

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# NÁVRH VÝROBY TĚLESA PLYNOVÉHO ANALYZÁTORU S VYUŽITÍM METODY DIRECT METAL LASER SINTERING

PRODUCTION DESIGN OF GAS ANALYZER BODY USING DIRECT METAL LASER  
SINTERING METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. DANIEL ŘÍČAN

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. JOSEF SEDLÁK, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Daniel Říčan

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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:

**Návrh výroby tělesa plynového analyzátoru s využitím metody Direct Metal Laser Sintering**

v anglickém jazyce:

**Production design of gas analyzer body using Direct metal laser sintering method**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Analýza současného výrobního stavu ve firmě Frentech Aerospace s.r.o.
3. Popis, princip a využití metody DMLS
4. Inovace výroby rozvodného tělesa ve firmě Innomia a.s.
5. Rozbor a vyhodnocení korozivzdorného materiálu (klasická metalurgie/prášková metalurgie)
6. Technicko-ekonomické zhodnocení
7. Závěr

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce bude popis a rozbor výroby tělesa plynového analyzátoru. V práci bude provedena analýza současného výrobního stavu ve firmě Frentech Aerospace s.r.o. Dalším krokem bude inovace výroby tělesa plynového analyzátoru aditivní technologií Rapid Prototyping s využitím metody Direct Metal Laser Sintering (DMLS) ve firmě Innomia a.s. Součástí práce bude rozbor a vyhodnocení vzorků materiálu (klasická metalurgie/prášková metalurgie) použitých při výrobě tělesa plynového analyzátoru. V diplomové práci bude provedeno rovněž technicko-ekonomické zhodnocení stávající a nově navržené technologie výroby.

Seznam odborné literatury:

1. PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1.vyd. 246s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W., BOCKING C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2004, pp.112. ISBN 1860584659.
3. SEDLÁK, J., PÍŠA, Z. Rapid Prototyping master modelů pomocí CAD/CAM systémů. In Mezinárodní vědecká konference 2005. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 07.09.2005-09.09.2005. 30 s. ISBN: 80-248-0895-1.
4. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society): Rapid Prototyping of Materials. The Minerals, Metals & Materials Society. 2002, pp. 615. ISBN 0873395301.
5. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
6. ROZKOŠNÝ, L. Jak vyrobit plně funkční kovové díly přímo z 3D CAD dat. [online]. Únor 2008. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=3698&mark=>>.
7. KOČMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2002. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 16.11.2010

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá možností výroby plynového analyzátoru technologií Rapid Prototyping a to metodou Direct Metal Laser Sintering. V teoretické části je popsána stávající výroba součástí ve společnosti Frentech Aerospace s.r.o a inovace ve firmě Innomia a.s, metodou Direct Metal Laser Sintering. Dále je proveden rozbor principu jednotlivých metod Rapid Prototyping, především metody Direct Metal Laser Sintering. Cílem experimentální části je porovnání mechanických vlastností a struktur materiálu, klasické metalurgie a práškové metalurgie. Součástí diplomové práce je technicko-ekonomické zhodnocení, které porovnává výrobu strojního dílu konvenční a moderní aditivní technologií.

### Klíčová slova

Rychlé prototypování, Direct Metal Laser Sintering, EOSINT M 270, mechanické vlastnosti, metalografická analýza, příprava vzorků.

## ABSTRACT

This master's thesis deals with the possibility of manufacturing gas analyzer by Rapid Prototyping Technology and it with the method Direct Metal Laser Sintering. The theoretical part describes the current production of component in the Frentech Aerospace LLC and innovation with the DMSL method in the company Innomia Furthermore JSC. Then an analysis of the principle of single methods Rapid Prototyping, especially the method of Direct Metal Laser Sintering, is implemented. The aim of the experimental part is to compare the mechanical properties and material structures, conventional metallurgy and powder metallurgy. The thesis also contains a technical-economic evaluation comparing the manufacture of mechanical part by conventional and advanced additive technology.

### Key words

Rapid prototyping, Direct Metal Laser Sintering, EOSINT M 270, mechanical properties, metallographic analysis, sample preparation

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŘÍČAN, D. *Návrh výroby tělesa plynového analyzátoru s využitím metody Direct Metal Laser Sintering*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 86 s., 4 přílohy. Vedoucí práce Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Návrh výroby tělesa plynového analyzátoru s využitím metody Direct Metal Laser Sintering vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....  
Daniel Říčan

## **Poděkování**

Děkuji tímto vedoucímu mé práce panu Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce, společnosti Frentech Aerospace s.r.o. jmenovitě Ing. Petru Valáškov, firmě Innomia a.s. jmenovitě Ing. Luboši Rozkošnému, Ústavu materiálových věd inženýrství jmenovitě Ing. Josefu Zapletalovi, Ing. Marii Ptáčkové, Ing. Pavlu Gejdošovi a také panu Vojtěchu Řiháčkov za podporu a spolupráci při zpracování experimentální části této práce.

**OBSAH**

Abstrakt.....	4
Klíčová slova.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah .....	7
<b>Úvod</b> .....	9
<b>1 ANALÝZA STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE VÝROBY</b> .....	10
1.1 Představení společnosti Frentech Aerospace s.r.o .....	10
1.1.1 Obchodní zaměření.....	10
1.1.2 Strojní vybavení .....	11
1.2 Popis a rozbor tělesa plynového analyzátoru .....	12
1.2.1 Výkresová dokumentace tělesa .....	12
1.2.2 Stručný popis výroby součástí.....	13
1.2.3 Popis stěžejního stroje při výrobě .....	13
<b>2 inovace výroby rozvodného tělesa</b> .....	14
2.1 Představení společnosti Innomia a.s.....	14
2.1.1 Strojní vybavení .....	14
<b>3 TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING</b> .....	15
3.1 Princip technologie Rapid Prototyping.....	15
3.1.1 Získání dat pro tvorbu modelu.....	15
3.1.2 Přehled technologií Rapid Prototyping .....	15
3.1.3 Stereolitografie .....	16
3.1.4 Solid Ground Cutting.....	16
3.1.5 Selective Laser Sintering.....	17
3.1.6 Direct Metal Laser Sintering .....	17
3.1.7 Laminated Object Manufacturing .....	18
3.1.8 Fused Deposition Modeling.....	18
3.1.9 Three Dimensional Printing .....	19
3.1.10 Multi Jet Modeling .....	19
<b>4 METODA DIRECT METAL LASER SINTERING</b> .....	20
4.1 Princip metody Direct Metal Laser Sintering.....	20
4.2 Napětí při metodě Direct Metal Laser Sintering.....	21
4.2.1 Experiment.....	21
4.3 Hustota a pórovitost při Direct Metal Laser Sintering.....	25
4.3.1 Experiment .....	25
4.4 Výrobní zařízení pro metodu Direct Metal Laser Sintering.....	28
4.4.1 EOSINT M 280.....	28
4.4.2 EOSINT M270.....	30
4.5 Používané práškové materiály.....	31
4.5.1 Korozivzdorná ocel GP1.....	31
4.5.2 Korozivzdorná ocel PH1 .....	33
4.5.3 Vysokopevnostní ocel MS1 .....	34
4.5.4 Slitina niklu IN 718.....	36
4.5.5 Slitina MP1 .....	38
4.5.6 Hliníková slitina AlSi10Mg .....	40
4.5.7 Titan Ti64 .....	41

4.5.8 Direct Metal 20 .....	42
4.6 Dokončovací metody .....	44
4.6.1 Mechanické leštění.....	44
4.6.2 Elektrochemické leštění .....	44
4.6.3 Galvanické pokovování .....	45
4.6.4 Kuličkování, tryskání a balotínování .....	45
4.6.5 CNC obrábění .....	45
4.7 Využití metody Direct Metal Laser Sintering .....	45
4.7.1 Prototypové a malosériové formy .....	45
4.7.2 Konformní chlazení forem .....	45
4.7.3 Prototypy .....	46
<b>5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>47</b>
5.1 Experimentální materiály .....	47
5.1.1 Korozivzdorná ocel GP1.....	47
5.1.2 Korozivzdorná ocel X5CrNiCuNb16-4 .....	47
5.1.3 Nástrojová ocel MS1 .....	47
5.1.4 Nástrojová ocel X3NiCoMoTi18-9-5.....	47
5.2 Zkoušky mechanických vlastností materiálu.....	48
5.2.1 Zkouška tahem.....	48
5.2.2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse.....	51
5.3 Vyhodnocení mechanických zkoušek.....	54
5.3.1 Vyhodnocení zkoušky tahem .....	54
5.3.2 Vyhodnocení zkoušky tvrdosti dle Vickerse .....	61
5.4 Metalografická analýza.....	66
5.4.1 Příprava vzorků .....	66
5.4.2 Světelná mikroskopie .....	67
5.4.3 Elektronová rastrovací mikroskopie .....	67
5.4.4 Obrazová analýza .....	67
5.5 Vyhodnocení metalografické analýzy .....	68
5.5.1 Světelná mikroskopie .....	68
5.5.2 Elektronová mikroskopie .....	71
5.5.1 Lomové plochy po statické zkoušce tahem .....	76
5.5.2 Obrazová analýza .....	78
<b>6 DISKUSE K EXPERIMENTÁLNÍM VÝSLEDKŮM .....</b>	<b>81</b>
<b>7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....</b>	<b>82</b>
<b>Závěr .....</b>	<b>84</b>
Seznam použitých zdrojů.....	86
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	90
Seznam příloh.....	92

## ÚVOD

Obecně lze říct, že základem technologie Rapid Prototyping (RP) je vytvoření fyzického modelu, prototypu nebo funkční součásti přímo z 3D dat v nejkratším výrobním čase a v maximální možné kvalitě. Zvláště struktura povrchu vyrobených součástí je jedna z největších slabin RP technologií. Naopak velkou předností je zkrácení etapy výrobního procesu, kdy odpadají investice do výrobních nástrojů. Právě zkrácení doby vývojového procesu je klíčovým a pozitivním faktorem pro výrobu součástí nejrůznějších tvarů ze všech oblastí průmyslu.

Technologie RP je aditivní výroba již s 20 letou historií. Na trhu existuje několik zařízení, které využívají různých stavebních metod, jako je např. 3D Printing (3DP), Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS) a další. Z počátku byla technologie RP používána převážně na výrobu polymerních prototypů jako např. komunikační přístroje a měřicí nástroje. Tato koncepční výroba prototypů z polymerů je na trhu již dobře zavedená.

V současnosti nejsou RP metody používány pouze jako nástroje pro vizualizaci nebo pro montážní testování, ale nabízí možnosti urychlení vývojové etapy výrobku, které nachází uplatnění ve strojírenském průmyslu v lékařství a marketingu. V této práci je podrobně rozepsána metoda DMLS a její vlastnosti, které určují vhodnost použití této technologie ve strojírenství.

DMLS je metoda RP, která nabývá na významu a nyní je nejperspektivnější metodou pro rychlé nástrojové aplikace, ale stále si zaslouží být vyvíjena. Ve skutečnosti existuje jen jedno komerční zařízení (EOS s.r.o., Německo), které je v současné době schopno přímo sintrovat kovové prášky (tj. prášky, které nejsou potažené plastem nebo jiným materiálem s nízkým bodem tání).

Nadále existují poměrně tvrdá konstrukční omezení, jenž jsou způsobena tím, že složky standardních kovových prášků s nízkým bodem tání obsahují fosfor, který je nežádoucí ve většině kovů, a to i při malém množství. Materiálové vlastnosti jsou tedy nadále limitujícím faktorem pro rozšíření této metody. Rozsah a vlastnosti dostupných materiálů se neustále zlepšují. V budoucnu budou nové a vylepšené plastové a kovové materiály, např. s vyšší pevností, pružností nebo tuhostí úspěšným krokem, který povede k rozšíření této metody.

## 1 ANALÝZA STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE VÝROBY

Tato kapitola obsahuje krátké pojednání o společnosti Frentech Aerospace s.r.o. a popis součásti plynového analyzátoru se stručným výrobním postupem.

### 1.1 Představení společnosti Frentech Aerospace s.r.o

Česká společnost Frentech Aerospace s.r.o. Obr. 1.1 byla založena v roce 1994. Produkce podniku byla zpočátku určena pro obor lékařské techniky, mikroelektroniky a výrobu speciálních strojů včetně dodávek náhradních dílů.



Obr. 1.1 Pohled na sídlo společnosti<sup>17</sup>.

V roce 1997 se uskutečnila první dodávka dílů do leteckého průmyslu (AIRBUS). Od tohoto roku se datuje spolupráce v oboru Aerospace. Proto společnost investovala do moderních technologií a zvyšovala své know-how.

V roce 2006 byla ustanovena skupina firem Frentech Aerospace s.r.o. a Frentech Investments s.r.o., které jako dceřiné společnosti patří holdingové společnosti Czech Aerospace Systems s.r.o.

Společnost Frentech Aerospace s.r.o. se vypracovala v kvalifikovaného dodavatele zejména pro letecký a vesmírný průmysl, mikroelektroniku, lékařskou techniku, vakuovou a přístrojovou techniku, mikrovlnné radarové a rádiové systémy. Především je exportérem do zemí EU, USA a ASIE.

#### 1.1.1 Obchodní zaměření

Hlavním zaměřením společnosti je spolupráce s lídry v oboru letecké techniky, společnost dodává a vyrábí díly pro veškerá letadla typu AIRBUS, vesmírného a obranného průmyslu (díly pro vysokofrekvenční a telekomunikační satelity, solární panely satelitů a sestavy zrcadel pro projekt ALMA v Čile). Vyrábí měřicí a přístrojové techniky, vakuové a mikrovlnné techniky. Společnost produkuje díly v malých a středních dávkách, také prototypy a zejména montážní sestavy a podsestavy.

V nabídce společnosti Frentech Aerospace s.r.o. je:

- výroba a dodávka obráběných dílů,
- montáže mechanických skupin a subsystémů,
- návrh a konstrukce dílů a subsystémů,
- technické a technologické poradenství,
- speciální projekty.

### 1.1.2 Strojní vybavení

Společnost Frentech Aerospace s.r.o. disponuje moderním a efektivním technologickým vybavením Tab. 1.1 a Tab. 1.2. Výrobní proces je řízen systémem CPC (Cyber Production Center). Samozřejmě disponuje konvenčními stroji (brusky na kulato a na plocho TOS, žíhací pece ELSKLO, CNC pila FORTE, soustruhy a frézky). Dále jsou to zařízení pro popisování a značení dílů (mikroúder ec9, laser o výkonu 75 W s rotační osou a elektrochemické leptání).

Tab. 1.1 CNC Soustruhy a soustružnická centra<sup>17</sup>.

Stroj	Výrobce	Počet os	Počet strojů	Pracovní rozsah [mm]
Apha 330 plus	HERISON	2	1	Ø 3 - 150
SQT 10	MAZAK	3	1	Ø 5 - 125
QTN 100	MAZAK	3	1	Ø 5 - 125
SQT 200	MAZAK	4	1	Ø 20 - 250
STAR VNC 20C	STAR	4	1	Ø 1 - 20
STAR SV 32	STAR	9	1	Ø 0,1 - 32
INTEGREX 100	MAZAK	5	1	Ø 20 - 125
INTEGREX 200	MAZAK	4+1	1	Ø 30 - 250

Tab. 1.2 CNC Frézovací centra<sup>17</sup>.

Stroj	Výrobce	Počet os	Počet strojů	Pracovní rozsah [mm]
FJV 20	MAZAK	3	1	300x250x150
MCFV 100	TAJMAC	3	2	800x600x200
MCFV 1060	TAJMAC	3	1	1000x600x200
H400N	MAZAK	4	1	350x350x200
FH580	MAZAK	4	1	500x400x250
VARIAXIS 630	MAZAK	5	2	650x500x200
PICOMAX 90	FEHLMANN	5	1	200x200x200
PICOMAX 95	FEHLMANN	5	1	300x300x200

Obě strojní zařízení PICOMAX pracují v bezobslužném režimu s robotem EROWA.

## 1.2 Popis a rozbor tělesa plynového analyzátoru

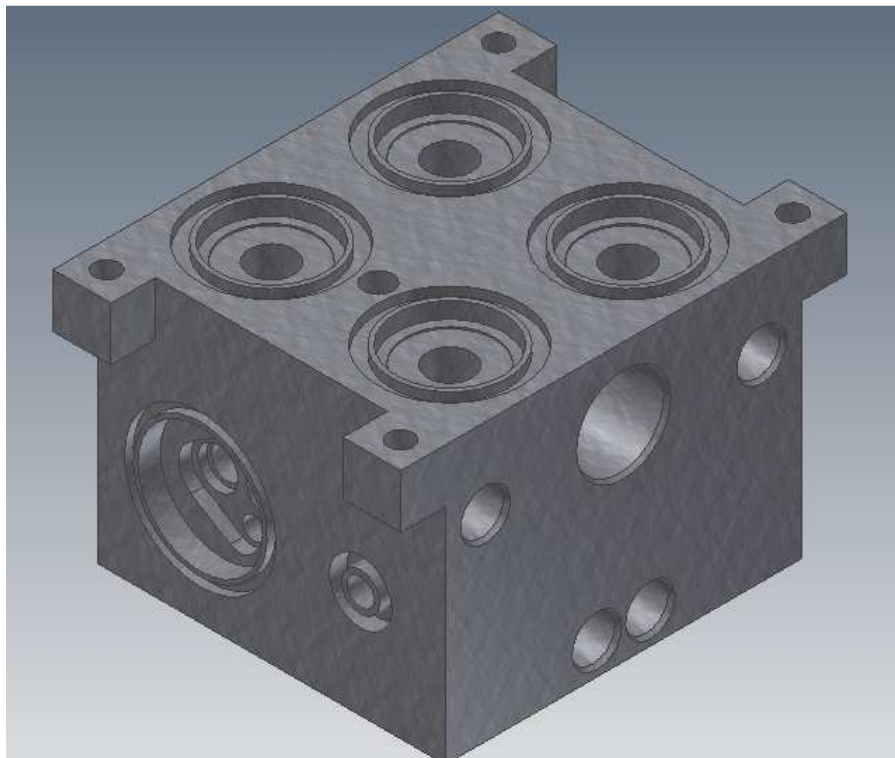
Těleso plynového analyzátoru (označení dílu TC-Zelle) je základem modulu Obr. 1.2. Tento modul je používán v chemickém průmyslu pro analyzování plynů v agresivním prostředí nebo např. na skládkách.



Obr. 1.2 Modul plynového analyzátoru<sup>17</sup>.

### 1.2.1 Výkresová dokumentace tělesa

Přiložená výkresová dokumentace je v podobě, ve které byla získána od společnosti Frentech Aerospace s.r.o (Příloha č. 4). Na požádání společnosti je z výkresu odstraněno popisové pole. Součástí výkresové dokumentace je samozřejmě 3D model součásti Obr. 1.3, který je následně využíván při zpracování a tvorbě NC programu.



Obr. 1.3 Model tělesa plynového analyzátoru<sup>40</sup>.

### 1.2.2 Stručný popis výroby součásti

Tab. 1.3 Popis výroby součásti<sup>40</sup>.

Operace	Pis operace	Čas přípravy [min]	Čas obrábění [min/ks]
Dělení polotovaru	Řezání tyčového materiálu 60x40 mm	10	5
Frézování (hrubování a dokončení)	Pro frézování se použilo CNC frézovací centrum FH 580, součást je upnuta v hydraulickém svěráku. Následuje frézování dle NC programu.	240	98
Odjehlení a označení dílu	Sražení hran a otřepů. Poté následuje označení dílu mikroúderem ec9.	30	23
Výstupní kontrola	Provádí se stoprocentní kontrola prvního kusu při každé operaci a nakonec kontrola několika náhodně vybraných kusů.	/	/

### 1.2.3 Popis stěžejního stroje při výrobě

Obráběcí centrum FH 580 je dalším vývojovým stupněm postavený na základě zkušeností z výroby. Rozsah otáček FH 580 umožňuje efektivní obrábění oceli, litiny a hliníkových slitin. Tím může nahradit dva samostatné stroje. Technické údaje jsou v Tab. 1.4.

Tab. 1.4 Technické údaje CNC Frézovací centrum FH 580<sup>40</sup>.

Frézovací centrum FH 580			
Podélný pojezd stolu X		[mm]	710
Svislý pojezd vřetena Y		[mm]	610
Příčný pojezd vřetena Z		[mm]	660
Vzdálenost osy vřetene k horní ploše stolu		[mm]	50 - 660
Vzdálenost čela vřetene od středu stolu		[mm]	150 - 810
Váha stroje		[kg]	10640
Celková výška stroje		[mm]	2621
Požadavky podlahové plochy (Š x D)		[mm]	3230 x 4027
Výkon motoru (trvalý výkon/30 min. /10 min. provozu)		[kW]	11 / 15 / 22
Rozsah otáček vřetena		[min <sup>-1</sup> ]	35 - 12000
Rozměry stolu		[mm]	500 x 500
Maximální zatížení stolu		[kg]	500
Osa X	rychloposuv	[mm.min <sup>-1</sup> ]	32000
	Posuv	[mm.min <sup>-1</sup> ]	1 - 32000
Osa Y	rychloposuv	[mm.min <sup>-1</sup> ]	32000
	Posuv	[mm.min <sup>-1</sup> ]	1 - 32000
Osa Z	rychloposuv	[mm.min <sup>-1</sup> ]	32000
	Posuv	[mm.min <sup>-1</sup> ]	1 - 32000
Maximální průměr nástroje ovládaný ATC		[mm]	Ø 150
Maximální průměr nástroje v zásobníku (se sousedními nástroji)		[mm]	Ø 95
Maximální průměr nástroje v zásobníku (bez sousedních nástrojů)		[mm]	Ø 150

## 2 INOVACE VÝROBY ROZVODNÉHO TĚLESA

Inovace výroby tělesa plynového analyzátoru spočívá ve výrobě součástí moderním aditivním způsobem s využitím technologie RP (metoda DMLS) ve společnosti Innomia a.s., která disponuje tímto zařízením jako jediná v České republice.

### 2.1 Představení společnosti Innomia a.s

Společnost Innomia a.s. byla založena v roce 2006 s cílem poskytovat zákazníkům kompletní podporu při návrhu, vývoji a výrobě kovových a plastových prototypů technologiemi Rapid Prototyping<sup>20</sup>. V případě prototypů nabízí zejména výrobu kovových dílů a forem s využitím rychlé a flexibilní metody (DMLS), kterou společnost provozuje jako jediná na území ČR. Dostupnými materiály jsou, Martenzitická ocel MS1, Korozivzdorná ocel GP1 a Bronz DM20. Na Obr. 2.1 je vybráno několik prototypových součástí.

Kromě oblasti kovových a plastových prototypů se společnost zabývá výrobou sériových forem a vložek do forem s tzv. "konformním chlazením". Tento revoluční způsob chlazení forem, kdy chladicí kanály sledují tvar dutiny poskytuje 20 – 40 % zkrácení výrobního cyklu a snížení deformací dílů díky optimálnímu odvodu tepla z dutiny formy. Mimo jiné nabízí také 3D tisk prototypů (technologie FDM, materiál ABS plus) a 3D skenování výrobků (optický 3D skener ATOS I).



Obr. 2.1 Portfolio společnosti Innomia a.s.<sup>20</sup>.

#### 2.1.1 Strojní vybavení

Společnost Innomia disponuje strojním vybavením uvedené v Tab. 2.1, žíhací pece a ruční soupravou pro dokončení a leštění dílů vyrobené metodou DMLS. Zařízení je podrobněji popsáno v kapitole 4.4.1.

Tab. 2.1 Strojní vybavení společnosti Innomia a.s.<sup>20</sup>.

Stroj	Výrobce	Pracovní rozsah [mm]
EOSINT M270	EOS	250x250x215
SST 1200	DIMENSION	254X254X305
3D skener ATOS I	GOM	-

### 3 TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

Na začátku byla technologie Rapid Prototyping (RP) většinou používána pro výrobu prototypů vyrobených z polymerů jako komunikační a kontrolní nástroj. Tyto metody jsou na trhu již dobře zavedené. V současnosti díly vyrobené aditivními metodami již nejsou používány pouze jako nástroje pro vizualizaci nebo pro montážní testování, ale představují urychlení vývojové etapy výrobního procesu v automobilovém a leteckém průmyslu v lékařství a také marketingu. Ve všech zmíněných oblastech došlo ke zkrácení času vývoje nových součástí, snížení nákladů a zvýšení kvality výsledného produktu tím, že se automatizuje výroba prototypových součástí. Dalším přirozeným vývojem pro metody RP je vytvoření funkční součásti přímo z kovů a keramiky.

#### 3.1 Princip technologie Rapid Prototyping

RP je technologie, která vytváří fyzické modely na základě 3D dat. Tato technologie umožňuje vytvářet jakkoli složité součásti. Podstatou všech technologií RP je výroba součástí postupným nanášením materiálu po vrstvách konstantní tloušťky na rozdíl od CNC obrábění, kdy se materiál odebrává ve formě třísky<sup>5</sup>. Finální součásti mohou být vytvořené z pryskyřice, termoplastu, vosku nebo kovového prášku.

Technologie RP se člení do třech základních postupů zpracování nazvaných jako Preprocessing. Sem patří vše související s přípravou 3D dat, např. transformace dat z CAD systémů do formátu \*.stl, vhodná orientace součásti atd. Dalším krokem je Processing, do kterého spadá samotná výroba fyzického modelu vhodně zvolenou metodou RP. Závěrečnou fází je skupina kroků, které vedou k finálnímu dokončení součásti souhrnně nazvané jako Postprocessing. Technologie RP umožňuje zkrácení etapy výrobku, což se příznivě projevuje při zvyšování konkurenceschopnosti výrobku na trhu<sup>5</sup>.

##### 3.1.1 Získání dat pro tvorbu modelu

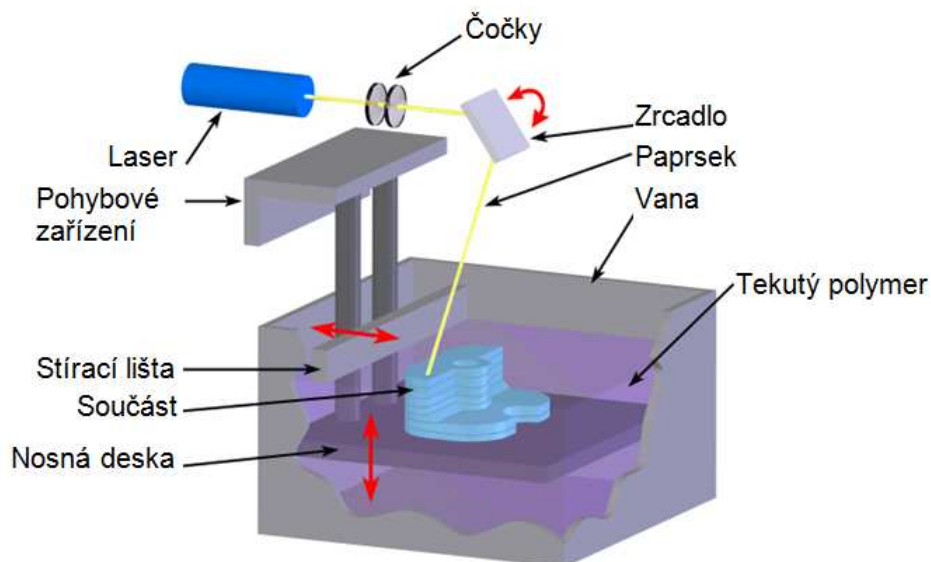
Je několik možností získání dat pro technologie RP. První variantou je proces Reverse Engineering (RE), kdy na začátku výrobního procesu je fyzický model, který se převádí do digitální podoby. Fáze převodu reálné součásti do digitální podoby se nazývá 3D digitalizace nebo také skenování a zařízení k tomu potřebné je 3D skener<sup>7</sup>. Výstupem je mrak bodů vyžadující převed na trojúhelníkovou síť, jenž může být uložena do vhodného formátu. Druhým zdrojem je virtuální model, který vznikne v libovolném CAD systému umožňující vytvářet 3D modely.

##### 3.1.2 Přehled technologií Rapid Prototyping

Téměř veškeré množství prototypů vzniká pomocí speciálních technologií. Některé technologie jsou založeny na stejném principu. Liší se pouze v některých detailech. Všechny způsoby, ale mají společnou vlastnost v postupném nanášení vrstev materiálu<sup>5</sup>. V následujících kapitolkách je přehled nejznámějších a nejvýznamnějších technologií RP.

### 3.1.3 Stereolitografie

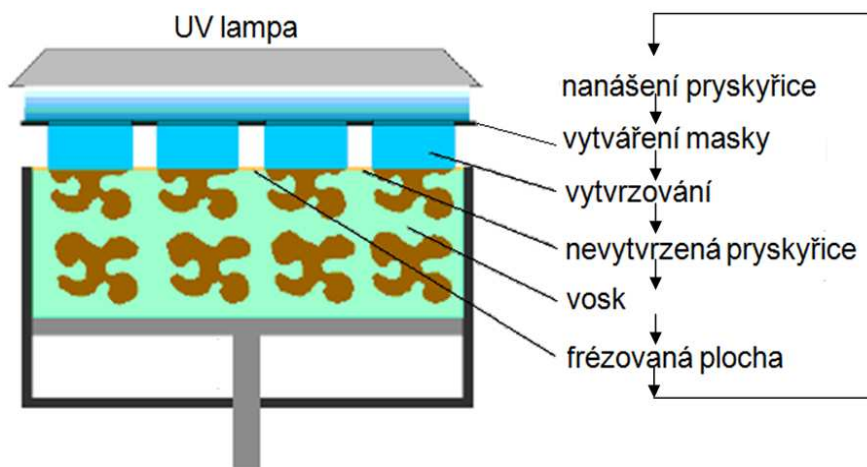
Metoda Stereolitografie (SLA) Obr. 3.1 je založena na postupném vytvrzování jednotlivých vrstev z fotopolymerní pryskyřice laserem řízeným optickou soustavou. Po ukončení tisku následuje úprava povrchu včetně opracování v UV komoře. Metoda se řadí mezi nejpřesnější výrobu prototypů. SLA metoda se používá především v automobilovém průmyslu.



Obr. 3.1 Princip metody SLA<sup>30</sup>.

### 3.1.4 Solid Ground Cutting

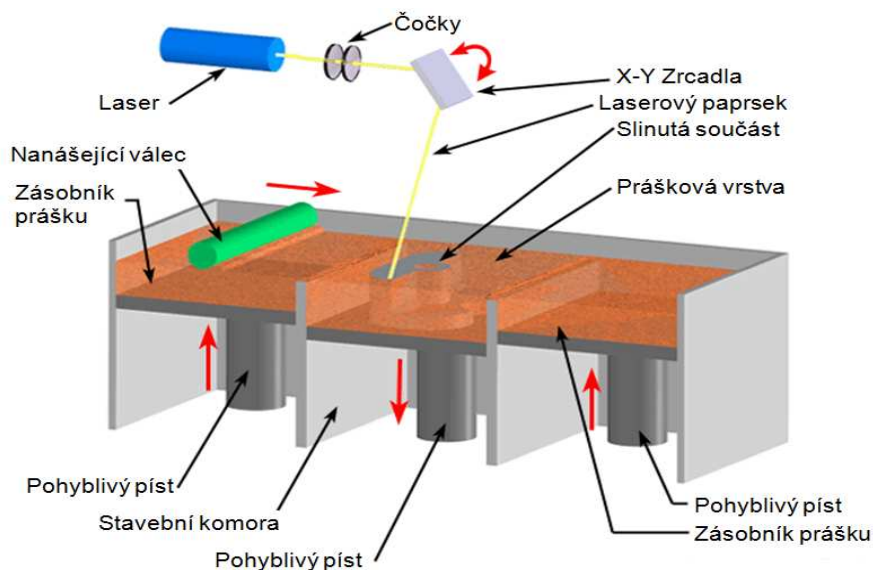
Metoda Solid Ground Cutting (SGC) Obr. 3.2 je založena na vytvrzování polymerní pryskyřice působením UV lampy o výkonu 4 kW přes negativní masku. Po odstranění šablony je nevytvrzená pryskyřice odsáta a nahrazena výplňovým voskem, který slouží jako podpora. Následně je vrstva s voskem odfrézována na požadovanou tloušťku. Dokončená součást může být závěrečně vytvrzená speciální UV lampou. SGC metoda se používá k ověřování designu a pro účely prezentace nových výrobků, atd.



Obr. 3.2 Princip metody SGC<sup>10</sup>.

### 3.1.5 Selective Laser Sintering – SLS

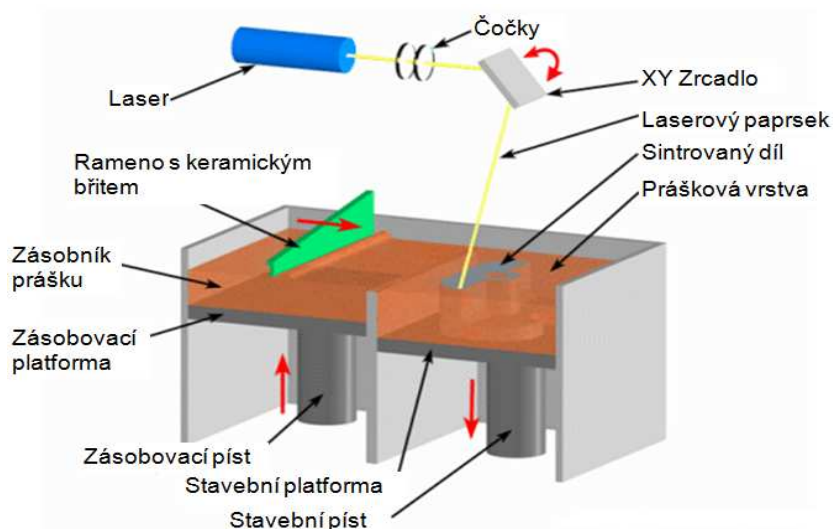
Metoda Selective Laser Sintering (SLS) Obr. 3.3 je založena na tavení materiálu ve formě jemného prášku pomocí CO<sub>2</sub> laseru. Prášek je nanášen ve vrstvách válcem, který je stlačuje a následně laser průřez vytvrzuje. Poté se základna sníží o jednu vrstvu a postup se opakuje. Nenatavený prášek slouží jako podpora pro model. Metodou SLS je možné vytvářet součásti z plastů, kovu, pryže a keramiky. Po dokončení součásti jsou nezbytné dokončovací operace. Metoda SLS se uplatňuje v oblasti výroby forem a nástrojů pro výrobu plastových nebo kovových součástí.



Obr. 3.3 Princip metody SLS<sup>29</sup>.

### 3.1.6 Direct Metal Laser Sintering

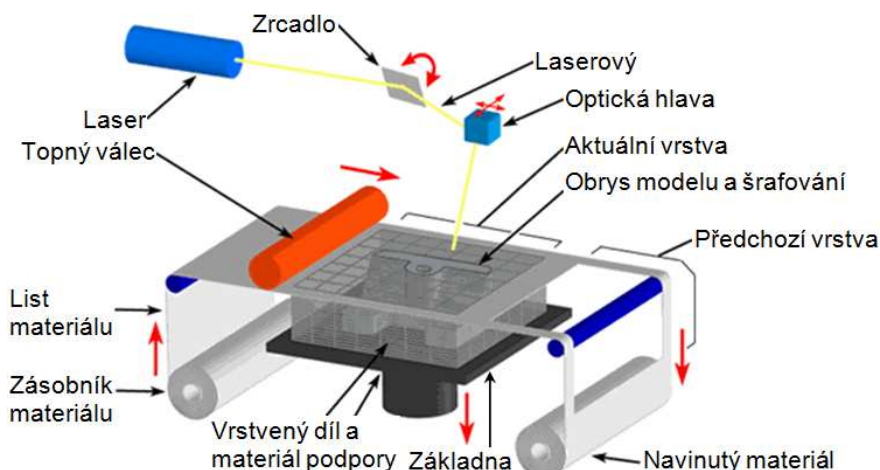
Metoda Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Obr. 3.4 je založena na postupném tavení jemných vrstev kovového prášku laserovým paprskem. DMLS technologie nabízí širokou oblast různých vlastností. Podrobněji bude popsána v kapitole 4.



Obr. 3.4 Princip metody DMLS<sup>14</sup>.

### 3.1.7 Laminated Object Manufacturing

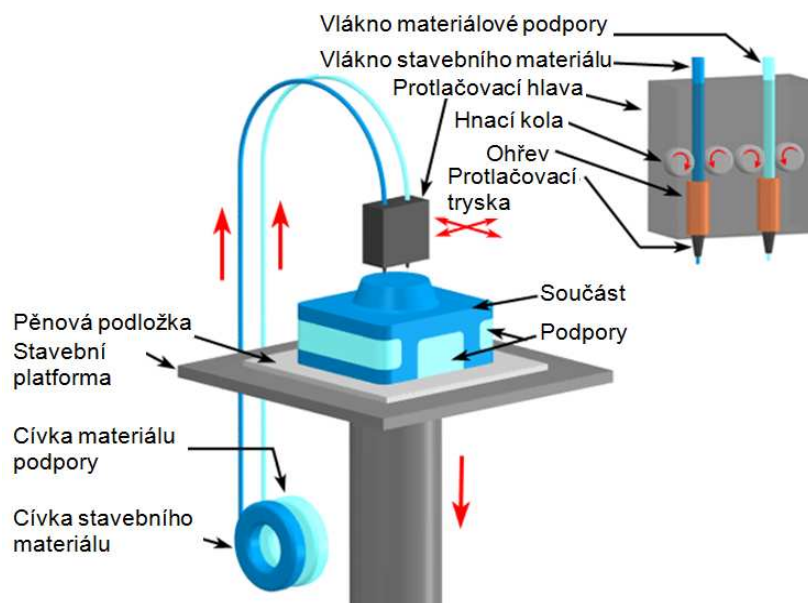
Metoda Laminated Object Manufacturing (LOM) Obr. 3.5 je založena na postupném odvíjení jednotlivých vrstev fólií na pracovní desku, kde jsou přilepeny k předcházející vrstvě přitlakem pomocí válce zahřátého přibližně na 330 °C. Následně je vyřezána kontura modelu a zbylá fólie se navíjí na válec s odpadem. Součásti vyrobené metodou LOM se používají pro vizualizace, marketing a prezentaci nových výrobků. Modely lze také použít jako formy pro odlévací a vstřikovací technologie.



Obr. 3.5 Princip metody LOM<sup>24</sup>.

### 3.1.8 Fused Deposition Modeling

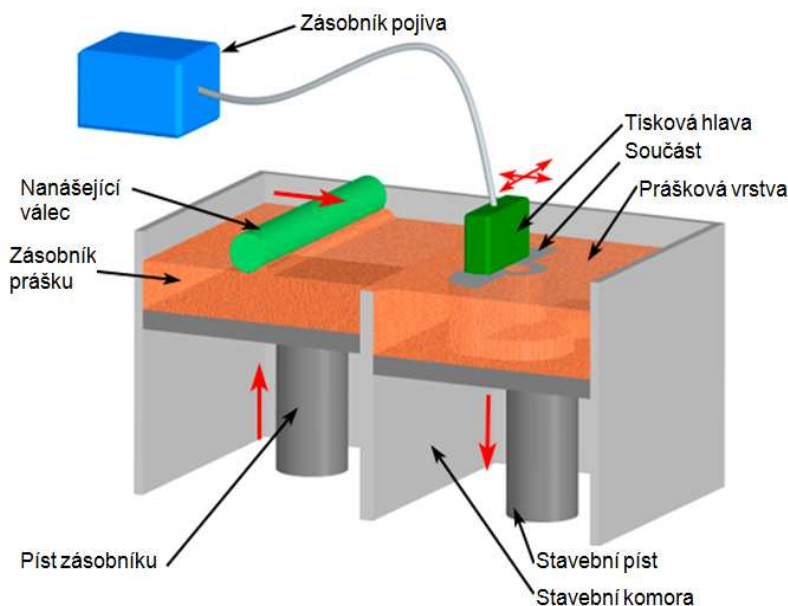
Metoda Fused Deposition Modeling (FDM) Obr. 3.6 je založena na tavení termoplastického drátu navinutého na cívce, ze které je pomocí kladek vtačován do vyhříváné trysky a následně nanášen v jednotlivých vrstvách. Technologie FDM vyžaduje stavbu podpor, které se po dokončení součásti mechanicky nebo chemicky odstraní. Součásti vyrobené metodou FDM se používají k testování designu a funkčnosti nových výrobků.



Obr. 3.6 Princip metody FDM<sup>18</sup>.

### 3.1.9 Three Dimensional Printing

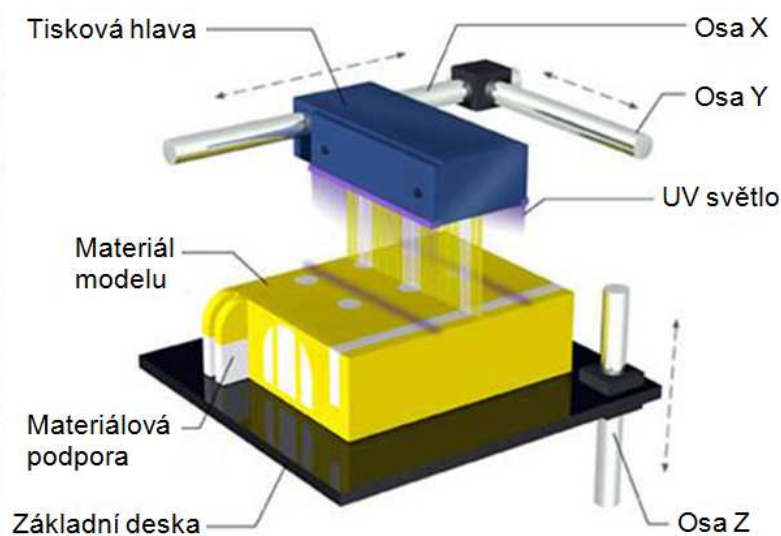
Metoda Three Dimensional Printing (3DP) Obr. 3.7 je podobná technologii SLS, ale laserová hlava je nahrazena tiskovou hlavou s pojivem. Na nanášený práškový materiál je vstřikováváno přesné množství pojiva z tiskové hlavy, která se pohybuje rastrovým způsobem. Po vytvrzení jedné vrstvy je píšť spojený se základnou snížen o tloušťku nanášené vrstvy. Jako podpurný materiál slouží nespojený prášek. 3DP je jediná metoda umožňující tvorbu barevných součástí.



Obr. 3.7 Princip metody 3DP<sup>31</sup>.

### 3.1.10 Multi Jet Modeling

Metoda Multi Jet Modeling (MJM) Obr. 3.8 je založena na postupném nanášení vrstev termopolymery pomocí speciální tiskové hlavy, která se pohybuje nad deskou v X a Y směru a po nanášení vrstvy se deska sníží o tloušťku nanášené vrstvy. Nanášený materiál téměř okamžitě ztuhne při styku s předcházející vrstvou.



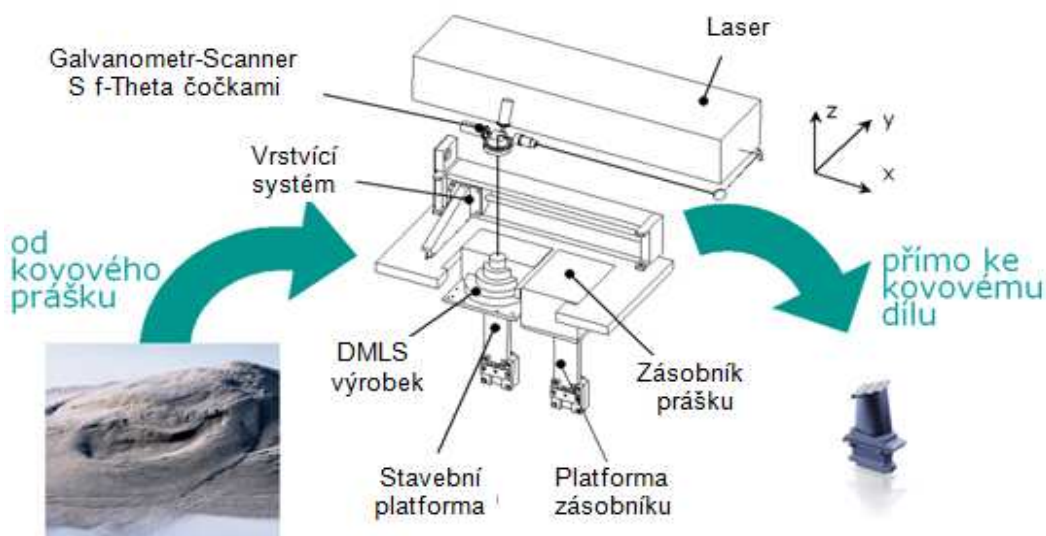
Obr. 3.8 Princip metody FDM<sup>18</sup>.

## 4 METODA DIRECT METAL LASER SINTERING

Direct Metal Laser Sintering je moderní technologie umožňující vyrobit plně funkční kovové díly přímo z 3D CAD dat. Nabízí široký rozsah vlastností, jenž dosahují vyšších mechanických vlastností než odlitky nebo výkovky.

### 4.1 Princip metody Direct Metal Laser Sintering

Metoda Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Obr. 4.1 je založena na postupném tavení jemných vrstev kovového prášku laserovým paprskem. Nejprve je 3D CAD model součásti nahrán do softwaru (Magics X SP2), kde proběhne kontrola vstupních dat ve formátu \*. stl, návrh umístění součásti na platformě, tvorba podpor (\*. cli formát), která je automatická, ale vyžaduje úpravu. Na základě zvolené tloušťky (min. tloušťka je 20  $\mu\text{m}$ ) výrobních vrstev jsou 3D data „rozřezána“ na jednotlivé vrstvy (formát \*.sli). Poté obsluha zvolí materiál součásti a přiřadí správné technologické parametry stavby. Takto připravená data jsou odeslána do zařízení EOSINT M 270. Dávkovací zařízení odměří množství pro jednu vrstvu a rozprostře ji na povrch ocelové platformy, která je umístěna v pracovní komoře vyplněné dusíkem nebo argonem. Ovládací softwar řídí trajektorii laserového paprsku podél kontury součásti, kde dochází k lokálnímu roztavení prášku pouze v konturách řezu součásti. Nespotřebovaný prášek je z 98 procent znovu využíván pro výrobu. Takto proces pokračuje vrstvu po vrstvě dokud není postavena celá součást. Po spuštění procesu zařízení EOSINT M 270 pracuje v plně automatickém režimu 24 hodin denně<sup>5</sup>.



Obr. 4.1. Princip metody DMLS<sup>13</sup>.

DMLS metoda umožňuje vytvářet velmi složité vnější i vnitřní tvary součástí a komplexní díly, které byly standardní technologií nutné vyrobit z několika součástí. Dokončovací operace jsou nedílnou součástí každé technologie RP a také metody DMLS. Po ukončení stavby je nutno součásti z některých materiálů žíhat ke snížení vnitřního pnutí, např. korozivzdorná ocel EOS GP1. Poté následuje odstranění podpor z povrchu součásti a dále je možné součást zpracovat jako klasický kovový materiál.

## 4.2 Napětí při metodě Direct Metal Laser Sintering

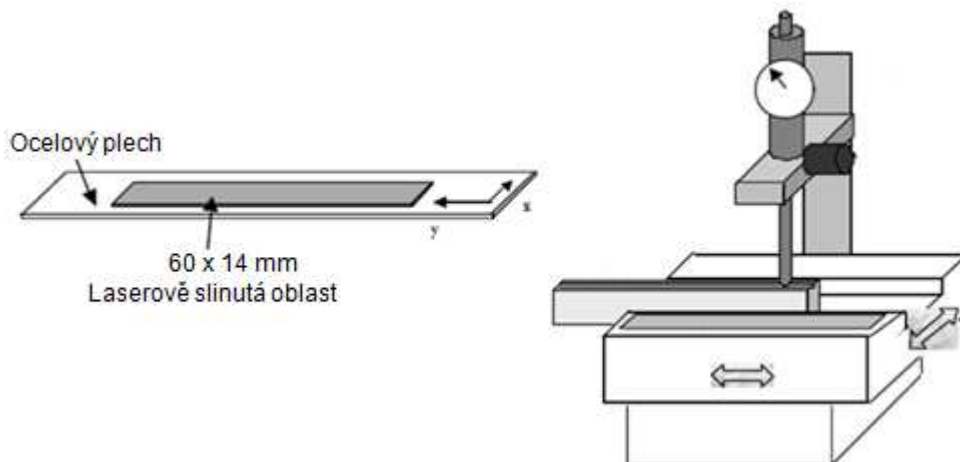
Vzhledem k vysoké tepelné energii, která je potřebná k uskutečnění všech materiálových kroků během slinování v extrémně krátkém čase, vznikají ve struktuře teplotní gradienty. Tepelné namáhání a odpovídající zbytková napětí vyvolávají deformaci nebo popraskání předmětu. Zásadní vliv na podobu tepelného namáhání mají parametry procesu jako výkon laseru, snímací rychlost, šrafovací vzdálenost, tloušťka vrstvy, počet vrstev atd. Vzhledem k tomu je důležitá tvorba podpor zabraňující deformaci dílu, která vyžaduje určitou zkušenost obsluhy.

Za účelem snížení úrovně deformace v laserově slinutých předmětech byly provedeny podrobné studie procesních parametrů. Jednotlivé vlivy provozních parametrů jsou popsány v následujícím experimentu.

### 4.2.1 Experiment

Změna provozních parametrů je popsána na rozdílných práškových materiálech, čisté železo typu ASC a ocelový prášek DirectSteel 50-V1. Slinování proběhlo pod dusíkovou atmosférou pomocí zařízení EOSINT M250.

Deformace je měřena na ocelovém plechu (1.1403, tloušťky 1 mm) připevněném na platformu, kde je laserem slinovaná oblast s rozměry 60 x 14 mm. Po odstranění plechu z platformy dojde k prohnutí vlivem zbytkového napětí, které je bodově měřeno v X a Y směru pomocí číselníkového úchylkoměru Obr. 4.2.



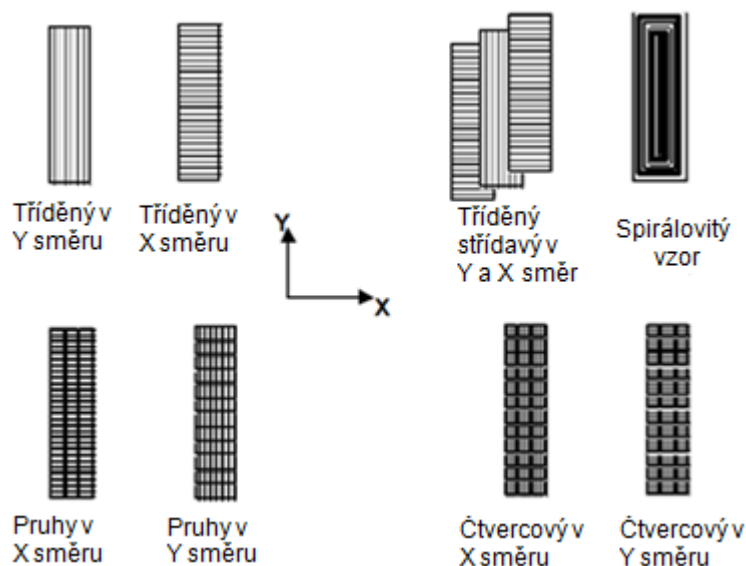
Obr. 4.2 a) Ocelový plech se slinutou oblastí, Obr. b) zařízení pro měření deformace<sup>32</sup>.

Výkon laseru, snímací rychlost, šrafovací vzdálenost, tloušťka vrstvy a počet vrstev byly různé vzhledem k posouzení jejich vlivů na množství zbytkových napětí. Také bylo aplikováno několik skenovacích vzorů. Přehled skenovacích vzorů je uveden na Obr 4.3.

Skenovací vzor "tříděný" je typický rastrový vzor s krátkým mřížkovým vzorem v X směru a dlouhým mřížkovým vzorem v Y směru. Tento typ se může střídát od vrstvy k vrstvě. Ve spirálovitém vzoru se nejprve laserem skenuje kontura a podle šrafovací vzdálenosti střed součásti

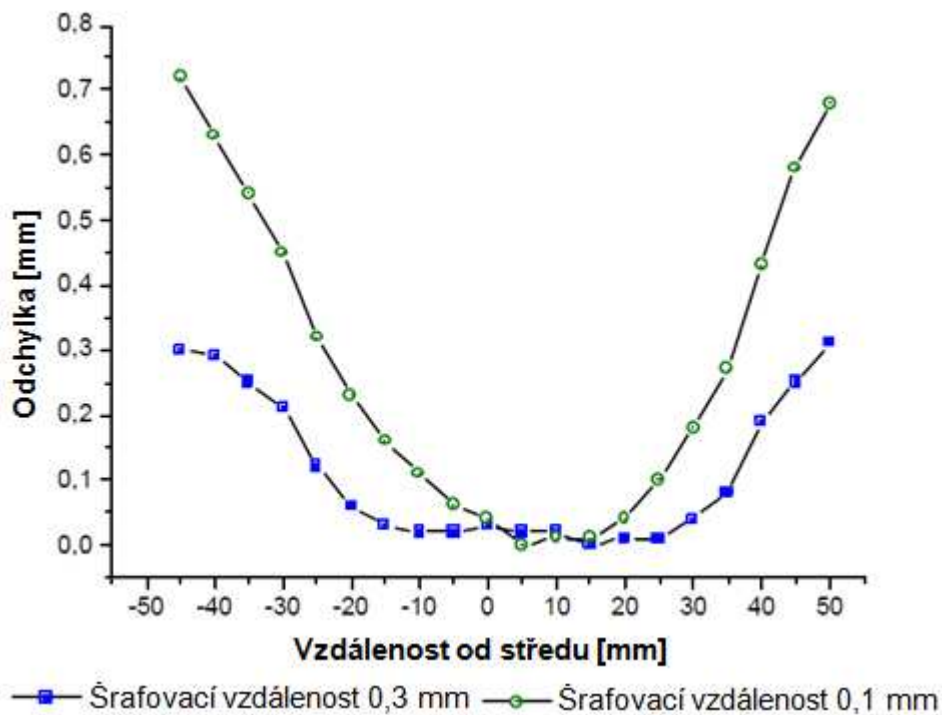
Skenovací vzor "pruhy" je kombinace krátkých a dlouhých rastrových vzorů. Pruhy se mohou navzájem překrývat.

Vzor "čtvercový" čtverce obvykle nejsou po skenování navzájem propojené. Mezera je následně uzavřena jedním skenovacím řádkem.



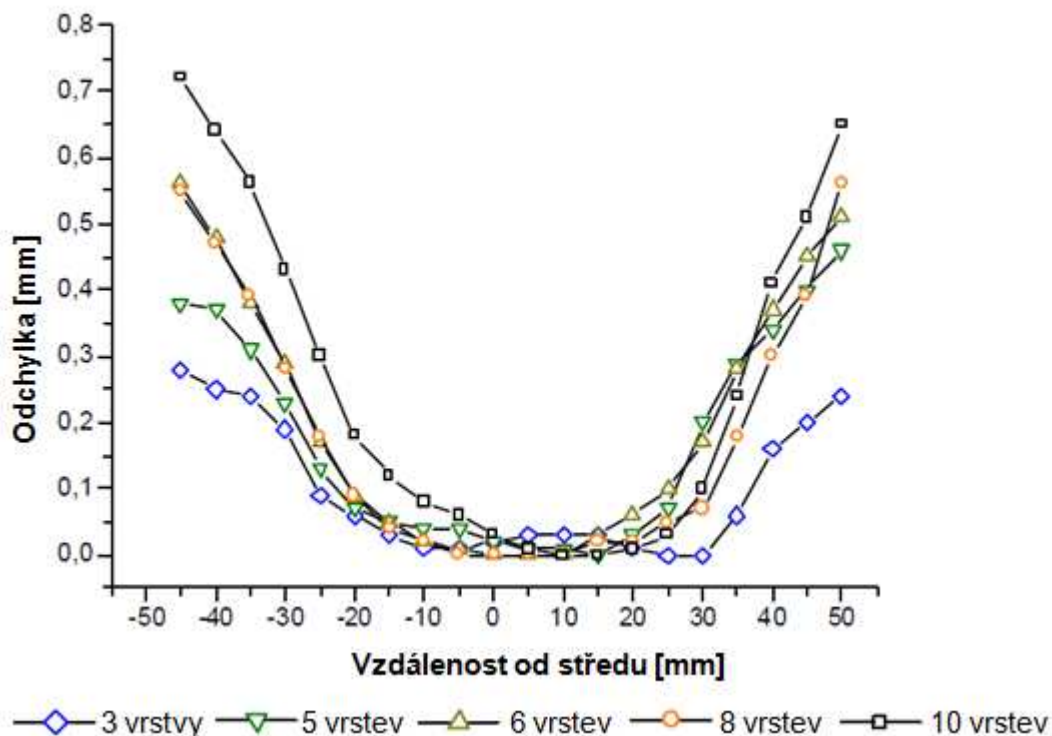
Obr. 4.3 Skenovací vzory použity v DMLS<sup>32</sup>.

Všeobecně se ocelový plech vychyluje ve tvaru zvonu. Obr. 4.4 znázorňuje vliv šrafovací vzdálenosti na deformaci pro skenovací vzor "tříděný". Při dodržení konstantních parametrů procesu, snížení šrafovací vzdálenosti vede jednoznačně ke zvýšení průhybu.



Obr. 4.4 Vliv šrafovací vzdálenosti na deformaci, tříděný vzor s dlouhým rastrem, snímací rychlost  $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , čisté železo ASC<sup>32</sup>.

Deformace také byla zkoumána v závislosti na počtu vrstev. Z Obr. 4.5 je možno konstatovat, že množství deformace v podélném směru se zvyšuje s více vrstvami. Nebyly zjištěny žádné žíhací účinky vlivem překrývání jednotlivých vrstev.

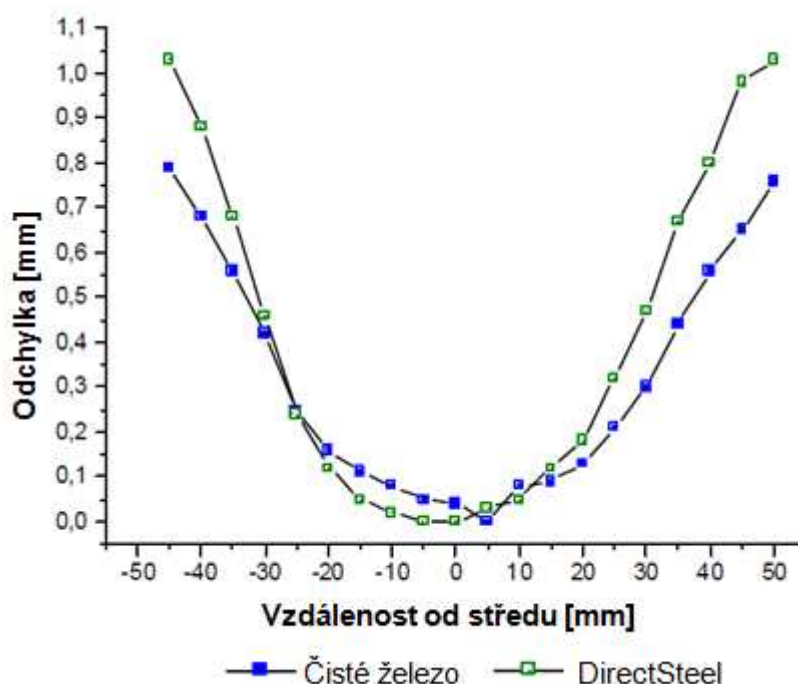


Obr. 4.5 Vliv výšky vzorku na deformaci, tříděný vzor s dlouhým rastrem, skenovací rychlost  $50 \text{ mm.s}^{-1}$ , čisté železo ASC<sup>32</sup>.

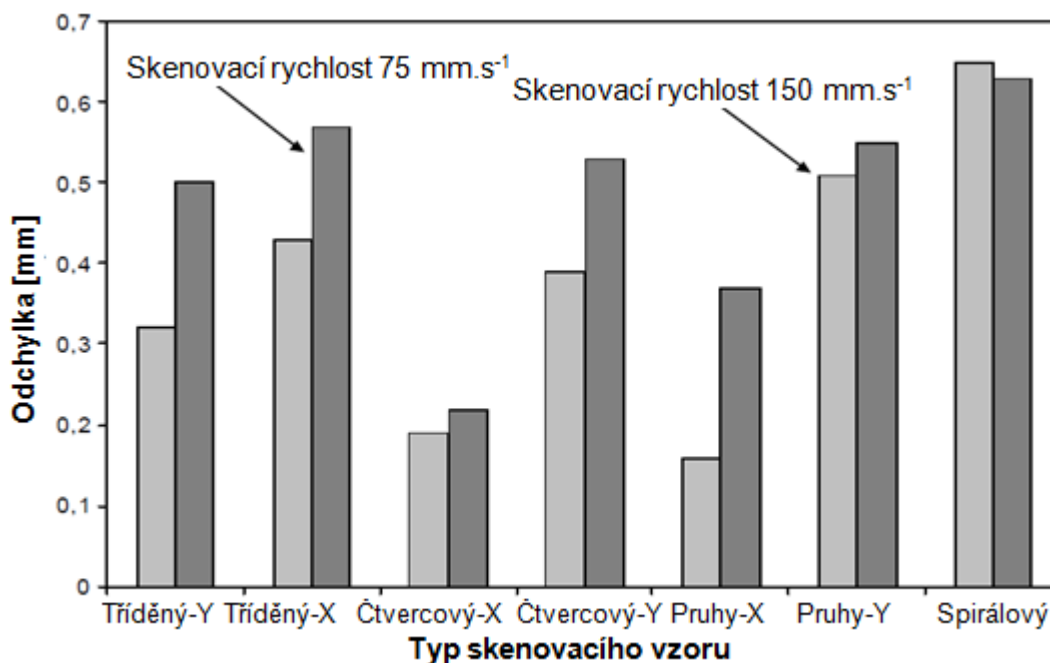
Vliv materiálového složení na deformaci ocelového plechu je znázorněn na Obr. 4.6, kde jsou porovnány výsledky pro čisté železo a prášek na bázi oceli DirectSteel 50-V1. Při slinování prášku s čistého železa se zdá, že má za následek menší deformaci ve srovnání s DirectSteel. Musí se zvážit, že čisté železo vykazuje zhutnění do výše 75 procent teoretické hustoty a DirectSteel až 95 procent teoretické hustoty. Vyšší stupeň zhuštění napomáhá vytváření zbytkových napětí<sup>32</sup>.

Např. na Obr. 4.7 je množství deformace srovnáváno mezi různými typy skenovacích vzorů pomocí různých rychlostí skenování. Zatímco vysoká rychlost skenování jednoznačně vede k významnému snížení zbytkových napětí, tak rovněž snižuje energetické vstupy a zhuštění.

Největší množství vychýlení bylo zjištěno pro spirálový vzor. Rozdíl pro nízké a vysoké rychlosti skenování je poměrně malý. Nejnížší průhyb byl zjištěn pro typ vzoru "čtverec" a "pruhy" s krátkou délkou vektoru (x-směr). Zbytkové napětí výrazně vzrostlo při použití vektoru (y-směr). Rozdíl mezi krátkým a dlouhým rastrovacím vzorem pro typ "tříděný" je poměrně malý<sup>32</sup>.



Obr. 4.6 Vliv složení materiálu na deformaci, tříděný vzor s dlouhým rastrem, skenovací rychlost  $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  <sup>32</sup>.



Obr. 4.7 Vliv skenovacích vzorů na deformaci plechu v různých rychlostech skenování čistého železa (X vzor krátkého rastru, Y vzor dlouhého rastru) <sup>32</sup>.

Z výsledků lze konstatovat, že několik faktorů včetně podmínek zpracování a materiálová hlediska hrají důležitou roli. K minimalizaci zbytkového napětí by měly být zvoleny optimální parametry procesu. Pro různé skenovací vzory byla nejnižší naměřená deformace pro skenovací vzory typu "pruhy" a "čtverce". Nicméně, zlepšení velmi závisí na směru skenovací řady.

### 4.3 Hustota a pórovitost při Direct Metal Laser Sintering

Aby komponenty vykazovaly stejné nebo podobné fyzikální a mechanické vlastnosti jako konvenčně zpracovávané materiály, vyžaduje se zpracování bez dodatečných pojiv<sup>37</sup>. Existuje ovšem řada překážek, které brání úspěchu výroby komponent s vysokou hustotou. Patří mezi ně velké tepelné namáhání materiálu vznikající v důsledku strmého teplotního spádu a především oxidace, která vede ke snížení smáčivosti materiálu a také ke kulovému formování taveniny v důsledku přirozeného povrchového napětí. Protože je DMLS aditivní metodou, snížená smáčivost je významnou překážkou a způsobuje defekty jako je pórovitost, shlukování a štěpení v důsledku účinků povrchového napětí. Proto by měl být vliv procesních parametrů na pórovitost důkladně prozkoumán. Jednotlivé vlivy provozních parametrů jsou popsány v následujícím experimentu.

#### 4.3.1 Experiment

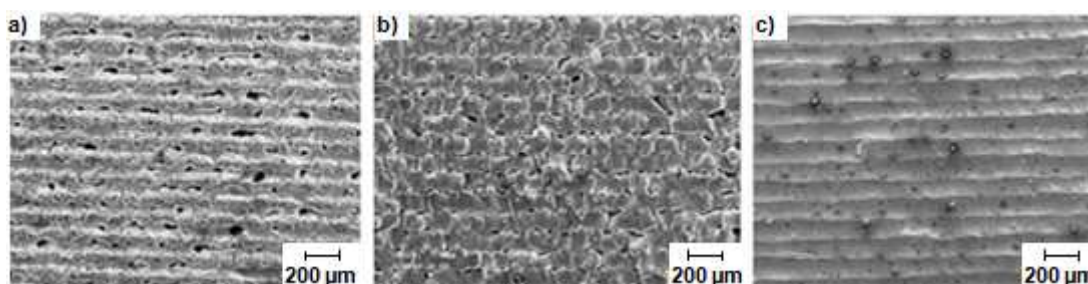
V průběhu studie byla použita plynově atomizovaná korozivzdorná ocel 316 L. Prášek 316 L byl slinutý s různými podmínkami Tab. 4.1. Jedna vrstva vzorku byla připravena v podmínkách výkonu laseru 10 - 20 W, rychlost snímání 2 - 20 mm.s<sup>-1</sup> a snímací roztečí 0,1 mm. Tyto parametry jsou navrženy k posouzení příslušného vlivu výkonu laseru a rychlosti snímání na pórovitost.

Tab. 4.1 Podmínky slinování vzorků<sup>11</sup>.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Výkon laseru [W]</b>	10	12	14	16	18	18	18	18	18	18	18	18
<b>Rychlost snímání [mm.s<sup>-1</sup>]</b>	10	10	10	10	10	2	5	10	15	20	25	30
<b>Snímací rozteč [mm]</b>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<b>Výška vrstvy [mm]</b>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

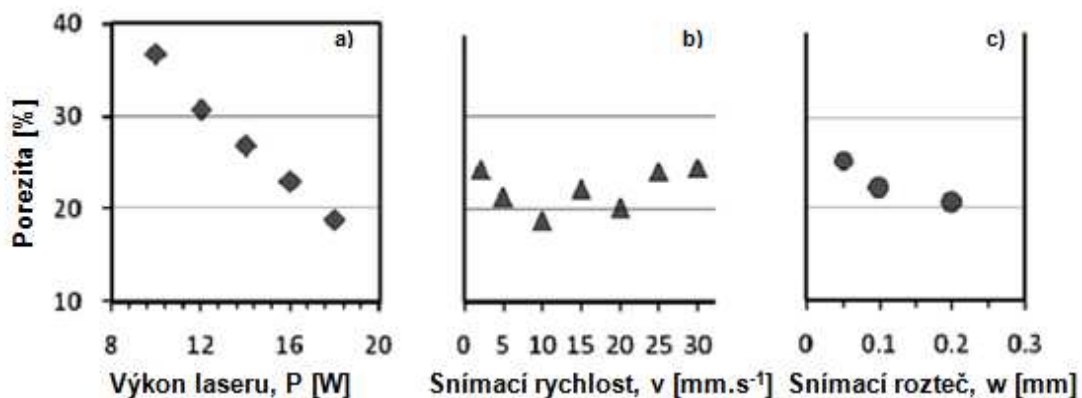
Částečná hustota vzorků byla měřena Archimédovou metodou. Také byl proveden příčný řez vzorků a byla pozorována mikrostruktura na optickém mikroskopu (NIKON, OPTIPHOT 150S).

Obr. 4.8 ukazuje povrchovou morfologii jedné vrstvy. Nicméně když jsou 3D díly stavěny vrstvu po vrstvě, jsou získány zcela odlišné výsledky v důsledku špatného spojení vrstvy.



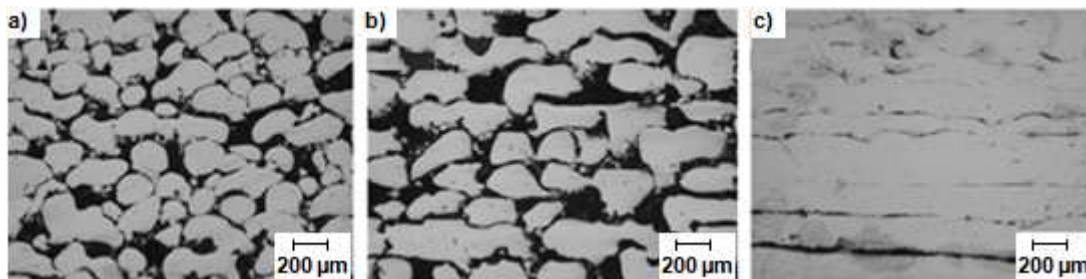
Obr. 4.8. Povrchová morfologie jedné vrstvy prášku slinutého s parametry, Obr. a) 10 W, 5 mm s<sup>-1</sup>, Obr. b) 10 W, 20 mm s<sup>-1</sup> a Obr. c) 12 W, 10 mm s<sup>-1</sup><sup>11</sup>.

Také byly postaveny 3D vzorky s různými kombinacemi provozních parametrů k posouzení vlivu provozních parametrů na pórovitosti. Obr. 4.9 a) znázorňuje pórovitost s různými výkony laseru (P). Graf ukazuje, že pórovitost je nepřímo úměrná výkonu laseru.



Obr. 4.9. Pórovitost versus výkon laseru, rychlost snímání a skenovací rozteč byly použity příslušně parametry a) rychlost snímání  $10 \text{ mm s}^{-1}$  a snímací rozteč  $0,1 \text{ mm}$ , b) výkon laseru  $18 \text{ W}$  a snímací rozteč  $0,1 \text{ mm}$ , c) výkon laseru  $18 \text{ W}$  a rychlost snímání  $10 \text{ mm s}^{-1}$ .

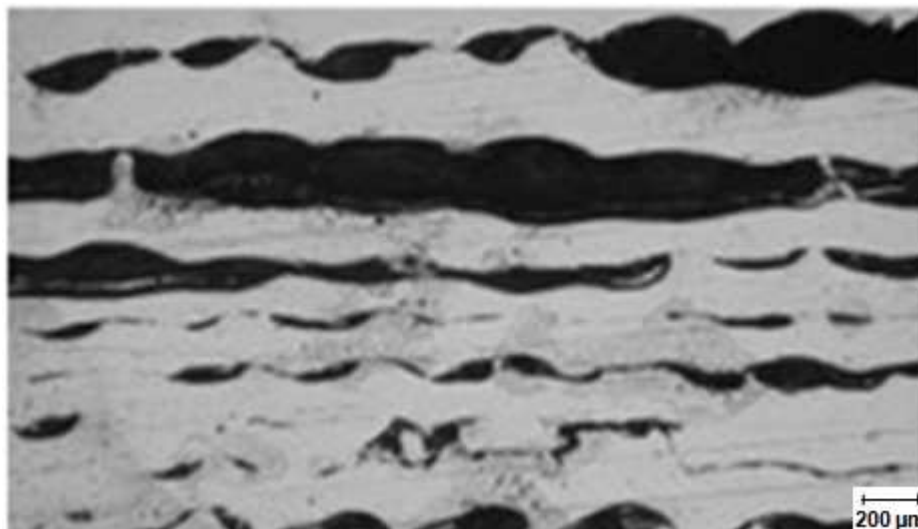
Jestliže je aplikován nízký výkon laseru, v tavenině se tvoří malé shluky a dělají se póry mezi těmito shluky, porézní strukturu Obr. 4.10 a). Pokud se zvyšuje výkon laseru, shluky se zvětší, malá uskupení se spojují s jinými shluky a struktura se stává hustou, hustá struktura Obr. 4.10 b) a c).



Obr. 4.10. Obrázky znázorňující formování a uskupení pórů jak se zvyšuje výkon laseru, výkon laseru a pórovitost jsou v tomto pořadí Obr. a)  $10 \text{ W}$ ,  $36,71\%$ , Obr. b)  $14 \text{ W}$ ,  $26,76\%$  a Obr. c)  $18 \text{ W}$ ,  $18,8\%$ .

Na Obr. 4.9 (a) je velikost seskupení přímo úměrné výkonu laseru, protože pórovitost bezprostředně souvisí s velikostí seskupení. V důsledku toho by pórovitost byla řízena tvorbou seskupení. Nicméně příliš vysoký výkon laseru může způsobit špatné propojení vrstvy a vznik trhlin, obr. 4.11.

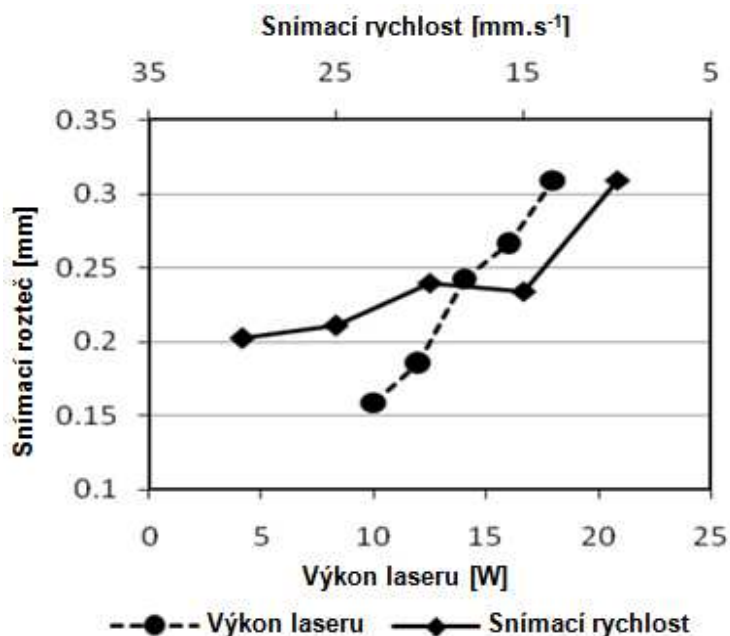
Obr. 4.9 b) ukazuje vliv rychlosti snímání ( $v$ ) na pórovitosti. V porovnání s vlivem výkonu laseru, rychlost snímání tolik neovlivňuje pórovitosti. Jak se snímací rychlost zvyšuje, pórovitost se mírně zvyšuje díky nízké vstupní energii. Při rychlosti snímání  $2 \text{ mm s}^{-1}$  a  $5 \text{ mm s}^{-1}$  nastane vysoká pórovitost včetně vrstvení trhlin. Kontrola pórovitosti rychlostí snímání se v porovnání s výkonem laseru obtížně stanovuje.



Obr. 4.11. Špatné propojení vrstvy díky vysoké hodnotě laserové energie (výkon 18 W, snímací rychlost  $2 \text{ mm s}^{-1}$ , výška vrstvy 0,1 mm, snímací rozteč 0,1 mm)<sup>11</sup>.

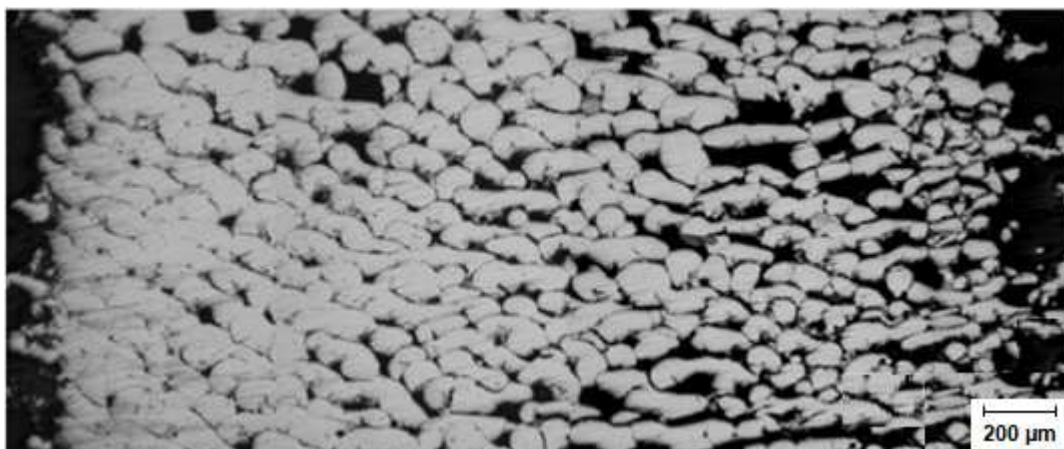
Vliv laserové snímací rozteče ( $w$ ) na pórovitost je zobrazena na Obr. 4.9 c). Je poměrně obtížné diskutovat o vlivu snímací rozteče se třemi body v grafu. Nicméně by bylo užitečné rozhodnout o této hodnotě pro výrobu hustotního materiálu.

Vysoký příkon je obvykle v důsledku nadměrného překrývání skenovacího řádku. Snímací rozteč 0,1 mm má možnost vrstvení trhlin díky širokému překrytí. Snímací rozteč 0,2 mm byla potvrzena, že není vhodná pro nízký výkon laseru (10 nebo 12 W), protože se netvořila přilnavost mezi skenovanými řádky<sup>11</sup>. Z toho důvodu je snímací rozteč 0,15 mm (Obr. 4.12) zvolena jako parametr pro hustotní materiál.



Obr. 4.12. Šířka řádku versus výkon laseru a rychlost snímání<sup>11</sup>.

Na základě předchozích výsledků byl vyroben hustotní materiál a mikrostruktura příčného průřezu, který je znázorněn na Obr. 4.13.



Obr. 4.13. Hustotní gradient materiálu korozivzdorné oceli 316L, výkon laseru 10 - 18 W, snímací rychlost  $10 \text{ mm s}^{-1}$ , výška vrstvy 0,1 mm, snímací rozteč  $0,15 \text{ mm}^{11}$ .

Rychlost snímání a snímací rozteč byla pevná, respektive  $10 \text{ mm s}^{-1}$  a 0,15 mm. Za účelem kontroly pórovitosti (velikosti seskupení), byl použit laserový výkon 10 - 18 W po 2 W krocích na obrázku z pravé strany<sup>11</sup>. Jak bylo uvedeno výše, roztavená lázeň tvoří seskupení a pórovitost klesá s rostoucím seskupením.

Z výsledků lze konstatovat, že nejdůležitějším parametrem je výkon laseru. Rztavený kovový prášek tvoří vyšší seskupení se zvyšující se energií laseru, ale pouze do určité hodnoty, kdy výkon laseru 18 W už prokázal špatné propojení vrstev a vznik trhlin. Ačkoli přesnost povrchu výrobku a rozložení pórů by měla být zlepšena, lze požadovanou hustotu materiálu dosáhnout řízením velikosti seskupení.

#### 4.4 Výrobní zařízení pro metodu Direct Metal Laser Sintering

Je mnoho výrobců strojních zařízení pro aditivní technologie RP, pro metodu DMLS je hlavní zástupcem společnost Electro Optical Systems (EOS), která vyrábí strojní zařízení EOSINT M 270 a tento rok představila nový stroj EOSINT M 280. Popis jednotlivých strojů a technické parametry jsou v následující kapitole.

##### 4.4.1 EOSINT M 280

EOSINT M 280 Obr. 4.14 je aktualizovaná a dále vylepšená verze zařízení EOSINT M 270 Tato verze je vedoucím systémem na trhu aditivní výroby kovových dílů. Systém je volitelně vybaven 200 W nebo 400 W pevnolátkovým laserem. Výkon laseru monitoruje (LPM) a umožňuje ovládání v průběhu stavebního procesu. Spolu s optimalizovaným plynovým systémem, kdy stroj pracuje v obou ochranných atmosférách dusíku a argonu. Zařízení zaručuje optimální a jednotné podmínky zpracování a nejvyšší kvality stavby součástí. Integrovaný proces řízení (IPCM) umožňuje vyšší produktivitu, vyšší kvalitu a větší uživatelskou přívětivost. Tyto funkce jsou tím, co činí systém ideálním výrobním nástrojem pro ekonomickou a optimalizovanou výrobu dílů ve všech fázích životního cyklu výrobku. Technická data jsou uvedena v Tab. 4.2

Obr. 4.14 Zařízení EOSINT M 280<sup>16</sup>.Tab. 4.2 Základní parametry zařízení EOSINT M280<sup>12</sup>.

EOSINT M 280		
Technické údaje	Efektivní pracovní prostor	250 mm x 250mm x 215mm
	Rychlost stavby	2 - 20 mm.s <sup>-1</sup>
	Tloušťka vrstvy	20 - 100 μm
	Typ laseru	YB-vláknový laser, 200 W nebo 400 W
	Optika	F- theta -čočka, vysokorychlostní skener
	Rychlost skenování	až 7,0 m.s <sup>-1</sup>
	Proměnný fokusační průměr	100 - 500 μm
	Proudový zdroj	32 A
	Příkon	Max. 8,5 kW
	Generátor dusíku	standardní
	Přívod stlačeného vzduchu	0,7 MPa, 20 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>
	Přívod argonu	0,4 MPa, 100 l.min <sup>-1</sup>
Rozměry	Zařízení	2200 mm x 1070 mm x 2290 mm
	Doporučený instalační prostor	cca. 4,8 m x 3,6 m x 2,9 m
	Váha	cca. 1250 kg
Příprava dat	Software	EOS RP nástroje, EOSTATE Magics RP
	CAD rozhraní	*.stl volitelný: konvertor pro všechny běžné formáty.
	Síť	Ethernet

#### 4.4.2 EOSINT M270

EOSINT M 270 Obr. 4.15 je zavedený laserově slinovací systém. Jeho pevnolátkový vláknový laser nabízí vysoký výkon a spolehlivost při dlouhé životnosti. Jemná fokusační optika umožňuje vynikající rozlišení detailu a kvalitu, zatímco proměnný průměr fokusace umožňuje zvýšení produktivity a rozsáhlý proces kontroly. Plynotěsná komora nabízí využití ochranné atmosféry. To umožní široký rozsah materiálů od lehkých slitin přes ocele až k superslitinám. Technická data jsou uvedena v Tab. 4.3.



Obr. 4.15 Zařízení EOSINT M 270<sup>19</sup>.

Tab. 4.3 Základní parametry zařízení EOSINT M270<sup>12</sup>.

EOSINT M270		
Technické údaje	Efektivní pracovní prostor	250 mm x 250mm x 215mm
	Rychlost stavby	2 - 20 mm.s <sup>-1</sup>
	Tloušťka vrstvy	20 - 100 μm
	Typ laseru	YB-vláknový laser, 200 W
	Optika	F- theta -čočka, vysokorychlostní skener
	Rychlost skenování	až 7,0 m.s <sup>-1</sup>
	Proměnný fokusační průměr	100 - 500 μm
	Proudový zdroj	32 A
	Příkon	Max. 5,5 kW
	Generátor dusíku	Standardní
	Přívod stlačeného vzduchu	0,7 MPa, 20 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>
Rozměry	Zařízení	2000 mm x 1050 mm x 1940 mm
	Doporučený instalační prostor	cca. 3,5 m x 3,6 m x 2,5 m
	Váha	cca. 1130 kg
Příprava dat	PC	aktuální operačním systémem Windows
	Software	EOS RP nástroje, Magics RP
	CAD rozhraní	*. stl volitelný: konvertor pro všechny běžné formáty.
	Síť	Ethernet

## 4.5 Používané práškové materiály

Je k dispozici mnoho různých materiálů, které nabízejí široké spektrum a požadavky pro výrobní aplikace<sup>12</sup>. Jsou k dispozici i jiné materiály a další materiály se neustále vyvíjí. V následujících kapitolách je stručný popis kovových práškových materiálů a tabulky mechanických a fyzikálních vlastností.

Pokud není uvedeno jinak, uvedené mechanické a fyzikální vlastnosti se vztahují na standardní stavební parametry a zkušební vzorky, které jsou postaveny ve vodorovné poloze. Tyto hodnoty jsou poskytovány pouze pro orientaci a ne jako záruka pro konkrétní použití. Uvedené vlastnosti závisí na stavebních parametrech a použitých strategiích stavby, které mohou být uživatelem změněny podle potřeby<sup>12</sup>. Všechny hodnoty jsou přibližné a opírají se o nejnovější poznatky v této oblasti.

### 4.5.1 Korozivzdorná ocel GP1

EOS korozivzdorná ocel GP1 je legovaná korozivzdorná ocel ve formě jemného prášku, která byla optimalizována především pro EOSINT systémy M 270. Chemické složení odpovídá americké klasifikaci 17-4 PH a evropské 1.4542.

Tento druh oceli se vyznačuje velmi dobrou odolností proti korozi a dobrými mechanickými vlastnostmi, zejména vynikající tažností v laserových aplikacích a je široce používán v různých inženýrských aplikacích.

Součásti vyrobené z EOS korozivzdorné oceli GP1 mohou být obráběny, vyjiskřovány, mikro kuličkovány, leštěny, obráběny a v případě nutnosti povlakovány. S použitím běžných parametrů stavebního postupu jsou mechanické vlastnosti poměrně stejné ve všech směrech<sup>12, 25</sup>.

Typické aplikace:

- strojírenské aplikace včetně funkčních prototypů,
- malé série produktů,
- individualizované výrobky,
- náhradní díly,
- součásti, které vyžadují vysokou odolnost proti korozi,
- součásti vyžadující vysokou pevnost a tvárnost.

Materiálové složení oceli, včetně legujících prvků v hmotnostních procentech je uvedeno v Tab. 4.4. Fyzikální a chemické vlastnosti laserově slinutých součástí jsou uvedeny v Tab. 4. 5.

Tab. 4.4 Materiálové složení oceli GP1<sup>12</sup>.

Cr	Ni	Nb	Cu	Mn	Si	Mo	C
15 - 17,5	3 - 5	0,15-0,45	3 - 5	max. 1,0	max. 1,0	max. 0,5	max. 0,07

Tab. 4.5 Fyzikální a mechanické vlastnosti oceli GP1<sup>12</sup>.

Korozivzdorná ocel GP1				
Geometrické údaje	Min. doporučená tloušťka vrstvy		20 $\mu\text{m}$	
	Typická dosažitelná přesnost [1]	malé součásti	$\pm 20 - 50 \mu\text{m}$	
		velké součásti [2]	$\pm 0,2 \%$	
	Min. tloušťka stěny [3]		0,3 – 0,4 mm	
	Struktura povrchu	po kuličkování	Ra	2,5 – 4,5 $\mu\text{m}$
			Ry	15 – 40 $\mu\text{m}$
	po leštění	Rz	až < 0,5 $\mu\text{m}$ (jemně leštěné)	
Objemová rychlost [4]	Standardní parametry (20 $\mu\text{m}$ vrstvy, plná hustota)		2 $\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	
	Vnitřní parametry jádra (styl povrch a jádro, plná hustota)		4 $\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	
Hustota	Relativní hustota se standardními parametry		cca. 100%	
	Hustota se standardními parametry		7,8 $\text{g/cm}^3$	
Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu	Ve vodorovném směru	1050 $\pm 50 \text{ MPa}$	
		Ve svislém směru	980 $\pm 50 \text{ MPa}$	
		Po odstranění pnutí při 650°C po dobu 1 hod.	cca. 1200 MPa	
	Mez kluzu (Rp 0,2)	Ve vodorovném směru	540 $\pm 50 \text{ MPa}$	
		Ve svislém směru	500 $\pm 50 \text{ MPa}$	
	Tažnost		25 $\pm 5 \%$	
Tvrdość [5]	postavený		cca. 230 HV1	
	broušen a leštěn		cca. 250 – 400 HV1	
Tepelné vlastnosti	Tepelná vodivost	při 20 °C	13 $\text{W/m} \cdot \text{°C}$	
		při 100 °C	14 $\text{W/m} \cdot \text{°C}$	
		při 200 °C	15 $\text{W/m} \cdot \text{°C}$	
		při 300 °C	16 $\text{W/m} \cdot \text{°C}$	
	Koeficient tepelné roztažnosti	od 20 – 600 °C	14 $\times 10^{-6} \text{ m/m} \cdot \text{°C}$	
	Maximální provozní teplota		550 °C	

[1] Na základě uživatelských zkušeností rozměrové přesnosti pro typické geometrie je např.  $\pm 20 \mu\text{m}$  vrstva vhodná pro určité součásti, které mohou být optimalizovány, nebo  $\pm 50 \mu\text{m}$  vrstva při stavbě nového druhu geometrie.

[2] Pro větší součásti může být zlepšena přesnost žiháním k odstranění pnutí při 650°C po dobu 1 hod<sup>12</sup>.

[3] Mechanická odolnost je závislá na geometrii (výška stěny atd.) a používání<sup>12</sup>.

[4] Objemová rychlost je míra rychlosti stavby během laserového záření. Celková rychlost stavby závisí na průměrné objemové rychlosti.

[5] Tvrdość podle Vickerse (HV) měřena dle DIN EN ISO 6507-1<sup>12</sup>.

#### 4.5.2 Korozivzdorná ocel PH1

Korozivzdorná ocel PH1 je legovaná korozivzdorná ocel ve formě jemného prášku, která byla optimalizována především pro EOSINT systémy M 270. Chemické složení vyhovuje složení DIN 1.4540 a UNS S15500<sup>12</sup>.

Tento druh oceli se vyznačuje velmi dobrou odolností proti korozi a vynikajícími mechanickými vlastnostmi, zejména v precipitačně vytvrzeném stavu. Je široce používána v lékařství, letectví a jiných strojírenských aplikacích vyžadující vysokou tvrdost, pevnost a korozní odolnost<sup>12, 25</sup>.

Součásti vyrobené z EOS korozivzdorné oceli PH1 mohou být obráběny, vyjiskřovány, mikro kuličkovány, leštěny a v případě nutnosti povlakovány<sup>12</sup>.

Typické aplikace:

- strojírenské aplikace včetně funkčních prototypů,
- malé série produktů,
- individualizované výrobky nebo náhradní díly,
- součásti, které vyžadují vysokou odolnost proti korozi, atd. a zvláště vysokou tvrdost a pevnost.

Materiálové složení oceli, včetně legujících prvků v hmt. % je uvedeno v Tab. 4.6. Fyzikální a chemické vlastnosti laserově slinutých součástí jsou uvedeny v Tab. 4. 7.

Tab.4.6 Materiálové složení oceli PH1<sup>12</sup>.

Cr	Nb	Ni	Cu	Mn	Si	Mo	C	Fe
14 - 15,5	0,15-0,45	3,5 – 5,5	2,5 – 4,5	max. 1,0	max. 1,0	max. 0,5	max. 0,07	zb.

Tab. 4.7 Fyzikální a mechanické vlastnosti oceli PH1<sup>12</sup>.

Korozivzdorná ocel PH1				
Geometrické údaje	Min. doporučená tloušťka vrstvy		20 μm	
	Typická dosažitelná přesnost [1]	malé součásti	± 20 – 50 μm	
		velké součásti	± 0,2 %	
	Min. tloušťka stěny [2]		0,3 – 0,4 mm	
	Drsnost povrchu	po kuličkování	Ra	2,5 – 4,5 μm
			Ry	15 – 40 μm
	po leštění	Rz	až < 0,5 μm (jemně leštěné)	
Objemová rychlost [3]	Standardní parametry (20 μm vrstvy, plná hustota)		1,8 mm <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	
	Vnitřní parametry jádra (styl povrch a jádro, plná hustota)		3,2 mm <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	
Hustota	Relativní hustota se standardními parametry		cca. 100%	
	Hustota se standardními parametry		7,8 g/cm <sup>3</sup>	

Korozivzdorná ocel PH1				
		Vyrobený stav	Tvrzený stav [5]	
Mechanické vlastnosti [4]	Pevnost v tahu	Ve vodorovném směru	1150 ± 50 MPa	min. 1310 MPa
		Ve svislém směru	1050 ± 50 MPa	min. 1310 MPa
	Mez kluzu ( $R_{p0,2}$ )	Ve vodorovném směru	1050 ± 50 MPa	min. 1170 MPa
		Ve svislém směru	1000 ± 50 MPa	min. 1170 MPa
	Tažnost	Ve vodorovném směru	16 ± 4 %	min. 10%
		Ve svislém směru	17 ± 4 %	min. 10%
Tvrdość [5]		30 – 35 HRC	min. 40 HRC	
Tepelné vlastnosti	Tepelná vodivost	Ve vodorovném směru	13,8 ± 0,8 W/m°C	15,7 ± 0,8 W/m°C
		Ve svislém směru	13,7 ± 0,8 W/m°C	15,8 ± 0,8 W/m°C
	Měrná tepelná kapacita		460 ± 20 J/kg°C	470 ± 20 J/kg°C

[1] Na základě uživatelských zkušeností rozměrové přesnosti pro typické geometrie je např. ± 20 µm vrstva vhodná pro určité součásti, které mohou být optimalizovány, nebo ± 50 µm vrstva při stavbě nového druhu geometrie.

[2] Mechanická odolnost je závislá na geometrii (výšce stěny atd.) a používání<sup>12</sup>.

[3] Objemová rychlost je míra rychlosti stavby během laserového ozáření. Celková rychlost stavby závisí na průměrné objemové rychlosti (související s počtem vrstev) a dalších faktorů<sup>12</sup>.

[4] Mechanické zkoušky podle normy ISO 6892:1998, testovací vzorky postaveny s tloušťkou vrstvy 20 µm<sup>12</sup>.

[5] Rockwell C (HRC), měření tvrdosti dle DIN EN ISO 6508-1<sup>12</sup>.

#### 4.5.3 Vysokopevnostní ocel MS1

Vysokopevnostní ocel MS1 je legovaná vysokopevnostní ocel ve formě prášku, která byla optimalizována především pro zpracování v systémech EOSINT M 270. Její složení odpovídá evropské klasifikaci 1.2709 a německé X3NiCoMoTi 18-9-5<sup>12, 25</sup>.

Tento druh oceli je charakteristický tím, že má velmi dobré mechanické vlastnosti a je snadno tepelně zpracovatelný pomocí jednoduchého tepelného vytvrzení získá vysokou tvrdost a pevnost. Díly postavené z EOS vysokopevnostní oceli MS1 jsou po stavebním procesu snadno vytvrzeny na více než 50 HRC a zpevnění vytvrzením při 490°C po dobu 6 hod. V obou, jak postaveném, tak vytvrzeném stavu mohou být součásti obráběny, vyjiskřovány, svařovány, mikro kuličkovány, leštěny a v případě nutnosti povlakovány<sup>12, 25</sup>.

Typické aplikace:

- vstřikovací formy pro velké zatížení a vložky pro lisování všech běžných termoplastů pomocí standardních parametrů vstřikování s dosažitelnou životností nástroje až milion součástí,
- vstřikovací formy lehkých slitin až pro tisíc součástí,
- přímá výroba součástí pro technické použití,
- funkční prototypy,
- malé série výrobků,
- individualizované výrobky,
- náhradní díly,
- součásti vyžadující zvláště vysokou pevnost a tvrdost<sup>12, 25</sup>.

Materiálové složení oceli, včetně legujících prvků v hmt. % je uvedeno v Tab. 4.8. Fyzikální a chemické vlastnosti laserově slinutých součástí jsou uvedeny v Tab. 4.9 a 4.10.

Tab. 4.8 Materiálové složení oceli MS1<sup>12</sup>.

Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr
17-19	8,5-9,5	4,5-5,2	0,6-0,8	0,05-0,15	≤ 0,5
C	Mn, Si	P, S	Fe		
≤ 0,03	každý ≤ 0,1	každý ≤ 0,01	Zb.		

Tab. 4.9 Fyzikální a mechanické vlastnosti oceli MS1<sup>12</sup>.

Vysokopevnostní ocel MS1				
Geometrické údaje	Min. doporučená tloušťka vrstvy		40 μm	
	Typická dosažitelná přesnost [1]	malé součásti	± 40 – 60 μm	
		velké součásti	± 0,2 %	
	Min. tloušťka stěny [2]		0,3 – 0,4 mm	
	Drsnost povrchu	po kuličkování	Ra	4 – 6,5 μm
			Ry	20 – 50 μm
		po leštění	Rz	až < 0,5 μm (jemně leštěné)
	Po mikrotryskání	Rz	40-60 μm	
Objemová rychlost [3]	Standardní parametry (plná hustota)		3 – 3,6 mm <sup>3</sup> . s <sup>-1</sup>	
Smrštění vytvrzením	teplota vytvrzování 490°C, 6 hod, chlazení vzduchem		0,08%	
Hustota	Relativní hustota se standardními parametry		cca. 100%	
	Hustota se standardními parametry		8,0 – 8,1 g/cm <sup>3</sup>	

Tab. 4.10 Fyzikální a mechanické vlastnosti oceli MS1<sup>12</sup>.

Vysokopevnostní ocel MS1			
		Vyrobený stav	Po vytržení
Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu	1100 ± 100 MPa	1950 MPa ± 100 MPa
	Mez kluzu (Rp 0,2%)	1000 MPa ± 100 MPa	1900 MPa ± 100 MPa
	Tažnost	8% ± 3 %	2% ± 1 %
	Tvrdość [4]	33 - 37 HRC	50 - 54 HRC
	Zkouška rázem v ohybu	45 J ± 10 J	11 J ± 4 J
Hustota testovací kostky má hustotu		8,042 kg/dm <sup>3</sup>	
Tepelné vlastnosti	Tepelná vodivost	15 ± 0,8 W/m °C	20 ± 1 W/m °C
	Měrná tepelná kapacita	450 ± 20 J/kg °C	450 ± 20 J/kg °C
	Maximální provozní teplota	400 °C	400 °C

[1] Na základě uživatelských zkušeností rozměrové přesnosti pro typické geometrie je např. ± 20 µm vrstva vhodná pro určité součásti, které mohou být optimalizovány, nebo ± 50 µm vrstva při stavbě nového druhu geometrie.

[2] Mechanická odolnost je závislá na geometrii (výška stěny atd.) a používání.

[3] Objemová rychlost je míra rychlosti stavby během laserového ozáření. Celková rychlost stavby závisí na průměrné objemové rychlosti (související s počtem vrstev) a dalších faktorů<sup>12</sup>.

[4] Rockwell C (HRC), měření tvrdosti dle DIN EN ISO 6508-1, aby se zabránilo nepřesným výsledkům, měla by se tvrdost měřit na leštěném povrchu<sup>12</sup>.

#### 4.5.4 Slitina niklu IN 718

Slitina niklu IN 718 je na bázi niklu tepelně odolná slitina ve formě jemného prášku, která byla optimalizována pro zpracování v EOSINT systémech M 270. Chemické složení odpovídá N07718 UNS, AMS 5662, AMS 5664, W. Nr 2.4668, DIN NiCr19Fe19NbMo3.

Tento druh precipitačně vytržené chrom-niklové slitiny je charakteristický tím, že má dobrou pevnost až za teplot 700°C a mez únavy. Také vynikající odolnost proti korozi v různých korozních prostředích. Materiál má také vynikající kryogenní vlastnosti a potenciál pro kryogenní aplikace. Jak v postaveném tak i ve vytrženém stavu mohou být součásti obráběny, vyjiskřovány, svařovány, mikro tryskány, leštěny a v případě potřeby povlakovány.

Typické aplikace:

- letecké a pozemní součásti turbínových motorů, aplikace raketových a vesmírných součástí,
- součásti chemického a zpracovatelského průmyslu, ropných vrtů, ropného a plynárenského průmyslu.

Materiálové složení slitiny, včetně legujících prvků v hmt. % je uvedeno v Tab. 4.11. Fyzikální a chemické vlastnosti laserově slinutých součástí jsou uvedeny v Tab. 4. 12.

Tab. 4.11 Materiálové složení slitiny niklu IN 718<sup>12</sup>.

Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Co
50-55	17-21	4,75-5,5	2,8-3,3	0,65-1,15	0,2-0,8	≤ 1,0
Cu	C	Si, Mn	P, S	B	Fe	
≤ 0,3	≤ 0,08	každý ≤ 0,35	každý 0,015	≤ 0,006	Zb.	

Tab. 4.12 Fyzikální a mechanické vlastnosti slitiny niklu IN 718<sup>12</sup>.

Slitiny niklu IN 718				
Geometrické údaje	Min. doporučená tloušťka vrstvy		40 μm	
	Typická dosažitelná přesnost [1]	malé součásti	± 40 – 60 μm	
		velké součásti	± 0,2 %	
	Min. tloušťka stěny [2]		0,3 – 0,4 mm	
	Drsnost povrchu	po kuličkování	Ra	4 – 6,5 μm
Ry			20 – 50 μm	
	po leštění	Rz	až < 0,5 μm (jemně leštěné)	
Objemová rychlost [3]	Standardní parametry (plná hustota)		2 mm <sup>3</sup> . s <sup>-1</sup>	
Hustota	Relativní hustota se standardními parametry		cca. 100%	
	Hustota se standardními parametry		8,0 – 8,1 g/cm <sup>3</sup>	
	<b>Postavený</b>	<b>Po rozpouštěcím žihání a vytvrzení na AMS 5662 [4]</b>	<b>Po rozpouštěcím žihání a vytvrzení na AMS 5664 [5]</b>	
Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu [6]		min. 1276 MPa	min. 1241 MPa
		typ. 980 ± 50 MPa	typ. 1400 ± 100 MPa	typ. 1380 ± 100 MPa
	Mez kluzu (Rp 0,2%) [6]		min. 1034 Mpa	min. 1034 MPa
		typ. 634 ± 50 MPa	typ. 1150 ± 100 MPa	typ. 1240 ± 100 MPa
	Tažnost [6]		min. 12 %	min. 12 %
31 % ± 3 %		typ. 15 % ± 3 %	typ. 18 % ± 3 %	
Youngův modul [6]		170 GPa ± 20 GPa	170 GPa ± 20 GPa	
Tvrdość	cca. 30 HRC (287HB)	cca. 47 HRC (446 HB)	cca. 43 HRC (400 HB)	

[1] Na základě uživatelských zkušeností rozměrové přesnosti pro typické geometrie je např.  $\pm 40 \mu\text{m}$  vrstva vhodná pro určité součásti, které mohou být optimalizovány, nebo  $\pm 60 \mu\text{m}$  vrstva při stavbě nového druhu geometrie.

[2] Mechanická odolnost závisí na geometrii (výška stěny atd.) a použití<sup>12</sup>.

[3] Objemová rychlost je míra rychlosti stavby během laserového ozáření. Celková rychlost stavby závisí na průměrné objemové rychlosti (související s počtem vrstev) a dalších faktorů.

[4] postup tepelného zpracování podle AMS 5662:

- krok 1: rozpouštěcí žíhání při  $980 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 1 hod, ochlazení na vzduch (argon),
- krok 2: Vytvrzení, výdrž na  $720^\circ\text{C}$  po dobu 8 hod, o chlazení na  $620^\circ\text{C}$  v peci ve 2 hodinách, výdrž na  $620^\circ\text{C}$  8 hod, o chlazení na vzduch (argon).

[5] Postup tepelného zpracování podle AMS 5664:

- krok 1: rozpouštěcí žíhání při  $1065 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 1 hod, ochlazení na vzduch (argon),
- krok 2: vytvrzení, výdrž na  $720^\circ\text{C}$  po dobu 8 hod, o chlazení na  $620^\circ\text{C}$  v peci ve 2 hodinách, výdrž na  $620^\circ\text{C}$  8 hod, o chlazení na vzduch (argon)<sup>12</sup>.

#### **4.5.5 Slitina MP1**

Kobalt-chrom MP1 je univerzální superslitina prášku na základě kobaltu, chromu a molybdenu, která byla optimalizována především pro zpracování v EOSINT systémech M 270. Chemické složení slitiny kobalt-chromo MP1 odpovídá složení UNS R31538 vysokouhlíkové Co-Cr-Mo slitině<sup>12, 25</sup>.

Má vynikající mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost apod.), odolnost proti korozi a teplotní odolnost. Podobné slitiny jsou obvykle používány v biomedicínských aplikacích, jako jsou stomatologické a lékařské implantáty a strojní aplikace např. v leteckých motorech<sup>12</sup>.

Plně splňuje požadavky ISO 5832-4 a ASTM F75 pro odlévané implantáty Co-Cr-Mo slitiny, stejně jako požadavky normy ISO 5832-12 a ASTM F1537 pro tvářené implantáty Co-Cr-Mo slitiny. Součásti vyrobené ze slitiny MP1 mohou být obráběny, vyjiskřovány, mikro kuličkovány, leštěny a v případě nutnosti povlakovány<sup>12</sup>.

Typické aplikace:

- prototypy, jednorázové nebo malé série biomedicínských implantátů,
- součásti vyžadující vysoké mechanické vlastnosti při vyšších teplotách ( $500 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) s dobrou korozní odolností, např. turbíny a jiné součásti motorů, řezné součásti atd.
- součásti mající velmi malé objekty jako tenké stěny, čepy, atd., které vyžadují zvláště vysokou pevnost nebo tuhost<sup>12</sup>.

Materiálové složení slitiny, včetně legujících prvků v hmt. % je uvedeno v Tab. 4.13. Fyzikální a chemické vlastnosti laserově slinutých součástí jsou uvedeny v Tab. 4. 14.

Tab. 4.13 Materiálové složení slitiny MP1<sup>12</sup>.

Co	Cr	Mo	Si	Mn	C	Ni	Fe
60 - 65	26 - 30	5 - 7	max. 1,0	max. 1,0	max. 0,16	max. 0,1	max. 0,75

Tab. 4.14 Fyzikální a mechanické vlastnosti slitiny MP1<sup>12</sup>.

Kobalt-chromová slitina MP1				
Geometrické údaje	Min. doporučená tloušťka vrstvy		20 μm	
	Typická dosažitelná přesnost	malé součásti [1]	± 20 – 50 μm	
		velké součásti [2]	± 0,2 %	
	Min. tloušťka stěny [3]		0,3 mm	
	Drsnost povrchu	postavený	Ra	cca. 10 μm
		po leštění	Rz	40 – 50 μm
Objemová rychlost [4]	standardní parametry (bez povrchu a jádra, plné roztavení, plná hustota, max. pevnost)		1,6 mm <sup>3</sup> . s <sup>-1</sup>	
	rychlé parametry povrchu a jádra (plné roztavení, plná hustota)		3,0 mm <sup>3</sup> . s <sup>-1</sup>	
Hustota	Relativní hustota se standardními parametry		cca. 100%	
	Hustota se standardními parametry		8,29 g/cm <sup>3</sup>	
Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu	ve vodorovném směru	1300 MPa ± 50 MPa	
		ve svislém směru	1150 MPa ± 50 MPa	
	Mez kluzu (Rp 0,2%)	ve vodorovném směru	960 MPa ± 50 MPa	
		ve svislém směru	880 MPa ± 50 MPa	
	Tažnost	ve vodorovném směru	11 % ± 2 %	
		ve svislém směru	9 % ± 1 %	
		po izostatickém lisování (HIP)	21 - 24 %	
	Youngův modul	ve vodorovném směru	220 GPa ± 20 GPa	
ve svislém směru		220 GPa ± 20 GPa		
Únanová životnost	ve svislém směru v rozsahu zatížení 0-400 MPa a 20 Hz		cca. 7,2 milionů cyklů	
Tvrdost (DIN EN ISO 6508-1)			35 - 45 HRC	
Tepelné vlastnosti	Tepelná vodivost	při 20 °C	13 W/m °C	
		při 100 °C	18 W/m °C	
		při 200 °C	22 W/m °C	
		při 300 °C	33 W/m °C	
	Koeficient tepelné roztažnosti	od 20 – 500 °C	13,6 x 10 <sup>-6</sup> m/m °C	
		od 500 – 1000 °C	15,1 x 10 <sup>-6</sup> m/m °C	
Maximální provozní teplota			1150 °C	
Rozsah bodu tání			1350 - 1430 °C	

[1] Na základě uživatelských zkušeností rozměrové přesnosti pro typické geometrie je např.  $\pm 20 \mu\text{m}$  vrstva vhodná pro určité součásti, které mohou být optimalizovány, nebo  $\pm 50 \mu\text{m}$  vrstva při stavbě nového druhu geometrie.

[2] Pro větší části může být zlepšena přesnost (post-proces) žíháním k odstranění prnutí, při  $1050^\circ\text{C}$  po dobu 2 hod<sup>12</sup>.

[3] Mechanická odolnost je závislá na geometrii a používání.

[4] Objemová rychlost je míra rychlosti stavby během laserového ozáření. Celková rychlost stavby závisí na průměrné objemové rychlosti.

#### 4.5.6 Hliníková slitina AlSi10Mg

Hliník AlSi10Mg je hliníková slitina ve formě jemného prášku, která byla speciálně optimalizována pro EOSINT systémy M 270. AlSi10Mg je typická licí slitina s dobrou licí vlastností a je používána pro odlitky s tenkou stěnou a složitou geometrií. Má dobré dynamické vlastnosti a je proto používána pro součásti vystavené vysoké zátěži.

Součásti vyrobené ze slitiny hliníku AlSi10Mg mohou být obráběny, drátově řezány a elektrojiskrově obráběny, svařovány, mikro tryskány, leštěny a povlakovány.

Typické aplikace:

- výroba funkčních prototypů, malé výrobní série, zakázková výroba nebo náhradní díly,
- díly, které vyžadují kombinaci dobrých tepelných vlastností s nízkou hmotností jako např. motoristické aplikace.

Chemické složení slitiny v hmt. % je uvedeno v Tab. 4.15. Fyzikální a chemické vlastnosti součástí jsou uvedeny v Tab. 4. 16 a 4.17.

Tab. 4.15 Chemické složení slitiny AlSi10Mg<sup>12</sup>.

Mg	Si	Cu	Mn	Ni	Ti	Zn	Pb	Sn	Fe
0,2-0,45	9,0-11,0	max. 0,05	max. 0,45	max. 0,05	max. 0,15	max. 0,10	max. 0,05	max. 0,05	max. 0,55

Tab. 4.16 Fyzikální a mechanické vlastnosti slitiny AlSi10Mg<sup>12</sup>.

Slitina AlSi10Mg				
Geometrické údaje	Min. doporučená tloušťka vrstvy		30 $\mu\text{m}$	
	Min. tloušťka stěny [1]		0,3 - 0,4 mm	
	Drsnost povrchu	postavený, očištěný	Ra	15 - 19 $\mu\text{m}$
			Rz	96 – 115 $\mu\text{m}$
	Objemová rychlost [2]	po kuličkování	Ra	7 - 10 $\mu\text{m}$
Rz			50 – 60 $\mu\text{m}$	
Hustota	standardní parametry (plná hustota, max. pevnost)		4,8 mm <sup>3</sup> . s <sup>-1</sup>	
	Relativní hustota se standardními parametry		cca. 100%	
	Hustota se standardními parametry		2,68 g/cm <sup>3</sup>	

[1] Mechanická odolnost závisí na geometrii (výška stěny atd.) a použití<sup>12</sup>.

[2] Objemová rychlost je míra rychlosti stavby během laserového ozáření. Celková rychlost stavby závisí na průměrné objemové rychlosti (související s počtem vrstev) a dalších faktorů.

Tab. 4.17 Fyzikální a mechanické vlastnosti slitiny AlSi10Mg<sup>12</sup>.

Slitina AlSi10Mg				
			Postavený	Tepelné zpracování T6 [4]
Mechanické vlastnosti [3]	Pevnost v tahu	ve vodorovném směru		
		ve svislém směru	340 ± 40 MPa	315 ± 20 MPa
	Mez kluzu ( $R_{p0,2}$ )	ve vodorovném směru		
		ve svislém směru	250 ± 15 MPa	260 ± 15 MPa
	Tažnost	ve vodorovném směru		
		ve svislém směru	1,5 % ± 0,5 %	1,2 ± 0,5 %
	Mez únavy [5]	ve vodorovném směru		
		Ve svislém směru	97 ± 7 MPa	93 ± 3 MPa
	Tvrdość [3]		120 ± 5 HBW	112 ± 5 HBW

[3] Zkouška tvrdosti podle Brinella (HB 2.5/62.5) dle DIN EN ISO 6506-1.

[4] Tepelné zpracování T6: rozpouštěcí žíhání 5h/530°C, ochlazení ve vodní lázni, zvýšená teplota vytvrzování 12h/160°C<sup>12</sup>.

[5] Zkouška únavy s testovacím kmitočtem 50 Hz, měření je zastaveno při dosažení 5 milionů cyklů bez porušení<sup>12</sup>.

#### 4.5.7 Titan Ti64

Titan Ti64 je legovaná slitina Ti6ALV4 ve formě jemného prášku, která byla optimalizována především pro zpracování v EOSINT systémech M 270. Titan Ti 64 splňuje požadavky ASTM F1472 týkající se maximální koncentrace nečistot<sup>12</sup>.

Titan Ti 64 je lehká slitina charakteristická tím, že má vynikající mechanické vlastnosti a korozní odolnost v kombinaci s nízkou měrnou hmotností a biokompatibilitou. Tento materiál je ideální pro mnoho vysoce účinných inženýrských aplikací jako např. například v letectví a automobilovém průmyslu a také pro výrobu implantátů biomedicíny<sup>12</sup>. Typické aplikace:

- výroba funkčních prototypů, malé série produktů, nebo náhradní díly,
- součásti vyžadující kombinaci vysokých mechanických vlastností a nízké měrné hmotnosti např. konstrukční součásti motoru v letectví a automobilovém průmyslu,
- biomedicínské implantáty.

Chemické složení slitiny, včetně legujících prvků v hmt. % je uvedeno v Tab. 4.18. Fyzikální a chemické vlastnosti laserově slinutých součástí jsou uvedeny v Tab. 4. 19.

Tab. 4.18 Chemické složení slitiny Ti64<sup>12</sup>.

Mg	Si	Cu	Mn	Ni	Ti	Zn	Pb	Sn	Fe
0,2-0,45	9,0-11,0	max. 0,05	max. 0,45	max. 0,05	max. 0,15	max. 0,10	max. 0,05	max. 0,05	max. 0,55

Tab. 4.19 Fyzikální a mechanické vlastnosti slitiny Ti64<sup>12</sup>.

Slitina Ti64				
Geometrické údaje	Min. doporučená tloušťka vrstvy		30 $\mu\text{m}$	
	Min. tloušťka stěny [1]		0,3 - 0,4 mm	
	Drsnost povrchu	postavený, očištěný	Ra	9 - 12 $\mu\text{m}$
			Rz	40 – 80 $\mu\text{m}$
Objemová rychlost [2]	standardní parametry (plná hustota, max. pevnost)		3,0 mm <sup>3</sup> . s <sup>-1</sup>	
Hustota	Relativní hustota se standardními parametry		cca. 100%	
	Hustota se standardními parametry		4,43 g/cm <sup>3</sup>	
Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu [3]		1150 $\pm$ 60 MPa	
	Mez kluzu ( $R_{p0,2}$ ) [3]		1030 $\pm$ 70 MPa	
	Tažnost [3]		11 $\pm$ 2 %	
	Yongův modul [3]		110 $\pm$ 7 GPa	
	Tvrdość [4]		cca. 400 do 430 HV (41 až 44 HRC)	

[1] Mechanická odolnost závisí na geometrii (výška stěny atd.) a použití<sup>12</sup>.

[2] Objemová rychlost je míra rychlosti stavby během laserového ozáření. Celková rychlost stavby závisí na průměrné objemové rychlosti (související s počtem vrstev) a dalších faktorů<sup>12</sup>.

[3] Podle normy ISO 6892:1998<sup>12</sup>.

[4] Měření tvrdosti dle Vickerse HV podle DIN EN ISO 6507-1<sup>12</sup>.

#### 4.5.8 Direct Metal 20

Direct Metal 20 je velmi jemnozrnný vícesložkový kovový prášek na základě bronzy, který byl vyvinut a optimalizován především pro zpracování v EOSINT systémech M270.

Speciálně vyvinutá prášková směs obsahující rozdílné komponenty, která se rozpíná během stavebního procesu. Částečná korekce smrštění po přirozeném tuhnutí umožňuje dosáhnout velmi vysokou přesnost součástí.

Oblasti postavené s parametry jádra mají porézní strukturu, ale mají dobrou pevnost a zbývající pórovitost může být uzavřena kuličkováním.

Tento materiál je vhodný pro většinu prototypů vstřikovacích nástrojů (DirectTool) a pro mnoho funkčních kovových prototypů (Direct Part). Nabízí velmi vysokou rychlost, takže je také vhodný pro větší nástroje a součásti. Nabízí také široké pole použitelných procesních parametrů, např. široký rozsah dosažitelných mechanických vlastností a rychlostí stavby<sup>12</sup>.

Součásti mohou být obráběny, drátově řezány, svařovány, mikro tryskány, leštěny a v případě nutnosti povlakovány<sup>12</sup>.

Typické aplikace:

- vstřikovací formy a vložky pro lisování až desítek či stovek tisíc součástí standardních termoplastů pomocí,
- přímá výroba funkčních kovových prototypů<sup>12</sup>.

Chemické složení je základní bronzová matrice obsahující Ni. Fyzikální a chemické vlastnosti laserově slinutých součástí jsou uvedeny v Tab. 4. 20.

Tab. 4.20 Fyzikální a mechanické vlastnosti Direct Metal 20<sup>12</sup>.

Direct Metal 20				
Geometrické údaje	Min. doporučená tloušťka vrstvy		30 $\mu\text{m}$	
	Dosažitelná přesnost součásti [1]		$\pm 20 - 50 \mu\text{m}$ ,	
	Přesnost specifikace pro omezení [2]		$\pm (0.07 \% + 50 \mu\text{m})$	
	Min. tloušťka stěny [3]		0,2 mm	
	Drsnost povrchu	po kuličkování	Ra	3 $\mu\text{m}$
			Rz	15 $\mu\text{m}$
		po leštění	Ra	až < 1 $\mu\text{m}$
postavený	Ra	9 $\mu\text{m}$		
	Rz	40 – 50 $\mu\text{m}$		
Objemová rychlost	standardní parametry jádra		25 mm <sup>3</sup> . s <sup>-1</sup>	
	parametry povrchu		9.2 mm <sup>3</sup> . s <sup>-1</sup>	
Hustota	Hustota v oblastech povrchu		7,6 g/cm <sup>3</sup>	
	Hustota v oblastech jádra		6,3 g/cm <sup>3</sup>	
	Zbývající pórovitost (min.) [5]		8 %	
Mechanické vlas.	Pevnost v tahu [6]		400 $\pm$ 60 MPa	
	Mez kluzu ( $R_{p0,2}$ ) [6]		200 $\pm$ 70 MPa	
	Příčná skutečná pevnost [6]		700 $\pm$ 60 MPa	
	Yongův modul		80 GPa	
	Tvrdost [7]		110 HB, 115 HV ( $\cong$ 65 HRB)	
Tepelné vlas.	Koeficient tepelné roztažnosti		18 x 10 <sup>-6</sup> m/m $^{\circ}\text{C}$	
	Tepelná vodivost		30 W/mK	
	Maximální provozní teplota		400 $^{\circ}\text{C}$	

[1] Na základě uživatelských zkušeností rozměrové přesnosti pro typické geometrie je např.  $\pm 20 \mu\text{m}$  vrstva vhodná pro určité součásti, které mohou být optimalizovány, nebo  $\pm 50 \mu\text{m}$  vrstva při stavbě nového druhu geometrie.

[2] Platí pro standardní kvalifikaci součásti a postup<sup>12</sup>.

[3] Mechanická odolnost je závislá na geometrii (výška stěny atd.) a použití<sup>12</sup>.

[4] Objemová rychlost je míra rychlosti stavby během laserového ozáření. Díly jsou postaveny s užitím strategie povrchu a jádra, v některých případech pomocí vnitřního a vnějšího povrchu. Průměrná objemová rychlost pro konkrétní součást je tedy závislá na geometrii. Celková rychlost stavby závisí na objemové rychlosti (související s počtem vrstev) a dalších faktorů<sup>12</sup>.

[5] Zbývající pórovitostí je možno uzavřít kuličkování<sup>12</sup>.

[6] Mechanické vlastnosti včetně pevnosti se může lišit v závislosti na orientaci, podle materiálu a použitých parametrů. Uvedené hodnoty jsou měřeny rovnoběžně ke stavební rovině (X nebo Y směru), což obvykle dává nejlepší vlastnosti<sup>12</sup>.

[7] Tvrdost podle Brinella (BH) měřená dle DIN EN ISO 6506-, zkráceně HBW 2,5 / 62,5. Tvrdost podle Vickerse (HV) měřena dle DIN EN ISO 6507-1. Hodnoty v závorkách jsou převedeny v souladu s DIN 50150, která je použitelná pro ocelolitiny, a proto poskytuje pouze údaj u slinutých materiálů, aby se zabránilo nepřesným výsledkům, měla by se tvrdost měřit na leštěném povrchu<sup>12</sup>.

## 4.6 Dokončovací metody

Postavené součásti se strukturou povrchu přibližně Ra 9  $\mu\text{m}$  mohou být snadno zlepšeny až na Ra 0,025  $\mu\text{m}$ . Je několik možných postupů, které mohou být použity k dosažení požadované struktury povrchu nebo dokončení součásti. Některé procesy jsou zmíněny v následujících podkapitolách.

### 4.6.1 Mechanické leštění

Leštění je pomocí mechanického působení leštících nástrojů, nejčastěji to jsou kotouče. Leštění lze provádět ručně nebo na strojích. K leštěnímu povrchu je přitlačován rychle se točící kotouč s naneseným brusivem, který součást vyleští až do zrcadlového lesku<sup>8</sup>. Dosahuje se vynikajících hodnot drsnosti povrchu, ale celý proces je časově náročný, takže se dosahuje špatné produktivity.

### 4.6.2 Elektrochemické leštění

Základem elektrochemického leštění je anodické rozpouštění výstupků a nerovností povrchu materiálu v elektrolytu při průchodu stejnosměrného proudu. Nástroj (katoda) se většinou vyrábí z olova (nerozpustného v elektrolytu) a musí mít větší plochu, než má obrobek. Podle materiálu obrobku a požadované jakosti obrobené plochy se používají různé elektrolyty<sup>34</sup>. Elektrochemické leštění se uplatňuje zejména při dokončování vnitřních otvorů. Jakost obrobeného povrchu je 40 až 50 % Ra původního povrchu.

#### **4.6.3 Galvanické pokovování**

Cílem galvanického pokovení je vyloučení kovových povlaků chromu, mědi, niklu, zinku a zlata. Zlepšuje vzhledové vlastnosti a korozní odolnost základních materiálů. Princip elektrolýzy. Rozpustná anoda uvolňuje kladné ionty kovu do roztoku, které se na katodě vylučují jako čistý kov. Elektrolyt tvoří roztok soli vylučovaného kovu a vodící soli pro zvýšení elektrické vodivosti<sup>23</sup>.

#### **4.6.4 Kuličkování, tryskání a balotínování**

Jedná se o beztržiskové metody dokončování ploch<sup>8</sup>. Tyto metody jsou založeny na ostřelování povrchu součásti cizími tělesy v proudu stlačeného vzduchu nebo proudu kapaliny. Při tryskání se používají abrazivní zrna z ocelové drtě, syntetického korundu a další materiály. Kuličkování používá kuličky z oceli nebo z litiny, mohou být použity měkké nebo kalené. Pro balotínování se používají skleněné kuličky. Výsledná kvalita povrchu závisí hlavně na tvaru, velikosti, hmotnosti a materiálu působících částic. Dosahovaná struktura povrchu se pohybuje v rozsahu Ra 0,8-1,6.

#### **4.6.5 CNC obrábění**

CNC dokončení umožňuje vysokou kvalitu členitých povrchů při dosažení přesné rozměrové a tvarové tolerance. Využívají se vícerá multifunkční CNC frézovací centra a CNC soustruhy.

### **4.7 Využití metody Direct Metal Laser Sintering**

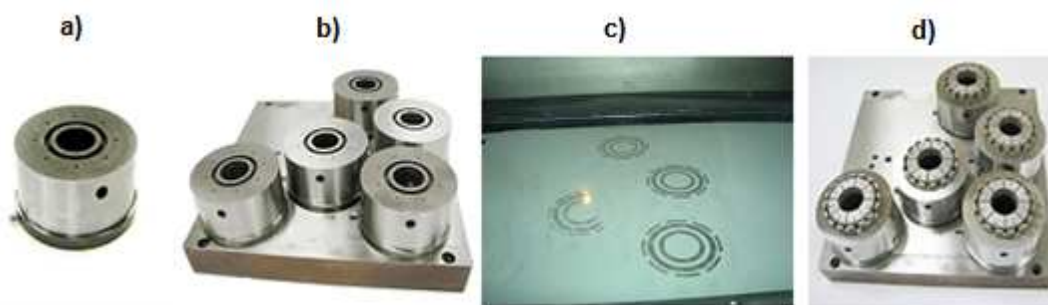
DMLS postupně získává pozici výrobní metody pro rychlou a zároveň přesnou výrobu plně funkčních prototypových dílů nebo finálních výrobků pro rozmanité aplikace. Proces vytváří vysoce odolné, ale přitom jemné komponenty, které nachází využití v mnoha odvětvích, včetně letectví, automobilového, elektronického či obalového průmyslu a medicíny<sup>33</sup>. Pole působnosti technologie DMLS je velice široké a neustále se rozrůstá, vzhledem k tomu, že se rozšiřuje počet materiálů.

#### **4.7.1 Prototypové a malosériové formy**

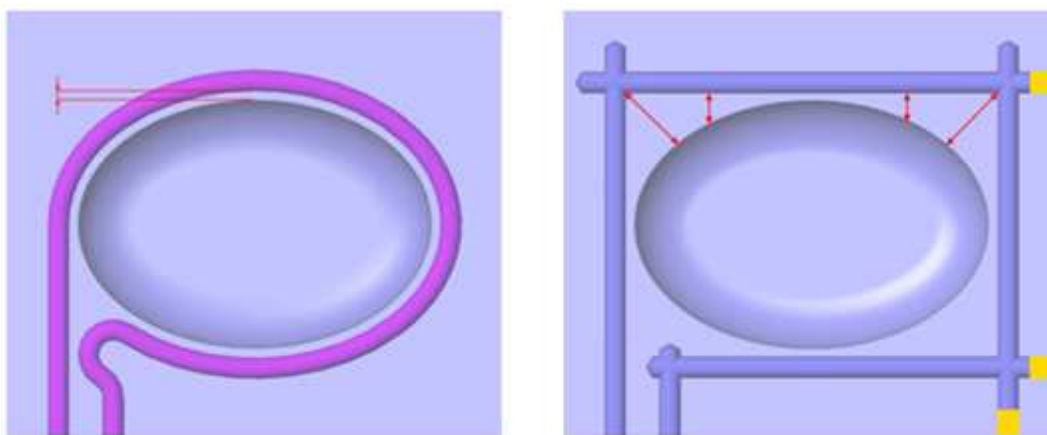
Široké pole uplatnění získává v oblasti výroby forem a nástrojů pro výrobu plastových, keramických či kovových výrobků, prototypové formy, malosériové formy a tvarově složité vložky<sup>33</sup>. Typickým příkladem je forma vyrobená kombinací tradičních výrobních postupů a metody DMLS tzv. hybridní koncepce Obr. 4.16, kde složitější tvary formy jsou vyrobeny metodou DMLS. Většinou to jsou malé vložky a pro ostatní tvary se použije konveční metoda.

#### **4.7.2 Konformní chlazení forem**

Pokud chladicí kanály sledují tvar dutiny formy, jedná se o tzv. konformní chlazení, Obr. 4.17 a Obr. 4.18. Takto vyrobené chladicí kanály poskytují rovnoměrnější rozložení teploty v dutině formy a rychlejší chlazení, což se projeví jako razantní zkrácení výrobního cyklu až o 50%. Konstrukce chladicího okruhu není limitována standardními výrobními postupy a návrh chlazení se optimalizuje s ohledem na výlisek.



Obr. 4.16 Hybridní koncepce technologie DMLS, a) základní vložka vyrobená klasickou metodou, b) upevnění vložek na platformu, c) stavba vrchní části vložky, d) hotové vložky<sup>22</sup>.



Konformní chlazení

Vrtané chlazení

Obr. 4.17 Porovnání konformního chlazení a vrtaných chladících kanálů<sup>20</sup>.



Obr. 4.18 Fyzická forma s konformním chlazením<sup>20</sup>.

#### 4.7.3 Prototypy

Důvody tvorby prototypů je nalezení chyb ve výrobní dokumentaci a chyb v koncepci atd. Technologie DMLS umožní vyrobit tyto prototypy mnohem rychleji a levněji než jiné způsoby.

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této kapitole je proveden rozbor materiálů a vyhodnocení několika mechanických zkoušek na materiálech EOS GP1, EOS MS1 pro EOSINT systémy a materiálů X5CrNiCuNb16-4 (1.4542), X3NiCoMoTi18-9-5 (1.2709) vyrobené klasickou metalurgií.

### 5.1 Experimentální materiály

Popis použitých materiálů při jednotlivých experimentech je v následujících kapitolách.

#### 5.1.1 Korozivzdorná ocel GP1

Korozivzdorná ocel GP1 je legovaná korozivzdorná ocel ve formě jemného prášku. Chemické složení odpovídá americké klasifikaci 17-4 PH a evropské 1.4542<sup>12</sup>. Tento druh oceli se vyznačuje velmi dobrou odolností proti korozi a dobrými mechanickými vlastnostmi, zejména vynikající tažností. Veškeré informace o materiálu jsou uvedené v kapitole 4.6.1.

#### 5.1.2 Korozivzdorná ocel X5CrNiCuNb16-4

Precipitačně vytvrditelná martenzitická ocel stabilizovaná niobem (Nb). Ocel má vynikající korozní odolnost srovnatelnou s austenitickými korozivzdornými ocelmi. Po daném tepelném zpracování je odolná proti mezikrystalové korozi a erozi v korozním prostředí. Materiálový list je uveden v příloze 1. Chemické složení oceli je uvedeno v Tab. 5.1.

Tab. 5.1 Chemické složení oceli [hm. %].

C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni, Cu	Cr	Nb
max. 0,07	max. 0,70	max. 0,15	max. 0,040	max. 0,015	max. 0,60	3,0- 5,0	15,0– 17,0	5x C až 0,45

#### 5.1.3 Nástrojová ocel MS1

Vysokopevnostní ocel MS1 je ocel ve formě prášku. Její složení odpovídá evropské klasifikaci 1.2709 a německé X3NiCoMoTi 18-9-5<sup>12</sup>. Má velmi dobré mechanické vlastnosti a je snadno tepelně zpracovatelná. Pomocí jednoduchého tepelného vytvrzení získá vysokou tvrdost a pevnost. Veškeré informace o materiálu se nachází v kapitole 4.6.3.

#### 5.1.4 Nástrojová ocel X3NiCoMoTi18-9-5

Vysoce pevná martenziticky vytvrditelná ocel pro práci za studena i za tepla, která v porovnání s klasicky kalenými ocelmi nedosahuje svých vlastností po kalení, ale vyloučením intermediálních fází na bázi hliníku. Materiál má téměř nulovou změnu rozměrů při tepelném zpracování. Martenzitická ocel je vhodná pro vysoce namáhané díly pro letecký průmysl a raketovou techniku, tlakové nádoby, ozubená kola, průtlačné nástroje za studena, formy na plasty a nástroje pro tlakové lití (hliníku, zinku). Materiálový list je uveden v příloze 2. Chemické složení oceli je v Tab. 5.2.

Tab. 5.2 Chemické složení oceli [hm. %].

C	Mn	Si, P, S	Cr	Mo	Co	Ni	Ti
max. 0,03	max. 0,15	max. 0,10	max. 0,25	4,5 -5,2	8,5 - 10,0	17,0- 19,0	0,8 – 1,2

## 5.2 Zkoušky mechanických vlastností materiálu

Pro stanovení mechanických vlastností je použita zkouška tahem a měření tvrdosti dle Vickerse.

### 5.2.1 Zkouška tahem

Zkouška jednoosým tahem je základní zkouška, která je svým principem, jednoduchostí a účelností předurčena k tomu, aby se stala nejrozšířenější a nejuznávanější zkušební metodou pro hodnocení mechanických vlastností materiálů<sup>27</sup>.

Zkouška spočívá v deformaci zkušební tyče jednoosým tahovým zatížením obvykle do přetržení pro stanovení jedné nebo více napěťových a deformačních charakteristik zavedených v normě. Obvykle se zkouší při okolní teplotě v rozmezí od 10°C do 35°C, pokud není stanoveno jinak<sup>27</sup>.

### Postup měření při zkoušce tahem

Zkouška tahem je provedena v souladu s normou ČSN EN 10002, ČSN ISO 6892 – 1 a DIN 50 128. Zkušební tyč je upnuta za osazení do závitových čelistí tak, by zatížení působilo v ose zkušební vzorku. Po spuštění stroje se pohybuje střední příčnick a zkušební vzorek je zatěžován silou  $F$ , která je zaznamenávána v závislosti na prodloužení  $\Delta L$ . Před porušením tyče se odejme průtahoměr, aby nedošlo k jeho poškození při následném přetržení vzorku. Po přerušení zkušební vzorku je obvykle zkouška ukončena.

### Zkušební zařízení

Pro tahovou zkoušku je použit zkušební stroj TIRA test 2300 řízený počítačem Obr. 5.1. Skutečné prodloužení zkušebních vzorků je zaznamenáno pomocí průtahoměru, použitý průtahoměr má rozsah měření 0 až 1 mm. Pomocí měřicích břitů je připevněn na zkušební vzorek. Prodloužení vzorku se převede na elektrický signál a současně je snímána zatěžující síla.



Obr. 5.1 Elektronický zkušební stroj TIRA test 2300<sup>38</sup>.

### Zkušební vzorky

Pro tahovou zkoušku jsou použity poměrné zkušební tyče s příčným kruhovým průřezem se závitovými hlavami dle Obr. 5.2, výkres zkušebního tělesa je uveden v příloze č. 3.



Obr. 5.2 Zkušební vzorky

- **Příprava vzorku z klasických materiálů (1.4542, 1.2709)**

Vzorky poměrných zkušebních tyčí není možné odebrat z konkrétní součásti, proto jsou vzorky obrobena klasickým způsobem přímo z hutního tyčového polotovaru o průměru 15 mm.

- **Příprava vzorku z materiálů GP1 a MS1**

Vzorky poměrných zkušebních tyčí na Obr. 5.3 jsou vyrobeny přímo z 3D modelu, který byl exportován do formátu \*.stl. Metodou DMLS na stroji EOSINT M 270 s příslušným přídavkem na obrábění. Některé konkrétní stavební parametry při výrobě zkušebních vzorků přiblíží Tab. 5.3.

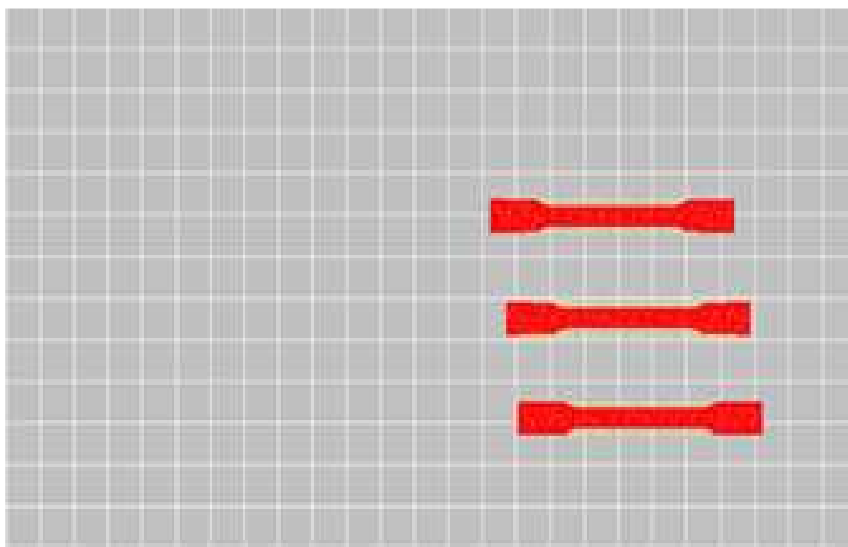


Obr. 5.3 Zkušební vzorky vyrobené metodou DMLS.

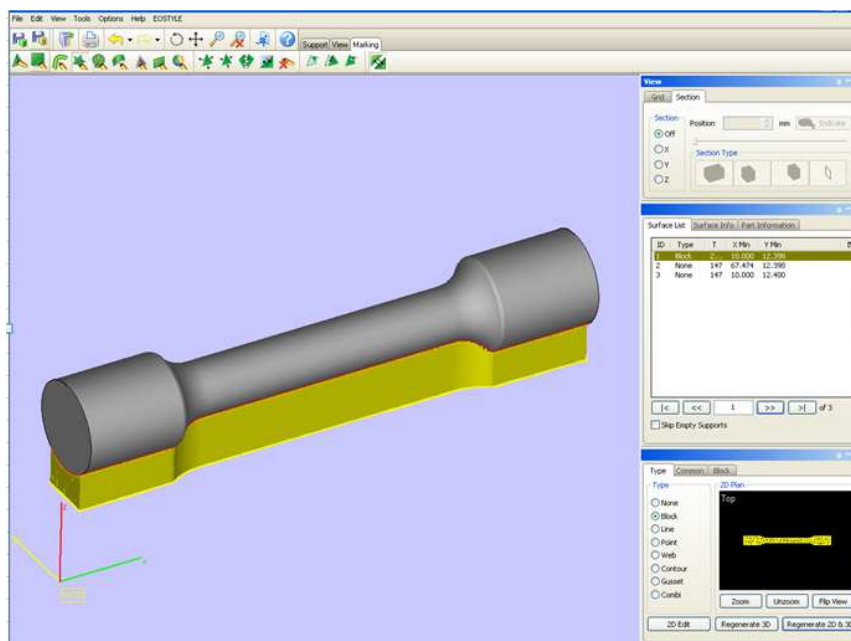
Tab. 5.3 Základní parametry stavby při výrobě vzorků.

Materiál	Tloušťka vrstvy [mm]	Objemová rychlost [mm <sup>3</sup> /s]	Orientace stavby [-]
GP1	0,4	2 – 4 mm <sup>3</sup> /s	Vodorovná (XY)
MS1	0,4	3 – 3,6 mm <sup>3</sup> /s	Vodorovná (XY)

Při stavbě vzorků jsou použity rozdílné parametry pro jádro a povrch vzorku. Obecně platí, že pro materiál MS1 se používá vyšší výkon laseru než pro materiál GP1. Umístění vzorku na vyhřívané platformě (40°C) je uvedeno na Obr. 5.4, na Obr. 5.5 je vidět vytvořená podpora ze stejného materiálu jako zkušební vzorek pro tahovou zkoušku. Proces stavby probíhal v dusíkové atmosféře. Po dokončení stavby vzorky z korozivzdorné oceli GP1 byly vyžihány ke snížení vnitřního pnutí.



Obr. 5.4 Výřez z umístění vzorku na platformě zařízení EOS M270.



Obr. 5.5 Příprava vzorku v systému zařízení EOS M270.

Po výrobě vzorků metodou DMLS následovalo obrobení na univerzálním soustruhu SV 18R na požadované tolerované rozměry a hodnoty Ra uvedené na výkrese.

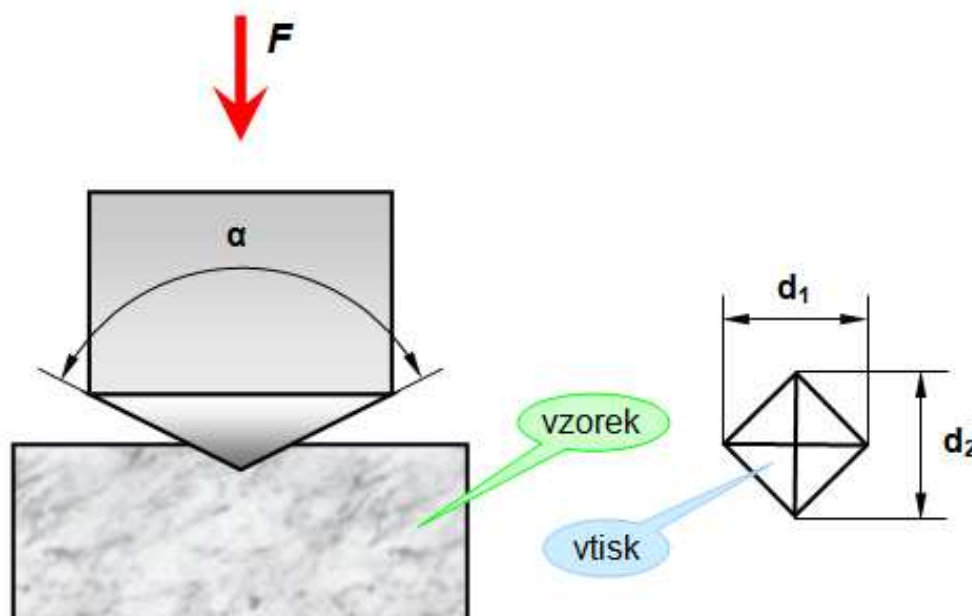
### 5.2.2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Zkouška dle Vickerse je založena na vtláčování vnikajícího diamantového tělíska ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem  $136^\circ$ . Toto tělísko se vtláčuje do povrchu vzorku zkušebními zatížením (Tab. 5.4) směřující kolmo k povrchu, bez rázu a po stanovenou dobu.

Tab. 5.4 Druhy měření tvrdosti podle Vickerse<sup>27</sup>.

Označení	Symbol tvrdosti	Zkušební zatížení F [N]	Zkušební metoda
Zkouška tvrdosti podle Vickerse	HV 5 ÷ HV 100	49,03 ÷ 980,7	ČSN EN ISO 6507/1
Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení	HV 0,2 ÷ < HV 5	1,961 ÷ < 49,07	ČSN EN ISO 6507/2
Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse	< HV 0,2	< 1,961	ČSN EN ISO 6507/3

Po odlehčení se změří úhlopříčka vtisku Obr. 5.6. Tvrdost podle Vickerse je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu vtisku<sup>27</sup>.

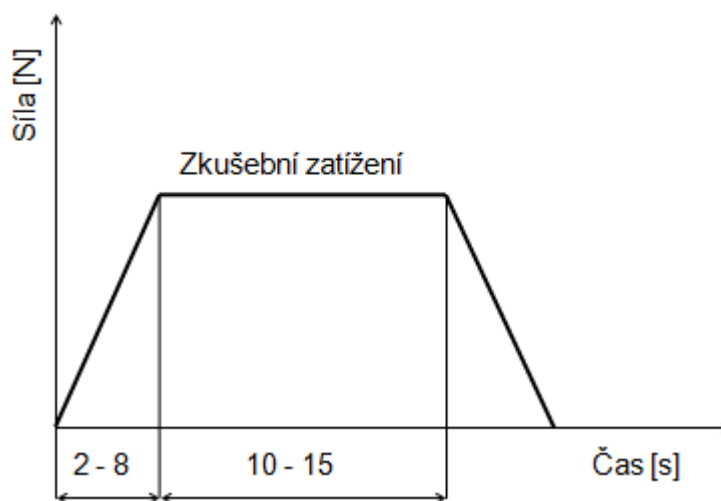


Obr. 5.6 Schéma měření tvrdosti dle Vickerse<sup>27</sup>.

### Postup při měření tvrdosti

Při měření tvrdosti bylo postupováno v souladu s normou ČSN EN ISO 6507. Zkouška proběhla za okolní pokojové teploty ( $20 \pm 5$ ), při zkušebním zatížení 10 HV, jehož časový průběh je možné vidět na Obr. 5.7. Zkušební vzorek je upnut a vypořádán tuhou podložkou, aby nedošlo k pohnutí vzorku. Na vzorcích je provedeno 10 zkušebních vtisků, které jsou jednotlivě vyhodnoceny.

Jelikož se jedná o ocelové vzorky, vzdálenost středu vtisku od okraje je nejméně  $2,5 \times d$  ( $d$  je aritmetický průměr délek úhlopříček  $d_1$  a  $d_2$ ) a vzdálenost středů sousedních vtisků je nejméně  $3 \times d$ .



Obr. 5.7. Časový průběh zkušebního zatížení

### Zkušební zařízení

Pro měření tvrdosti je použit tvrdoměr Zwick 3212 Obr. 5.8, jehož součástí je optický měřicí systém s CCD kamerou (typ TK 45088A4), která spolu se softwarem Zwick / Roell zajišťuje digitální přenos obrazu vtisku na obrazovku a jeho následné vyhodnocení.



Obr. 5.8. Tvrdoměr Zwick 3212.

### Příprava vzorků

Pro měření tvrdosti se použily vzorky ze zkušebních tyčí, na kterých byla provedena zkouška tahem. Odebrané vzorky jsou rovnoběžně s osou zkušebních těles, proto se na vzorcích objevují oblasti přetvoření materiálu.

Především pro přesnější výsledky vyhodnocení tvrdosti, ale také manipulaci při měření je provedena úprava jednotlivých vzorků. Provedená příprava vzorku je shrnuta do několika základních kroků.

#### 1) Preparace vzorku

Vzorky jsou zality za studena do předem připravených papírových formiček. Pro zalití je použita dvousložková metylmetakrylátová licí pryskyřice (Dentacryl). Obě složky je důležité dobře rozmíchat v požadovaném poměru. Doba vytvrzení při okolní teplotě byla přibližně 24 hod.

#### 2) Obrobení

Po vytvrzení se jednotlivé vzorky obráběly na požadovaný tvar pomocí univerzálního hrotového soustruhu SV 18 R. Obrobení proběhlo nízkými řeznými parametry za použití chladicí kapaliny, aby nedošlo k tepelnému a mechanickému ovlivnění vzorků.

#### 3) Broušení

Broušení se provádělo manuálně v různých směrech voděodolnými brusnými papíry (typ 522). Postupovalo se od nejnižší zrnitosti k nejvyšší zrnitosti brusných papírů za použití vody, aby docházelo k odplavení odebraného materiálu. Byly použity následující zrnitosti 400, 800, 1000, 2000.

#### 4) Leštění

Leštění se tak též provádělo ručně leštící pastou na kovové materiály. Pasta se nanasla v tenké vrstvě na jednotlivé vzorky a savou tkaninou se vyleštily.

Výsledkem zmíněného postupu jsou vzorky připravené pro měření tvrdosti dle Vickerse, které je možné vidět na Obr. 5.9.



Obr. 5.9 Vzorky připravené pro měření tvrdosti.

### 5.3 Vyhodnocení mechanických zkoušek

Následující kapitoly popisují vyhodnocení jednotlivých zkoušek a zpracování naměřených hodnot.

#### 5.3.1 Vyhodnocení zkoušky tahem

Z tahové zkoušky jsou vyhodnoceny základní parametry:

- mez pevnosti  $R_m$ ,
- smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ ,
- tažnost  $A$ ,
- kontrakce  $Z$ .

Tyto základní parametry jsou vyhodnoceny pomocí softwaru, který je součástí zkušebního stroje TIRA test 2300. Matematické vztahy základních napěťových a deformačních parametrů pro určení charakteristik tahové zkoušky jsou uvedeny níže.

#### Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ <sup>27</sup>

Je to napětí, při kterém dosáhne trvalá plastická deformace předepsané hodnoty v % počáteční délky  $L_0$  bez zvyšování napětí. Lze ji určit z rovnice 5.1, kde  $F_{p0,2}$  je dána průsečíkem rovnoběžky s lineární částí tahové křivky vedené ve vzdálenosti 0,2 %.  $L_0$  a  $S_0$  je původní průřez zkušebního tělesa.

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [MPa] \quad (5.1)$$

#### Mez pevnosti $R_m$ <sup>27</sup>

Je to maximální dosažené napětí ve smluvním diagramu napětí-deformace vztahující se k počátečnímu průřezu  $S_0$ . Lze ji vyjádřit rovnicí 5.2, kde  $F_{max}$  je maximální dosažená síla při tahové zkoušce a  $S_0$  je původní průřez zkušebního tělesa.

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad [MPa] \quad (5.2)$$

#### Tažnost $A$ <sup>27</sup>

Popisuje deformační schopnost materiálu, kterou lze vypočítat z trvalého prodloužení po přetržení ( $L_u - L_0$ ) vztahující se k počáteční délce  $L_0$  vyjádřené v procentech dle rovnice 5.3.

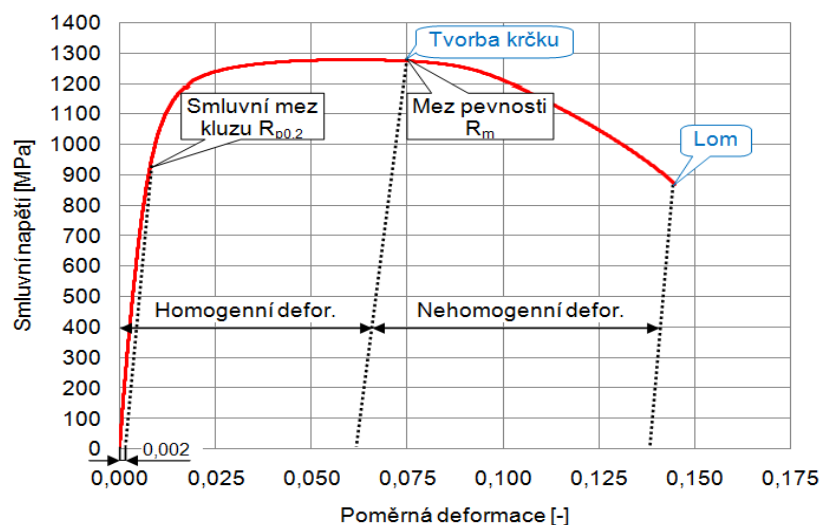
$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad [\%] \quad (5.3)$$

#### Kontrakce $Z$ <sup>27</sup>

Je dána vztahem 5.4, kde vyjadřuje změnu nejmenšího průřezu  $S_u$  po přetržení vzhledem k počátečnímu průřezu  $S_0$  vyjádřenou v procentech. Nejmenší průřez  $S_u$  je v oblasti krčku zkušebního vzorku.

$$Z = \frac{S_u - S_0}{S_0} \quad [\%] \quad (5.4)$$

Na Obr. 5.10 jsou graficky znázorněné základní napěťové parametry.

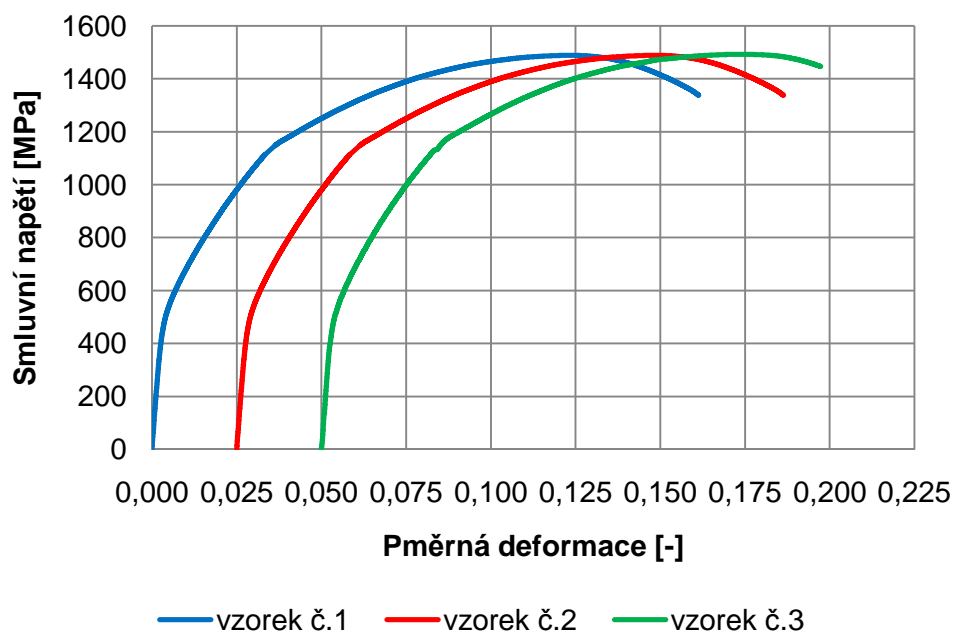


Obr. 5.10 Smluvní diagram napětí-deformace<sup>5</sup>.

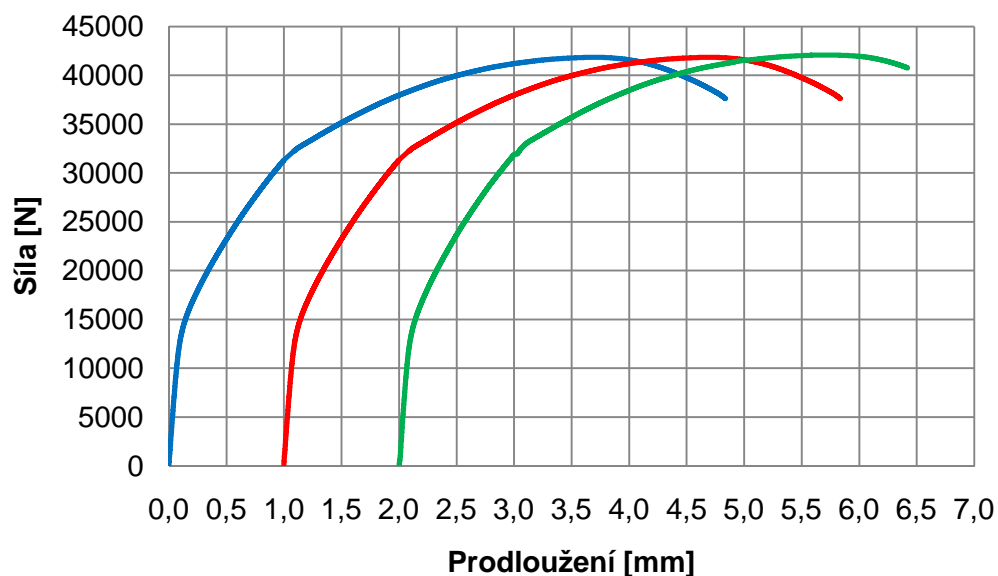
Naměřené hodnoty získané při tahové zkoušce pro materiál GP1 jsou uvedeny v Tab. 5.5. Hodnoty měření byly vyhodnoceny a graficky zpracovány Obr. 5.11 a Obr. 5.12.

Tab. 5.5 Naměřené hodnoty pro materiál GP1.

Číslo vzorku	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$R_m$ [MPa]	A [%]	Z [%]
1	28,18	597,00	41829,68	1484,37	9,67	9,12
2	28,18	548,33	41831,60	1489,40	13,40	24,38
3	28,18	547,53	42059,60	1493,53	12,00	13,52
<b>Průměrná hodnota</b>	28,18	564,29	41906,96	1489,10	11,69	15,67



Obr. 5.11 Smluvní diagram závislosti napětí na deformaci (GP1).



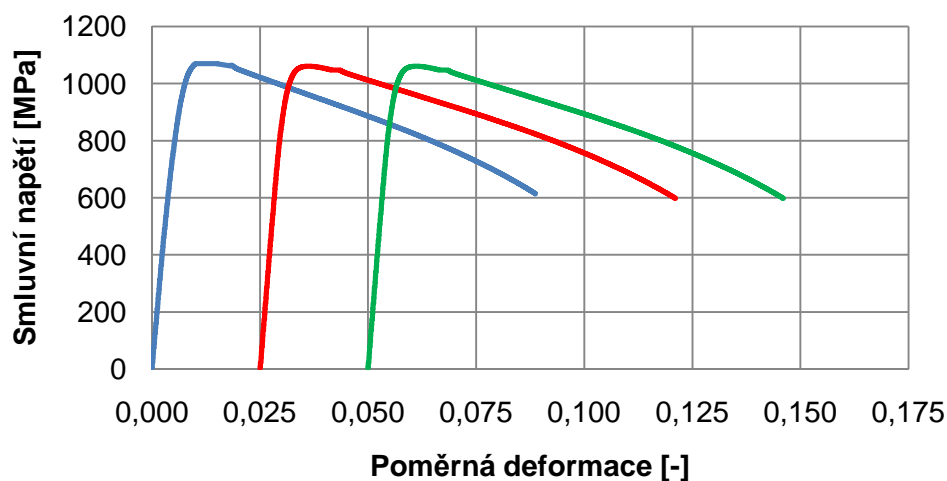
— vzorek č.1    — vzorek č.2    — vzorek č.3

Obr. 5.12 Diagram závislosti síly na prodloužení (GP1).

Naměřené hodnoty získané při tahové zkoušce pro materiál X5CrNiCuNb16-4 (1.4542) jsou uvedeny v Tab. 5.6. Hodnoty měření byly rovněž vyhodnoceny a graficky zpracovány Obr. 5.13 a Obr 5.14.

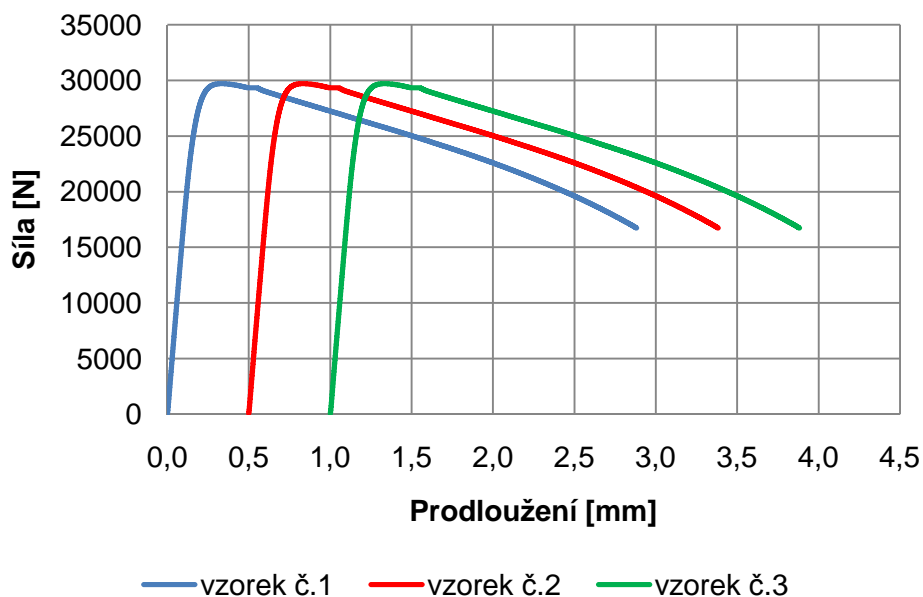
Tab. 5.6 Naměřené hodnoty pro materiál X5CrNiCuNb16-4 (1.4542).

Číslo vzorku	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$R_m$ [MPa]	A [%]	Z [%]
1	28,18	1014,12	30171,10	1077,84	10,77	61,81
2	28,18	1027,24	29704,12	1061,15	11,00	63,03
3	28,18	1018,21	29104,14	1065,15	10,97	62,81
<b>Průměrná hodnota</b>	28,18	1019,86	29659,79	1068,05	10,91	62,55



— vzorek č.1    — vzorek č.2    — vzorek č.3

Obr. 5.13 Smluvní diagram závislosti napětí na deformaci (1.4542).

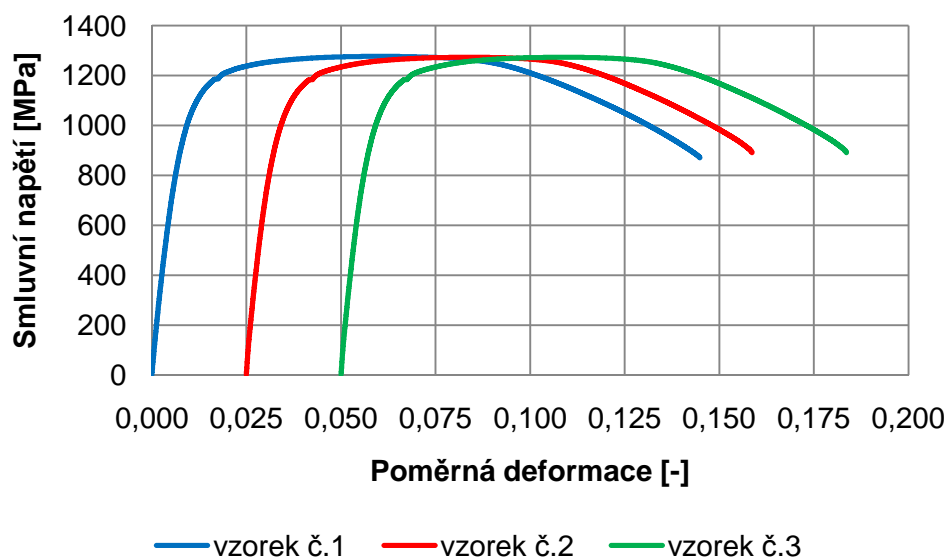


Obr. 5.14 Diagram závislosti síly na prodloužení (1.4542)

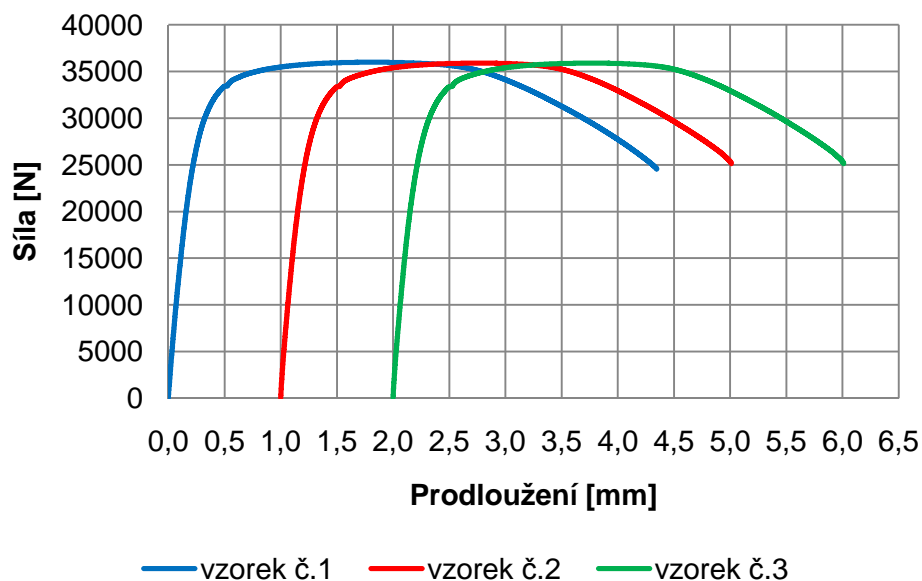
Naměřené hodnoty získané při tahové zkoušce pro materiál MS1 jsou uvedeny v Tab. 5.7. Hodnoty měření byly taktéž vyhodnoceny a zpracovány do grafu Obr. 5.15 a Obr 5.16.

Tab. 5.7 Naměřené hodnoty pro materiál MS1.

Číslo vzorku	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$R_m$ [MPa]	A [%]	Z [%]
1	28,18	920,20	36004,56	1278,62	15,00	52,24
2	28,18	895,36	35885,74	1273,40	14,33	48,72
3	28,18	890,26	35820,54	1271,52	13,50	47,15
<b>Průměrná hodnota</b>	28,18	901,94	35903,61	1274,51	14,28	49,37



Obr. 5.15 Smluvní diagram závislosti napětí na deformaci (MS1).

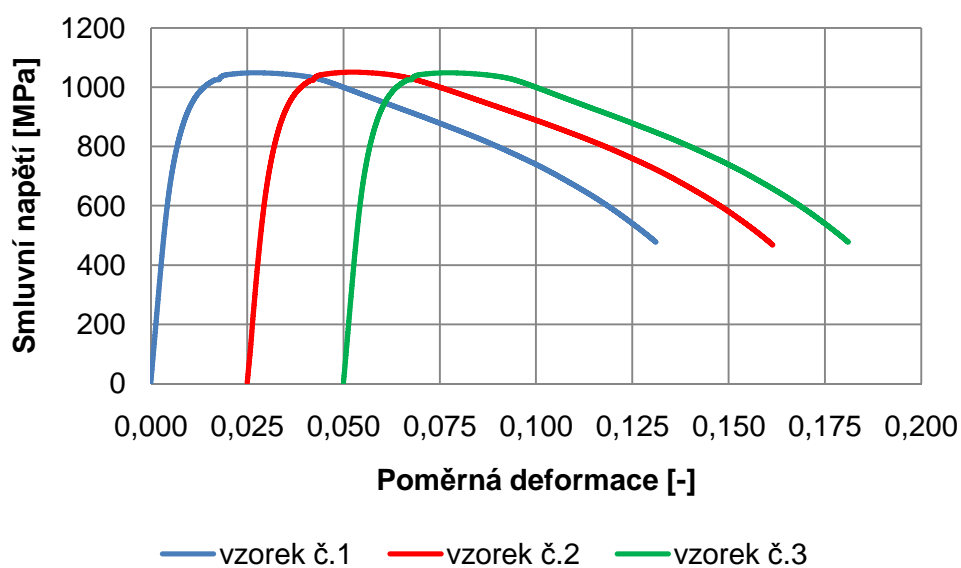


Obr. 5.16 Diagram závislosti síly na prodloužení (MS1).

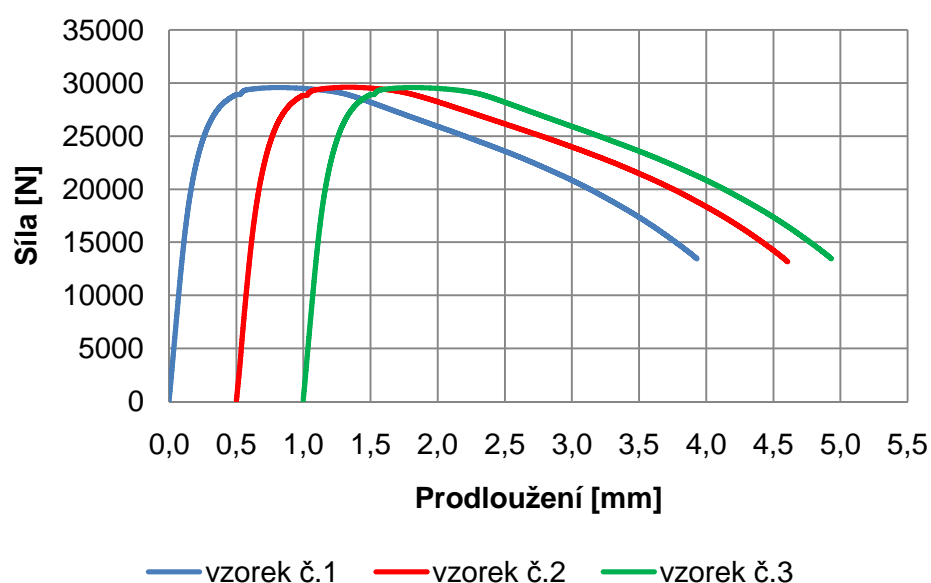
Naměřené hodnoty získané při tahové zkoušce pro materiál X3NiCoMnTi18-9-5 (1.2709) jsou uvedeny v Tab. 5.8. Hodnoty měření byly rovněž vyhodnoceny a zpracovány do grafu Obr. 5.17 a Obr. 5.18.

Tab. 5.8 Naměřené hodnoty pro materiál 1.2709.

Číslo vzorku	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$R_m$ [MPa]	A [%]	Z [%]
1	28,18	841,77	29567,30	1049,22	14,70	73,74
2	28,18	827,64	29618,70	1051,05	15,40	74,41
3	28,18	830,54	29718,73	1052,25	15,94	75,11
<b>Průměrná hodnota</b>	28,18	833,32	29634,91	1050,84	15,35	74,42



Obr. 5.17 Smluvní diagram závislosti napětí na deformaci (1.2709).



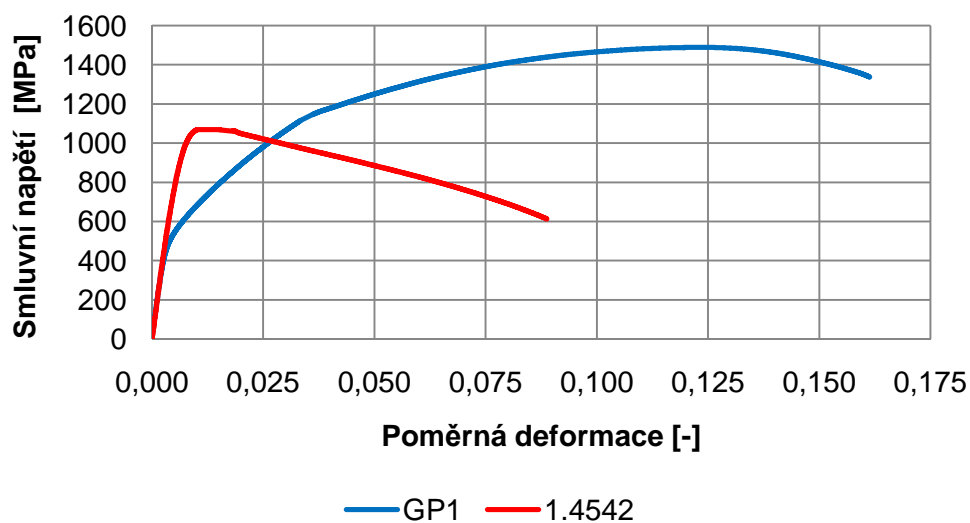
Obr. 5.18 Diagram závislosti síly na prodloužení (1.2709).

### Srovnání materiálů

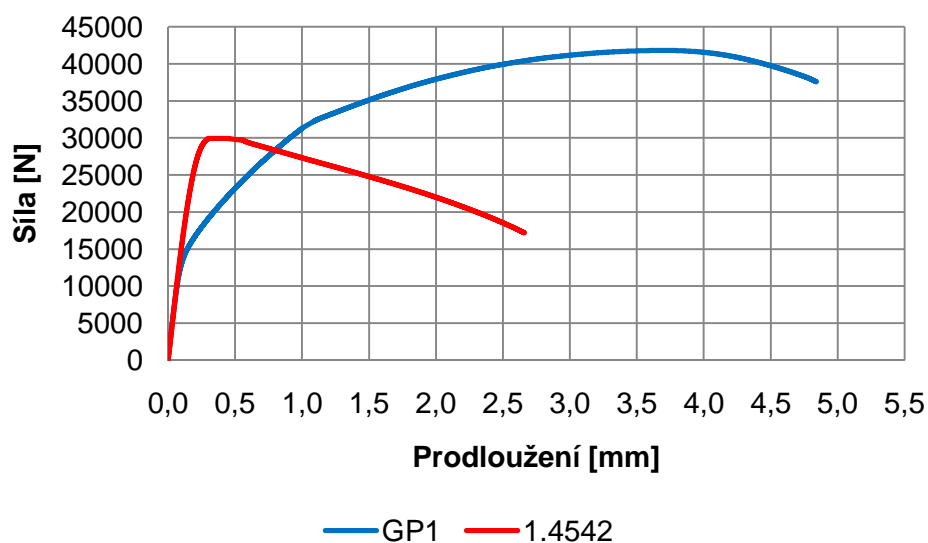
Porovnání materiálu GP1 vyrobeného metodou DMLS a materiálů 1.4542 vyrobené klasickou metalurgií je uvedeno v Tab. 5.9 a na Obr. 5.19 a 5.20. Z křivek tahových diagramů vyplývá, že materiál GP1 vykazuje především vyšší hodnotu meze pevnosti přibližně o 400 MPa. Mez kluzu je téměř o 400 MPa nižší. Kontrakce je o 45 % nižší, hodnoty tažnosti jsou shodné.

Tab. 5.9 Naměřené hodnoty pro materiál 1.4542 a GP1.

Materiál	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$R_m$ [MPa]	A [%]	Z [%]
GP1	28,18	564,29	41906,96	1489,10	11,69	15,67
1.4542	28,18	1019,86	29659,79	1068,05	10,91	62,55



Obr. 5.19 Porovnání smluvních závislosti napětí na deformaci (1.4542,GP1).

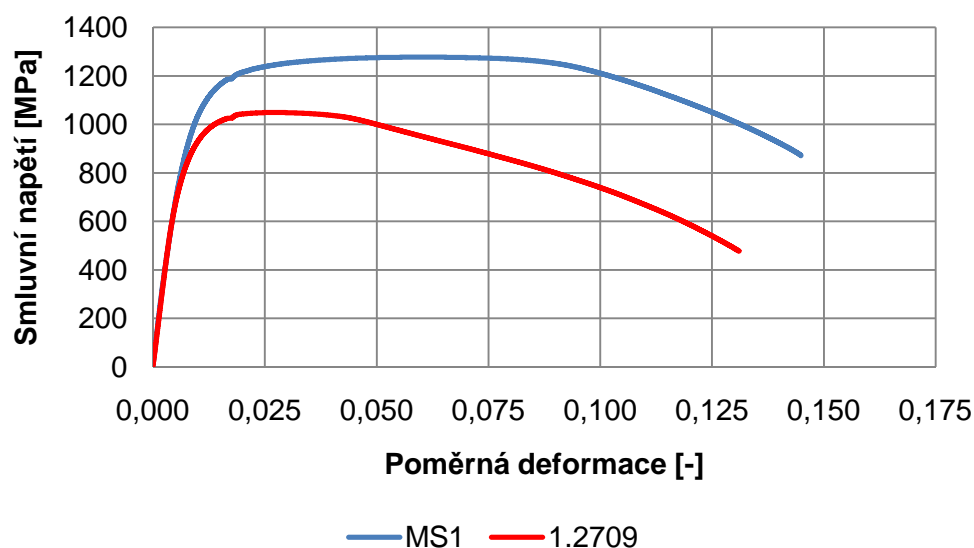


Obr. 5.20 Porovnání závislosti síly na prodloužení (1.4542, GP1).

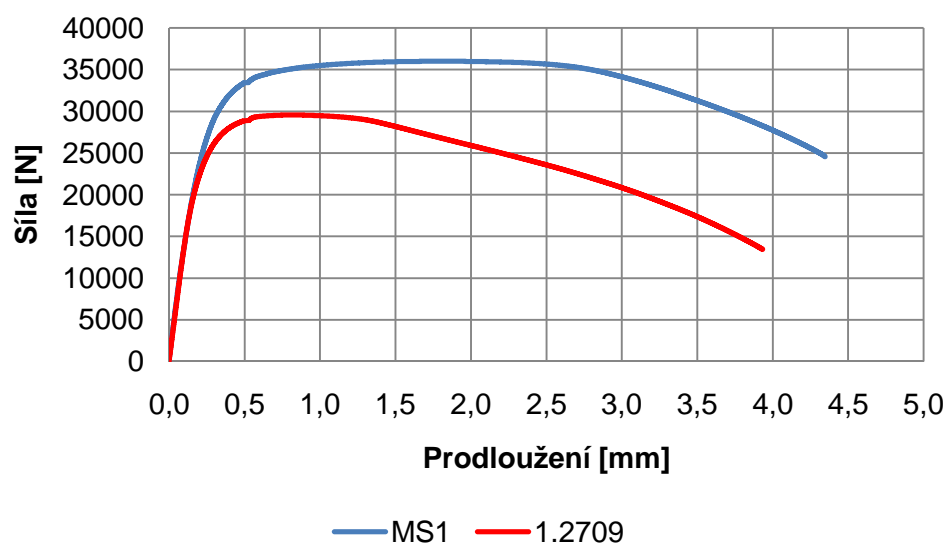
Porovnání materiálu MS1 vyrobeného metodou DMLS a materiálu 1.2709 vyrobené klasickou metalurgií je vidět v Tab. 5.10 a na Obr. 5.21 a 5.22. Z křivek tahových diagramů vyplývá, že materiál MS1 vykazuje vyšší hodnoty sledovaných parametrů tahové zkoušky oproti materiálu 1.2709. Především hodnota meze pevnosti je o 200 MPa větší a meze kluzu o 70 MPa. Kontrakce je o 25 % vyšší, hodnoty tažnosti jsou téměř shodné.

Tab. 5.10 Naměřené hodnoty pro materiál 1.2709 a MS1.

Materiál	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$R_m$ [MPa]	A [%]	Z [%]
MS1	28,18	901,94	35903,61	1274,51	14,28	49,37
1.2709	28,18	833,32	29634,91	1050,84	15,35	74,42



Obr. 5.21 Porovnání smluvních závislostí napětí na deformaci (1.2709, MS1).



Obr. 5.22 Porovnání závislosti síly na prodloužení (1.2709, MS1).

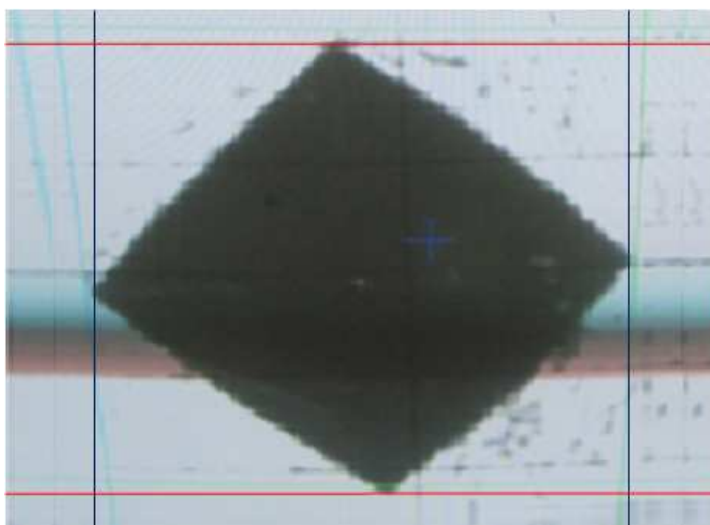
### 5.3.2 Vyhodnocení zkoušky tvrdosti dle Vickerse

Po každém provedeném vtisku jsou na přístroji pomocí optického systému a softwaru, který je součástí zkušebního zařízení, změřeny úhlopříčky  $d_1$  a  $d_2$  Obr. 5.24 a přímo vyhodnocena tvrdost. Také existuje vztah (1.5), pomocí kterého se tvrdost dříve stanovovala.

#### Výpočet tvrdosti dle Vickerse<sup>27</sup>

Je dána vztahem 5.5, kde  $F$  je zkušební zatížení a  $d$  je aritmetický průměr úhlopříček  $d_1$  a  $d_2$ .

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2F \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (5.5)$$



Obr. 5.23 Obrázek vtisku na obrazovce.

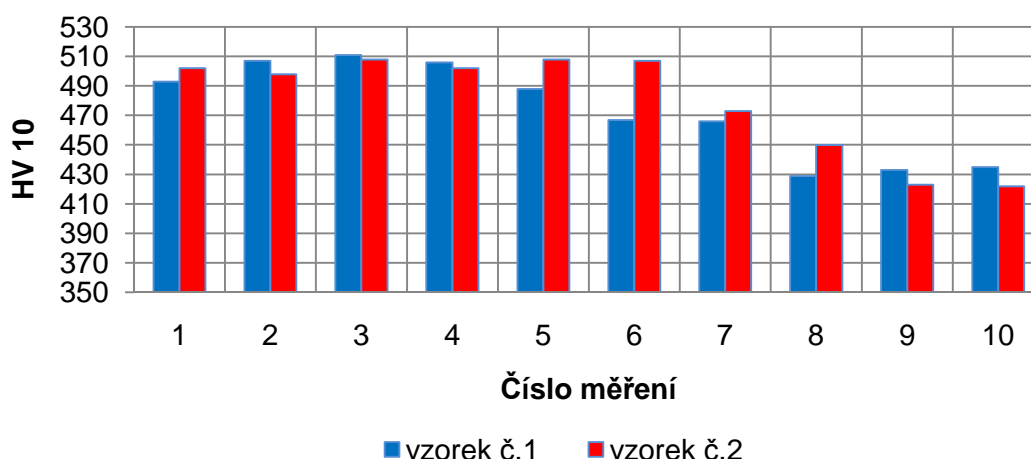
Naměřené hodnoty získané při zkoušce dle Vickerse pro materiál GP1 jsou uvedeny v Tab. 5.11 a Tab. 5.12. Hodnoty měření byly vyhodnoceny a graficky zpracovány Obr. 5.24.

Tab. 5.11 Naměřené hodnoty pro materiál GP1.

Vzorek č. 1										
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>HV10</b>	493	507	511	506	488	467	466	429	433	435
<b>d<sub>1</sub> [μm]</b>	194,0	191,8	190,1	190,1	195,2	199,7	199,7	207,6	205,9	204,8
<b>d<sub>2</sub> [μm]</b>	193,9	190,9	190,9	192,7	194,2	198,8	199,4	207,9	207,9	207,9

Tab. 5.12 Naměřené hodnoty pro materiál GP1.

Vzorek č. 2										
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>HV10</b>	502	498	508	502	525	517	473	450	423	422
<b>d<sub>1</sub> [μm]</b>	194,6	194,6	190,6	191,8	186,1	188,9	198,0	203,1	208,7	209,3
<b>d<sub>2</sub> [μm]</b>	189,6	191,5	191,5	192,7	189,6	189,6	198,2	203,0	209,8	209,8



Obr. 5.24 Graficky zpracované hodnoty tvrdosti HV 10 pro materiál GP1.

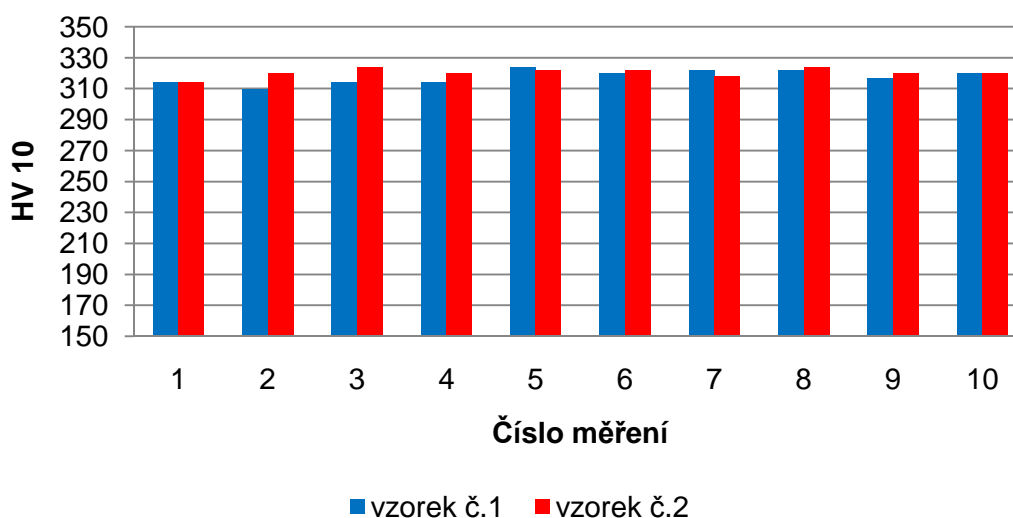
Naměřené hodnoty získané při zkoušce dle Vickerse pro materiál X5CrNiCuNb16-4 (1.4542) jsou uvedeny v Tab. 5.13 a Tab. 5.14. Hodnoty měření byly rovněž vyhodnoceny a graficky zpracovány Obr. 5.25.

Tab. 5.13 Naměřené hodnoty pro materiál X5CrNiCuNb16-4 (1.4542).

Vzorek č. 1										
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>HV10</b>	314	310	314	314	324	320	322	322	317	320
<b>d<sub>1</sub> [μm]</b>	246,7	246,7	244,4	244,4	239,9	239,0	241,0	242,7	245,5	242,3
<b>d<sub>2</sub> [μm]</b>	239,0	242,7	241,5	241,5	241,5	241,4	239,0	239,0	237,8	239,4

Tab. 5.14 Naměřené hodnoty pro materiál X5CrNiCuNb16-4 (1.4542).

Vzorek č. 2										
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>HV10</b>	314	320	324	320	322	322	318	324	320	320
<b>d<sub>1</sub> [μm]</b>	244,8	242,1	239,5	250,0	241,5	239,9	241,7	239,1	242,7	242,1
<b>d<sub>2</sub> [μm]</b>	241,1	239,6	241,9	246,3	238,5	241,5	239,1	241,3	239,0	239,6



Obr. 5.25 Graficky zpracované hodnoty tvrdosti HV 10 pro materiál 1.4542.

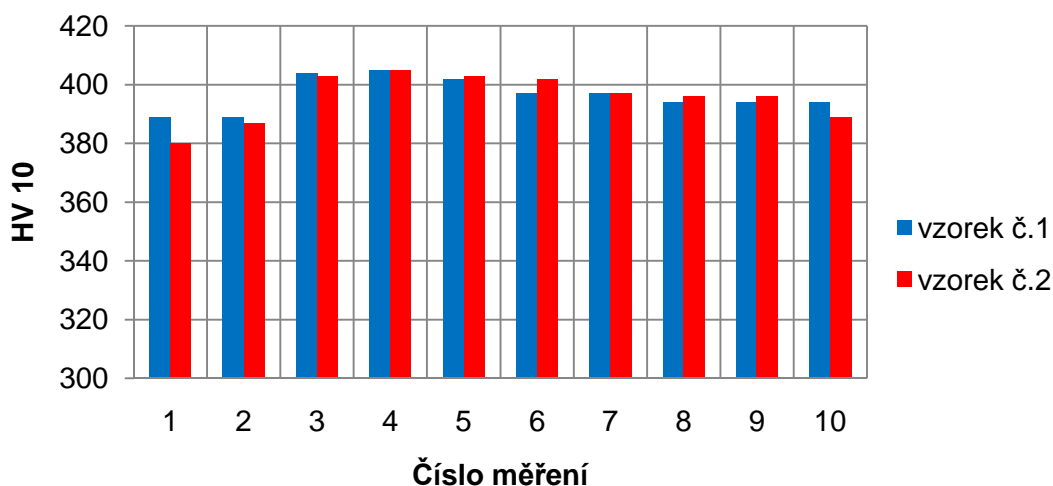
Naměřené hodnoty získané při zkoušce dle Vickerse pro materiál MS1 jsou uvedeny v Tab. 5.15 a Tab. 5.16. Hodnoty měření byly taktéž vyhodnoceny a zpracovány do grafu Obr. 5.26.

Tab. 5.15 Naměřené hodnoty pro materiál MS1.

Vzorek č. 1										
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>HV10</b>	389	389	404	405	402	397	393	394	394	394
<b>d<sub>1</sub> [μm]</b>	218,4	218,4	212,1	209,3	213,5	216,1	219,5	216,1	216,1	216,1
<b>d<sub>2</sub> [μm]</b>	218,3	218,3	213,4	211,8	215,9	215,9	215,9	217,7	217,7	217,7

Tab. 5.16 Naměřené hodnoty pro materiál MS1.

Vzorek č. 2										
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>HV10</b>	380	387	403	405	403	402	397	396	396	389
<b>d<sub>1</sub> [μm]</b>	222,3	218,4	213,8	211,6	211,6	213,6	215,5	216,1	216,1	216,1
<b>d<sub>2</sub> [μm]</b>	219,5	219,5	215,2	209,1	213,4	215,3	216,5	216,5	216,5	220,7



Obr. 5.26 Graficky zpracované hodnoty tvrdosti HV 10 pro materiál MS1.

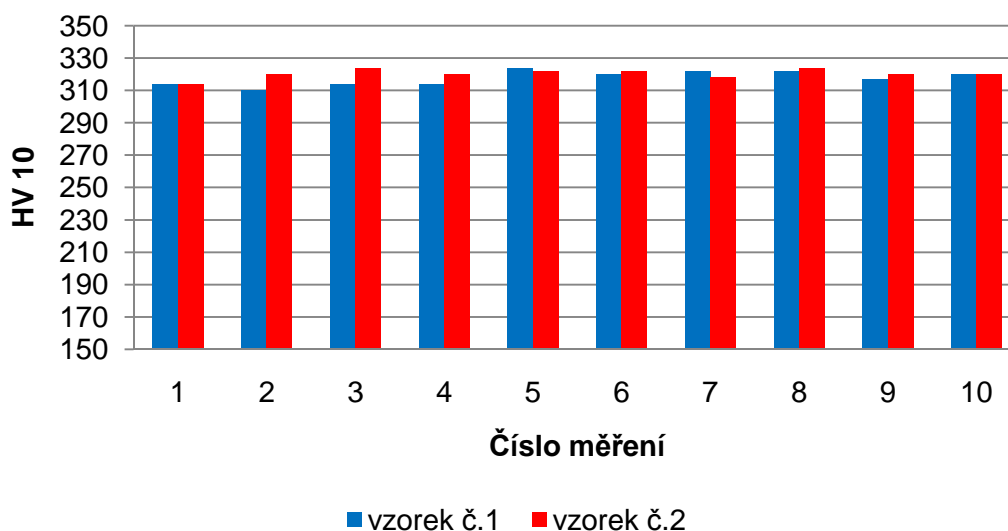
Naměřené hodnoty získané při zkoušce dle Vickerse pro materiál 1.2709 jsou uvedeny v Tab. 5.17 a Tab. 5.18. Hodnoty měření byly taktéž vyhodnoceny a zpracovány do grafu Obr. 5.27.

Tab. 5.17 Naměřené hodnoty pro materiál 1.2709.

Vzorek č. 1										
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HV10	334	323	323	331	326	329	331	332	323	335
d <sub>1</sub> [μm]	235,9	240,4	239,3	236,5	238,7	237,6	235,9	237,6	241,1	235,1
d <sub>2</sub> [μm]	228,7	239,0	236,6	237,2	238,4	237,2	237,2	234,8	237,8	228,5

Tab. 5.18 Naměřené hodnoty pro materiál 1.2709.

Vzorek č. 2										
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HV10	335	323	321	331	325	326	331	328	321	331
d <sub>1</sub> [μm]	235,2	240,2	239,8	235,5	238,9	236,6	236,9	237,6	242,1	235,9
d <sub>2</sub> [μm]	228,6	238,4	236,6	237,6	238,8	237,1	238,9	237,2	238,8	228,7



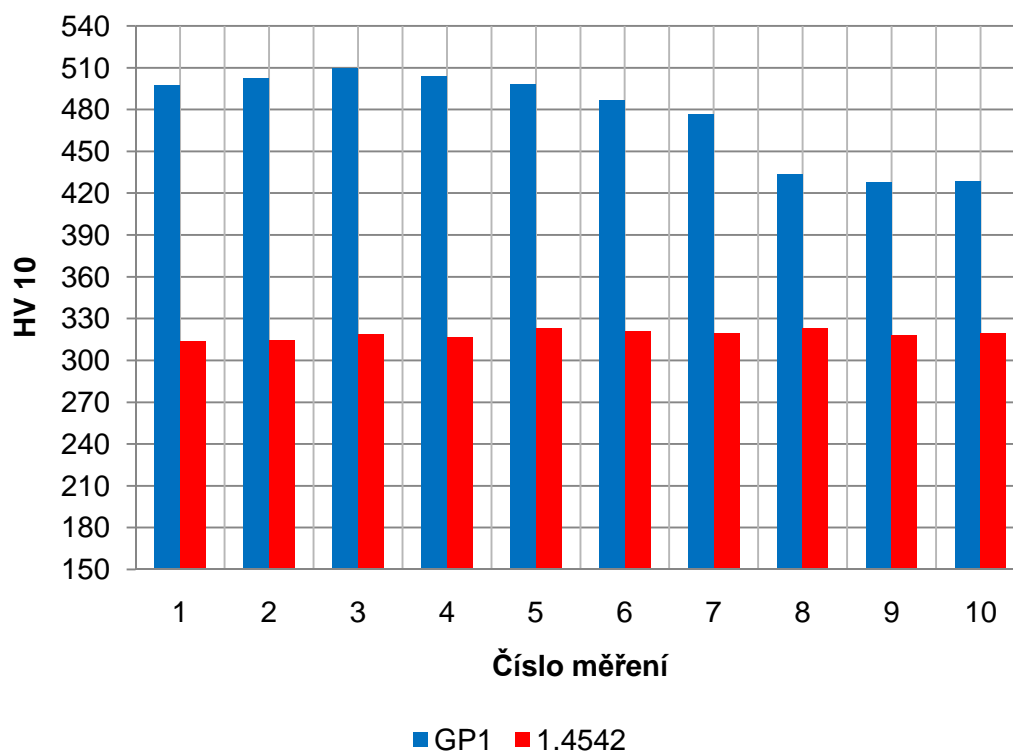
Obr. 5.27 Graficky zpracované hodnoty tvrdosti HV 10 pro materiál 1.2709.

### Srovnání materiálů

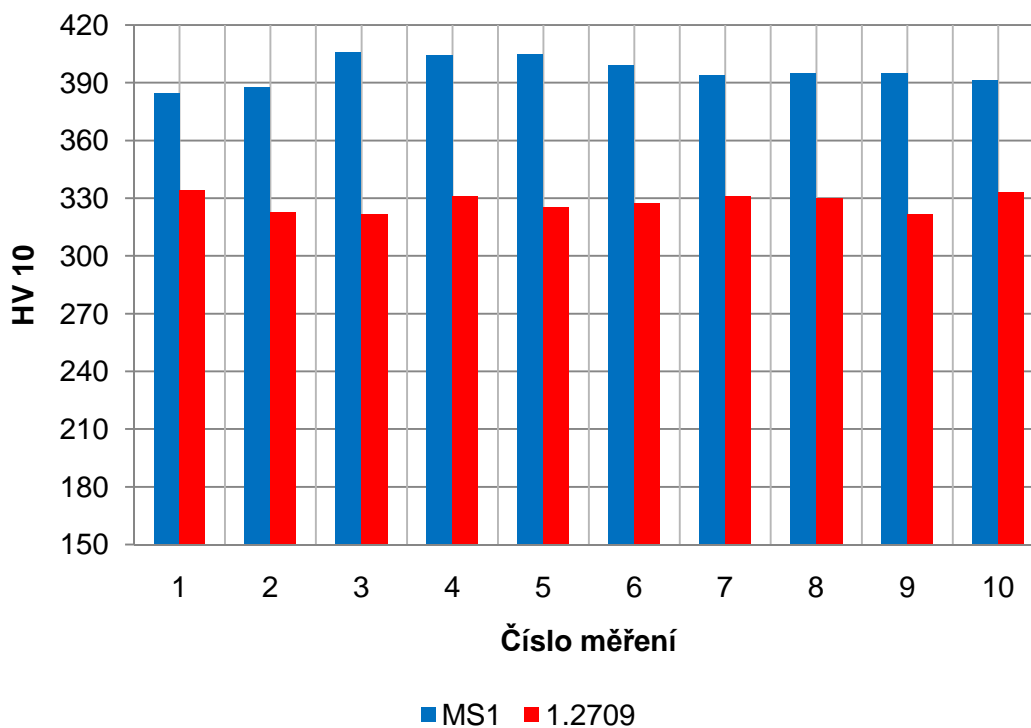
Porovnání tvrdosti materiálu GP1 a MS1 vyrobených metodou DMLS a materiálů vyrobených standardním způsobem je na Obr. 5.28 a Obr. 5.29.

Z grafu pro srovnání materiálu GP1 a 1.4542 je patrný jednoznačný nárůst tvrdosti v deformované (zpevněné) části vzorku materiálu GP1 oproti vzorku z materiálu 1.4542, kde hodnoty tvrdosti jsou téměř konstantní v celé délce vzorku. Pro stanovení skutečné tvrdosti je důležité, zaměřit se na nedeformovanou část vzorku, kde hodnoty tvrdosti mat. GP1 jsou přibližně o 60 HV vyšší.

Z grafu pro srovnání materiálu MS1 a 1.2709 lze konstatovat, že hodnoty tvrdosti jsou téměř konstantní v celém vzorku pro oba materiály. Pro stanovení skutečné tvrdosti se přesto hodnoty porovnají v nedeformované hlavě zkušební vzorku, kde tvrdosti mat. MS1 jsou přibližně o 60 HV vyšší.



Obr. 5.28 Porovnání hodnot tvrdosti HV 10 materiálu GP1 a 1.4542.



Obr. 5.29 Porovnání hodnot tvrdosti HV 10 materiálu MS1 a 1.2709.

## 5.4 Metalografická analýza

Kapitola obsahuje přípravu vzorků. Stručný popis světelné mikroskopie, elektronové mikroskopie a obrazové analýzy.

### 5.4.1 Příprava vzorků

Odebrání vzorků proběhlo standardním způsobem ze zkušebních tyčí pro tahovou zkoušku tak, aby nedošlo k tepelnému a mechanickému ovlivnění. Z tyčí se odebrali vzorky v kolmém a podélném směru v oblasti hlavy a dřívku. Postup je shrnut do několika následujících kroků.

#### 1) Preparace

Preparace se uskutečnila na lisovacím zařízení firmy Leco PR - X4 Obr. 5.30 metodou lisování za tepla. Vzorky se umístily na píst tepelné komory a zasypaly daným množstvím Dentacrylu. Lisování probíhalo za zvýšené teploty (cca. 180°C) a tlaku p řibližně po dobu 10 minut.



Obr. 5.30 Lisovací zařízení firmy Leco a zalisované vzorky.

#### 2) Broušení

Broušení vzorků proběhlo za mokra na materiálografické brusce ABRAMIN od firmy STRUES Obr. 5.31 pomocí brusných papírů s částicemi SiC v označených zrnitostích 120, 220, 320, 600, 1000, 2400, 4000. Podle kvality povrchu vzorků je zvolena nejnižší zmíněná zrnitost, následně se postupuje k papírům s nejvyšší zrnitostí. Broušení trvalo přibližně 2 minuty.



Obr. 5.31 Materiálografická bruska a držák vzorků.

#### 3) Leštění

Mechanické leštění se provádí na stejném zařízení pomocí leštících past s částicemi diamantu nanesené na leštícím plátně. Doba leštění je 5 minut. Poté následovalo mechanicko-chemické leštění pomocí speciálního kotouče a suspenze OP-S<sup>15</sup>.

### 5.4.2 Světelná mikroskopie

Světelná mikroskopie je základní metoda pro studium mikroskopických předmětů a jejich struktur tím, že poskytuje zvětšený obraz zkoumaného předmětu. Je založena na zákonech optiky, k zobrazení a vyhodnocení struktury je použito viditelné světlo o vlnové délce 0,35 až 0,75  $\mu\text{m}$ . Světelný mikroskop se skládá ze dvou hlavních částí, objektivu a okuláru. Objektiv je soustava čoček umístěných poblíž pozorovaného předmětu<sup>3</sup>. Paprsky dopadající na předmět jsou odraženy do objektivu kde vytváří skutečný zvětšený převrácený obraz. Okulárem pozorujeme tento obraz jako lupou<sup>39</sup>. Pozorujeme zvětšený neskutečný převrácený obraz předmětu<sup>3</sup>.

### 5.4.3 Elektronová rastrovací mikroskopie

Elektronový rastrovací mikroskop umožňuje dosáhnout až statisícinásobného zvětšení. Elektronová mikroskopie pracuje na principu zobrazení pomocí svazku urychlených elektronů urychlovacím napětím. Elektrony primárního svazku se emitují ze žhaveného Wolframového vlákna.

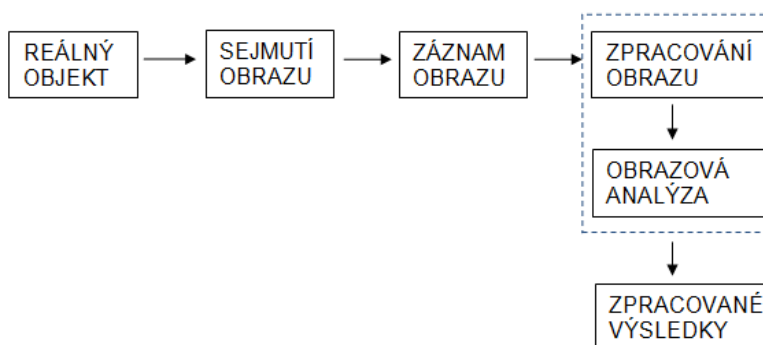
Pracuje se s odraženým, tak průchozím signálem i dalšími typy, jako např. sekundárně emitovanými elektrony<sup>39</sup>. Na vzorek dopadá tenký svazek elektronů, který pomocí vychylovací soustavy zajistí, že elektronový svazek postupně dopadne na všechna místa povrchu. Obraz je většinou vytvořen elektrony, které jsou odraženy případně emitovány z povrchové vrstvy. Tyto elektrony se následně zachycují různými druhy detektorů umístěných společně se vzorkem ve vakuové komoře.

Elektronové mikroskopy umožňují mimo pozorování povrchu a vnitřní struktury také jiné testování vzorků. Patří mezi ně difrakce elektronů, WDS-vlnově disperzní spektroskopie, EDS energiově disperzní spektroskopie<sup>6</sup>.

### 5.4.4 Obrazová analýza

Obrazová analýza je proces sejmutí obrazu z připravených vzorků pomocí vhodného snímacího prvku, převedení do digitální podoby a analýzy obrazu vhodným softwarem. Měřicí postup je na Obr. 5.32.

Výstupem obrazové analýzy může být měření nalezených objektů (počet plocha, rozměry částic, tvarové vlastnosti, vzdálenosti mezi objekty), vyhledávání, počítání objektů a další analytické operace.



Obr. 5.32 Schéma měřicího postupu.

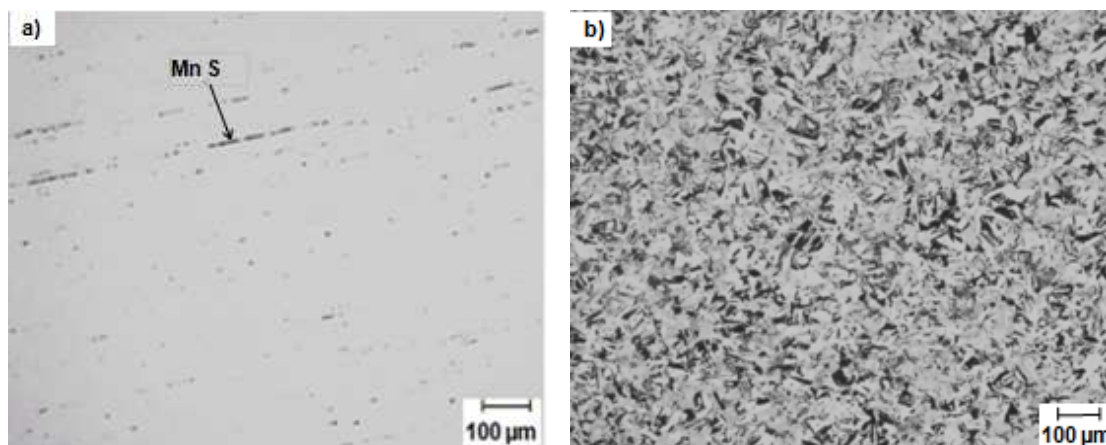
## 5.5 Vyhodnocení metalografické analýzy

Pro vyhodnocení jednotlivých materiálů bylo využito světelné mikroskopie, ze které se získaly snímky pro obrazovou analýzu a elektronové rastrovací mikroskopie.

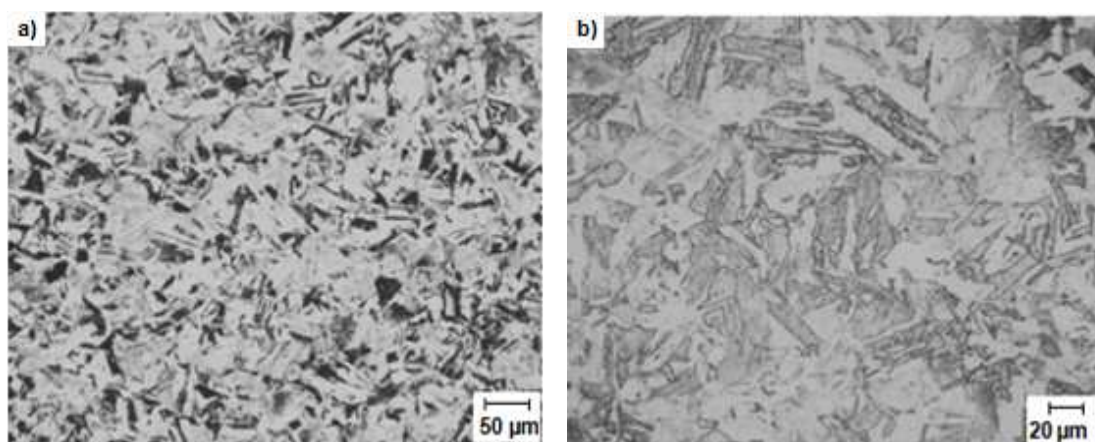
### 5.5.1 Světelná mikroskopie

Pro studium a dokumentaci struktury materiálů byl využit světelný mikroskop OLYMPUS GX 51 s digitální kamerou. Následující obrázky dokumentují strukturu jednotlivých materiálů.

Snímky světelné mikroskopie materiálu 1.4542 vyrobeného standardním metalurgickým postupem (válcovaný mat.) ukazují, že mikrostrukturu tvoří martenzit o velikosti zrna 6-8 (dle ČSN EN ISO 643). Popisované struktury jsou na Obr. 5.33 a 5.34. Na Obr. 5.33 a) je zachycena struktura v nenaleptaném stavu při 50-ti násobném zvětšení, kde je možné vidět rozválcované sulfidy manganu ve směru válcování. Mikrostruktura byla také studována v naleptaném stavu při zvětšení 50, 100 a 200. Obr. 5.34 a) a 5.34 b) zachycuje martenzitickou strukturu a zbytkový austenit.



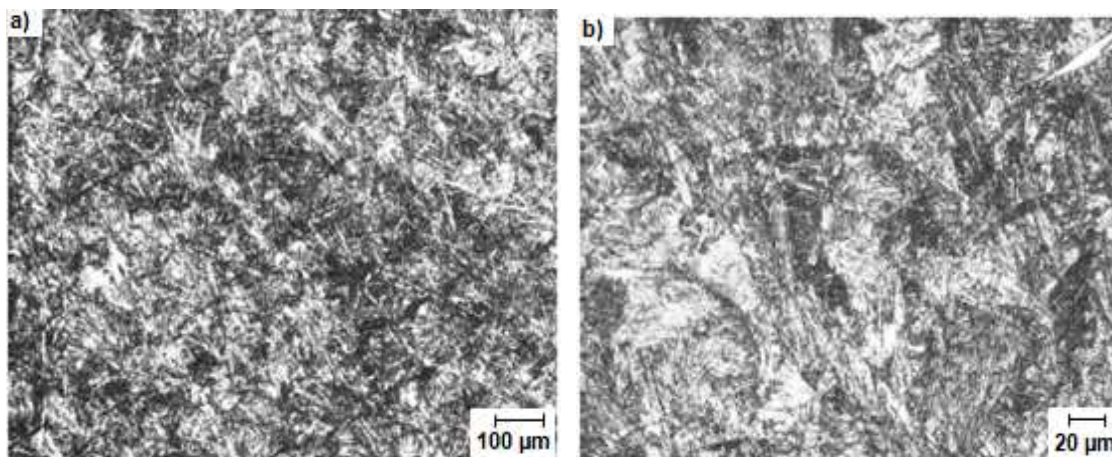
Obr. 5.33 Mikrostruktura materiálu 1.4542 vyrobeného klasickou metalurgií. Obr. a) neleptáno, zvětšení 50x. Obr. b) leptáno (leptadlo Marble), zvětšení 50x.



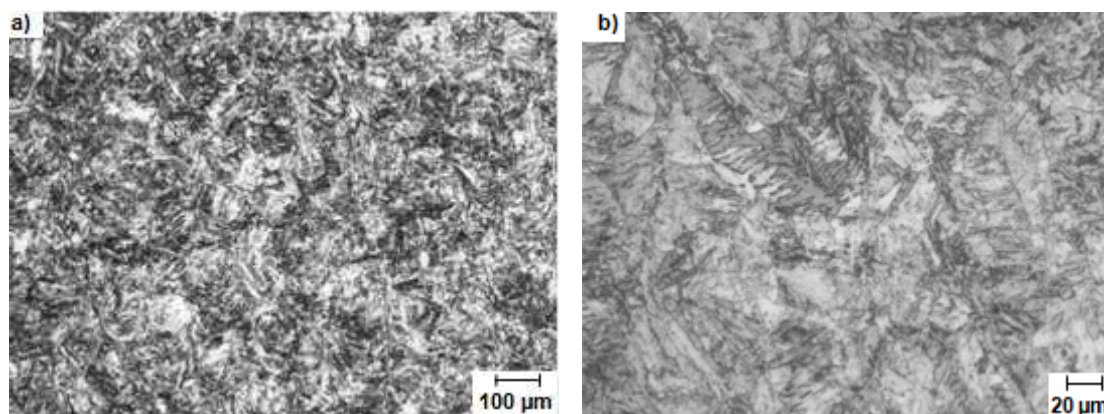
Obr. 5.34 Mikrostruktura materiálu 1.4542 vyrobeného klasickou metalurgií. Obr. a) leptáno (leptadlo Marble), zvětšení 100x. Obr. b) leptáno (leptadlo Marble), zvětšení 200x.

Snímky mikrostruktury materiálu korozivzdorné ocele EOS GP1 vyrobené slinováním na stroji EOSINT M 270 pomocí doporučených parametrů ukazují, že mikrostruktura je tvořena jemnozrnnou strukturou martenzitu a zbytkového austenitu.

Studované struktury jsou v odpovídajícím zvětšení na Obr. 5.35 kolmý řez a Obr. 5.36 podélný řez. Struktury vykazují jednotlivé nanášené vrstvy při stavbě daného vzorku. V podélném a kolmém směru vykazují shodné mikrostruktury.



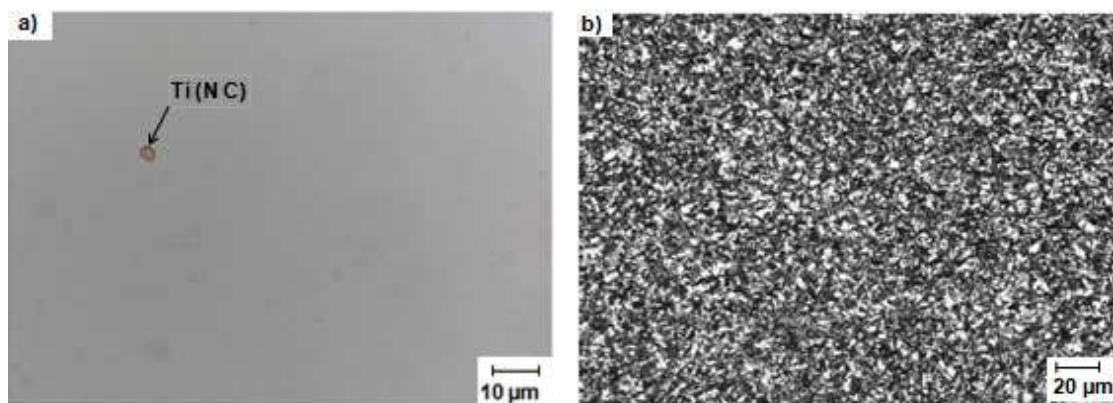
Obr. 5.35 Mikrostruktura korozivzdorné oceli EOS GP1. Obr. a) leptáno (leptadlo Marble), zvětšení 50x. Obr. b) leptáno (leptadlo Marble), zvětšení 200x.



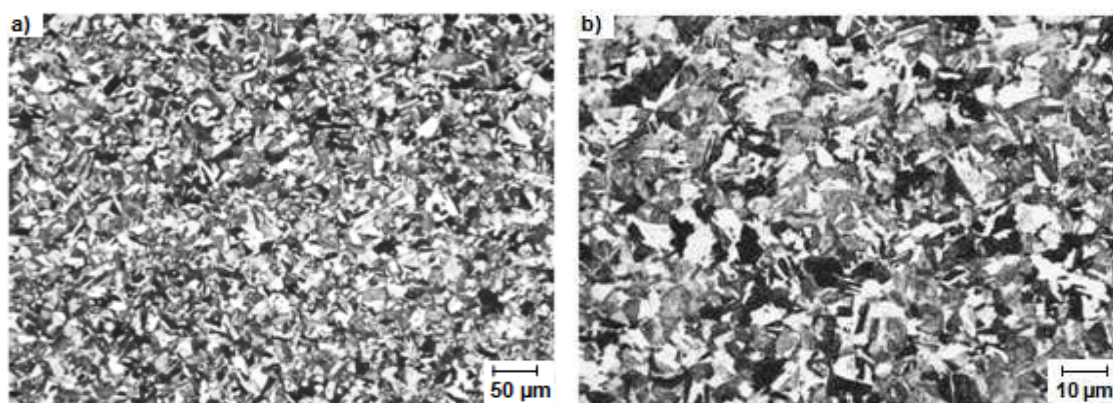
Obr. 5.36 Mikrostruktura korozivzdorné oceli EOS GP1. Obr. a) leptáno (leptadlo Marble), zvětšení 50x. Obr. b) leptáno (leptadlo Marble), zvětšení 200x.

Snímky světelné mikroskopie materiálu 1.2709 vyrobeného klasickým metalurgickým postupem (válcovaný mat.). Vykazují zrnitou feriticko-perlitickou strukturu.

Popisované struktury jsou na Obr. 5.37 a 5.38. Na Obr. 5.37 a) je zachycena struktura v nenaleptaném stavu při 500 ti násobném zvětšení, kde je možné vidět karbo-nitrid titanu Ti (N C). Mikrostruktura byla také studována v naleptaném stavu při zvětšení 50, 100 a 200. Na Obr. 5.38 je mikrostruktura feriticko-perlitická, kde ferit vykazuje částečně Widmannstattenovu morfologii.



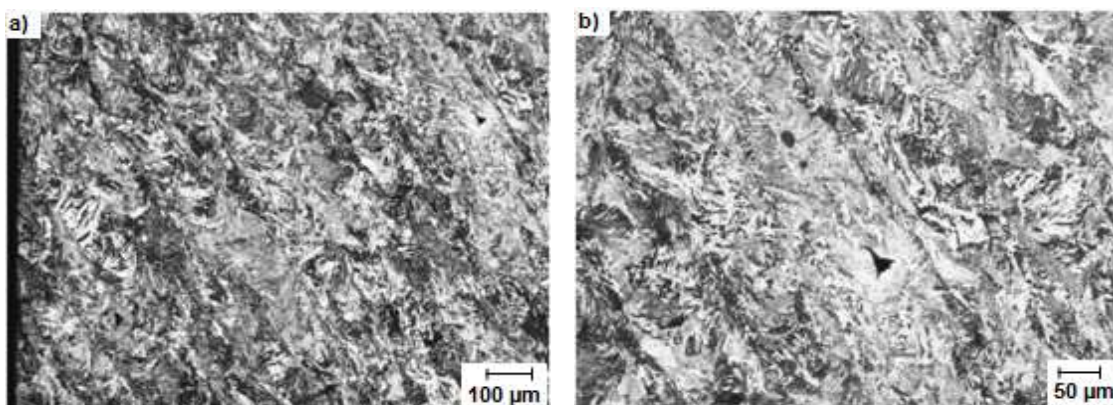
Obr. 5.37 Mikrostruktura materiálu 1.2709 vyrobeného klasickou metalurgií. Obr. a) neleptáno, zvětšení 500x. Obr. b) leptáno (leptadlo Marble), zvětšení 50x.



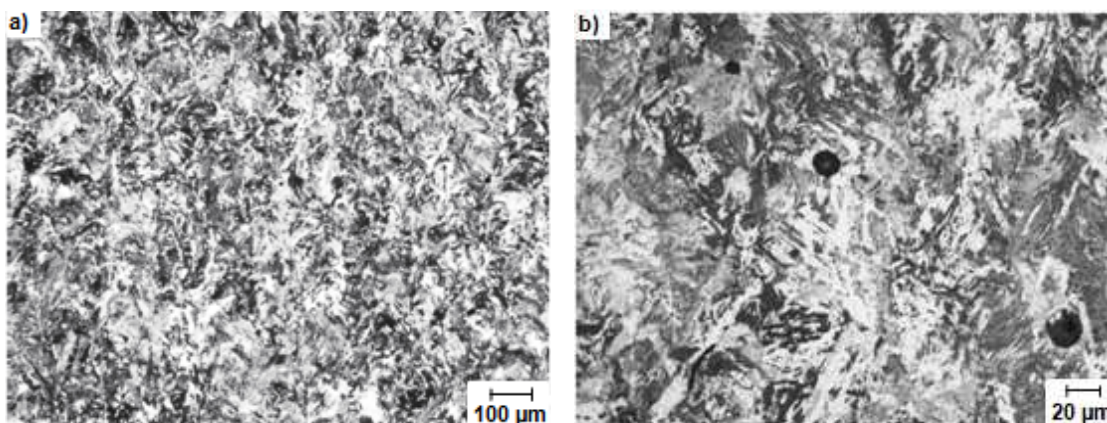
Obr. 5.38 Mikrostruktura materiálu 1.2709 vyrobeného klasickou metalurgií. Obr. a) leptáno (lept. Marble), zvětšení 100x. Obr. b) leptáno (lept. Marble), zvětšení 200x.

Snímky mikrostruktury materiálu nástrojové oceli EOS MS1 vyrobené slinováním na stroji EOSINT M 270 pomocí doporučených parametrů ukazují, že mikrostruktura je tvořena martenzitem a perlitem.

Studované struktury jsou v odpovídajícím zvětšení na Obr. 5.39 kolmý řez a Obr. 5.40 podélný. Ve struktuře je možné vidět jednotlivé nanášené vrstvy při stavbě daného vzorku. Struktury v podélném a kolmém směru vykazují shodné struktury.



Obr. 5.39 Mikrostruktura nástrojové oceli EOS MS1. Obr. a) leptáno (leptadlo Marble), zvětšení 50x. Obr. b) leptáno (leptadlo Marble), zvětšení 100x.

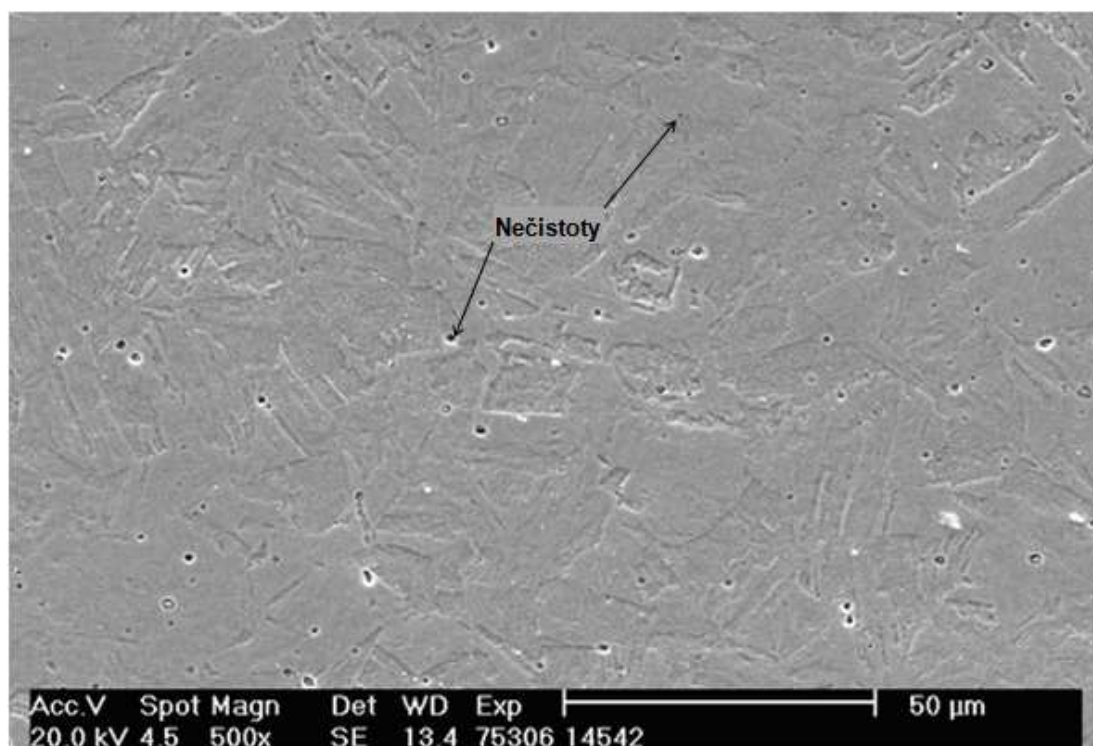


Obr. 5.40 Mikrostruktura nástrojové oceli EOS MS1. Obr. a) leptáno (leptadlo Marble), zvětšení 50x. Obr. b) leptáno (leptadlo Marble), zvětšení 200x.

### 5.5.2 Elektronová mikroskopie

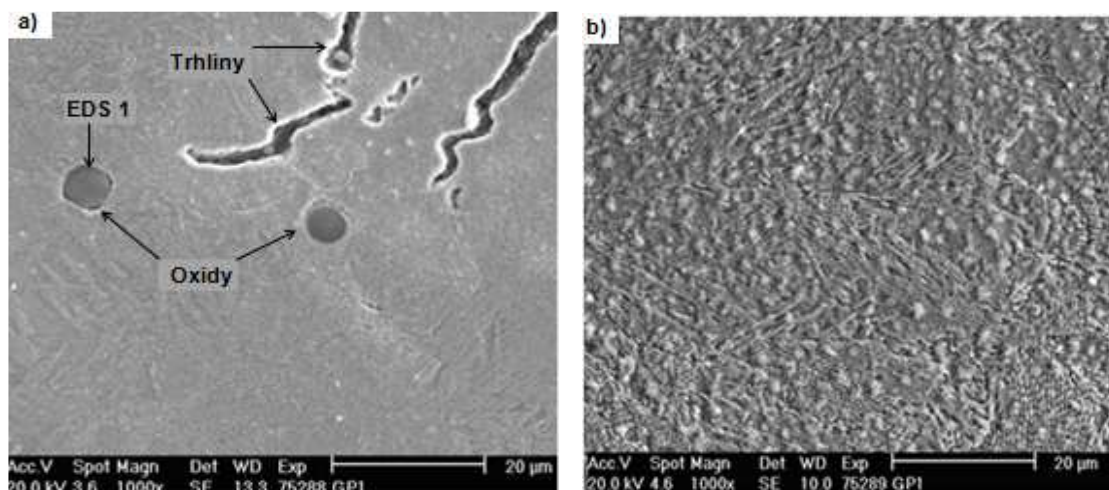
Pro studium a dokumentaci struktury materiálů byl použit rastrovací elektronový mikroskop PHILIPS X L30. Lokální chemické analýzy byly provedeny na REM s využitím analyzátoru EDAX metodou energiově disperzní spektroskopie (EDS). Následující obrázky dokumentují strukturu jednotlivých materiálů při zvětšeních až 1500x.

Snímek elektronové mikroskopie materiálu 1.4542 Obr. 5.41 vyrobeného standardním metalurgickým postupem (válcovaný mat.) vykazuje, martenzitickou mikrostrukturu s velkým počtem drobných nečistot.

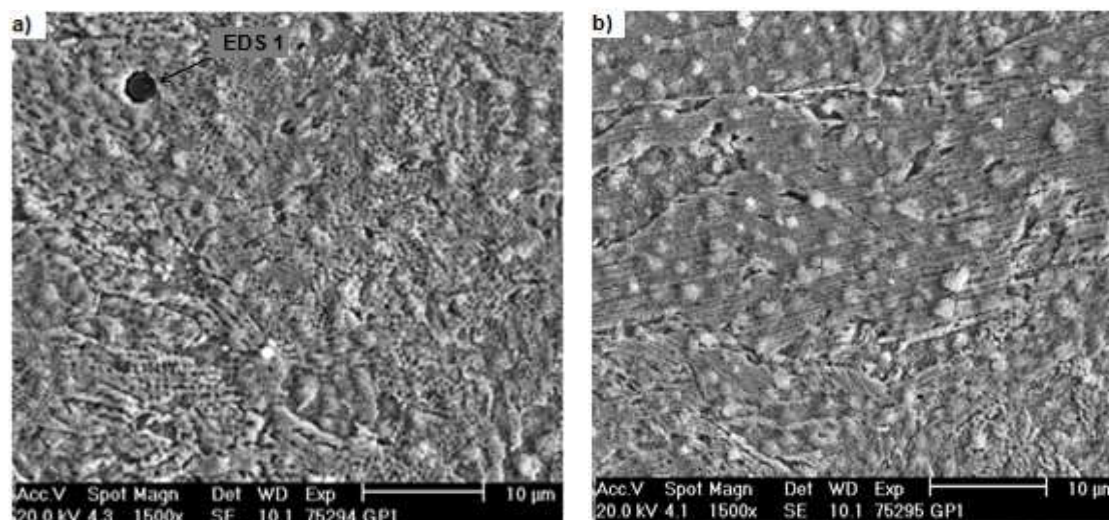


Obr. 5.41 Mikrostruktura materiálu 1.4542 vyrobeného klasickou metalurgií. Leptáno (leptadlo Marble), zvětšení 500x.

Snímky elektronové mikroskopie materiálu korozivzdorné oceli EOS GP1 vyrobené slinováním laserem na stroji EOSINT M 270 ukazují mikrostrukturu, kde je možné vidět trhliny nečistosti komplexní nečistoty na bázi oxidu Mg, Al, Si, Co. Komplexní oxidické vměstky, z nichž některé jsou na bázi oxidu křemíku, jsou vidět na Obr. 5.42 a) a 5.43 a). Spektrum chemického složení je na Obr. 5.44 a 5.45. Výsledky uvádí Tab. 5.19 a Tab. 5.20.



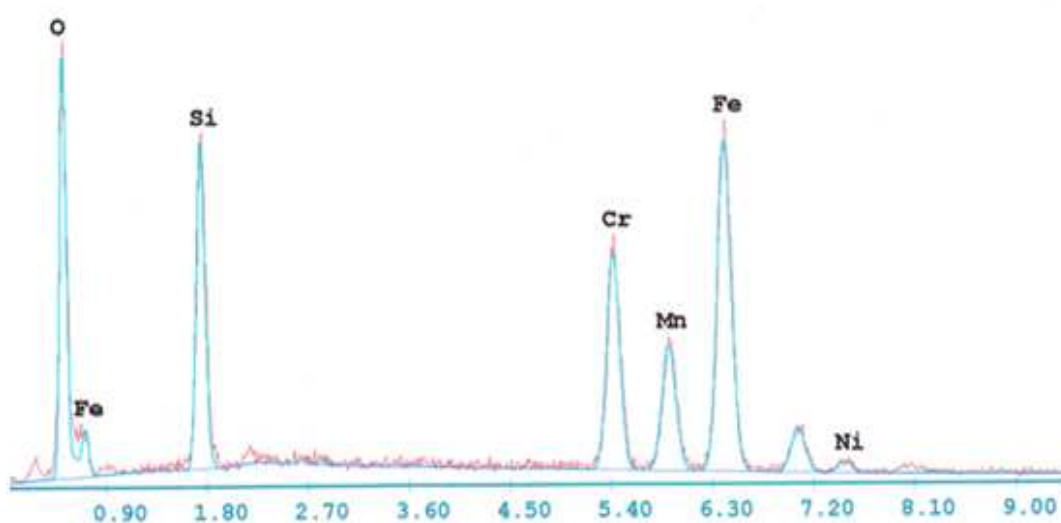
Obr. 5.42 Mikrostruktura materiálu korozivzdorné oceli EOS GP1. Obr. a) leptáno (Marble), zvětšení 1000x. obr. b) leptáno (Marble), zvětšení 1000x



Obr. 5.43 Mikrostruktura materiálu korozivzdorné oceli EOS GP1. Obr. a) leptáno (Marble), zvětšení 1500x. Obr. b) leptáno (Marble), zvětšení 1500x

Tab. 5.19 Naměřené hodnoty EDS analýzy pro oblast 1.

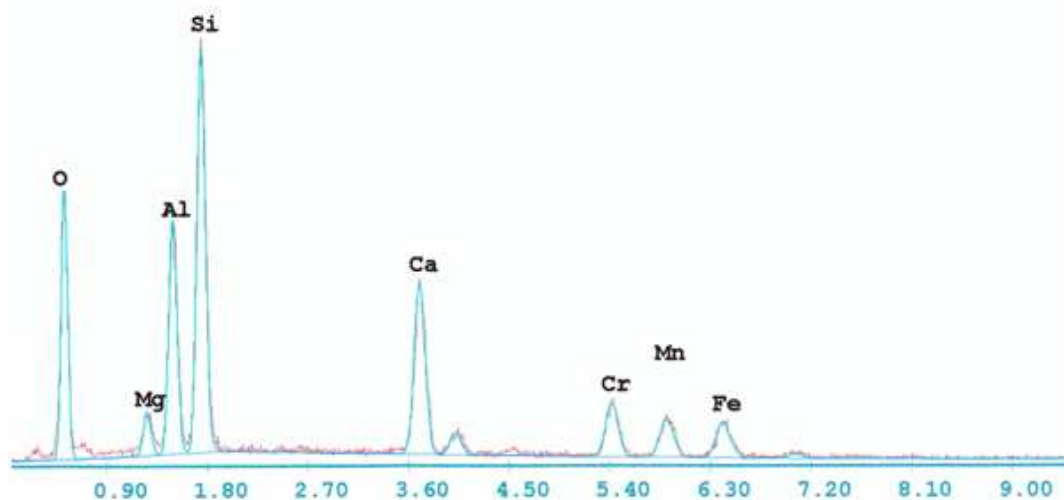
Prvek	Hmotnostní [%]	Atomové [%]	K-faktor	Atomové číslo	Absorpce	Frekvence
O	19,79	42,49	0,0913	1,1126	0,4136	1,0020
Si	11,13	13,62	0,0632	1,0648	0,5328	1,0016
Cr	16,14	10,67	0,1660	0,9477	0,9919	1,0944
Mn	10,03	6,27	0,0934	0,9308	0,9979	1,0026
Fe	38,94	23,96	0,3612	0,9486	0,9744	1,0034
Ni	2,22	1,3	0,0199	0,9640	0,9284	1,0000



Obr. 5.44 Spektrum chemického složení pro oblast 1.

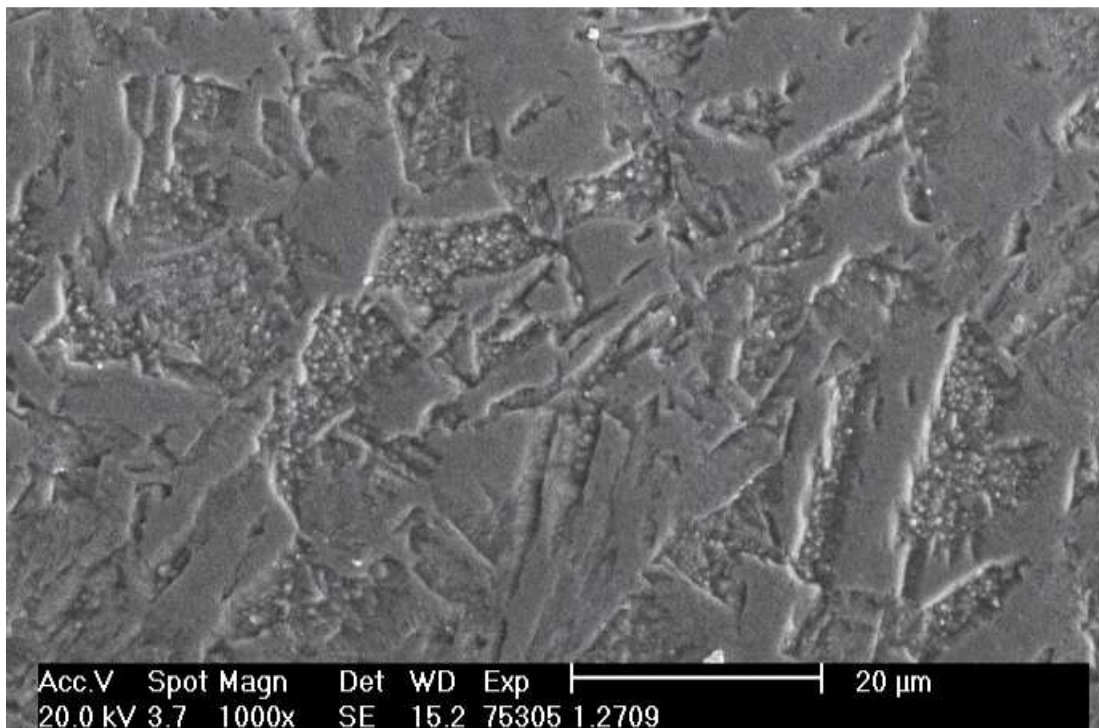
Tab. 5.20 Naměřené hodnoty EDS analýzy pro oblast 2.

Prvek	Hmotnostní [%]	Atomové [%]	K-faktor	Atomové číslo	Absorpce	Frekvence
O	34,01	52,47	0,0919	1,0551	0,2558	1,0008
Mg	2,53	2,57	0,0117	1,0120	0,4543	1,0062
Al	12,20	11,16	0,0696	0,9821	0,5771	1,0069
Si	20,16	17,72	0,1234	0,0107	0,6044	1,0017
Ca	11,79	7,26	0,1090	0,9832	0,9294	1,0114
Cr	7,21	3,42	0,0635	0,8947	0,9709	1,0146
Mn	5,49	2,47	0,0473	0,8781	0,9815	1,0000
Fe	6,62	2,93	0,0579	0,8944	0,9769	1,0000



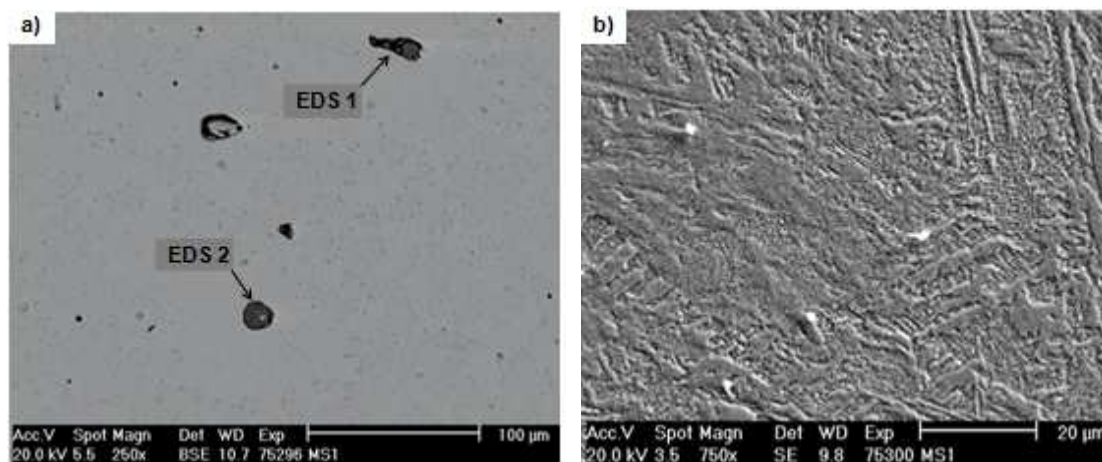
Obr. 5.45 Spektrum chemického složení pro oblast 2.

Snímek elektronové mikroskopie materiálu 1.2709 vyrobeného standardním metalurgickým postupem (válcovaný mat.) Obr. 5.46 ukazuje mikrostrukturu, která odpovídá struktuře na světelném mikroskopu.

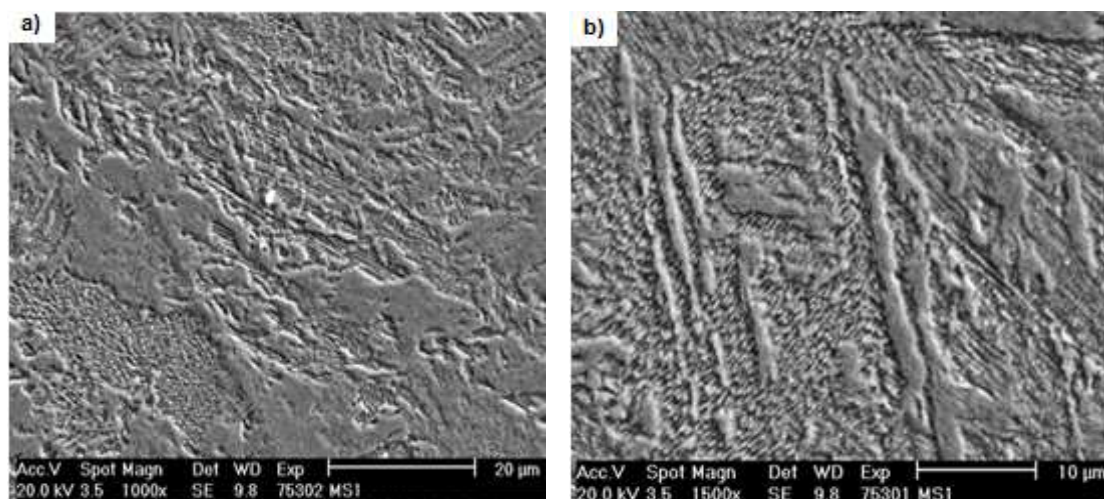


Obr. 5.46 Mikrostruktura materiálu 1.2709 vyrobeného klasickou metalurgií. Leptáno (leptadlo Marble), zvětšení 1000x.

Snímky struktury materiálu EOS Nástrojové oceli MS1 Obr. 5.47 a 5.48 vyrobené slinováním laserem na stroji M 270 ukazují mikrostrukturu, kde je možné vidět trhliny nečistoty na bázi oxidu Al, Si, Co. Komplexní oxidické vměstky, z nichž některé jsou na bázi oxidu křemíku, znázorňuje Obr. 5.47 a). Spektrum chemického složení popisuje Obr. 5.49 a 5.50. Výsledky uvádí Tab. 5.21 a Tab. 5.22.



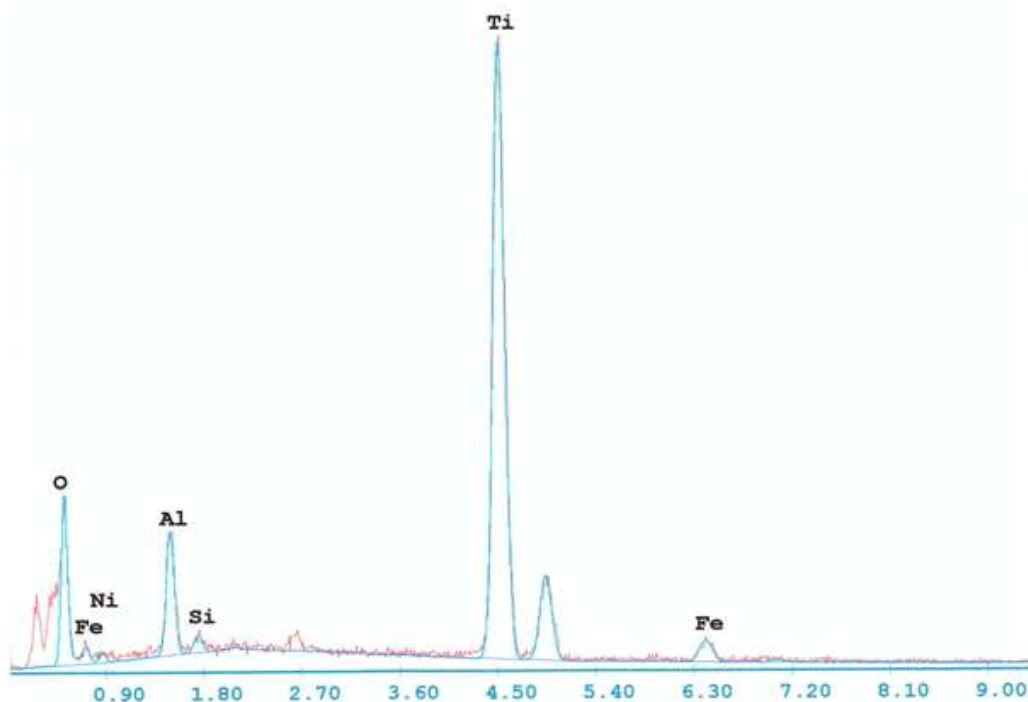
Obr. 5.47 Mikrostruktura materiálu EOS Korozivzdorné oceli MS1. Obr. a) leptáno (Marble), zvětšení 250x. Obr. b) leptáno (Marble), zvětšení 750x



Obr. 5.48 Mikrostruktura materiálu EOS Nástrojové oceli MS1. Obr. a) leptáno (Marble), zvětšení 1000x. Obr. b) leptáno (Marble), zvětšení 1500x

Tab. 5.21 Naměřené hodnoty EDS analýzy pro oblast 1.

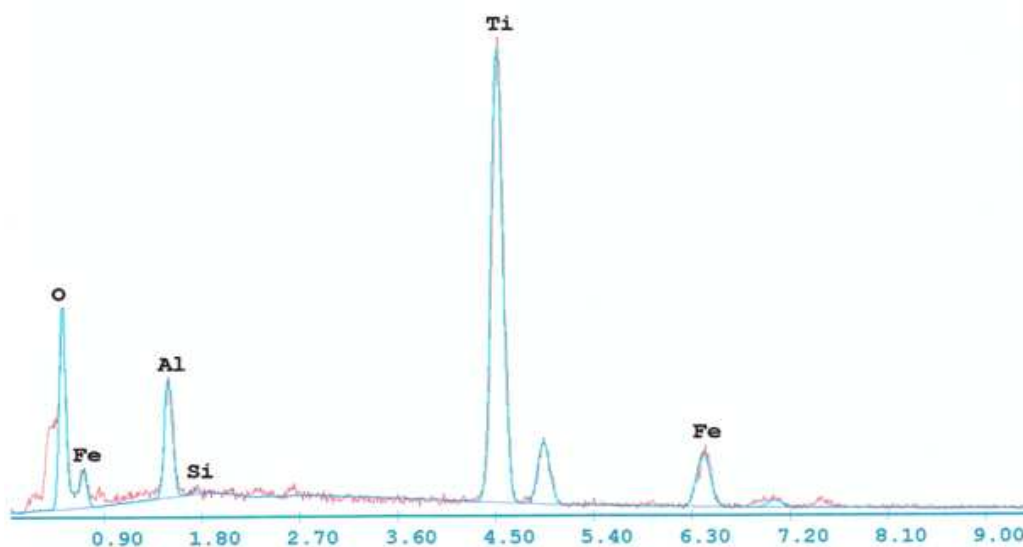
Prvek	Hmotnostní [%]	Atomové [%]	K-faktor	Atomové číslo	Absorpce	Frekvence
O	36,05	61,29	0,0502	1,0909	0,1276	1,0002
Ni	3,21	1,48	0,0080	0,9540	0,2612	1,0003
Al	6,21	6,26	0,0320	1,0153	0,5064	1,0019
Si	0,75	0,73	0,0047	1,0447	0,5932	1,0033
Ti	50,06	28,42	0,4674	0,9295	0,9995	1,0051
Fe	3,72	1,81	0,0327	0,9266	0,9435	1,0058



Obr. 5.49 Spektrum chemického složení pro oblast 1.

Tab. 5.22 Naměřené hodnoty EDS analýzy pro oblast 2.

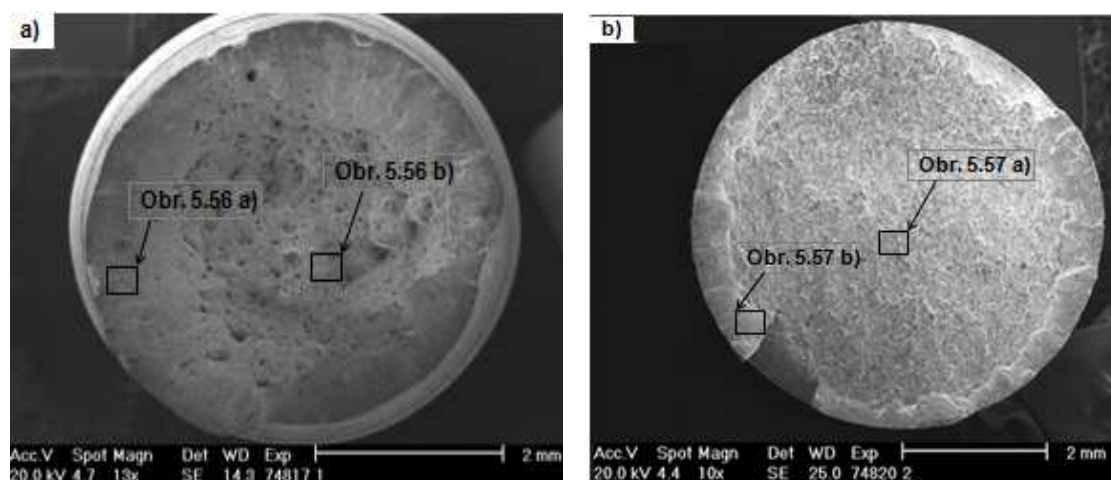
Prvek	Hmotnostní [%]	Atomové [%]	K-faktor	Atomové číslo	Absorpce	Frekvence
O	41,18	66,30	0,0665	1,0826	0,1491	1,0003
Al	6,65	6,35	0,0340	1,0077	0,5075	1,0016
Si	0,26	0,24	0,0016	1,0369	0,5912	1,0029
Ti	41,34	22,23	0,3583	0,9222	0,0003	1,0104
Fe	10,58	4,88	0,0929	0,9191	0,9554	1,0000



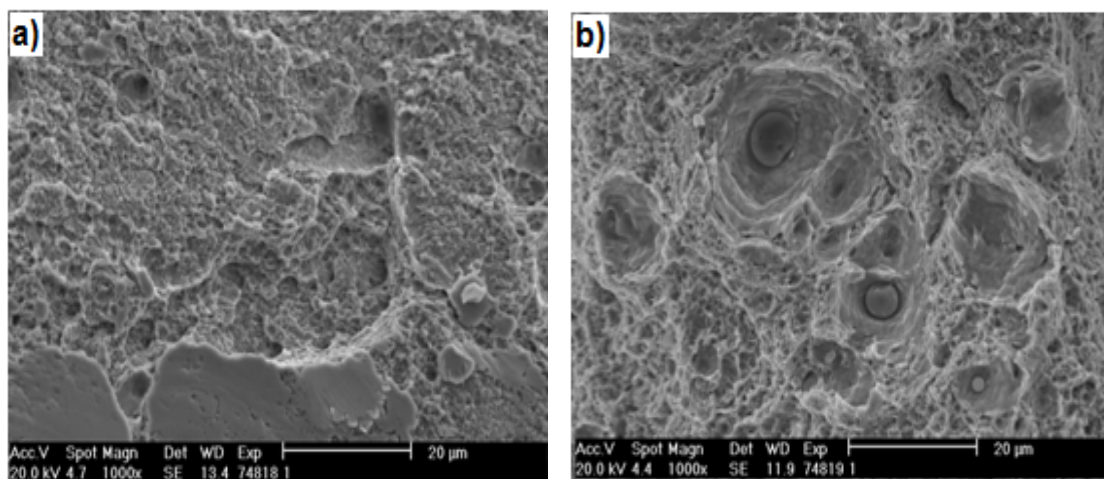
Obr. 5.50 Spektrum chemického složení pro oblast 2.

### 5.5.1 Lomové plochy po statické zkoušce tahem

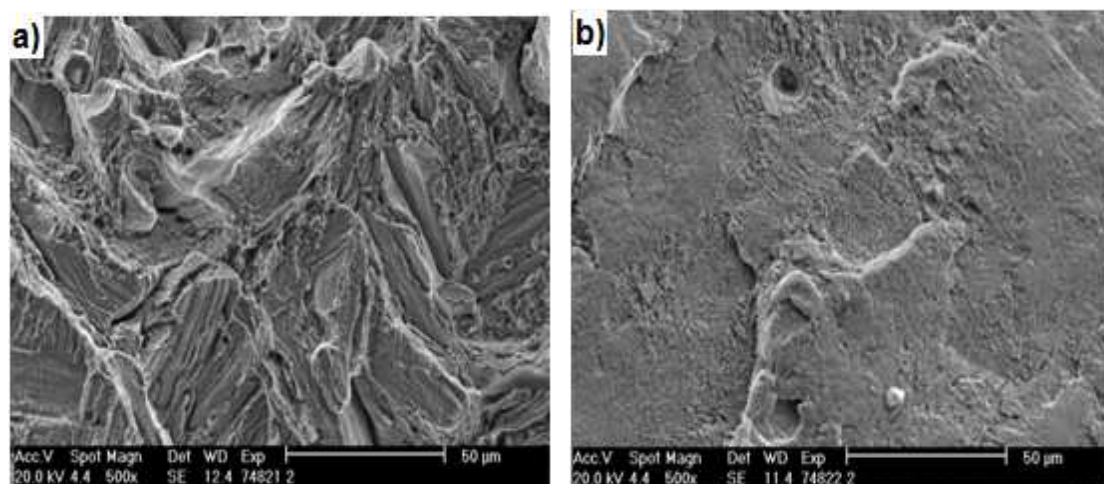
Lomové plochy jsou vyhodnoceny pro materiály MS1 a GP1 Obr. 5.51, Obr. 5.52 a Obr. 5.53. Pro dokumentaci a studium lomových ploch byl použit rastrovací elektronový mikroskop PHILIPS X L30.



Obr. 5.51 Lomová plocha vzorku mat. MS1, zvětšení 13x obr. a). Lomová plocha vzorku mat. GP1, zvětšení 10x obr. b)



Obr. 5.52 Detail lomové plochy vzorku mat. MS1, zvětšení 1000x



Obr. 5.53 Detail lomové plochy vzorku mat. GP1, zvětšení 500x.

Morfologie vykazuje kvazištěpný charakter s transkrystalickým lomem, který odpovídá hodnoceným mikrostrukturám jak pro mat. GP1, tak pro mat. MS1. Na obrázku jsou vidět fazety, které mohou být iniciované inkluzemi nebo částicemi karbidů. U takového lomu není jednoznačně definovaná krystalografická struktura, jako v případě štěpného lomu.

Z fotografií je patrný rozdíl okrajové kůry a jádra způsobený rozdílnými parametry stavby při slinování jednotlivých vrstev.

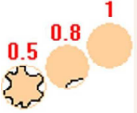
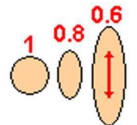
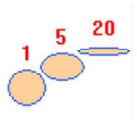
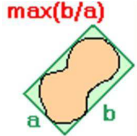
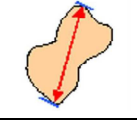
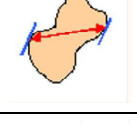
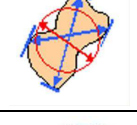

### 5.5.2 Obrazová analýza

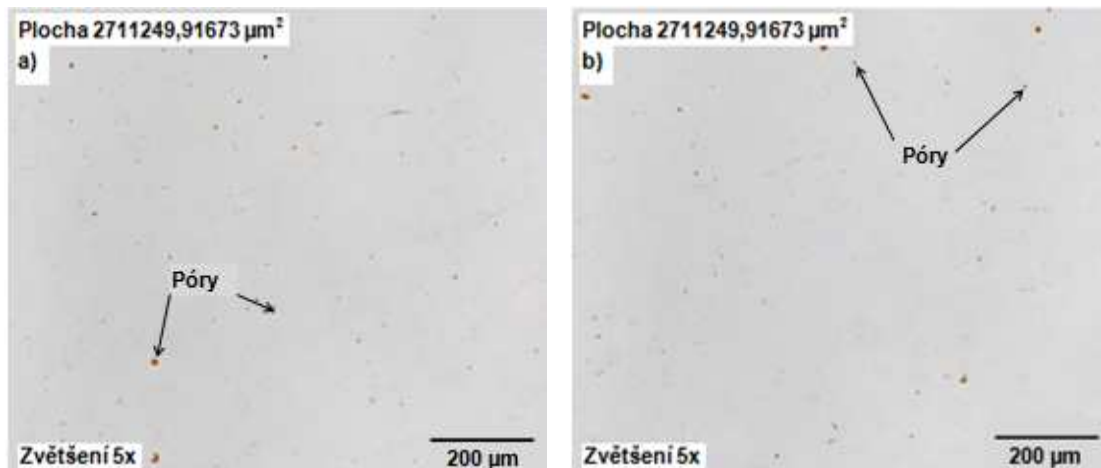
Obrazová analýza byla realizována na snímcích získaných pomocí světelné mikroskopie. Porezita je hodnocena na materiálu EOS GP1 a EOS MS1. Pro názornost jsou uvedeny struktury konvenčních materiálů Obr. 5.55 a Obr. 5.57, kde se porezita nevyskytuje. Pro obrazovou analýzu je důležité, aby vzorky nebyly naleptány.

Hodnocení pórovitosti proběhlo na světelném mikroskopu PMG 3 s digitální kamerou DP 20 pomocí softwaru Stream Motion. Program na základě barevné odlišnosti detekuje objekty a následně vyhodnocuje jejich tvar a rozměry. Před vlastním vyhodnocením parametrů uvedených v Tab. 5.23 je důležité stanovit okrajové podmínky. V našem případě jako okrajová podmínka bylo zanedbání póru velikosti do 10 pixelů.

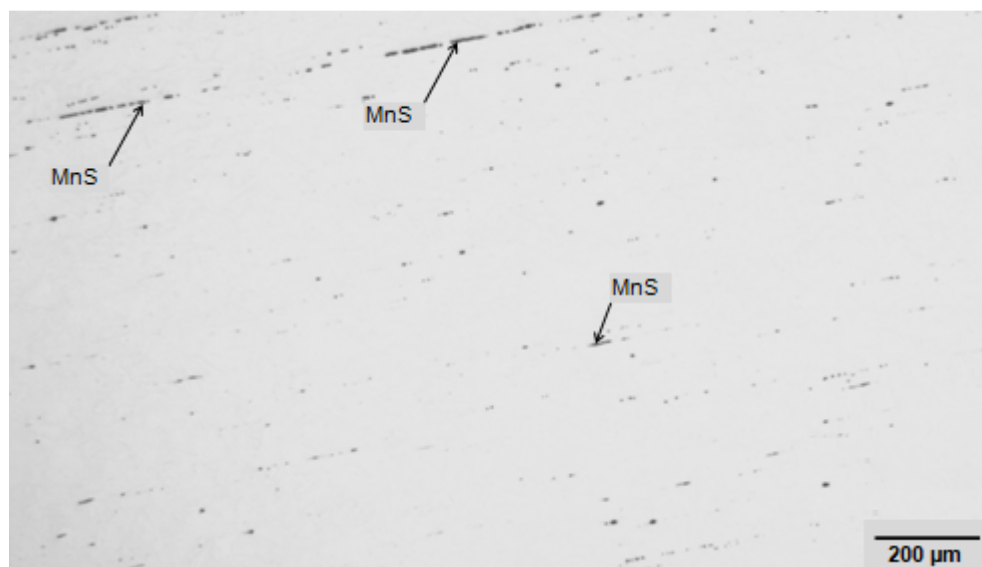
Při vyhodnocení pórovitosti byla nafocena tři zorná pole (příklad hodnocených oblastí v kolmém a podélném směru je vidět na Obr. 5.54 a 5.56). Závěrečné výsledky jsou statistickým zpracováním výsledných hodnot jednotlivých oblastí uvedeny v Tab. 5.24.

Tab. 5.23 Programem hodnocené parametry pórovitosti<sup>9</sup>.

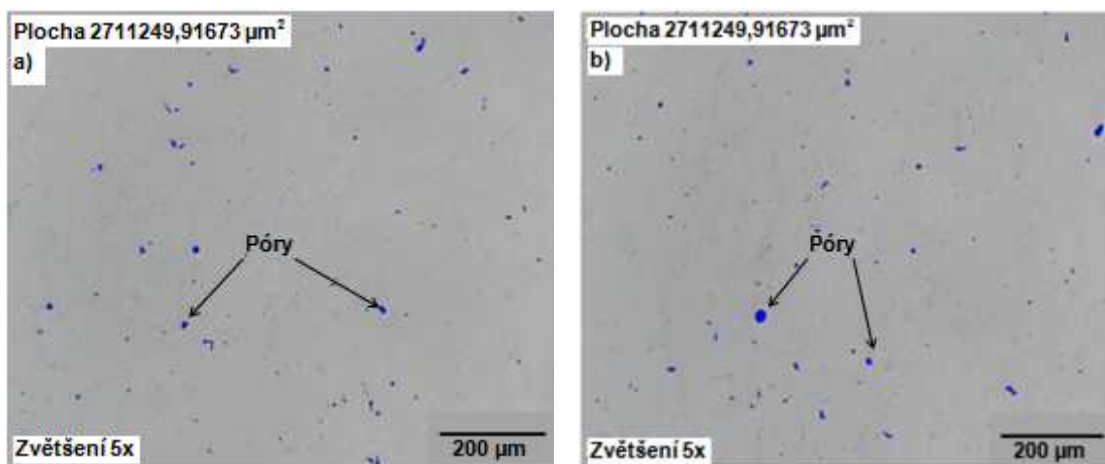
<b>Shape factor</b>		Tvarový faktor zachycující kruhovitost póru.
<b>Sphericity</b>		Svislé prodloužení.
<b>Elongation</b>		Vodorovné prodloužení pórů charakterizuje jejich roztváření.
<b>Aspect Ratio</b>		Poměr maximálního a minimálního rozměru póru.
<b>Max. Diameter</b>		Průměr největšího zaznamenaného póru.
<b>Min. Diameter</b>		Minimální průměr zaznamenaného póru.
<b>Mean Diameter</b>		Průměrná velikost póru.
<b>Area</b>		Plocha póru.



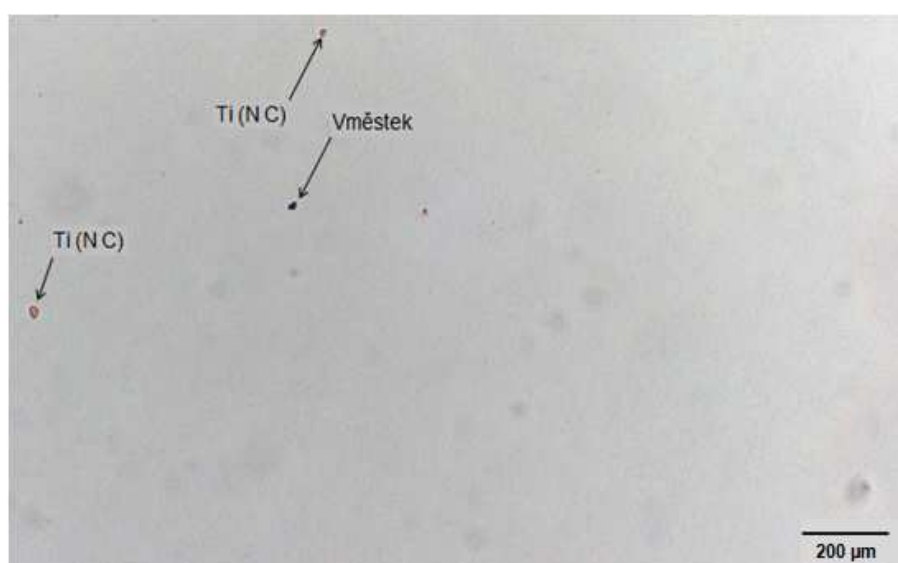
Obr. 5.54 Vyhodnocovaná oblast pro mat. EOS GP1, a) podélný řez, b) kolmý řez.



Obr. 5.55 Mikrofotografie oblasti pro mat. 1.4542.



Obr. 5.56 Vyhodnocovaná oblasti pro mat. EOS MS1, a) podélný řez, b) kolmý řez.



Obr. 5.57 Mikrofotografie oblasti pro mat. 1.2709.

Tab. 5.24 Vyhodnocení parametrů a pórovitosti vzorků pro materiál GP1, MS1.

Mat.	Řez	Tvarový faktor [-]	Svislé Prodloužení [-]	Vodorovné prodloužení [-]	Poměr max. a min. velikosti [-]
GP1	Podélný	0,81	0,36	2,24	1,91
	Kolmý	0,79	0,37	2,05	1,81
MS1	Podélný	0,68	0,38	2,16	1,86
	Kolmý	0,90	0,45	1,87	1,66
Mat.	Řez	Max. průměr [μm]	Průměrná velikost [μm]	Plocha [μm <sup>2</sup> ]	Pórovitost [%]
GP1	Podélný	12,06	7,74	3863,52	0,05
	Kolmý	10,41	6,75	3972,41	0,05
MS1	Podélný	15,69	10,37	16824,39	0,45
	Kolmý	12,78	8,60	22573,05	0,38

Tvar pórů má zásadní vliv na koncentraci napětí a vrubové účinky. Ve struktuře se převážně vyskytují póry podobné tvaru koule (hodnota blízká 1), proto je v objemu materiálu méně koncentrátů napětí a vrubových účinků. Porezita nevykazuje jakýkoliv směrový účinek vlivem nanášení a tavení jednotlivých vrstev. Porezita se pohybuje ve velmi nízkých hodnotách shodných jak v kolmém, tak i podélném směru. Pro materiál GP1 jsou to setiny procent a pro materiál MS1 se porezita pohybuje v desetinách procent plochy výbrusu. Například pro porovnání při technologii tlakového lití se porezita pohybuje až v desítkách % plochy výbrusu.

Dalo by se předpokládat, že i takhle nízká porezita by měla mít negativní vliv na mechanické vlastnosti, jako je  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $A$  (Tažnost). Tento fakt ale nepotvrzují provedené tahové zkoušky na daných materiálem. V porovnání s materiály 1.4542 a 1.2709 vyrobené standardní technologií (válcováním) vykazovaly vyšší hodnoty  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$  a tažnost se téměř shodovala. Pouze hodnota meze kluzu u mat. GP1 byla nižší. Z toho lze usoudit, že porezita u materiálů MS1 a GP1 vyrobených metodou DMLS nemá zásadní vliv na mechanické vlastnosti.

## 6 DISKUSE K EXPERIMENTÁLNÍM VÝSLEDKŮM

Výsledky měření uvedené v 5 kapitole jsou zpracovány a porovnány s výsledky uvedenými v literatuře.

Dle vyhodnocení jednotlivých parametrů mechanických zkoušek pro materiály korozivzdorné oceli 1.4542 a nástrojové oceli 1.2709 vyrobené standardní metalurgií a materiály EOS GP1 a EOS MS1 vyrobené metodou DMLS lze konstatovat, že mechanické vlastnosti odpovídají daným materiálovým listům. Je důležité uvést, že materiály nejsou po tepelném zpracování. Literatura udává materiály 1.4542 a 1.2079 jako chemické ekvivalenty slinovaných materiálům EOS GP1 a EOS MS1.

Z porovnání výsledků tahové zkoušky a tvrdosti dle Vickerse vyplývá, že mechanické hodnoty pro materiály vyrobené metodou DMLS vycházejí vyšší než u materiálů 1.4542 a 1.2709. Z toho lze usoudit, že materiály vyrobené klasickou metalurgií jsou pouze chemickým ekvivalentem s rozdílnými mechanickými vlastnostmi. Např. materiál EOS GP1 vykazuje mez pevnosti o 400 MPa vyšší a nižší mez kluzu přibližně o 400 MPa.

Provedená metalografická analýza ukazuje podobné mikrostruktury studovaných vzorků. U materiálů vyrobených metodou DMLS lze pozorovat zvýšené množství trhlin nečelistvostí a komplexních nečistot v porovnání s klasickými materiály.

Také je provedeno vyhodnocení pórovitosti materiálů EOS GP1 a EOS MS1. Pórovitost u materiálů vyrobených standardními technologiemi nelze sledovat vzhledem k tomu, že se jedná o válcované materiály a pórovitost se u nich nevyskytuje. Hodnoty pórovitosti se pohybují u materiálu EOS GP1 v setinách procent a u materiálu EOS MS1 v desetínách procent plochy výbrusu.

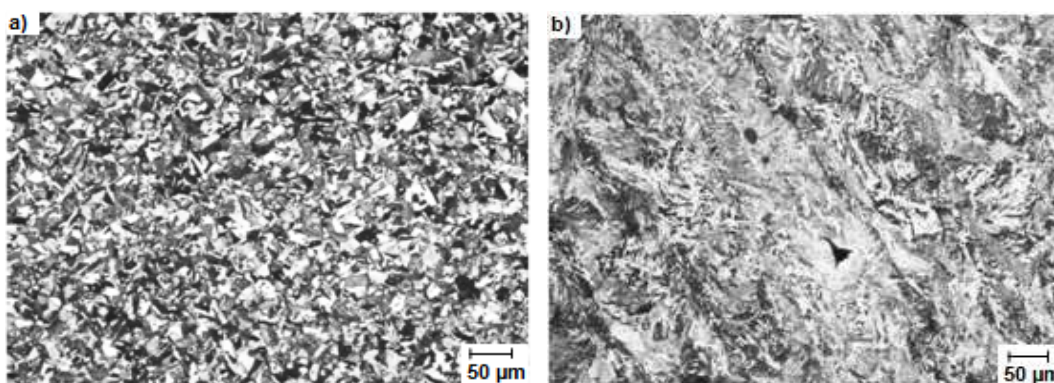
Výsledky mechanických zkoušek ukázaly, že tyto vady nečelistvosti a pórovitost u materiálů MS1 a GP1 vyrobených metodou DMLS nemají zásadní vliv na mechanické vlastnosti.

## 7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

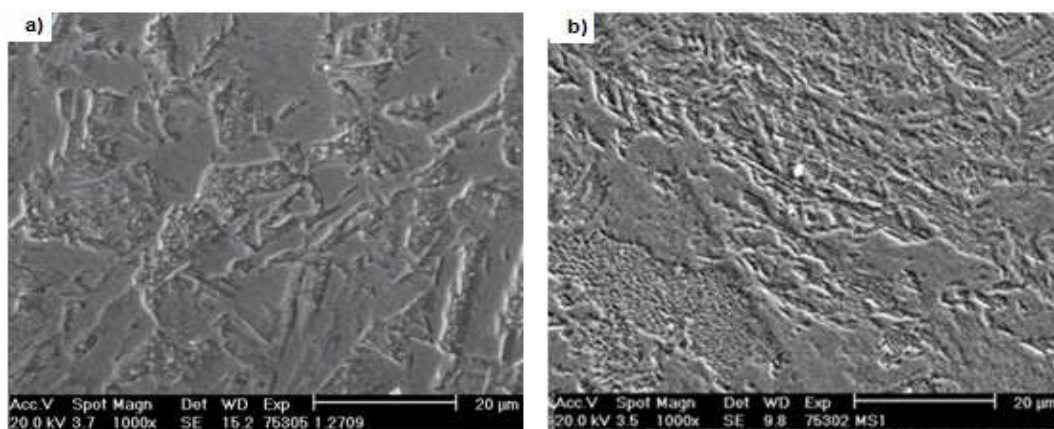
Tato práce se zaměřila spíše na srovnání mechanických vlastností materiálů vyrobených standardním způsobem a metodou DMLS. Zhodnocení samozřejmě porovná i jednotlivé náklady spojené s výrobou, ale pouze okrajově. Byla provedena řada měření jenž vedla k porovnání mechanických vlastností materiálů použitých v odlišných výrobních postupech. Pro souhrnné zhodnocení a porovnání materiálů jsou zvoleny charakteristické parametry uvedené v Tab. 7.1. Na Obr. 7.1 je porovnání mikrostruktur materiálů 1.2709 a EOS MS1 ze světelné mikroskopie a na Obr. 7.2 z elektronové mikroskopie v odpovídajícím zvětšení. Na Obr. 7.3 a Obr. 7.4 je taktěž srovnána mikrostruktura materiálů 1.4542 a EOS GP1.

Tab. 7.1 Mechanické vlastnosti.

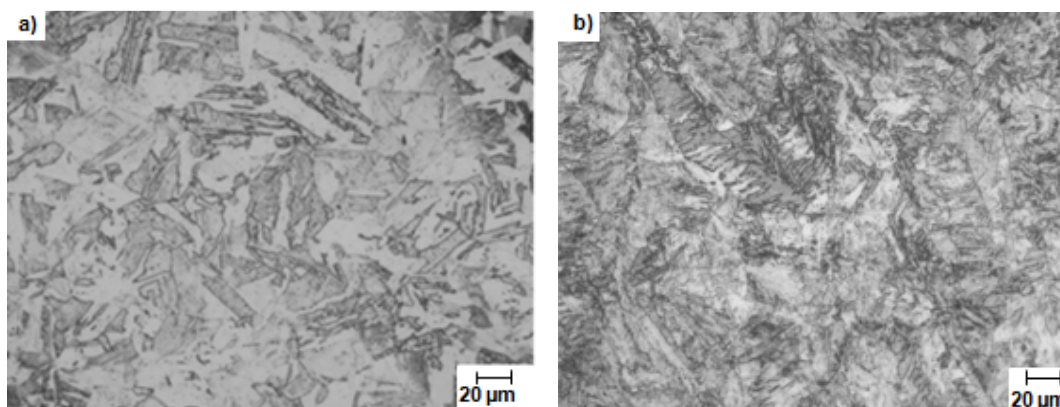
Materiál	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]	Z [%]	HV 10 [%]	Pórovitost [%]
MS1	901,94	1274,51	14,28	49,37	394	0,41
1.2709	833,32	1050,84	15,35	74,42	328	0
GP1	564,29	1489,10	11,69	15,67	428	0,05
1.4542	1019,86	1068,05	10,91	62,55	320	0



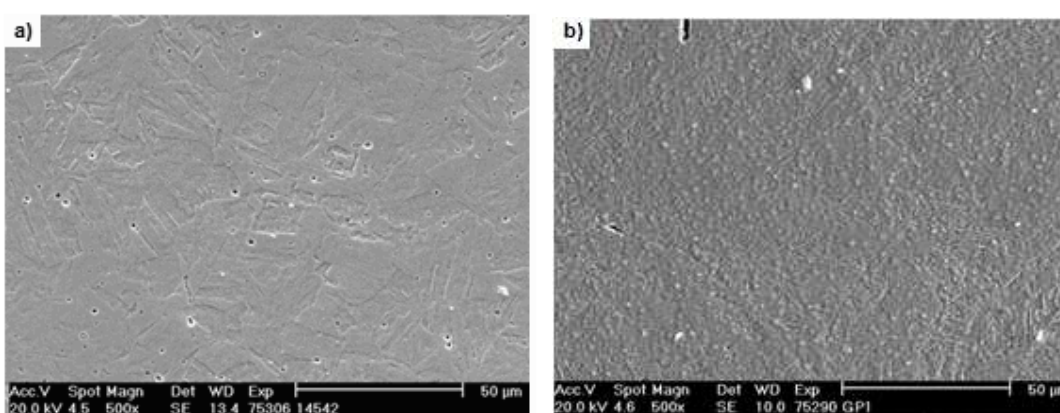
Obr. 7.1 a) Mikrostruktura materiálu 1.2709 leptáno (lept. Marble), zvětšení 100x,  
Obr. 7.1b) Mikrostruktura materiálu EOS MS1 leptáno (lept. Marble), zvětšení 100x.



Obr. 7.1 a) Mikrostruktura materiálu 1.2709 leptáno (lept. Marble), zvětšení 100x,  
Obr. 7.1b) Mikrostruktura materiálu EOS MS1 leptáno (lept. Marble), zvětšení 100x.



Obr. 7.3 a) Mikrostruktura materiálu 1.4542 leptáno (lept. Marble), zvětšení 200x,  
Obr. 7.3 b) Mikrostruktura materiálu EOS GP1 leptáno (lept. Marble), zvětšení 200x.



Obr. 7.4 a) Mikrostruktura materiálu 1.4542 leptáno (lept. Marble), zvětšení 500x,  
Obr. 7.4 b) Mikrostruktura materiálu EOS GP1 leptáno (lept. Marble), zvětšení 500x.

Porovnání výrobních nákladů jednotlivých metod je v Tab. 7.2. Z porovnání lze konstatovat, že výroba součástí metodou DMLS je výrazně dražší. Je to způsobeno především nesprávnou volbou součástí, kde jsou kladené vysoké požadavky na přesnost a strukturu povrchu, kterých metoda DMLS nedosahuje, proto je potřebné následné obrobení.

Ze zjištěných poznatků vyplývá, že materiály zpracované metodou DMLS dosahují srovnatelných mechanických vlastností v porovnání s klasickými materiály. Proto metoda DMLS je vhodná pro výrobu funkčních součástí. Druhá stránka je volba vhodné součásti pro tuto metodu, aby výroba byla ekonomicky srovnatelná s konvenčním způsobem výroby. Možné využití metody je rozebráno v kapitole 4.7.

Tab. 7.2 Porovnání celkových nákladů u jednotlivých metod.

Výroba standardní metodou		Výroba metodou DMLS	
Výrobní dávka [ks]	Náklady na jeden kus [Kč/ks]	Výrobní dávka [ks]	Náklady na jeden kus [Kč/ks]
1	9950,00	1	18 000,00
20	3700,00	20	9 600,00
50	3190,00	50	9 600,00

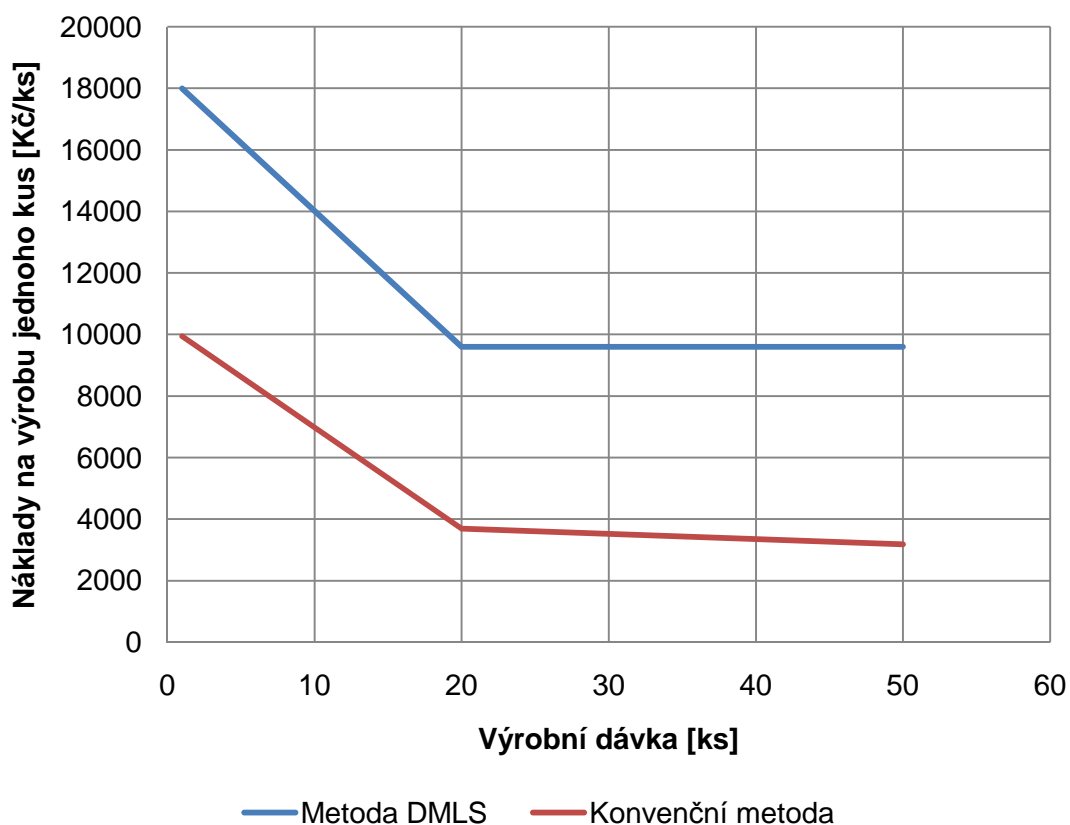
## ZÁVĚR

Z měření a pozorování jednotlivých materiálů vyplývají závěry, které jsou shrnuty v několika následujících bodech:

- je uveden popis výroby tělesa plynového analyzátoru konvenčním způsobem a výroby metodou DMLS, která je v této práci podrobně rozepsána,
- z výsledků tahových zkoušek lze konstatovat, že parametry ( $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $A$ ,  $Z$ ) materiálů vyrobených metodou DMLS se neshodují s klasickými materiály, některé parametry jsou vyšší, např. hodnota  $R_m$  u mat. EOS GP1 je vyšší o 400 MPa a naopak hodnota  $R_{p0,2}$  je o 400 MPa,
- z měření tvrdosti dle Vickerse vyplývá, že hodnoty tvrdosti převyšují standardní materiály o 60 HV, zjištěná průměrná tvrdost pro EOS GP1 je 428 HV a EOS MS1 je 394 HV,
- ve slitinách zpracovaných klasickým způsobem a metodou DMLS se pro materiál EOS GP1 vyskytují stejné fáze jemnozrnného martenzitu a zbytkového austenitu, mikrostruktura materiálu EOS MS1 je tvořena martenzitem a perlitem, pro materiál 1.2709 je mikrostruktura feriticko perlitická,
- při metodě DMLS se pórovitost pro materiál EOS GP1 pohybuje v setinách procent a pro EOS MS1 v desetínách procent. Převážně se jednalo o kulové póry, které do objemu materiálu nevnáší téměř žádné vrubové účinky, což se potvrdilo mechanickými zkouškami, které jsou uvedené výše,
- morfologie lomu je pro oba materiály stejná, vykazuje kvazištěpný charakter s transkrystalickým lomem, který odpovídá hodnoceným mikrostrukturám,
- součástí práce je také technicko-ekonomické zhodnocení, ze kterého vyplynulo, že cena dílu vyrobeného aditivní metodou DMLS je v porovnání s konvenčním způsobem výroby mnohem vyšší.

Je možné tedy konstatovat, že práškové materiály EOS GP1 a EOS MS1 zpracované aditivní metodou DMLS jsou svými mechanickými vlastnostmi plně srovnatelné s materiály vyrobenými konvenčními technologiemi. Při výrobě prototypů či jiných součástí tedy mohou plně nahradit standardní materiály.

Ekonomické zhodnocení prokázalo nevhodnost použití metody DMLS pro výrobu součástí plynového analyzátoru. Je to způsobeno především tím, že jsou kladené vysoké požadavky na přesnost a strukturu povrchu dané součásti, kterých metoda DMLS nedosahuje. Vzhledem k tomu je nutné následné obrobení, což výrazně zvýší výrobní náklady. Další příčinou je také malá tvarová složitost dílu a vysoký objem spotřebovaného práškového materiálu, který zásadně ovlivňuje výslednou cenu součásti. Při projekční činnosti výrobního procesu je pro tuto metodu velice důležitá volba typu součásti s ohledem na její tvarovou složitost a objemovou náročnost.



Obr. 8 Provnání výrobních nákladů konvenční metody a metody DMLS.

Dosažené výsledky, uvedené v této práci, mohou do budoucna napomoci rozšíření metody DMLS do podvědomí široké veřejnosti nejen v České republice.

Samozřejmě DMLS metoda zaslouží řadu dalších podrobných studií. Předmětem dalšího zkoumání může být porovnání daných materiálů po tepelném zpracování, kde lze očekávat zajímavé mikrostruktury a mechanické vlastnosti s návazností na vývoj nových materiálů.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W., BOCKING C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2004, pp.112. ISBN 1860584659.
2. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society): Rapid Prototyping of Materials. The Minerals, Metals & Materials Society. 2002, pp. 615. ISBN 0873395301.
3. FIEDLER, Rudolf. *Metody analýzy a kontroly materiálů*. Brno : SNTL, 1986. 138 s.
4. HRIVŇAK, Ivan. *ELEKTÓNOVÁ MIKROSKOPIA OCELÍ*. Bratislava : VEDA, 1986. 235 s.
5. PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1.vyd. 246s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
6. PTÁČEK, Luděk, et al. *NAUKA O MATERIÁLU I.*. Vyd. 1. Brno : CERM, 2003. 516 s. ISBN 80-7204-193-2.
7. SEDLÁK, J., PÍŠA, Z. Rapid Prototyping master modelů pomocí CAD/CAM systémů. In Mezinárodní vědecká konference 2005. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 07.09.2005-09.09.2005. 30 s. ISBN: 80-248-0895-1.
8. BARTOŠÍK, Luděk. *NOVÉ METODY DOKONČOVÁNÍ VNĚJŠÍCH ROTAČNÍCH PLOCH*. Brno, 2010. 51 s. Bakalářská práce. VUT, Fakulta Strojního Inženýrství.
9. KLOCOVÁ, Petra. *HODNOCENÍ POREZITY U ODLITKŮ TLAKOVĚ LITÝCH Z AL SLITIN*. Brno, 2008. 66 s. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ.

**Elektronické zdroje**

10. *Autofabrication Technologies* [online]. © 2002-2011 [cit. 2011-05-24]. Autofabrication Technologies > Light Curing > Masking. Dostupné z WWW: <[http://www.turkcadcam.net/rapor/autofab/tech-light\\_curing\\_masking.html](http://www.turkcadcam.net/rapor/autofab/tech-light_curing_masking.html)>.
11. *Density Gradient Materials by Direct Metal Laser Sintering* [online]. © 2010 [cit. 2011-05-24]. Advanced Materials Research . Dostupné z WWW: <<http://www.scientific.net/AMR.89-91.281>>.
12. *Direct Metal Laser Sintering (DMLS) : GPI Prototype* [online]. © 2009 [cit. 2011-05-25]. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) - GPI Prototype . Dostupné z WWW: <<http://gpiprototype.com/Services/dmls-direct-metal-laser-sintering.html>>.
13. *DMLS* [online]. ©2007 [cit. 2011-05-24]. DIRECT METAL LASER SINTERING. Dostupné z WWW: <<http://www.dmls.cz/>>.

14. *DMLS-Direct Metal Laser Sintering* [online]. © 2009 [cit. 2011-05-24]. Direct Metal Laser Sintering. Dostupné z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>>.
15. DOLEŽAL, Pavel; Simona, POSPÍŠILOVÁ; Petra, PAVLÍKOVÁ, . *Multimediální podklady pro studium struktur kovových materiálů* [online]. 16.2:2011 [cit. 2011-05-25]. Příprava a hodnocení materiálografických vzorků. Dostupné z WWW: <[http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/PHMV/le\\_me.html](http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/PHMV/le_me.html)>. Mat.
16. *EOS Debuts M 280 Laser Sintering System in North America at RAPID 2011* [online]. © 2011 [cit. 2011-05-24]. Advances in direct metal laser-sintering support precision manufacturing applications. Dostupné z WWW: <<http://www.deskeng.com/articles/aabbab.htm>>.
17. *Frentech* [online]. ©2010 [cit. 2011-05-24]. O společnosti. Dostupné z WWW: <[http://www.frentech.eu/index\\_c.php](http://www.frentech.eu/index_c.php)>.
18. *Fused Deposition Modeling (FDM)* [online]. © 2009 [cit. 2011-05-24]. Fused Deposition Modeling (FDM). Dostupné z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>>.
19. *HARBEC* [online]. © 2009 [cit. 2011-05-24]. Functional Prototypes and Production Parts in One Day. Dostupné z WWW: <[http://www.harbec.com/selective\\_laser\\_sintering.html](http://www.harbec.com/selective_laser_sintering.html)>.
20. *INNOMIA a.s. : 3D tisk prototypů z kovu a plastu, prototypové formy, Konformní chlazení* [online]. 2007 [cit. 2011-05-24]. INNOMIA a.s. - specialista na 3D tisk kovů a plastů. Dostupné z WWW: <<http://www.innomia.cz/>>.
21. KHAING, M. W; J. Y. H, FUH; L, LU, . *Science Direct : Journal of Materials processing Technology* [online]. © 2011 [cit. 2011-05-25]. Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts . Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013601005842>>.
22. *Knformní chlazení* [online]. © JH 2009 [cit. 2011-05-25]. Knformní chlazení cesta k úspěchu. Dostupné z WWW: <<http://www.konformnichlazení.cz/galerie.html>>.
23. KUBÍČEK, Jaroslav. *Odbor technologie svařování a povrchových úprav, ÚST, FSI VUT v Brně* [online]. 20.12.2010 [cit. 2011-05-25]. Odbor technologie svařování a povrchových úprav, Renovace a povrchové úpravy. Dostupné z WWW: <[http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/renovace\\_a\\_povrchove\\_upravy\\_\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/renovace_a_povrchove_upravy__kubicek.pdf)>.
24. *Laminated Object Manufacturing (LOM)* [online]. © 2009 [cit. 2011-05-24]. Laminated Object Manufacturing (LOM). Dostupné z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>>.
25. *Lasergenerieren* [online]. © 2011 [cit. 2011-05-25]. Information. Dostupné z WWW: <<http://www.lasergenerieren.de/en/material-data-sheets.php>>.

26. MIANY, F. *RECENT DEVELOPMENTS OF DIRECT METAL SELECTIVE LASER SINTERING* [online]. 25.5.2011 [cit. 2011-05-25]. Direct selective laser sintering. Dostupné z WWW: <<http://www.ics.trieste.it/media/133856/df143.pdf>>.
27. MOLLIKOVÁ, Eva. *ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ A VÝROBKŮ* [online]. 20.1.2006 [cit. 2011-05-25]. ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ A VÝROBKŮ. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/Index.html>>.
28. *Rapid Prototype Technologies : Design Engineer Life* [online]. © 2009-2010 [cit. 2011-05-24]. Rapid Prototype Technologies. Dostupné z WWW: <<http://www.designengineerlife.com/2010/rapid-prototype-technologies/>>.
29. *Rapid prototyping : Selective Laser Sintering (SLA)* [online]. © 2009 [cit. 2011-05-24]. Selective Laser Sintering. Dostupné z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>>.
30. *Rapid Prototyping : Stereolithography (SLA)* [online]. © 2009 [cit. 2011-05-24]. Stereolithography. Dostupné z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>>.
31. *Rapid Prototyping : Three Dimensional Printing* [online]. © 2009 [cit. 2011-05-24]. 3D Printing. Dostupné z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>>. 3DP:
32. *RIT* [online]. 2009-12-16 [cit. 2011-05-24]. 2001 SFF Papers - Directory contents. Dostupné z WWW: <<http://edge.rit.edu/content/P10551/public/SFF/SFF%202001%20Proceedings/2001%20SFF%20Papers/41-Pohl.pdf>>.
33. ROZKOŠNÝ, Luboš . Jak vyrobit plně funkční kovové díly přímo z 3D CAD dat . *Technický týdeník* [online]. 2008, 2, [cit. 2011-05-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=3698&mark=DMLS>>.
34. ŘASA, Jaroslav; Zuzana, KEREČANIKOVÁ. Nekonvenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 9.10.2007, č.10, [cit. 2011-05-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2>>.
35. *Science Direct : Journal of Materials processing Technology* [online]. © 2011 [cit. 2011-05-25]. Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013601005842>>.
36. SIMCHI, A; F, PETZOLDT; H, POHL,. *Science Direct : Journal of Materials processing Technology* [online]. © 2011 [cit. 2011-05-25]. On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360300283>>.

37. *Springerlink : Journal of Materials Science Volume 39, Number 4* [online]. 2004 [cit. 2011-05-24]. Journal of Materials Science. Dostupné z WWW: <<http://www.springerlink.com/index/k2544064qvl707h8.pdf>>.
38. *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. 5.2.2007 [cit. 2011-05-25]. Ústav materiálových věd a inženýrství Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/laboratore.html>>.
39. VOJTKULÁKOVÁ, Zina. *Světelná Mikroskopie* [online]. 1.1.2002 [cit. 2011-05-25]. SVĚTELNÁ MIKROSKOPIE. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/sm/Index.html>>.
40. Firemní podklady společnosti Frentech Aerospace s.r.o.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

Chemická značka	Jednotka	Popis
Al	[-]	hliník
C	[-]	uhlík
Ca	[-]	kalcium
Co	[-]	kobalt
CO <sub>2</sub>	[-]	oxid uhličitý
Cr	[-]	chrom
Cu	[-]	měď
Fe	[-]	železo
Mg	[-]	hořčík
Mn	[-]	mangan
Mo	[-]	molybden
N	[-]	dusík
Nb	[-]	niob
Ni	[-]	nikl
P	[-]	fosfor
Pb	[-]	olovo
S	[-]	síra
Si	[-]	křemík
Sn	[-]	cín
Ti	[-]	titan
Zn	[-]	zinek

Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	tažnost
d	[μm]	aritmetický průměr úhlopříček
d1	[μm]	úhlopříčka
d2	[μm]	úhlopříčka
F	[N]	zkušební zatížení
F <sub>max</sub>	[N]	maximální dosažená síla
F <sub>p0,2</sub>	[N]	síla na mezi kluzu
L <sub>0</sub>	[mm]	počáteční délka
L <sub>u</sub>	[mm]	délka vzorku po přetržení
P	[W]	výkon laseru
Ra	[μm]	průměrná aritmetická úchylka profilu
R <sub>m</sub>	[MPa]	mez pevnosti
R <sub>p0,2</sub>	[MPa]	smluvní mez kluzu
Ry	[μm]	aritmetický průměr úchylek
Rz	[μm]	největší výška profilu
S <sub>0</sub>	[mm]	původní průřez zkušebního tělesa
S <sub>u</sub>	[mm]	průřez vzorku v místě lomu
v	[mm.s <sup>-1</sup> ]	rychlost snímání
w	[mm]	snímací rozteč
Z	[%]	kontrakce
ΔL	[mm]	celkové prodloužení

Zkratka	Jednotka	Popis
*.stl	[-]	datový formát
3D	[-]	3-Dimension
3DP	[-]	Three Dimensional Printing
a.s	[-]	akciová společnost
atd.	[-]	a tak dále
CAD	[-]	počítačové podporované navrhování
cca.	[-]	přibližně
CCD	[-]	zařízení s vázanými náboji
CNC	[-]	číslicově řízený systém
CPC	[-]	Cyber Production Center
DMLS	[-]	Direct Metal Laser Sintering
EDS	[-]	elektronová disperzní spektroskopie
EOS	[-]	Electro Optical Systems
EU	[-]	evropská unie
FDM	[-]	Fused Deposition Modeling
HB	[-]	tvrdost podle Brinella
hod.	[-]	hodina
HRC	[-]	tvrdost podle Rockvella
HV	[-]	tvrdost podle Vickerse
IPCM	[-]	integrovaný proces řízení
LOM	[-]	Laminated Object Manufacturing
LPM	[-]	Lines Per Minute
max.	[-]	maximum
min.	[-]	minimum
MJM	[-]	Multi Jet Modeling
Obr.	[-]	obrázek
PC	[-]	osobní počítač
REM	[-]	rastrovací elektronový mikroskop
RP	[-]	Rapid Prototyping
s.r.o	[-]	společnost s ručením omezeným
SGC	[-]	solid ground cutting
SLA	[-]	stereolitografie
SLS	[-]	Selective Laser Sintering
Tab.	[-]	Tabulka
USA	[-]	spojené státy americké
WDS	[-]	vlnově disperzní spektroskopie
Zb.	[-]	zbytek

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Materiálový list korozivzdorné oceli X5CrNiCuNb16-4
- Příloha 2 Materiálový list nástrojové oceli X3NiCoMoTi18-9-5
- Příloha 3 Výkres zkušebního tělíska pro tahovou zkoušku
- Příloha 4 Výkresová dokumentace plynového analyzátoru

## Příloha 1

### Materiálový list korozivzdorné oceli X5CrNiCuNb16-4

<b>WNr.</b> (číslo materiálu) <b>1.4542</b>					<b>Cr-Ni-Cu-Nb vytvrditelná korozivzdorná ocel</b>					<b>OCEL</b> Kurznázev (značka) <b>X5CrNiCuNb16-4</b>
<b>Chemické složení [hm. %]</b>										
C <sup>1)</sup>	Si	Mn	P	S <sup>2)</sup>	Cr	Ni	Cu	Mo	Nb	
max 0,07	max 0,70	max 1,50	max 0,040	max 0,015	15,0– 17,0	3,00– 5,00	3,00– 5,00	max 0,60	5x C až 0,45	
<b>Normy DIN</b>										
DIN EN 10088/1-3-97 – korozivzdorné oceli										
<b>Mechanické vlastnosti</b>										
Polotovary		pás válcovaný za studena				plech válcovaný za tepla				
Rozměr t, d [mm]		≤ 6				≤ 50				
Stav		po rozpouště- cím žhání <sup>3)</sup>		vytvrzený <sup>4)</sup>		vytvrzený <sup>5)</sup>				
				P1300	P900	P1070	P950	P850	SR 630 <sup>6)</sup>	
Mez kluzu R <sub>p</sub> 0,2 [MPa] min		–		1 150	700	1 000	800	600	–	
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]		max 1275		min 1300	min 900	1070–1270	950–1150	850–1050	max 1050	
Tažnost A <sub>80</sub> nebo A [%] min		5		3	6	–	–	–	–	
Tažnost A <sub>80</sub> [%] (t < 3) min		–		–	–	8	10	12	–	
Tažnost A [%] (t ≥ 3) min		–		–	–	10	12	14	–	
Tvrdość HB		–		–	–	–	–	–	–	
Modul pružnosti E [GPa]		200								
Polotovary		válcovaný drát, tyč								
Rozměr t, d [mm]		≤ 100								
Stav		po rozpouš- tícím žhání		vytvrzený						
				P800	P930	P960	P1070			
Mez kluzu R <sub>p</sub> 0,2 [MPa] min		–		520	720	790	1000			
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]		max 1 200		800–950	930–1 100	960–1 160	1 070–1 270			
Tažnost A [%] podél min		–		18	16	12	10			
Kontrakce Z [%]		–		–	–	–	–			
Nárazová práce KV [J] podél min		–		75	40	–	–			
Tvrdość HB max		360		–	–	–	–			
Modul pružnosti E [GPa]		200								
Hodnoty modulu pružnosti E [GPa] při zvýšených teplotách										
Teplota [°C]		100		200		300		400		
Modul pružnosti E [GPa]		195		185		175		170		
Min hodnoty meze kluzu R <sub>p</sub> 0,2 [MPa] při zvýšených teplotách (stav vytvrzený)										
Teplota [°C]		100		150		200		300		
Mez kluzu R <sub>p</sub> 0,2 [MPa] P800		500		490		480		470		
P850, P930		680		660		640		620		
P950, P960		730		710		690		670		
P1070		880		830		800		770		

<b>Fyzikální vlastnosti</b>				
Hustota $\rho$ [kg . m <sup>-3</sup> ]	Měrné teplo $C_p$ [J . kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	Teplotní součinitel roztlačnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivost $\lambda_t$ [W . m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	Rezistivita [ $\Omega$ . mm <sup>2</sup> . m <sup>-1</sup> ]
7 800	500	10,9 . 10 <sup>-6</sup>	16	0,71
<b>Technologické údaje</b>				
<b>TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ</b>				
rozpouštěcí žíhání	1 025–1 055 °C	ochlazovat na vzduchu		
žíhání ke snížení pnutí	600–660 °C <sup>7)</sup>	min 4 hodiny (na jakost SR630)		
vytvrzování	470–490 °C	1 hodina (na jakost P1300) – plech, pás		
	540–560 °C	1 hodina (na jakost P1070) – plech, pás		
	550 °C	4 hodiny (na jakost P1070) – drát, tyč		
	590 °C	4 hodiny (na jakost P960) – drát, tyč		
	580–600 °C	1 hodina (na jakost P950) – plech, pás		
	620 °C	4 hodiny (na jakost P930) – drát, tyč		
	590–610 °C	1 hodina (na jakost P900) – plech, pás		
	610–630 °C	4 hodiny (na jakost P850) – plech, pás		
	760 °C/2h + 620 °C/4 h	(na jakost P800) – drát, tyč		
<b>TVAŘITELNOST</b>				
teploty tváření	1 150–900 °C	ochlazovat na vzduchu		
<b>SVARĚTELNOST</b>				
svařitelná elektrickým obloukem, metodami pod ochrannou atmosférou, odporově i plamenem				
doporučený přídavný materiál	X5CrNiCuNb16-4			
<b>OBROBITELNOST</b>				
dobrá u oceli se zaručeným obsahem S = 0,015–0,030 %				
<b>Použití</b>				
Materiál na šrouby a vřetena v armaturách, kola a víka kompresorů.				
<b>Ostatní vlastnosti</b>				
ocel je magnetovatelná				

<b>Porovnání se zahraničními materiály</b>					
<i>ISO</i>		<i>EURO</i>		<i>Česká republika</i>	
1	ISO 683/16	X5CrNiCuNb16-4	EN 10088/1-3-97	X5CrNiCuNb16-4	ČSN EN 10088/1-3-97
<i>Francie</i>		<i>Velká Británie</i>		<i>Rusko</i>	
Z6CNU17-04	NF A35-558-83	X5CrNiCuNb16-4	BS EN 10088/1-3-97	–	–
Z6CNU17-04	NF A35-581-84				
Z7CNU15-05	NF A35-574-90				
X5CrNiCuNb16-4	NF EN 10088/1-3-97				
<i>USA</i>		<i>Japonsko</i>		<i>Kanada</i>	
630	AISI	SUS 630	JIS G4303-91	–	–
Type 630	–	SUS 630	JIS G4305-91		
		SCS 24	JIS G5121-91		
<i>Itálie</i>		<i>Rakousko</i>		<i>Švédsko</i>	
V 174	–	X5CrNiCuNb16-4	ÖNORM EN 10088/1-3-97	X5CrNiCuNb16-4	SS EN 10088/1-3-97
X5CrNiCuNb16-4	UNI EN 10088/1-3-97				
<i>Polsko</i>		<i>Maďarsko</i>		<i>Norsko</i>	
–	–	–	–	X5CrNiCuNb16-4	NS EN 10088/1-3-97
<i>Finsko</i>		<i>Švýcarsko</i>		<i>Španělsko</i>	
X5CrNiCuNb16-4	SFS EN 10088/1-3-97	X5CrNiCuNb16-4	EN 10088/1-3-97	X5CrNiCuNb16-4	UNE EN 10088/1-3-97
<i>Austrálie</i>		<i>Belgie</i>		<i>Bulharsko</i>	
630	AS 2837-86	X5CrNiCuNb16-4	NBN EN 10088/1-3-97	–	–
<i>Brazílie</i>		<i>Čína</i>		<i>Jugoslávie</i>	
V-630	Br-800	0Cr17Ni4Cu4Nb	GB 1221-84	–	–
		0Cr17Ni4Cu4Nb	GB 1220-92		
<b>Poznámky</b>					
1) při objednávání je možné dohodnout užší rozmezí obsahu uhlíku					
2) pro tyče, válcované dráty, profily a odpovídající předvýrobky platí $S \leq 0,030 \%$ ; pro všechny výrobky určené k obrábění je povolen obsah $S = 0,015-0,030 \%$					
3) dodávaný stav					
4) stav použití; mohou být dohodnuty jiné vytvrzované teploty					
5) pokud je dodáno v konečném stavu zpracování					
6) žháný ke snížení prutí					
7) po martenzifické transformaci je nutné před vytvrzováním rozpouštěcí žhání					

## Příloha 2

### Materiálový list nástrojové oceli X3NiCoMoTi18-9-5

<b>WNr.</b> (číslo materiálu) <b>1.2709</b>	Nástrojová legovaná, martenziticky vytrvditelná ocel pro práci za studena i za tepla						<b>OCEL</b> Kurzname (značka) <b>X3NiCoMoTi18-9-5</b>		
<b>Chemické složení [hm. %]</b>									
C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Mo	Ni	Ti
max 0,03	max 0,10	max 0,15	max 0,010	max 0,010	8,50–10,0	max 0,25	4,50–5,20	17,0–19,0	0,80–1,20
<b>Normy DIN</b>									
SEW 200-69 SEW 250-70 SEL – VDE									
<b>Polotovary</b>									
tvářená tyč									
<b>Mechanické vlastnosti</b>									
Určené pro práci za	tepla	studena	–			tepla	studena		
Slav	žháný na měkko	žháný na měkko	vytvrzený			vytvrzený <sup>1)</sup>	vytvrzený <sup>1)</sup>		
Mez kluzu R <sub>e</sub> [MPa]	–		–			–		–	
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]	950–1 000	950–1 100	~ 2 000			1 900–2 000	1 900–2 000		
Tažnost A <sub>5</sub> [%]	–		–			–		–	
Kontrakce Z [%]	–		–			–		–	
Nárazová práce [J]	–		–			–		–	
Tvrdość HB max	281–300		281–325			–		–	
Tvrdość HRC	–		–			~55	54–55	54–55	
<b>Fyzikální vlastnosti</b>									
Hustota ρ [kg . m <sup>-3</sup> ] 7 850									
<b>Technologické údaje</b>									
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ									
žhání na měkko	820–850 °C		ochlazovat na vzduchu (pro práci za studena)						
	840 °C		ochlazovat na vzduchu (pro práci za tepla)						
vytvzování	490 °C		2–3 h – pro práci za studena						
	480 °C		2–3 h – pro práci za tepla						
popouštění	–		po vytvrzení se nepopouští						
informativní změny tvrdosti po vytvrzování (Ž. t. 830 °C/vzduch)									
vytvzovací teplota [°C]	400	450	500	550	600	650			
tvrdost HRC	51	54	55	54	50	47			
TVAŘITELNOST									
teploty tváření 1 100–900 °C									

## Použití

Ocel je zvláště vhodná na členité nástroje s požadavkem na minimální deformace a změny rozměrů po tepelném zpracování

Pro práci za studena

Pěchovadla, lisovníky, lisovací matrice, střížníky a nástroje pro ražení.

Pro práci za tepla

Tepelně méně až běžně namáhané nástroje pro práci za tepla, např. zápustky a zápustkové vložky na lisy a zejména formy, včetně jejich vložek, pro tlakové lití lehkých kovů a jejich slitin.

## Porovnání se zahraničními materiály

ISO		EURO		Česká republika	
–	–	–	–	(19 902)	ČSN 41 9902
Francie		Velká Británie		Rusko	
(X2NiCoMoTi18-8-5)	NF A35-590-92	–	–	–	–
USA		Japonsko		Kanada	
–	–	–	–	–	–
Itálie		Rakousko		Švédsko	
–	–	–	–	–	–
Polsko		Maďarsko		Norsko	
–	–	–	–	–	–
Finsko		Švýcarsko		Španělsko	
–	–	–	–	–	–

## Poznámky

<sup>1)</sup> doporučené hodnoty



