VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TESTOVÁNÍ VYSOKOTEPLOTNÍ KOROZIVZDORNOSTI MATERIÁLU INCONEL 625

TESTING OF HIGH-TEMPERATURE CORROSION RESISTANCE OF INCONEL 625

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Jiří Tomek

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Bc. Jiří Tomek**
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	**Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Testování vysokoteplotní korozivzdornosti materiálu Inconel 625

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autor navrhne a provede ve spolupráci s ostaními kolegy pracujícími na zvolené problematice experimenty na materiálu trubek do korozního prostředí kotlů se zaměřením na Inconel 625. Korozní odolnost se bude testovat za vysokých teplot při 850 až 1050°C v tekutých solích. Součástí práce je jak samotný návrh a úprava průběhu experimentu, tak aby se výsledné poškození materiálu trubek blížilo reálnému opotřebení v kotli, tak jeho fyzické provedení a vyhodnocení výsledků, včetně zapojení do souvisejícího projektu. Testy budou zaměřeny jak na samotné materiály, tak na návar slitiny Inconel 625 na trubkách z 16Mo3 na funkčním vzorku trubkového oblouku.

Cíle diplomové práce:

– rešerše zvolená problematiky
– rozbor stávající fáze experimentu
– návrh vlastního experimentu
– provedení testů a jejich vyhodnocení
– zhodnocení a doporučení do budoucna

Seznam doporučené literatury:

PTÁČEK, L. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.

DONACHIE, M. J. a S. J. DONACHIE. Superalloys: a technical guide. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, 2002. ISBN 08-717-0749-7.

DAVIS, J. R. Heat-resistant materials. Materials Park, Ohio: ASM International, c1997. ISBN 08-717-0596-6.

Technical instruction for Boiler Clading. 4. Sedziszow: Sefako, 2021.

SALINAS-SOLANO, G., J. PORCAYO-CALDERON, J. G. GONZALEZ-RODRIGUEZ, V. M. SALINAS-BRAVO, J. A. ASCENCIO-GUTIERREZ a L. MARTINEZ-GOMEZ. High Temperature Corrosion of Inconel 600 in NaCl-KCl Molten Salts. Advances in Materials Science and Engineering [online]. Hindawi Publishing Corporation, 2014, 2014 [cit. 2021-01-07]. ISSN 1687-8434. Dostupné z: doi:10.1155/2014/696081

KHORSAND, S., A. SHEIKHI, K. RAEISSI a M. GOLOZAR. Hot Corrosion Behavior of Inconel 625 Superalloy in Eutectic Molten Nitrate Salts. Oxidation of Metals [online]. New York: Springer US, 2018, 90(1), 169-186 [cit. 2021-01-07]. ISSN 0030-770X. Dostupné z: doi:10.1007/s11085-017-9830-5

GOLAŃSKI, G., M. LACHOWICZ, J. SŁANIA, J. JASAK a P. MARSZAŁEK. Research on 16Mo3 (16M) Steel Pipes Overlaid with Haynes Nicro625 Alloy Using MIG (131) Method. Archives of Metallurgy and Materials. Warszawa: Polska akad nauk, 2015, 60(4), 2521-2524. ISSN 2300-1909. Dostupné z: doi:10.1515/amm-2015-0408

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce bylo navržení experimentu pro testování vysokoteplotní korozivzdornosti materiálu Inconel 625. Experiment proběhl při dvou teplotách (900°C a 975°C) celkem na 6 vzorcích (3 pro každou teplotu). Experiment probíhal v rozpuštěné směsi solí (35 % Na2SO4 30 % KCl a 35 % NaCl.) v peci „PEC Lac PK 105/12“. Na základě výsledků jednotlivých měření byly navrženy parametry experimentu a kroky do budoucna. Diplomová práce uvádí i základní popis projektu, kterého je součástí. Kde projekt vznikl a v jaké je zrovna fázi. Projekt vznikl na základě požadavků firmy BPP Energy s.r.o. vyvinout zařízení pro ohyb trubek z materiálu 16Mo3 s návarem z Inconelu 625. Výsledky diplomové práce jsou porovnány i s výsledky stejného měření, ale pro materiál 16Mo3. V rešeršní části se diplomová práce zabývá hlavně materiálem Inconel 625. Dále je diplomová práce zaměřena na vysokoteplotní korozivzdornost, proto je popsán proces koroze. A v neposlední řadě je věnována pozornost procesu svařování.

Klíčová slova

Inconel 625, 16Mo3, korozivzdornost Inconel 625, PEC Lac PK 105/12, svařování

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis was to design an experiment for testing the high-temperature corrosion resistance of Inconel 625. The experiment was performed at two (900°C and 975°C) on a total of 6 samples (3 for each temperature). The experiment was performed in a dissolved mixture of salts (35% Na 2 SO 4, 30% KCl and 35% NaCl) in a „PEC Lac PK 105/12“ furnace. Based on the results of individual measurements, experimental parameters and future steps were proposed. The diploma thesis also presents a basic description of the project of which it is a part. Where the project originated and what stage it is at. The project was created based on the requirements of BPP Energy s.r.o. to develop a device for bending pipes made of 16Mo3 material with a weldment from Inconel 625. The results of the diploma thesis are also compared with the results of the same measurement, but for 16Mo3 material. In the research part, the diploma thesis deals mainly with the material Inconel 625. Furthermore, the diploma thesis is focused on high-temperature corrosion resistance, therefore the corrosion process is described. And in the completion, attention is paid to the welding process.

Key words

Inconel 625, 16Mo3, corrosion resistence Inconel 625, PEC Lac PK 105/12, welding

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TOMEK, Jiří. *Testování vysokoteplotní korozivzdornosti materiálu Inconel 625* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: https://www.vutbi.cz/studenti/zav-prace/detail/139600. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma testování vysokoteplotní korozivzdornosti materiálu Inconel 625 vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 15.5.2022

místo, datum

Bc. Jiří Tomek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce panu Ing.Oskaru Zemčíkovi,Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále děkuji panu Bc. Františku Šiklovi za pomoc při provádění experimentu.

OBSAH

ÚVOD 9
1 Popis řešeného problému 10
1.1 BPP Energy 10
1.2 Diplomová práce v kontextu celého výzkumu 10
1.2.1 Proč projekt vznikl 10
1.2.2 Cíle projektu 10
1.2.3 Dosavadní výsledky projektu 11
1.2.4 Cíl diplomové práce 11
2 Teorie 13
2.1 Inconel 625 13
2.1.1 Základní vlastnosti Inconelu 625 13
2.1.2 Základní použití Inconelu 625 14
2.1.3 Vlastnosti Inconelu 625 v tabulkách a grafech 14
2.2 Koroze 15
2.3 Svařitelnost 16
2.3.1 Metody svařování 17
2.3.2 Svařování plamenem 17
2.3.3 Svařování elektrickým obloukem 17
2.3.4 MIG-MAG (Metal Inert Gas – Metal Active Gas) 18
2.3.5 TIG/WIG 18
2.3.6 Další metody tavného svařování 19
2.3.7 Tlakové svařování 19
2.4 Materiál 16Mo3 19
2.5 Pece 20
2.6 Soli 21
2.7 Hadovitý systém 22
3 Praktická část 23
3.1 Cíl experimentu 23
3.2 Postup experimentu 23
3.2.1 Příprava experimentu 23
3.2.2 Potřebné vybavení 23
3.2.3 V experimentu příprava vzorků 29
3.2.4 Příprava pracoviště 30
3.2.5 Průběh měření 30
3.2.6 Zajímavosti – detaily, které je potřeba zmínit 34
3.3 Výsledek měření 38
3.4 Závěr z měření 46
4 Závěr 49
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 50
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 53

ÚVOD

Diplomová práce byla napsána na základě poptávky firmy BPP Energy s.r.o., která zahájila výzkum v oblasti hadovitých systémů. Cílem výzkumu je vytvořit zařízení, pomoci kterého bude možné vytvářet hadovité systémy trubek z materiálu 16Mo3 i z návarem z Inconelu 625. Cílem diplomové práce bylo navrhnout experiment, pomocí kterého by bylo možné testovat vysokoteplotní korozivzdornost materiálu Inconel 625. Tenhle experiment byl navržen a byla vytvořena konkrétní forma tohoto experimentu i s následnými doporučenými kroky. Nejdřív bylo navrženo testovací zařízení a korozní prostředí. Konkrétně šlo o směs tří solí (35 % Na2SO4 30 % KCl a 35 % NaCl). Směs solí byla navržena z chemického rozboru reálné součásti z praxe. Poté proběhl experiment a z výsledku měření se vytvořili závěry.

Součástí práce je i základní rešerše o zkoumaném materiálu Inconelu 625, použitých zařízeních a dalších prvcích experimentu. Zároveň tak je předmětem diplomové práce i zasazení do kontextu s projektem BPP Energy s.r.o.. Co vedlo společnost k zahájení výzkumu a v jaké fázi projekt momentálně je. Hlavní důvod je ten, že na českém trhu chybí výrobce hadovitých systému pro trubky s návarem z Inconelu 625. Společnost díky tomu, že tohle bude schopna vyrábět, tak získá silnější pozici na trhu a výhodu oproti konkurenci. Zároveň se ji odstraní starosti s dodavateli.

Ve spalovnách komunálního odpadu, kam společnost své výrobky dodává, vzniká velmi silné korozní prostředí. Proto se na trubky ve spalovnách, kudy vede pára, navařuje Inconel 625, který má lepší korozní odolnost. Spalovací komorou prochází voda v trubkách a dochází k ohřívání procházející vody. Aby se voda stihla ohřát, je potřeba zabezpečit co možná nejdelší dráhu ve spalovací komoře. A toho se dociluje právě pomocí hadovitého systému.

1 POPIS ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

V téhle kapitole je více popsána firma BPP Energy s.r.o a její činnost. Dále je zde uveden důvod, proč se firma rozhodla zahájit výzkumný projekt. Součástí projektu je i část, ve které se zkoumá nejlepší způsob, jak měřit vysokoteplotní korozivzdornost materiálu Inconel 625. A diplomová práce se věnuje právě téhle části.

1.1 BPP Energy

BPP Energy je firma, která se zabývá výrobou tlakových částí kotlu. Ať už se jedná o energetický průmysl, chemický, petrochemický nebo hutnictví. Společnost byla založena v roce 2011 panem Radkem Multušem. Hlavními výrobky, které společnost poskytuje jsou převážně výrobky z Inconelu 625, ekonomizéry, přehříváky, membránové stěny a další tlakové systémy. Tyhle výrobky a systémy jsou používány v náročných podmínkách. Převážně v chemicky agresivních prostředí jako jsou spalovny komunálního odpadu, kde jsou zároveň i vysoké teploty (okolo 900 – 1100°C). To vyžaduje velmi odolné materiály výrobků. Společnost BPP Energy s.r.o. to jako jediní v ČR řeší například pomocí návaru na trubky z Inconelu 625. Dále jako jediní v ČR vyrábí membránové stěny [1].

1.2 Diplomová práce v kontextu celého výzkumu

V téhle části se diplomová práce zabývá popisem celkového výzkumného projektu, který společnost BPP Energy s.r.o zahájila a jehož je diplomová práce součástí. Dále je zde uvedeno proč tenhle projekt vznikl, jaký byl záměr a jaké jsou jeho cíle. V neposlední řadě je zde uvedeno i jakých výsledků, v rámci projektu, již bylo dosaženo.

1.2.1 Proč projekt vznikl

Společnost BPP Energy, s.r.o. byla před zahájením projektu závislá na zahraničních dodavatelích. Neexistovala žádná společnost na Českém trhu, která by dokázala vyrobit a dodávat bimetalové trubky s ohybem menším než je 1D. Projekt vznikl tedy proto, aby se posílila konkurenceschopnost společnosti. A né jenom společnosti, ale i celé České Republiky. Společnost má totiž v plánu novou technologii poskytnout a distribuovat do zahraničí. Díky tomu se zvýší globální konkurenceschopnost České Republiky [1].

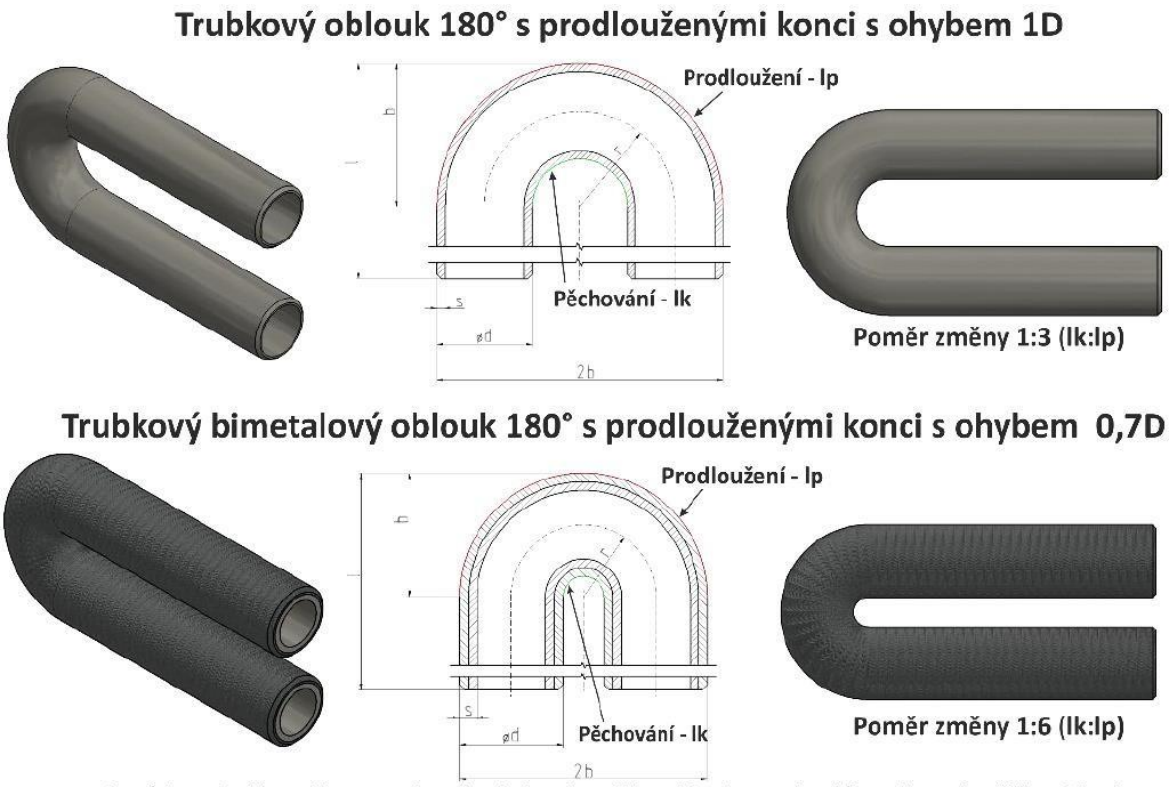
Společnosti to pomůže se více osamostatnit od zahraničních dodavatelů. Díky tomu, že zavede hadovitý systém s tímto řešením z vlastní výroby, tak dojde ke zvýšení účinnosti o 20–50 % oproti dosavadnímu řešení, které bylo nedostačující a zvyšovalo náklady. Jak výrobní náklady, jelikož firma musela častěji měnit používané zařízení, tak náklady na straně odběratele, jelikož odběratel musel platit další výrobní zařízení. Další pozitivní výsledek je zvýšení životnosti. Což souvisí se snížením nákladů, jak těch provozních, tak těch na straně odběratelů [1].

1.2.2 Cíle projektu

Cílem celého výzkumného projektu je vyvinout technologii na ohýbání bimetalových trubek. Základní materiál trubek je 16Mo3, na který je navařen návar z Inconelu 625. Je požadovaný trubkový ohyb s obloukem 180° s prodlouženými konci s ohybem 0,7D a menším, viz. obr. 1 [1].

Další cílem projektu je vyvinout testovací zařízení. Pomoci tohoto zařízení bude moci simulovat nebezpečné prostředí v reálném provozu s rychlejším účinkem. Díky tomu bude

možné testovat vzorky. Posledním krokem v projektu je samotné testování vzorků v navrhnutém zařízení a prostředí. Dále o tomhle cíli v kapitole „1.2.4 Cíl diplomové práce“.



Obr. 1 Srovnání ohybu 1D a 0,7D [1].

1.2.3 Dosavadní výsledky projektu

Momentálně je projekt ve fázi, kdy je navrhnuto zařízení, pomocí kterého je možné dosáhnout požadovaného ohybu. Bylo navrhnuto zařízení, které umožňuje vytvořit bimetalový trubkový oblouk 180° s prodlouženými konci s ohybem 1D. A zařízení pro vytvoření bimetalového trubkového oblouku 180° s prodlouženými konci s ohybem 0,7D. K tomu vytvořené potřebné technické výkresy, technická dokumentace řešení návrhu polotovaru a prototypu zkušebního pracoviště [2].

Následně bylo navrženo testovací zařízení a způsob, jakým simulovat prostředí provozu. Byly navrženy základní parametry, jak by mohl experiment probíhat a byly provedeny první měření. První měření se provedly jak se vzorky z materiálu 16Mo3, tak i se vzorky z materiálu Inconel 625. Testy byly prováděny při teplotě 1050 °C. Během prvního testování byly odstraněny hlavní nedostatky experimentu a ze sesbíraných údajů navrženy další požadavky pro následující měření [2].

1.2.4 Cíl diplomové práce

Diplomová práce se věnuje další části projektu. A tou částí je pokračovat v testování vysokoteplotní korozivzdornosti materiálu Inconel 625 i pro další teploty. Pro průběh diplomové práce byly použity předešlé poznatky a cílem je tyhle poznatky rozšířit. Udělat měření i pro teploty 900 °C a 975 °C.

Následně naměřené hodnoty zhodnotit a porovnat s předešlými měřeními a navrhnout optimální parametry experimentu, pomocí kterého by bylo možné simulovat reálné prostředí ve spalovnách. Popřípadě doporučit další kroky, které je potřeba udělat, aby k tomuto výsledku mohlo dojít [1]. Na obr. 2 lze vidět prostředí, ve kterém se měřilo. Na pravé straně je přichystávací stůl, kde docházelo k měření a čištění vzorků, přípravě solí a jako odkládací plocha. Za osobou na obrázku lze vidět pec, ve které se vzorky měřily. Na osobě jde vidět, jaké ochranné a jiné pomůcky se při měření používaly, viz. obr. 2.

Obr. 2 Ochranné prostředky a prostředí měření.

2 TEORIE

V téhle části se diplomová práce věnuje rešerši použitých materiálů, které byly testovány, jejich mechanických vlastností a základního použit. Poté se diplomová práce věnuje pecím, které byly při experimentu použity. A následně se diplomová práce zabývá směsi soli, která byla použita.

2.1 Inconel 625

V diplomové práci byl použit materiál s názvem Inconel 625. Materiál je možné nalézt také pod označením: Chronin 625, Altemp 625, Haynes 625, Nickelvac 625, Alloy 625 nebo Nicrofer 6020. V odborné literatuře Inconel 625 najdeme pod označením W – Nr 2.4856. V diplomové práci je používáno označení Inconel 625. Jedná se o Nikl-Chrom-Molybden-Niob slitinu. Spadá do niklových slitin označovaných jako superslitiny. Termín superslitina byl vytvořen za druhé světové války a označuje slitiny, které byly použity pro turbíny a kompresory, které vyžadovaly vysoký výkon při extrémních teplotách [3]. Díky kombinaci těchto prvkům má slitina velmi dobré vlastnosti. Slitina se vyznačuje velkou pevností a korozivzdorností. Inconel se dá dobře zpracovávat a odolává oxidaci za vysokých teplot. Díky tomu, že Inconel odolává korozi a vysokým teplotám, tak je vhodný pro naše použití [4]. Ve spalovacích pecích je silně agresivní prostředí a zároveň vysoká teplota. Proto je potřeba materiál, který tomuhle dokáže odolat [5].

Tab.1 Chemické složení Inconel 625 [6].

Složení [hm %]	Cr	Ni	Co	Mo	Cu	Nb	Ti	Al	Fe	C
Inconel 625	21,5	61	-	9	-	3,6	0,2	0,2	2,5	0,05

2.1.1 Základní vlastnosti Inconelu 625

Korozivzdornost

Inconel 625 má velmi dobrou korozivzdornost. Dokáže odolávat velkému množství korozních prostředí. V mírných korozních prostředích Inconel 625 nezaznamená téměř žádný útok. Jedná se o prostředí jako je atmosféra, voda, alkalická media nebo neutrální soli. Velmi dobrou odolnost má i k mořské vodě. Z toho důvodu má široké uplatnění v lodním průmyslu, který vyrábí lodě a součástky do lodí, člunů a ponorek, které slouží k použití v mořské vodě. Hlavní výhodou, pro použití Inconelu 625 v mořské vodě je fakt, že Inconel velmi dobře odolává důlkové a štěrbinové korozi. A to hlavně díky přítomnosti velkému množství molybdenu. Hlavní použití v mořské vodě je pro ocelové lano pro kotvení kabelů, pomocné pohonné motory pro ponorky, vrtulové lisy pro motorové dělové čluny… [3; 5].

Co se týče silnějších korozních prostředí, tak Inconel odolává též dobře. Hlavní důvod je kombinace niklu a chromu, která poskytuje odolnost proti oxidujícím chemikáliím a kombinace niklu a molybdenu na druhou stranu poskytuje odolnost vůči neoxidačním prostředím. Další prvek, který pozitivně přispívá k lepší vlastnostem Inconelu je niob, který zabraňuje následnému mezi krystalovému praskání po svařování, a to tak, že slitinu během svařování stabilizuje proti senzibilizaci [3].

Díky niklu je Inconel chráněn i proti korozi praskáním, způsobené chloridovými ionty [3]. Inconel 625 také dobře odolává minerálním kyselinám, mezi které patří kyselina chlorovodíková, dusičná a fosforečná. Dále je Inconel 625 dobře odolný proti organickým kyselinám a zásadám. Inconel 625 zároveň poskytuje i odolnost proti kotelnímu kameni za cyklických a statických podmínek [5].

Pevnost, svařitelnost a pájitelnost Inconelu 625

Inconel 625 se vyznačuje vysokou pevností v tahu. Zároveň má vysokou pevnost i při tečení (cca nad 600 °C) a přetržení. Má přípustnou konstrukční pevnost při zvýšených teplotách (649-760 °C). Další vlastností Inconelu 625 je vynikající únavová a tepelně únavová pevnost. Mezi velmi dobré vlastnosti Inconelu 625 je svařitelnost a pájitelnost. Je to skvělá vlastnost i pro účely diplomové práce, kdy dochází k návaru Inconelu 625 na trubky z 16Mo3 [3; 5]. Více o procesu svařování je napsáno dále.

2.1.2 Základní použití Inconelu 625

Mezi běžné použití Inconelu 625 patří oblasti leteckého průmysl, aplikace s mořskou vodou, spalovny odpadu, ropný průmysl, likvidace radioaktivního odpadu a další. V aplikaci s mořskou vodou to jsou vybavení vystavené mořské vodě, potrubí mořské vody při stavbě lodí a další. V ropném průmyslu Inconel 625 najdeme ve výrobě potrubních a spalovacích systémech, vyzdívek stoupaček při těžbě ropy, komponenty při těžbě ropy a plynu... [3; 5]. Využití Inconel 625 má u tenkostěnných potrubí nebo nádob, kde šetří hmotnost a zlepšuje přenos tepla. Toho se využívá u výměníku tepla, přenosové potrubí a ventily. Dále se používá jako reakční nádoby, uzávěry a hadičky… [3; 5]. Pro diplomovou práci je významné použití jako přehříváky ve spalovnách odpadu [5].

Svařování

Inconel 625 je vhodný pro svařování. Snadno dochází ke spojení konvenčními svařovacími postupy a procesy. Pro svařování se používají svařovací dráty (např. INCONEL Metal 625 a INCONEL Welding Electrode 112 – jedná se o nikl-chrom-molybdenové produkty) [3]. Nanesený svarový kov má dobrou korozní a oxidační odolnost, vysokou houževnatost a pevnost [3; 5].

Pro aplikaci v diplomové práci je svařování Inconelu 625 velmi důležité. Dnešní odpad ve spalovnách je vyráběn z různých materiálů, při jejichž spalování agresivně působí na materiály, které s nimi dojdou do styku. Jedná se i o výměníky tepla. Z toho důvodu jsou na trubky výměníku tepla, který je z materiálu 16Mo3, navařen Inconel 625. Díky tomu jsou výměníky mnohem víc odolné. To způsobí větší životnost a snížení nákladů [3; 5; 6].

2.1.3 Vlastnosti Inconelu 625 v tabulkách a grafech

Tab.2 Základní mechanické vlastnosti Inconel 625 [3; 5; 6].

Měrná hmotnost	**8,44 g.cm^{-3}**
Tažnost při 20 °C	50 %
Modul pružnosti v tahu při 20 °C	207 GPa
Tvrdost před tvářením za studena	200 HV
Pevnost při tečení	360 MPa

Tab.3 Pevnost v tahu a smluvní mez kluzu v závislosti na provozní teplotě [3; 5; 6].

Provozní teplota [°C]	**21**	**204**	**316**	**427**	**538**	**649**	**760**	**871**
Pevnost v tahu [MPa]	965	924	910	910	896	820	538	276
Smluvní mez kluzu [MPa]	490	455	434	421	421	414	407	269

Tab.4 závislosti ostatních superslitin v závislosti na provozní teplotě [3; 5; 6].

Materiál	Pevnost v tahu [MPa]			Mez kluzu [MPa]		
	21 °C	540 °C	760 °C	21 °C	540 °C	760 °C
Inconel 600	660	560	260	285	220	180
Inconel 601	740	725	290	455	350	220
Inconel 617	740	580	440	295	200	180
Inconel 625	965	893	538	490	419	407
Inconel 718	1435	1275	950	1185	1065	740

Tab.5 Pevnost při tečení [3; 5; 6].

Teplota [°C]	649	704	760
100 hodin	59	34	18
1000 hodin	43	23	12

2.2 Koroze

Koroze je proces, při kterém dochází k samovolnému porušení materiálu vlivem reakce s okolním prostředí. Mezi nejčastější korozní prostředí patří samotná atmosféra, ve které se vyskytuje většina materiálu. Další častým korozním prostředím je voda, ať už se jedná o slanou nebo sladkou vodu. Slaná je více agresivní prostředí. To znamená, že materiál potřebuje mít specifické vlastnosti, díky kterým bude ve slané vodě pomaleji korodovat, než kdyby tyhle vlastnosti neměl [7; 8].

Koroze probíhá téměř v každém prostředí. Mezi prostředí, kde koroze neprobíhá, tak je vakuum. Ve vakuum koroze probíhat nemůže, jelikož tam není nic, co by materiál napadlo. Tohle se pochopí lépe, když se upřesní, jak taková koroze probíhá. Koroze je děj, při kterém dochází k reakci mezi kovem (mimo kovy tak korodují i další organické a neorganické látky. Může jít například o plasty nebo s organických látek o horniny. Diplomová práce se zabývá vysokoteplotní korozi Inconelu 625, proto je v práci zmíněna hlavně koroze způsobená kovům) a okolním prostředním. Podle prostředí se mění i typ koroze. To znamená, jakým způsobem je materiál znehodnocen. Záleží také, jestli je okolní prostředí relativně v klidu nebo se jedná například o proudící vodu nebo plyn [7; 8].

Norma **EN ISO 9223** rozděluje atmosféry podle korozní agresivity do šesti stupňů:

- **C1** – *velmi nízká*. Atmosféry uzavřených, klimatizovaných místností, v nichž nedochází ke kondenzaci vody,
- **C2** – *nízká*. Vztahuje se na prostory, v nichž dochází k občasné kondenzaci.
- **C3** – *střední*. Odpovídá suchým klimatům,
- **C4** – *vysoká*. Odpovídá vlhkým oblastem za působení atmosférických nečistot průmyslových měst, přístavů aj.,
- **C5** – *velmi vysoká*,
- **CX** – *extrémní*. Odpovídá prostředím s extrémní vlhkostí nebo velmi vysokým průmyslových znečištěním [7].

Některé materiály se přirozeně proti korozi chrání. Jedná se o tak zvanou pasivační vrstvu. Kov si vytvoří velmi tenkou a však účinnou vrstvu, která ho proti korozi chrání. Není to 100% ochrana, ale koroze má slabší účinky. Tvorba pasivační vrstvy nemusí být vždy jen samovolná, ale může být i řízená [7; 8].

Dalším rozdělením koroze je na:

1. Koroze při mechanickém namáhání materiálu,
2. Koroze při únavě materiálu,
3. Vibrační koroze,
4. Korozní praskání (koroze pod napětím),
5. Koroze bludnými proudy [7].

Koroze při mechanickém namáhání materiálu vzniká při tom, když je materiál mechanicky namáhán. Když dochází během koroze zároveň i k mechanickému účinku na materiál, tak se tím zvyšuje korozní účinek. Je to z toho důvodu, protože během toho dochází k poškození pasivační vrstvy, která materiál chrání a tím koroze může probíhat tak, jako by tam pasivační vrstva nebyla. Namáhání může být jen na části materiálu, díky tomu vzniká koroze jen na částech, kde došlo k poškození pasivační vrstvy. Respektive je tam průběh koroze mnohem silnější [7; 8].

Koroze se dá rozdělit podle toho jakým způsobem vzniká:
1. Štěrbinová,
2. Bodová,
3. Mezikristalová,
4. Rovnoměrná/nerovnoměrná,
5. Galvanická,
6. Korozní praskání,
7. Selektivní,
8. Erozní,
9. Styková [7; 8].

2.3 Svařitelnost

Svařování je proces, při kterém dojde ke spojení dvou a více součástí pomocí nerozebíratelného a trvalého spoje. Během svařování je potřeba dosáhnout potřebných termodynamických podmínek, při kterých dojde ke vzniku nových meziatomárních vazeb. Během svařování dochází k ovlivnění vlastností kolem spoje. Je to z toho důvodu, jelikož je velmi obtížné dosáhnout svařovaného spoje za běžných podmínek (teplota a tlak) [9].
Svařování lze rozdělit na tlakové svařování a tavné svařování. Při tlakovém svařování dochází ke spojení dvou a více součástí převážně za působení tlaku. Zatím co při tavném svařování dochází ke spojení dvou a více součástí převážně pomocí teploty. Platí, že když je při svařování použitá větší teplota, tak je zároveň použit menší tlak. Čím větší tlak, tím je potřeba menší teplota, aby došlo ke spojení. Svařování má široké použití. Lze totiž svařovat jak kovové, tak i nekovové materiály a krom materiálů, které mají podobné vlastnosti, tak lze svařovat i materiály, které mají rozdílné vlastnosti. To je umožněno

převážně díky široké škále svařovacích metod. Podle toho, jestli je použita vysoká teplota nebo tlak, jestli mají materiály stejné nebo odlišné vlastnosti nebo jestli jsou součásti kovové nebo nekovové, tak se zvolí příslušná svařovací metoda [9].

2.3.1 Metody svařování

Aby došlo ke spojení dvou a více součástí, je potřeba překonat termodynamický stav a dodat potřebnou energii. Podle toho, jakým způsobem je energie dodána, tak se dělí svařovací metody. Energie může být dodána buď ve formě tepla (například svařování plamenem), radiací (například iontové záření) nebo plastickou deformací (například svařování třením) [9].

2.3.2 Svařování plamenem

Princip metody spočívá v roztavení místa plamenem, kde se mají dvě nebo více součástí spojit, a zároveň tak i spojovacího materiálu. Po zchladnutí dojde ke spojení. Plamen je směsí hořlavého plynu a kyslíku nebo vzduchu. Mezi hořlavé plyny patří acetylen, propan nebo vodík [9].

Obr. 3 Svařování plamenem [10].

2.3.3 Svařování elektrickým obloukem

Jedná se o nejstarší metodu svařování elektrickým obloukem. Nevýhodou této metody je nízká výkonost, a proto je její použití omezováno. V případě zkušeného svářeče, je svar velmi kvalitní. Výhodou je, že se dá svářet ve všech polohách a je relativně snadné sehnat přídavný svařovací materiál a dostat se ke svářečským zdrojům. Jako přídavný svařovací materiál se používá obalovaná svářecí elektroda. Zdrojem pro sváření může být jak střídavé (trafosvářečky), tak i stejnosměrné (invertory) napětí [9; 11].

2.3.4 MIG-MAG (Metal Inert Gas – Metal Active Gas)

Jedná se v současné době o celosvětově nejpoužívanější metody [9]. Metoda funguje na tom principu, že místo svaru je nataveno pomocí elektrického oblouku. Dále je do místa sváru přiveden přídavný materiál, který je přiváděn pomocí podávacího zařízení. To ulehčuje práci svářeče a i méně zkušený svářeč může dosáhnout kvalitních svarů. Zároveň je do místa sváru hnán plyn, který vytvoří ochrannou atmosféru a zabrání tak přístupu kyslíku a dalších nežádoucích prvků, které by zhoršili výsledný svar [9].

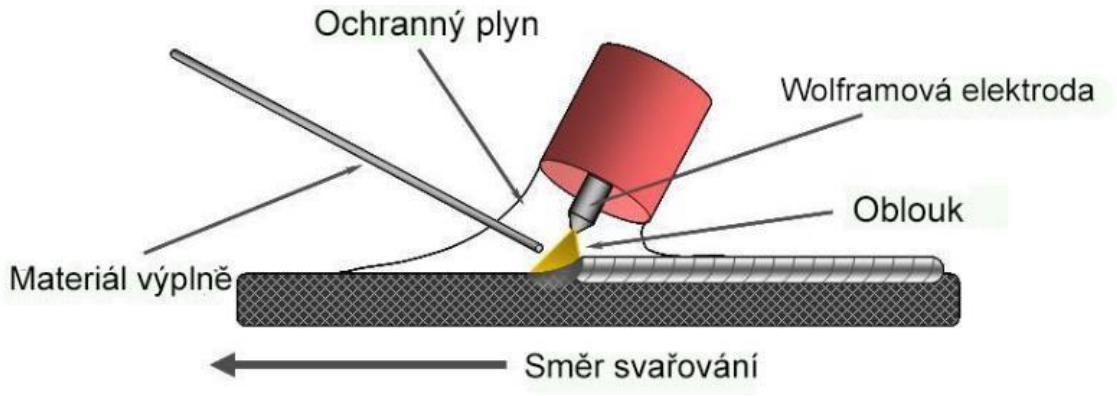
MIG – svařování v inertním plynu. Inertní plyn je plyn, který se skládá z prvků, které nepodléhají chemickým reakcím a nepodporují hoření [12; 13].

MAG – svařování v aktivním plynu. Aktivní plyn je plyn, kde se k hlavnímu plynu, argonu, přidají i další plyny například CO_2 [14].

Při svařování metodou MIG/MAG se dále rozlišuje, jestli přídavný materiál je plný drát nebo plněný [9]. Další významný ukazatel je druh svařovacího oblouku. Každý oblouk je vhodný na něco jiného. Například sprchový oblouk je vhodný pro svařování silných plechů a funguje na principu neustálých zkratů, kdy přídavný materiál přechází do svařovací lázně vysokou rychlostí v drobných kapkách [14].

2.3.5 TIG/WIG

Jedná s o metodu, kde dochází k elektrickému oblouku mezi svařovaným materiálem a netavící se wolframovou elektrodou. Wolframová elektroda je chráněna proudem inertního plynu (nejčastěji argon). Metoda TIG se dělí na TIG AC (střídavý proud) a TIG DC (stejnosměrný proud). Střídavý proud se používá u materiálů, které vytváří oxidační vrstvu, která brání svařování. Díky střídavému proudu se oxidační vrstva poruší a dochází k lepšímu svařování [9; 11; 14].



Obr. 4 Princip svařování pomocí metody TIG [15].

Metoda TIG je vhodná i pro svařování Inconelu. Nejsvařitelnější slitina Inconel je obecně Inconel 625. Správně vyrobený svar z Inconelu je silný a vysoce odolný proti korozi. Na povrchu svaru se vytváří tzv. kůže. Jedná se o povrchovou vrstvu, která se na pohled může zdát špinavá. Nevýhodou metody TIG je, že je obtížnější než svařování klasickými způsoby. Hlavně pokud se jedná o svařování Inconelu. Další vhodné způsoby svařování Inconelu jsou plazmové obloukové svařování a pulzní mikro laserové svařování. Tyhle metody mají výhodu v tom, že jsou více automatizované [16].

2.3.6 Další metody tavného svařování

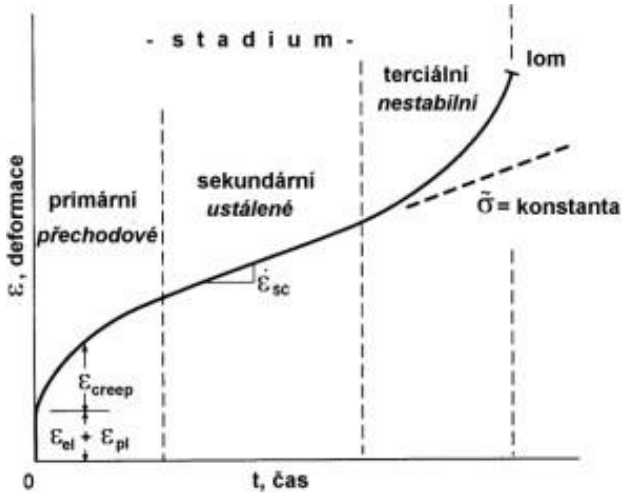
Mezi další metody svařování můžeme zařadit svařování pod tavidlem, kde je svarová lázeň chráněná plyny, které vzniknou při hoření a tavením tavidla ve svarové lázni. Elektronové svařování, při kterém dojde k emitaci svazku elektronů pomocí vysokého napětí (30 až 200 kV) na svařovaný kov. Při průchodu svazku elektronů svařovaným materiálem, dojde k rozkmitání atomární mřížky v materiálu a vzniká teplo. Aluminotermické svařování, které se používá pro svařování kolejnic [9].

2.3.7 Tlakové svařování

Významnou kapitolou v metodách svařování je tlakové svařování. Během svařování tlakem je použitý tlak, díky kterému je materiál svařen a díky kterému je vyvinuto teplo a nebo oba účinky zároveň. Mezi nejvýznamnější metody svařování pomocí tlaku patří odporové svařování. Během odporového svařování jsou na sebe svařované materiály (nejčastěji se jedná o ocelové plechy) položeny a elektrodami přimáčknuty k sobě. Mezi elektrodami prohází proud. Z důvodu toho, že je ocel špatný vodič, tak vzniká odpor, který způsobí lokální ohřátí. A při současném tlaku dochází ke svaření. Další významné tlakové svařování je svařování třením. Jedná se o metodu, při které je jedno těleso v klidu a druhé se k němu přitlačí a zároveň se roztočí. Vznikne vysoké tření a tím se zvýší teplota v místě styku. Díky tomu dojde ke spojení obou součástí. Další metody svařování tlakem je kovářské svařování, svařování výbuchem, difuzní svařování a nebo svařování ultrazvukem [9].

2.4 Materiál 16Mo3

Jedná se o nízkolegovanou ocel, která odolává vysokým teplotám. Jeho označení podle evropské normy je 1.5415. Další jeho pozitivní vlastností je odolnost proti vysokoteplotní korozi a plastické deformaci, která je pomalu vyvolávaná, když je materiál dlouhodobě zatížen při vysokých teplotách. Tento mechanismus je hojně označován jako creep a také se jedná o parametr, pomocí kterého se definuje žárupevnost materiálu. Mezi další pozitivní vlastnosti materiálu 16Mo3 patří také svařitelnost. Hlavně za použití obvyklých metod svařování jako jsou MAG a WIG. Mezi hlavní použití tohoto materiálu patří teplárenský, chemický, ropný a energetický průmysl. Hlavní uplatnění je při výrobě parních vedení, výměníků, kotlů, tlakových nádob a další. Pro ještě větší odolnost tohoto materiálu se používá návar ze slitiny niklu pod průmyslovým označením Inconel. Nejčastěji Inconel 625. O tom bylo podrobněji napsáno v předešlých kapitolách [19; 20; 21; 22].



Obr. 5 Graf průběhu creepu [18].

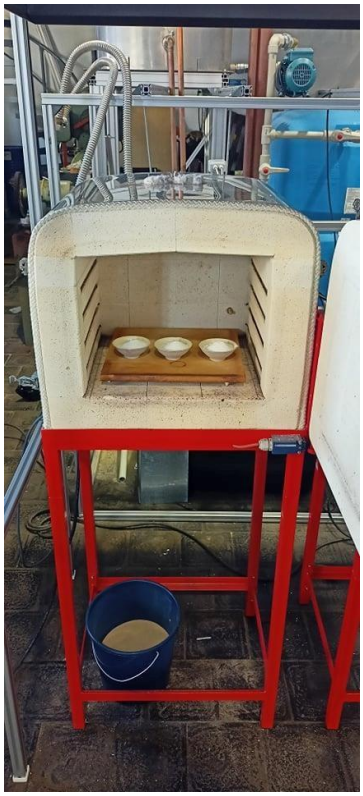
Nízkolegovaná ocel 16Mo3 je vyráběna v obloukové peci nebo kyslíkovém konvektoru a musí být v uklidněném stavu. Ocel se žíhá na teplotu okolo 900 °C. Jedná se o podeutektoidní ocel s mřížkou BCC. Ocel patří do skupiny žárupevných ocelí, proto hlavní kritérium, které je zkoumáno je tečení (creep). Creep se znázorňuje podle grafu, viz. obr. 5, kde na svislé ose je deformace a na vodorovné ose je čas. Na začátku (bráno od času 0) je rychlost deformace výraznější. Poté se deformace stabilizuje a průběh je lineární. Po určité době nastane vysoké poškození vnitřní struktury kovu a následuje lom materiálu. Tzn. vysoký nárust deformace [23; 24].

2.5 Pece

V diplomové práci byla použita pec PEC Lac PK 105/12., viz. obr. 6. Jedná se o komorovou kalící pec, která se používá pro žíhání, kalení a předehřívání pod oxidační atmosférou. Maximální teplota udávaná výrobcem je 1280 °C s tím, že doporučený pracovní rozsah teplot je 700–1250 °C. Vnitřní rozměry pece jsou 500x350x600 mm, příkon 21,0 kW, maximální nosnost dna 150 Kg a napětí 400 V. Pro použití experimentu v diplomové práci to bylo dostačující. Potřebovaly se teploty 900 °C a 975 °C. Dále vzorky i s miskami a pálenou cihlou nepřesáhly 150 Kg a vnitřní rozměry 500x350x600 mm [17].

Tab.6 Parametry pece od výrobce [17].

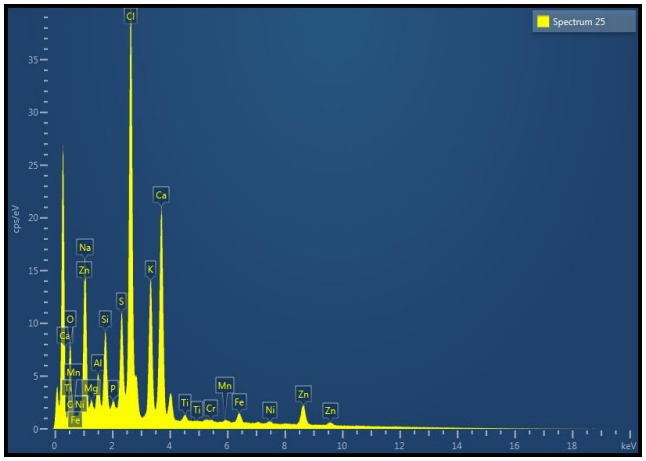
Typ pece	Tmax °C	Doporučený rozsah pracovních teplot °C	Objem l	Vnější rozměry (š×v×h) mm	Vnitřní rozměry (š×v×h) mm	Příkon kW	Jištění	Napětí V	Max. nosnost dna kg	Max. nosnost odklápěcího stolku kg
PK 105/ 12	1280	700 - 1250	105	1450*×1550 ×1850	500×350×6 00	21	40/ 3	400	150	50



Obr. 6 PEC Lac PK 105/12.

2.6 Soli

Pro provedení experimentu byla v diplomové práci použita směs solí. Směs se skládala celkem ze tří solí. 35 % Na2SO4 (Síran sodný) 30 % KCl (Chlorid sodný) a 35 % NaCl (Chlorid draselný). Složení solí vyšlo z rozboru materiálu, který byl použit z praxe. Tzn. přímo se nacházel ve spalovně, kde na něj působily agresivní páry. Jedná se o materiál, kterému došla životnost. Rozbor naměřených hodnot, tak jak dopadl, je znázorněn na obr. 3 a na následující tabulce, tab. 7, která byla celá přejeta z prvního návrhu experimentu [2].



Obr. 7 edx spektrum vzorku – rozbor nečistot s pomocí energeticky disperzní rentgenové spektroskopie [2].

Tab.7 Chemické složení nečistot a korodovaného materiálu na povrchu trubky [2].

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Standard Label	Factory Standard
Kyslík O	K series	13,7	0,0461	24,42	0,46	41,69	SiO2	Yes
Dusík Na	K series	9,2	0,03882	9,07	0,13	10,78	Albite	Yes
Hořčík Mg	K series	0,61	0,00405	0,78	0,04	0,88	MgO	Yes
Hliník Al	K series	1,79	0,01288	1,93	0,03	1,95	Al2O3	Yes
Křemík Si	K series	3,7	0,02933	3,52	0,04	3,42	SiO2	Yes
Fosfor P	K series	0,79	0,00444	0,49	0,03	0,43	GaP	Yes
Síra S	K series	5,38	0,04632	4,44	0,05	3,78	FeS2	Yes
Chlór Cl	K series	23,86	0,20848	20,26	0,14	15,61	NaCl	Yes
Kalcium K	K series	11,14	0,09439	9,13	0,07	6,38	KBr	Yes
Vápník Ca	K series	17,62	0,1574	15	0,11	10,22	Wollastonite	Yes
Titan Ti	K series	0,63	0,00627	0,64	0,03	0,36	Ti	Yes
Chrom Cr	K series	0,11	0,00112	0,11	0,03	0,06	Cr	Yes
Mangan Mn	K series	0,24	0,00241	0,23	0,04	0,11	Mn	Yes
Železo Fe	K series	1,82	0,01824	1,69	0,05	0,82	Fe	Yes
Nikl Ni	K series	0,55	0,00554	0,49	0,05	0,23	Ni	Yes
Zn	K series	8,24	0,08236	7,8	0,11	3,26	Zn	Yes

Na základě tohoto měření byla navržena směs, která obsahuje nejvíce zastoupené vzorky. Jedná se tedy o 35 % Na2SO4 30 % KCl a 35 % NaCl. V přepočtu na hmotnostní podíl jednotlivých prvků představuje 29,2 % Na, 10,8 % S, 21,5 % K a 38,5 % Cl [2].

2.7 Hadovitý systém

Jedná se o trubkový systém sestávající se z tvářených dílčích celků. Hadovitý systém se používá v České republice. Ve světě je používán výraz Tube Coil. Hadovitý systém se vytvoří z polotovaru, kterým je trubka. Hadovité systémy jsou v rozvinutém tvaru velmi dlouhé. Ovšem polotovar trubka bývá nejčastěji ve velikosti 6 m. Proto dochází ke tváření jednotlivých trubek do požadovaného tvaru podle požadované funkčnosti a následně ke svaření jednotlivých částí tak, aby celkově vytvořili požadovaný tvar hadovitého systému s požadovanou funkčností. Hadovité systémy se používají tam, kde požadujeme co možná největší dráhu média, které trubkou prochází na limitovaném prostoru. Ve spalovnách požadujeme, aby došlo k ohřátí vody, která prochází hadovitým systémem a je ohřívána výpary zplodin v podobě páry. Pro maximální účinnost je potřeba vodu danou spalovací komorou vést, pokud možno, co nejdelší drahou. A k tomu slouží hadovité systémy. Tyhle hlavní přednosti hadovitých systémů se uplatňují například ve spalovnách a jako přehříváky, deskové přehříváky, ekonomizéry a další typy produktů [1].

Obr. 8 Příklad hadovitého systému [1].

Obr. 9 Ukázka finálních produktů, tvořených z hadovitých trubkových systémů, oblouků a dalších komponent [1].

3 PRAKTICKÁ ČÁST

V druhé části se diplomová práce věnuje samotnému experimentu. Je zde popsáno, jak daný experiment probíhal, co bylo třeba udělat před samotným experimentem a na závěr jsou uvedeny výsledky celého experimentu, jednotlivých měření a doporučené kroky do budoucna.

3.1 Cíl experimentu

Cílem experimentu bylo vymyslet a zrealizovat experiment, který bude co nejvíce přesně simulovat prostředí, které se nachází ve spalovně a průběh opotřebení materiálu během životnosti trubek s návarem Inconelu 625, jen bude mnohonásobně intenzivní. Tak, aby se dané součásti daly testovat v řádů hodin. V našem experimentu budeme měřit Inconel 625. Z toho důvodu je cílem diplomové práce vymyslet průběh experimentu pro Inconel 625.

3.2 Postup experimentu

V téhle části se diplomová práce věnuje konkrétním krokům, které bylo potřeba udělat, aby se dosáhlo výsledků, kterých se nakonec dosáhlo. Jsou zde popsány jednotlivé kroky tak, jak následovali. Je zde popsáno vybavení, které se použilo. Na konci se diplomová práce v téhle části věnuje tomu, na co si dát při experimentu pozor. Jaké jsou zajímavosti, které nemusí být před samotným experimentem zřejmé.

3.2.1 Příprava experimentu

Před tím, než bylo možné začít měřit, tak bylo potřeba experiment připravit. V krátkosti lze experiment popsat následovně:

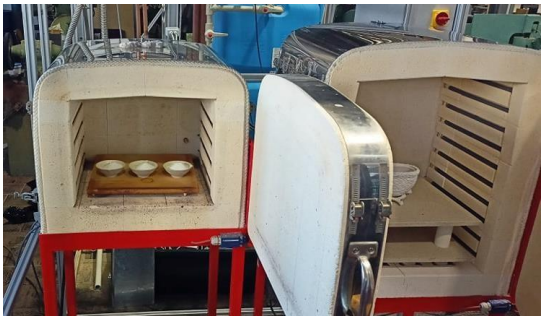
1. Zahřátí pece a soli, do které se ponoří vzorky => Budou potřeba misky.
2. Ponoření vzorků do solí na určitou dobu a teplotu.
3. Vyndání vzorků a jejich očištění.
4. Zaznamenat úbytek materiálu.
5. Celý proces opakovat.

3.2.2 Potřebné vybavení

Před zahájením experimentu je potřeba si připravit potřebné vybavení a nachystat potřebné zařízení, které se během experimentu používalo. V téhle části diplomová práce popisuje jednotlivé vybavení a zařízení, které bylo použito.

Misky

Nejdřív byly použity tavící misky tenkostěnné [25]. Zjistilo se, ovšem, že soli jsou příliš agresivní a misky popraskaly. Proto se řešilo, co s tím. Pro větší odolnost se na misky nanesla glazura, ta už vydržela. Postup nanesení glazury probíhal následovně. Misky se potřely glazurou a následně vytvrdily v peci.



Obr. 10 Použité pece (vlevo pec na experimenty).

Obr. 11 Popraskaná tavicí miska tenkostěnná.

Na obrázku 10 jdou vidět dvě pece, které se při experimentu používaly. Pec v levo se používala pro samotný experiment, kam se daly misky se solí, do které se ponořili vzorky. V pravo je větší pec, kde se dělaly glazury, připravovaly součástky a dělaly další podobné experimenty. Díky glazuře už misky vydržely déle. Pro experiment byly použity celkem 4 misky. Tři misky byly v peci a jedna byla náhradní. Náhradní miska zároveň posloužila i jako prostředek pro dosypávání soli, viz. obr. 12. Soli se v peci postupně vypařovaly a bylo potřeba je čas od času dosypat. Během experimentu jedna miska, i přes to, že byla glazurovaná, praskla, viz. obr. 11. To se vyřešilo tak, že se vyměnila za náhradní a ta prasklá nově sloužila jako prostředek pro dosypávání solí.

Obr. 12 Okamžik, kdy je miska s nerozpuštěnou solí vkládána do pece.

Pece

Pro experiment bylo potřeba vytvořit prostředí o teplotě 900 ºC a 975 ºC a zároveň na téhle teplotě vydržet potřebnou dobu. K tomu se využila pec PEC Lac PK 105/12, viz. obr.13. Více se diplomová práce peci, která byla použita, věnuje v teoretické části „2.5 pece“. Výkonost pece ovlivňuje kvalitu i rychlost experimentu.

Obr. 13 PEC Lac PK 105/12.

Kleště

Jelikož je v peci vysoká teplota na to, abychom vzorky do soli dávali, a hlavně vytahovali, pomocí rukou, tak byly použity kleště na kelímky, viz. obr. 14. Kleště na kelímky jsou vyrobeny z kombinace grafitové hlíny, díky tomu vydrží nejen vysokou teplotu v peci, ale i agresivní prostředí solí. Na obrázku 15 si lze všimnout, že soli se zachytávaly na kleštích a při zchladnutí se vytvořila skořepina, která se oklepala.

Obr. 14 Kleště na kelímky.

Obr. 15 Nanesená sůl na kleštích.

Rukavice

V peci je jak příliš vysoká teplota, tak i nebezpečí vyprsknutí solí z misek. Proto je potřeba při experimentu mít zakryté ruce. Při experimentu byly proto použity žáruvzdorné palcové rukavice, které jsou vyrobeny z para-aramidové tkaniny s izolační vlněnou podšívkou, viz. obr. 16 a 17. Jejich tepelná odolnost proti kontaktnímu teplu je do 600 °C a zároveň jsou odolné i proti sálavému teplu.

Obr. 16 žáruvzdorné palcové rukavice [26].

Obr. 17 žáruvzdorné palcové rukavice [26].

Chladící lázeň

Pro rychlejší chlazení vzorků, při vytáhnutí z pece, byly vzorky ponořeny do chladící lázně. Chladící lázeň byla složena z kohoutkové vody. Na obr.18 si lze všimnout, že byly použity krabičky od Solviny a ty byly položeny do plechového boxu, ve kterém byla hadra. Nejdřív se použili samotné misky, ale ve chvíli, kdy se tam dal rozpálený vzorek, tak misky praskly. Proto se daly do plechového boxu, aby v případě prasknutí misky byla voda zadržena. Poté se zjistilo,

že box vodu neudrží, proto byla na spod položena hadra, která malý unik kapaliny zadržela. Nakonec se použili dvě misky od Solviny na sebe. Tím se to vyřešilo, jelikož vrchní miska praskla, ale druhá miska zůstala celá, protože rozpálený vzorek se jí přímo nedotkl.

Obr. 18 Chladící lázně.

Váha

Aby bylo možné změřit úbytek materiálu na vzorcích, tak byla při experimentu použita digitální klenotnická váha, viz. obr. 19. Tuhle váhu používají zlatníci, kteří potřebují vážit na tisíciny gramů. Pro měření vzorků v diplomové práci bylo potřeba stejné přesnosti. Přesnost váhy je 0,001 g [27].

Obr. 19 Digitální klenotnická váha [27].

Soli

V experimentu byly použity soli, do kterých se ponořily vzorky. Směs solí se skládala z 35 % Na2SO4 30 % KCl a 35 % NaCl. Soli byli namíchány v tomhle poměru a dány do, pro ně určené, krabičky. Pokud se příslušná směs přepočte na hmotnostní podíl jednotlivých prvků, tak dostaneme 29,2 % Na, 10,8 % S, 21,5 % K a 38,5 % Cl. To je složení, které odpovídá naměřeným hodnotám ve zkoušeném materiálu.

Drátky

Aby bylo možné vzorky pohodlně dát a zároveň vytáhnout ze soli, tak byl použit Inconelový drát, viz. obr. 21, který se provlekl dírkou ve vzorku. Drátek byl dlouhý okolo 80 mm. Bylo vyzkoušeno několik způsobů ohnutí pro co nejlepší zaháknutí vzorku. Je potřeba, aby drát držel tvar a trčel směrem nahoru. Pokud se drát otočil do stejné roviny jako tloušťka vzorku, tak bylo obtížnější vzorek vytáhnout. Nejlepší tvar drátku lze vidět na obr. 21.

Obr. 20 Inconelový drátek.

Vrtačky

Aby byl Inconelový drátek možné zachytit za vzorek, tak byly do vzorků vyvrtány otvory. Ty byly vyvrtány pomocí stolní vrtačky. Nejdřív byly použity vrtáky o průměru 3 mm. Následně byly použity vrtáky o průměru 6 mm. Z důvodu tvrdé niklové slitiny Inconel 625 bylo obtížné do daných vzorků vyvrtat otvory. Nakonec se to podařilo.

Obr. 21 Příprava vzorku na stolní vrtačce.

Pásová bruska

V experimentu byla použita i pásová bruska, viz. obr. 23 a 24, která pomohla k odbroušení ostrých hran vzorku a k odbroušení zbytkového základního materiálu. Při dělení Inconelového návaru od základního materiálu 16Mo3 vznikly otřepy. Otřepy byly ostré a pokud by se neodstranily, tak by došlo k úrazu. Zároveň je poté se vzorky lepší manipulace. Dále bylo potřeba odstranit zbytky základního materiálu 16Mo3, který nebyl oddělen v dřívější operaci.

Obr. 22 Pásová bruska.

Obr. 23 Pásová bruska.

Ochranný kryt na obličej a plynová maska

Aby se zamezilo nebezpečí, že sůl vyprskne do obličeje, tak byl použit ochranný kryt na obličej, viz. obr. 25 a 26. Přes kryt je hůře vidět, každopádně jako ochrana před vyprsknutou solí je velmi dobrý. Další ochranu obličeje poskytovala plynová maska. Soli sami o sobě nejsou extra jedovaté. Každopádně lepší účinek na nemoc člověka mají v plynném skupenství. Proto byla použita plynová maska, která zamezila vdechování nebezpečných plynů, viz. obr. 27. Ochranný kryt na obličej má výhodu oproti plynové masce v tom, že poskytuje ochranu i krku.

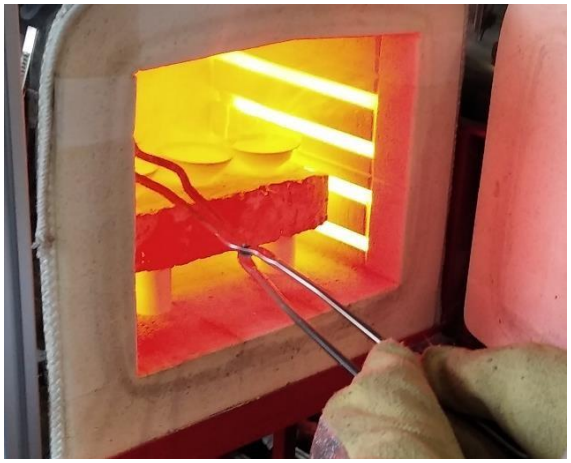
Obr. 24 Ochranný kryt na obličej.

Obr. 25 Ochranný kryt na obličej.

Obr. 26 Použitá plynová maska.

Cihla

Aby se zabránilo vytečení solí do pece, v případě, že by misky praskly, byly misky podloženy cihlou, viz. obr. 28. Jednalo se o použitou pálenou cihlu. Cihla byla podložena válečky, aby docházelo k proudění vzduchu i pod cihlou. Přemýšlelo se i o použití pálené střešní tašky, ale ta se do pece nevešla.



Obr. 27 Cihla v peci.

3.2.3 V experimentu příprava vzorků

Před samotným experimentem bylo potřeba připravit vzorky. Vzorky pochází z Inconelového návaru, který se navařuje na trubky z 16Mo3. Proto první úkon na vzorcích byl, když nepočítáme vyříznutí z trubky na malé kousky, odstranit, i když cílem bylo oddělit základní materiál 16Mo3 od Inconelu 625, ale základní materiál byl obroben, a proto „zničen“, základní materiál 16Mo3 od Inconel 625.

V druhém kroku se na vzorky nanesla kyselina, která měla za cíl, aby základní materiál 16Mo3 prodělal korozi a zůstal jen Inconel 625. To se příliš neosvědčilo. Důvod je ten, že pro naše dobro, na vzorku příliš základního materiálu 16Mo3 nezůstalo. Proto stačila jen menší úprava na pásové brusce, kde se odstranily ostré hrany a zbytek základního materiálu 16Mo3. Ve třetím kroku následovalo vyvrtání otvorů pro provlečení a zaháknutí Inconelového drátku. První dírky byly vyvrtány příliš blízko kraje. Proto se vyvinula snaha vyvrtat dírky dál od kraje. Od toho se nakonec, po dlouhém snažení a několika zlomených vrtácích, opustilo. V tuhle chvíli byly vzorky připraveny pro experiment.

3.2.4 Příprava pracoviště

A teď, než se začne provádět experiment, tak je ještě potřeba připravit samotné pracoviště. Mezi úkony, které je potřeba udělat pro přípravu pracoviště patří:

1. Zapnout pec,
2. zapnout větrání,
3. nachystat misky se solí,
4. nachystat stůl s chladící lázní, váhou a dalšími pomůckami,
5. zkontrolovat vybavení (ochranné pomůcky, kleště…).

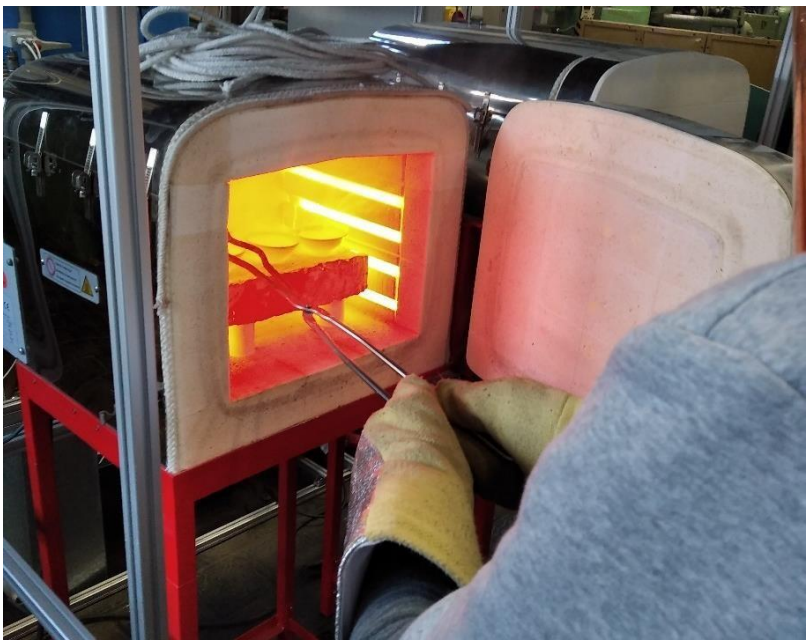
3.2.5 Průběh měření

Měření pro první teplotu 975 °C

Prvním krokem je příprava pece (prvním krokem je příprava vzorků, ale tenhle krok je popsán v kapitole „příprava vzorků“, proto tady není znova zmíněn a začíná se od kroku „příprava pracoviště“). Za přípravu pece se rozumí nachystání misek se solemi do pece, viz. obr. 29. Nejdřív se nachystají misky, které se dají do pece. Do misek se nasype směs solí v prášku. Poté se připraví cihla, která má za úkol zabránit vytečení solí do pece, kdyby náhodou misky praskly.

Obr. 28 Příprava misek se směsí.

Pravdou je, že nejdřív bylo v plánu tam dát pálenou střešní tašku, bohužel ta se tam nevešla. Byly pokusy ji ulomit tak, aby se do pece vešla. Ale výsledek byl nakonec jiný než očekávaný. Použila se použitá pálená cihla, kterou bylo nejdřív potřeba očistit od zbytků malty a betonu. Tahle cihla se do pece položila na podpěrné válečky, které umožňují lepší proudění vzduchu v peci. Misky se solemi se položili na cihlu, viz. obr. 29. V tuhle chvíli již bylo možné zapnout pec. Pec se zapne zastrčením připojovacího kabelu do zásuvky a na ovládacím panelu se nastaví potřebný program, viz. obr. 30.



Obr. 29 Způsob uspořádání misek, cihly a válečků v peci.

Prvním program pro experiment při teplotě 975 °C vypadá následovně:

1. Pec se ohřeje na 975 °C s ohřevem 500 °C/hod.,
2. následuje výdrž na teplotě po dobu 8 h,
3. vypnutí pece.

Po nastavení a potvrzení programu, pec začíná ohřívat.

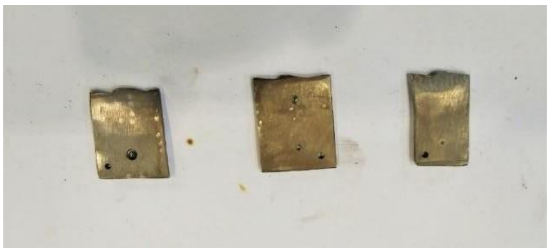
Obr. 30 Ovládací panel pece.

V tuhle chvíli je možnost si připravit pracovní stůl, viz. obr. 31. Na stůl se umístili chladící lázně s vodou. Jednalo se o misky od Solviny, do kterých se nalila voda. Jelikož vzorky vyndané z pece jsou horké a v předešlých experimentech propálily dno misek, tak se použili dvě misky

na sebe. Pro větší jistotu se ještě misky dali do plechového boxu. K nádobám s vodou se nachystaly hadry, které slouží pro usušení a očištění vzorků.

Obr. 31 Připravený stůl před prvním měřením.

Následně si nachystáme váhu na měření vzorků a vzorky před začátkem experimentu zvážíme. To nám poslouží k sledování úbytku materiálu po prvním ponoření vzorků. K váze si nachystáme i prázdný bílí papír, na který si vzorky seřadíme a vyfotíme, viz. obr. 32. Vzorky budeme fotit v průběhu celého měření, ať můžeme pozorovat úbytek materiálu jak pomocí naměřených hodnot v tabulce, tak i vizuálně.



Obr. 32 Vyfocené vzorky před prvním měřením.

Obr. 33 Inconelový drátek.

Další činnost, kterou je potřeba udělat, než se ohřeje pec, je připravit háčky z Inconelového drátu, viz. obr. 33. Dráty se nastřihnou na potřebnou délku a pomocí kleští se na jednom konci vytvoří háček. Drátek se provleče vzorkem a zahákne se za háček na jeho konci. Teď se čeká, až pec dosáhne potřebné teploty.

Jakmile se blíží teplota 975 °C, tak je potřeba si připravit kleště na uchycení Inconelových drátků, rukavice a ochranný kryt na obličej, viz. obr. 34. Druhá osoba, s kterou se experiment prováděl, si vzala plynovou masku a pracovní rukavice (háček, pomocí kterého se pec zavírá, není tak horký, takže stačí pouze pracovní rukavice. Plynovou masku má člověk proto, aby nemusel dýchat škodlivé látky vypařované z pece. Plynová maska nešla nasadit společně se štítem, proto jeden má ochranný štít na obličej a druhý plynovou masku.), viz. obr. 35.

Obr. 34 Ochranné prostředky při měření.

Obr. 35 Ochranné prostředky při měření.

Po dosažení potřebné teploty se do kleští vezme první měřený vzorek. Druhá osoba otevírá pec a vzorek je ponořen do první misky se solí, viz. obr. 36. V peci byly při jedné teplotě zaráz tři misky. Poté se člověk vrátí ke stolu, kde má nachystané další dva vzorky. Jeden chytne do kleští, jde k peci a ponoří ho do druhé misky. Stejný postup opakuje i u posledního třetího vzorku. Jakmile jsou všechny vzorky v peci a každý vzorek ponořený v jiné misce, pec se zavře a čeká se 20 min..

Obr. 36 Moment, kdy je pomocí kleští vzorek nesen do pece.

Po 20 min. si jeden člověk opět nasadí ochranný kryt na obličej a rukavice a druhý plynovou masku a pracovní rukavice. Druhý člověk otevře pec a člověk s ochranným krytem na obličej pomocí kleští chytí první vzorek za inconelový drátek, vytáhne ho a ponoří do první misky s vodou. Poté se vrátí a z pece za Inconelový drátek vytáhne druhý vzorek z druhé misky a ponoří ho do druhé misky s vodou. Stejný postup provede i u třetího vzorku. Poté se zavře pec. Chvilku se počká, než se vzorky schladí. Poté se po jednom vytáhnou a pomocí hadry usuší a očistí. Na vzorku se vytvořila první vrstva koroze. Ze vzorků se očistí to, co jde jednoduše, pouze otřením v hadře, očistit.

Jakmile jsou všechny vzorky očištěny, tak jsou následně změřeny. Na papír se vytvořila tabulka, kam se zanesly hodnoty vzorků před experimentem (přepsaná tabulka do excelu, pro lepší čitelnost, je na obrázku 37.). Teď se do příslušného sloupce zapíšou i hodnoty po prvním měření a vzorky se po měření dají na čistý bílí papír, kde se vyfotí. Dál se vzorky pořádně usuší. To proto, jelikož roztavené soli mají velkou teplotu a když by se dali vlhké vzorky do pece, soli by vyprskly. Po usušení vzorků se opět na vzorky navlékne Inconelový drátek a vzorky se nachystají pro opětovné dání do pece. Jakmile se pec opět ohřeje na příslušnou teplotu (tím, jak se vzorky vytahovaly, tak teplota v peci klesla. Z toho důvodu je vždy potřeba, než se do pece dají vzorky na další měření, počkat, až se pec znovu nahřeje na požadovanou teplotu.), je možné vzorky opět dát do pece a ponořit do solí. Celý proces se opakuje do doby, než je dostatek hodnot nebo se vzorky rozpadnou. V našem experimentu jsme naměřili 15 měření, viz. obr. 37. Jeden vzorek se nám rozpadl, viz. obr. 38.

čas [min]	váha [g]
0	25,325
20	23,999
40	21,09
60	18,698
80	16,912
100	15,884
120	14,315
140	14,291
160	13,268
180	11,661
200	10,527
220	10,001
240	9,456
260	9,205
280	8,998

Obr. 37 Naměřené hodnoty.

Obr. 38 Rozpadlý vzorek, po posledním měření.

Měření pro druhou teplotu 900 °C

Jakmile se provedlo 15 měření u teploty 975 °C, bylo možné začít měřit další tři vzorky pro nižší teplotu. Tou teplotou je 900 °C. V prvním kroku bylo potřeba změnit program na ovládacím panelu pece. Na ovládacím panelu pece program zůstal stejný jak v minulém případě. Jediný rozdíl byl v koncové teplotě, která je 900 °C. Postup měření je totožný jak při teplotě 975 °C. Rozdíl je v tom, že snížením teploty se zároveň dostalo i blíž k bodu, kdy sůl v peci tuhne. Proto je potřeba dávat si pozor, aby pec nebyla příliš dlouho otevřená. Buď by se vzorky dávaly do neroztavené soli nebo v horším případě by ztuhly v soli při vytahování. V tomhle druhém měření se opět provedlo 15 měření.

3.2.6 Zajímavosti – detaily, které je potřeba zmínit

Vzorky se musí pořádně usušit, jinak soli vyprsknou.

Tím že se vzorky, při vyndání z pece, dávají do lázně s vodou, tak je potřeba při následném dávání zpět do pece, pořádně je osušit. Vzorky navlhnout a když by se neosušily, docházelo by k tomu, že by, při ponoření do roztavené soli, soli vyprskly. Což je nebezpečné. Pokud je člověk chráněn ochranným krytem na obličej a má na sobě oblečení, potom se mu nic nestane. Ale pokud by u toho byl nahý nebo hůř bez ochranného krytu na obličej, poté by hrozilo popálení kůže nebo dokonce oslepnutí. Stejně tak dojde k vyprsknutí v momentě, kdy ponoříme

rozehřáté vzorky, které jsme zrovna vytáhly z pece, viz. obr. 39, do vodní lázně. Tam to naštěstí není tak nebezpečné, jelikož vyprskne voda a né roztavená sůl.

Obr. 39 Moment, kdy dochází k vytahování horkého vzorku z pece.

Je dobré (potřebné) si zapamatovat jaký vzorek je jaký. Aby se zapisovali hodnoty vždy do správného příslušného sloupce v tabulce.

Tím, že se měřily tři vzorky za ráz, tak bylo potřeba si je poznačit. Kdyby se to neudělalo, tak by mohlo dojít k záměně vzorků. Tím by bylo celé měření označené za neplatné a bylo by nutné měřit znovu. V případě diplomové práce byly vzorky poznačeny podle otvorů a výběru odlišného tvaru vzorků, viz. obr. 40 (i když později v experimentu, kdy došlo k značné deformaci vzorků, už byl tvar hůře rozpoznatelný, viz. obr. 41). Další rozdělení bylo v tom, že každý vzorek měl svoji misku se solemi a svoji misku s vodní lázní.

Je doporučováno si udělat výraznější odlišení. Např. u vzorku č.1 si odbrousit jeden roh, u vzorku č.2 si odbrousit dva rohy, u vzorku č.3 nebrousit žádný roh. Tím budete mít jasně rozlišené vzorky a nestane se vám, že byste je popletly. Jak je vidět na obr.41, tak u vzorku, který je uprostřed, tak by nepomohlo ani to, kdyby se obrousily rohy. „Naštěstí“ tady tak dopadl jen jeden vzorek, a proto nemohlo dojít k záměně.

Obr. 40 Vzorky před měřením.

Obr. 41 Vzorky po měření.

Dosypávání solí

Během měření je potřeba přisypávat sůl do misek v peci. Soli se v peci vypařují, tím ubývají v tekuté podobě z misek. Z toho důvodu je potřeba jednou za čas sůl dosypat. Vytáhnout misky z pece a dosypat do nich sůl přímo z plastové nádoby, kde je sůl namíchána v požadovaném poměru, by vedlo k několika problémům. Jedním z nich je: Sůl by mezitím ztuhla a musela by se znovu rozehřívat. Což by vedlo k prodloužení času experimentu.

Další nebezpečí je, že tím, že by rozehřátá miska začala na vzduchu rychle chladnout, tak by mohlo dojít k jejímu prasknutí. Což je problém v tom, že jakmile by se sůl v peci roztavila, tak by vytekla do pece. Přesněji na pálenou cihlu. Hlavní problém v tom je ten, že by vzorek nebyl ponořený v soli, ale pouze se ohříval ve výparech, které jsou v peci přítomny.

Postup při doplňování solí během měření byl následovný. Do další (čtvrté) misky, která byla na vzduchu, se nasypala směs soli z nádoby, ve které jsou soli již v požadovaném poměru. Potom byla miska chycena do kleští za okraj. Následně se otevřela pec a sůl ze čtvrté misky byla vysypána do misek, které se nacházeli v peci, viz. obr. 42 a 43. Tím nedošlo k takovému ochlazení pece. A přidaná sůl se rychleji roztavila. Pro dosypávání byla používána starší miska, která byla naprasklá. To nevadilo, jelikož sůl se roztaví až v peci a sypká sůl se v téhle misce nevysypala.

Obr. 42 Prázdná miska v kleštích.

Obr. 43 Moment, jak je sůl dosypávána do misek v peci.

Vzorky se měří bez Inconelového drátku

Další důležitý poznatek je, že pro dávání a vyndávání vzorků z pece, je použit Inconelový drátek. Díky tomuto drátku je vyndávání a dávání vzorků do soli jednodušší. Každopádně při měření vzorků se Inconelový drátek vytáhne. Drátek byl vytažen vždy po vytáhnutí vzorků z vodní lázně (drátek byl použit i na lehčí vytáhnutí vzorku z vodní lázně. Tím, že byl vzorek od soli, tak voda se rychle zanesla a stala se neprůhlednou tekutinou černé barvy, viz. obr. 44. Hustota a viskozita byly stále stejné, jen došlo k zakalení).

Obr. 44 Zakalená voda v miskách s vodou.

Vzorek se vytáhl z vodní lázně, došlo k vyndání Inconelového drátku ze vzorku a následovalo očištění vzorku, jeho změření, vyfocení a usušení. Poté se opět nasadil Inconelový drátek a tím byl vzorek připravený na další měření. Je důležité zmínit, stejně jak u samotných vzorků, že bylo potřeba rozlišit, který drátek patřil k jakému vzorku. Né že by to bylo v experimentu to nejdůležitější, ale kvůli korozi těchto drátků (korozi drátku se diplomová práce věnuje později), může docházet k tomu, že drátek od vzorku č.1 nepůjde prostrčit dírkou od vzorku č.2, tak jak se několikrát stalo, viz. obr. 45. To vede k prodloužení experimentu, k předčasnému zničení drátku a k prodražení experimentu, jelikož Inconelový drátek není nejlevnější záležitost. Žádný další závažný problém s tím spojený, nebyl zjištěn.

Obr. 45 Zkorodovaný Inconelový drátek.

Koroze Inconelového drátku

Stejně jak vzorky, tak i Inconelový drátek koroduje. Kvůli jeho malému průměru a tím, že se jedná o drátek, který má menší plochu než samotný vzorek. Z toho důvodu Inconelový drátek korodoval rychleji, než samotný vzorek. Během měření druhé teploty 900 °C nastal problém v tom, že Inconelový drátek došel. Vzorky poté byly vytahovány, a bylo s nimi manipulováno, bez Inconelového drátku. Což vedlo k určitým potížím. Hlavní z potíží bylo prodloužení celkového času experimentu. Další byla obava, která se naštěstí nezrealizovala, že se vzorek, který je už příliš zkorodovaný, zničí pomocí kleští při jeho manipulaci.

Doba trvání měření (sušení vzorků +- 10min.)

Při sérii měření během experimentu bylo zjištěno, že doma měření, která se začala počítat od chvíle, kdy byly ponořeny vzorky do roztavených solí v rozehřáté peci, přes vyndání vzorků, jejich očištění, změření, až po následné znovu ponoření do solí, je +-30 min. Čas se skládá z 20 min., které musí být vzorky ponořeny v solích v peci. Doba, než se pec znovu nahřeje je přibližně 10 min. Během těchto 10 min. se vzorky stihnou ochladit, očistit, změřit, vyfotit a znovu nachystat do pece. I kdyby se pec stihla nahřát rychleji, tak doba očištění, naměření, vyfocení, usušení a nachystání na další měření se snižuje těžko a těch 10 min. to zabere.

Kontrola, zda pec ukazuje správnou teplotu

Během provádění měření bylo dosaženo jiných hodnot než očekávaných. Tak nastalo podezření, že pec ukazuje špatnou teplotu. Proto byl povolán odborník ze slévárny, aby zkontroloval, jestli pec ukazuje správnou teplotu. Odborník přišel s tepelným čidlem a bylo zjištěno, že pec správnou teplotu ukazuje.

Vrtání děr na vzorky

Inconel 625 je tvrdý materiál, proto bylo obtížné do něj vyvrtat díry pro navlečení Inconelového drátku. Do vzorku byl nejdřív vytvořen důlek a poté bylo zahájeno vrtání na stolové vrtačce. Bohužel neúspěšně. Další pokus byl uskutečněn na jiné stolové vrtačce s jinými vrtáky. Bohužel opět neúspěšně. Následně byl použit nejdřív menší vrták s vidinou, že se nejdřív provrtá menší dírka. Bohužel vrták se zlomil a vrtání bylo opět neúspěšné. Před tím se odbornému pracovníkovi podařilo do materiálu díry vyvrtat, ale když to zkoušel podruhé, tak byl i on neúspěšný. Nakonec bylo rozhodnuto, že se použijí dříve vyvrtané díry.

3.3 Výsledek měření

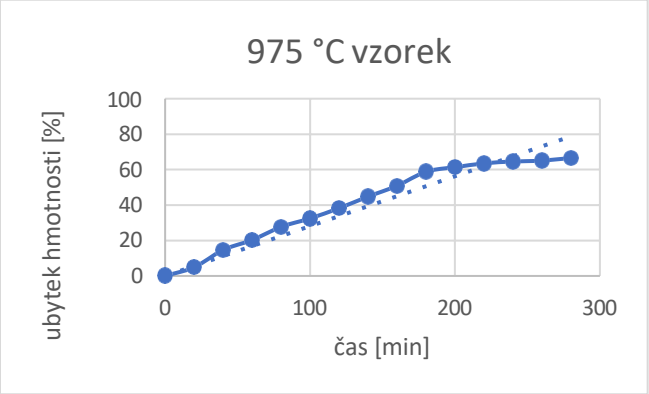
V téhle části se diplomová práce zabývá výslednými hodnotami z jednotlivých měření pro jednotlivé teploty. Hlavní rozdělení výsledků je podle teplot. A to konkrétně pro teplotu 975 °C a 900 °C. Výsledky jsou dány to tabulek a pro názornost přeneseny i do grafů. Nejdřív se budeme zabývat samotnými hodnotami. Jsou přiloženy i fotografie, které ukazují počáteční stav vzorku a jeho konečný stav. Jde vidět, že soli mají na materiál značný vliv. Dále následuje porovnání naměřených hodnot i s hodnotami základního materiálu 16Mo3.

Hodnoty a grafy pro T=975°C

První měření proběhlo při teplotě 975 °C. Naměřené hodnoty jsme dali do excelovské tabulky a vypočítali hmotnostní úbytek v %, viz. tab. 8. Na prvním vzorku si lze všimnout, že hodnoty ubývali nejdřív +- o 1,5 g a jakmile se snížila hmotnost pod 10 g, tak úbytek byl 0,5 g a dokonce u jednoho měření pouze 0,117 g. Tenhle průběh popisuje graf 1, viz. obr. 46. Z grafu lze krásně vypozorovat, že průběh byl nejdřív téměř lineární a po 10 měření se křivka začala srovnávat s vodorovnou osou, viz. obr. 46.

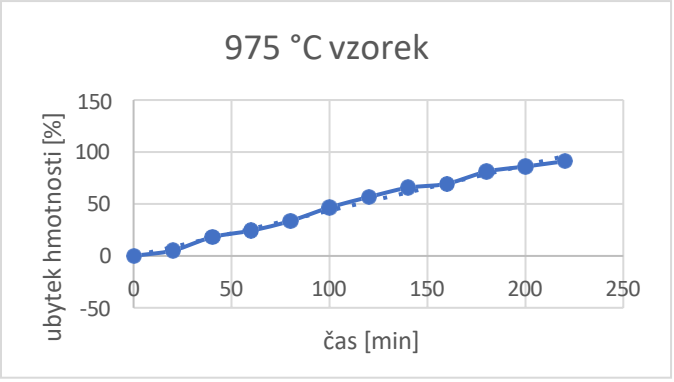
Tab.8 Hodnota pro první vzorek.

975 °C vzorek 1				
měření	čas [min]	váha [g]	čas [min]	hm. ubytek [%]
1	0	22,663	0	0
2	20	21,561	20	4,863
3	40	19,343	40	14,649
4	60	18,084	60	20,205
5	80	16,39	80	27,679
6	100	15,319	100	32,405
7	120	13,997	120	38,239
8	140	12,519	140	44,760
9	160	11,133	160	50,876
10	180	9,339	180	58,792
11	200	8,763	200	61,333
12	220	8,261	220	63,549
13	240	8,028	240	64,577
14	260	7,911	260	65,093
15	280	7,591	280	66,505



Obr. 46 Závislost úbytku hmotnosti na čase pro první vzorek.

U druhého vzorku byl průběh téměř po celou dobu lineární, až do okamžiku posledních 3 měření, kdy se křivka začala opět srovnávat s vodorovnou osou. Tzn. že úbytek materiálu nebyl tak výrazný, jak v předešlých měření u tohohle vzorku. Vzorek byl menší než ty ostatní, a tak už během 12 měření došlo ke zničení vzorku. Během posledních 3 měření byl vzorek natolik poničen korozí, že nebylo možné použít drátek, pro lepší manipulaci se vzorkem a vzorek byl vytahován jen pomocí kleští. Více o tom v diplomové práci píše v kapitole „4.závěr“. V tabulkách jdou vidět naměřené hodnoty a průběh hm. úbytku materiálu v %. Na následujícím grafu lze názorně vidět průběh měření u tohohle druhého vzorku, viz. obr. 47.

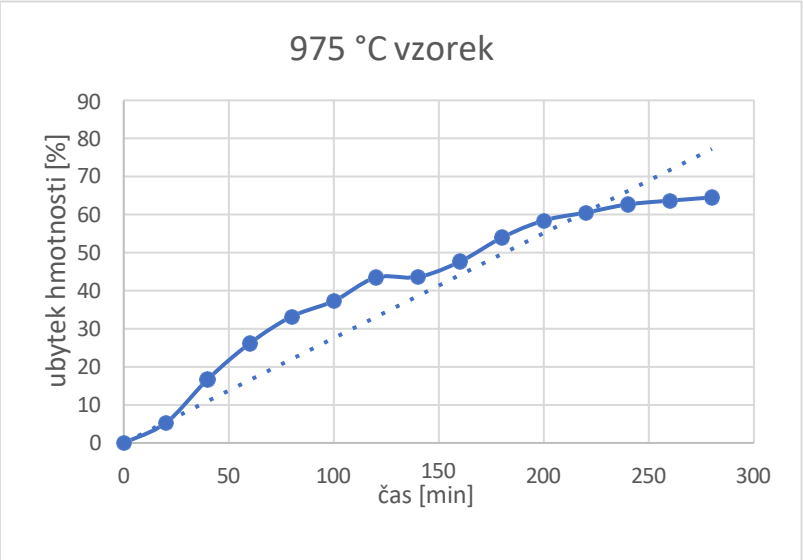


Obr. 47 Závislost úbytku hmotnosti na čase pro druhý vzorek.

Tab.9 Hodnota pro druhý vzorek.

975 °C vzorek 2				
měření	čas [min]	váha [g]	čas [min]	hm. ubytek [%]
1	0	17,902	0	0
2	20	16,998	20	5,050
3	40	14,703	40	17,870
4	60	13,575	60	24,170
5	80	11,907	80	33,488
6	100	9,583	100	46,470
7	120	7,789	120	56,491
8	140	6,176	140	65,501
9	160	5,49	160	69,333
10	180	3,415	180	80,924
11	200	2,515	200	85,951
12	220	1,625	220	90,923

Průběh měření u třetího vzorku byl oproti předešlým dvou specifický. Specifický v tom, že po druhém měření začal materiál víc korodovat. Tzn. Že došlo k rychlejšímu hm. úbytku. Následně opět ke konci měření došlo ke srovnání s vodorovnou osou. Názorně je to zobrazeno na následujícím grafu, který celý průběh popisuje, viz obr. 48. Níže jsou pro teplotu 975 °C přiloženy fotografie, které ukazují, jak vzorky vypadaly v prvních fázích měření a následně po měření, viz. obr. 50 a 51. Jde vidět, že prostředí směsi má na vzorky značný vliv.



Obr. 48 Závislost úbytku hmotnosti na čase pro třetí vzorek.

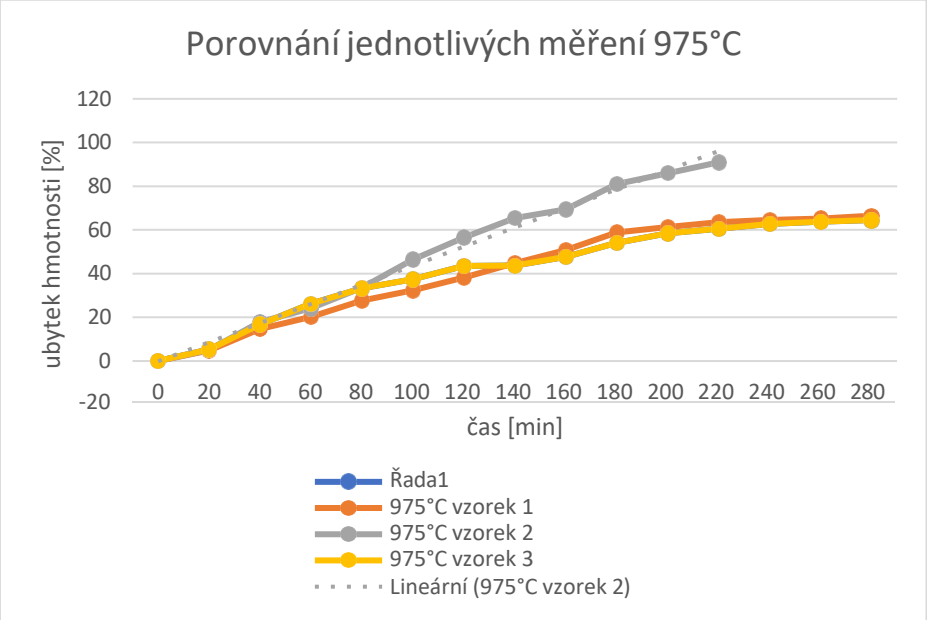
Tab.10 Hodnota pro třetí vzorek

975 °C vzorek 3				
měření	čas [min]	váha [g]	čas [min]	hm. ubytek [%]
1	0	25,325	0	0
2	20	23,999	20	5,236
3	40	21,09	40	16,723
4	60	18,698	60	26,168
5	80	16,912	80	33,220
6	100	15,884	100	37,279
7	120	14,315	120	43,475
8	140	14,291	140	43,570
9	160	13,268	160	47,609
10	180	11,661	180	53,955
11	200	10,527	200	58,432
12	220	10,001	220	60,509
13	240	9,456	240	62,661
14	260	9,205	260	63,653
15	280	8,998	280	64,470

Obr. 49 Vzorky během prvních měřeních.

Obr. 50 Vzorky po 15 měření.

Na obr. 52 je celkové porovnání všech tří měření pro teplotu 975 °C. U vzorku 2 došlo ke kompletnímu zničení, proto je hmotnostní úbytek téměř 100 %. Dále jde z obrázku vypozorovat, že průběh vzorků 1 a 3 je téměř totožný.



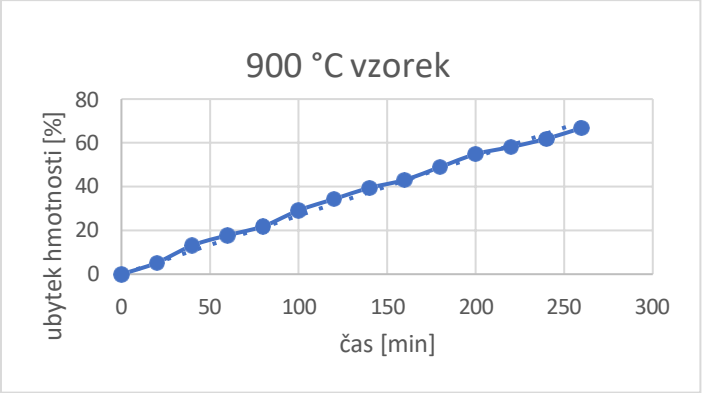
Obr. 51 Celkové porovnání jednotlivých měření pro teplotu 975°C.

Hodnoty a grafy pro T=900 ºC

Druhé měření probíhalo při teplotě 900 ºC, kde se opět měřili 3 vzorky a proběhlo celkem 15 měření. U prvního vzorku byl průběh po celou dobu téměř lineární. Došlo jen k malým odchylkám, které nejsou natolik výrazné, aby se průběh nedal považovat za lineární. Na následujícím grafu je hezky vidět, že jde opravdu o lineární průběh, a to po celou dobu, viz. obr. 53.

Tab.11 Hodnota pro čtvrtý vzorek.

900 °C vzorek 1				
měření	čas [min]	váha [g]	čas [min]	hm. ubytek [%]
1	0	16,892	0	0
2	20	16,001	20	5,275
3	40	14,664	40	13,190
4	60	13,881	60	17,825
5	80	13,188	80	21,928
6	100	11,962	100	29,185
7	120	11,089	120	34,354
8	140	10,224	140	39,474
9	160	9,607	160	43,127
10	180	8,609	180	49,035
11	200	7,618	200	54,902
12	220	7,071	220	58,140
13	240	6,426	240	61,958
14	260	5,597	260	66,866

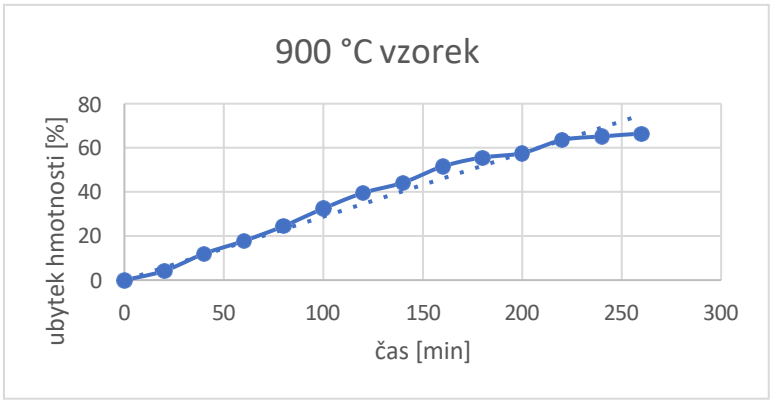


Obr. 52 Závislost úbytku hmotnosti na čase pro čtvrtý vzorek.

U druhého vzorku lze sledovat, že hm. úbytek u 6 měření lehce stoupl a pak se hned vyrovnal do lineárního průběhu. Ovšem u jedenáctého měření byl úbytek menší. Dvanácté měření bylo opět lineární a poté až do konce měření znovu došlo ke snížení hm. úbytku. Na následujícím grafu lze vidět celý průběh, viz. obr. 54.

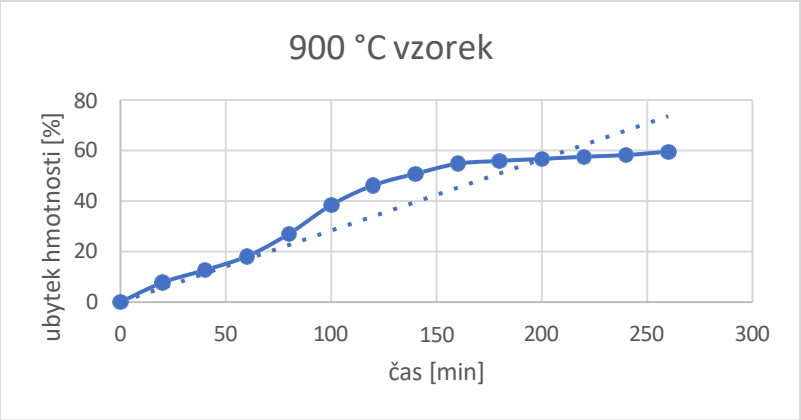
Tab.1 Hodnota pro pátý vzorek.

900 °C vzorek 2				
měření	čas [min]	váha [g]	čas [min]	hm. ubytek [%]
1	0	20,874	0	0
2	20	19,998	20	4,197
3	40	18,371	40	11,991
4	60	17,171	60	17,740
5	80	15,763	80	24,485
6	100	14,097	100	32,466
7	120	12,618	120	39,552
8	140	11,663	140	44,127
9	160	10,114	160	51,547
10	180	9,269	180	55,595
11	200	8,863	200	57,540
12	220	7,604	220	63,572
13	240	7,275	240	65,148
14	260	6,999	260	66,470



Obr. 53 Závislost úbytku hmotnosti na čase pro pátý vzorek.

U třetího měření byl průběh následující. Mezi čtvrtým až šestým měřením došlo k mnohem většímu úbytku materiálu. Od sedmého měření probíhalo opět lineárně. Lineární průběh byl až do devátého měření, kde došlo opět k poklesu úbytku mezi měřeními. Tak to probíhalo až do konce. Nejlépe to jde vidět na následujícím grafu, kde jde jasně vidět celý průběh a jednotlivé významné (změna linearity) úseky, viz. obr. 55. Následně jsou opět přiloženy fotografie, které ukazují, jaký vliv měli směsi soli na vzorky při teplotě 900 °C, viz. obr. 56 a 57.

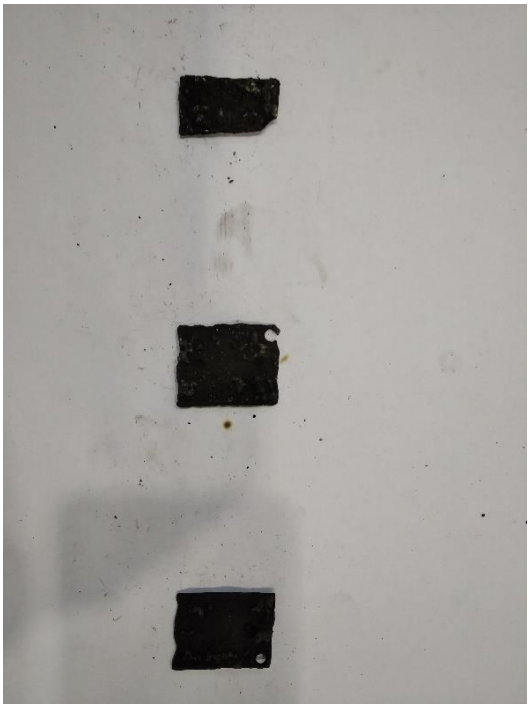


Obr. 54 Závislost úbytku hmotnosti na čase pro šestý vzorek.

Tab.13 Hodnota pro šestý vzorek.

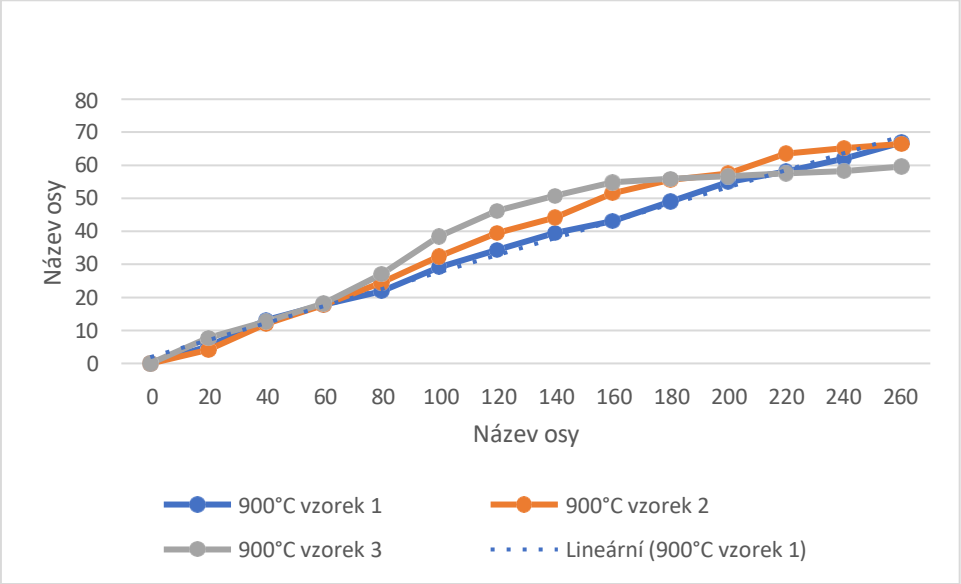
900 °C vzorek 3				
měření	čas [min]	váha [g]	čas [min]	hm. ubytek [%]
1	0	18,834	0	0
2	20	17,374	20	7,752
3	40	16,452	40	12,647
4	60	15,427	60	18,090
5	80	13,747	80	27,010
6	100	11,598	100	38,420
7	120	10,124	120	46,246
8	140	9,268	140	50,791
9	160	8,514	160	54,795
10	180	8,308	180	55,888
11	200	8,159	200	56,679
12	220	7,998	220	57,534
13	240	7,872	240	58,203
14	260	7,612	260	59,584

Obr. 55 Vzorky před měřením.



Obr. 56 Vzorky po měření.

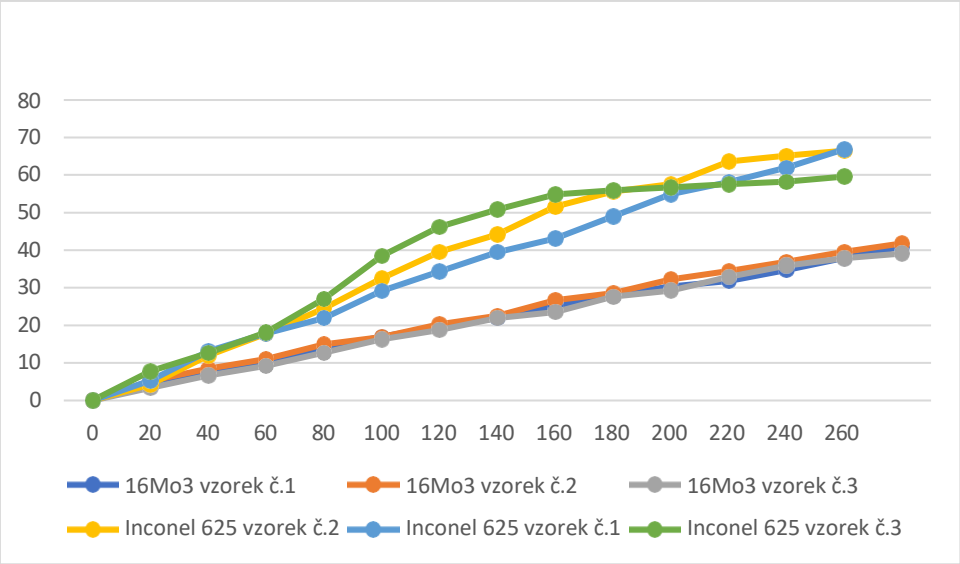
Na obr. 58 je porovnání jednotlivých měření pro 900 °C. Z obrázku lze vidět, že průběh je téměř lineární a průběh se pro jednotlivé vzorky příliš neliší.



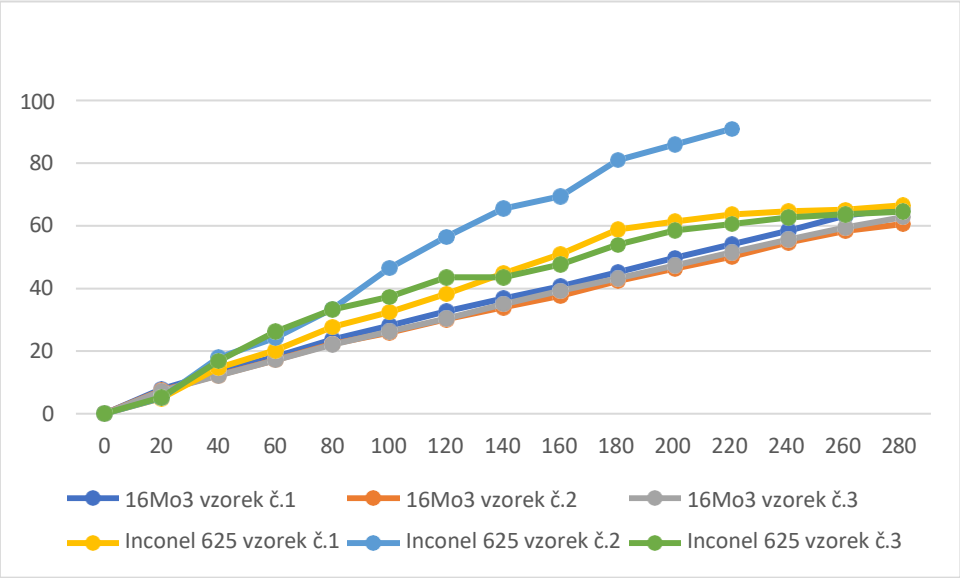
Obr. 57 Porovnání jednotlivých měření 900 °C.

Na obr. 59 a 60 vidíme porovnání naměřených hodnot Inconelu 625 se základním materiálem, z kterého jsou vyrobeny trubky, na které se Inconel 625 navařuje. Z obou obrázků lze vidět, že Inconel měl větší hmotností úbytek než základní materiál. Což je překvapující zjištění, jelikož Inconel se na trubky navařuje z toho důvodu, aby déle vydržely. Tzn., že Inconel je materiál, který má víc vydržet a má mít lepší korozní odolnost než základní materiál 16Mo3.

Hlavní důvod, proč došlo k takovým výsledkům, je prostředí síry. Bylo dokázáno, že Inconel 625 špatně odolává síře [28; 29].



Obr. 58 Porovnání hodnot Inconel 625 a 16Mo3 při 900°C.



Obr. 59 Porovnání hodnot Inconel 625 a 16Mo3 při 975°C.

3.4 Závěr z měření

Během experimentu při teplotě 975 °C došlo k rapidnímu poklesu úbytku materiálu po 200 min. měření. Zajímavé na to je, že jde o dobu, kdy se rozpadl druhý vzorek. Ke konci měření při teplotě 975 °C se měřili jen vzorky jedna a tři. Zajímavý ukazatel je i to, krom vzorku dva a čtyři, že během posledních měření došlo ke snížení úbytku materiálu. Tzn., že materiál korodoval méně než na začátku měření. Jeden z možných důvodů je fakt, že během měření nedocházelo k výměně misek. Soli se postupně dosypávaly do misek v peci. V peci se mohlo změnit prostředí z důvodu výparů. Dalším důvodem, proč tomu tak mohlo být jsou zbytky zkorodovaného materiálu. V úvahu přichází i to, že během měření přeci jen párkrát došlo k výměně misek. A to z toho důvodu, že miska, která se měnila, tak napraskla a tím sůl z misky mohla začít vytékat. To by způsobilo, že by vzorek nebyl při každém měření 100 % ponořený v soli.

Vzorky se po vyndání z pece ponořili do nádoby s vodou, aby rychleji zchladly. Tohle samotné mohlo mít menší vliv na výsledek měření. Další, co mohlo ovlivnit výsledky, mohlo být to, pokud se vzorek špatně usušil, než se položil do misek v peci. Pokud se málo usušil, tak při styku s roztavenou solí, která byla v peci při teplotě nad 900 °C, tak došlo k reakci a sůl začala prskat. To mohlo změnit prostředí. Například pokud by sůl vyprskla na dno pece, tak mohlo dojít k jiné reakci, než když se sůl vypařovala z misek. Zároveň tím, že došlo k vyprsknutí soli, tak se mohlo stát, že vzorek při měření nebyl celý ponořený.

Bylo vypozorováno, hlavně na inconelovým drátku, že k největšímu koroznímu účinku dochází na přechodu mezi roztavenou solí a vzduchem. Tzn. na hladině. Na obr. 61 jde jasně vidět, kde byla hladina směsi a že pravá část byla ponořená v soli. Pro experiment to znamená to, že pokud by byl vzorek ponořený jen na půl, tak v místě, kde by byla hladina soli, tak by docházelo k většímu koroznímu úbytku materiálu. Zároveň nad hladinou by mělo docházet k menšímu koroznímu úbytku.

Obr. 60 Zkorodovaný Inconelový drátek.

Jeden z poslední důvodů, na co se přišlo, že by mohlo mít vliv na výsledek experimentu je fakt, že při průběhu měření při teplotě 975 °C se druhý vzorek začal rychle rozpadat. Resp. se rozpadl tak, že nešlo použít inconeový drátek, pomocí kterého by došlo ke snadnému vytáhnutí z pece. To mohlo způsobit delší prodlevu při vytahování z pece. Tzn. že byl vzorek o chvilku déle v peci. Jedná se o faktory, které nebyly potvrzeny. Mohly nastat a také nemusely a mohly mít významný vliv a také nemusely. Z toho důvodu se s nimi nemůže 100 % počítat.

Každopádně hlavní a experimentálně ověřený důvod, proč došlo k rychlejšímu úbytku materiálu, než u 16Mo3, je špatná odolnost Inconelu 625 proti síře [28; 29]. A jelikož bylo během experimentu použito velké množství síry 29,5 %, tak to bude hlavní důvod pozorovaného chování.

Během měření mohlo dojít k velkému množství faktorů, které mohly experiment ovlivnit. Mohly nastat jen některé z nich a taky mohlo dojí ke kombinaci každé z nich. Z naměřených hodnot, se dá vypozorovat, jak se materiál chová při dané teplotě, na co si při zkoušení dávat pozor a jak dlouho mít materiál v peci.

Doporučení pro provádění experimentu

Z průběhu experimentu lze vyvodit tyhle závěry:

1. Dostatečně velký vzorek pro plánovanou dobu měření – To je důležité, aby se nestalo to, jak v diplomové práci, že se vzorek rozpadne dřív, než se stihne provést požadovaný počet měření. Zároveň se zabrání tomu, aby se vzorek hůře vytahoval z pece a došlo tak k prodloužení doby, kdy je vzorek v peci.

2. Průběh korozního úbytku je lineární – Na začátku, pokud nedošlo k narušení experimentu nežádoucími vlivy, tak jak byly popsány výš, je průběh lineární. Linearita se +- držela u všech vzorků do 160-200 min. experimentu. Z toho lze odvodit, že po 200 min. experimentu v peci došlo k výrazné změně prostředí nebo se nastřádali ostatní vlivy, které měly za následek poklesu korozního úbytku materiálu. Bylo navrhnuto tohle ještě vypozorovat. Každopádně je doporučena doba experimentu do 200 min.

3. Nejlepší teplota a doba měření – Při porovnání dvou teplot, při kterých probíhal experiment, tak lze vyvodit, že při vyšší teplotě docházelo k rychlejšímu koroznímu úbytku materiálu, než tomu bylo u nižší teploty. Proto pokud máme menší vzorky, je lepší použít menší teplotu nebo menší počet měření. Měření, jak bylo zmíněno výše, by mělo probíhat po dobu do 200 min..

Pozn. Když porovnáme výsledky i z předešlého experimentu při teplotě 1050^{o}C, kde byly použity malé vzorky, tak si lze všimnout, že korozní úbytek materiálu byl podobný koroznímu úbytku materiálu u ostatních vzorků a teplot, když vzorky dosáhly menší hmotnosti.

4. Udělat rozbor vzorků – pro experiment by bylo prospěšné vědět složení jednotlivých vzorků, aby se dalo predikovat, a hlavně poté lépe zhodnotit, proč se daný vzorek choval právě takhle.

5. Dát si pozor na to, co by mohlo negativně ovlivnit nebo znehodnotit experiment – Jak bylo zmíněno výš, tak průběh experimentu může ovlivnit víc věcí, a proto je potřeba dát si na to pozor a podniknout kroky a opatření, které zabrání tomu, aby k tomuhle znehodnocení experimentu došlo.

4 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout experiment, pomocí kterého by bylo možné provádět vysokoteplotní testy korozivzdornosti návaru z Inconelu 625 na trubky z oceli 16Mo3, které jsou součástí hadovitého systému ve spalovnách komunálního odpadu. Experiment byl navržen a následně probíhal tak, že byla rozpuštěna směs tří solí (35 % Na2SO4 30 % KCl a 35 % NaCl) v peci, která byla nahřáta na dvě teploty (975 °C a 900 °C). Upravené vzorky Inconelu 625 byly vloženy do rozpuštěné směsi soli a ponechány tam po dobu 20 min.. Poté byly vytaženy a změřil se úbytek materiálu. Udělalo se celkem 15 měření pro každý vzorek. Celkem byly vždy tři vzorky pro každou teplotu.

Změřené hodnoty se zapsaly do excelovské tabulky a ze závislosti čas v min. a hm. úbytek v % byly vytvořeny grafy, které nám názorně ukázaly průběh experimentu pro daný vzorek a teplotu. Z toho bylo zjištěno, že do času zhruba 160-200 min. je průběh lineární a dál se průběh začal srovnávat s vodorovnou osou. Tzn., že hm. úbytek se začal zmenšovat. Dále bylo zjištěno, že čím vyšší teplota, tím dochází k rychlejšímu úbytku materiálu. Lze si všimnout, že během průběhu experimentu došlo v určitých okamžicích k vychýlení od linearity. Byly proto popsány důvody, které to můžou způsobovat a navrženo, co dělat, aby se tomu zabránilo. Nebo spíš, co nedělat.

Při porovnání naměřených hodnot Inconelu 625 a základního materiálu 16Mo3 se zjistilo, že Inconel 625 podléhal korozi víc, než základní materiál 16Mo3. Inconel je velmi odolná slitina, která má mít mnohem lepší korozní odolnost než 16Mo3. Zjistilo se, že jako hlavní důvod, proč to bylo v experimentu obráceně, bylo velké množství síry 29,5 %. V jiných experimentech bylo zjištěno, že Inconel má špatnou odolnost v prostředí síry [28; 29].

Po zhodnocení všech parametrů experimentu byly navrženy následující parametry experimentu:

1. Vzorky z Inconelu 625 o hmotnosti 25 g (čím méně ploché, tím lepší),
2. Teplota experimentu 975 °C,
3. Doba experimentu 200 min. (Celkem 10 měření po dobu 20 min.),
4. Směs solí (35 % Na2SO4 30 % KCl a 35 % NaCl),
5. Tavící miska tenkostěnná s glazurou [25],
6. V peci PEC Lac PK 105/12 [17].

U experimentu je ještě co zkoumat. Věřím tomu, že bude experiment do budoucna dál zlepšován. Experiment, který byl proveden je dobrý základ pro to, co funguje a co naopak nefunguje.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *MPO_TRIO_2019-2021*. Brno, 2019, 17 s.
2. *Návrh základního experimentu vysokoteplotní koroze navařovaných trubek*. Brno, 2021.
3. INCONEL® Alloy 625. In: *Https://www.specialmetals.com/* [online]. Holmer Road Hereford: Special Metals Corporation, 2013 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf
4. VDM® Alloy 625. In: *Www.vdm-metals.com* [online]. Altena: VDM metals, 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.vdm-metals.com/en/alloy625
5. A brief history of Inconel 718. *Http://www.718alloy.com/* [online]. Danyang City: Danyang Hualong Superior Steel Co., 2018 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: http://www.718alloy.com/info/a-brief-history-of-inconel-28346105.html*PŘEHLED - vše o Inconelu 625*. Brno, 2022.*Sdf*
6. *PŘEHLED - vše o Inconelu 625*. Brno, 2022.
7. Koroze. *Oneindustry* [online]. Brno: INFOCUBE, 2019 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.oneindustry.cz/lexikon/koroze/
8. *Pasivace a korozní ochrana kovových materiálů*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Ústav chemie.
9. Svařování | sváření | vše o sváření. *Svářecí kukla* [online]. Poděbrady: Proindustry [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.svarecikukla.cz/blog/svarovani-svareni-vse-o-svareni/
10. Kurz svařování plamenem (fotogalerie). In: *ART Weld* [online]. Liberec: ARTWELD [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.svarecskekurzy.cz/kurz-svarovani-plamenem/
11. ZÁKLADNÍ POJMY SVAŘOVÁNÍ. *Svářečky-obchod.cz* [online]. Rožnov pod Radhoštěm: Stroje a vybavení [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.svarecky-obchod.cz/info/28-zakladni-pojmy-svarovani.htm
12. Význam Inertní plyny. *Vyznam-slova* [online]. vyznam-slova.com [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.vyznam-slova.com/Inertn%C3%AD%20plyny
13. Inertní plyny jako hasební látka. *Hasiči vzdělávání: Vzdělávací portál jednotek požární ochrany* [online]. Frýdek-Místek: Portál hasici-vzdelavani.cz, 2012 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.hasici-vzdelavani.cz/content/inertni-plyny-jako-hasebni-latka
14. Co je vlastně… svařování MIG/MAG?. *Fronius* [online]. Česká Republika: Fronius International, 2020 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://blog.perfectwelding.fronius.com/cs/co-je-svarovani-mig-mag/
15. *Co je vlastně … svařování TIG?. Fronius* [online]. Česká Republika: Fronius International, 2020 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://blog.perfectwelding.fronius.com/cs/co-je-svarovani-mig-mag/

16. Jak svařovat Inconel. *Yzpipes* [online]. Cangzhou City: Cangzhou Yizeng Industry Co., 2020 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: http://cz.yzpipes.com/info/how-to-weld-inconel-45993336.html
17. PK 105/12 do 1280 °C. *LAC* [online]. Židlochovice: LAC [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.lac.cz/cs/pece-a-susarny/testovaci-centrum/sluzby-testovaciho-centra/pk-105-12-atyp-(1)
18. PANTĚLEJEV, Libor. Přednášky: Mezní stavy materiálů. Brno, 2007. Dostupné také z: http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-zimni-semestr
19. 16Mo3 Chrome Moly Steel. AZoM.com [online]. Masteel UK, © 2000-2019, 29.5.2010 [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5244
20. Nová ocel z Ostravy se uplatní zejména v energetice. TechMagazín [online]. Praha: TECH MEDIA PUBLISHING s r.o., © 2010-2019, 13.5.2015 [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: http://www.techmagazin.cz/2138
21. Material No.: 1.5415. M.Woite Sonderwerkstoffe Edelstähle [online]. Erkrath: M. Woite, 2012 [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: http://www.woiteedelstahl.com/15415en.html#
22. Značky ocelí. Metalmax, s.r.o [online]. Frýdek-Místek: Metalmax, s.r.o, 2005 [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: http://www.metalmax.cz/znacky.php
23. PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
24. PÍŠKA, Miroslav. Speciální technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
25. Tavicí miska tenkostěnná. *Advantage* [online]. Praha: Advantage-fl.cz [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://eshop.advantage-fl.cz/eshop/liti-a-taveni/spotrebni-material/nadoby/tavici-miska-c-9-pr-85x32-mm-tenkostenna/
26. Palcové rukavice z para-aramidové tkaniny s izolační vlněnou podšívkou. *Takos* [online]. Praha: Takos [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.takos.cz/rukavice-palcove-tepluodolne-pokovene-600-%B0c-delka-440-mm-zluto-stribrne-10300.html?tak2019-1&gclid=Cj0KCQjwr-SSBhC9ARIsANhzu1465k_GlvKjAKdYOvQ3dp-cxMwLmk0ykcrr8gN7TDJzEGqWjkLJiGUaAkTmEALw_wcB
27. KL20 digitální klenotnická váha do 50g / 0,001g. *Mikrováhy* [online]. Hodonín: JADO Trade [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.mikrovahy.cz/mikrovahy-do-50g/397-kl20-digitalni-klenotnicka-vaha-do-50g-0-001g.html?gclid=Cj0KCQjwmuiTBhDoARIsAPiv6L_MpphJKnHqYieA1kHhNSWgesYYe0RwqoF3Z4NXnmN_X3lTpjnhWVEaApNQEALw_wcB
28. Corrosion Performance of Inconel 625 in High Sulphate Content. *Iopscience.iop* [online]. Bristol: IOP Publishing, 2016 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/131/1/012010/pdf
29. Molten salt induced corrosion of Inconel 625 superalloy in PbSO4–Pb3O4–PbCl2–Fe2O3–ZnO environment. *ScienceDirect* [online]. Rio de Janeiro: Elsevier Editora,

2012 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z:
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X12003903

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
0,7D	Poloměr ohybu se rovná 0,7 průměru trubky	[mm]
1D	Poloměr ohybu se rovná průměru trubky	[mm]

Zkratky

Označení	Legenda
BCC	Plošně centrovaná mřížka
Edx	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
EN	Evropská norma
ISO	International Organization for Standardization
GPa	Gigapaskaly
hm.	hmotnostní
HV	Tvrdost podle Vickers
MAG	Metal active gras
MIG	Metal inert gas
s.r.o.	Společnost s ručením omezeným
TIG	Tungsten inert gas
Tube Coil	Hadovitý systém
WIG	Wolfram inert gas