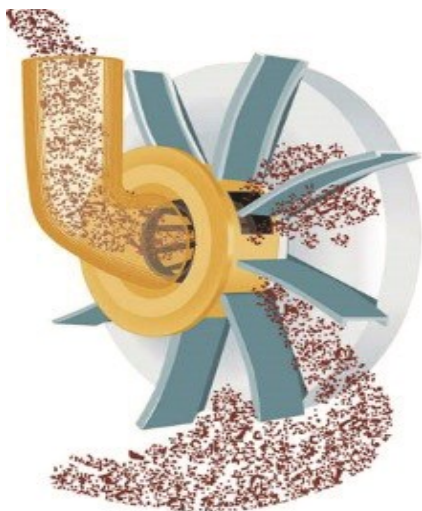
Účinnost tryskání závisí nejen na druhu abraziva a energii, s jakou dopadá na tryskaný předmět, ale také na dalších klíčových parametrech. Mezi takové patří úhel tryskání, množství abraziva a celková doba tryskání [6].

Kromě odstraňování korozních produktů a nečistot se tryskání využívá také pro sjednocení povrchu po předchozích operacích, sražení hran a vytvoření optimálních podmínek pro následné zpracování. Jde tedy o univerzální metodu, která nachází uplatnění v mnoha oblastech průmyslu. Existují dvě základní metody technologie tryskání – mechanické a pneumatické [6].

2.3.1 Mechanické tryskání

Mechanické tryskání, konkrétně tryskání pomocí metacích kol (*wheel blasting*), využívá metání abraziva pomocí kinetické energie, která je přenášena lopatkami oběžného kola spojeného s elektromotorem v uzavřené komoře neboli tryskači. Tryskací abrazivo je nejčastěji přiváděno středem metací jednotky. Samotná jednotka (metací kolo) je složena z radiálně uložených lopatek mezi dvěma vymezujícími disky. Výsledná rychlost dosahuje až $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a je dána součtem odstředivé a obvodové rychlosti. Stopa metací jednotky má většinou eliptický tvar. Aby byl proces co možná nejefektivnější, některá tryskací zařízení

se skládají z více metacích kol pro maximální plošnou účinnost. Kola jsou nastavena a přizpůsobena tak, aby byl díl otryskán ze všech stran a ze všech úhlů na požadovanou čistotu a drsnost [3] [7] [6].



Obrázek 2: Princip metacích kola [62]

Tento způsob tryskání je několikanásobně výkonnější a hospodárnější než tryskání pomocí stlačeného vzduchu. Nevýhodou je nedokonalé řízení směru tryskaného paprsku, opotřebení lopatek metacích kol, omezené velikosti tryskacích zařízení a vyšší pořizovací náklady. Z důvodu vysokých pořizovacích nákladů se tryskání pomocí metacích kol využívá ve velkovýrobách, kde se náklady kompenzují vysokou výkonností [3] [7].

Tryskací zařízení se vyrábějí ve velkém rozsahu výkonů od desítek až po stovky kW. Jsou navrhovány dle specifických požadavků na tryskané materiály. Nejčastěji se jedná o tryskací zařízení průběžná, komorová, stolová, bubnová nebo závěsná [3] [8].

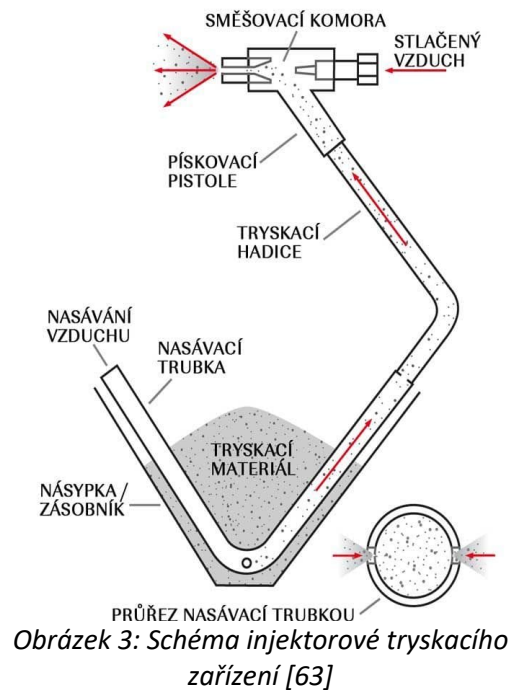
2.3.2 Pneumatické tryskání

V technické praxi se nejčastěji dělí pneumatické tryskání na následující druhy:

- injektorové tryskání
- tlakové tryskání
- tryskání zvlhčeným abrazivem

2.3.2.1 Injektorové tryskání

Injektorové tryskání je založeno na principu nasávání abraziva podtlakem vytvořeným ze stlačeného vzduchu. Prouděním vytváří stlačený vzduch podtlak a do něj je přiváděn abrazivní prostředek. Výsledná směs je poté tryskána na materiál pomocí tryskací pistole [9] [10].



Tento způsob umožňuje účinné odstraňování rzi, okují a dalšího znečištění. Křemičitý písek, kovové střepy a další materiály jsou hojně využívány jako tryskací prostředek [9].

Výhodou injektorového tryskání je vysoká účinnost a rychlost práce oproti kartáčování a broušení. Další výhodou je přesné řízení proudu abraziva v případě ručních tryskacích boxů. Nelze ovšem využít těžká abraziva, jelikož stlačený vzduch je nemůže efektivně přenášet. Nevýhodou metody jsou zvýšená bezpečnostní rizika, jelikož je nutné používat ochranné pomůcky, aby nedošlo

k poškození očí a kůže, a zamezit vdechnutí jemných prachových částic, které mohou způsobit poškození plic. Pokud není zvoleno vhodné abrazivo, nebo je nesprávně zvolena délka tryskání, může dojít až k poškození povrchu materiálu [9] [11].

2.3.2.2 Tlakové tryskání

Metoda využívá tlaku vzduchu, který je hnán do zásobníku abraziva a mísí tak abrazivo s hlavním proudem vzduchu pod tlakem. Výsledná směs je pak tryskána proti tryskanému materiálu. Tento způsob umožňuje využití těžších abraziv oproti injektorovým tryskacím zařízením, např. ocelová a litinová drť, korund nebo balotina. Použití těžších abraziv může mít destruktivní účinky na drobnější díly. Hlavní výhodou tlakového tryskání je vysoká účinnost a rychlost tryskacího procesu [9] [11].

2.3.2.3 Tryskání zvlhčeným abrazivem

Tryskání zvlhčeným abrazivem (*wet abrasive blasting*) je metoda, která kombinuje tlakové tryskání s přidáním vody nebo jiného mokrého média, které slouží k redukci prašnosti a zlepšení výkonu tryskání. Jako médium může být využita voda, olej nebo speciální směs s požadovanými vlastnostmi, které doprovázejí a napomáhají čištění a přípravě povrchu [12].

Výhodou této metody je kromě vysoké efektivity také snížení prašnosti, a tím pádem odpadá nutnost využití ochranných tryskacích boxů. Mokrém médiem udržuje teplotu povrchu, nedochází tak k jeho zahřívání a následnému možnému tepelnému poškození součásti. Nevýhodou je vysoká spotřeba mokrého média a s tím spojené náklady na údržbu a odvod odpadní vody. Některá média na bázi vody mohou reagovat s materiálem tryskané části a podněcovat vznik negativních vlivů [11] [12].

2.3.3 Ostatní způsoby tryskání

- tryskání suchým ledem
- tryskání vodním paprskem

2.3.3.1 Tryskání suchým ledem

Metoda, také nazývaná kryogenní tryskání, využívá malé kousky suchého ledu (tzv. pelety), jenž vlivem atmosférické teploty mění pevné skupenství na plynné. Pro realizaci se využívají zařízení, která mění suchý led na pelety a následně je za pomoci stlačeného vzduchu tryskají proti materiálu. Částičky suchého ledu narážejí na nečistoty, ochlazují je a tím dochází k jejich křehnutí – výsledkem je narušení vazeb těchto nečistot. Suchý led mezitím sublimuje a zvětšuje svůj objem explozivní reakcí, při které jsou nečistoty uvolňovány z místa přichycení k povrchu části. Po tryskání je nutné povrch vysát nebo zamést od odstraněných nečistot [13].

Hlavní výhodou této metody je její ekologičnost a neagresivita. Využití suchého ledu nevytváří žádný odpad v podobě chemikálií. Oproti tomu mezi nevýhody této metody se řadí vysoké náklady na zařízení, nutnost kvalifikovaného personálu a omezení použití pro některé materiály [13].

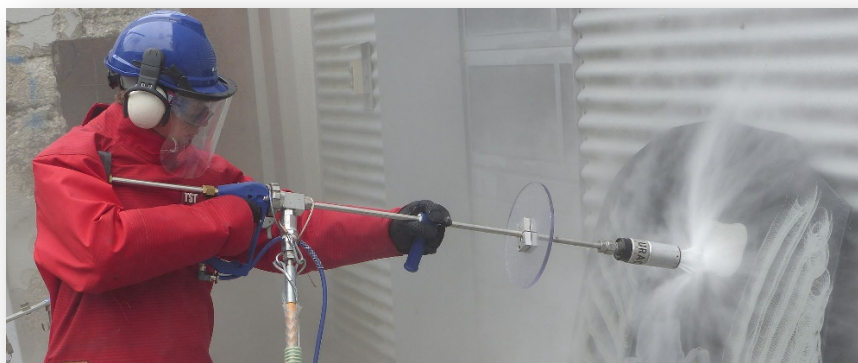
2.4 Tryskání vodním paprskem

Jedná se o technologii, při níž se využívá vysokotlaký paprsek vody pro odstranění nečistot, nánosů a korozních produktů z povrchu materiálů. Voda je stlačena pod vysokým tlakem a poté vystřikována tryskou na povrch materiálu. Dle Asociace pro technologii tryskání vodním paprskem sídlící v St. Louis, se dělí tryskání vodním paprskem do tří kategorií – tlakové

čištění (méně jak 340 bar), vysokotlaké čištění (340-2000 bar) a ultra-vysokotlaké čištění (2000 bar a více) [14] [15].

Tryskání vodním paprskem je metoda šetrná vůči životnímu prostředí, jelikož nevyužívá žádné toxické látky ani pevná abraziva, čímž minimalizuje vznik prachu. Výhodou této metody je chladicí účinek vody, který snižuje teplotní ovlivnění materiálu [15] [1] [16].

Spotřeba vody jakožto tryskacího média je vysoká a může být problémem v oblastech s omezenými zdroji. Kromě toho je nezbytně nutné zajistit kvalifikované pracovníky a ochranné pomůcky pro bezpečnou práci. Velkou nevýhodou oproti jiným metodám tryskání jsou vysoké pořizovací náklady. To znamená, že pořízení vhodného vybavení a zaškolení pracovníků může být nákladnější než klasické tryskací metody [15] [1].



Obrázek 4: Ukázka procesu tryskání vodním paprskem [17]

2.5 Trysky pro tryskání vodním paprskem

V současné době neexistuje žádná ucelená norma, která by rozdělovala nebo stanovovala požadavky na trysky pro vysokotlaké tryskání vodním paprskem. Avšak výrobci a prodejci těchto trysek rozdělují trysky dle určitých parametrů:

- podle pracovního tlaku trysek
- podle systému rozvodu kapaliny tryskou
- podle způsobu využití

2.5.1 Rozdělení dle pracovního tlaku trysek

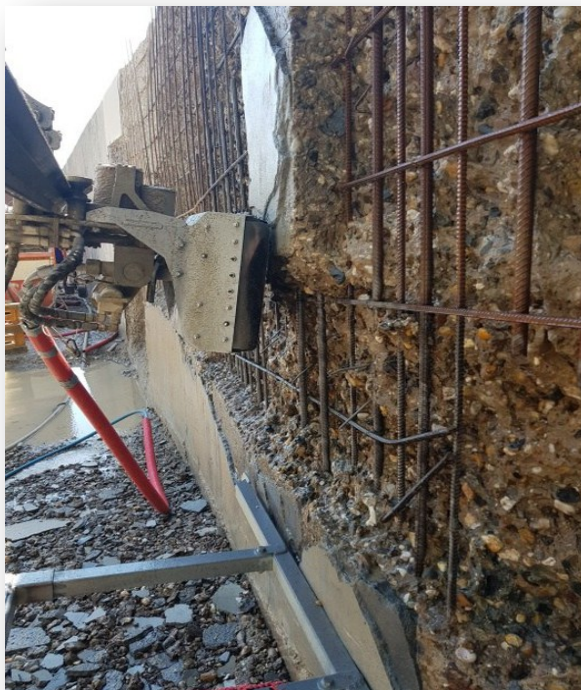
Nízkotlaké trysky do 500 bar:

Trysky pro nízkotlaké tryskání jsou většinou využívány jako čistící. Jejich úkolem je v dostatečné kvalitě očistit povrch součásti, ale nepoškodit jej. Tento typ trysek se vyrábí nejčastěji z kombinace korozivzdorné oceli a plastu. Díky nastavitelnosti některých hlavic je možné přepínat mezi různými režimy dopadu sloupce vody na tryskaný objekt. Díky tomu je možné mít pro více čistících aplikací pouze jeden typ trysky. Nejběžněji dostupné jsou trysky rotačního typu [18] [19].

Vysokotlaké trysky 500-3500 bar:

S využitím vyšších pracovních tlaků roste i potřeba po pevnějších materiálech pro výrobu a robustnější konstrukci trysky. Vysokotlaké trysky se vyrábějí z odolnějších materiálů, aby lépe odolávaly destrukci. Využívají se ušlechtilé oceli, umělé diamanty, safíry, rubíny, keramika a různé druhy karbidů. S rostoucími požadavky však roste i pořizovací cena trysek.

Účelem těchto trysek je například čištění starých nátěrů, odstranění nečistot a korozních produktů z objektů a otryskání na čistý kov. Další možností využití je hydrodemolice. Jedná se o velmi efektivní způsob odstranění například starého nevyhovujícího betonu. Pomocí vysokotlaké trysky nebo tryskací sestavy za použití specifického zařízení [20] je nežádoucí beton otryskáván až do hloubek 70 cm. Výhodou použití vysokotlakého tryskání vodou je absence otřesů a s tím spojené narušování statiky struktury [21] [22] [23].



Obrázek 5: Hydrodemolice v praxi [21]

2.5.2 Rozdělení dle systému rozvodu kapaliny [24]:

Přímé trysky:

- s plochým paprskem
- s kuželovým paprskem

Rotační trysky

- pro vnější povrchy
- pro vnitřní povrchy

Venturiho trysky

2.5.2.1 Přímé trysky

Jedná se o trysky, kde médium je tlačeno do jednoho nebo více vývodů a výchozí sloupec média má přímý směr od vývodu. Různí výrobci upravují vývody pro potřebné aplikace, aby vystupující sloupec měl tvar plochého nebo širšího kuželu. Taková změna tvaru může velice ovlivnit tryskácké parametry a tím i výsledný proces tryskání. Přímé trysky se využívají v širokém spektru aplikací dle toho, na jaký tlak jsou dimenzovány, jaké jsou jejich rozměry

a tvary vývodů. Používají se jako nízkotlaké čistící a oplachové, vysokotlaké čistící a demoliční až po ultra-vysoké řezací trysky. Trysky pro řezání vodním paprskem jsou konstruovány až do enormních pracovních tlaků více jak 3 000 bar [25] [26] [27].



Obrázek 6: Přímé trysky [28]

Největší výhodou přímých trysek je zacílení paprsku do jedné konkrétní oblasti pomocí úzce zaměřeného proudu. Úzce zaměřený proud tak velice rychle otryská danou oblast. Přímé trysky jsou nejvíce vhodné na otryskávání menších předmětů. Za nevýhodu tohoto typu trysek je považována nižší účinnost oproti Venturiho tryskám a menší efektivita při použití na velkých plochách [26] [29].

2.5.2.2 Rotační trysky

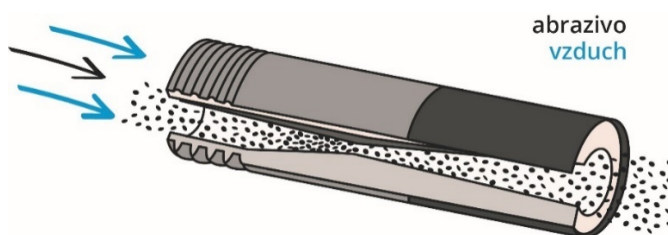
Principem fungování rotačních trysek je přeměna tlaku kapaliny, vytvořená ve vysokotlakých čerpadlech, na kinetickou energii, která nutí tryskací hlavu k rotačnímu pohybu. Tento pohyb se využívá k rozprašování kapaliny do určeného tvaru pomocí malých otvorů z trysek. Rotační pohyb lze realizovat hydraulicky, pneumaticky a mechanicky. Hydraulický způsob využívá tlaku kapaliny, zatímco pneumatický způsob využívá stlačeného vzduchu. Mechanickému způsobu slouží k vytvoření rotačního pohybu například motor a ozubené převody [19] [29].

Rotační trysky lze dělit do více kategorií, například na základě jejich konstrukce a funkce. Prodejci je běžně rozdělují dle pracovních tlaků, druhu tryskané kapaliny nebo potřebného průtoku pro různé aplikace. Další výrazná kategorie je založena na tvaru výstupního paprsku z otvoru trysky. Ten může být kulatý (dutý nebo plný), plochý, vějířovitý a mlžící. Stejně jako trysky přímé, ani rotační trysky nejsou stanoveny žádnou normou. Proto je velice důležité znát požadavky na trysku a konkrétní proces, aby bylo možné co nejpřesněji trysku vybrat [30] [31].

Rotační trysky mají několik výhod oproti tryskám přímým nebo Venturiho. Díky rotačnímu pohybu vytvářejí široce rozptýlený obrazec. Díky tomu pokrývají větší plochu než trysky přímé. Mezi nevýhody se řadí vyšší spotřeba vody a energie než u Venturiho trysek. Díky vysoké variabilitě tvarů a velikostí jsou rotační trysky všestrannější a preferovanější volbou v mnoha průmyslových a technologických procesech [31].

2.5.2.3 Venturiho trysky

Venturiho trysky jsou velice často používaným typem trysek, jejichž princip funkce je založen na Venturiho efektu. Hubice nebo trubka, kterou kapalina proudí, se v délce zužuje, což má za následek zvýšení rychlosti kapaliny kvůli zachování kontinuity a pokles statického tlaku kvůli zákonu zachování energie. Aby mohla být kapalina urychlena, musí poklesnout tlak média. Díky tomuto principu je možné docílit účinnějšího tryskacího efektu oproti tryskám přímým s relativně malou změnou konstrukce trysek. Díky použití Venturiho trysky lze snížit vstupní tlak vyvíjený tlakovým zařízením [32] [33].



Obrázek 7: Schéma Venturiho trysky [34]

2.5.3 Rozdělení dle způsobu využití:

Oplachové trysky

Využívají se k mytí a oplachování povrchu předmětů. Mohou být samostatné, nebo jako součást výrobních linek. Jejich škála využití je široká od domácností (myčky na nádobí) až po využití v průmyslu (oplachy před a po technologických procesech) [35].

Čistící trysky

Slouží k odstranění různých druhů nečistot, nánosů a korozních produktů z povrchu součásti [27].

Trubkové trysky

Jak z názvu vyplývá, mají trubkový tvar a využívají se v omezených prostorech, kam se ostatní druhy trysek dostávají jen velice obtížně. Vytvářejí úzký, soustředěný proud vody, který i v těsných oblastech dokáže spolehlivě odstraňovat nečistoty. Velkou výhodou trubkových trysek jsou nízké pořizovací náklady [31] [36].



Obrázek 8: Trubkové trysky [37]

Demoliční trysky

Demoliční trysky jsou výborný způsob, jak odstraňovat tvrdý materiál jako je beton nebo kámen bez nežádoucích vibrací, která způsobují mechanická bourací kladiva. Používají se například pro opravy mostů, silnic i budov. Více detailů o demoličních tryskách je uvedeno v kapitole 7 [23].

Abrazivní trysky

Využívají se v kombinaci média s přidaným abrazivem jako je například křemičitý písek. Díky tomu lze zlepšit řezné podmínky v případě řezání vodním paprskem [38].

2.6 Výroba děr

Vrtání je technologická operace, při které dochází k vytváření vnitřních rotačních ploch do plného materiálu, ať už pohybem nástroje (vrtáku), popřípadě obrobku, nebo za využití fyzikálních nebo fyzikálně chemických principů. Řadí se sem výroba děr průchozích i neprůchozích (slepých). Výrobu děr lze rozdělit z hlediska konvenčního nebo nekonvenčního způsobu výroby [39].

2.6.1 Konvenční metody

Do konvenčních metod se řadí všechny druhy třískového obrábění, kde se využívá nástroj s definovanou geometrií. Do této kategorie spadají vrtáky, záhlubníky, výstružníky, frézy, vrtáky s vyměnitelnou řeznou částí, nástroje pro termální vrtání, odstupňované vrtáky a vyvrtávací tyče. V technické praxi existuje široká škála vrtáků. Pro účely této diplomové práce budou podrobněji rozebrány pouze vrtáky kopinaté, šroubovité a dělové. Konvenční metody nabízejí mnohé výhody oproti nekonvenčním způsobům jako je vysoká dostupnost, jednoduchost, spolehlivost a v neposlední řadě také vysoká míra produktivity [39] [40].

2.6.1.1 Kopinaté vrtáky

Tento druh vrtáku se vyznačuje vysokou tuhostí. Využívá se pro vrtání děr o průměru 10-120 mm. Pro kopinaté vrtáky je poměr vrtání $L = 3 \cdot D$. Nejvíce zastoupené jsou kopinaté nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami z rychlořezné oceli nebo slinutého karbidu. Nevýhodou může být vyšší drsnost vyvrtané díry oproti díře vrtané šroubovitým vrtákem [39].

2.6.1.2 Šroubovité vrtáky

Nejvíce zastoupený nástroj pro výrobu otvorů a děr je šroubový vrták. Nejběžnější variantou je dvoubřitý nástroj opatřený šroubovitými drážkami, které zajišťují odvod třísky a procesní kapaliny z místa řezu. Vícebřité nástroje se využívají pro vrtání přesnějších otvorů a jednobřité nástroje nejběžněji slouží pro vrtání hlubších děr nebo otvorů [39] [41].

2.6.1.3 Dělové a hlavňové vrtáky

Tento typ vrtáku se nejčastěji využívá pro technologie vrtání hlubokých otvorů, kde je poměr vrtání $D/L > 1/10$. Před použitím je však nutné, aby byla část díry předvrtána a nástroj tak byl snáze veden. Aby tyto nástroje dokázaly vyvrtat hluboké otvory, pracují přerušovaně z důvodu geometrie nástroje, která nezaručuje patřičný odvod třísky. Přerušování přichází po odvrtání určité hloubky díry, kdy je třeba nástroj vytáhnout a očistit jej od třísky, poté operace pokračuje. Hlavňové vrtáky slouží pro vrtání přesných otvorů. Nevýhodou tohoto vrtáku je potřeba speciálně modifikovaného zařízení [39] [42] [40].

2.6.2 Nekonvenční metody

Na rozdíl od metod konvenčních, nekonvenční metody obrábění, dále jen NMO, nevyužívají klasické běžně definované nástroje pro mechanický úběr materiálu. NMO využívají k úběru fyzikální nebo fyzikálně-chemické principy. Chemické obrábění využívá pracovní prostředí, například $FeCl_3$, $NaOH$, H_2SO_4 a další, jako nástroj pro úběr materiálu.

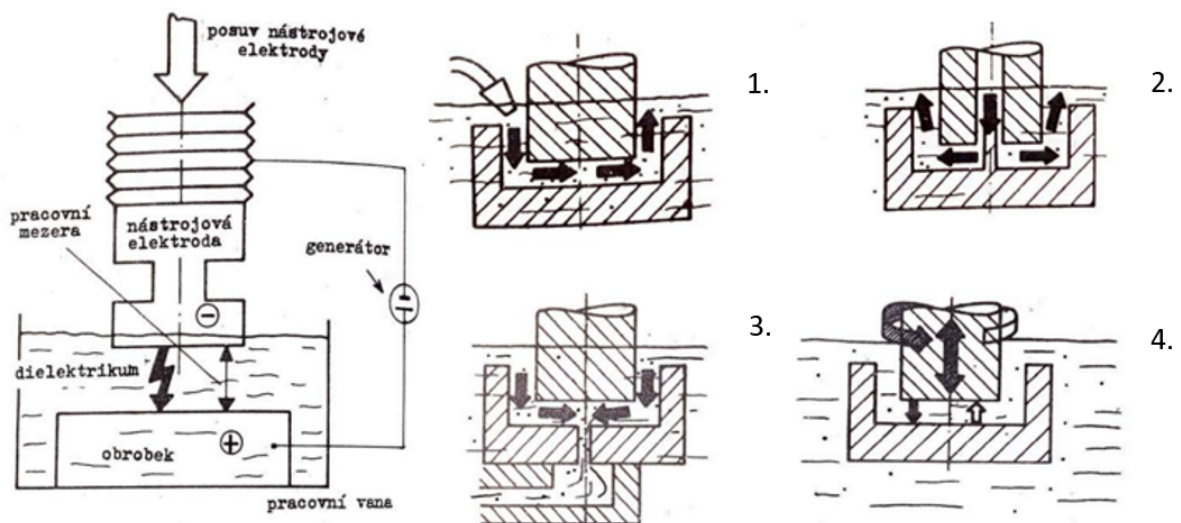
Přestože dostupnost NMO je nižší oproti konvenčním metodám, tyto technologie mají nezastupitelné místo v průmyslu kvůli svým specifickým výhodám. Mezi ty patří rozměrová a konstrukční variabilita při vytváření obrobků a snadnější tvorba otvorů do křehkých i vysoce pevných materiálů [43].

Mezi nejčastěji využívané NMO patří elektroerozivní hloubení a vrtání, dále pak vrtání laserovým paprskem a obrábění vodním paprskem. Pro účely této práce bude podrobněji rozepsána pouze metoda elektroerozivního obrábění a vrtání [43].

2.6.2.1 Elektroerozivní obrábění (EDM)

EDM je způsob obrábění, kdy se bezkontaktně elektro-tepelným způsobem ubírá materiál. Tento jev se nazývá elektroeroze materiálu. Aby mohla být uskutečněna, musí být obráběný materiál elektricky vodivý. Obrobek, v tomto případě zapojen jako kladná elektroda, je ponořen do pracovní vany, ve které se nachází kapalina s vysokým elektrickým odporem (tzv. dielektrikum). Následně je přivedena záporná (nástrojová) elektroda. Po přívodu elektrického napětí dochází mezi elektrodami v dostatečné vzdálenosti k výbojům, které vyvolávají tavení a odpařování materiálu z obráběné elektrody, tedy obrobku. Výboj vzniká vždy v místě největšího elektrického napěťového pole. Klíčovými parametry jsou vzdálenosti elektrod, materiál elektrody, vodivostní vlastnosti dielektrika, dále jeho viskozita, smáčivost a ekologická nezávadnost. Důležitá je také vhodná cirkulace média a jeho znečištění [43] [44].

Pro přívod a odvod dielektrika je možné využít různé druhy uspořádání. Vnější vyplachování je velice běžný způsob, ale pro obrábění hlubších dutin je nutné zařadit přerušované vyplachování. Tento způsob je zobrazen na obr. 9. pod označením 1. Dalšími způsoby jsou vnitřní tlakové vyplachování (označení 2) a odsávání (označení 3). Nejvíce zastoupenou metodou vyplachování je metoda pulsní. Při obrábění se elektroda vzdaluje a přibližuje, čímž dochází k proudění dielektrika do místa obrábění a výplachu znečištěného dielektrika. Tento způsob je znázorněn pod označením 4 [43].



Obrázek 9: Princip EDM obrábění (vlevo) a způsoby přívodu dielektrika (vpravo) [43]

Výhodou metody je skutečnost, že se jedná o bezsilové obrábění, které nezpůsobuje mechanické zpevnění. Vzniká zde pouze minimální tepelné zatížení v řádu setin až po jednotky milimetrů od povrchu (závisí na použité metodě a intenzitě úběru). Mezi nevýhody této metody patří nutnost přerušování procesu, aby proběhla výměna dielektrika v dutině otvoru, příp. zvolit jiný způsob odvodu dielektrika. V neposlední řadě jsou to také vysoké pořizovací náklady na elektrodu oproti konvenčním metodám [43] [44].

2.6.2.2 Elektroerozivní vrtání (EDD)

Tato technologie se stále ve velké míře využívá pro vrtání startovacích otvorů pro drátořez. Velkou míru využití zaznamenává při tvorbě malých otvorů (0,5-3 mm), které jsou konvenčními technologiemi téměř nevyrobitelné. Jelikož se opět jedná o bezkontaktní metodu výroby, je nutné elektrody ve formě trubiček opatřit vnitřními kanálky, které do místa obrábění přivádějí dielektrikum. Elektroda je upnuta do vedení vrtacího zařízení a při konstantním otáčení a proudění dielektrika (50–100 kg·cm²) je prováděno vyjiskření otvoru. V technické praxi se nejvíce využívají dva hlavní materiály pro tvorbu vrtacích elektrod. Jedná se o mosaz a měď [45] [46] [44].

Oproti konvenčním metodám má tato technologie nevýhodu v obtížnějším nastavení procesu. Jelikož nedochází ke kontaktu elektrody s obrobkem, musí být ze zkušenosti nebo experimentálně určeny podmínky vrtání. Nejedná se tedy jen o průměr trubičky, ale i procházející proud [45] [46].

2.7 Standardy pro předúpravy ocelových mostních konstrukcí

2.7.1 Kvalifikační stupně stavu mostu

Mostní konstrukce je nutné dle zákona č. 13/1997 Sb. zákona o pozemních komunikacích, pravidelně kontrolovat a udržovat je v požadovaném stavu. Norma ČSN 73 6221 určuje oblasti kontroly stavebně-technického charakteru stavu mostních konstrukcí pozemních komunikací (dálnic, silnic, místních i účelových komunikací) [47] [48].

Mostní konstrukce jsou děleny dle klasifikačních stupňů, které se odvozují od jejich stavu. Tyto stupně jsou znázorněny v tab. 1. K určení klasifikačního stupně dané konstrukce je zapotřebí odborně způsobilá osoba s odpovídajícím vzděláním, praxí a řádným

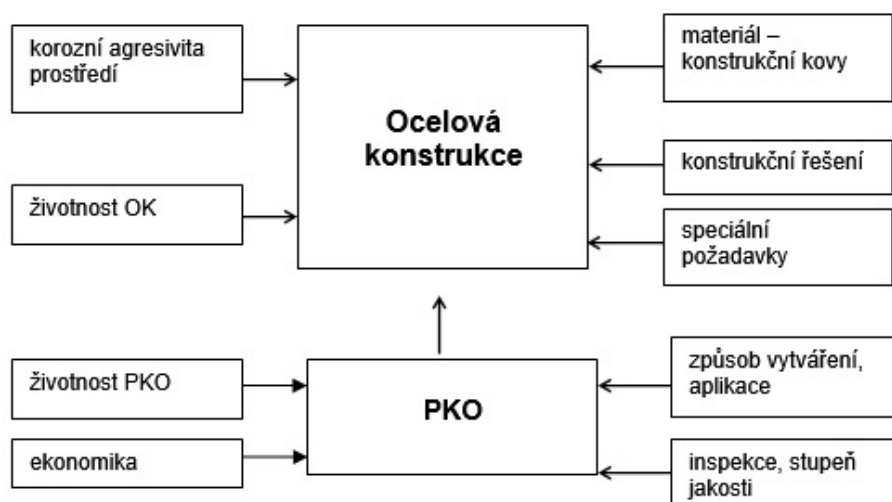
vybavením k vykonání prohlídky. Provádění běžných, hlavních a mimořádných prohlídek zajišťuje vlastník nebo určený správce mostu u odborně způsobilé osoby [48].

Tabulka 1: Kvalifikační stupně stavu mostních konstrukcí [48]

Kvalifikační stupeň stavu	Stav konstrukce
1 (I)	bezvadný
2 (II)	velmi dobrý
3 (III)	dobrý
4 (IV)	uspokojivý
5 (V)	špatný
6 (VI)	velmi špatný
7 (VII)	havarijní

2.7.2 Životnost ocelových mostních konstrukcí a PKO

Při plánování nové PKO je důležité brát v potaz několik faktorů, které se navzájem protínají a ovlivňují. Před uvažováním, jakou PKO zvolit, je nutné provést analýzu stavu ocelové konstrukce. Je třeba identifikovat materiály, ze kterých je konstrukce tvořena. Konstruktivní řešení je dalším významným faktorem. Pomocí správného konstruktivního řešení lze mnohdy zvýšit životnost konstrukce až o celé roky. Je klíčové znát požadovanou životnost konstrukce a v jakém korozním prostředí se nachází. Teprve na základě těchto faktorů lze správně navrhovat PKO. Proces je znázorněn na obr. 10 [49].



Obrázek 10: Postup navrhování PKO [49]

Životnost PKO se volí v závislosti na požadované délce životnosti konstrukce. Kategorie jsou znázorněny v tab. 2. Mosty se řadí do 5. kategorie a jejich návrhová životnost přesahuje 100 let [49].

Tabulka 2: Návrhová životnost konstrukcí [49]

Kategorie návrhové životnosti	Informativní návrhová životnost (roky)	Příklady konstrukcí
1	10	dočasné konstrukce
2	10–25	vyměnitelné konstrukční části, jeřábové nosníky, ložiska
3	15–30	zemědělské a obdobné stavby
4	50	budovy a další běžné stavby
5	100	monumentální stavby, mosty a jiné inženýrské konstrukce

Nátěrové systémy nejsou schopné bez údržby účinně chránit konstrukci po tak dlouhou dobu. Z tohoto důvodu je nutné tyto systémy kontrolovat, udržovat, opravovat a v případě potřeby i obnovit. Životností se rozumí doba fungování do první obnovy. Životnost nátěrových systémů je vyjádřena dle normy ČSN EN ISO 12944-1 ve čtyřech rozmezích [50]:

- nízká (**Low**) – méně než 7 let
- střední (**Medium**) - 7-15 let
- vysoká (**High**) – 15-25 let
- velmi vysoká (**Very High**) – více než 25 let

2.7.3 Stupně zarezivění

Stupně čistoty povrchu jsou definovány normou ČSN EN ISO 8501-1 „*Příprava ocelových povrchů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků*“. Pro správné určení čistoty povrchu po otryskání je důležité znát touto normou stanovené stupně zarezavění materiálů. Ty se vyhodnocují vizuálně a jsou rozděleny do 4 skupin [51]:

- **A** - „*Povrch oceli je z velké části pokryt přilnavou vrstvou okují, ale téměř bez rzi.*“
- **B** - „*Na povrchu oceli se začala tvořit rez a z povrchu se začaly odlupovat okuje.*“
- **C** - „*Povrch oceli, ze kterého odkorodovaly okuje nebo ze kterého je lze oškrabat, a který vykazuje mírnou korozi prostým okem.*“

- **D** - „Povrch oceli, ze kterého odkorodovaly okraje, a který vykazuje celkovou rovnoměrnou důlkovou korozi (pitting) viditelnou prostým okem.“

2.7.4 Stupně otryskání

Stupně přípravy povrchu dosažené tryskáním před nanesením nátěrových hmot stanovuje norma ČSN EN ISO 8501-2. Hodnocení je určeno na základě slovního popisu a porovnání s reprezentativní fotografií [52].

- Sa 1 (lehké otryskání) - „Při prohlížení bez zvětšení musí být povrch prostý viditelných olejů, mastnoty a nečistot, málo přilnavých okují, rzi, nátěrů a cizích látek.“ [52]
- Sa 2 (důkladné otryskání) - „Při prohlížení bez zvětšení musí být povrch prostý viditelných olejů, mastnoty a nečistot, bez většiny okují, rzi, nátěrů a cizích látek. Všechny zbylé nečistoty musí být pevně přilnavé.“ [52]
- Sa 2½ (velmi důkladné otryskání) - „Při prohlížení bez zvětšení musí být povrch prostý viditelných olejů, mastnoty a nečistot, okují, rzi, nátěrů a cizích látek. Všechny zbylé stopy nečistot musí vykazovat pouze lehké zabarvení ve formě skvrn nebo pruhů.“ [52]
- Sa 3 (otryskání až na vizuálně čistý ocelový povrch) - „Při prohlížení bez zvětšení musí být povrch prostý viditelných olejů, mastnoty a nečistot, okují, rzi, nátěrů a cizích látek. Povrch musí mít jednotný kovový vzhled.“ [52]

2.7.5 Stupně kvality otryskání vodním paprskem

Kvalitu otryskání vodním paprskem upravuje norma ČSN EN ISO 8501-4. Tou je určeno pět výchozích stavů povrchu podle stupně zarezivění. Kvalita očištění je určena slovním popisem a reprezentativními fotografiemi a je rozdělena do čtyř stupňů [53].

- Wa 1 (lehké otryskání paprskem o vysokém tlaku) - „Při prohlídce bez zvětšení musí být povrch bez viditelných stop oleje a mastnot, nepřilnavých nebo poškozených nátěrů, nepřilnavé rzi a ostatních cizích látek. Všechny zbytky nečistot musí být rozptýleny náhodně a pevně přilnavé.“ [53]

- Wa 2 (důkladné otryskání paprskem o vysokém tlaku) - „Při prohlídce bez zvětšení musí být povrch bez viditelných stop oleje a mastnot a nečistot a většiny rzi, předchozích nátěrů a ostatních cizích látek. Všechny zbytky znečištění musí být rozptýleny náhodně a mohou obsahovat pevně přilnavé povlaky, pevně přilnavé cizí látky a stíny po dřívě se vyskytující rzi.“ [53]
- Wa 2½ (velmi důkladné otryskání paprskem o vysokém tlaku) - „Při prohlídce bez zvětšení musí být povrch bez viditelných stop koroze, oleje, mastnot, nečistot, předchozích nátěrů a, kromě lehkých stop, bez všech cizích látek. Pokud byl původní nátěr neporušen, může povrch vykazovat barevné změny. Šedé nebo hnědočerné zbarvení pozorované v místech důlkové koroze nebo zkorodované oceli nemůže být dalším otryskáním vodou odstraněno.“ [53]
- Wa 3 (otryskání vodou na holý podklad) – „Nesmí být vidět žádná předchozí rez, mastnota, olej, žádné cizí látky nebo předchozí nátěry. Ocelový povrch může mít stejnoměrný vzhled, ale není to podmínkou. Přípustná je také změna odstínu povrchu, jestliže je původní nátěr neporušen.“ [53]

2.8 Požadavky na přípravu povrchu před nanesením PKO

Než je možné začít samotnou přípravu povrchu, je nutné provést jeho důkladné omytí a odmaštění. Tento proces je prováděn např. vodním paprskem, do kterého jsou přidávány ekologicky šetrné a odbouratelné detergenty. Rozsah čištění nebo nadstandardní požadavky se určují z výsledků korozního průzkumu dané konstrukce [2].

Požadavky na opravu, částečnou obnovu nebo pro případy úplné obnovy stávající PKO jsou voleny dle použitého typu přípravy povrchu. Jedná se o přípravu suchým abrazivním tryskáním a využití vysokotlakého tryskání vodou [2]:

Oprava, částečná obnova PKO [2] [54]:

- Požadován stupeň přípravy povrchu na P Sa 2 ½. Pokud se na konstrukci nachází důlková koroze, znečištění chloridy nebo jejich kombinace je třeba posoudit, zda suchým abrazivním tryskáním nedojde k uzavření solí ve zmíněných důlcích.

- Na plochách, kde nedošlo k výraznému vlivu prorezivění je požadován stupeň otryskání Wa 1. Pokud se na plochách nachází výrazné prorezivění, je požadováno otryskání Wa 2 ½.

Úplná obnova stávající PKO [2]:

- U suchého abrazivního tryskání pro kovové povlaky s žárovým nástřikem kovu je požadován stupeň přípravy Sa 3.
- U suchého abrazivního tryskání pro nátěrové systémy je požadavek na stupeň přípravy Sa 2 ½.
- U vysokotlakého tryskání je požadován stupeň Wa 2 ½.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Úvod do experimentu

Prvním krokem v procesu pochopení problematiky úzkých štěrbin před výpočty, konstrukcí, výrobou a experimenty bylo provedení průzkumu samotných ocelových mostních konstrukcí. Bylo zjištěno mnoho aspektů, které je nutné brát v úvahu a které budou výrazně ovlivňovat vlastnosti, tvar, rozměry a vhodné použití tryskací sestavy.

Součástí experimentu byl také geografický průzkum, kolik mostních konstrukcí s danou problematikou se přibližně vyskytuje především v České republice, ale i v zahraničí. Výsledkem tohoto průzkumu je získání statistiky a určení relevance jevu. Nalezené mostní konstrukce byly podrobeny zjednodušenému průzkumu, který určil jejich stav.

Pro účely této práce by bylo velice obtížné a zdlouhavé vytvářet komplexní korozní průzkumy nalezených konstrukcí. Pro vytvoření požadovaného souboru dat proto postačí vizuální kontrola samotné konstrukce (celistvost, soudržnost, poškození), stav protikorozní ochrany – zda je nátěrový systém na mostní konstrukci ve vyhovujícím stavu, jestli není jeho funkce omezená, nebo je ve stavu nevyhovujícím. Mosty musí být dle normy ČSN 73 6221 pravidelně udržovány, proto bylo rovněž ověřeno, zda údržba probíhá a v jaké je kvalitě.

Po prozkoumání a zaznamenání stavu mostních konstrukcí byly zjištěny rozměry a délky štěrbin. Jelikož bylo zjištěno více typů a velikostí štěrbin, byly pro přehlednost vytvořeny 3 kategorie. Na základě určených kategorií vznikla idea vytvoření více tryskacích soustav, které by splňovaly požadavky pro dané skupiny štěrbin. Pro statisticky reprezentativní závěry průzkumu byla stanovena hranice prověření minimálně 15 mostních konstrukcí. Tento počet je dostačující pro následné vyhodnocení a určení základních požadavků pro navrhované tryskací sestavy.

3.2 Průzkum mostních konstrukcí

3.2.1 Vybrané mostní konstrukce v České republice

Tabulka 3: Vybrané mostní konstrukce v České republice

Pořadí	Označení mostu	Souřadnice GPS
1.	Most přes Vltavu (Miřejovice)	50.275N, 14.313E
2.	Lávka přes Cidlinu (Zbraň)	50.141N, 15.365E
3.	Most přes Chrudimku (Automatické mlýny, Pardubice)	50.040N, 15.781E
4.	Most přes Chrudimku (Zeletňák, Pardubice)	50.023N, 15.787E
5.	Most přes Labe Pardubice (most Kpt. Bartoše, Pardubice)	50.039N, 15.753E
6.	Most přes železnici (ul. Moskevská, Praha)	50.065N, 14.464E
7.	Most přes Vltavu (Vyšehradský železniční most, Praha)	50.066N, 14.413E
8.	Most přes Berounku (Černošický most, Černošice)	49.939N, 14.324E
9.	Most přes Vltavu (Vrané nad Vltavou)	49.917N, 14.377E
10.	Most přes Úpu (Vodácký most, Trutnov)	50.573N, 15.950E
11.	Most přes Úpu (Lázeňský most, Trutnov)	50.563N, 15.921E
12.	Most přes Labe (Josefov)	50.337N, 15.917E
13.	Most přes Labe (Lochenice)	50.272N, 15.827E
14.	Most přes Chrudimku (Červeňák, Pardubice)	50.020N, 15.786E
15.	Most přes Chrudimku (Chrudim)	49.962N, 15.809E

3.2.2 Mostní konstrukce v zahraničí

Mostní příhradové konstrukce se nacházejí po celém světě, konstrukce se ovšem mnohdy liší. Byl proveden průzkum v mapě 8 zemí, cílem bylo v každé zemi najít alespoň 2 typově podobné mosty. Vyhledávání bylo prováděno pomocí aplikace Google Maps (Google Alphabet Inc.), která díky obrázkům a funkci Street View umožňuje téměř dokonalou vizualizaci reálného objektu. Výsledky hledání jsou uvedeny v tab. 4.

Tabulka 4: Vybrané mostní konstrukce v zahraničí

	Země	Město	Název mostu	Souřadnice GPS
1.	Polsko	Krakov	most Marszałka Józefa Piłsudskiego	50.045N, 19.945E
		Toruň	most kolejowy im. Ernesta Malinowskiego	53.010N, 18.621E
2.	Rakousko	Innsbruck	Emile-Béthouart-Steg	47.273N, 11.395E
		Kaindorf	Eisenbahnbrücke	46.791N, 15.531E
3.	Slovensko	Komárno	Alžbetin most	47.751N, 18.120E
		Poprad	most v ulici Športová	49.060N, 20.309E
4.	Německo	Řezno	Eisenbahnbrücke über Donau	49.022N, 12.134E
		Landshut	Eisenbahnbrücke Isar Landshut	48.528N, 12.137E
5.	Francie	Paříž	Viaduc d'Austerlitz	48.843N, 2.367E
		Porte Roques	Pont de Saint-Cirq-Lapopie	44.469N, 1.683E
6.	Švýcarsko	Würenlos	Limmatbrücke	47.434N, 8.356E
		Wettingen	Limmatbrücke Baden	47.463N, 8.309E
7.	Slovinsko	Vipava	Železniški most	45.887N, 13.727E
		Lublaň	Železniški most	46.054N, 14.530E
8.	Maďarsko	Budapešť	Szabadság híd	47.486N, 19.055E
		Budapešť	Széchenyi Lánchíd	47.499N, 19.043E

3.2.3 Prozkoumané mostní konstrukce a jejich stav

Jelikož je ke správnému určení kvalifikačních stupňů zapotřebí oprávněná osoba s náležitým vzděláním, praxí a adekvátním vybavením, byly při prohlídce stupně stavu konstrukce zjednodušeny na základní 3 kategorie – stav dobrý, špatný a velmi špatný. Jedná se o zjednodušenou verzi, která interpretuje výsledky ohledání štěrbin přímo pro tuto práci. Nejedná se o celkové zhodnocení mostních konstrukcí. Výsledky průzkumu jsou zaznamenány v tab. 5.

Tabulka 5: Stav vybraných mostních konstrukcí

	Označení mostu	Stav konstrukce
1.	Most přes Vltavu (Miřejevce)	Velmi špatný
2.	Lávka přes Cidlinu (Zbraň)	Dobrý
3.	Most přes Chrudimku (Automatické mlýny, Pardubice)	Dobrý
4.	Most přes Chrudimku (Zeletník, Pardubice)	Špatný
5.	Most přes Labe Pardubice (most Kpt. Bartoše, Pardubice)	Špatný
6.	Most přes železnici (ul. Moskevská, Praha)	Dobrý
7.	Most přes Vltavu (Vyšehradský železniční most, Praha)	Velmi špatný
8.	Most přes Berounku (Černošický most, Černošice)	Dobrý
9.	Most přes Vltavu (Vrané nad Vltavou)	Dobrý
10.	Most přes Úpu (Vodácký most, Trutnov)	Dobrý
11.	Most přes Úpu (Lázeňský most, Trutnov)	Velmi špatný
12.	Most přes Labe (Josefov)	Dobrý
13.	Most přes Labe (Lochenice)	Dobrý
14.	Most přes Chrudimku (Červeňák, Pardubice)	Velmi špatný
15.	Most přes Chrudimku (Chrudim)	Dobrý

3.2.4 Rozměry štěrbin vybraných konstrukcí

Z naměřených rozměrů byly vytvořeny 3 kategorie typů štěrbin podle jejich velikosti:

- malé štěrbin (4-13 mm)
- střední štěrbin (13-30 mm)
- velké štěrbin (30 mm a více)

Z hlediska konstrukce tryskací sestavy není relevantní zaznamenávat délku štěrbin. Tento rozměr stanovuje časovou náročnost procesu tryskání a s tím spojené celkové náklady. Hloubky štěrbin se pohybují v rozmezí od 100 do 300 mm, dle typu konstrukce. Naměřené hodnoty jsou zaneseny v tab. 6.

Tabulka 6: Rozměry štěrbin na vybraných mostních konstrukcích

Pořadí	Označení mostu	Typy štěrbin													
		Malé štěrbiný [mm]						Střední štěrbiný [mm]				Velké štěrbiný [mm]			
1.	Most přes Vltavu (Miřejovice)	9	9	9,5	8,5	11	11	19	21	20	20	43	44	-	-
2.	Lávka přes Cidlinu (Zbraň)	8	8,5	9	9	9	8,5	-	-	-	-	-	-	-	-
3.	Most přes Chrudimku (Automatické mlýny, Pardubice)	-	-	-	-	-	-	16,5	17,5	-	-	44	48	44,5	-
4.	Most přes Chrudimku (Zeleňák, Pardubice)	9,5	10	11,5	12,5	13	12	16	14	-	-	41	42	46	-
5.	Most přes Labe (most Kpt. Bartoše, Pardubice)	10	12	12	12	8,5	9	29,5	29	14	-	-	-	-	-
6.	Most přes železnici (ul. Moskevská, Praha)	11,5	12	12	11,5	11	12	28	30	-	-	-	-	-	-
7.	Most přes Vltavu (Vyšehradský železniční most, Praha)	11	9	12,5	7	4	8	22	22,5	-	-	50	52	-	-
8.	Most přes Berounku (Černošický most, Černošice)	10	12,5	6,5	12	10,5	12	24,5	24,5	24	-	52	53	-	-
9.	Most přes Vltavu (Vrané nad Vltavou)	9	10,5	8,5	9	9	9,5	18	18,5	17	20	45	45,5	-	-
10.	Most přes Úpu (Vodácký most, Trutnov)	10	10,5	11	10	10,5	10,5	-	-	-	-	32	30	45	44
11.	Most přes Úpu (Lázeňský most, Trutnov)	-	-	-	-	-	-	18	18,5	19	-	53,5	50	-	-
12.	Most přes Labe (Josefov)	8	13	7	10	8,5	7,5	17	20	18	-	34	34,5	-	-
13.	Most přes Labe (Lochenice)	-	-	-	-	-	-	15	16	15,5	16	-	-	-	-
14.	Most přes Chrudimku (Červeňák, Pardubice)	9	14	7	13	12,5	12	-	-	-	-	40	41	34	41
15.	Most přes Chrudimku (Chrudim)	-	-	-	-	-	-	20	19	20	20	41	43	42	41

3.3 Shrnutí poznatků z průzkumné části

Průzkumná část přinesla mnoho poznatků, které ovlivnily následný vývoj tryskací sestavy. Při pozorování konstrukcí byl nalezen opakující se jev. V případě konstrukcí, které byly již renovovány nebo opravovány, byla objevena společná vada – vnitřek zkoumaných štěrbin nebyl u žádného ze zmíněných mostů z kapitoly 0 opatřen protikorozní ochranou. Pokud se PKO někde nacházela, jednalo se spíše o pozůstatky původní ochrany, která byla již ve velmi špatném stavu a nemohla spolehlivě plnit svůj účel. Z neupravených štěrbin se koroze znovu šíří napříč konstrukcí. Tento jev je vidět na obr. 11. Toto zjištění ještě více podtrhuje potřebu zařízení, které by štěrbinu dokonale otryskalo od původní protikorozní ochrany a vzniklých korozních produktů.



Obrázek 11: Korozní produkty uvnitř konstrukcí (vlevo – 5, uprostřed 6–a vpravo – 13)

3.4 Návrh tryskací sestavy

Z výsledků průzkumu [55] vyplynulo, že není možné vyrobit jedno univerzální zařízení, které by dokázalo efektivně otryskat většinu konstrukcí. Proto byla vytvořena sada tryskacích sestav pro různé velikosti a typy štěrbin, aby výsledné otryskávání probíhalo rychle a v požadované kvalitě.

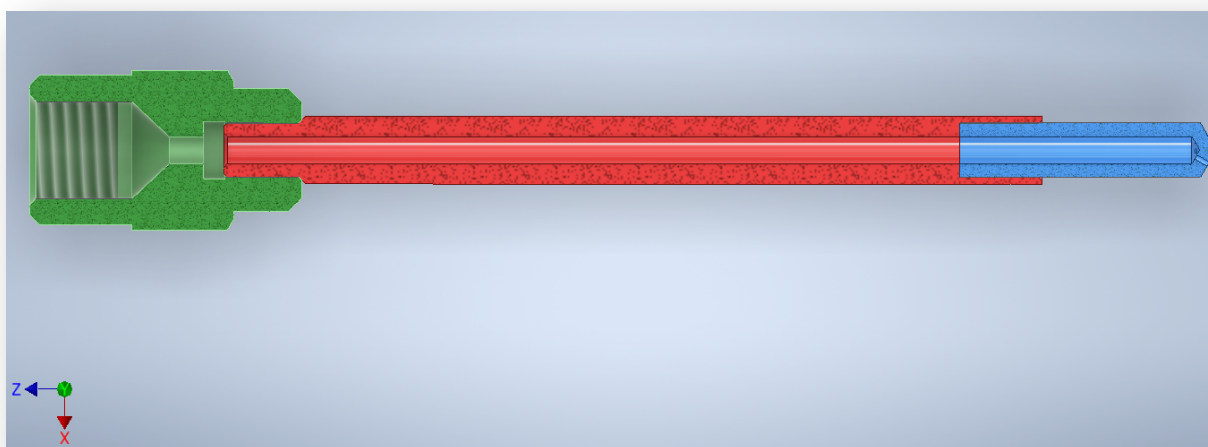
3.4.1 Počet částí tryskací sestavy

S otázkou, jak efektivně provádět proces tryskání do požadovaných hloubek vyvstala konstrukční výzva, jak vytvořit do monolitního materiálu díru o délce 150-300 mm o velmi malém vnitřním průměru.

První možností, jak se tomuto problému jednoduchou cestou vyhnout, bylo nahrazení dvou částí tryskací sestavy třemi částmi – redukční část spojující tryskací pistoli s navrhovanou sestavou, část nastavovací a nakonec samostatná tryskací část. Možná varianta tohoto návrhu je zobrazena na obr. 12. Přidaná nastavovací část by byla tvořena tlustostěnnou trubičkou s vnitřním průměrem odpovídající tryskací části pro zajištění laminárního proudění a vnějším průměrem, který nebude přesahovat vnější průměr tryskací části. Dále by nastavovací část obsahovala na obou koncích závit, jeden pro našroubování do redukční části, druhý pro spojení s tryskací částí. Tímto řešením by se eliminovala nutnost vytvářet hlubokou vrtanou díru, avšak tato varianta není ideální a má taktéž svá úskalí. Přidání členu do sestavy znamená vytvoření dalšího místa, kde je nutné zavádět závity, které musí plnit bezpečnostní požadavky, zajišťovat snadnou montáž, a především dokonale těsnit, aby nedocházelo ke ztrátám tlaku a tryskacího média nežádoucím únikem.

Druhý a mnohem zásadnější problém spočívá ve velikosti. Je zapotřebí zašroubovat tryskací část do nastavovací části a zároveň zachovat minimální vnější průměr celé sestavy. Aby bylo možné části sestavy sešroubovat, nepřipadá v úvahu vytvoření nastavovací části, která by svým vnějším průměrem byla stejná nebo větší než tryskací část. Z důvodu tuhosti tryskací části nelze snižovat vnitřní ani vnější průměr. Aby tuhost tryskací i nastavovací části byla vyhovující, musí být vnější průměr nastavovací části větší, než je maximální požadovaný průměr. Větší vnější průměr nastavovací části lze aplikovat na střední a velké štěrbin,

kde je možnost rozměry tryskací části upravit. Toto řešení nelze využít u malých štěrbin, kde vnější průměr je kritický parametr. Z těchto důvodů bylo od této varianty upuštěno.



Obrázek 12: Schéma třídílné tryskací sestavy v řezu

Další myšlenkou bylo vytvoření tryskací části, která by nebyla šroubovaná, ale měla nastavovací část, která by byla spojena pomocí svarového spoje. Tím by došlo ke zúžení celkového vnějšího průměru nastavovací části a eliminaci závitů. Výhodou je využití tlustostěnné trubky namísto vrtaného polotovaru. Nevýhodou je ovšem snížení mechanických vlastností tepelně ovlivněnou oblastí v místě svaru a s tím zvýšené riziko vzniku vad, jako např. vruby, převýšení kořene svaru nebo trhliny. Tyto vady by mohly být koncentrátoři napětí a také výraznou překážkou hladkého průchodu média. Z těchto důvodů bylo od této varianty rovněž upuštěno.

3.4.2 Rozměry a tvary trysek

Z kapitoly 3.2.2. byly získány cenné informace o rozměrech jednotlivých štěrbin. Získané informace do určité míry dávají prostor vytvořit takové trysky, které by svými rozměry nepřesahovaly velikosti štěrbin a mohly pracovat co možná nejefektivněji.

Následný vývoj byl realizován pouze pro první dva typy štěrbin (malé a střední). Pro velké štěrbin s rozměry od 30 mm by bylo možné vytvořit specifický výrobek. Nicméně, pro tyto velikosti lze s dostatečnou efektivitou využít běžně vyráběné demoliční trysky (podrobnější informace o tryskách jsou uvedeny v kapitole 2.5).

Pro malé štěrby je zásadním parametrem vytvořit co možná nejmenší velikost tryskové sestavy, která by se bez obtíží vešla do štěrby, nedošlo by zde k jejímu zaklínění a zároveň by dokázala efektivně odstranit korozní produkty a nečistoty.

3.4.2.1 Rozměry tryskové sestavy pro malé štěrby

Štěrbiny tohoto typu mají rozměry nejčastěji od 6 do 12 mm, jak vyplývá z průzkumu v kapitole 0. Cílem proto bylo vytvoření tryskové části, která měla vnější průměr v rozmezí 6-9 mm. Z konstrukčního a bezpečnostního hlediska je nutné brát v potaz i typ materiálu, tloušťku stěny trysky, její vnitřní průměr a tlak, pod jakým bude do tryskové sestavy hnáno médium. S rostoucím tlakem tryskového média vzrůstá i účinnost tryskového procesu. Avšak s rostoucím tlakem rostou nároky na materiál a tuhost sestavy. Vnější průměr sestavy byl stanoven na 8 mm s vnitřním průměrem 3,2 mm. Jedná se tak o kompromis mezi co nejmenším rozměrem a bezpečnostním výpočtem.

3.4.2.2 Rozměry tryskové sestavy pro střední štěrby

Při otryskávání středních štěrbin pomocí konvenčních rotačních a demoličních trysek není možné docílit efektivního otryskání v celé hloubce štěrby. Hlavním problémem je velikost samotných trysek, potažmo celé tryskové sestavy, která se kvůli krátké délce nedostane dostatečně hluboko, nebo její rozměr neumožňuje sestavu naklonit a otryskávat pod úhlem. Některé demoliční trysky je možné se svými rozměry do štěrby vložit, avšak jejich vývody nejsou uzpůsobeny k efektivnímu tryskání i na bocích štěrbin.

Stejně tak, pokud je do stejné štěrby vložena tryska s malými rozměry, nemusí být proces dostatečně efektivní. Pokud tryskové médium, v tomto případě voda, překoná k tryskanému objektu příliš dlouhou vzdálenost, ztrácí svoji energii a tím i sílu na odstranění korozních produktů. Malá tryska by dokázala spolehlivě očistit pouze jednu stranu štěrby. Celý proces by tedy trval jednou takový čas a vyžádal si dvojnásobné zdroje v podobě média a paliva do tryskového zařízení. Tento jev byl experimentálně ověřen v mé bakalářské práci [55].

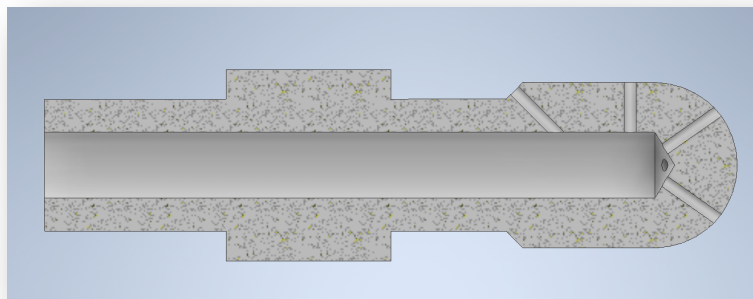
Byl tedy vytvořen druhý typ sestavy, která svými rozměry více odpovídá požadavkům středních štěrbin (13 až 30 mm). Navržená sestava má vnější průměr 14 mm, vnitřní průměr

je zachován jako u malé trysky – 3,2 mm. Díky větší tuhosti sestavy lze využít vyššího tlaku tryskacího média. Vzhledem k delšímu rozměru trysky se zkracuje vzdálenost tryskacího média od výstupu k dopadu na stěnu štěrbin, čímž dochází k vyššímu zachování energie média než v případě trysky malé.

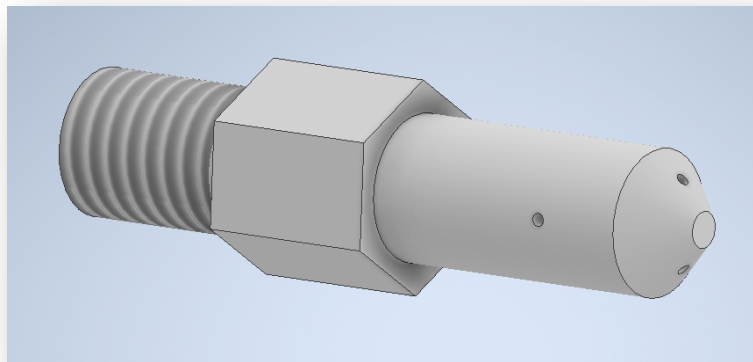
3.4.3 Umístění vývodů a jejich počet

Pro bakalářskou práci byla vytvořena tryskací sestava, která měla mít univerzální vlastnosti jak pro průchozí, tak neprůchozí štěrbin. Z výsledků práce je ale patrné, že takové řešení není dokonalé ani uspokojivé, jelikož efektivita přímého vývodu je mnohem větší než pro boční vývody. Oproti tomu v praxi je nutné, aby boky štěrbin byly tryskány se srovnatelnou účinností jako dno štěrbin. Kombinace přímého vývodu s bočními často není relevantní, jelikož na mostních konstrukcích se hojněji nacházejí průchozí štěrbin než štěrbin neprůchozí [56].

V počáteční fázi bylo vytvořeno několik návrhů trysek s vývody, které jsou zobrazeny na obr. 13 a 14.



Obrázek 13: Návrh trysky s označením 1



Obrázek 14: Návrh trysky s označením 2

Prvotní návrhy byly inspirovány již konvenčně používanými tryskami. Princip této trysky vznikl z dnes již běžně používaných trubkových trysek, viz obr. 8. Tento typ trysek však pracuje v naprosto odlišném prostředí a jejich konstrukce je upravena pro specifický účel. Každý z vytvořených návrhů však vždy vykazoval některou z níže popsaných vad. Velké množství vývodů s malými průměry se při vyšších tlacích (1500–2500 bar) chová jako vruby a koncentrátoři napětí, což klade enormní požadavek na přesnost, pevnost a vlastnosti materiálu. V případě trysky, která má zpětný chod (obr. 13), jsou vývody ve zpětném směru a mohlo by dojít k odletování otryskaných korozních produktů a nečistot z tryskané konstrukce a média směrem k operátorovi. Hlavním důvodem odstoupení od tohoto návrhu byla bezpečnost operátora a pevnostní náročnost sestavy.

Další možností bylo zachování šikmých vývodů a přidání kolmých bočních vývodů. Z teorie vyplývá, že nejlepší efektivita tryskání nastává, když je proces prováděn kolmo k tryskanému objektu (obr. 14). Kolmé vývody se v konstrukci chovají jako vruby a koncentrátoři napětí, mohlo by se tedy jednat o závažné pevnostní riziko. Dalším problémem je jejich umístění, které není na konci, ale uprostřed tryskací části. Takto by nikdy nebylo spolehlivě dosaženo kvalitně otryskaného povrchu štěrbin v celé její délce.

Po sumarizaci výsledků byly z možných variant vybrány dva finální návrhy, které jsou svojí konstrukcí nejméně náročné pro tuhost a mají potenciál dosahovat největší účinnosti ze všech uvažovaných variant.



Obrázek 15: Vyrobená tryska s přímým a bočními vývody

Boční vývody v první variantě (obr. 15, tryska vpravo) zajišťují dostatečné otryskání bočních ploch štěrbin. Jsou vedeny pod úhlem 30 °, což je ideální kompromis mezi účinností procesu a následného odvodu nečistot z místa tryskání. Tryska obsahuje 4 vývody rozmístěné po 90 ° od sebe. Toto opatření umožňuje natáčet tryskací pistoli do potřebných poloh, čímž dochází k usnadnění procesu pro samotného operátora.

Přímý vývod v druhé variantě (obr. 15, tryska vlevo) zajišťuje tryskání neprůchozích štěrbin, především jejich dna a méně dostupných rohů. Tryska dále slouží k výplachu a odstranění zbytků korozních produktů a nečistot po předchozím tryskání tryskou s bočními vývody.

3.4.4 Tvorba dlouhých děr

Konstrukční výzvou, která vyvstala při návrhu, byla nezbytná délka sestavy. Aby tryska s příslušnými vývody mohla plnit svůj účel, bylo zapotřebí vyřešit, jakým způsobem bude vnitřní otvor vyroben. Potřebná díra musí splňovat stanovený vnitřní průměr 3,2 mm a délku v rozmezí od 150 mm až po finální hodnoty dosahující 284 mm. Délky byly voleny na základě korozního průzkumu popsaného v kapitole 0.

Pro takovou díru nelze využít běžně dostupné konvenční metody vrtání. Po neúspěšné snaze vyhnout se konstrukčnímu problému vrtání hlubokých děr uvedenému v kapitole

3.4.1, byly vybrány dvě metody vrtání – technologie elektroerozivního obrábění nebo vrtání a technologie vrtání s dělovým vrtákem.

Elektroerozivní obrábění (EDM) je ideální varianta pro výrobu děr. Lze vytvořit univerzální elektrodu, například z wolframové mědi nebo grafitu, která dokonale odpovídá požadovanému tvaru dna trysky (kruhový, kónický). Jedná se o nekonvenční metodu obrábění s čímž je spojený i problém snížené dostupnosti této technologie na našem území. Zařízení musí mít buď relativně velkou pracovní vanu na dielektrikum s vysokými hodnotami posuvu, nebo se musí jednat o stroj, který má posuvné zařízení v horizontální poloze.

Druhou možností z hlediska elektroeroze byla technologie elektroerozivního vrtání (EDD). Elektroerozivní vrtání otvorů je výhodná metoda pro vrtání do tvrdých materiálů, avšak technologie neumožňuje vytvářet přesné díry do konkrétní hloubky. Při procesu se elektroda opotřebovává a probíhá úběr jak na materiálu výrobku, tak materiálu elektrody, a tím pádem nelze určit přesný posuv. Navíc pomocí elektroerozivního vrtání by nebylo možné vytvořit přesný kónický nebo kulový tvar dna trysky.

Další uvažovanou technologií pro výrobu děr bylo dělové vrtání. Výhodou této metody je relativně vysoká přesnost a rychlost celého procesu. Tato metoda má však jedno úskalí – dno vrtané díry kopíruje tvar dělového vrtáku, který je jednobřítý. Vrták svírá úhel 120° a uprostřed je vyvýšený. Oproti technologii EDM je zde nevýhoda v ovlivnění materiálu mechanickými vlivy.

Dle dostupnosti výrobních technologií u tuzemských výrobců bylo rozhodnuto, že pro další vývoj bude upřednostněna technologie EDM hloubení. Z důvodu nutnosti upínání polotovaru do stroje byla navržena konstrukční úprava. Tato úprava dále napomohla i řešení těsnění popsané v následující kapitole.

3.4.5 Těsnost tryskací sestavy

Důležitým parametrem pro sestavu, kterou proudí médium o vysokém tlaku, je těsnění závitů. Médium na bázi vody nesmí přes závity unikat ani ohrozit tuhost sestavy. Z tohoto důvodu bylo navrženo jednoduché těsnící řešení pomocí teflonové pásky. Teflonová páska nebo nit bude umístěna jak na závit tryskací pistole, tak na závit tryskové části. Při testování

montáže sestavy bylo odzkoušeno i použití gumového těsnícího kroužku. Tato varianta však nepřinesla požadovaný efekt a byla zavrhnuta.

Technologie výroby hlubokých děr stanovuje požadavek na sražení hrany na vnějším průměru trysky. Sražení slouží pro vhodné upnutí součásti do zařízení. Aby materiál pro sražení nemusel být přidáván k polotovaru navíc a následně po vrtání odstraněn, byla upravena konstrukce jak tryskací části, tak části redukční. Změna spočívá v zachování sražení na tryskací části a přidání sražení na vnitřní části redukčního členu. Konstrukce redukční části je více rozebrána v kapitole 3.5.1. Díky této změně dochází při montáži k samosvornému spoji, který napomáhá těsnosti sestavy.

3.4.6 Výpočty pro zvolené varianty

Po vytvoření návrhů tryskací sestavy bylo nezbytně nutné provést pevnostní výpočty. Tloušťka stěny musí být dostačující, aby nedošlo k narušení soudržnosti a tuhosti během zatíženého stavu. Pro malou trysku je stěžejní, aby tloušťka stěny byla co nejmenší a aby celkový průměr trysky nepřesahoval navrhovaných 8 mm, a zároveň nepředstavovala bezpečnostní riziko. Maximální použitelný pracovní tlak je další faktor, který zohledňuje výpočet. Trysky jsou navrhovány pro pracovní tlaky v rozmezí od 150 MPa do 200 MPa. Díky znalosti maximálního povoleného tlaku lze regulovat životnost trysky.

Navrhované druhy trysek jsou dimenzovány jako silnostěnné otevřené nádoby a u takových je nejvíce namáhaným místem vnitřní plocha, potažmo vnitřní poloměr r_m . Následující výpočty v této kapitole vycházejí ze zdrojů [57] [58].

Pevnostní podmínka vnitřních ploch je určena podle hypotézy τ_{MAX} .

$$\sigma_{red} = \sigma_t(r_m) - \sigma_r(r_v) \leq \sigma_D \quad (1)$$

$$\sigma_t(r_m) = 2 \cdot K + p_1 = 2 \cdot \frac{p_1 \cdot r_m^2 - p_2 \cdot r_v^2}{r_v^2 - r_m^2} + p_1 \quad (2)$$

$$\sigma_r(r_m) = -p_1 \quad (3)$$

Po dosazení a úpravě vzniká vztah pro dovolený tlakový spád.

$$(p_1 - p_2) \leq \frac{\sigma_D}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{r_m}{r_v} \right)^2 \right] = (p_1 - p_2)_D \quad (4)$$

Takto vzniklý vzorec lze upravit a získat z něj hodnoty pro minimální tloušťku stěny při známém tlaku r_{MIN} a maximální dovolený tlak p_{1MAX} , který lze do navrhované konstrukce dodávat.

Příklad výpočtu p_{1MAX} pro trysku do malých štěrbin:

Dovolené napětí je typem materiálu $\sigma_D = 600 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$, vnitřní poloměr $r_m = 1,6 \text{ mm}$, vnější poloměr $r_v = 4 \text{ mm}$.

$$\frac{\sigma_D}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{r_m}{r_v} \right)^2 \right] = p_{1MAX}$$

$$\frac{600}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{1,6}{4} \right)^2 \right] = p_{1MAX}$$

$$p_{1MAX} = 252 \text{ MPa}$$

Tímto způsobem byly dopočítány ostatní varianty a výsledky byly zaneseny do tab. 7.

Tabulka 7: Výsledky výpočtů

Veličina	Jednotky	Typ trysky					
		Pro malé štěrbin			Pro střední štěrbin		
σ_D	$\text{N} \cdot \text{mm}^2$	600	600	600	600	600	600
r_m	mm	1,6			1,6		
r_v	mm	4			7		
p_1	MPa	150	180	200	150	180	200
p_{1MAX}	MPa	252			284		
r_{1MIN}	mm	2,3	2,6	2,8	2,3	2,6	2,8

Z výsledků je patrné, že rozměry obou typů trysek jsou dimenzovány dostatečně.

Aby bylo možné určit typ proudění uvnitř trysek a ztráty tlaku prouděním, je zapotřebí vypočítat Reynoldsovo číslo. Pro laminární proudění, je zapotřebí, aby vypočtená hodnota nepřesahovala hodnotu kritickou. Kritická hodnota se udává v rozmezí $Re_K < 1000; 10000 >$.

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\eta} \tag{5}$$

$$Re = \frac{997 \cdot 0,0032 \cdot 26,5}{0,8} = 105,682$$

$R_e < 1000 \rightarrow$ *Vyhovuje*

$$\Delta P = f \cdot \left(\frac{L}{r_m}\right) \cdot \left(\frac{\rho \cdot v^2}{2}\right) \quad (6)$$

$$\Delta P = 0,4 \cdot \left(\frac{0,285}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}\right) \cdot \left(\frac{997 \cdot 26,5^2}{2}\right) \doteq 12,5 \text{ MPa}$$

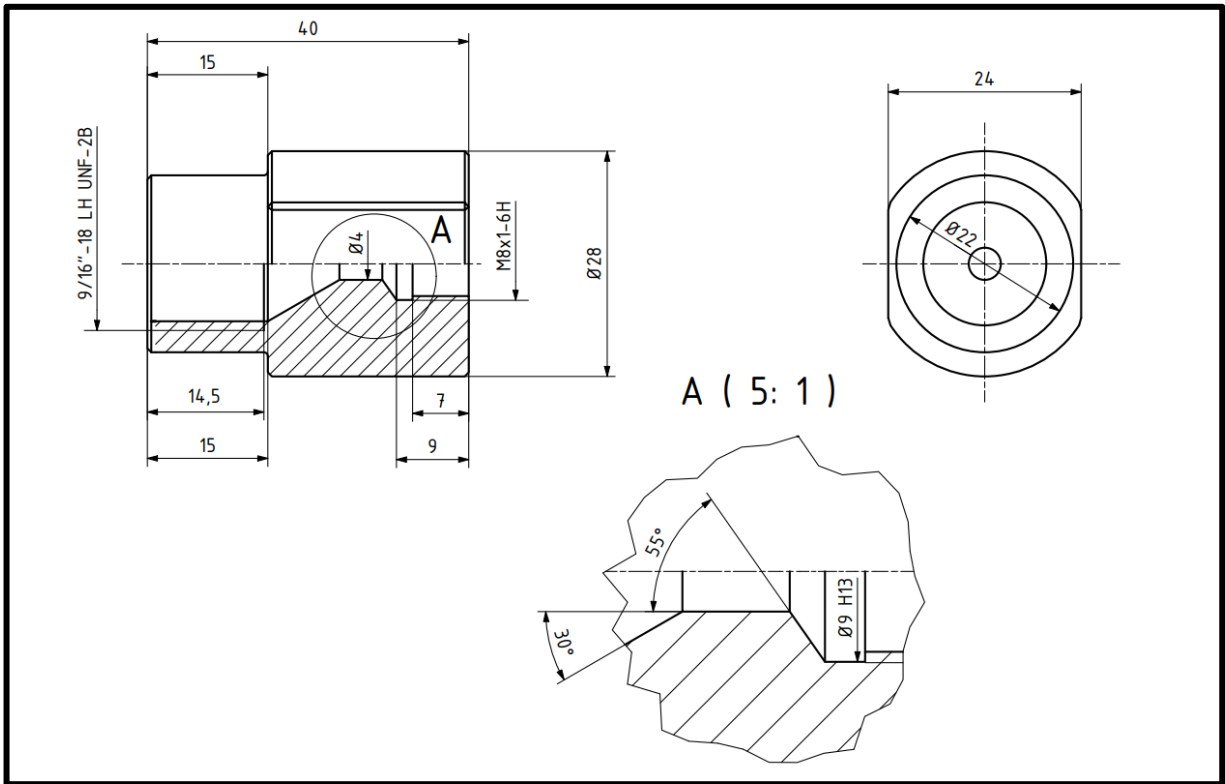
Z výsledků je patrné, že proudění uvnitř trysky bude laminární a ztráty v tlaku vlivem prouděním kapaliny 20 l·min⁻¹ budou 12,5 MPa.

3.5 Návrh redukční části

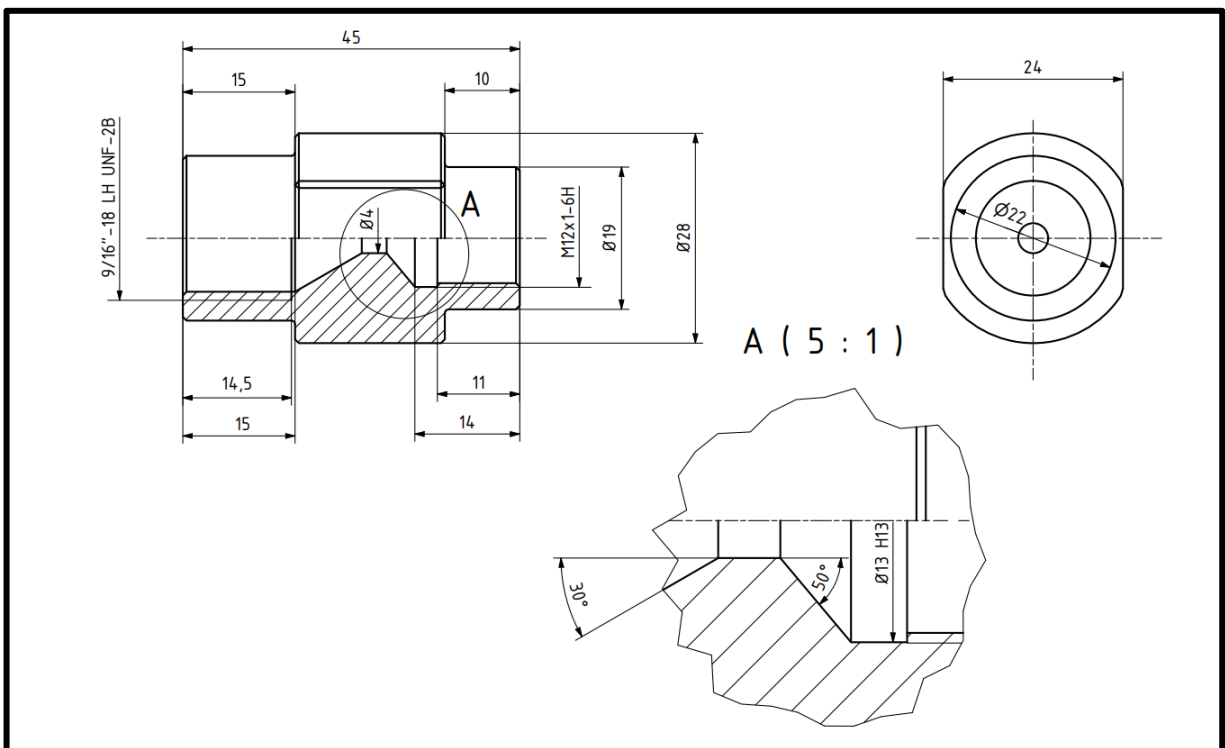
Aby mohla tryskáč část plně sloužit svému účelu, je nutné ji spojit s tryskáčím zařízením, konkrétně s tryskáč pistolí. Pro experiment bylo použito zařízení od firmy Falch. Tryskáč pistole má na svém vývodu vytvořený vnější závit 9/16"-18 LH. Jelikož rozměry tryskáč pistole jsou oproti rozměrům trysky mnohem větší, je zapotřebí, aby byla zkonstruována redukční část, která by byla vložena mezi oba členy. V bakalářské práci byly popsány důvody, proč je výhodné tvořit redukční a tryskáč část separátně oproti monolitní trysce s redukcí na tryskáč pistolí. Hlavními důvody jsou úspora materiálu na odpadu a možnost volby odlišného materiálu dle potřeb konkrétní části [55].

3.5.1 Rozměry a parametry redukční části

Hlavním kritériem je spolehlivé spojení všech částí tryskáč sestavy a bezproblémový přesun tryskáčho média z pistole do trysky. Tvar a velikost redukční části nehraje příliš důležitou roli. Jedná se o část, která nebude vkládána do štěrbin. Aby mohly být využity obě navrhované varianty tryskáč části (malá a střední), bylo zapotřebí vytvořit dva návrhy redukční části. Výkresy variant jsou uvedeny na obr. 15 a 16. Jako vstupní materiál pro obě varianty byla zvolena kruhová tyč o průměru 28 mm. Pro snadnou montáž a demontáž byly navrženy dvě sražení na bocích, která umožňují využít očkoplochý ráčnový klíč pro pevné dotažení obou částí k sobě.

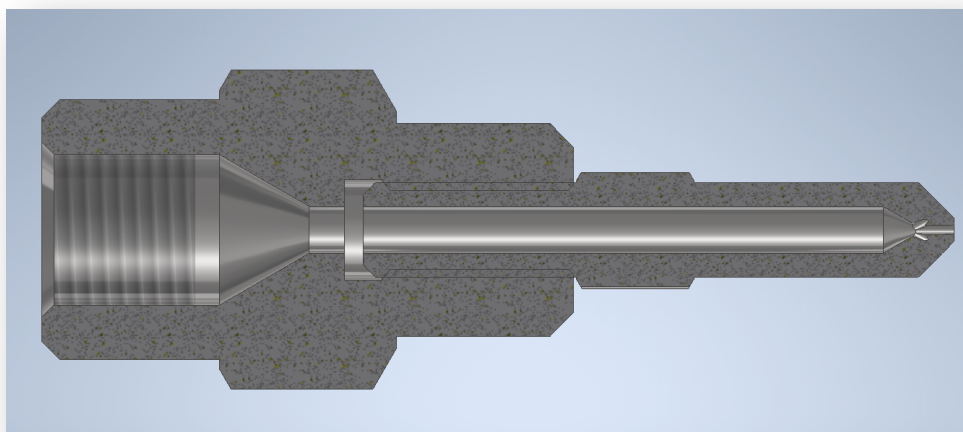


Obrázek 16: Výřez výkresu redukční části LH_M8



Obrázek 17: Výřez výkresu redukční části LH_M12

V kapitole 3.4.5 byla popsána konstrukční úprava tryskací části. Jedná se o sražení na vnějším průměru trysky. Redukční část byla podobně upravena a vnitřní část obsahuje zkosení v úhlu 50° a 55° dle sražení tryskací části. Tato změna sestavy zajišťuje, že při šroubování trysky do redukce se vnější sražení opře o vnitřní zkosení a vzniká tak samosvorný spoj, který podporuje těsnění sestavy. Oproti původnímu řešení zobrazenému na obr. 18 byla odstraněna dutina, která nemá pro funkci sestavy žádný pozitivní efekt.



Obrázek 18: Model původní sestavy [59]

3.6 Materiály použité pro výrobu sestavy

Před samotným výběrem materiálu pro tryskací sestavu bylo třeba rozhodnout směr, jakým se bude výrobek ubírat. První možností bylo nalézt materiál s nejlepšími vlastnostmi a počítat s velmi vysokou pořizovací cenou sestavy, obtížnějším zpracováním a neznámou dobou životnosti sestavy. Druhou variantou byla volba materiálu, který by byl svými vlastnostmi vhodný, jeho cena by byla nižší a zpracování jednodušší, ale s omezenou životností.

Dále pak z výsledků mé bakalářské práce [55] je zřejmé, že na redukční a tryskací část jsou vyvíjeny velice odlišné nároky. Redukční část je namáhána méně než tryskací část a také její rozměry jsou odlišné, což dává mnohem větší pevnostní stabilitu a možnost využít dostupnější varianty materiálu s nižšími mechanickými vlastnostmi. Každou součást je tedy možné vyrobit z odlišného materiálu, čímž lze snížit celkové náklady na výrobu sestavy.

3.6.1.1 Materiál pro tryskáč část

Z hlediska mechanických vlastností je nejlepší variantou využití materiálu na bázi karbidu wolframu nebo boru. Neméně časté je použití syntetického diamantu, safíru, popřípadě rubínu. Cena dílce se neodráží pouze od ceny materiálu. Je nutné brát v potaz i cenu za výrobu, nástroje a jejich opotřebení a v neposlední řadě celkovou složitost dílce. Pro tuto diplomovou práci bylo zvoleno využití více dostupného materiálu s vhodnými vlastnostmi, ale s rizikem nižší životnosti sestavy. Do experimentu byla zařazena zkouška životnosti finální sestavy. Od tohoto údaje se může odvíjet případný další vývoj a zdokonalení tryskáč sestavy.

Pro trysky s nižšími nároky na životnost se využívají ve velké míře legované korozivzdorné oceli. Pro výrobu tryskáč části byla použita korozivzdorná martenzitická chromová ocel 1.4034 (X46Cr13), stejně jako v mé bakalářské práci [55]. Mechanické vlastnosti a chemické složení je zobrazeno v tab. 8 a 9.

3.6.1.2 Materiál pro redukční část

Rozměry redukční části jsou odlišné oproti tryskáč části, stejně tak jako jsou rozdílné nároky na namáhání součástí. Volba stejného materiálu jako pro tryskáč část by byla možná, ale jelikož redukční část není limitovaná rozměrem, bylo možné zvolit materiál s horšími mechanickými vlastnosti a nižšími pořizovacími náklady. Proto byla zvolena korozivzdorná austenitická chrom-niklová ocel s přísadou síry 1.4305. Tato ocel byla již využita při prvním testování [55] a její vlastnosti byly více než uspokojivé pro experiment. Mechanické vlastnosti a chemické složení je zobrazeno v tab. 8 a 9.

Tabulka 8: Mechanické vlastnosti vybraných ocelí [60] [61]

Materiál	Mez kluzu [N·mm ⁻²]	Mez pevnosti [N·mm ⁻²]	obrobitelnost
1.4034	≥600	≤800 po zakalení 1700-1900	špatná
1.4305	≥190	500-700	velmi dobrá

Tabulka 9: Chemické složení vybraných ocelí (v procentech) [60] [61]

Materiál	C	Si max	Mn max	P max	S max	Cr	Mo	Ni	Cu
1.4034	0,43- 0,5	1,00	1,00	0,040	≤0,03	12,5- 14,5	-	-	-
1.4305	0,12	1,00	6,5	0,2	0,15- 0,35	16-19	0,7	5-10	1,75-2

3.7 Zkušební vzorky a tryskací zařízení

Před možnou aplikací úzkých trysek na mostní konstrukci bylo nutné provést testování na zkušebních vzorcích v kontrolovaném prostředí. Hlavním důvodem tohoto kroku bylo zajištění bezpečnosti v případě poškození nebo destrukce trysek, a tím předejití možnému zranění osob a poškození majetku. Dále bylo nutné zjistit účinnost konkrétních typů trysek a optimalizovat tryskací proces v závislosti na velikosti pracovního tlaku a spotřeby vody.



Obrázek 19: Upevněný vzorek

(horní strana obsahuje díru na uchycení).

Pro usnadnění vyhodnocení byly využity ocelové destičky o rozměrech 150×100×5 mm, které byly pokryty nátěrovou hmotou. Naměřené hodnoty velikosti nátěrových hmot na přípravcích jsou uvedeny v příloze č. 1. Mezi tyto destičky byly umístěny distanční kroužky, které zajišťují definovanou velikost štěrbin. Rozměry štěrbin (10 a 20 mm) byly voleny s ohledem na průzkum popsáný v kapitole 3.2.4. Destičky byly poté sešroubovány a připevněny na testovací místo. Všechny vzorky byly tryskány ze stejného směru, a to od spodní hrany k horní

Provedení experimentálního testování bylo zajištěno tryskacím zařízením Trail Jet 125 2500-26-0-d s pracovními tlaky v rozsahu 600-2500 bar a průtokem pohybujícím se v rozmezí 11-26 l·min⁻¹. Toto zařízení pracuje s agregátem o síle 125 kW a rychlostí 600 otáček za minutu. Na zařízení je vždy nastaven požadovaný tlak a přístroj

po stisknutí spouště pouští vodu do trysky. Na začátku dochází k náběhu tlaku na přednastavenou hodnotu a poté se tlak pohybuje v pracovním rozmezí.

Zápůjčku zařízení a prostor k testování poskytla firma Bintana, s.r.o., která rovněž za účasti zaškoleného personálu provedla veškeré experimentální tryskání.

3.8 Experimentální tryskání vzorků

Cílem experimentu bylo vyhodnotit, zda vyrobené tryskací sestavy fungují dle konstruovaných parametrů a zda dokážou otryskat vnitřní plochy simulovaných štěrbin (vzorků) na požadovaný stupeň otryskání $Wa\ 2\frac{1}{2}$, což je požadavek daný předpisem ministerstva dopravy pro částečnou nebo kompletní obnovu protikorozní ochrany na mostních ocelových konstrukcích. Dále bylo třeba zjistit, jaké parametry (tlak a průtok média) budou ideální pro dosažení co možná nejefektivnější tryskacího procesu.

3.8.1 Tryskání pomocí trysky D14 se čtyřmi vývody

Na tryskací pistoli a trysku byla umístěna teflonová těsnicí páska a následně byly součásti sešroubovány s redukční částí. Tryskací pistole s kompletní sestavou je zobrazena na obr. 20.



Obrázek 20: Tryskací sestava D14 se čtyřmi vývody připevněná na pistoli

Tryskací zařízení bylo nastaveno na prvotní zkušební tlak 1500 bar, průtok vody v zařízení byl během experimentu $18\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Tento tlak byl nastaven pro ujištění, že v žádné

části sestavy nedochází k úniku kapaliny, popřípadě k poklesu tlaku na zařízení. Po kontrole parametrů bylo s takto nastavenými parametry provedeno tryskání upevněného vzorku po dobu 120 s. Skutečný pracovní tlak se pohyboval v rozmezí 1470-1500 bar. Během zkušebního běhu nedošlo k žádným změnám nebo netěsnostem na sestavě. Na tryskaném vzorku byly vidět mírné známky otryskání, ale jednalo se spíše o lehké narušení nátěrových hmot.

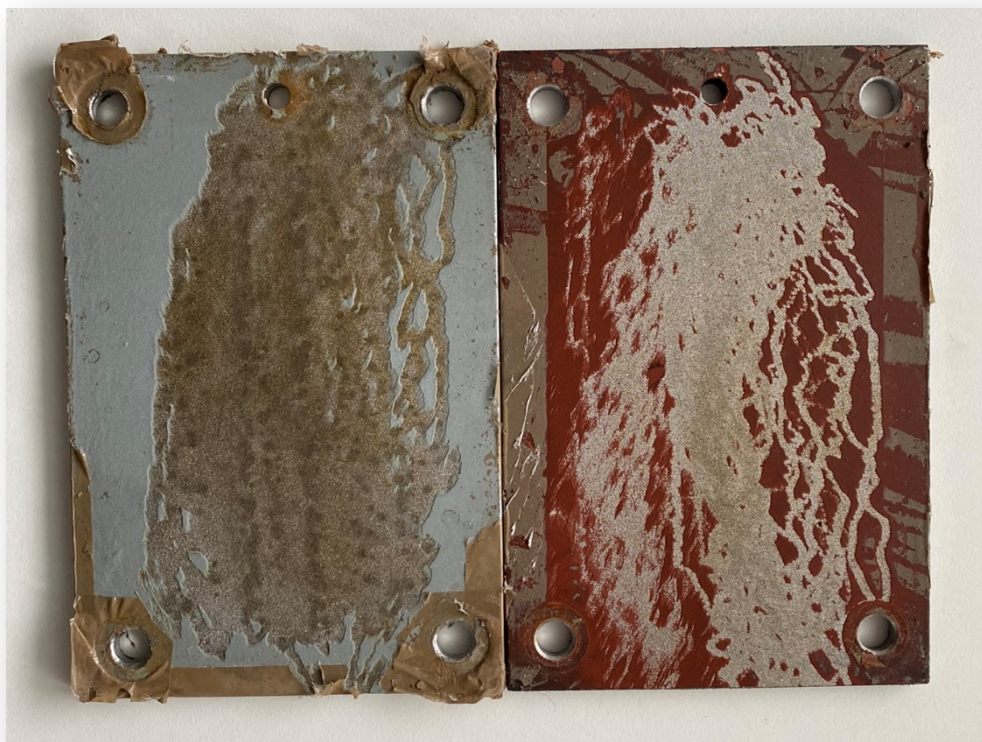
Následně byl nastaven tlak na zařízení na 1800 bar. Skutečný pracovní tlak se v průběhu experimentu měnil v rozsahu 1780-1810 bar. Průtok vody byl konstantní $20 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Vzorek byl tryskán po dobu 120 s. Po demontáži přípravku byla vyhodnocena účinnost otryskání. V této části experimentu došlo k otryskání v místních plochách až na stupeň Wa 2 (dle normy ČSN EN ISO 8501-4). Celková účinnost ale nebyla příliš uspokojivá, jelikož došlo spíše k nitkovitému otryskání.



Obrázek 21: Vzorek č. 1 po tryskání tryskou D14 (1800 bar)

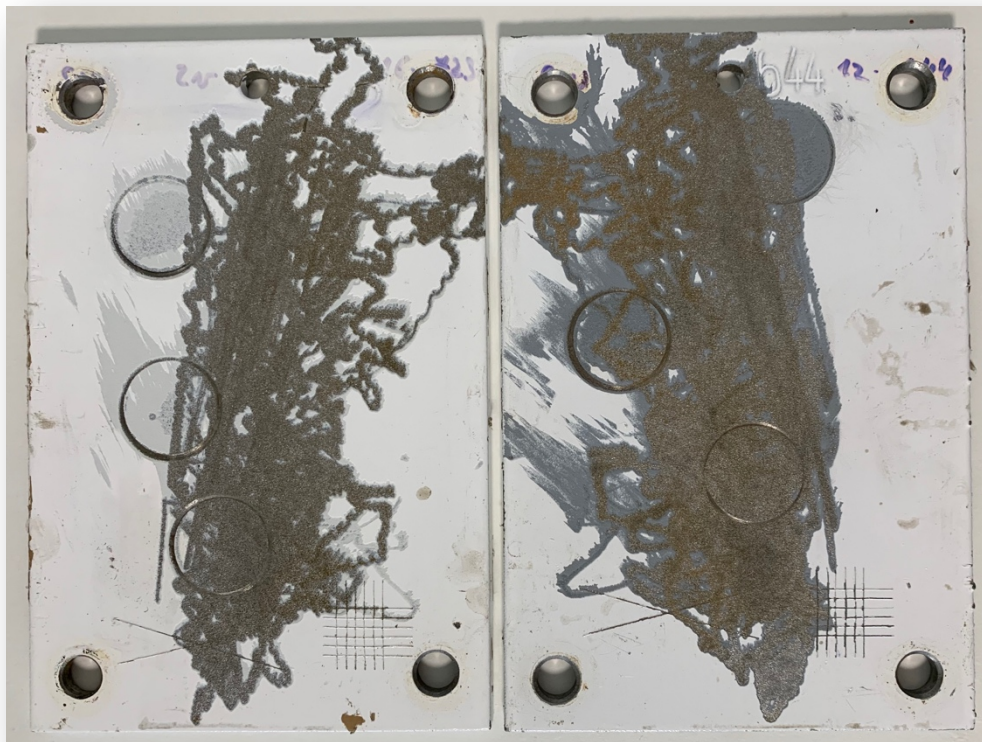
Ve třetí části experimentu této trysky byl připevněn nový vzorek č. 2 a zařízení bylo nastaveno na tlak 2000 bar. Pracovní tlak během experimentu se pohyboval v rozmezí 1980-2000 bar, průtok vody byl nastaven na $20 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, doba tryskání 180 s. Po demontáži

byl vzorek rozložen a bylo vyhodnoceno otryskání v místních plochách až na stupeň Wa 2½. Účinnost otryskání tedy byla vyšší než v případě tlaku 1800 bar, nastaveného v předešlé části experimentu. Kromě vyšší úrovně otryskání byla pozorována i rozsáhlejší dotčená oblast a minimalizace nitkovitého otryskání.



Obrázek 22: Vzorek č. 2 po tryskání tryskou D14 (2000 bar)

Ve čtvrté části experimentu po výměně na vzorek č. 3 byl nastaven tlak na zařízení 2200 bar, průtok vody během experimentu byl konstantní $22 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Skutečný tlak se pohyboval v rozmezí 2050-2200 a doba tryskání byla 180 s. Zde se opakoval jev z první části, kde úroveň otryskání je na obou stranách vzorku velice odlišná. V levé části byla otryskaná plocha výrazně nižší oproti pravé části. Tento jev je způsoben nejspíše natočením trysky. V případě špatného natočení může paprsek vody dopadat rozdílně na obě strany vzorku a tím pádem jedna strana může být otryskána více než druhá. Stupeň otryskání byl v tomto případě vyhodnocen v místních oblastech na stupeň Wa 2.



Obrázek 23: Vzorek č. 3 po tryskání tryskou D14 (2200 bar)

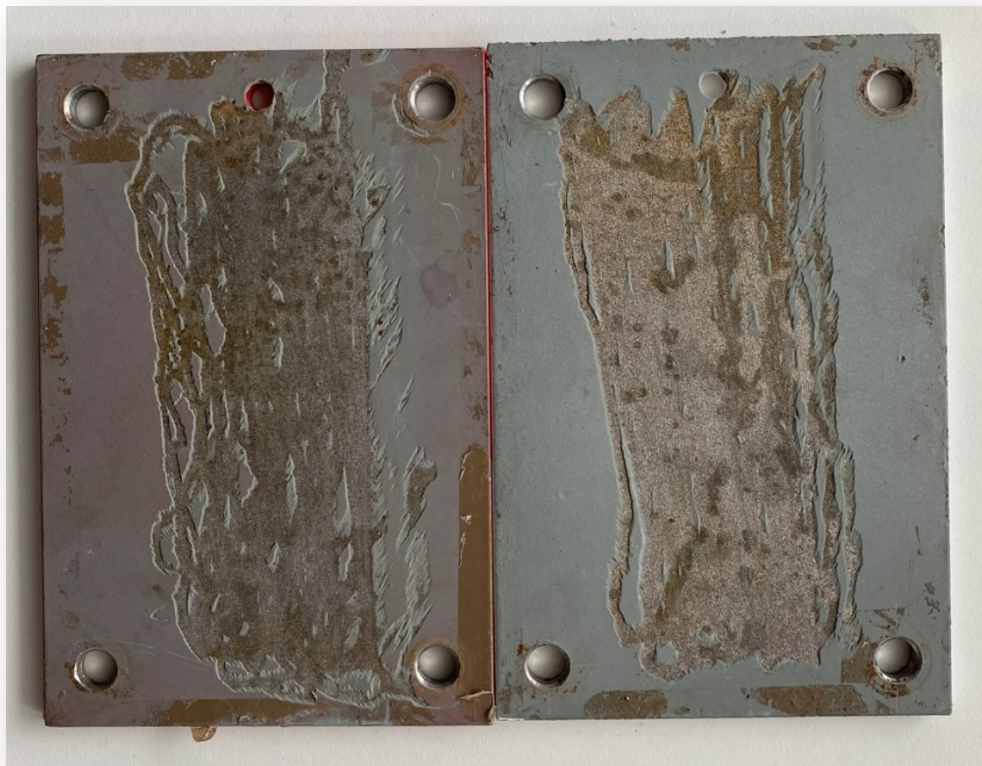
V páté a poslední části experimentu s tryskou D14 byl připevněn nový vzorek č. 4. Tlak byl nastaven na maximální možný, a to 2500 bar. Průtok vody během experimentu byl $22 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ a tryskací proces trval 120 s. Reálné hodnoty tlaku se pohybovaly v rozmezí 2300-2500 bar. Výsledný stupeň otryskání byl stanoven na hodnotu $W_a 2\frac{1}{2}$ a jednalo se o nejúčinnější proces. Kromě požadovaného stupně otryskání byl proces nejvíce rovnoměrný bez lokálních reziduí nátěrových hmot. Na tomto vzorku se vzápětí během několika minut objevila bleskové koroze.



Obrázek 24: Vzorek č. 4 po tryskání tryskou D14 (2500 bar)

3.8.2 Tryskání pomocí trysky D8 se čtyřmi vývody

Obdobným způsobem jako tryska D14 se čtyřmi vývody byla ověřena i její menší varianta D8. Po montáži nového vzorku č. 5 na místo a montáži tryskací sestavy na zařízení byl nastaven tlak 2000 bar. Na základě výsledků zjištěných v experimentu s tryskou D14 se čtyřmi vývody, bylo upuštěno od tlaku 1500 a 1800 bar, při kterém se otryskání jeví jako méně účinné. Pracovní tlak se v průběhu tryskání pohyboval v rozmezí 1970-2000 bar, průtok byl $21 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Vzorek byl tryskán po dobu 180 s. Výsledná účinnost otryskání byla vyhodnocena na stupeň Wa 2½. Účinnost trysky D8 při použití tlaku 2000 bar je srovnatelná s účinností trysky D14 za stejného tlaku.



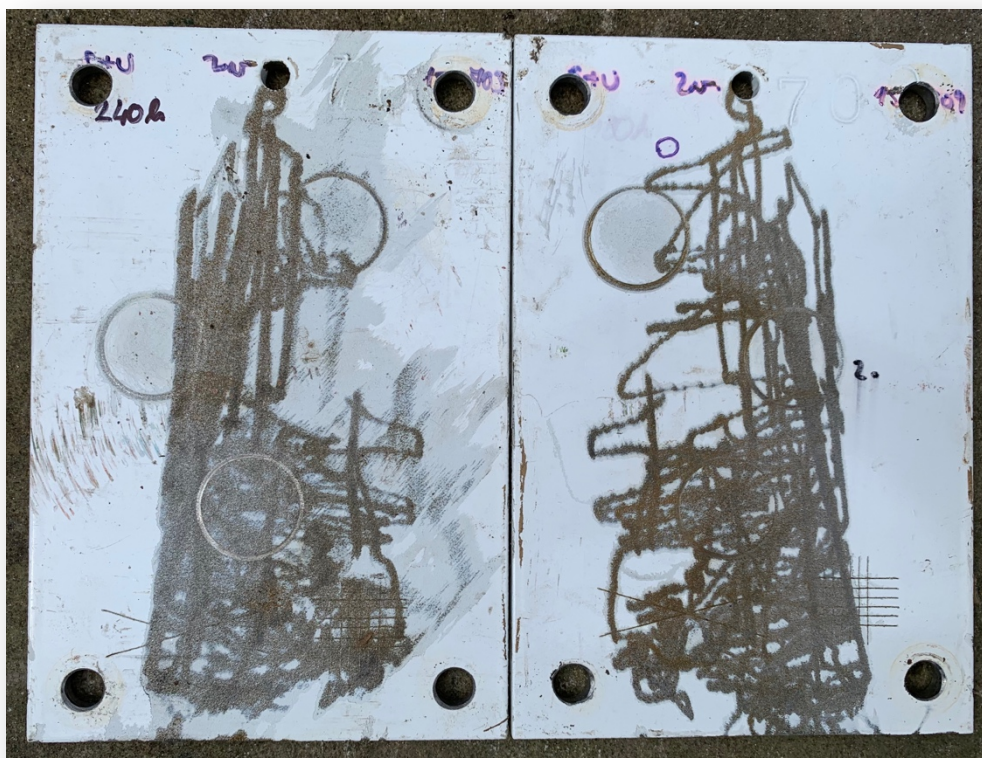
Obrázek 25: Vzorek č. 5 po tryskání tryskou D8 (2000 bar)

V druhé části experimentu byl přimontován nový vzorek č. 6 a nastaven tlak na 2200 bar. Reálné hodnoty tlaku se pohybovaly v rozmezí 2030-2200 bar a průtok vody byl $22 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Tryskací proces trval 180 s a výsledný povrch byl vyhodnocen na stupeň Wa 2½. Oproti tryskání tlakem 2000 bar došlo k minimalizaci reziduí uvnitř tryskané oblasti, tím pádem byl proces rovnoměrnější.



Obrázek 26: Vzorek č. 6 po tryskání tryskou D8 (2200 bar)

V poslední části experimentu s tryskou D8 byl testován tlak 2500 bar. Tato tryska nebyla navržena na takto vysoké tlaky. Cílem tohoto experimentu bylo zjistit, jak dlouho je tryska schopna tryskat s limitním tlakem. Následně byl tento cíl upraven a bylo třeba zjistit, zda dokáže tryska D8 při nastaveném tlaku 2500 bar dosahovat účinnějšího otryskání oproti nižším tlakům a zda bude výsledek obdobný jako v případě trysky D14. Pro tento experiment byl využit vzorek č. 7.



Obrázek 27: Vzorek č. 7 po tryskání tryskou D8 (2500 bar)

První část posledního experimentu trysky D8 trvala 5 minut. Tryska byla testována bez cíle otryskat jakýkoliv vzorek. Na trysce po 5 minutách limitního zatížení nebyla pozorována žádná změna, a tak bylo přistoupeno k tryskání vzorku č. 7 po dobu 180 s. Skutečný tlak se pohyboval v rozmezí 2100-2500 bar a průtok byl celou dobu experimentu konstantní $22 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Přibližně v půlce experimentu se vystupující proud vody z tryskaného vzorku změnil a byl méně intenzivní. Po dokončení experimentu byla zjištěna příčina poklesu intenzity vystupujícího paprsku. Příčinou bylo zborcení 3 ze 4 vývodů zobrazené na obr. 28.



Obrázek 28: Poškozená tryska D8 po limitním testu

Z důvodu poškození trysky je výsledek tryskání neuspokojivý. Voda v tomto případě nedokázala účinně otryskat vzorek č. 7 a došlo převážně k nitkovému otryskání a narušení nátěrových hmot.

3.8.3 Tryskání pomocí trysky D14 s přímým vývodem

V další části experimentu byly ověřovány trysky s přímým vývodem, nejdříve tryska D14. Cílem bylo na ocelové destičce otryskat oblast 40×50 mm. Na zařízení byl nastaven tlak 2000 bar. Během trykacího procesu se však tlak nedostal na požadovanou hodnotu, jelikož byl proces ukončen již při nabíhání tlaku 1600 bar – určená oblast byla otryskána před dosažením výsledného tlaku. Celková doba trykání trvala necelých 20 s včetně náběhu na tlak. Výsledné otryskání povrchu bylo vyhodnoceno na stupeň Wa 2½. Otryskaná oblast je zobrazena na obr. 29 (označena černým ohraničením vpravo dole).

3.8.4 Tryskání pomocí trysky D8 s přímým vývodem

Po montáži trysky D8 s přímým vývodem byl nastaven tlak zařízení na 1500 bar. Průtok vody byl 18 l·min⁻¹. Obdobně jako v kapitole 3.8.3 bylo cílem otryskat oblast 40×50 mm na ocelové destičce. Proces trykání trval 30 s a výsledně otryskaná oblast byla vyhodnocena na stupeň Wa 2½.

Při nastavení tlaku 1800 bar s průtokem $17 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, byla stejná oblast otryskána za 20 vteřin. Oblast byla stejně jako předchozí oblasti hodnocena stupněm Wa 2½ (velmi důkladné otryskání paprskem o vysokém tlaku).



Obrázek 29: Destička po zkoušce přímých trysek, vpravo D14, vlevo D8: nahoře 1500 bar, dole 1800 bar

3.9 Shrnutí poznatků z experimentálního tryskání

Cílem experimentálního ověření trysek bylo získat data, která by mohla potvrdit, zda tryskácké sestavy fungují správně dle navržených specifikací a zda nedochází ke ztrátám těsnosti mezi jednotlivými částmi sestavy. Současně bylo sledováno chování jednotlivých částí sestavy při použití v rámci navrženého rozsahu tlaků, a zda bude tryskácký proces vyhovovat předpokládaným výkonnostním a kvalitativním standardům. Dále byla zkoumána optimální a limitní nastavení tlaků a průtoků pro efektivní využívání v každodenní praxi.

Při montáži sestavy a prvním testování bylo potvrzeno, že využití teflonové těsnící pásky je nutné. Při prvotním testování nebylo těsnění aplikováno mezi redukční částí a tryskáckou pistolí. V rámci testovacího spuštění byla zjištěna v této části netěsnost.

Po demontáži, aplikaci teflonové pásky a opětovné montáži byla netěsnost při dalších pokusech odstraněna.

Ze získaných dat během experimentu s tryskami se čtyřmi vývody je patrné, že nižší tlaky v rozmezí 1500-1800 bar jsou méně účinné než vyšší tlaky 1800-2200 bar pro tryskání stejně velké oblasti. Při použití nižších tlaků docházelo spíše k nitkovitému otryskání a proces nebyl rovnoměrný. Aby bylo možné kvalitně otryskat s nižšími tlaky stejnou oblast jako při použití vyšších tlaků, vyžadovalo by to větší spotřebu vody a mnohem delší časové úseky. Například při použití tlaku 1500 bar a průtoku $18 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ je spotřeba vody vyšší, než při použití tlaku 2000 bar a vyššího průtoku $22 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$.

V případě trysky D14 byla největší účinnost tryskání při nastavených parametrech tlaku 2500 bar a průtoku $22 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. U této trysky lze konstatovat, že vyšší pracovní tlak je přímo úměrný vyšší účinnosti tryskacího procesu. Jelikož je tryska konstruována na tlak 2800 bar, lze předpokládat, že i její životnost při takto vysokém tlaku nebude výrazně ohrožena.

Pro trysku D8 byla největší účinnost pozorována při nastavených parametrech tlaku 2000 a 2200 bar a průtoku $22 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Při testování limitního tlaku 2500 bar byla tryska poškozena po přibližně 8 minutách. Celkově tak tryska D8 byla v provozu více jak 30 minut. Při použití nižších tlaků, například 2000 bar a maximálně 2200 bar, bude její životnost delší. Pro větší přehlednost byly výsledky experimentů s tryskami zaznamenány do tab. 10.

Pro aplikaci trysek s jedním vývodem není potřeba využívat vyšší tlaky, jejich účinnosti jsou vysoké i při využití nižších tlaků do 1800 bar. Lze tedy konstatovat, že navrhovaná konstrukce přímých trysek předčila očekávání.

Tabulka 10: Souhrn poznatků z experimentu

Název	Tryska D8 se čtyřmi vývody				Tryska D14 se čtyřmi vývody			
Testovaný tlak (bar)	1800	2000	2200	2500	1800	2000	2200	2500
Doba tryskání (s)	-	180	180	180	120	180	180	120
Spotřeba vody ($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$)	-	21	22	22	20	20	22	22
Stupeň otryskání	-	2½	2½	2	2	2½	2	2½
Stav po tryskání	-	Beze změny	Beze změny	Tryska poškozena	Beze změny	Beze změny	Beze změny	Beze změny

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Pro experimentální testování navržených úzkých trysek byly vytvořeny čtyři trysky a dvě redukční části spojující tryskací část s pistolí. Trysky byly vyrobeny v páru (tryska se čtyřmi vývody a tryska s jedním přímým vývodem) pro rozměry D8 a D14. Výroba všech trysek byla rozdělena na dvě části. Část přípravná, kterou vyhotovil technik z Ústavu strojírenské technologie fakulty strojní ČVUT a část dokončovací, kterou provedla firma HMC engineering systém, s.r.o. V přípravné části byly z kruhových tyčí připraveny polotovary trysek s výjimkou vnitřní díry a vývodů, dále byly vyhotoveny kompletní redukční části. V části dokončovací byly vyhotoveny otvory a vývody pomocí EDM obrábění. Z hlediska výrobních nákladů byla výroba obou typů trysek téměř shodná, největší rozdíl byl v pořizovací ceně za materiál tryskacích částí. Cena za výrobu redukčních částí byla pro obě varianty stejná.

Účinnost trysek se čtyřmi vývody nelze jednoznačně porovnávat s tryskou s přímým vývodem. Každá varianta byla vyrobena pro jiný typ použití. Tryska s přímým vývodem slouží pro tryskání dna neprůchozích štěrbin, popř. jako vyplachovací tryska. Z kapitol 3.8.3 a 3.8.4 je zřejmé, že optimální pracovní tlaky pro efektivní otryskání jsou nižší (1500-1800 bar), než pro trysky se čtyřmi vývody (1800-2200 bar). Naproti tomu trysky se čtyřmi vývody tryskají obtížně dostupné boky úzkých štěrbin.

Porovnat náklady navržené sestavy s konkurenčními produkty a běžně dostupnými alternativami je obtížné. Na trhu neexistuje žádný dostupný produkt, který by plnil stejnou funkci. Běžně dostupné demoliční a rotační trysky nedokážou tryskat efektivně dostatečně hluboko a trubkové trysky nejsou navrženy pro použití na ruční tryskací pistole, navíc jejich pracovní tlaky jsou mnohem nižší. Výsledná kvalita a produktivita práce takových alternativ je značně horší.

Pro další vývoj by bylo možné provést úpravy vývodů trysek se čtyřmi vývody. Testován by mohl být větší úhel (45°, 50° a 55°) pod kterým jsou vývody vrtány nebo úprava tvaru vývodů, například navržení varianty s podobným ústím jako u trysek Venturiho.

V experimentu se také objevil jev, kdy jedna strana vzorku byla více otryskána oproti druhé. Tento problém by bylo možné eliminovat návrhem trysky, která by byla konstruována pouze s jedním vývodem, který by byl vedený co možná nejvíce proti boku štěrbině

a pod větším úhlem. Zaměření na jeden vývod by bylo jednodušší variantou pro operátora, ale oproti trysce se čtyřmi vývody by proces tryskání byl pomalejší vzhledem k nutnosti provést tryskání na každé straně zvlášť. Navíc by se takový vývod mohl chovat jako vrub a mohlo by docházet k vyššímu namáhání při použití stejných tlaků. Tento problém by mohl být vyřešen úpravou materiálu trysky.

5 ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo navrhnout, vyrobit a otestovat trysky pro kvalitní tryskání vysokotlakým vodním paprskem úzkých štěrbin nacházejících se hlavně na ocelových mostních konstrukcích vyrobených v převážné většině v letech 1850-1960. Teoretická část se věnuje tématu předúprav povrchu a zaměřuje se na tryskání vodním paprskem, konkrétně na trysky pro tuto aplikaci. Dále popisuje metody pro výrobu děr a standardy pro předúpravy ocelových mostních konstrukcí.

V první fázi experimentu proběhl průzkum mostních konstrukcí s problematickými štěrbinami a byla zapsána jejich poloha. Pro účely práce bylo navštíveno 15 mostů v České republice. Dále byly nalezeny další mostní konstrukce v zahraničí, které mají problematické štěrbin. Tento fakt podporuje názor, že se nejedná pouze o problematiku v České republice, ale jedná se o mezinárodní problém. Navštívené konstrukce byly prohlédnuty a naměřeny velikosti štěrbin, které byly rozřazeny do tří kategorií: malé štěrbin (4-13 mm), střední štěrbin (13-30 mm) a velké štěrbin (30 mm a více). Hloubky těchto štěrbin se pohybují nejčastěji v rozmezí 100 až 300 mm. Tato data následně sloužila jako podklad pro druhou návrhovou, konstrukční a výrobní fázi experimentu.

V druhé fázi experimentu byly popsány a řešeny uvažované návrhy tryskacích sestav včetně počtu částí, jejich velikostí, tvarů, způsobu montáže a počtu vývodů a jejich umístění. Byl vytvořen konečný návrh trysek dvojího typu: se čtyřmi vývody a s jedním vývodem. Dále byly provedeny výpočty a zvolen materiál pro tryskací a redukční části. Pro tryskací část byla volena korozivzdorná martenzitická chromová ocel s označením 1.4034, pro redukční část korozivzdorná austenitická chrom-niklová ocel s přísadou síry 1.4305. Materiály se již experimentálně osvědčily a jejich vlastnosti jsou velice uspokojivé vzhledem k výsledkům experimentální části.

Třetí testovací fáze experimentu měla za cíl vyrobené tryskací sestavy vyzkoušet pro definované štěrbin. Zařízení pro realizaci zapůjčila firma Bintana, s.r.o. Byly testovány varianty trysek velikosti D8 a D14, konkrétně jejich varianty se čtyřmi bočními vývody a jedním přímým vývodem. Účinnost trysek s přímým vývodem byla vyšší, než bylo konstruováno, a to i při využití nižších tlaků. Trysky s bočními vývody dokázaly, že jsou schopné otryskat úzké štěrbin do hloubky až 250 mm se stupněm otryskání na úroveň $W_a 2\frac{1}{2}$. Výsledky ukázaly, že nejefektivnější pracovní tlak pro trysku D14 je při hodnotách

2500 bar. Při těchto parametrech došlo k rovnoměrnému a efektivnímu otryskání. Pro trysku D8 bylo z experimentu zjištěno, že její nejvyšší účinnost nastává při použití tlaků 2000-2200 bar. Při použití vyšších tlaků je její životnost snížena a rychle dochází k jejímu poškození.

Pro případné komerční využití je zapotřebí pokračovat ve vývoji, provést další zkoušky životnosti trysek a optimalizovat tryskání obou stran štěrbin rovnoměrně.

Celkově lze konstatovat, že navržené tryskací sestavy jsou jediný způsob, jak efektivně odstranit nevyhovující nátěrové systémy a tím pádem i korozní produkty a nečistoty z vnitřních prostor úzkých štěrbin mostních a jiných konstrukcí se stupněm otryskání $Wa 2 \frac{1}{2}$. Tento stupeň je požadavek stanovený technickým předpisem ministerstva dopravy pro částečnou nebo úplnou obnovu protikorozní ochrany na mostních ocelových konstrukcích.

6 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ, ZKRATEK A JEDNOTEK

ρ	hustota tekutiny ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ΔP	ztráty tlaku prouděním (MPa)
cm	centimetr
EDD	elektroerozivní vrtání (Electrical discharge drilling)
EDM	elektroerozivní obrábění (Electrical discharge machining)
f	koeficient tření
FeCl_3	chlorid železitý
H_2SO_4	kyselina sírová
$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$	kilogram na krychlový centimetr
kW	kilowatt
$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$	litr za minutu
l_{max}	maximální délka vnitřní části trysky (mm)
$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	metr za sekundu
mm	milimetr
MPa	megapascal
NaOH	hydroxid sodný
NMO	nekonvenční metody obrábění
p_1	tlak vnitřní (MPa)
$p_{1\text{Max}}$	maximální vnitřní tlak (MPa)
p_2	tlak vnější (MPa)
PKO	protikoroziční ochrana
r_m	poloměr vnitřní (mm)
r_v	poloměr vnější (mm)
v	rychlost tekutiny ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
η	dynamická viskozita látky
σ_D	napětí dovolené ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)
σ_{red}	napětí redukované

7 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Kvalifikační stupně stavu mostních konstrukcí [48].....	27
Tabulka 2: Návrhová životnost konstrukcí [49]	28
Tabulka 3: Vybrané mostní konstrukce v České republice	33
Tabulka 4: Vybrané mostní konstrukce v zahraničí	34
Tabulka 5: Stav vybraných mostních konstrukcí	35
Tabulka 6: Rozměry štěrbin na vybraných mostních konstrukcích	36
Tabulka 7: Výsledky výpočtů	46
Tabulka 8: Mechanické vlastnosti vybraných ocelí [57] [58].....	50
Tabulka 9: Chemické složení vybraných ocelí (v procentech) [57] [58]	51
Tabulka 10: Souhrn poznatků z experimentu.....	62

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Koroze na mostní konstrukci.....	10
Obrázek 2: Princip metacího kola [59]	14
Obrázek 3: Schéma injektorové tryskacího zařízení [60]	15
Obrázek 4: Ukázka procesu tryskání vodním paprskem [17]	17
Obrázek 5: Hydrodemolice v praxi [21].....	19
Obrázek 6: Přímé trysky [28].....	20
Obrázek 7: Schéma Venturiho trysky [34].....	21
Obrázek 8: Trubkové trysky [37]	22
Obrázek 9: Princip EDM obrábění (vlevo) a způsoby přívodu dielektrika (vpravo) [43].....	25
Obrázek 10: Postup navrhování PKO [49]	27
Obrázek 11: Korozní produkty uvnitř konstrukcí (vlevo – 5, uprostřed 6–a vpravo – 13).....	37
Obrázek 12: Schéma třídílné tryskací sestavy v řezu.....	39
Obrázek 13: Návrh trysky s označením 1	41
Obrázek 14: Návrh trysky s označením 2	42
Obrázek 15: Vyrobená tryska s přímým a bočními vývody	43
Obrázek 16: Výřez výkresu redukční části LH_M8	48
Obrázek 17: Výřez výkresu redukční části LH_M12	48
Obrázek 18: Model původní sestavy	49
Obrázek 19: Upevněný vzorek	51
Obrázek 20: Tryskací sestava D14 se čtyřmi vývody připevněná na pistoli.....	52
Obrázek 21: Vzorek č. 1 po tryskání tryskou D14 (1800 bar)	53
Obrázek 22: Vzorek č. 2 po tryskání tryskou D14 (2000 bar)	54
Obrázek 23: Vzorek č. 3 po tryskání tryskou D14 (2200 bar)	55
Obrázek 24: Vzorek č. 4 po tryskání tryskou D14 (2500 bar)	56
Obrázek 25: Vzorek č. 5 po tryskání tryskou D8 (2000 bar)	57
Obrázek 26: Vzorek č. 6 po tryskání tryskou D8 (2200 bar)	58
Obrázek 27: Vzorek č. 7 po tryskání tryskou D8 (2500 bar)	59
Obrázek 28: Poškozená tryska D8 limitním testu.....	60
Obrázek 29: Destička po zkoušce přímých trysek, vpravo D14, vlevo D8: nahoře 1500 bar, dole 1800 bar	61

9 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 Fotodokumentace vzorků a naměřené hodnoty nátěrových hmot (uvedené hodnoty v μm)

Příloha č.2 Výkres tryskací části D8_1 vývod

Příloha č.3 Výkres tryskací části D8_4 vývody

Příloha č.4 Výkres tryskací části D14_1 vývod

Příloha č.5 Výkres tryskací části D14_4 vývody

Příloha č.6 Výkres redukční části LH_M8

Příloha č.7 Výkres redukční části LH_M12

10 ZDROJE

- [1] *Ultra-High-Pressure Waterjetting* [online]. 2012: Technology Publishing Company 2100 Wharton Street, Suite 310 Pittsburgh, PA 15203 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: https://www.paintsquare.com/store/assets/JPCL_uhp_ebook1.pdf
- [2] ČESKÁ REPUBLIKA. *OPRAVY, OBNOVY A PŘESTAVBY OCELOVÝCH NOSNÝCH KONSTRUKCÍ MOSTŮ: Metody a technologie k zvýšení zatížitelnosti a prodloužení životnosti*. In: . 2020, ročník 2020, MD-5363/2021-120/2. Dostupné také z: <https://pjpk.rsd.cz/uvodni-strana/nove-schvaleny-technicky-predpis-ministerstva-d10>
- [3] ING. KREIBICH VIKTOR, CSC. a RNDR. KAREL HOCH. *Koroze a technologie povrchových úprav*. Druhé. Praha: České vysoké učení technické, 1991.
- [4] PROCHÁZKA, Jiří, Miroslav ZAHRADNÍK a Milan NĚMEC. *Technologie slévání, tváření a svařování*. První. Praha: České vysoké učení technické, 1982. Učební texty vysokých škol.
- [5] ING. KREIBICH VIKTOR, CSC. *Příčiny a důsledky nevhodných aplikací povrchových úprav*. První. Praha: České vysoké učení technické, 2004. ISBN 8001031209.
- [6] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 8070826681.
- [7] HESTON, Tim. The basics of wheel blasting: The fundamentals of wheel blasting for part cleaning and paint prep. *The Fabricator* [online]. 2013 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/finishing/the-basics-of-wheel-blasting>
- [8] Tryskací zařízení s metacími koly. In: *Www.oteco.cz* [online]. [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.oteco.cz/cz/produkty/metaci-kola/>
- [9] HANSEL, Dave. Abrasive blasting systems. In: *Metal Finishing* [online]. 2000, , s. 26-42 [cit. 2023-02-16]. ISSN 00260576. Dostupné z: doi:10.1016/S0026-0576(00)80389-X
- [10] INJEKTOROVÉ TRYSKACÍ (PÍSKOVACÍ) KABINY. In: *Www.spolmont.cz* [online]. [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.spolmont.cz/injektorove-kabiny>
- [11] *ABRASIVE BLASTING OPERATIONS: Engineering Control and Work Practices Manual*. In: . Washington, D.C.: u.s. DEPARTMENT OF HEALTH, EDUCATION, AND WELFARE Public Health Service, 1976, ročník 1976, číslo 210-75-0029. Dostupné také z: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/76-179/pdfs/76-179.pdf?id=10.26616/NIOSH PUB76179>
- [12] *ACHIEVING EFFICIENCY IN ABRASIVE BLAST CLEANING* [online]. Technology Publishing Company 2100 Wharton Street, Suite 310 Pittsburgh, PA 15203, 2012 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: https://www.paintsquare.com/store/assets/jpcl_abrbblast_ebook.pdf
- [13] MÁŠA, Vítězslav a Pavel KUBA. Efficient use of compressed air for dry ice blasting. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2016, (111), 76-84 [cit. 2023-02-16]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.053

- [14] MOMBER, Andres W. *Hydrodemolition of Concrete Surfaces and Reinforced Concrete Structures*. Oxford, UK: Elsevier Advanced Technology, 1959. ISBN 185617 4603.
- [15] What is Hydro Jetting?. In: *Whatispiping.com* [online]. [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://whatispiping.com/hydrojetting/>
- [16] THE BASICS OF HIGH PRESSURE CLEANING. In: *Cleanfax.com* [online]. [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://cleanfax.com/technical-tip/basics-high-pressure-cleaning/>
- [17] Efficient cleaning by high pressure water jets. In: *Www.uraca.com* [online]. [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.uraca.com/en/applications/cleaning/high-pressure-water-jets/>
- [18] KARCHER Multi-Power-Jet MJ 180 FC (K7 FC Plus, K7 Premium FC Plus) 26439070. In: *Www.doktorkladivo.cz* [online]. [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <https://www.doktorkladivo.cz/karcher-pracovni-nastavec-multi-jet-180-full-control-3v1-pro-k-7-fc-plus-a-k-7-premium-fc-plus?paginator-page=1>
- [19] AANDERUD, Jim. Understanding Nozzles and How They Work. In: *Www.mswmag.com* [online]. 2015 [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: https://www.mswmag.com/online_exclusives/2015/12/understanding_nozzles_and_how_they_work
- [20] Aqua Cutter 710V. In: *Aquajet.se* [online]. [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://aquajet.se/products/aqua-cutter-710v/>
- [21] HYDRODEMOLICE. In: *Www.hdrservis.cz* [online]. [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://www.hdrservis.cz/hydrodemolice-betonu/>
- [22] HYDRODEMOLITION. In: *Www.conjet.com* [online]. [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://www.conjet.com/hydrodemolition/>
- [23] Africatuff.co.za. In: *HYDRO DEMOLITION* [online]. [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: <https://africatuff.co.za/hydro-demolition/>
- [24] Rotační a přímé trysky. In: *Www.aqpumpy.cz* [online]. [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <https://www.aqpumpy.cz/produkty/standardni-prislusenstvi/rotacni-a-prime-trysky>
- [25] Řezací hlava PASER 4. In: *Www.flowwaterjet.cz* [online]. [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/Rezaci-Hlavy/Standardni>
- [26] A Guide to Blasting Nozzle Selection. In: *Www.kennametal.com* [online]. [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <https://www.canfieldjoseph.com/assets/files/Industrial/Blast-Parts-Accessories/Nozzles/Kennametal/Kennametal-Guide-to-Blasting-Nozzle-Selection.pdf>
- [27] Spray nozzles and equipment for cleaning. In: *Www.spray-nozzle.co.uk* [online]. [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: <https://www.spray-nozzle.co.uk/spray-nozzle-applications/cleaning>
- [28] BLAST NOZZLES. In: *Www.hollandmineraal.com* [online]. [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <https://www.hollandmineraal.com/delivery-program/blast-nozzles/>
- [29] Pressure Washer Nozzles Explained. In: *Www.kerrick.com.au* [online]. [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: <http://www.kerrick.com.au/about/hints-tips-and-faqs/pressure-washer-nozzles-explained.aspx>

- [30] O tryskách. In: *Www.ejektory.cz* [online]. [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: https://www.ejektory.cz/trysky_bete.html
- [31] ROTARY, STRAIGHT, PIPE & TUBE CLEANING NOZZLES. In: *Www.waterblast.com* [online]. [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: [http://www.waterblast.com/uploadedFiles/Site/Service_and_Support/Resources/20K_Section%20G_02-25-2015\(1\).pdf](http://www.waterblast.com/uploadedFiles/Site/Service_and_Support/Resources/20K_Section%20G_02-25-2015(1).pdf)
- [32] SETTLES, G.S. a S. GARG. *A Scientific View of the Productivity of Abrasive Blasting Nozzles* [online]. 1996, 7 [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Gary-Settles/publication/225753713_A_scientific_view_of_the_productivity_of_abrasive_blasting_nozzles/links/55c38d2608aea2d9bdc1c090/A-scientific-view-of-the-productivity-of-abrasive-blasting-nozzles.pdf
- [33] Venturiho efekt. In: *Wikijii.com* [online]. [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: https://wikijii.com/wiki/venturi_effect
- [34] Venturiho trysky – původ, funkce a přínos. In: *Www.wista-shop.cz* [online]. [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <https://www.wista-shop.cz/venturiho-trysky-%E2%80%93-puvod-funkce-a-prinos>
- [35] Pressure Washer Nozzles 101: Everything You Need To Know. In: *Pressurewashr.com* [online]. [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: <https://pressurewashr.com/pressure-washer-nozzles-101/>
- [36] INTERNAL PIPE BLAST NOZZLES 360°L. In: *Www.contracor.eu* [online]. [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: http://www.contracor.eu/abrasive/nozzles/PTC_360L.html
- [37] TYPHOON™ SELF-ROTATING NOZZLES. In: *Www.nlbcorp.com* [online]. [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://www.nlbcorp.com/shop/nozzles/typhoon-self-rotating-nozzles/>
- [38] ABRASIVE BLAST NOZZLES. In: *Www.kennametal.com* [online]. [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: <https://www.kennametal.com/us/en/products/carbide-wear-parts/abrasive-blast-nozzles.html>
- [39] HUMÁR, Anton. Technologie I: Technologie obrábění - 2. část. In: *Ust.fme.vutbr.cz* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2004 [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-2cast.pdf
- [40] SCHMEIDER, George. *Cutting Tool Applications*. Soutfield: gmrs@hotmail.com, 2002. ISBN 9780615121918.
- [41] *Metal Cutting Theory and Practice*. 3rd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2016. ISBN 9781315373119.
- [42] Vrtání hlubokých otvorů na obráběcích centrech. *Průmyslové spektrum* [online]. **2006(60707)** [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vrtani-hlubokych-otvoru-na-obrabecich-centrech>
- [43] BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. První. Praha: České vysoké učení technické, 1989. ISBN 80-8057-091-4.
- [44] *SELECTING THE APPROPRIATE EDM TECHNOLOGY FOR HOLE-DRILLING APPLICATIONS* [online]. Metaalmagazine, 2014 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: https://www.metaalmagazine.nl/wp-content/uploads/2015/02/Makino_EDM_White_Paper_Final-1.pdf

- [45] RISTO, M., R. HAAS a M. MUNZ. *Optimization of the EDM drilling process to increase the productivity and geometrical accuracy*. Karlsruhe University of Applied Science, Stuttgart, Germany, 2016.
- [46] The Basics of High-Speed EDM Hole Drilling. In: *Www.moldmakingtechnology.com* [online]. 2000 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/the-basics-of-high-speed-edm-hole-drilling>
- [47] ČESKÁ REPUBLIKA. *Zákon o pozemních komunikacích*. In: . 1997, 3/1997, Zákon č. 13/1997 Sb. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1997-13>
- [48] ČSN 73 6221. *Prohlídky mostů pozemních komunikací*. ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. 2018.
- [49] ING. KORBELÁŘ, Jaroslav a Hana ING. GEIPLOVÁ. Protikorozi ochrana kovových konstrukcí (TP 3.2). In: *Profesis.ckait.cz* [online]. [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: <https://profesis.ckait.cz/dokumenty-ckait/tp-3-2/>
- [50] ČSN EN ISO 12944-1 (038241). *Nátěrové hmoty - Protikorozi ochrana ocelových konstrukcí ochrannými nátěrovými systémy - Část 1: Obecné zásady*. 2018.
- [51] ČSN ISO 8501-1. *Příprava ocelových povrchů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků - Vizuelní vyhodnocení čistoty povrchu - Část 1: Stupně zarezavění a stupně přípravy ocelového podkladu bez povlaku a ocelového podkladu po úplném odstranění předchozích povlaků*. Český normalizační institut, 1998.
- [52] ČSN ISO 8501-2. *Příprava ocelových povrchů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků - Vizuelní vyhodnocení čistoty povrchu - Část 2: Stupně přípravy dříve natřeného ocelového podkladu po místním odstranění předchozích povlaků*. Český normalizační institut, 1998.
- [53] ČSN EN ISO 8501- 4. *Příprava ocelových povrchů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků - Vizuelní vyhodnocení čistoty povrchu - Část 4: Výchozí stav povrchu, stupně přípravy a bleskové koroze po vysokotlakém tryskání vodou*. Český normalizační institut, 2007.
- [54] ČESKÁ REPUBLIKA. *PROTIKOROZNÍ OCHRANA OCELOVÝCH MOSTŮ A KONSTRUKCÍ PŘI OPRAVÁCH A REKONSTRUKCÍCH*. In: . Praha, 2020. Dostupné také z: <https://pjpk.rsd.cz/uvodni-strana/nove-schvaleny-technicky-predpis-ministerstva-d11>
- [55] LERACH, Ondřej. *Vývoj a experimentální ověření trysky pro vysokotlaké tryskání do úzkých štěrbin*. Praha, 2021. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jan Kudláček, Ph.D.
- [56] LERACH, O. a J. KUDLÁČEK. *Development And Experimental Verification Of A Nozzle For High-Pressure Blasting In Narrow Slots*. Technological Forum: Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2022. ISBN 978-80-87583-36-4.
- [57] ŘEZNÍČEK, Jan a Jitka ŘEZNÍČKOVÁ. *Pružnost a pevnost v technické praxi: příklady III*. První. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-800-1039-472.
- [58] Laminární a turbulentní proudění. In: *Physics.mff.cuni.cz* [online]. [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/4_5
- [59] KUDLÁČEK, J., O. LERACH, M. ZOUBEK a J. SVOBODA. *Tryska pro čištění úzkých štěrbin ocelových konstrukcí*. 2021. Funkční vzorek. Zapsáno 2021.

- [60] 1.4034 nerezová ocel. In: *Www.kipp.cz* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.kipp.cz/cz/cs/Slu%C5%BEby/P%C5%99ehled-materi%C3%A1l%C5%AF/nerezov%C3%A1-ocel/1-4034-nerezov%C3%A1-ocel.html>
- [61] 1.4305 nerezová ocel. In: *Www.kipp.cz* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.kipp.cz/cz/cs/Slu%C5%BEby/P%C5%99ehled-materi%C3%A1l%C5%AF/nerezov%C3%A1-ocel/1-4305-nerezov%C3%A1-ocel.html>
- [62] Wheel blasting. In: *Www.pfonline.com* [online]. [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.pfonline.com/articles/mechanical-finishing-qa-blasting-steel-parts-to-clean-and-profile-for-coating-adhesion-specifications->
- [63] Injektorová pískovací kabina SM-HM-36.1. In: *Www.pkit.cz* [online]. [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.pkit.cz/37424.injektorova-piskovaci-kabina-sm-hm-36-1-1-ks/>

11 PŘÍLOHY

Fotodokumentace vzorků a naměřené hodnoty tloušťek nátěrových hmot (uvedené hodnoty v μm)



Vzorek č. 1 před tryskáním



Vzorek č. 2 před tryskáním

126	117	121	124
56	126	124	131
139	131	126	130
139	121	125	131
136	130	125	125

99	97	35	90
100	98	93	90
103	45	93	93
103	102	28	92
105	95	97	94

Vzorek č. 3 před tryskáním

153	164	169	156
174	175	178	168
193	189	181	181
185	190	200	265
189	208	236	221

56	50	44	54
65	70	45	52
67	67	70	55
66	66	60	89
80	77	78	76

Vzorek č. 4 před tryskáním

184	191	201	194
181	198	227	212
184	182	227	207
194	181	195	196
206	226	200	211

215	214	225	263
214	231	248	266
251	243	266	282
238	238	280	281
239	223	244	294

Vzorek č. 5 před tryskáním

241	235	244	253
240	236	244	233
221	237	225	226
217	227	209	214
194	199	191	198

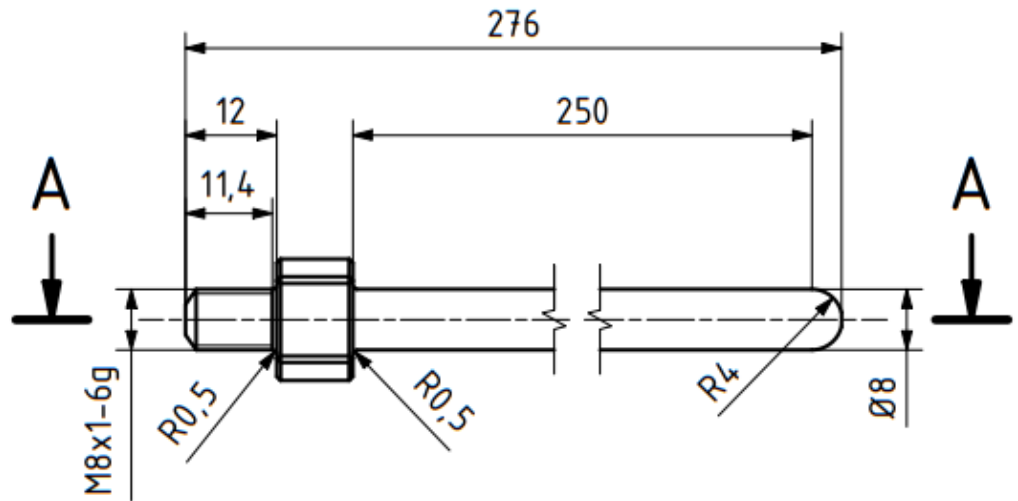
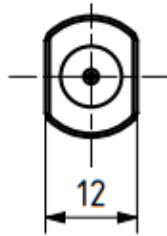
187	199	218	195
213	202	214	194
197	211	207	215
219	202	211	199
177	211	196	183

Vzorek č. 6 před tryskáním

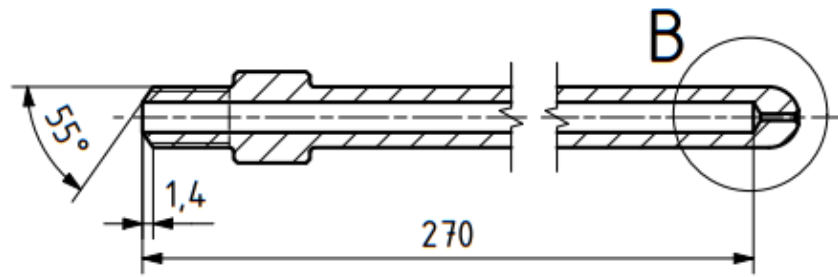
110 2402	111	111	108
120	110	98	112
127	105	111	102
128	116	108	103
114	107	103	99

90	86	89	95
94	91	96	103
96	94	50	108
101	96	98	108
96	92	93	94

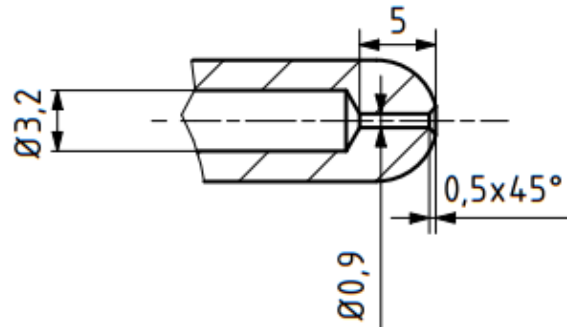
Vzorek č. 7 před tryskáním



A-A



B (2 : 1)



MATERIÁL: 1.4034
 POLOTOVAR: - TYČ KRUHOVÁ Ø16 - 290
 TOLEROVÁNÍ DLE ISO 8015 ISO 14405-1
 PŘESNOST ISO 2768 - mK ISO 14405-3
 VŠEOB. TOL. ISO 8062 -

ISO 13715
 +0,5
 +0,1
 -0,2
 -0,5

INDEX ZMĚNA DATUM PODPIS

NAVŘEL	Autor	Datum	Podpis	Datum	HMOTNOST 0,091 kg	MĚŘÍTKO
KRESLIL	Bc. Ondřej Lerach	10.12.2022	PREZK.		SESTAVA	1:1 (2:1)
	Bc. Ondřej Lerach	10.12.2022	SCHVALIL		SEZNAM ČÁSTÍ	PROMÍTÁNÍ: (ISO E)

NÁZEV Tryska D8 - 1 vývod
 TYP: VV

ČÍSLO VÝKRESU 01-0001
 LIST: 1/1

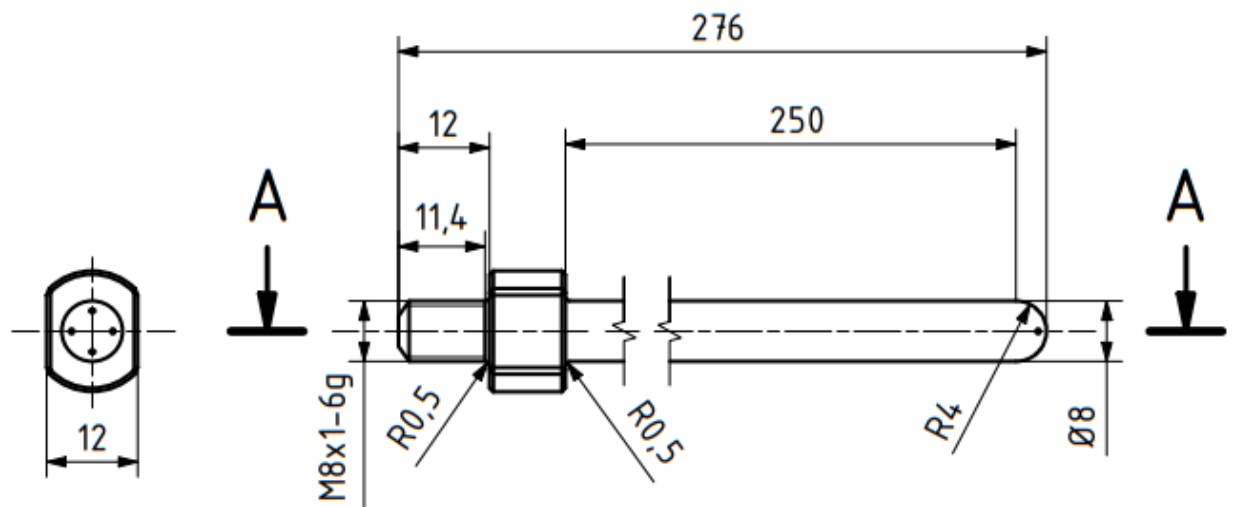


ČESKÉ
 VYSOKÉ
 UČENÍ
 TECHNICKÉ
 V PRAZE

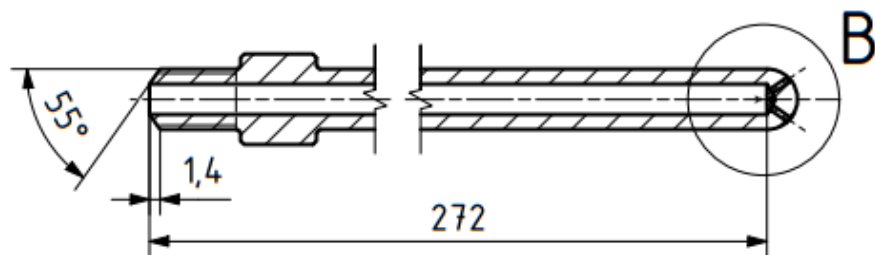
FAKULTA
 STROJNÍ

v21.1

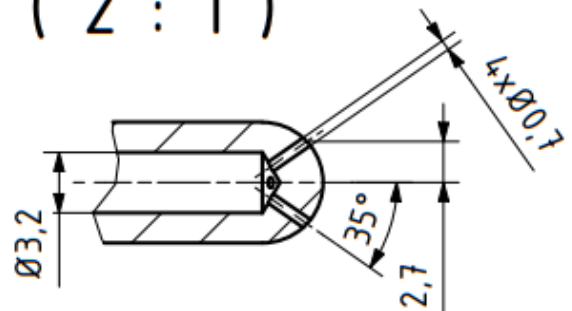
CHRÁNĚNO DLE ISO 16016



A-A



B (2 : 1)



MATERIÁL: 14034
 POLOTOVAR: - TYČ KRUHOVÁ Ø16 - 290
 TOLEROVÁNÍ DLE ISO 8015 ISO 14405-1
 PŘESNOST ISO 2768 - mK ISO 14405-3
 VŠEOB. TOL. ISO 8062 -

ISO 13715
 $\begin{matrix} +0,5 \\ +0,1 \end{matrix}$
 $\begin{matrix} -0,2 \\ -0,5 \end{matrix}$

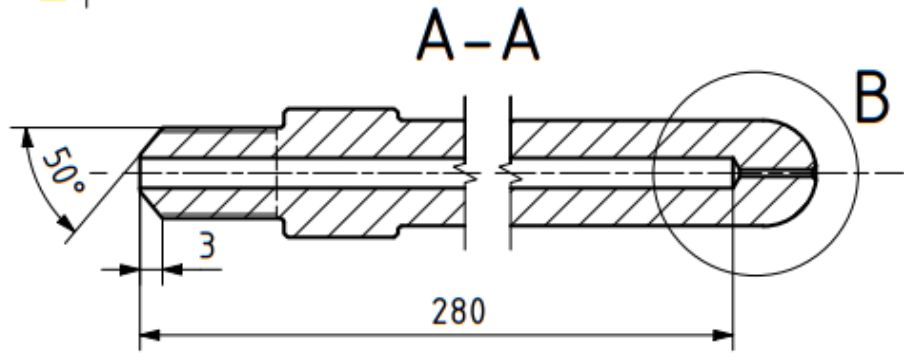
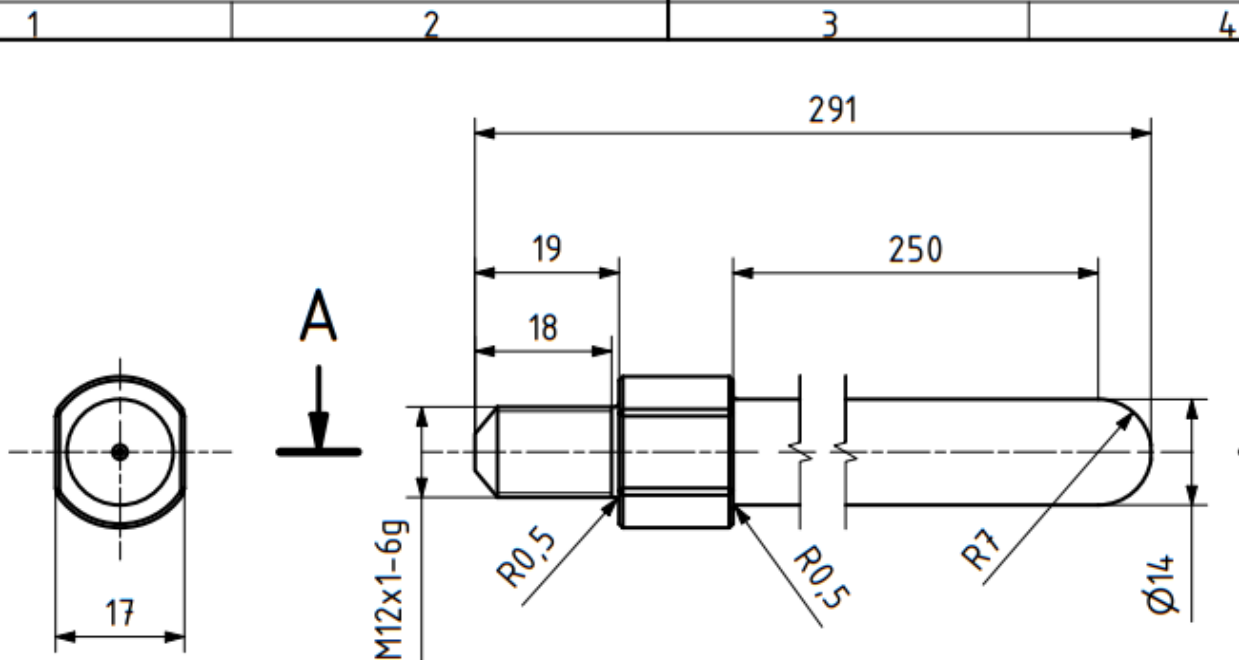
INDEX ZMĚNA DATUM PODPIS

NAVŘHL	Bc. Ondřej Lerach	Datum	10.12.2022	PŘEZK.		HMOTNOST	0,091 kg	MĚŘÍTKO	1:1 (2:1)
KRESLIL	Bc. Ondřej Lerach	Datum	10.12.2022	SCHVÁLIL		SESTAVA		PROMÍTÁNÍ	⊕ (ISO E)
						SEZNAM ČÁSTÍ		TYP: VV	

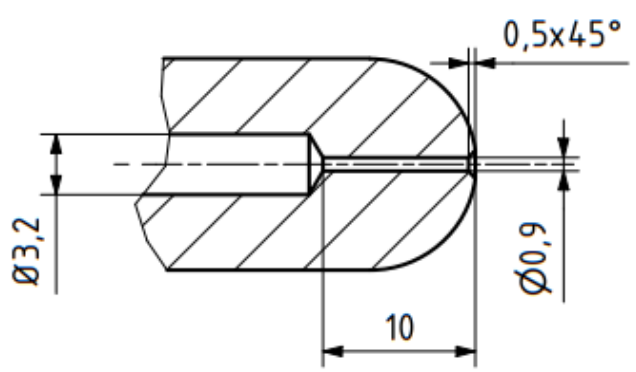
 ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STROJNÍ <small>v21.1</small>	NÁZEV Tryska D8 - 4 vývody
	ČÍSLO VYKRESU 01-0002

LIST: 1/1

CHRÁNĚNO DLE ISO 16016




B (2 : 1)

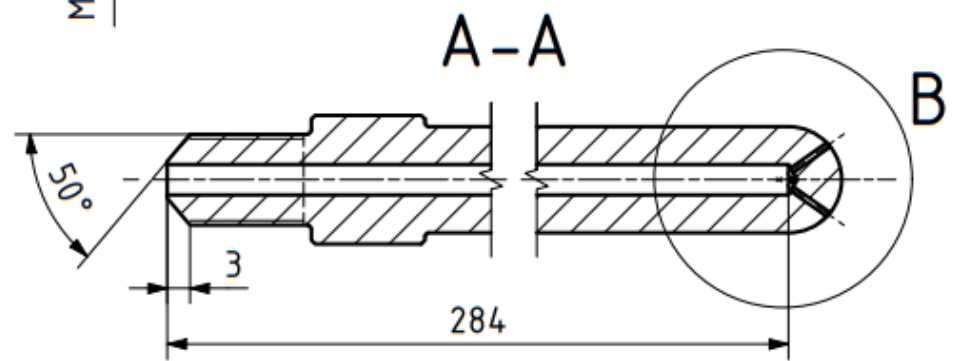
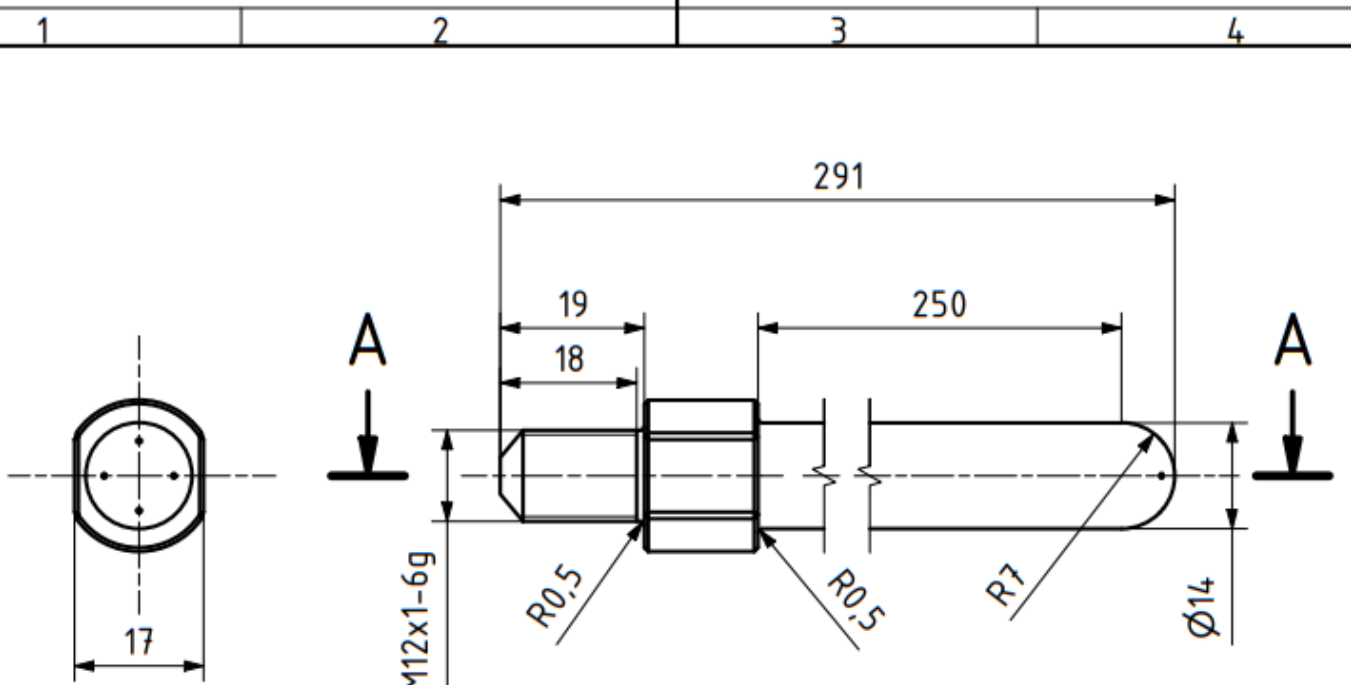


MATERIÁL: 14034		ISO 13715					
POLOTOVAR: - TYČ KRUHOVÁ Ø20 - 300		+0,5 +0,1		-0,2 -0,5			
TOLEROVÁNÍ DLE ISO 8015		ISO %405-1					
PŘESNOST ISO 2768 - mK		ISO %405-3					
VŠEOB. TOL. ISO 8062 -				INDEX		ZMĚNA	
				DATUM		PODPIS	

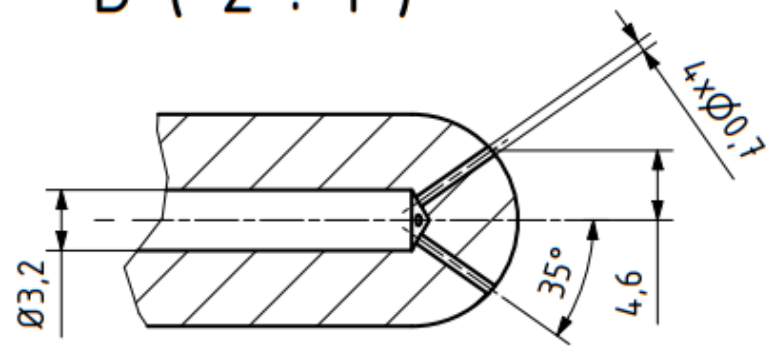
Autor		Datum		Podpis		HMOTNOST 0,330 kg		MĚŘÍTKO	
NAVRHL Bc. Ondřej Lerach		10.12.2022		PŘEZK.		SESTAVA		1:1 (2:1)	
KRESLIL Bc. Ondřej Lerach		10.12.2022		SCHVÁLIL		SEZNAM ČÁSTÍ		PROMÍTÁNÍ: (ISO E)	

 ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE		FAKULTA STROJNÍ v21.1		NÁZEV Tryskační část D14_1 vývod		ČÍSLO VÝKRESU 01-0003		LIST: 1/1	
--	--	---------------------------------	--	--	--	---------------------------------	--	-----------	--

CHRÁNĚNO DLE ISO 16016



B (2 : 1)



MATERIÁL: 1.4034	
POLOTOVAR: - TYČ KRUHOVÁ Ø20 - 300	
TOLEROVÁNÍ DLE ISO 8015	ISO 14405-1
PŘESNOST ISO 2768 - mK	ISO 14405-3
VŠEOB. TOL. ISO 8062 -	

ISO 13715	+0,5 +0,1	-0,2 -0,5
-----------	--------------	--------------

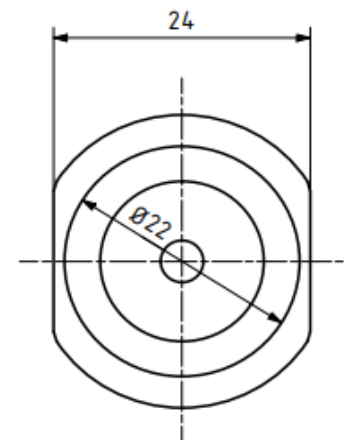
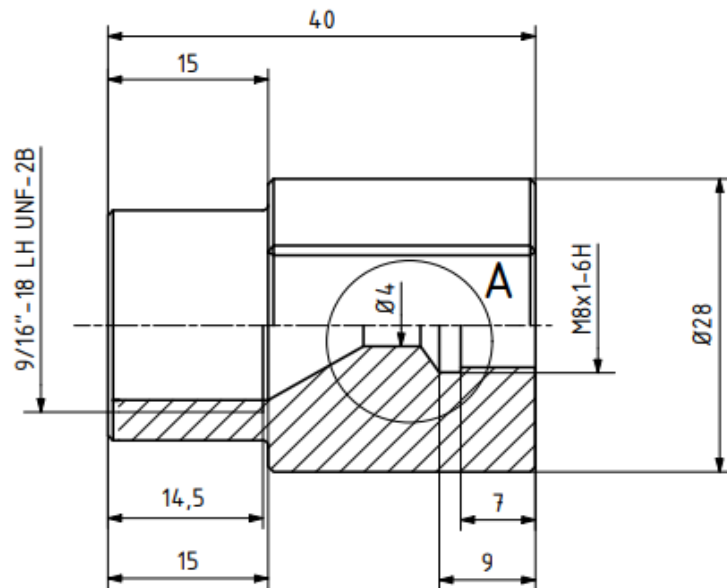
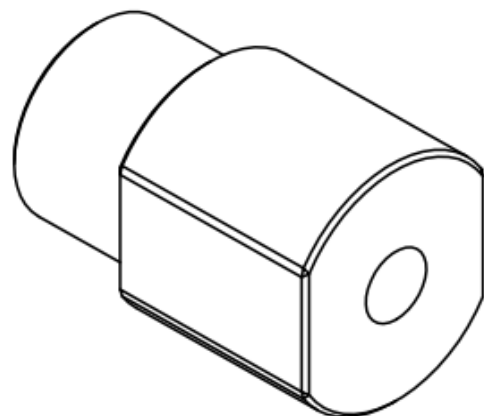
INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS
-------	-------	-------	--------

NAVŘHL	Aut. Bc. Ondřej Lerach	Datum	10.12.2022	PŘEZK.		HMOTNOST	0,330 kg	MĚŘÍTKO	1:1 (2:1)
KRESLIL	Bc. Ondřej Lerach	Datum	10.12.2022	SCHVÁLIL		SESTAVA		PROMÍTÁNÍ	☐ (ISO E)

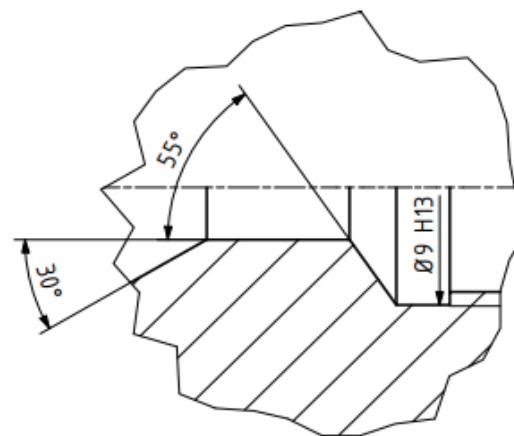


NÁZEV	Tryska D14 - 4 vývod
ČÍSLO VÝKRESU	01-0004
	LIST: 1/1

CHRÁNĚNO DLE ISO 16016

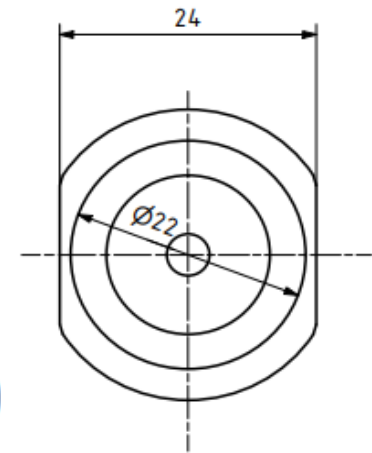
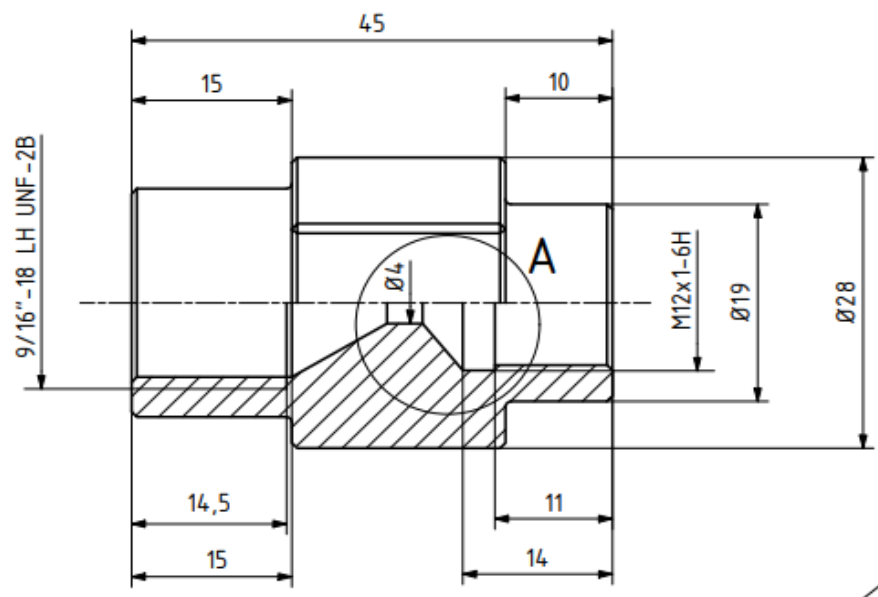


A (5 : 1)

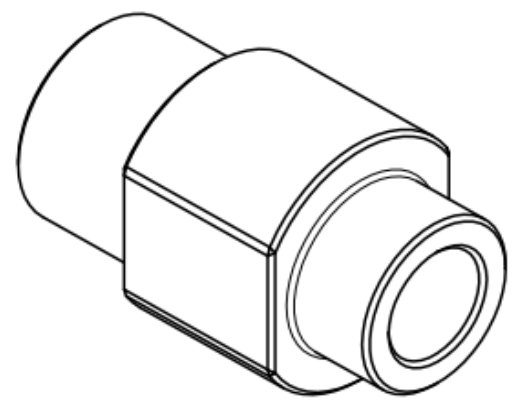
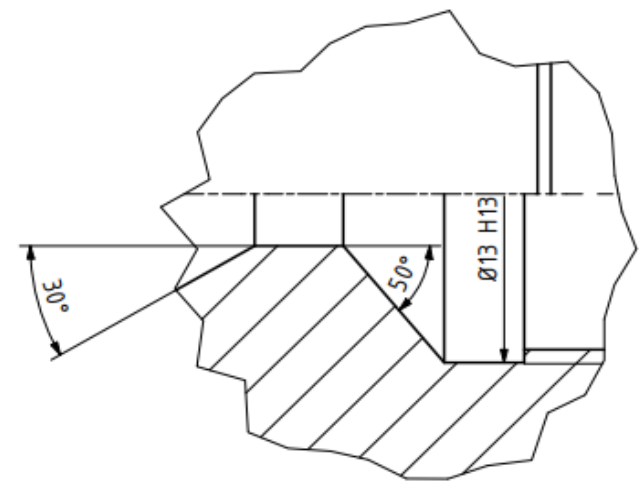


VŠECHNY HRANY SRAŽENY NA 0,5x45°

MATERIÁL: 1.4305		ISO 13715		+0,5	-0,2				
POLOTOVAR: - TYČ KRUHOVA Ø28 - 45				+0,1	-0,5				
TOLEROVÁNÍ DLE ISO 8015		ISO 14405-1							
PŘESNOST ISO 2768 - mK		ISO 14405-3							
VŠEOB. TOL. ISO 8062 -									
	Autor	Datum	Podpis	Datum	HMOTNOST 0,029 kg	MĚŘÍTKO			
NAVRHL	Bc. Ondřej Lerach	10.12.2022	PŘEZK.		SESTAVA	2:1 (5:1)			
KRESLIL	Bc. Ondřej Lerach	10.12.2022	SCHVÁLIL		SEZNAM ČÁSTÍ	PROMĚTANÍ	ISO E 1		
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE		FAKULTA STROJNÍ		NAZEV		Redukční část LH_M8			
				ČÍSLO VÝKRESU		02-0002			
						LIST: 1/1			



A (5 : 1)



VŠECHNY HRANY SRAŽENY NA 0,5x45°

MATERIÁL - 1430S		POLOTOVAR - TYČ KRUHOVÁ Ø28 - 50		ISO 13715		+0,5 +0,1		-0,2 -0,5		INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS
TOLEROVÁNÍ DLE ISO 8015		ISO 14405-1		PŘESNOST ISO 2768 - mK		ISO 14405-3							
VSEOB. TOL. ISO 8062 -													
NAVRH	Bc. Ondřej Lerach	Datum	10.12.2022	PŘEZK		Podpis		Datum		HMOTNOST	Neni k dispozici	MĚŘÍTKO	2:1 5:1
KRĚSLIL	Bc. Ondřej Lerach	Datum	10.12.2022	SCHVÁLIL						SEZNAM ČÁSTÍ		PROJÍMÁNÍ	ISO E 1
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE		FAKULTA STROJNÍ		NAZEV		Redukční část LH_M12		TYP: VV					
				ČÍSLO VÝKRESU		02_0004							