



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

**VÝVOJ A EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ TRYSKY
PRO VYSOKOTLAKÉ TRYSKÁNÍ DO ÚZKÝCH ŠTĚRBIN**

DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF A NOZZLE FOR HIGH-PRESSURE
BLASTING IN NARROW SLOTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR:

Author

Ondřej Lerach

VEDOUcí PRÁCE:

Supervisor

Ing. Jan Kudláček, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM:

Study programme

B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR:

Field of study

2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Praha 2021

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

V první řadě bych chtěl poděkovat Ing. Janu Kudláčkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, připomínky a konzultace při tvorbě bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Kláře Štumarové za odbornou pomoc při zpracování a konzultacích. Děkuji firmě Bintana s.r.o. za pomoc při realizaci experimentu a v neposlední řadě technikům z Ústavu strojírenské technologie fakulty strojní ČVUT za pomoc s výrobou trysky.

Anotace

Název diplomové práce:	Vývoj a experimentální ověření trysky pro vysokotlaké tryskání do úzkých štěrbin
Autor práce:	Ondřej Lerach
Vedoucí práce:	Ing. Jan Kudláček, Ph.D.
Akademický rok:	2020/2021
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Rozsah práce:	42 stránek, 3 tabulky, 28 obrázků
Klíčová slova:	Vysokotlaké tryskání, tryskání štěrbin, tryska, vývoj trysky

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vývojem a experimentálním ověřením trysky pro vysokotlaké tryskání do úzkých štěrbin. Teoretická část se zaměřuje na problematiku předúpravy povrchů a s tím spojené hodnocení kvality povrchu po otryskání. Detailněji je rozebrána kapitola tryskání vodním paprskem (waterblasting), která je předmětem experimentální části. Pro experiment byla navržena trysková sestava splňující specifické parametry pro tryskání do štěrbin mostních konstrukcí. Efektivita tryskové sestavy byla následně odzkoušena na zkušebních vzorcích.

Annotation

Title of the final thesis:	Development and experimental verification of nozzle for high pressure blasting in narrow slots
Author:	Ondřej Lerach
Supervisor:	Ing. Jan Kudláček, Ph.D.
Academic year:	2020/2021
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Extent:	42 pages, 3 tables, 28 pictures
Keywords:	High pressure blasting, slot blasting, nozzle, nozzle development

Abstract:

This bachelor thesis deals with the development and experimental verification of a nozzle for high pressure blasting into narrow slots. The theoretical part focuses on the issue of surface pre-treatment and the associated evaluation on surface quality after blasting. The chapter of waterblasting, which is the subject of the experimental part, is discussed in more detail. A nozzle assembly meeting specific parameter for blasting into the gaps of bridge structures was designed for the experiment. The efficiency of the nozzle assembly was then tested on test specimens.

OBSAH

1	Úvod	9
2	Teoretická část	10
2.1	Předúpravy povrchu	10
2.1.1	Chemické úpravy povrchu	10
2.1.2	Mechanické úpravy povrchu	11
2.2	Tryskání	13
2.2.1	Mechanické tryskání	14
2.2.2	Pneumatické tryskání	15
2.3	Hodnocení čistoty povrchu po tryskání	21
2.3.1	Stupně zarezivění	21
2.3.2	Stupně otryskání	21
2.3.3	Stupně kvality otryskání vodním paprskem	22
3	Experimentální část	24
3.1	Návrh parametrů trysky pro vysokotlaké tryskání	24
3.1.1	Cílové požadavky na parametry trysky	24
3.1.2	Sestava redukční a tryskové části	24
3.1.3	Volba vývodů a rozměrů trysky	25
3.1.4	Volba materiálu trysky	29
3.2	Návrh zkušebních přípravků	30
3.3	Experimentální ověření trysky	31
3.4	Technicko-ekonomické zhodnocení	35
4	Závěr	37
5	Seznam tabulek	38
6	Seznam obrázků	38
7	Zdroje	39
8	Přílohy	43

1 ÚVOD

V současném světě se stále více klade důraz na zachování historických a kulturních památek. Mostní ocelové konstrukce zejména staré historické příhradové nýtované ocelové konstrukce, a především mosty mezi ně patří. Je nutné tyto stavby s postupujícím časem renovovat a rekonstruovat. Jejich konstrukce nebyla navržena tak, aby mohlo jednoduše docházet k pravidelné údržbě a obnově protikorozi ochrany, je proto nutné nalézt nové a co nejvíce šetrné způsoby a postupy, kterými by se dala renovace uskutečnit. Problematická jsou především místa, kde nelze běžnými metodami provádět renovaci, jako jsou úzké štěrbin, které podléhají koroznímu napadení ve velké míře. Do těchto štěrbin zatéká voda, ulpívají zde nečistoty, prach a další. Rozebrat konstrukci a provádět renovaci jednotlivých dílů by bylo extrémně nákladné a komplikované, v takovém případě by bylo vhodnější konstrukci rozebrat a postavit most nový.

Předúprava povrchu je důležitou součástí renovace. Pokud není dostačující, protikorozi ochrana nemůže efektivně fungovat a šíření koroze nebude dostatečně potlačeno. Bezpečnost a životnost takové mostní konstrukce by byla velmi limitována. V praxi se jako předúprava ocelové konstrukce osvědčilo tryskání. V dnešní době se jedná o jednu z nejpoužívanějších metod mechanických předúprav. Vysokotlaké tryskání vodním paprskem představuje účinný a ekologický způsob předúpravy povrchu. Přesto má tato metoda značné nedostatky v kvalitě otryskání úzkých štěrbin a špatně přístupných míst. Na trhu dostupné nástroje a trysky nesplňují kvalitativní požadavky pro dokonalé otryskání těchto míst.

Cílem praktické části bakalářské práce je vytvořit a experimentálně ověřit funkčnost nových typů trysek pro vysokotlaké tryskání, které by se daly aplikovat na uvedenou problematiku čištění úzkých štěrbin ocelových konstrukcí.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Předúpravy povrchu

Povrchové úpravy materiálů jsou nedílnou součástí technologických procesů ve výrobě. Používají se za účelem úpravy a zkvalitnění vlastností povrchu – zvýšená odolnost proti korozi a namáhání, zvýšení nebo snížení elektrických vlastností, prodloužení životnosti materiálu, ale i za zlepšením vizuální stránky konečného výrobku. Počáteční fází úprav povrchu je jejich předúprava. Ta má za úkol odstranit z povrchu nečistoty, které by znemožňovaly provést další úpravy v požadované kvalitě, a vytvoření kovově čisté struktury povrchu opracovávaného materiálu. Nečistoty lze podle původu vzniku rozdělit na vlastní a cizí. Vlastní nečistoty jsou takové, které vznikly chemickou přeměnou daného materiálu a řadí se mezi ně například okuje, korozní nebo reakční produkty. Naopak nečistoty cizí jsou jiné než kovové částice, které na materiálu ulpěly z prostředí (prach, voda, písek) nebo se jedná o již dříve aplikované ochranné vrstvy a maziva (oleje, tuky, silikony, laky), které jsou pro další úpravy povrchu nežádoucí [1] [2] [3].

2.1.1 Chemické úpravy povrchu

Nežádoucí vrstvy a nánosy mohou být k povrchu materiálu vázány fyzikální adsorpcí (látky tukového charakteru) nebo adhezními silami (anorganické nečistoty, kovové částice). Chemické, resp. elektrochemické úpravy jsou založené na reakci činidla s nečistotami na povrchu materiálu, čímž se narušují vazby mezi nečistotou a povrchem. Tyto vrstvy nemusí být pouhým okem viditelné, ale mají značný vliv na kvalitu výsledné povrchové úpravy. Pro odstranění se využívá odmašťování. Tento proces zapříčiňuje uvolnění nečistot z povrchu, jejich následnou precipitaci v roztoku nebo emulzi, čímž dojde k zamezení možnosti opětovného ulpění na povrchu materiálu [1] [4].

Odmašťování lze rozdělit podle druhu použitého roztoku nebo emulze [1]:

- odmašťování v alkalických neutrálních roztocích
- odmašťování v organických rozpouštědlech
- elektrolytické odmašťování
- emulzní odmašťování
- odmašťování opalováním
- vysokotlaké kapalinné odmašťování

Pro odstranění zoxidovaných nečistot se v praxi využívá chemického a elektrochemického moření. Nejčastěji je reakční prostředí upraveno na bázi kyselin a jejich solí (kyselina sírová, solná a fosforečná). Další možností je využití alkalických činidel [1] [4].

2.1.2 Mechanické úpravy povrchu

Mechanické úpravy nenapomáhají k dosažení přesného, výkresem stanoveného tvaru a rozměrů výsledného komponentu. Jejich cílem, stejně jako u chemických úprav, je dosažení určité jakosti povrchu materiálu pro následné úpravy. Očištění povrchu od hrubých nečistot, okují a korozních produktů probíhá mechanicky. Proces napomáhá k vytvoření požadovaných podmínek pro aplikaci následujících vrstev nebo vzhled součásti a zlepšení mechanických či protikorozních vlastností [1] [4] [5].

2.1.2.1 Omílání

Omílání je mechanická úprava spočívající ve vzájemném odírání a vyhlazování předmětů v uzavřené nádobě. Nádoby mají nejčastěji tvar uzavřených válců, hranolů a zvonů a jsou upevněny na otočné ose. Jednotlivé výrobky se omílají vzájemně mezi sebou, nebo za pomoci omílacích tělísek. Substráty mohou být sypké nebo kapalné. Kapalné substráty mají předem definované chemické složení, čímž dále mohou vytvářet pasivační, leštící nebo mořící účinek. Intenzitu omílání mimo jiné ovlivňuje i průměr bubnu, jeho otáčky, celková doba trvání procesu, stejně tak jako tvar, velikost omílaných výrobků a poměr mezi výrobky a velikostí částic substrátu. Tento proces se nejvíce uplatňuje při odjehlování a leštění malých sériově vyráběných předmětů, dále pak k odstraňování zbytků korozních produktů a tavidel. Nevýhodou této úpravy je nerovnoměrný úběr materiálu z povrchu, přílišné otupení hran a vyšší pravděpodobnost znehodnocení členitých výrobků. Mezi výhody naopak patří snížení provozních nákladů a zvýšení produktivity (omílací nádoby jsou schopny pojmout velké množství výrobků najednou), minimalizace manuálního broušení a leštění a snížení zmetkovitosti. [1] [4] [5].

2.1.2.1 Broušení, leštění a kartáčování

Jedná se o nepoužívanější způsoby mechanických předúprav povrchu. Tyto metody lze provádět jak ručně, tak strojně. Rozdíl v metodách je pouze v nástroji, jejich podstata se nemění. Broušení, leštění a kartáčování se provádí jako poslední úprava před aplikací určitého povlaku nebo jako závěrečná úprava povrchu výrobku. Přesné obrábění nelze zaměnit s těmito

procesy. V rámci předúprav nalézají největší uplatnění při odstraňování hrubých nerovností a nedokonalostí povrchu a jeho sjednocení (okují, pozůstatků vtokových soustav, rzi, pórů, rýh, svarových nedokonalostí apod.) [1] [3] [4].

Broušení je postupný úběr materiálu, jehož efektivita závisí na stupni nerovnosti povrchu a druhu broušeného materiálu. Při hrubém broušení se uplatňují nástroje s brusivem o zrnitostí 24–80. Pro následné hlazení a jemné hlazení se používají nástroje s brusivem o zrnitosti 100–150, resp. 200–240. Při broušení se přechází od hrubých zrnitostí po jemné. Nejnižší dosažitelné drsnosti se dosahuje v rozmezí Ra 0,2–0,4 μm . Pro hlazení a jemné hlazení se využívají také brusné pasty, především z důvodu snížení tření a s tím spojeným zahříváním broušeného předmětu. V praxi se jako pracovní nástroje používají brusné kotouče a pásy. Kotouče se vyrábějí z různých materiálů např. plstě, dřeva, látky nebo skládaných lístků brusného plátna. Tuhé kotouče se používají na předměty rovinné a s ostrými hranami. Měkké kotouče lze použít na předměty o složitějších tvarech [1] [3] [6].

Přechodová hranice mezi broušením a **leštěním** není pevně stanovena. V případě leštění, stejně jako u broušení, dochází k úběru materiálu a zahřívání povrchu, jen v menší míře. Mimo jiné zde dochází k plastické deformaci povrchové vrstvy. Leštěním se dosahuje velmi nízkých hodnot drsnosti, až Ra 0,1 μm . Na hodnotách drsnosti a lesku se podílí nejen materiál kotouče a obvodová rychlost nástroje, ale i použité leštící pasty. Ty mohou být tuhé a tekuté. Pasty obsahují kromě hlavní tukové složky i částice abrazivní. Nejčastěji se jedná o oxid chromitý (leštící zeleň), oxid železitý (leštící červeň), oxid vápenatý (vídeňské vápno), umělý korund apod. Leštění se provádí jako předúprava povrchu, stejně tak jako dokončovací operace. V některých případech se před leštěním samotným zavádí ještě předlešťování, při kterém se používají tvrdší látkové, kožené nebo plstěné kotouče, vyšší obvodová rychlost (40–48 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), mastnější a ostřejší pasty. Naopak pro dokončovací operace se používají sušší leštící pasty, měkké leštící kotouče například z flanelu nebo hedvábí a až o polovinu nižší obvodová rychlost (26–30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) [1] [4] [7].

Kartáčování se používá k odstranění hrubých nečistot např. starých povlaků, nátěrů a korozních produktů apod. Opracování se provádí pomocí ocelových kartáčů s rovnými nebo vlnitými dráty. Pro úpravu neželezných povrchů se používají drátěné kartáče z materiálů, které nezneškodňují daný povrch – například dráty z mosazi nebo nylonu. Kartáčování je také vhodné pro sjednocení a přípravu povrchu před leštěním. V takovém případě se používají

kartáče z měkkých a pružných, přírodních i umělých vláken (fibr, silon, žíně, sisal), na kterých dobře ulpívají brusné pasty. Nečistotami zanesené kartáče po kartáčování lze vyčistit odmašťováním a mořením uvedeným v předchozích odstavcích [1] [4].

2.1.2.2 Tryskání

Vzhledem k zaměření práce je o tryskání podrobněji pojednáváno v kapitole 2.2.

2.2 Tryskání

Při této mechanické předúpravě se kinetická energie tryskaného materiálu usměřňuje vůči otryskávané součásti. Tryskaný materiál se nazývá zrnno nebo abrazivo, proto se také ustálil název abrazivní tryskání, anglicky „*abrasive blast cleaning*“. Tryskaný materiál získává kinetickou energii ze stlačeného vzduchu, vodou hnanou pod tlakem či metacími koly. Je také možné využívat vzájemné kombinace vody a stlačeného vzduchu. Účelem tryskání je narušení vazby mezi nečistotami (korozní produkty, grafit, písek, nátěry apod.) a povrchem materiálu díky dopadu abrazivní složky při vysoké rychlosti. Tím dochází ke zdrsnění, aktivaci, zvětšení kotvící plochy povrchu a s tím spojené odstranění defektů a zpevnění zapříčiněné plastickou deformací abraziva s povrchovou vrstvou [1] [3] [5].

Efektivita a výsledek tryskání je závislý na více parametrech, především ale na materiálu, velikosti, tvaru, hmotnosti a tvrdosti zrn. Dalším důležitým parametrem je úhel, rychlost, doba trvání procesu a množství částic abraziva dopadající na povrch výrobku. Ostrá a tvrdá zrna zvyšují účinnost čištění, jelikož se do výrobku zasekávají a vytváří hrubý povrch. Naopak zrna kulatá mají zpevňující a vyhlazující účinek a po dokončení procesu zůstávají na povrchu mělké důlky, přičemž úbytek materiálu je zanedbatelný. Nevýhodou při tryskání s použitím kulatých zrn je to, že může docházet k zatlačování nečistot do struktury materiálu. Nehodí se proto jako předúprava pro nanášení nátěrových hmot [1] [4].

Tabulka 1: Vlastnosti abraziv [8]:

Materiál	Zrnitost	Měrná hmotnost [kg·dm ⁻³]	Tvrlost	Drobnost	Počet cyklů životnosti	Původ
Křemičitý písek	6-270	1,66	5,0-6,0	vysoká	1	přírodní
Minerální struska	8-80	1,4-1,86	7,0-7,5	vysoká	1-2	vedlejší produkt
Ocelová drtina	10-325	3,83	8,0	nízká	200+	vyrobena
Ocelový granulát	8-200	4,6	8,0	nízká	200+	vyrobena
Korund	12-325	2,08	9,0	střední	6-8	vyrobena
Karbidy křemíku	12-325	1,83	9,5	střední	5-6	vyrobena
Balotina	10-400	1,4-15	5,5-6,0	střední	8-10	vyrobena
Plast	12-80	0,75-1	3,0-4,0	nízká/střední	8-10	vyrobena
Pšeničný škrob	12-80	0,75	3,0	střední	12-15	vyrobena
Polymer a kukuřičná drtina	16-60	0,75	3,0	nízká	14-17	vyrobena
Mletý kukuřičný klas	8-40	0,58-0,75	2,0-4,5	střední	4-5	vedlejší produkt

Takzvaný „hydrofinit“ je specifická metoda využívající suspenzi vody a brusiva. Směs je urychlována vzduchem. Kombinace vody a abraziva snižuje účinek otryskání, vyhlazuje a zjemňuje povrch (vhodné například pro galvanické pokovení) [4].

Otryskávání produktu se rozlišuje podle mnoha parametrů. V praxi zavedené je rozdělení je podle způsobu, jakým se dodává energie abrazivu. Dvěma hlavními způsoby jsou metody pneumatického a mechanického tryskání [4].

2.2.1 Mechanické tryskání

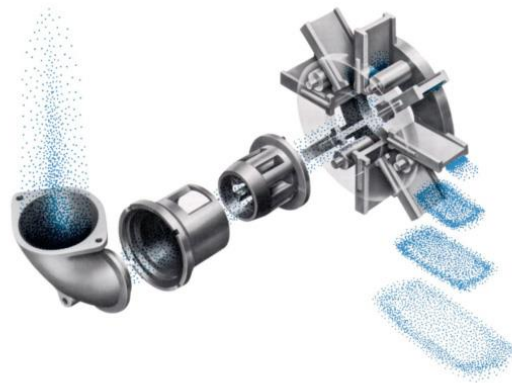
2.2.1.1 Tryskání pomocí metacích kol (wheel blasting)

Proces mechanického tryskání spočívá v předání kinetické energie abrazivním mediím za pomoci rotujících metacích kol. Celý proces probíhá v uzavřené komoře a metací kola jsou poháněna elektromotorem. Na vnitřní stranu metacích kol se přivádí tryskací materiál, který je odstředivou silou metán proti tryskanému předmětu. Výstupní rychlost je dána součtem obvodové a odstředivé rychlosti, jež v maximu dosahuje až 100 m·s⁻¹. Pro účinné otryskání složitějších tvarů se tryskací kola rozmisťují na více místech tryskací kabiny. Kola jsou vyráběna se dvěma a více lopatkami, jejich úhly natočení jsou různé dle potřeby tryskaného objektu.

Oproti pneumatickému tryskání je možné přivádět více abrazivního materiálu, čímž se zvyšuje produktivita a efektivita práce [1] [9] .

Nevýhodou této metody je omezení velikosti tryskací komory a nedokonalé řízení tryskacího paprsku. Vysoké pořizovací náklady se dají kompenzovat produktivitou stroje ve velkovýrobě. V neposlední řadě dochází k opotřebení metacích kol, čemuž se předchází vhodnou volbou použitého média, např. ocelový nebo litinový granulát [10].

Tryskání pomocí metacích kol se nejvíce využívá při objemovém tryskání součástí jednoduchých tvarů jako je např. očištění odlitků, výkovek, svařenců, zpevnění materiálu, nebo vytvoření požadované kotvící plochy pro další operace. Metací stroje lze dělit podle konstrukce – komorové, stolové, závěsné, válečkové, bubnové nebo průběžné [1] [10] [11].



Obrázek 1: Princip tryskání metacími koly [9]

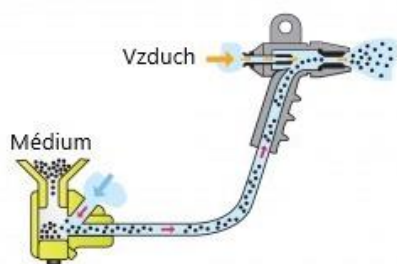
2.2.2 Pneumatické tryskání

Proces pneumatického tryskání spočívá v předávání kinetické energie abrazivním médiím za pomoci pneumatického zrychlení z kompresorové stanice. Abrazivo dopadá na povrch součásti pomocí trysky, která usměrňuje částice a zaručuje pokrytí požadované plochy, podle svého tvaru. Výhodou pneumatického tryskání je mobilita a možnost tryskat i špatně přístupná místa [12] [13].

2.2.2.1 Injektorové tryskání

Provádí se pomocí tryskací pistole, která se skládá z pracovní a vzduchové trysky. Stlačený vzduch, který proudí vzduchovou tryskou způsobuje podtlak, čímž se nasává abrazivo ze zásobníku a společně vystupují pracovní tryskou ven, směrem k tryskanému předmětu. Nejčastěji se touto metodou otryskávají malé a středně velké předměty. Metoda má oproti

tlakovému tryskání (kapitola 2.2.2.2) nižší účinnost. Není proto možné využít těžké abrazivní prostředky jako je ocelová nebo litinová drť. Výhodou je nižší pořizovací cena než u tlakového tryskání. Neopomenutelnou součástí jsou tryskací boxy, které zabraňují úletu tryskaného abraziva. To je důležité hlavně v případě použití křemičitého písku, který je nebezpečný pro obsluhující pracovníky z hlediska vdechnutí [14] [15].



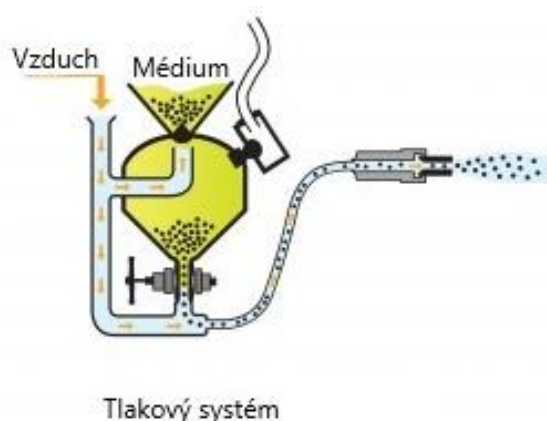
Obrázek 2: Schéma injektorového tryskání pro pískovací zařízení [16]



Obrázek 3: Tryskací box [17]

2.2.2.2 Tlakové tryskání

Stlačený vzduch se přivádí do tlakové nádoby, tzv. zásobníku. Ve spodní části je umístěna směšovací komora. Zde je abrazivo urychlováno stlačeným vzduchem a hnáno přes otevřený ventil do hadice a dále přes trysku ven na tryskaný předmět. Tlakové tryskací stanice mohou využívat všechny druhy abrazivních médií např. ocelové a litinové drtě, korund, balotina, zirblast apod. Oproti injektorovému tryskání nezáleží na hmotnosti a velikosti média. Tlakové tryskání má mnohonásobně vyšší účinnost, což má za následek vyšší nároky jak na spotřebu stlačeného vzduchu, tak na pořizovací cenu. Největší uplatnění má při tryskání velkých a členitých dílů, u kterých se odstraňují mechanické nečistoty, zbytky nátěrových hmot a okují [16] [18].



Obrázek 4: Schéma tlakového způsobu tryskání pro pískovací zařízení [16]

2.2.2.3 Tryskání zvlhčeným abrazivem

Jedná se o upravenou trysku, ve které se mísí vzduchem urychlené abrazivo s vodou a společně vystupují z trysky. Smíchání se provádí přímo v tryskové části nebo předem v zásobníku. Takto spojená směs zaručuje rovnoměrný tok po povrchu otryskávaného předmětu. Voda ve směsi snižuje poškození podkladu a zaručuje konzistentní účinek tryskání po celém povrchu. Díky spojení vody a abraziva dochází k redukci prašnosti při tryskání. Chrání se tak nejen pracovníci, kteří by mohli abrazivo vdechnout, ale i zařízení citlivé na prachové a jiné částice. Z tohoto důvodu je tato metoda často využívána v mobilních zařízeních. Voda obsažená ve směsi při tryskání odstraňuje nežádoucí fragmenty abraziva a znečištění, díky čemuž se eliminuje až úplně vylučuje následný oplach tryskané součásti. Nevýhodou této metody jsou zvýšené náklady na systém čerpání a míchání vody, dále pak likvidace odpadu po otryskání. Vystavování kovového povrchu vodě a vzduchu může mít rovněž nepříznivý účinek na rychlost koroze [19] [20].



Obrázek 5: Tryskání zvlhčeným abrazivem [21]

2.2.2.4 Tryskání suchým ledem

Suchý led neboli oxid uhličitý (CO_2) v pevném skupenství sublimuje při teplotě $-79\text{ }^\circ\text{C}$. Tryskacím materiálem jsou v tomto případě bloky nebo pelety suchého ledu o velikosti 0,4-3 mm. Tyto pelety se vytvářejí z kapalné kyseliny uhličitě (H_2CO_3). Voda obsažená v kyselině uhličitě se uvolňuje v tzv. „peletovači“ při atmosférickém tlaku. Vzniká sníh suchého ledu, který se stlačuje do tvrdých pelet a bloků [22].

Tryskání suchým ledem lze rozdělit do 3 částí [23]:

- V kinetické fázi dochází k urychlení částic suchého ledu na rychlost $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ za pomoci stlačeného vzduchu. Tyto částice následně narážejí do tryskaného předmětu.
- V termické části dochází k ochlazení a zkřehnutí nečistot (kontaminantů), což má za následek narušení mechanických vazeb mezi nečistotami a povrchem.
- V sublimační části se pelety suchého ledu přeměňují na plyn – sublimují, čímž zvětšují svůj objem až 540krát. Dochází k explozivnímu jevu, při kterém se uvolňují nečistoty a jsou unášeny z povrchu pryč expandujícím plynem. Nečistoty se následně mohou vysát nebo zamést.

Tryskáním suchým ledem je neagresivní a neabrazivní, nepoškozuje se původní materiál, nedochází k obroušení a na finálním produktu nezůstávají žádné částice. Suchý led není vodivý a na povrchu tryskaného předmětu nezanechává žádné své produkty. Proces je ekologický, nevyužívá žádných toxických ani chemických látek. Problematické je ovšem otryskávání předmětu, jehož materiál, ze kterého je vyroben, negativně reaguje na nízkou teplotu (např. dochází ke změně struktury materiálu apod.) [23] [24] [25].

2.2.2.5 Tryskání vodním paprskem (water jet blasting)

Tryskání vodním paprskem nebo vodou pod tlakem má širokou škálu uplatnění. Hlavním parametrem pro rozdělení je tlak, pod kterým je voda tryskána, následně tryska, která udává, pro jakou operaci je tryskání vhodné. Aplikovány jsou tlaky 300-3200 barů. Pro jednoduché čisticí operace se používají tlaky nižší v rozmezí 300-700 barů. S tím je spojená i velikost a pořizovací cena agregátů. Tyto stroje se využívají na čištění, renovaci a sanaci menších betonových, ocelových a dřevěných ploch od ulpěných nečistot a přírodních porostů (mechy a lišejníky). Na složitější operace jako je odstranění korozních produktů, nátěrových hmot, pryže, laminátu, sanaci betonu a ocelových konstrukcí, potrubí a jímek se uplatňují agregáty s provozními tlaky 700-3200 barů. Benefitem této metody je ekologická nenáročnost a nulová prašnost [26] [27].

Jednou z dalších možností využití vodního paprsku je řezání a hydrodemolice. Hydrodemolice je jiný název pro likvidaci poškozeného, zvětralého nebo i zdravého betonu z konstrukcí. Nejčastěji se metoda aplikuje na mostní konstrukce, silnice, přehradu a podobné betonové stavby. Výhodou oproti frézování a sbíjení bouracími kladivky je eliminace otřesů

a narušování statiky celkové struktury. Výsledný povrch je drsný, což přispívá k lepší přilnavosti nového betonu [28].

Řezání materiálu vodním paprskem je výhodné, protože na rozdíl od jiných technologií zde vzniká tzv. studený řez a nedochází ke změnám struktury ani k mikrotrhlinám. Metoda umožňuje obrábět materiály v rozsahu 0,1-300 mm s mnohem vyšší přesností. Využívá se u materiálů, které jsou jinak obtížně dělitelné jako např. nikl, titan, kobalt a jeho slitiny. Nevýhodou této technologie je vysoká pořizovací cena stroje a větší náchylnost ke korozi řezaného materiálu [29].

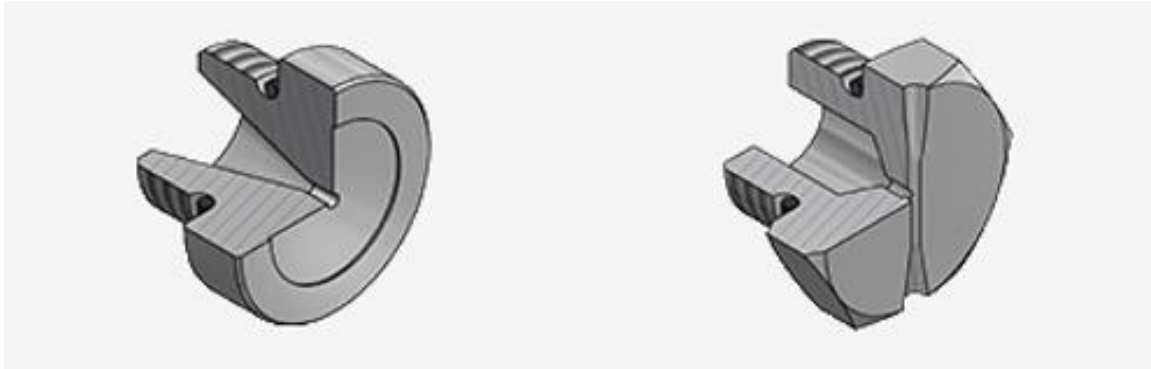
Trysky pro tryskání vodním paprskem

Pro zvolení vhodného typu trysky je nutná znalost parametrů dané operace. Jejich tvar, velikost a celková konstrukce je závislá na účelu tryskání – zda se jedná o čištění, řezání nebo v případě hydrodemolice odbourávání materiálu.

Pro tryskání vodním paprskem se nejčastěji používají tlaky v rozmezí 300-3 200 barů. Volba vhodného materiálu, ze kterého je tryska vyrobena je proto stěžejní. Nejvíce využívaným materiálem pro výrobu je ocel – nejčastěji korozivzdorná anebo spojení oceli a safíru. Dále také keramika a karbidy. Své uplatnění najdou i trysky vytvořené z umělého diamantu a materiálů vzniklých kombinací výše uvedených. Konstrukce trysek se liší a dosud neexistuje žádná ucelená norma, která by trysky pro tryskání vodním paprskem definovala. Na trhu je možné nalézt množství rozdílných trysek lišících se v některém z výše uvedených kritérií [30].

Přímá tryska

Přímé trysky nemají žádnou normou stanovené parametry. U výrobců se lze setkat s nejrůznějšími podnázvami (standartní, potrubní, demoliční, kanalizační tryska) podle oblastí, na které je výrobce doporučuje. Cílem těchto trysek je usměrnění vodního paprsku do přímého proudu, širšího plochého nebo kuželového tvaru. Přímé trysky se používají pro širokou škálu tlaků od nízkých (oplachové a čistící trysky) po tlaky vysoké až 3200 barů (hydrodemoliční a řezací trysky). V nabídce výrobců jsou také různé druhy trysek se specifickým usměrněním vodního paprsku pro konkrétní využití [31] [32].



Obrázek 6: Možné typy přímých trysek [33]

Rotační tryska

Základní charakteristikou rotačních trysek je jejich otáčení kolem osy způsobené nejčastěji reakční energií tlakové vody procházející tryskou. Existují také trysky, kde je rotování zajištěno elektromotorem a ozubenými koly. Varianta s elektromotorem se využívá velmi málo, pouze ve speciálních případech. Stejně jako u přímých trysek, rotační trysky nejsou definovány normou. Jejich označení, počet trysek a jejich natočení v rotační hlavici a doporučené tlaky pro tryskání stanovují sami výrobci. Výhodou použití této trysky je vyšší efektivita díky širokému rozstříku tryskací stopy a s tím spojené urychlení čistícího procesu, dále pak snížení zpětného rázu [34] [35].

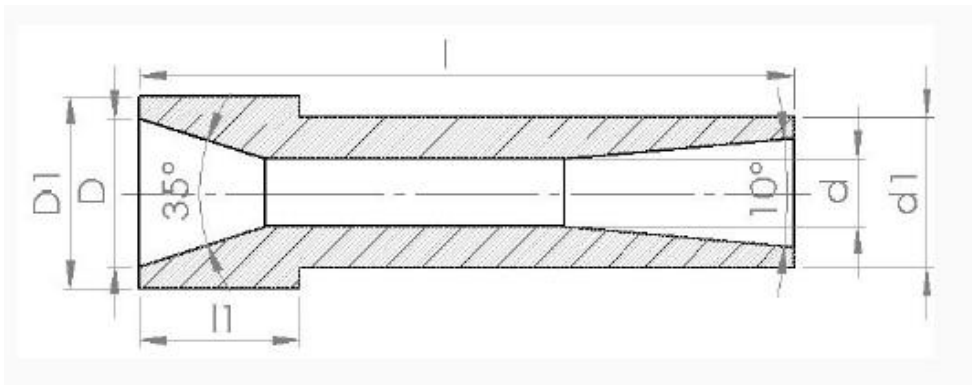


Obrázek 7: Rotační tryska [34]

Venturiho tryska

Tento typ trysek je založen na principu Venturiho efektu (hydrodynamický paradox), tj. tlak v proudící kapalině je nepřímo úměrný rychlosti proudění dané tekutiny. Tohoto efektu je docíleno kónickými zúžením vnitřního otvoru trysky. Hlavní výhodou Venturiho trysky oproti

standardním tryskám je vyšší efektivita a s tím spojená úspora vody. Rozšiřující se výstup trysky přispívá k širokému záběru paprsku vodního sloupce na tryskané ploše, oproti vnitřnímu průměru trysky. Jejich plošná účinnost oproti standardním přímým tryskám je vyšší a využívají se pro tryskání větších ploch. Rychlost média u tohoto typu trysky může dosahovat až $350 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [36] [37].



Obrázek 8: Venturiho tryska [37]

2.3 Hodnocení čistoty povrchu po tryskání

2.3.1 Stupně zarezivění

Pro stupně čistoty povrchu po tryskání je zavedena norma 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 [38]:

- 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 okuje, a který vykazuje celkovou rovnoměrnou důlkovou korozi (*pitting*) viditelnou prostým okem.“

2.3.2 Stupně otryskání

Stupně přípravy povrchu dosažené tryskáním před nanesením nátěrových hmot stanovuje rovněž norma ČSN EN ISO 8501-1. Hodnocení je určeno na základě slovního popisu a porovnání s reprezentativní fotografií [38].

- 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.“ [38]
- 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.“ [38]
- 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.“ [38]
- 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.“ [38]

2.3.3 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 [39].

- 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.“ [39]
- 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.“ [39]
- 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.“ [39]

- 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.“ [39]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Návrh parametrů trysky pro vysokotlaké tryskání

3.1.1 Cílové požadavky na parametry trysky

Pro požadované a kvalitní otryskání úzkých štěrbin vysokotlakým paprskem vody je důležité znát výhody a nevýhody rozměrů přímých a rotačních trysek, které se nejčastěji využívají k tomuto účelu. Je požadováno, aby tryska kvalitně otryskávala i do větších hloubek, které nejsou přístupné k očištění jinými metodami, například rotační tryskou. Je nutné docílit možnost pohybu trysky uvnitř štěrbin, aby mohl proces kontinuálně probíhat a docházelo k rovnoměrnému otryskání. Naopak nesmí dojít k zaklínění trysky uvnitř štěrbin, aby se předešlo úrazu operátora nebo poškození upravované konstrukce.

Vývody trysek by měly zajistit co nejvyšší možnou účinnost otryskání povrchu, stejně tak jako co největší záběr paprsku vody, aby tryskací proces probíhal co možná nejrychleji a nejúčinněji. Například přímá tryska bez bočních vývodů spolehlivě odstraní nečistoty z neprůchozích stěn štěrbin, ale nebude dostatečně otryskávat boky štěrbin. Dále pak musí docházet k plynulému odvádění vody smíchané s korozními produkty, aby se nesnižovala účinnost procesu.

Trysky by měly být z materiálu, který bude svými vlastnostmi odolávat korozi, otěru způsobenému pohybu trysky ve štěrbině, a hlavně odolávat proudu vody. Materiál musí být dostatečně pevný a jeho vlastnosti musí umožňovat nízké náklady na výrobu a vysokou životnost. Konstrukce a montáž by měli být co nejjednodušší, aby zabrali co nejméně času a nebylo zapotřebí složité nářadí. Rychlost montáže se může ukázat i kritická v případě výměny trysky při procesu čištění. Pokud by byla montáž časově náročná mohl by celý proces trvat příliš dlouho.

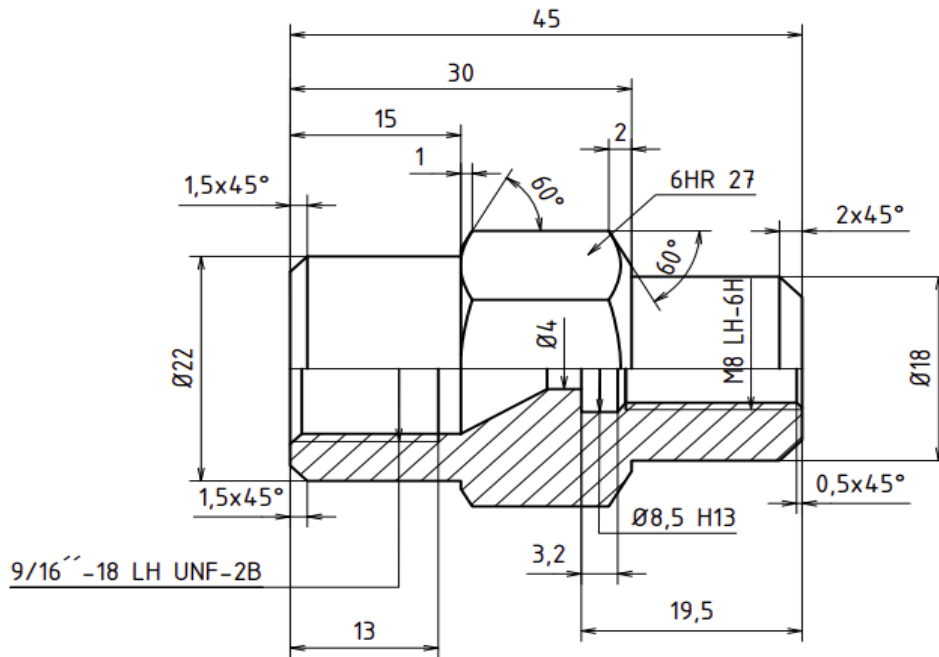
3.1.2 Sestava redukční a tryskové části

Z hlediska výroby a volby materiálu byla celková tryska vytvořena ze dvou částí:

- Trysková část
- Redukční část

Redukční část bude namontována pomocí závitů na tryskací zařízení a do ní bude vložena trysková část, která bude v případě předčasného opotřebení vyměněna za novou. V případě

výroby trysky z jednoho kusu by spousta materiálu skončila jako odpad. Volba sestavy ze dvou částí je také výhodná z důvodu montáže, jelikož se předpokládá, že životnost trysky bude nižší než redukční části, a proto bude docházet k výměně. Výkres redukční části je zobrazen na obr. 9, výkres tryskové části je vyobrazen na obr. 13 a vyrobená sestava na obr. 10. Tato tryskáč sestava vychází z práce V. Šinágla [40].



Obrázek 9: Výkres redukční části

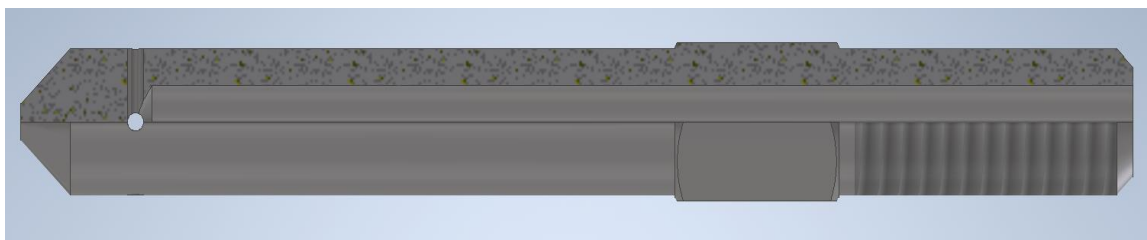


Obrázek 10: Sestava vyrobené trysky

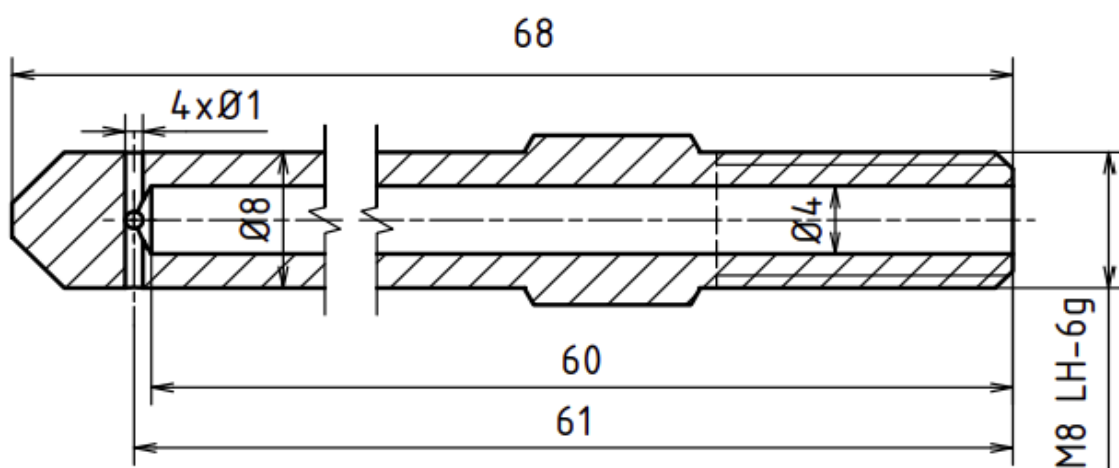
3.1.3 Volba vývodů a rozměrů trysky

V prvním návrhu na obr. 12 byly zvoleny 4 vývody kolmo k materiálu. Tímto návrhem by se docílilo nejlepšího možného otryskání, ale mohlo by také dojít k zaklínění trysky ve štěrbině

a její následné deformaci tlakem, až k možné destrukci z důvodu velkého tlaku na dno trysky a vývody. Dále by mohlo dojít ke kontaktu operátora a proudu vody, který by se odrážel od kolmé plochy. Ani možná úprava přidáním hlavního vývodu vedeného v přímém směru by nevyloučila příliš vysoké namáhání vedlejších vývodů.

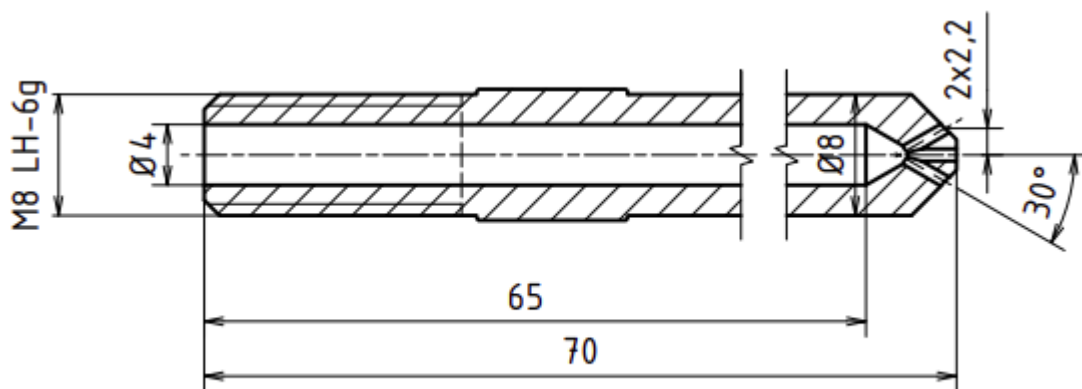


Obrázek 11: Tryska kolmá

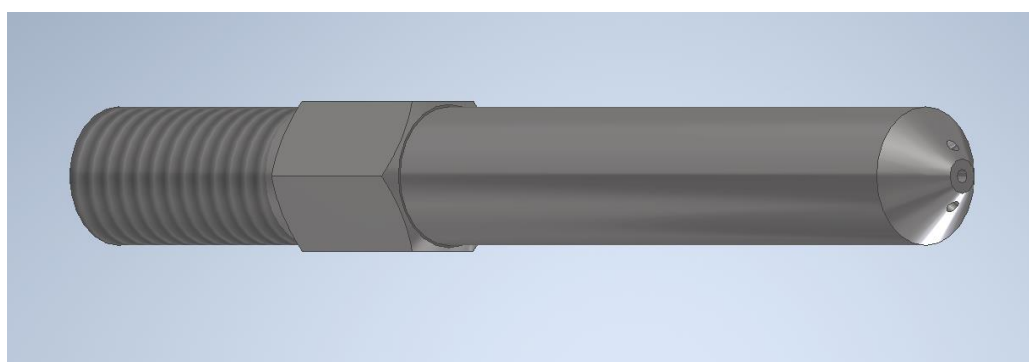


Obrázek 12: Výkres kolmé trysky

V druhém návrhu na obr. 13 je hlavní vývod z trysky veden přímo jako u standardních přímých trysek. Vývod byl takto zvolen, aby bylo možné docílit především kvalitního otryskání neprůchozích štěrbin, ale také z důvodu bezpečnosti. Tryska je navrhovaná na vysoké tlaky, 600-2000 barů, proto je hledisko bezpečnosti kritické. Vedlejší vývody byly zvoleny dva – vedené pod úhlem 30° od přímého paprsku. Tento úhel je ideální kompromis pro všechny popsané požadavky v kapitole 3.1.1. Vyšší množství vývodů by mohlo způsobit snižování pevnostních vlastností celé trysky.



Obrázek 13: Výkres tryskové části



Obrázek 14: Model tryskové části

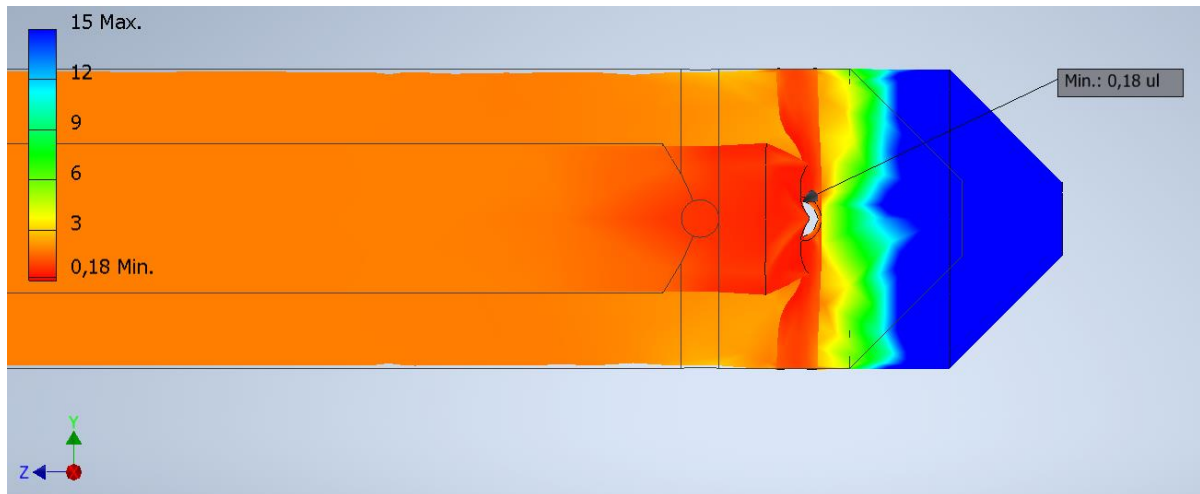
Druhá varianta trysky byla vytvořena ve dvou verzích – kratší (22 mm) a delší (42 mm). Cílem vytvoření dvou délek je ověřit možnost tryskání štěrbin na dvě fáze. První fáze tryskání kratší tryskou a ve druhé části tryskat delší tryskou. Obě verze jsou zobrazeny na obr. 15.



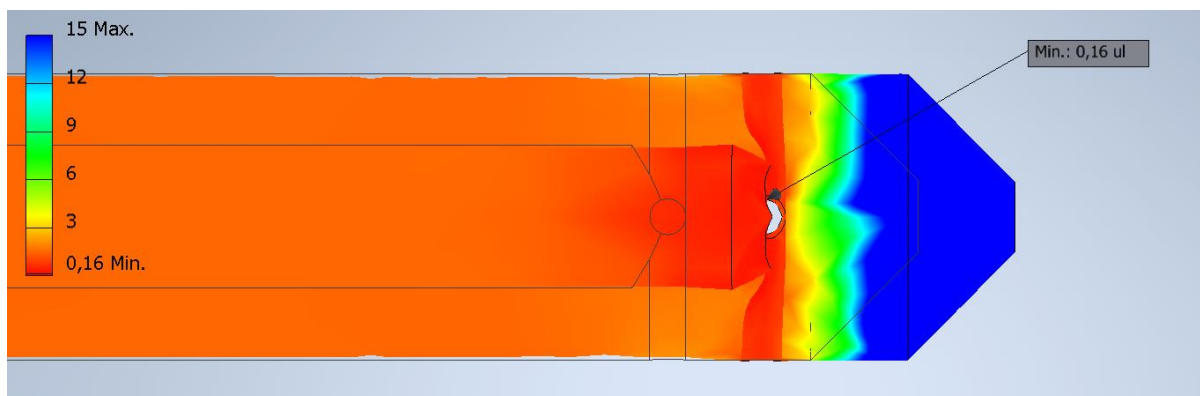
Obrázek 15: Trysky použité v experimentu

Při tvorbě variant byly v aplikaci Autodesk Inventor vytvořeny tlakové simulace. Tyto simulace měly ukázat namáhání vývodů, stejně tak těla trysky. Dále pak sloužit jako podklad při výběru vhodné varianty. Pro simulace byly zvoleny dva tlaky 1500 a 2000 barů. Posléze byl

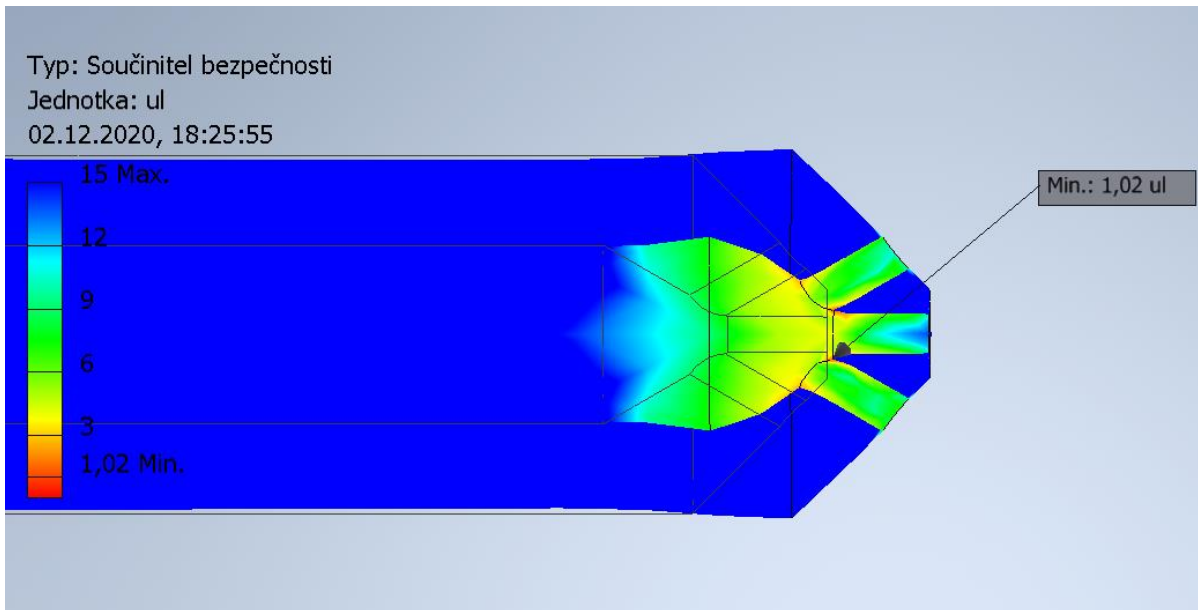
vyhodnocen součinitel bezpečnosti. Ze simulací na obr. 16-19 je patrné, že tryska kolmá je riziková z hlediska koeficientu bezpečnosti. Naopak tryska s přímým a bočními vývody splňuje koeficient bezpečnosti.



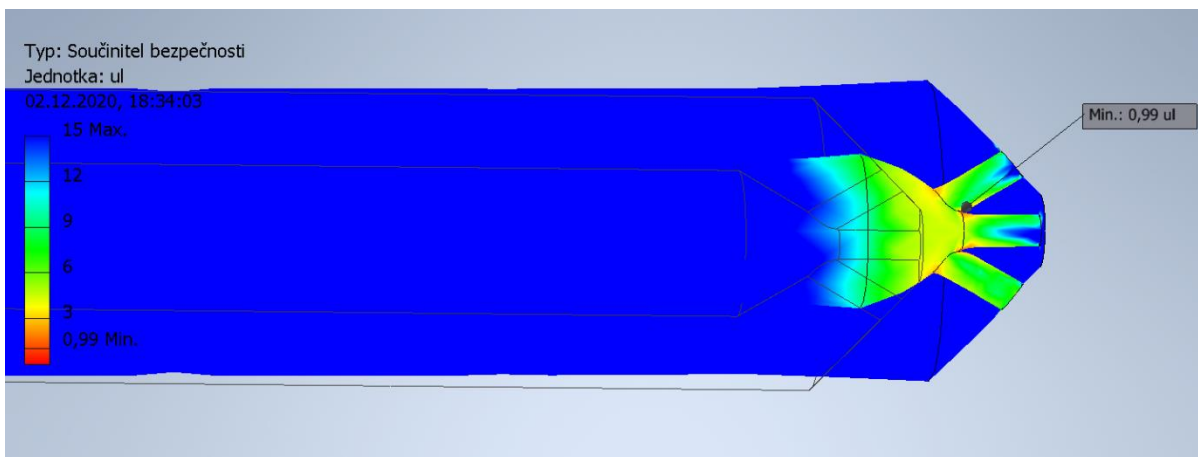
Obrázek 16: Simulace první varianty (1500 barů)



Obrázek 17: Simulace první varianty (2000 barů)



Obrázek 18: Simulace druhé varianty (1500 barů)



Obrázek 19: Simulace druhé varianty (2000 barů)

3.1.4 Volba materiálu trysky

Materiál byl volen pro redukční i tryskovou část odlišný, jelikož pro obě části jsou různé požadavky na otěr a namáhání. Pro experimentální účely bude materiál trysky jiný od běžně používaných. V praxi se využívají nejčastěji karbidy wolframu, bóru, keramiky a legované korozivzdorné oceli, které mají velké otěruvzdorné vlastnosti. Další méně využívanou aplikací jsou trysky, ve kterých je vložka tvořena z keramiky, tvrdokovů, safíru nebo s rubínovou vložkou. Tyto typy jsou velmi obtížné na obrábění a jejich pořizovací cena je vysoká. Výrobci proto vyrábí z těchto materiálů jen vývody trysek. Pro prvotní odzkoušení, zda parametry trysky budou odpovídat požadované účinnosti, byly zvoleny materiály s nižšími vlastnostmi

na otěr a lepší možností obrábění. Pokud bude tryska splňovat požadavky na otryskání a parametry budou optimalizované, bude možné nahradit prototypní materiál jedním z výše uvedených materiálů. Pro tryskovou část byla zvolena legovaná ušlechtilá ocel, chromová s vysokým obsahem uhlíku 1.4034, dle ČSN 17 029. Jedná se o ocel vhodnou ke kalení s tvrdostí až cca 55 HRC. Redukční část byla zvolena z nerezové austenitické chrom-niklové oceli s přidavkem síry 1.4305, dle ČSN 17 243. Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 2, chemické složení v tabulce 3.

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti vybraných ocelí [41] [42]

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 3: Chemické složení vybraných ocelí (v procentech) [41] [42]

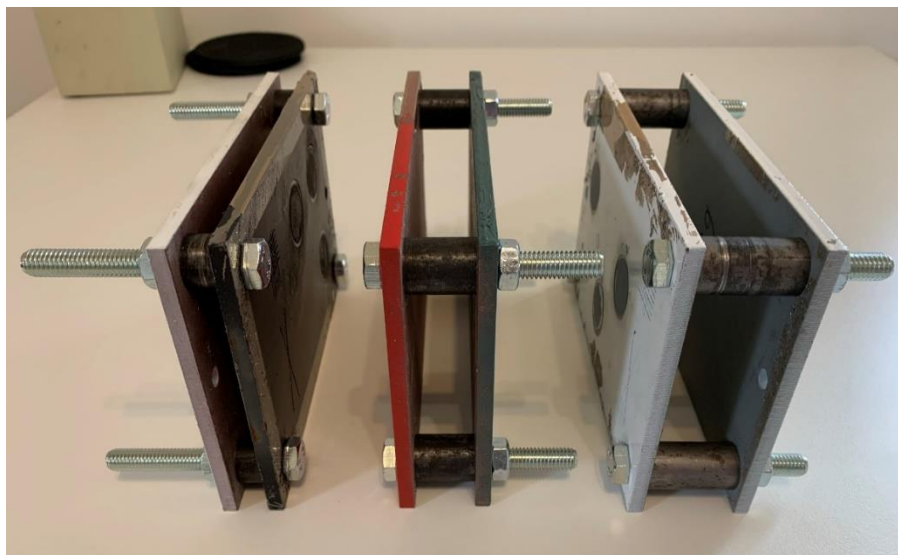
Materiál	C	Si max	Mn max	P max	S max	Cr	Mo	Ni	Cu
1.4034	0,43-0,5	1,00	1,00	0,040	≤0,03	12,5-14,5	-	-	-
1.4305	0,12	1,00	6,5	0,2	0,15-0,35	16-19	0,7	5-10	1,75-2

3.2 Návrh zkušebních přípravků

Pro úspěšný a bezpečný experiment bylo zapotřebí vytvoření zkušebních přípravků, které budou nahrazovat štěrby mostních konstrukcí, pro něž je tryska navržena. Bylo by nebezpečné trysku zkoušet přímo na mostní konstrukci, kde by mohlo dojít k poškození mostu nebo operátora z důvodu selhání trysky a její možné destrukci.

Zkušební přípravky byly vytvořeny z ocelových destiček o rozměrech 150×100×5 mm, na které byla nanášena nátěrová hmota o nominální tloušťce u vzorku č. 1, 40–60 μm

a u vzorku č. 2 a 3, 180–200 μm . Tato vrstva bude v experimentu reprezentovat nečistoty, které je třeba odstranit. Následně byly tyto destičky sešroubovány za pomoci šroubů, matic a distančních kroužků, které byly vytvořeny ve třech rozměrech štěrbin: 10, 20 a 30 mm. Tyto kroužky tvoří mezery mezi ocelovými destičkami, které reprezentují štěrbinu, které se běžně nacházejí na mostních ocelových konstrukcích. Zkušební přípravky jsou zobrazeny na obr. 20.



Obrázek 20: Zkušební přípravky

3.3 Experimentální ověření trysky



Obrázek 21: Tryskací stroj

Experimentální ověření bylo provedeno v areálu firmy Bintana s.r.o., která pro účely tohoto experimentu zapůjčila stroje a provedla tryskání vyvíjenou tryskou. Tryskání bylo prováděno vysokotlakým sloupcem vody a provedli jej zkušební pracovníci. Použité zařízení pro natlakování a přívod vody do tryskací pistole bylo od společnosti Falch, konkrétně stroj Trail Jet 125 2500-26-0-d, s pracovními tlaky v rozmezí 600–2500 barů a průtokem 11-26 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$. V průběhu celého experimentu bylo na zařízení nastaveno 1900 barů. Do zařízení byla přiváděna voda, ta byla natlakována a pod požadovaným tlakem byla hnána do tryskací pistole.

Příprava na experiment

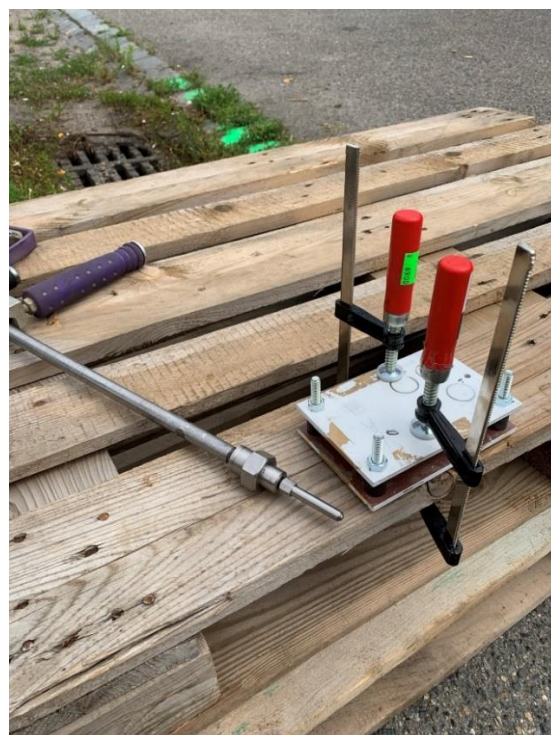
Po zapojení a nastavení stroje personálem firmy Bintana s.r.o. byly připraveny přípravky. Ty byly zajištěny proti pohybu pomocí svěrek a připevněny k provizornímu stojanu. Jako první byl zvolen přípravek se střední velikostí 20 mm. Trysková sestava byla našroubována a utažena pomocí klíčů na tryskací pistoli s použitím teflonové pásky, která zamezuje průchodu vody závitovými spoji. Tryska byla poprvé odzkoušena a nastaven tlak v přístroji. Fotografie ze zkoušky jsou zobrazeny na obr. 22-24.



Obrázek 22: Nastavení tryskacího stroje



Obrázek 23: První test trysky

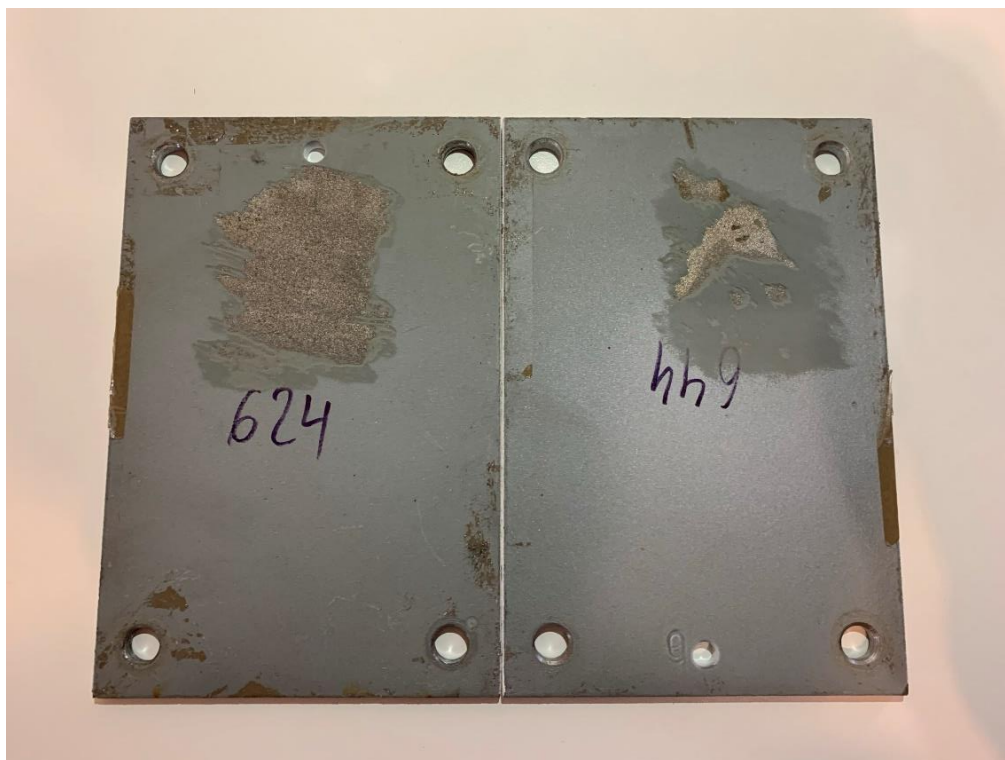


Obrázek 24: Trysková sestava a upevněný přípravek

Experiment

1. zkouška

Jako první byl otryskán přípravek se štěrbinou o velikosti 30 mm. Nominální hodnota tlaku přístroje byla nastavena na 1900 barů. Reálná hodnota se pohybovala kolem 1880 barů. Hodnota průtoku byla $20 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Úroveň otryskání byla vyhodnocena jako Sa 2½. Při této zkoušce byla účinnost otryskání na jedné straně nižší z důvodu větší vzdálenosti tryskaného materiálu a vývodů trysky oproti zkoušce 2 a 3 a rozdílným množstvím nátěrové hmoty na destičkách přípravku.



Obrázek 25: Rozmontovaný přípravek po 1. zkoušce

2. zkouška



Obrázek 26: Tryskání přípravku

Jako druhá byla vyzkoušena trysková sestava na přípravku se štěrbinou o velikosti 20 mm. Nominální tloušťka nátěrové hmoty byla 50 μm . Při tryskání operátor rovnoměrně pohyboval tryskou po šířce štěrbiny, aby bylo docíleno rovnoměrného otryskání. Při této zkoušce však



Obrázek 27: Rozmontovaný přípravek po 2. zkoušce

3. zkouška

Následně byl připraven přípravek se štěrbinou o velikosti 10 mm. Tloušťka nátěrové hmoty byla v rozmezí 170-200 μm . Parametry tryskání byly nastaveny jako ve zkoušce č. 1. Účinnost při této zkoušce byla nejvyšší a úroveň otryskání vyhodnocena jako Sa 2½. Došlo k otryskání na 80 % tryskaného povrchu. Z důvodu rozměrů trysky nemohla být otryskána větší plocha přípravku. Tryskací proces trval 90 vteřin.



Obrázek 28: Rozmontovaný přípravek po 3. zkoušce

3.4 Technicko-ekonomické zhodnocení

Pro požadované zadání bakalářské práce byly vytvořeny dva typy trysek. Z těchto dvou možností se zvolila tryska s přímým vývodem a dvěma bočními. Z hlediska nákladů není příliš znatelný rozdíl mezi oběma variantami, ale nízká účinnost a snížená bezpečnost v případě první (kolmé) trysky nemůže být zanedbána. V případě tryskové sestavy dochází ke snížení nákladů na práci a materiál oproti monolitní trysce. Je však nutné dbát na správnou montáž trysky do redukční části a následné našroubování sestavy na tryskací pistol. Z důvodu použití závitů jako montážního prvku je nutné dbát na utěsnění závitů například teflonovou páskou.

Z pozorování při experimentu vyplývá, že pro tryskání průchozích štěrbin (jako jsou použité přípravky) je odzkoušená tryska méně účinná, jelikož hlavní přímý vývod trysky vede nejvíce vody a ubírá na účinnosti bočních vývodů. Pro štěrbinu neprůchozí bude tato tryska mnohem účinnější, jelikož přímý vývod bude kvalitně otryskávat dno štěrbin.

Pro vytvoření trysky, která by účinněji čistila strany štěrbin bude zapotřebí odstranit přímý vývod a nahradit jej jedním bočním vývodem navíc. Vývody by mohly svírat mezi sebou úhel 120 stupňů, který by poskytoval kvalitní a rovnoměrné otryskání stran štěrbin.

Po optimalizaci výše zmíněných parametrů je třeba zvolit odolnější materiál, například karbidy bóru nebo wolframu, za účelem zvýšení životnosti. S vyšší životností a lepšími mechanickými vlastnostmi materiálu by mohlo být tělo trysky prodlouženo, aby bylo tryskání uvnitř štěrbin ve větších hloubkách stejně kvalitní jako v krajních polohách.

Pro kvalitní výsledky bude nutné využívat obou typů trysek, jak trysku s přímým vývodem (neprůchozí štěrbin), tak trysku bez přímého vývodu (průchozí štěrbin). Jejich kombinace by měla docílit kvalitní otryskání povrchu a jeho přípravu pro následné další úpravy.

V případě tryskové sestavy z korozivzdorné oceli jsou pořizovací náklady na materiál a výrobu násobně nižší než v případě použití karbidových trysek od profesionálních výrobců. Celkové pořizovací náklady se započtením výroby vychází v řádu stovek korun, stejně jako u profesionálních prodejců, které nabízí korozivzdorné přímé trysky. Profesionální trysky pro podobné účely z karbidických materiálů se pohybují v řádech desítek tisíc, některé dosahují až na částku sta tisíc korun.

4 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a experimentálně ověřit trysku pro vysokotlaké tryskání do úzkých štěrbin. Byla vytvořena tryskáč sestava skládající se z redukční části vyrobené z nerezové austenitické chrom-niklové oceli s přídavkem síry 1.4305, dle ČSN 17 243 a tryskové části vyrobené z materiálu 1.4034, dle ČSN 17029, jedná se o legovanou ušlechtilou ocel, chromovou s vysokým obsahem uhlíku. Rozměry této trysky byly upraveny pro snadnou a jednoduchou manipulaci a montáž. Konstrukce byla navržena tak, aby splňovala nároky použití pro tlaky až do 2000 barů. Tryska byla experimentálně odzkoušena při tlacích 1850 až 1890 barů na třech zkušebních přípravcích v rozmezí 60 až 90 vteřin. Jako přípravky pro tryskání byly použity k sobě smontované ocelové destičky o rozměrech 150×100×5 mm, na které byla nanesena nátěrová hmota jako referenční prvek. Během experimentu nedošlo k deformaci ani destrukci trysky. Pro zvolenou trysku se jako nejefektivnější použití jeví neprůchozí štěrbinu z důvodu nejsilnějšího přímého vývodu. Naopak nevýhodná se tryska ukázala pro štěrbinu průchozí, jelikož přímý vývod ubírá na tlaku vody bočními vývody což způsobuje snížení účinnosti otryskání stran štěrbin. Na základě vyhodnocených výsledků z experimentu by bylo možné konstrukci upravit, například použitím jiného materiálu trysky, prodloužením celkové délky trysky a možností odstranění přímého vývodu z důvodu zvýšení efektivity bočních vývodů. Z poznatků z experimentu je patrné, že by bylo výhodné vytvořit více typů trysek pro různé typy štěrbin, aby bylo docíleno co možná nejefektivnějšího otryskání.

5 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Vlastnosti abraziv [8]:	14
Tabulka 2: Mechanické vlastnosti vybraných ocelí [40] [41]	30
Tabulka 3: Chemické složení vybraných ocelí (v procentech) [40] [41]	30

6 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Princip tryskání metacími koly [9]	15
Obrázek 2: Schéma injektorového tryskání pro pískovací zařízení [16].....	16
Obrázek 3: Tryskací box [17]	16
Obrázek 4: Schéma tlakového způsobu tryskání pro pískovací zařízení [16].....	16
Obrázek 5: Tryskání zvlhčeným abrazivem [21]	17
Obrázek 6: Možné typy přímých trysek [33]	20
Obrázek 7: Rotační tryska [34]	20
Obrázek 8: Venturiho tryska [37]	21
Obrázek 9: Výkres redukční části.....	25
Obrázek 10: Sestava vyrobené trysky.....	25
Obrázek 11: Tryska kolmá	26
Obrázek 12: Výkres kolmé trysky	26
Obrázek 13: Výkres tryskové části.....	27
Obrázek 14: Model tryskové části	27
Obrázek 15: Trysky použité v experimentu	27
Obrázek 16: Simulace první varianty (1500 barů)	28
Obrázek 17: Simulace první varianty (2000 barů)	28
Obrázek 18: Simulace druhé varianty (1500 barů).....	29
Obrázek 19: Simulace druhé varianty (2000 barů).....	29
Obrázek 20: Zkušební přípravky	31
Obrázek 21: Tryskací stroj	31
Obrázek 22: Nastavení tryskacího stroje	32
Obrázek 23: První test trysky.....	32
Obrázek 24: Trysková sestava a upevněný přípravek	32
Obrázek 25: Rozmontovaný přípravek po 1. zkoušce	33
Obrázek 26: Tryskání přípravku	34

Obrázek 27: Rozmontovaný přípravek po 2. zkoušce	34
Obrázek 28: Rozmontovaný přípravek po 3. zkoušce	35

7 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Výkres tryskové části.

Příloha č. 2 Naměřené hodnoty nátěrové hmoty na otryskaných přípravcích (hodnoty v μm)

8 ZDROJE

- [1] MOHYLA, Miroslav. *Technologie povrchových úprav kovů*. 2. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2000. ISBN 80-7078-953-0.
- [2] SUCHÁNEK, Vladimír. *Speciální technologie povrchových úprav*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-01-01018-x.
- [3] JANKURA, Daniel, Janette BREZINOVÁ, Jarmila ŠEVČÍKOVÁ, Dagmar DRAGANOVSKÁ a Anna GUZANOVÁ. *Materiály v strojárskiej výrobe a technológje ich finalizácie*. Vydanie prvé. [Košice]: Technická univerzita v Košiciach, 2011. ISBN 978-80-553-0786-2.
- [4] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
- [5] PLACHÝ, Jan, Jiří PROCHÁZKA a Jan PRUDKÝ. *Technologie slévání, tváření a svařování*. Praha: ČVUT, 1970. Učební texty vysokých škol.
- [6] Drsnost obrobeneho povrchu. *Www.tumlikovo.cz* [online]. 2010 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/drsnost-obrobeneho-povrchu/>
- [7] Praktické rady pro leštění. *Www.topabrasive.cz* [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://www.topabrasive.cz/cz/prakticke-rady-pro-lesteni/>
- [8] BREZINOVÁ, J., Dagmar DRAGANOVSKÁ a D. DRAGANOVSKÁ. *Abrasive Blast Cleaning and its Application*. Switzerland: TTP, 2015. ISBN ISBN 978-3-03835-995-1.
- [9] Tryskání metacími koly. *Www.trytech.cz* [online]. [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.trytech.cz/o-tryskani/tryskani-metacimi-koly/>

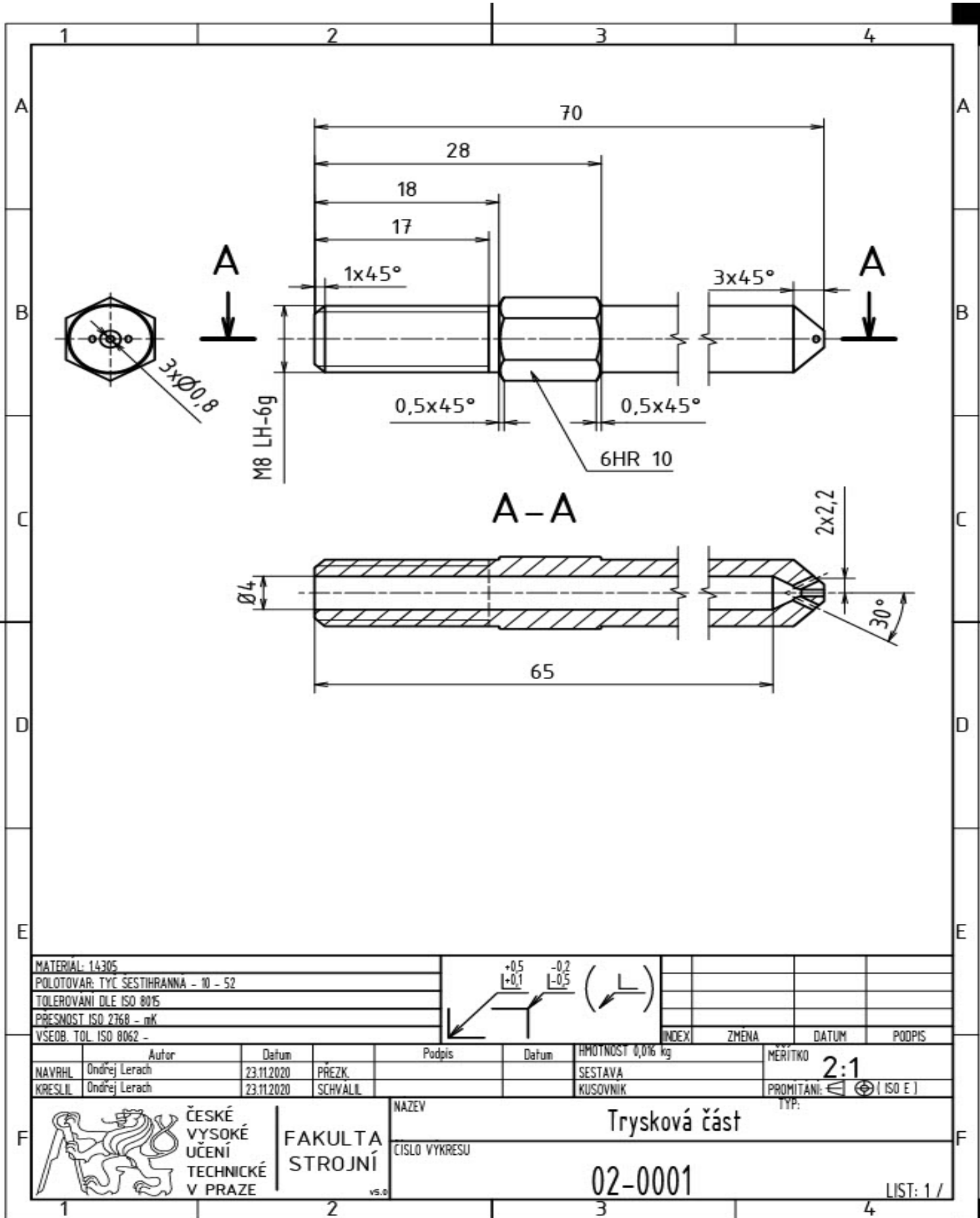
- [10] What is Wheel Blasting and When is it Right For You?. *Pittsburghsprayequip.com* [online]. [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://pittsburghsprayequip.com/blogs/pittsburgh-spray-equipment-company/what-is-wheel-blasting-is-it-right-for-you>
- [11] High speed descaling with Wheelabrator's Wire Rod machines. *Www.wheelabratorgroup.com* [online]. 2016 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.wheelabratorgroup.com/en-gb/whats-new/wheelabrador-news/advantages-of-blast-wheel-cleaning>
- [12] Compressed Air Application: Sandblasting/Abrasive Blasting. *Www.thecompressedairblog.com* [online]. [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.thecompressedairblog.com/application-sandblastingabrasive-blasting>
- [13] What is Air Blasting. *Ferroecoblast.com* [online]. [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://ferroecoblast.com/technology/air-blasting>
- [14] Ruční injektorové kabiny. *Www.oteco.cz* [online]. [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: <https://www.oteco.cz/cz/produkty/tlakovzduzne-tryskani/rucni-injektorove-kabiny/>
- [15] INJEKTOROVÉ TRYSKACÍ (PÍSKOVACÍ) KABINY. *Www.spolmont.cz* [online]. [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: <https://www.spolmont.cz/injektorove-kabiny>
- [16] Kabinové tryskání. *Www.trytech.cz* [online]. [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: <https://www.trytech.cz/o-tryskani/kabinove-tryskani/>
- [17] Injektorová tryskáč kabina CAB-110SD - Contracor. *Www.trytech.cz* [online]. [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: https://www.trytech.cz/injektorove-kabiny/injektorova-tryskaci-kabina-cab-110sd-contracor/?gclid=CjwKCAiAxeX_BRASEiwAc1QdkUxQAhSvQN27BR8v320Hs0gk-T6NIJEvXokZBifv9UZcbis72qMvAhoCuk0QAvD_BwE
- [18] KREIBICH, Viktor. *Teorie a technologie povrchových úprav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01472-x.
- [19] What is wet blasting?. *Www.vapormatt.com* [online]. [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.vapormatt.com/our-technology/what-wet-blasting>
- [20] DRY BLASTING VS WET BLASTING. *Www.kuegroup.com* [online]. [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.kuegroup.com/dry-blasting-vs-wet-blasting/>

- [21] The wet blasting technique. *Phibo.be* [online]. [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://phibo.be/en/products/installations-and-processes/wet-blasting-installations/wet-blasting-technique>
- [22] TRYSKÁNÍ SUCHÝM LEDEM. *Bionetplus.cz* [online]. [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://bionetplus.cz/tryskani-suchym-ledem/>
- [23] TRYSKÁNÍ SUCHÝM LEDEM. *Www.pap-pe.cz* [online]. [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.pap-pe.cz/index.php/portfolio/tryskani-suchym-ledem>
- [24] O suchém ledu a tryskání suchým ledem Bavaria ICE. *Www.bavaria-ice.de* [online]. [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.bavaria-ice.de/%C4%8Desk%C3%BD/technologie-such%C3%A9ho-ledu/v%C3%BDhody-metody/>
- [25] STRATFORD, Scott. Dry ice blasting for paint stripping and surface preparation. *Metal Finishing*. 1999, **97**(5), 481-487. ISSN 00260576. Dostupné z: doi:10.1016/S0026-0576(99)80815-0
- [26] Práce vysokotlakým vodním paprskem 300 až 2800 bar. In: *Http://www.saoplus.eu* [online]. 2014 [cit. 2021-01-18]. Dostupné z: http://www.saoplus.eu/letak_SAO.pdf
- [27] THE BASICS OF HIGH PRESSURE CLEANING. *Cleanfax.com* [online]. [cit. 2021-01-18]. Dostupné z: <https://cleanfax.com/technical-tip/basics-high-pressure-cleaning/>
- [28] Hydrodemolice. *Www.hdrservis.cz* [online]. [cit. 2021-01-18]. Dostupné z: <https://www.hdrservis.cz/hydrodemolice-betonu/>
- [29] JÁCHYM, Jan. *ŘEZÁNÍ MATERIÁLU VODNÍM PAPSKEM* [online]. Brno, 2009 [cit. 2021-01-18]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/13032/final-thesis.pdf?sequence=>. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. VLADIMÍR HABÁN, Ph.D.
- [30] NOZZLES. *Www.waterjetting.nl* [online]. [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.waterjetting.nl/derc-salotech/products/nozzles>
- [31] SPRAY NOZZLES. *Sprayweb.spray.com* [online]. [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: https://sprayweb.spray.com/spray_nozzles/high-pressure_nozzles.aspx
- [32] STANDARD NOZZLES. *Www.nlbcorp.com* [online]. [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.nlbcorp.com/shop/nozzles/standard-nozzles/>

- [33] Insert Round and Fan Jet Nozzle. *Www.waterjetting.nl* [online]. [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.waterjetting.nl/derc-salotech/products/nozzles/standaard-nozzles-and-inserts/insert-round-and-fan-jet-nozzle>
- [34] SPINNOZZLE. *Www.nlbcorp.com* [online]. [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.nlbcorp.com/shop/nozzles/spin-nozzle/>
- [35] Rotační a přímé trysky. *Www.aqpumpy.cz* [online]. [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.aqpumpy.cz/produkty/standardni-prislusenstvi/rotacni-a-prime-trysky>
- [36] Venturiho trysky – původ, funkce a přínos. *Wista* [online]. [cit. 2021-06-11]. Dostupné z: <https://www.wista-shop.cz/venturiho-trysky-%E2%80%93-puvod-funkce-a-prinos>
- [37] Tryska pracovní Venturiho. *Pískovačky.cz* [online]. [cit. 2021-06-11]. Dostupné z: <https://piskovacky.cz/trysky-profi-mobilnich-piskovacek-tryskacu/173-tryska-pracovni-venturiho-ntl-32-850.html>
- [38] ČSN ISO 8501-1. *Příprava ocelových povrchů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků - Vizuální 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.
- [39] ČSN EN ISO 8501- 4. *Příprava ocelových povrchů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků - Vizuální vyhodnocení čistoty povrchu - Část 4: Výchozí stav povrchu, stupně přípravy a bleskové koroze po vysokotlakém tryskání vodou*. Český normalizační institut, 2007.
- [40] ŠINÁGL, Viktor. *Návrh trysky pro vysokotlaké tryskání*. Praha, 2020. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jan Kudláček, Ph.D.
- [41] 1.4034 nerezová ocel. *Www.kipp.cz* [online]. [cit. 2021-05-23]. 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>
- [42] 1.4305 nerezová ocel. *Www.kipp.cz* [online]. [cit. 2021-05-23]. 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>

9 PŘÍLOHY

Příloha č. 1 Výkres tryskové části.



Příloha č. 2 Naměřené hodnoty nátěrové hmoty na otryskaných přípravcích (hodnoty v μm)

Vzorek č. 1



A grid of 32 samples arranged in 4 rows and 8 columns. Each sample is a dark grey rectangular plate with a circular hole at one end. The measured values are printed in white on each sample. Some samples have handwritten numbers in blue ink.

138	3	0	113	213	222	0	212
120	0	0	119	217	212	141	194
117	120	158	121	206	186	174	192
123	129	125	120	191	163	177	159

Vzorek č. 2



A grid of 32 samples arranged in 4 rows and 8 columns. Each sample is a reddish-brown rectangular plate with a circular hole at one end. The measured values are printed in white on each sample. Some samples have handwritten numbers in blue ink.

53	34	54	57	57	0	1	60
44	43	44	48	55	1	2	45
28	47	37	46	77	70	50	63
27	36	29	49	76	83	91	73

Vzorek č. 3

