

# Posouzení mechanických vlastností 3D tisknutých a tvářených dílů z nástrojové oceli H13

# Bakalářská práce

Studijní program: Studijní obor:

Autor práce: Vedoucí práce:

Konzultant práce:

B2301 Strojní inženýrství Strojní inženýrství

Petr Moc doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D. Katedra strojírenské technologie

Ing. Iva Nováková, Ph.D. Katedra strojírenské technologie



# Zadání bakalářské práce

# Posouzení mechanických vlastností 3D tisknutých a tvářených dílů z nástrojové oceli H13

Jméno a příjmení:	Petr Moc
Osobní číslo:	S18000348
Studijní program:	B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojní inženýrství
Zadávající katedra:	Katedra strojírenské technologie
Akademický rok:	2020/2021

#### Zásady pro vypracování:

- 1. Seznamte se teoreticky s podstatou 3D tisku kovových prášků pomocí metody SLM.
- 2. Proveďte rešerši současného stavu poznání v oblasti 3D tisku oceli AISI H13.
- 3. Seznamte se s podstatou tepelného zpracování a sekundárního vytvrzování oceli AISI H13.
- Seznamte se s podstatou provádění mechanických zkoušek (statická zkouška tahem, rázová zkouška v ohybu, měření tvrdosti dle Vickerse).
- 5. Seznamte se s podstatou tribologických zkoušek definujících odolnost proti opotřebení.
- Proveďte návrh experimentů pro posouzení vlastností tvářených a 3D tisknutých zkušebních vzorků.
- 7. Proveďte experimentální program a výsledky zpracujte.
- 8. Proveďte zhodnocení výsledků a jejich diskuzi.

Rozsah grafických prací: Rozsah pracovní zprávy: Forma zpracování práce: Jazyk práce: tabulky, grafy cca 30 tištěná/elektronická Čeština



#### Seznam odborné literatury:

 GIBSON, I., D.W. ROSEN a B. STUCKER. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.

[2] NOORANI, R. Rapid Prototyping: principles and applications. Hoboken: John Wiley and Sons, 2006. ISBN 0-471-73001-7.

[4] AWS Welding Handbook: Welding Science and Technology. 9th Ed., Vol.1, 2001.

[5] ČSN EN ISO 6892 Kovové materiály ? zkouška tahem.

[6] ČSN EN ISO 6507 Kovové materiály ? zkouška podle Vickerse.

[7] ČSN EN ISO 14556 Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-vrubem – Instrumentovaná zkušební metoda.

[8] Tribology Handbook, Friction wear lubrication, Vol. 1, Edited by Prof. I. V. Kragelsky and V. V. Alisin (Translated from the Russian by Felix Palkin and Valerian Palkin), English translation, Mir Publishers, 1981.

[9] TAISHO HASEGAWA. Tribology research trends, Nova Science Publishers, Inc., 2008 New York [10] Tribologické zkoušení dle norem ASTM G99 (ASTM G99-95), ASTM G133 a DIN 50324

L.S.

Vedoucí práce:	doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D. Katedra strojírenské technologie
Konzultant práce:	Ing. Iva Nováková, Ph.D. Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 15. listopadu 2020 Předpokládaný termín odevzdání: 15. května 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D. vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2020

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

8. ledna 2021

Petr Moc



# Anotace

Bakalářská práce řeší problematiku v oblasti aditivních technologií, zejména u kovových materiálů. V teoretické části jsou popsány jednotlivé metody 3D tisku kovových prášků, kde se pozornost přiklání k technologii SLM. Dále se práce zaměřuje na mechanické zkoušení materiálů, konkrétně na podstatu statické zkoušky tahem, Charpyho rázové zkoušky v ohybu, zkoušky tvrdosti dle Vickerse a tribologického zkoušení materiálu metodou Ball–on–Disc. Experimentální část práce je zaměřena na vliv různých druhů tepelného zpracování na vlastnosti oceli AISI H13. V práci jsou dále porovnány mechanické a tribologické vlastnosti 3D tisknutých SLM vzorků se vzorky tvářenými a tepelně zpracovávanými za různých podmínek. Porovnání je provedeno jak při teplotě okolí, tak za zvýšených teplot, protože nástroje z oceli AISI H13 mohou pracovat při teplotách až 500 °C.

# Klíčová slova

Aditivní technologie, 3D tisk, metoda SLM, nástrojová ocel AISI H13, mechanické vlastnosti, tribologické vlastnosti, opotřebení

# Annotation

The bacular thesis solves problematics in the field of additive technologies, especially for metallic materials. In the theoretical part are described individual methods of 3D printing metal powders, where attention is focused on SLM technology. Furthermore, the thesis focuses on mechanical testing of materials, specifically on the basis of static tensilce tests, Charpy impact tests in bending, Vickers hardness tests and tribological testing of materials by the Ball-on-Disc method. The experimental part of thesis is focused on the influence of different types of heat treatment on the properties of AISI H13 steel. The thesis also compares the mechanical and tribological properties of 3D printed SLM samples with samples formed and heat treated under different conditions. The comparison is made both in ambient temperature and in elevated temperatures, because tools made of AISI H13 steel can operate at temperatures up to 500  $^{\circ}$ C.

# Key words

Additive technology, 3D printing, SLM method, AISI H13 tool steel, mechanical properties, tribological properties, wear



# Poděkování

"Nejprve bych chtěl z velké části poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za jeho přínosné rady, profesionální přístup a ochotu konzultovat jakékoliv nejasnosti. Dále mé poděkování směřuje také k doc. Ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D., Ing. Totce Bakalové, Ph.D. a Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za jejich výpomoc při realizaci experimentů a rovněž za poskytnuté rady. Děkuji i Katedře strojírenské technologie za možnost zpracovat mojí práci v jejích prostorách a s pomocí jejími zařízeními. A v poslední řadě děkuji mé rodině, přítelkyni a přátelům z blízkého okolí za jejich podporu při celém trvání studia."

# Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů					
1 1	Úvod				
2	2 Teoretická část práce				
2.1	Ná	ástrojové oceli			
	2.1.1	Ocel AISI H1314			
2.2	Ро	odstata a rozdělení metod 3D tisknutých kovových dílů			
	2.2.1	Podstata 3D tisku metodou SLM 19			
	2.2.2	Rešerše v oblasti 3D tisků dílů z materiálu AISI H13 22			
2.3	M	echanické zkoušky			
	2.3.1	Statická zkouška tahem			
	2.3.2	Zkouška rázem v ohybu			
	2.3.3	Zkouška tvrdosti podle Vickerse			
	2.3.4	Tribologické zkoušky			
	2.3.	4.1 Tribologická metoda Ball–on-Disc			
3 1	Experi	mentální část			
3.1	Te	pelné zpracování tvářených dílů AISI H13			
3.2	3E	) tisk vzorků metodou SLM z materiálu AISI H13			
3.3	Р	osouzení mechanických vlastností SLM a tvářených vzorků			
	3.3.1	Zkoušení tvrdosti podle Vickerse			
	3.3.2	Statická zkouška tahem při pokojové teplotě			
	3.3.3	Statická zkouška tahem za zvýšených teplot46			
	3.3.4	Zkouška rázem v ohybu49			
3.4	Zk	oušení tribologických vlastností			
	3.4.1	Hodnocení koeficientu tření v závislosti na teplotě a způsobu výroby			
		materiálu53			



3.4.2 Ho	odnocení míry opotřebení třecí dvojice v závislosti na	teplotě		
a z	působu zpracování materiálu	55		
3.4.2.1 Hloubka profilu opotřebení zkoušeného materiálu				
3.4.2.2 Šířka profilu opotřebení zkoušeného materiálu				
3.4.2.3	Opotřebení zkušební kuličky	60		
4 Diskuze do	osažených výsledků	62		
Závěr		69		
Zdroje a literatura				



# Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Název	Jednotky
AISI	American Iron and Steel Institute	-
ASTM	ASTM American Society for Testing and Materials	
СТ	CT Computer Tomography	
DMD	Direct Metal Deposite	-
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	-
EBM	Electron Beam Melting	-
FDM	Fused Deposition Modeling	-
ISO	International Organization for Standardization	-
LENS	Laser Engineered Net Shaping	-
LOM	Laminated Object Manufacturing	-
RT	Room Temperature	-
RPI	Rapid Product Inovations	-
SLA	Stereolitography	-
SLM	Selective Laser Sintering	-
SLS	Selective Laser Sintering	-
VED	Volumetric Energy Density	-
А	tažnost	%
$d_1, d_2$	velikost úhlopříček při zkoušce dle Vickerse	mm
d	aritmetický průměr délek obou úhlopříček	mm
F	zatěžující síla	N
F <sub>max</sub>	maximální zatěžující síla	N
G	tíhová síla	N
Н	počáteční výška kladiva vzhledem ke zkoušenému vzorku (rázová zkouška)	mm
HB	tvrdost podle Brinella	-
HV	tvrdost dle Vickerse pro běžné zkušební zatížení 300 N	-
h <sub>1,2,3</sub>	poloha kladiva (rázová zkouška)	mm
K	Absorbovaná energie	J
KC	vrubová houževnatost	J·cm <sup>-2</sup>
KCV	vrubová houževnatost s tvarem vrubu "V"	J·cm <sup>-2</sup>
k	součinitel proporcionality	-

9



L <sub>0</sub>	počáteční délka zkušební tyče	mm
Lu	konečná délka zkušební tyče	mm
Re	mez pevnosti v tahu	MPa
R <sub>eh</sub>	horní mez kluzu (tahová zkouška)	MPa
R <sub>el</sub>	dolní mez kluzu (tahová zkouška)	MPa
$\overline{R_f}$	hodnota napětí těsně před přetržení (skutečný diagram)	MPa
R <sub>m</sub>	mez pevnosti v tahu (smluvní diagram)	MPa
R <sub>p 0,2</sub>	smluvní mez kluzu rovna napětí při vytvoření paralelní přímky v 0,2 % L <sub>0</sub>	MPa
Rr 0,2	mez kluzu určená z trvalé deformace po odlehčení	MPa
R <sub>t 1,0</sub>	mez kluzu určená z celkové deformace pod zatížením	MPa
$S_0$	počáteční průřez zkušební tyče	mm <sup>2</sup>
Sr	průřez při dosažení meze pevnosti (s trhlinou)	mm <sup>2</sup>
Su	okamžitý průřez	mm <sup>2</sup>
Т	teplota	°C
t	čas	min
Z	kontrakce	%
α, β	úhel kladiva vzhledem k ose před (α) (rázová zkouška), nebo úhel hrotu (α) 136° (dle Vickerse)	0
β	úhel kladiva vzhledem ke svislé ose po přeražení (rázová zkouška)	0
$\Delta_{l,}\Delta_{u,}\Delta_{z}$	absolutní prodloužení	mm
$\epsilon, \epsilon_r, \epsilon_u, \epsilon_z$	poměrné prodloužení	-
σ	smluvní napětí	MPa
σ	skutečné napětí	MPa
$\overline{\sigma}_{m}$	mez pevnosti (skutečný diagram)	MPa
$\sigma_t$	tečné napětí vlivem teplotní roztažnosti	MPa

# 1 Úvod

V dnešní době je kladen značný důraz na rychlost dodání zboží, jeho kvalitu, mnohdy i kvantitu a zároveň na nízkou cenu. Udržením této bilance v rovnováze je vyvíjen značný tlak na výrobní průmyslová odvětví i na jednotlivé firmy, zejména strojírenského typu. Zároveň je zapotřebí udržovat vývojový a inovační krok s konkurencí. Pro velkou část výrobních složek není jednoduché takovou rovnováhu udržet, a proto upřednostňují pouze některá z těchto kritérií, které si navzájem neodporují. Pro firmy je velmi složité udržovat závazek k dodavateli a přepravci, zejména v případech, kdy selhání výrobku nebo služby může způsobit zhroucení celého systému. V takových případech není třeba věnovat pozornost pouze ekonomickým problémům, jenž řeší cenu nabídnutého materiálu, ze kterého je například daný nástroj, či výrobek zhotoven, nebo logistickému časování a plánování tras. Je možné se vydat i cestou aditivních technologií, které umožní částečně eliminovat výše uvedené dva faktory. 3D tisk z kovových prášků je částečným řešením předchozích problémů, minimálně v následujících letech. Nicméně i přes nesporný rozvoj této technologie, není jeho stabilita a nezávislost zcela dořešena.

Variabilita aktuálních možností kovových prášků pro tisk aditivními technologiemi je velmi rozsáhlá, ale výsledný výrobek, jeho struktura a kvalita povrchu vyžadují následné technologické zpracování pro zlepšení mechanických i užitných vlastností. Proto se tato práce zaměřuje na porovnání mechanických a technologických vlastností dílů z nástrojové oceli AISI H13 zhotovených z tvářených ocelí a 3D tiskem. Cílem je posoudit podmínky, za kterých je výhodnější použít aditivně vytvořené díly jak z pohledu efektivity, rychlosti a ceny, tak také z pohledu mechanických a tribologických vlastností, tedy z pohledu předpokládané životnosti.

# 2 Teoretická část práce

Bakalářská práce se zabývá posouzením mechanických a tribologických vlastností 3D tisknutých dílů z nástrojové oceli AISI H13. V teoretické části bude stručně charakterizována podstata 3D tisku kovových prášků, přičemž bude pozornost věnována zejména metodě SLM (Selective Laser Melting), pomocí níž budou vyrobeny zkušební vzorky. Dále budou podrobně popsány vlastnosti a praktické využití materiálu AISI H13 včetně rešerše současného stavu poznatků v oblasti 3D tisku této oceli. Součástí teoretické části práce bude také popis mechanických zkoušek (statická zkouška tahem, rázová zkouška ohybem a způsob měření tvrdosti dle Vickerse), které budou využity v následující experimentální části práce. Na závěr bude definována podstata tribologického testování metod, které k tomu lze využít.

# 2.1 Nástrojové oceli

Pod pojem nástrojové oceli je možné zařadit slitiny používané k výrobě nástrojů, matric a forem, kterými se tvarují, formují, případně obrábějí jiné materiály, včetně ocelí, neželezných kovů nebo plastů. Obecně se nástrojové oceli dělí do tří skupin: oceli uhlíkové, slitinové a rychlořezné. Podle použití a provozního namáhání mohou být ale děleny na řezné nástroje, nástroje pro tváření, měřící nástroje a pomocné nástroje (přípravky) [1].

 Uhlíkové nástrojové oceli se používají na výrobu menších, méně namáhaných nástrojů. Jejich nevýhodou je poměrně rychlý pokles tvrdosti vlivem popouštění při ohřevu. Na řezné nástroje se volí oceli s větším obsahem uhlíku, cca 0,7 až 1,4 %, na nástroje ke stříhání oceli s 0,5 až 1,2 % C. U nástrojů na obrábění dřeva bývá obsah uhlíku obvykle nižší než u nástrojů na obrábění kovů. Nástroje pracující rázem (kladiva, pneumatické nářadí) musí být sice tvrdé, ale také dostatečně houževnaté a mívají nejvýše 1 % C. Dle ČSN se jedná o třídy 19 0XX, 19 1XX a 19 2XX [2].



- 2) Slitinové nástrojové oceli se volí pro více namáhané nástroje. Jsou legovány zejména V, Cr, W, Mo, Si, Mn, Ni, ve vhodné kombinaci. Trvanlivost ostří řezných nástrojů zvyšuje přísada karbidotvorných prvků (Cr, V, W). Legující prvky také usnadňují kalení a zabraňují vzniku trhlin. Celkové množství legur bývá 3 až 5 %. Legury posunují eutektoidní obsah i maximální rozpustnost C v austenitu k nižším koncentracím. Proto se může v jejich struktuře objevit ledeburit při obsahu značně nižším, než udává eutektoidní bod v binárním diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C. Dle ČSN se jedná o třídy 19 3XX až 19 7XX [2].
- 3) Rychlořezné nástrojové oceli základním faktorem omezujícím použití je teplota, na kterou se nástroj ohřeje. Při dané teplotě nesmí dojít k popuštění, a tedy ke ztrátě tvrdosti. Rychlořezné oceli mají zpravidla 0,7 až 1,3 % C. Hlavními legury v celkovém množství 15 až 22 %, jsou W, Cr a V, přičemž W bývá až 18 %. Pro zvýšení tuhého roztoku za vyšších teplot je přidáván Co, až do 10 %. Maximální rozpustnost uhlíku v austenitu je u těchto ocelí 0,7 %, proto mají částečně ledeburitickou strukturu. Dle ČSN se jedná o třídu 19 8XX [2].

Mnoho výrobců klasifikuje v současnosti nástrojové oceli podle systému AISI (American Iron and Steel Institute). Toto uspořádání je bráno za výchozí bod pro výběr správné oceli pro danou funkci z velmi širokého rozsahu využitelnosti. Pomocí klasifikace dle AISI jsou oceli rozdělovány do skupin, kterými se stanovují významné charakteristické vlastnosti. Mezi nimi jsou zastoupeny skupiny dle legování (např. wolframové, molybdenové rychlořezné oceli), dle použití (pro práci za studena, pro práci za tepla), nebo dle tepelného zpracování (např. při kalení vodou či olejem). Pro snadnější pochopení je dělení nástrojových ocelí shrnuto v tab. 2.1 [1].



Skupina	Identifikační symbol
Vodou chlazené nástrojové oceli	W
Nástrojové oceli odolné proti rázům	S
Olejem kalená nástrojová ocel pro tváření za studena	0
Vzduchem chlazené-středně legované nástrojové oceli pro tváření za studena	А
Vysoce uhlíkové oceli s vysokým obsahem chromu pro tváření za studena	D
Oceli pro formy	Р
Oceli pro obrábění za tepla chrom, wolfram a molybdenové	Н
Vysokorychlostní wolframové nástrojové oceli	Т
Vysokorychlostní molybdenové nástrojové oceli	М

 Tab. 2.1 ASME identifikace nástrojových ocelí dle oblasti použití [1]

### 2.1.1 Ocel AISI H13

Nástrojové oceli AISI H13 (1.2344 – označení dle ČSN EN 10027-2; X40CrMoV5-1 – označení dle ČSN EN 10027-1) jsou známy také jako chromové oceli určené pro horké pracovní nástroje, využívané v nástrojových aplikacích za tepla i za studena. Dalšími oblastmi využití jsou například formy pro tlakové lití neželezných kovů, části malých a středních zápustek, části forem na plasty, nebo nože pro stříhání za tepla či protlačování za tepla [3]. Tato ocel je klasifikována jako ocel skupiny H, kdy se řada těchto ocelí pohybuje od H1 do H19. Nástrojová ocel H13 se vyznačuje především dobrou odolností proti oděru při nízkých i vysokých teplotách. Mezi další výhody je řazena vysoká úroveň houževnatosti a tažnosti, velmi dobrá obrobitelnost a leštitelnost [4]. Dobře snáší teplotní rázy a nástroje lze chladit vodou. Z hlediska tepelného zpracování je velmi dobře prokalitelná i ve větších rozměrech. Má také dobrou tepelnou vodivost, naopak za nevýhodu se může považovat špatné broušení této oceli [3]. V následujících tabulkách je uvedeno chemické složení, fyzikální vlastnosti a mechanické vlastnosti oceli AISI H13, viz tab. 2.2, tab. 2.3 a tab. 2.4.

Prvek	С	Cr	Mn	Mo	V	Si	Fe
Množství	0,32 -	4,75 -	0,20 -	1,10 -	0,80 -	0,80 -	7. ustatal
[%]	0,45	5,50	0,60	1,75	1,20	1,25	Lustatek

14

63 I.



Veličina	Hodnota
Hustota [kg ⋅ m <sup>-3</sup> ]	7800
Součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	28,6
Teplota tání [°C]	1427
Součinitel teplotní objemové roztažnosti [K <sup>-1</sup> ]	10,4· 10 <sup>-6</sup>

 Tab. 2.3 Fyzikální vlastnosti oceli AISI H13 udávané firmou AZO Materials [6]

Tab. 2.4 Mechanické vlastnosti oceli AISI H13 udávané firmou ATM STEEL [7]

Vlastnosti	Hodnoty
Mez pevnosti v tahu (20 °C)	1200-1590 MPa
Mez úměrnosti (20 °C)	1000-1380 MPa
Zmenšení plochy	50 %
Modul pružnosti E	215 GPa
Possionův poměr	0,27-0,30

#### 2.2 Podstata a rozdělení metod 3D tisknutých kovových dílů

Vrstvení materiálu je známo již několik desítek let, ale pojem 3D tisk, též známý jako aditivní výroba byl vyvinut v 80. letech minulého století. Podstata této metody spočívá v tom, že pomocí numerického kódu vzatého z počítačového návrhu, jako CAD model (Computer Aided Design), jsou informace posílány do 3D tiskárny. Jedním z prvních, kdo se touto problematikou začal podrobněji zabývat byl Charles Hull, který si v polovině 80. let nechal patentovat sterelitografický přístroj (SLA). Tento přístroj pracuje na principu, pomocí kterého je využito UV světla k vytvrzení polymerní pryskyřice v nádobě k výrobě prototypu [8].

Potenciál spočívající ve zdokonalení a investičním rozvoji tohoto odvětví rozpoznal zejména automobilový, lodní, letecký a kosmický průmysl, kde je možné při výrobě prototypových dílů snížit množství odpadního materiálu, výrobní časy a jednorázové náklady. Za největší výhodu v porovnání s konvenční výrobou se pokládá tvarová variabilita a krátký časový interval výroby. Nicméně za nedostatky 3D tisku lze považovat relativně špatný povrch vyrobeného dílu, tedy nutnost následného opracování



#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní

a obtíže se zavedením do sériové výroby. Proto se vyskytuje výroba prozatímně u prototypů [9].

Technologie 3D tisku je popsána jako zhotovení 3D prostorového hmotného objektu libovolného tvaru přímo z numerického popisu (nejčastěji CAD) rychlým, plně automatizovaným a vysoce flexibilním postupem bez pomocí jakéhokoliv nástroje. Materiály využívané při 3D tisku se rozdělují do několika skupin: plasty, keramika, materiály s přídavkem dřeva a pro tuto práci nejdůležitější – kovy [4]. Materiál může být dodáván v podobě prášku, fólií nebo drátů navinutých na cívce. Jako vstupní údaje lze považovat vytvořený model pomocí CAD softwaru, případně může být již hotový model může být naskenován pomocí 3D skeneru, nebo pomocí CT (Computer Tomography). Druhým krokem je převod dat do STL formátu, který v oboru rapid prototyping je vybrán jako výchozí formát, protože rozdílné CAD softwary používají různé algoritmy k popisu pevných objektů. V dalším kroku je zahrnuto tzv. rozdělení STL souboru do 2D vrstev pomocí proprietárního softwarového programu, který je poskytnut výrobcem 3D zařízení zhotovujícím tento model. V posledním kroku této operace je samotná výroba součásti. Po uložení do správného formátu jsou informace poslány do stroje a následuje 3D tisk. Ten se už příliš neliší od klasického tisku s tím rozdílem, že zde není tištěna pouze jedna vrstva, ale vrstvení je realizováno pomocí posuvu stolu v Z - ové souřadnici. Stroje pro 3D tisk jsou v dnešní době plně automatizované, a proto mohou pracovat po nastavení a spuštění první operace zcela samostatně. Na závěr je díl vytažen ze zařízení a následuje jeho čištění, případné vytvrzování, nebo může nastat odstranění podpůrných materiálů, broušení nebo například lakování [8].

Mezi základní typy 3D tisku kovových prášků se zařazují především SLS, DMLS, LOM, LENS, EBM, SLM, DMD.

Selective laser sintering (SLS) – Proces aditivní výroby, kdy je materiál dodáván ve formě prášku, který je rozprostírán v tenké vrstvě po celé pracovní oblasti [12]. Jako zdroj tepla je použit laserový paprsek soustředěný do místa tvořícího se modelu, viz obr. 2.1. První vrstva vytvořena procesem slinování kovového prášku je definována geometrií danou v předem zhotoveném CAD modelu. Po dokončení trajektorie laseru po celé geometrii první vrstvy je základní plocha posunuta směrem dolů a proces se stále opakuje až k úplnému zhotovení výrobku. U této metody není prášek úplně roztaven. Vytváří se tedy póry nepříznivě ovlivňující strukturu a pevnost modelu,





proto je nutná následná povrchová úprava, jako je pískování, leštění nebo čištění ultrazvukem. Pracovní prostor je vyplněn inertním plynem (nejčastěji N) z důvodu zamezení oxidace [10-13].



Obr. 2.1 Princip metody SLS [12]

**Direct metal laser sintering (DMLS)** – Metoda DMLS vyvinuta německou firmou EOS (Electro Optical Systems) v roce 1995 ve spolupráci s RPI (Rapid Product Innovations). Tímto procesem je umožněna současná výroba různých tvarově odlišných součástí a zároveň nabízí široký rozsah vlastností (od úmyslné porozity pro odvzdušnění či filtraci, až po plně homogenní struktury). DMLS se velmi podobá metodě SLS, jenž je znázorněna na obr. 2.1. Hlavním rozdílem je výkon laseru (200–400 W) potřebný k úplnému roztavení kovového prášku k podkladové vrstvě. Dále se dosahuje poměrně přesné tolerance ( $\pm$  0,1mm) z důvodu relativně malému posunu v ose Z (20 µm). Škála materiálů je poměrně široká [14]. Mohou být použity lehké kovy a jejich slitiny, oceli, nebo super-slitiny [15].

Laser Engineered Net Shaping (LENS) - Při tomto procesu se k tavení kovového prášku využije vysokovýkonného laseru a nanášecí hlava přivádějící materiál koaxiálně do ohniska laserového paprsku, viz obr. 2.2. Laserový paprsek je zaostřen pouze na malé místo pomocí jedné nebo více čoček. Stůl se pohybuje v souřadnicích XY rastrovým způsobem, a tím je vytvořena jednotlivá vrstva vyráběného objektu. Hlava





se poté pohybuje svisle nahoru k dokončení následujících vrstev. Materiál je distribuován buď za použití tlaku nosného plynu nebo gravitace. Celý proces se uskutečňuje v komoře inertního plynu, nebo ve vakuu k ochraně lázně taveniny. Mezi nejčastěji používané materiály se řadí korozivzdorné oceli, měď, hliník aj. [9].



Obr. 2.2 Princip LENS [9]

**Electron Beam Melting (EBM)** – Je proces aditivní výroby, při kterém, jak z názvu vyplývá, je použit k tavení kovových prášku elektronový paprsek. Technologie je jako ostatní metody zařazena do kategorie lokálního tavení práškového lože a podstata metody je znázorněna na obr. 2.3. Tloušťka vrstvy v této metodě dosahuje 100 μm a paprsek se pohybuje rychlostí 500 mm.s<sup>-1</sup>. Výkon zdroje se rapidně liší od ostatních metod, dosahuje až 5 kW. Prostředí, v němž je proces vykonáván je vakuum. Za jeho další výhody se považuje minimalizování kontaminace (oxidace) prostředí a také dobré tepelné vlastnosti prostředí umožňující vhodnou tvarovou stabilitu a řízenou tepelnou rovnováhu v součásti. V komoře je udržována teplota asi 700 °C (oproti SLS, DMLS, SLM, kde teplota vyhřívané základové desky nepřekročí 300 °C). Konečný výrobek je získán v podobě dílu, který je schopen splnit přísné požadavky na pevnost a strukturu. Finalizaci tvaru a povrchu lze snadno dokončit konvenčními metodami, jako jsou vysokorychlostní frézování, broušení a soustružení. [16]





Obr.2.3 Princip EBM [17]

### 2.2.1 Podstata 3D tisku metodou SLM

Aditivní výroba se může rozdělit na celou řadu technologií. Obecně může být rozdělena do sedmi hlavních tříd založených na principu, ve kterém se vrstva vytváří fotopolymerizací, vytlačováním, laminováním, nanášení paprskem, přímým tiskem, tryskovým tiskem pojiva s práškovým ložem a fúze práškového lože. SLM metoda se zaměřuje na poslední z této skupiny technologií, kde ke spojení prášku je použita energie soustředěného paprsku. Jako zdroj může být aplikován elektronový nebo pro tuto práci výhodnější laserový paprsek. Schéma principu metody SLM je znázorněno na obr. 2.4. V tomto provedení je píst s předepsanou dávkou prášku zvedán směrem nahoru, nad hladinu budovaného předmětu. Prášek je následně rozprostřen v tenké rovnoměrné vrstvě po pracovní ploše pomocí stíracího mechanizmu. Ten je tvořen buď tvrdou stěrkou, nebo měkkou stírací lištou, případně pomocí válečku. Dávkování se může aplikovat násypkou, nebo dávkovací loží. Tloušťka jedné práškové vrstvy se pohybuje v rozmezí 10 až 100 µm. Selektivní části práškové vrstvy odpovídají průřezu součásti, která má být vyrobena, jsou roztaveny pomocí zaostřeného laseru. Používají se pevnolátkové lasery s vlnovými délkami v rozsahu 1,06 až 1,08 µm a výkonem řádově stovek wattů. Uvedený postup se opakuje do té doby, dokud není výsledný model zhotoven. U kovů je proces prováděn v ochranné atmosféře dusíku nebo argonu z důvodu zabránění oxidace kovu během tavení [18].





Obr.2.4 Schéma principu metody SLM [18]

Konečnou kvalitu hotové součásti ovlivňuje značné množství parametrů výroby, kterých je více než 50. Obecně se dají zařadit do pěti základních kategorií – parametry laseru a skenování, vlastnosti práškového materiálu, vlastnosti práškového lože a parametry opětovného stírání a nakonec parametry prostředí. Fyzikální podstata metody SLM je schematicky znázorněna na obr. 2.5 [18].



Obr. 2.5 Fyzikální podstata metody SLM [18]

Průběh interakce laserového paprsku s práškem během SLM metody, stejně jako dynamika tavení, je do značné míry dán jako funkce termodynamických vlastností práškového materiálu. Kromě standartních termo-fyzikálních vlastností může být důležitý také tvar práškových částic, drsnost povrchu a velikost částic, protože právě tím je ovlivněna absorpce světla, viskozita prášku během procesu stírání a rovnoměrnost vrstev určených k rozprostření. Tyto vlastnosti se mohou výrazněji měnit při opětovném použití kovového prášku i přesto, že došlo k jeho přesátí [18].



Jak již bylo řečeno, tak se proces SLM provádí v ochranné atmosféře inertních plynů (Ar, N<sub>2</sub>) s požadavkem co nejmenší příměsi škodlivého kyslíku, nebo s využitím vakua, kde výskyt kyslíku je téměř nulový. Z konsekvence výskytu ionizovaného plynu a odpařeného kovu je vytvořen plazmový oblak nad svarovou lázní. Oblaku může absorbovat, nebo lámat laserové záření, čímž je ovlivněna absorpce energie tavnou lázní. Tímto jevem je ovlivněno povrchového napětí a jde o jev dobře známý v procesech tavného svařování. Bylo zjištěno, že i malé změny ve množství kyslíku (od 0,1 do 1,0 %) vedou k velkým změnám ve tvaru svarové lázně, protože na povrchu taveniny se tvoří malé množství oxidu a je tím ovlivňován směr proudění uvnitř kapalné fáze [18].

Metoda SLM přináší řadu výhod ve srovnání s jinými aditivními technologiemi, jako je například vysoká přesnost. Využití metody SLM se uplatňuje především v leteckém, kosmickém a medicínském průmyslu. Srovnatelnost s konvenčními druhy výroby, jako je například kování a lití, je u těchto metod dána také svou pestrostí, co se tvaru a geometrie týče. Nicméně se podstatně liší od těchto metod právě z hlediska mikrostruktury a vlastnostmi výrobku [18].

Po tom, co je vytvořena tavenina, se materiál velmi rychle ochlazuje  $(10^3 - 10^8 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1})$ . Vlivem rychlého ochlazení dochází k nerovnováze procesu tuhnutí a je snížena rozpustnost tuhých látek. Tím je zapříčiněna možná tvorba metastabilní fáze a někdy dokonce i amorfní fáze. Velkými teplotními rozdíly a složitou formou přenosu tepla v roztavené lázni může být způsoben preferenční růst zrna a heterogenní struktura. Vzhledem k mikrostruktuře, směru růstu komplexních krystalů a defektům se mechanické vlastnosti části vyrobených SLM liší od vlastností odlévaných nebo tvářených částí. Dílům SLM je přisuzována vysoká pevnost, silná anizotropie ve směru tisku, ale zároveň nízká tažnost. Mechanické vlastnosti dílů vyrobených metodou SLM se dají pokládat za srovnatelné s tvářenými díly [19].

V porovnání například s FDM metodou, jsou u SLM procesu vyžadovány vyšší investiční náklady. 3D tiskárna založená na FDM se lépe provozuje, udržuje a není tolik nákladná. Také vstupní materiál, kterým je kovové vlákno, je u metody FDM cenově dostupnější a snadněji se s ním manipuluje. Například pro spuštění SLM stroje je potřeba několik kilogramů prášku, aby se celý postup mohl provést, ale nevyužitý prášek je možné prosát a recyklovat. Za další nevýhodu jsou považovány zvýšené nároky na bezpečnost a ochranu při manipulaci s prášky, obzvláště s reaktivními (např. titan, hliník atd.). [20]





# 2.2.2 Rešerše v oblasti 3D tisků dílů z materiálu AISI H13

3D tisk nástrojové oceli H13 spadající pod skupinu chrom-molybdenových ocelí je využíván právě pro nástrojové aplikace, zejména pro práce za tepla. Její využitelnost vychází z vynikající odolnosti proti praskání při tepelné únavě, ke které dochází v důsledku cyklických ohřevů a ochlazování při výrobě [21]. Aby mohla být ocel využívána v takových podmínkách, musí mít dobrou tepelnou vodivost [3].

Nástupem aditivní výroby prostřednictvím 3D tisku může být nabídnuta ekonomická alternativa při výměně poškozených nástrojů, přičemž je možno poškozenou dílčí část nástroje vytisknout a vrátit tak nástroj zpět do stavu s původními, požadovanými vlastnostmi. Tento způsob opravy by mohl mít značný dopad na snížení doby výroby, investiční požadavky a celkově na flexibilitu nástrojů. Největší nevýhodou je pak omezenost výrobního objemu tiskárny [22].

Mezi všemi parametry ovlivňující konečný výrobek při použití aditivních technologií, zejména metody SLM, lze vyjmenovat tyto čtyři nejvýznamnější – výkon laseru, rychlost skenování, vzdálenost mezi sousední dráhou a tloušťka vrstvy. Touto problematikou se zabývá věda nazývaná optimalizační topologie [23].

Nejdůležitějšími parametry ovlivňujícími kvalitu finálního výrobku jsou rychlost a výkon laseru. U výkonu laseru je největším problémem případná nedostatečná energie dodávaná laserovým paprskem, která nestačí k úplnému roztavení prášku. Vliv závislosti výkonu laseru na porozitě dílu je ukázán na obr. 2.6, kde se pórovitost rapidně zvyšovala až do výkonu 200 W a dalším zvýšením výkonu se postupně snižovala [23]. Dále se lze zaměřit na rychlost laseru, přičemž při zvýšení rychlosti skenování rapidně roste i daná pórovitost [24]. Tato charakteristika je zcela ovlivňována hodnotou VED (Volumetric energy density), která při dosažení příliš malé hodnoty způsobí neúplné roztavení prášku a po případném vysokém překročení VED hodnoty se práškové lože začne odpařovat. Tímto je zapříčiněn výskyt již zmiňovaných pórů. Je tedy potřeba, aby bylo nalezeno nějaké optimum rychlosti skenování a výkonu zařízení. Dle uvedených výsledků se pro ocel H13 jeví jako optimální parametry výkon laseru 160 W a rychlost skenování 400 mm  $\cdot s^{-1}$  [23].





**Obr.2.6** Základní vlivy na pórovitost - závislost výkonu laseru na pórovitosti (vlevo) a závislost skenovací rychlosti na pórovitosti (vpravo) [23]

Dalším ovlivňujícím parametrem výsledných vlastností výrobku je tloušťka vrstvy. Při různých tloušťkách je nutno použít různé parametry laseru. Například pokud se zvolí tloušťka vrstvy 30 µm, potom by měl laser být schopen roztavit vrstvu v celém svém objemu [24].

Mezi primární požadavky na vstupní materiál je považována jeho čistota. Při jakémkoli výskytu vměstků a nečistot by bylo dosaženo jak negativního vlivu na samotný proces tavení, tak i vzniku nehomogenit v konečné struktuře materiálu. Aby nebyl proces nijak ovlivněn a zhotovení bylo co nejkvalitnější, tak musí být splňovány některé vstupní požadavky. Kovový prášek musí být sférického tvaru a střední hodnota velikosti částic by neměla přesáhnout tloušťku natavované vrstvy. Práškem s větším podílem jemných částic je dosažena vyšší hustota lože, vyšší hustota vytvořených dílů při nízké laserové energii a je také generován hladší povrch hotových dílů [20]. Pokud by nebyl splněn požadavek na distribuci a tvar jednotlivých částic, tak by do sebe jednotlivé částice nezapadaly, a tím se ovlivnil počet volných míst, což by se projevilo v podobě nárůstu počtu právě zmiňovaných pórů [24].

Z obrazové analýzy prášku oceli H13, viz obr. 2.7, je zřejmé, že maximální průměry částic nepřesáhly 50  $\mu$ m, viz obr. 2.8. Nejvyšší procentuální zastoupení bylo zjištěno u částic s ekvivalentním průměrem 12  $\mu$ m a procentuální zastoupení částic s ekvivalentními průměry 6  $\mu$ m a 18  $\mu$ m byla kolem 20 %. Tomu odpovídá hustota prášku na úrovni 4600 kg · m<sup>-3</sup>, čemuž odpovídá 59 % hustota pevného materiálu.





Na obr. 2.8 je ukázáno procentuální zastoupení jednotlivých velikostí práškových částic, včetně maximálního procentuálního zastoupení ekvivalentního průměru částic 12 μm [25].



**Obr. 2.7** Kvalita ocelového prášku H13 (a) sférické a sféroidní tvary, povrch částic s malým množstvím satelitů; (b) průřezy částic bez plynových pórů [25]



**Obr. 2.8** Rozdělení frakcí prášku z H13 [25]

U 3D tisku kovových prášku, zejména u metody SLM je velmi blízká podobnost k procesu svařování, ačkoliv natavená oblast s rozměrem  $10^{-1}$ mm<sup>3</sup> se jen zřídka podobá těm běžným při komerčním svařování. Kvůli tuhnutí a následnému smršťování tavné lázně vznikají ve výrobku poměrně značná zbytková napětí. Zbytková napětí jsou jednou z hlavních nevýhod metody SLM, protože snižují mechanické vlastnosti tištěného dílu. Těmito napětími je ovlivněn již výrobek na základní desce, přičemž může dojít k jeho

praskání, nebo delaminaci. Jednoduchý příklad takového problému je znázorněn na obr. 2.9, kde jsou zřetelné praskliny způsobující delaminaci dílu [24].



Obr. 2.9 Vliv zbytkového napětí na model [26]

Schematické znázornění vzniku vnitřních napětí a případně deformací je znázorněno na obr. 2.10, kde se vyskytují na horní části vrstvy a na rozhraní mezi zhotovenou a tisknutou vrstvou. Důsledkem tepelné roztažnosti působí v horní části vrstvy tlaková napětí, zatímco na rozhraní chladnoucí vrstvy a již zhotoveného podkladu napětí tahová. Pokud by měla být tištěna pouze jedna vrstva, tak napětí po ochlazení by bylo přirozeně rozptýleno. Jenže problém se projevuje, když substrátem je omezována tepelná roztažnost a kontrakce vrstev bezprostředně pod tavnou lázní. Tento jev se může opakovat několik vrstev po sobě, anebo na stejné vrstvě v průběhu stavby, kdy se materiál nemusí roztavit úplně. Tím jsou způsobena elastická tlaková přetvoření uvnitř vrstev, což má za následek gradient napětí mezi jednotlivými rovinami [27].



Obr. 2.10 Teplotní gradient [27]



Pochopením způsobu tvorby a rozložení vnitřního napětí lze částečně předejít deformacím a problémům při následných krocích opracování. K minimalizaci vnitřního pnutí se kromě zvolení vhodných procesních parametrů využívá také strategie skenování. Trajektorie laseru je považována za rozsáhlý subjekt a je velice variabilní. Porovnáním použitých sedmi různých strategií pohybu laseru znázorněných na obr. 2.11 lze problematiku lépe pochopit a zvolit tak vhodný návrh skenování [27].



**Obr. 2.11** Skenovací strategie [27]

Studiemi pohybu laseru [27] ve shodě s obr. 2.11 bylo prokázáno, že deformace ve směru X jsou podstatně větší, než deformace ve směru Y. Tato nesrovnalost je dána rysem podlouhlého obdélníkového tvaru vzorku, kterým díky tzv. obdélníkové povaze vzorků jsou selektivně zesilovány X výchylky. Souvislost mezi strategií skenování a distribucí generovaných vnitřních napětí může být jasně definována následujícími poznatky. Nejvyšší hodnoty deformace je dosaženo, když byly skenované vektory zarovnány rovnoběžně se směrem měření, viz obr. 2.11 (typ skenovací strategie All X)). Naopak nejmenší velikosti deformace bylo dosaženo skenovací strategií All Y, kdy jsou vektory zarovnány kolmo ve směru měření. Jako optimum těchto dvou extrému může být použita varianta (XYA), kterou jsou střídány směry skenování. Posledními zkoušenými variantami bylo šachovnicové skenování (CB a CBNO), které se však rapidně liší větší hodnotou výchylky oproti možnosti XYA [27].



## 2.3 Mechanické zkoušky

Při návrhu strojírenských součástí je zvlášť dáván důraz na materiál, ze kterého mají být vyrobeny. Přičemž v úvahu se bere požadavek na jejich funkci, technologii výroby součástí, vliv prostředí, ve kterém budou umístěny a ekonomická hlediska výroby. Aby bylo dosaženo správné volby materiálu, je potřeba znát jeho fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti. Objektivní posouzení vlastností je prováděno pomocí mechanických zkoušek, jako jsou – statická zkouška tahem, rázová zkouška ohybem, měření tvrdosti podle Vickerse (případně podle Brinella, nebo Rockwella) aj.

### 2.3.1 Statická zkouška tahem

Zkouška je definována normou ČSN EN ISO 6892-1 a jejímž účelem je zjistit napěťové i deformační charakteristiky. Princip zkoušky je dán jednoosým tahovým zatížením, nejčastěji do lomu, pomocí kterého se stanoví jedna nebo více mechanických vlastností. Obvykle se provádí za pokojové teploty, pokud není stanoveno jinak. Výsledek je popsán především mezí pevnosti R<sub>m</sub>, mezí kluzu R<sub>e</sub>, kontrakcí Z a tažností A. Pokud je měřením vyžadován jiný výsledek, mohou být stanoveny i další vlastnosti [28].

Tvar a geometrie zkušebního tělesa mohou být přizpůsobeny součásti z kovu, která je pro experiment odebrána, ale doporučená geometrie je opět dána normou. Průřezy zkušebních vzorků mohou být kruhové, čtvercové, obdélníkové, prstencové, nebo pro zvláštní případy aj. [28] Nejčastěji se používají zkušební tyče, u kterých je použit pro počáteční měřenou délku  $L_0$  vztah [29]:

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \tag{1}$$

kde značí:  $L_0$  - počáteční délka zkušební tyče [mm],

 k - součinitel proporcionality (k = 5,65 pro krátké tyče, k = 11,3 pro dlouhé tyče),

$$S_0$$
 - počáteční průřez zkušební tyče [mm<sup>2</sup>].

Zkušebním zařízením je umožněno zaznamenat průběh síly (pomocí siloměrných hlav) a prodloužení nebo kontrakci vzorku pomocí extenzometru. Typicky se proces znázorňuje pomocí tahového diagramu síla-prodloužení, nebo může být přepočten na smluvní hodnoty napětí-deformace [2]. Právě v praxi se používá druhá možnost



zobrazení, kterou je smluvní diagram (OEMF) obr. 2.12. Zde je síla vztažena na počáteční průřez  $S_0$ , zatímco ve skutečném diagramu (OEM'F'), viz obr. 2.12, je znázorněna závislost zatěžující síly na okamžité velikosti průřezu  $S_u$  [30].



**Obr. 2.12** Diagram zkoušky tahem, závislost napětí a deformace zkušební tyče (křivka OEMF – smluvní diagram a křivka OEM'F'- skutečný diagram) [30]

Jednou z významných vlastností výsledku tahové zkoušky je hodnota **meze kluzu**  $\mathbf{R}_{e}$ , která je popsána jako napětí, při jehož překročení dochází k plastickým deformacím zkušební tyče. Mnoho materiálů se projevuje plynulým přechodem mezi elastickými a plastickými deformacemi. Mohou se vyskytnout výjimky, jako je například měkká uhlíková ocel, u které tento okamžik přechodu je patrný a je nazýván výrazná mez kluzu. Na obr. 2.13 je znázorněno několik příkladů způsobu určení meze kluzu [2].









**Mez pevnosti v tahu** odpovídá největšímu napětí, které se objeví u zatížení zkušební tyče, viz obr. 12 (bod M). Po překročení této hodnoty se začne křivka schylovat směrem dolů a smluvní napětí klesá z důsledku zmenšujícího se průřezu, který je vyvolán tvorbou tzv. krčku [2]. Vztah pro výpočet meze pevnosti je dán následující rovnicí:

$$R_{\rm m} = \frac{F_{\rm max}}{S_0} \tag{2}$$

kde značí:  $R_m$  - mez pevnosti v tahu [MPa],  $F_{max}$  - maximální síla tahové zkoušky [N],  $S_0$  - počáteční průřez zkoušené tyče [mm<sup>2</sup>].

Potom, co je tyč přetržena, lze z poměrného prodloužení vypočítat **tažnost** materiálu A, která je měřítkem tvárnosti. Tažností je myšlena charakteristika plasticity v tahu a je definována jako trvalé poměrné prodloužení měrné délky po přetržení tyče [2]. Tažnost lze vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \tag{3}$$

kde značí:A-tažnost materiálu [%], $L_u$ -konečná délka zkušební tyče [mm], $L_o$ -počáteční délka zkušební tyče [mm].

Tvárnost může být dále popsána kontrakcí Z, která je určena pomocí změny průřezu zkušební tyče před zkouškou a po zkoušce [2]. Způsob výpočtu kontrakce je dán následujícím vztahem:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100$$
 (4)

kde značí: Z - kontrakce [%],

 $S_o$  - počáteční průřez zkušební tyče [mm<sup>2</sup>],

$$S_u$$
 - konečný průřez zkušební tyče [mm<sup>2</sup>].



## 2.3.2 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu se řadí mezi mechanické zkoušky dynamické. Zkušební tyč je vystavena vlivem vnějšího namáhání plastickým deformacím, a proto je nutno brát v úvahu ovlivňující kritéria, kterými jsou teplota a rychlost deformace. Zatímco u zkoušky tahem bylo osové zatížení v tyči statické, u této zkoušky je dosaženo rázu kyvadlového kladiva. Jeho konečná rychlost před kontaktem se zkušebním vzorkem se pohybuje mezi 4,5 mm·s<sup>-1</sup> až 7 mm·s<sup>-1</sup>. Při zkoušce rázem v ohybu se v deformovaném objemu materiál zpevňuje a v důsledku tohoto zpevnění mohou být výrazně ovlivněny mechanické vlastnosti (např. nárůst meze kluzu). Nárůstem rychlosti deformace se také zvyšuje přetvárný odpor, a tedy je dosaženo většího zpevnění. Naopak vyšší teplotou jsou usnadněny odpevňovací procesy, při kterých mohou být kvůli uložené deformační energii obnoveny původní vlastnosti kovu [31].

Zkouškou rázem v ohybu se primárně zjišť uje **houževnatost** materiálu, respektive jeho odolnost proti křehkému porušení. Je provedena na kyvadlovém kladivu a výsledkem je **absorbovaná energie** (spotřebovaná práce) potřebná k přeražení zkušební tyče, nebo **vrubová houževnatost** (absorbovaná energie vztažená na průřez vzorku). Dále může být posouzen vzhled lomu a příčné rozšíření zkušební tyče. Na obr. 2.14 je schematicky znázorněn princip průběhu zkoušky. Práce spotřebovaná pro přeražení (31].



Obr. 2.14 Princip rázové zkoušky v ohybu [31]

Absorbovaná energie by měla být vztažena na jednotku deformovaného objemu zkušební tyče. Ten je však ovlivněn velkou proměnlivostí vzhledem ke zkoušenému materiálu a podmínkám zkoušky. Protože se deformovaný objem velmi špatně určuje, tak je zaveden pojem vrubová houževnatost, která se o mnoho snadněji popisuje z průřezu v místě vrubu tyče [31].

**Absorbovaná energie** se zjišťuje z výchylky kyvadlového kladiva po přeražení vzorku a je definována jako práce spotřebovaná na přeražení zkušební tyče. Značí se písmenem K a jejími jednotky jsou [J] [31].

**Vrubová houževnatost** je pak dána podílem absorbované energie a počátečního příčného průřezu zkušební tyče v místě vrubu. Vypočte se podle následujícího vzorce [31]:

$$KC = \frac{K}{S_0}$$
(5)

kde značí:	KC	-	vrubová houževnatost [J · cm <sup>-2</sup> ],
	K	-	absorbovaná energie [J],
	S <sub>0</sub>	-	počáteční příčný průřez zkušební tyče v místě vrubu [mm <sup>2</sup> ].

Ke zkoušce rázem v ohybu se používají zkušební tyče s různými rozměry a tvary tyčí i vrubů. Vytvoření vrubu je zpravidla odůvodněno dosažením prostorové napjatosti a definování místa, z něhož se bude šířit trhlina. Vruby mohou mít tvar U nebo V a jsou umístěny na odvrácenou stranu úderu kladiva. Kladiva jsou dána dvojího typu – Charpyho kladivo a Amslerovo kladivo. Jejich maximální velikost energie nárazu se pohybuje nejčastěji okolo 300 J, ale existují i kladiva 450 J [31].

Výsledek zkoušky může být významně ovlivněn teplotou, při které se zkouška provádí. Důležitým pojmem je přechodová (tranzitní) teplota, kterou se rozumí taková teplota, při které přechází houževnatý lom do lomu křehkého. Tato teplota je mnohdy důležitější nežli znalost maximální hodnoty vrubové houževnatosti sledované oceli. Rychlostí deformace a teplotou není příliš ovlivněna lomová pevnost, zatímco mez kluzu je významně závislá na jejich změně, jak je zřejmé z obr. 2.15 [31].



**Obr. 2.15** Závislost lomové pevnosti a meze kluzu na teplotě a rychlosti deformace  $\varepsilon$  [31]

### 2.3.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Podstata zkoušky je založena na vtlačování zkušebního tělesa do zkoušeného materiálu nebo výrobku. U zkoušky podle Vickerse je za zkušební těleso považován pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem  $136^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$ . Ten je vtlačován silou F směřující kolmo k měřenému povrchu po stanovenou dobu a po odlehčení zatížení jsou změřeny délky úhlopříček vtisknutých do tělesa. Tvrdost podle Vickerse HV je definována jako poměr zkušebního zatížení F k ploše povrchu vtisku, který se popisuje jako pravidelný čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou s úhlopříčkami d<sub>1</sub> a d<sub>2</sub>. Princip měření je znázorněn na obr. 2.16 [31].



**Obr. 2.16** Princip zkoušky tvrdost podle Vickerse [31]





Podle vzorce (6) lze vypočítat tvrdost ze zatěžující síly a naměřené délky úhlopříček. Tvrdost podle Vickerse se označuje písmeny HV a charakteristickou hodnotou zatížení. Příkladem běžného měření může být velikost zatěžující síly rovna 294 N (cca 30 kg) a doba působení od 10 do 15 s. V takovém případě bude zkouška označena HV30 [31].

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2} \tag{6}$$

kde značí: HV - tvrdost podle Vickerse,

F - zkušební zatížení [N],

d - aritmetický průměr délek obou úhlopříček [mm].

Výhodou zkoušky je především nezávislost hodnoty tvrdosti na zatěžující síle F [2]. Vzhledem k velikosti vtisku, který je poměrně malý a mělký, není nijak významně poznamenána pracovní plocha. Tloušťka zkušebního tělesa se pohybuje v rozmezí od 1,2·d do 1,5·d. Materiál je zatížen plynule, bez rázů a chvění. Vzdálenost středu vtisku od sousedního vtisku, nebo od kraje zkušebního tělesa musí být nejméně 2,5·d. Běžně se úhlopříčky vtisku měří pomocí mikroskopu s přesností  $\pm 0,001$  mm u úhlopříček do 0,2 mm a s přesností  $\pm 0,5$  % u úhlopříček s délkou větší než 0,2 mm. Pokud jsou měřeny plochy jiného tvaru, než je rovinný (např. kruhový, nebo válcový tvar), tak se použije dle normy opravných součinitelů v závislosti na poměru délky úhlopříčky vtisku a průměru měřeného výrobku. Na obr 2.17 je uvedena závislost HB-HV, pomocí které je možno do hodnoty 400 HB (tvrdost podle Brinella), pro oceli, převést z tvrdosti HB na tvrdost HV, protože právě v této oblasti je závislost lineární [31].



Obr. 2.17 Vzájemný vztah tvrdostí podle Brinella a Vickerse [31]



Přesnost výsledků měření může být ovlivněna stavem povrchu měřeného materiálu. Proto jsou obvykle povrchy broušeny, případně leštěny. Další ovlivňující faktor je homogenita materiálu. U hrubé heterogenní struktury (např. šedé litiny) může být mikroskopickým vtiskem zasaženo pouze zrno jedné fáze, tudíž není měřena tvrdost slitiny, ale pouze tvrdost jednotlivé fáze. Pro takové případy se zkouška podle Vickerse příliš nehodí, a proto je zavedena případná korekce ve vztahu (7) [31].

## 2.3.4 Tribologické zkoušky

Tribologie byla jako věda definována v roce 1967 výborem organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj. Pojem tribologie je odvozen z řeckého slova tribos, které je známo jako tření nebo klouzání. Jak již z názvu vyplývá, je tato věda zaměřena na tření, opotřebení a mazání vzájemně interagujících povrchů v relativním pohybu. Důraz je kladen zejména na úsporu energie a minimální opotřebení [32]. Tribologické vlastnosti jsou popsány především koeficienty tření a opotřebení, které jsou vázány na typ tření a mechanizmus opotřebení. Soustava, která je zkoumána z hlediska třecích účinků, se skládá z dvou těles, které jsou ve vzájemném kontaktu stykových ploch a látkou mezi nimi, nebo v jejich blízkém okolí. Tato soustava je definována jako tribologický systém [33].

Ve vzájemném kontaktu dvou těles, která se vůči sobě pohybují, je v místě dotyku vytvořen odpor, kterému musí pohybující se těleso čelit. Tento odpor může být definován jako tření, nebo třecí odpor [34]. Pod pojmem materiálová dvojice, je myšlen zkušební vzorek a zatěžující tělísko. Okrajovými podmínky mohou být – přítomnost maziva, drsnost povrchu, způsob pohybu, okolní teplota, vlhkost aj. [30]. Tření může být rozděleno do tří skupin, viz tab. 2.5.

Dělení dle	Тур	Význam
Charakteru	Vnější tření	Vzájemný vnitřní pohyb mezi stavebními částmi látek (plyn, kapalina, pevná látka)
	Vnitřní tření	Způsobeno na dotykových plochách látek nebo těles
Přítomnosti maziva	Fyzikální suché tření	Mezi povrchy se nevyskytuje žádná látka
	Technické suché tření	Mezi povrchy se vyskytují oxidy, plyny nebo páry

Tab. 2.5 Základní rozdělení typů tření [30,33]



Dělení dle	Тур	Význam
	Smíšené tření	Zde je přítomno mazivo–vlivem mikronerovností dochází k občasnému dotyku
Přítomnosti maziva	Kapalinné tření	Povrchy jsou odděleny kontinuem–nedochází k žádným dotykům
	Valivé tření	Odvalování
Vzájemného pohybu materiálové dvojice	Valivé tření	Odvalování

Na obr. 2.18 je uvedeno několik druhů opotřebení, z nichž nejčastějším mechanizmem je abrazivní opotřebení obr. 18 b). To je charakterizováno významně větší tvrdostí jednoho materiálu vzhledem k druhému. S postupným pohybem materiálů je v důsledku nepravidelné geometrie dosaženo nežádoucího odřezávání (rýhování) měkčího povrchu. Hodnota poškození funkčního povrchu je ovlivněna především zatížením, délkou kluzné dráhy a tvrdostí [33].



**Obr. 2.18** Druhy opotřebení [35] (a) - adhezivní, (b) - abrazivní, (c,d) - erozivní, (e,f) - kavitační, (g) - únavové, (h) – vibrační)

#### 2.3.4.1 Tribologická metoda Ball–on-Disc

Mezi nejběžnějšími zkušební testy patří metoda Ball-on-Disc definována normou ASTM G99. Principem je vtlačení hrotu nebo kuličky s předepsaným poloměrem definovanou silou do povrchu jiného zkušebního vzorku umístěného na rotačním kotouči otáčejícím se definovanou rychlostí [36]. Vzájemným působením je vytvořena na zkoumaném vzorku tribologická stopa [37]. Schéma metody je zobrazeno na obr. 2.19.



Obr. 2.19 Schéma metody Ball-on-Disc [37]

Výstupním údajem zkoušky je časový průběh koeficientu tření závislý na počtu cyklů. Dále je sledováno opotřebení zkušební kuličky a také stopa opotřebení, která vznikla na testovaném vzorku. Stejně jako u většiny měření, jsou výsledky ovlivněny okolními podmínkami, kterými jsou – vlhkost, teplota a přítomnost mazací látky. Dále je nezbytné zvolit vhodný poloměr otáčení vzorku, aby teplo uvolněné při kontaktu materiálové dvojice mohlo být v dostatečné míře odvedeno a neovlivňovalo měření [37].
# 3 Experimentální část

Experimentální část bakalářské práce se zabývá posouzením mechanických a tribologických vlastností 3D tisknutých a tvářených dílů z nástrojové oceli AISI H13. Cílem je posoudit rozdíly v mechanických a užitných vlastnostech a na jejich základě stanovit zda a za jakých podmínek je možné nahradit stávající tvářené díly 3D tisknutými díly. Na základě stanovených cílů byla experimentální část práce rozdělena do následujících čtyř oblastí:

- Posouzení vlivu tepelného zpracování na mechanické vlastnosti a tvrdost tvářených dílů z oceli AISI H13
- 2) Návrh a optimalizace 3D tisku vzorků z oceli AISI H13 metodou SLM.
- Stanovení mechanických vlastností tvářených a SLM dílů za teploty okolí RT i za zvýšených teplot a jejich porovnání
- Stanovení tribologických vlastností tvářených a SLM dílů za teploty okolí RT i za zvýšených teplot a jejich porovnání.

## 3.1 Tepelné zpracování tvářených dílů AISI H13

Tvářené polotovary z oceli AISI H13 se dodávají ve vyžíhaném stravu. Jejich primární vlastností je dostatečná houževnatost a dobrá obrobitelnost, přičemž tepelné zpracování určující finální vlastnosti dílu je aplikování až po finálním obrobení. Z hlediska tepelného zpracování je zpravidla volen proces zušlechtění, neboli kalení + popouštění. Jedním, nebo vícenásobným popouštěním mohou být měněny mechanické vlastnosti, tak jak je zřejmé z popouštěcího diagramu, viz obr. 3.1



Obr. 3.1 Popouštěcí digram



Materiály lze popouštět různými způsoby jak z ohledu popouštěcí teploty, tak i v rámci výdrže na této teplotě. Těmito parametry lze ovlivnit rozpad zbytkového austenitu po zakalení, který se následně rozpadá na feriticko-karbidickou směs. Na obr. 3.2 je schematicky znázorněn diagram tepelného zpracování pro ocel AISI H13.



Obr. 3.2 Diagram jednotlivých cyklů TZ

Vlivem různých ochlazovacích medií a použitých teplotních cyklů lze dosáhnout odlišných vlastností. Proto bylo rozhodnuto, pro prvotní experimenty tepelného zpracování, posoudit vliv odlišných ochlazovacích medií (olej, vzduch) na tvrdost po zakalení. Dále byl posuzován vliv jednoho a vícenásobného popouštění pro tři popouštěcí teploty 300, 475 a 675 °C. Důvodem bylo posoudit vliv celkového teplotního cyklu a na základě výsledků vybrat optimální varianty. Pro experimenty byly použity kostičky z tvářeného materiálu H13 o rozměrech 15x15x15 mm. Všechny vzorky pro dané měření byly ošetřeny třemi vrstvami vysokoteplotní proti oxidační pasty LUISO, která by měla zabránit oxidaci povrchu při teplotách do 1100 °C po dobu 1 hod.

První operací bylo kalení. Vzorky byly v peci ohřáty na austenitizační teplotu 1040 °C ve shodě s teplotním cyklem ukázaným na obr. 3.3. Po dosažení austenitizační teploty a výdrži na teplotě po dobu 20 minut, byla polovina vzorků ochlazována na vzduchu a druhá polovina vzorků byla zakalena do oleje TK46. Vybrané vzorky zakalené na vzduchu i v oleji byly následně jednou, anebo dvakrát popouštěny v pecích při teplotách 300,475 a 675 °C. Při popouštění na teplotě po dobu 2 hodin a volným ochlazováním na vzduchu. Při popouštění na teplotě 675 °C byla při ohřevu prodleva 15 minut na teplotě 400 °C a po výdrži na teplotě 675 °C po dobu 2 hodin chladl vzorek v peci do teploty 300 °C s následným dochlazováním na vzduchu. Výsledky provedených experimentů, vyjádřené průměrnou hodnotu tvrdosti dle Vickerse, jsou shrnuty v tab. 3.1.





Obr. 3.3 Průběh tepelného zpracování měřených vzorků

Na základě dosažených výsledků bylo rozhodnuto, že pro posouzení mechanických a tribologických vlastností budou použity tvářené vzorky zakalené na vzduchu a jednonásobně popouštěné při teplotách 300, 475 a 575 °C. Tepelné zpracování na vzorcích pro mechanické testy a tribologii bylo provedeno stejnými teplotními cykly jako pro zkušební kostičky o rozměrech 15 x 15 x 15 mm.

Tab. 3.1 Výsledky měření tvrdosti HV30 pro různé způsoby TZ oceli AISI H13

		Pořadí v pichů napříč vzorkem zatížení HV30							Průměrná	Směr.		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	hodnota	Odch.
Základní materiál	204	204	205	206	207	212	209	206	208	211	207,2	± 5
Kaleno v oleji	622	628	586	619	607	587	584	595	575	597	600	± 28
Kaleno v oleji 300 °C	571	577	560	565	556	563	571	566	562	562	565,3	± 12
Kaleno v oleji 1x475 °C	578	582	578	599	580	569	560	572	576	591	578,5	± 21
kaleno v oleji 2x475 °C	579	582	568	584	578	587	587	585	574	562	578,6	$\pm 17$
Kaleno v oleji 675 °C	370	369	370	369	369	370	373	369	366	369	369,4	± 3
Kaleno na vzduchu	581	570	570	568	554	557	564	556	552	546	561,8	± 19
Kaleno na vzduchu 300 °C	554	551	560	562	558	558	558	554	551	556	556,2	± 5
Kaleno na vzduchu 1x475 °C	571	580	563	569	568	593	571	580	571	582	574,8	$\pm 18$
Kaleno na vzduchu 2x475 °C	601	572	565	580	561	571	561	581	571	555	571,8	± 29
Kaleno na vzduchu 675 °C	359	361	360	362	358	356	357	362	366	367	360,8	± 6

## 3.2 3D tisk vzorků metodou SLM z materiálu AISI H13

Cely děj výroby vzorků metodou SLM probíhal v Laboratoři prototypových technologií a procesů (Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace, Technická univerzita v Liberci). Pro zhotovení 3D tištěných dílů bylo použito zařízení SLM280<sup>*HL*</sup>(SLM Solutions AG, Lübeck, Německo), kterým je umožněno zpracovat kovové prášky různých materiálů. Zařízení je ukázáno na obr. 3.4 a jeho vybavení se skládá z laserové jednotky typu Yb:YAG se skutečným výkonem 400 W. V procesu





tavení je možno eliminovat výskyt kyslíku ochrannou atmosférou nereaktivních plynů (Ar, N<sub>2</sub>). V pracovním prostoru můžou být zhotoveny malé, či středně velké vzorky. Jeho objem činí zhruba 27,4 litru při rozměrech 280x280x350 mm.



Obr. 3.4 Zařízení SLM280HL (SLM Solutions Group AG, Lübeck, Německo)

Zařízením byl zpracován prášek z nástrojové oceli AISI H13 (DIN 1.2344), jejíž vlastnosti jsou popsány v kapitole 2.1.1. Prášek byl rovněž dodán společností SLM Solutions Group AG a jeho rozložení velikosti částic, které odpovídá procesu SLM, je podloženo histogramem rozdělení na obr. 3.5. V tabulce 3.2 jsou uvedeny parametry použité při výrobě vzorků metodou SLM.



**Obr. 3.5** Rozložení velikosti prášku oceli AISI H13 (převzato z testovacího protokolu společnosti SLM Solutions AG)



Název	Označení	Hodnota
Tloušťka vrstvy	h [µm]	30
Výkon laseru	P [W]	175
Skenovací rychlost	v [mm $\cdot$ s <sup>-1</sup> ]	750
Vzdálenost drah laseru	t [mm]	0,12
Ochranná atmosféra	-	N <sub>2</sub> (Dusík)

Vzorky byly rovnoměrně a co nejefektivněji rozděleny na tiskovou plochu, viz obr.3.6, ve vzdálenosti 3 mm od základní platformy. Programem byly vygenerovány blokové podpůrné struktury a přidělena stavební strategie ve shodě s tab. 3.2.



Obr. 3.6 Data modelu v programu Materialise Magics 23.1

Vzorky, které byly zhotoveny 3D tiskem metodou SLM, byly po zhotovení tepelně zpracovány ve firmě Bodycote. Průběh TZ 3D tisknutých dílu je zobrazen na obr. 3.7. Zatímco u tvářených vzorků se jednalo o TZ pro zlepšení mechanických vlastností, tak u aditivně zhotovených vzorků je TZ aplikováno z důvodu snížení zbytkových napětí.

£3.





Obr. 3.7 Průběh TZ SLM vzorků

#### 3.3 Posouzení mechanických vlastností SLM a tvářených vzorků

Porovnání mechanických vlastností SLM vzorků se vzorky tvářenými s různým tepelným zpracováním proběhlo pomocí statické zkoušky tahem a rázové zkoušky ohybem. Mimo to byla pro všechny druhy zkušebních vzorků měřena tvrdost dle Vickerse. Na základě plánu byly provedeny následující experimentální měření.

- Měření tvrdosti HV30 u SLM i u tvářených vzorků. U SLM vzorků po žíhání na snížení zbytkových napětí, u tvářených vzorků pro všechny typy tepelného zpracování.
- Statická zkouška tahem při teplotě RT u tvářených vzorků: po kalení (2 ks);
   po kalení a popouštění 300 °C po dobu 2 hod (2 ks); po kalení a popouštění 475 °C
   po dobu 2 hod (2 ks); po kalení a popouštění 575 °C po dobu 2 hod (2 ks).
- Statická zkouška tahem u tvářených vzorků za zvýšených teplot: 100 °C (3 ks);
   200 °C (3 ks); 300 °C (3 ks); 400 °C (3ks) a 500 °C (3 ks). Realizováno pro vzorky tepelné zpracované kalením a popouštěním při teplotě 475 °C po dobu 2 hodin.
- Statická zkouška tahem pro SLM vzorky při teplotě okolí RT (2 ks); při teplotě 200 °C (2 ks); 300 °C (2 ks); 400 °C (2 ks) a 500 °C (2 ks).
- Rázová zkouška ohybem při teplotě okolí RT u tvářených vzorků kalených a popouštěných 300 °C po dobu 2 hod. (3 ks); u kalených a popouštěných 475 °C po dobu 2 hod. (3 ks); u kalených a popouštěných 575 °C po dobu 2 hod. (3 ks)
- Rázová zkouška ohybem Pro SLM vzorky při teplotě okolí RT (4 ks)

63 I



 Vzorky pro statickou zkoušku tahem za teploty okolí RT i za zvýšených teplot byly, pro SLM vzorky i pro kalené a popouštěné tvářené vzorky, vyrobeny ve shodě s výkresem na obr. 3.8. Stejně tak vzorky pro rázovou zkoušku ohybem pro tvářené i SLM vzorky byly vyrobeny dle výkresu na obr. 3.9.



**Obr. 3.8** Rozměry a tvar zkušební tyče pro zkoušku tahem



**Obr. 3.9** Rozměry a tvar zkušebního hranolu pro zkoušku rázem

### 3.3.1 Zkoušení tvrdosti podle Vickerse

Pro tuto práci byla zvolena metoda dle Vickerse v souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1, jejíž podstata je charakterizována v kapitole 2.3.3. Měření bylo realizováno na mikrotvrdoměru Qness Q30A metodou HV30, viz obr, 3.10.





Obr. 3.10 Mikrotvrdoměr Qness Q30A

Na každém vzorku bylo provedeno 16 vpichů symetricky rozprostřených po průřezu vzorku. Vpichy byly od sebe vzdálené tak, aby byl mezi nimi vždy zachován minimálně trojnásobek úhlopříčky vtisku. Výsledné hodnoty měření jsou uvedeny v tab. 3.3 pro tvářené i SLM vzorky.

		SLM			
Vpich	Kaleno	Kaleno a popouštěno 300 °C, 2 hod	Kaleno a popouštěno 475 °C, 2 hod	Kaleno a popouštěno 575 °C, 2 hod	
1	604	550	576	506	512
2	589	544	579	502	538
3	564	553	583	516	528
4	562	555	576	502	545
5	557	553	585	502	533
6	566	557	578	506	532
7	579	550	573	508	540
8	575	549	570	508	540
9	610	551	572	508	531
10	585	555	580	501	515
11	568	547	581	508	543
12	566	544	574	515	549
13	574	563	584	507	533

Tab. 3.3 Výsledky měření tvrdosti typu HV30 pro různé TZ a SLM tisknuté oceli AISI H13

		SLM			
Vpich	Kaleno	Kaleno a popouštěno 300 °C, 2 hod	Kaleno a popouštěno 475 °C, 2 hod	Kaleno a popouštěno 575 °C, 2 hod	
14	567	544	575	512	526
15	602	548	580	513	531
16	544	550	566	513	541
Průměr	576	551	577	508	533
SMODCH	± 17,6	± 5	± 5	± 4,6	$\pm 9,8$

## 3.3.2 Statická zkouška tahem při pokojové teplotě

Podstata statické zkoušky je definována v kapitole 2.3.1. Hlavními výstupy této zkoušky byly mez kluzu, mez pevnosti a homogenní a celková tažnost. Zkouška při pokojové teplotě RT byla realizována na zkušebním zařízení TIRA Test 2300, jenž je znázorněno na obr. 3.11. Průběh zatěžující síly byl zaznamenán tenzometrickým snímačem KAF s rozsahem 100 kN a velikost prodloužení byla měřena extenzometrem, MFX 500. Snímací jednotky byly použity v souladu s normou ČSN EN ISO 6892 Zkušební vzorek po zakalení před očištěním od proti oxidační pasty LUISO je ukázán na obr. 3.12



Obr. 3.11 Stroj pro tahovou zkoušku TIRA Test 2300



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta stroiní

Obr. 3.12 Zkušební tyč pro zkoušku tahem před očištěním od proti oxidační pasty

Mechanické vlastnosti získané při statické zkoušce tahem jsou pro tvářené tepelně zpracované a pro SLM zhotovené vzorky (z oceli AISI H13) uvedeny v následující tabulce jako průměrné hodnoty, viz tab. 3.4. Pro práci s naměřenými daty byl použit software Labtest 4.9.

VZORKY	Průměrné hodnoty								
(TZ)	Rp0,2 [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	Ag[%]	A50 [%]					
Kaleno	1216	1947,8	4,7	8,2					
TZ 300 °C	1421,3	1777,9	3,2	8,6					
TZ 475 °C	1368,5	1914,2	6,86	11,38					
TZ 575 °C	1387,3	1683,4	3,1	10,6					
SLM	1407,6	1609,3	1,83	1,84					

Tab. 3.4 Zjištěné mechanické vlastnosti pro tvářené a SLM vzorky při pokojové teplotě (RT)

#### 3.3.3 Statická zkouška tahem za zvýšených teplot

Provedení statické zkoušky za zvýšených teplot se uskutečnilo na stroji Testometric FS 100 CT. Průběh síly byl zaznamenán tenzometrickým snímačem Testometriic DSCCTCLHA s rozsahem 100 kN. Vzhledem ke zvýšeným teplotám bylo nutné testované vzorky zatěžovat v teplotní komoře SOP 40X200/140 poskytující možnost ohřevu až na teplotu 1600 °C. Teplotní komora je znázorněna na obr. 3.13. Aby bylo dosaženo přesné požadované teploty, tak se při testu použil regulátor Clasic Clare 4.0.





Obr. 3.13 Teplotní komora a uchycení vzorku pro zkoušku za zvýšených teplot

Při tahové zkoušce za zvýšených teplot není možné použít běžný extenzometr, proto byl použit video-extenzometr, snímající vzorek pomocí průhledného otvoru v komoře (průzor). Použitý video-extenzometru je ukázán na obr. 3.14. Velikost prodloužení byla zaznamenávána bezkontaktním systémem Mercury RT (výrobce – Sobriety), jehož princip je založen na fotogrammetrii.



Obr. 3.14 Video-extenzometr s průzorem pro identifikaci prodloužení vzorku

Pro správnou funkci fotogrammetrické analýzy deformace vzorku je nezbytné provést tzv. korekci povrchu vzorku. Ta spočívá v nanesení "patternu", pomocí kterého je umožněno detekovat kontrolní body na povrchu vzorku. Z obr. 3.15 je zřejmý průběh tvorby patternu. Nejprve bylo třeba vzorek důkladně očistit. Následně byl nastříkán černou barvou (Superthem), která odolává teplotám do 800 °C (z důvodu video-





identifikace) a poté je nanesen "pattern" v podobě bílých kapek na předchozí vrstvě černé barvy.



Obr. 3.15 Průběh přípravy zkušební tyče pro zkoušku tahem

Vyhodnocení výsledků bylo realizováno rovněž pomocí programu Labtest 4.9 stejně jako u tahové zkoušky při teplotě okolí RT. Výsledná data měření byla shrnuta do tab. 3.5, ve formě průměrné hodnoty ze třech měření u tvářených a tepelně zpracovávaných vzorků a ze dvou měření u SLM vzorků. Tvářené vzorky, použité pro testy za vyšších teplot, byly kalené a popouštěné při teplotě 475 °C po dobu 2 hod. Tento způsob tepelného zpracování vzorků byl zvolen z důvodu dosažení nejlepších mechanických vlastností.

	ocel AISI H13								
Teplota		Tvái	řený		3D tisknutý				
[°C]	<b>R</b> <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	Ag	Α	R <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	Ag	Α	
	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	
RT	1368,5	1914,2	6,86	11,38	1407,6	1609,3	1,83	2,33	
100	1345,0	1829,2	6,84	11,33	-	-	-	-	
200	1307,5	1766,7	6,72	11,81	1389,1	1564,6	0,97	0,97	
300	1197,6	1659,2	6,01	12,08	1359,4	1541,1	1,30	1,52	
400	1120,3	1515,4	3,99	12,73	1234,5	1387,8	1,01	3,34	
500	926.9	1230,4	3,86	12,19	1045,1	1155,2	1,17	3,91	

Tab. 3.5 Shrnutí středních hodnot z naměřených dat zkoušky tahem při různých teplotách





## 3.3.4 Zkouška rázem v ohybu

Podstata zkoušky rázem v ohybu je popsána v kapitole 2.3.2. Požadovaným výsledkem tohoto testu by mělo být stanovení vrubové houževnatosti materiálu KC a absorbované energie K spotřebované při přeražení vzorku. Tato metoda byla realizována v souladu s normou ČSN EN ISO 14 556 stejně jako příprava vzorku, postup provedení a vyhodnocení testu. Test byl proveden na stroji LabTest CHK 450J-I, který vyhovuje požadavkům pro zhotovení a vyhodnocení rázové zkoušky. Zařízení je zobrazeno na obr. 3.16 a použité těleso připravené na zkoušku je ukázáno na obr. 3.17. Jako zkušební těleso, byla použita tyč s "V" vrubem, jejíž tvar a rozměry jsou definovány na obr. 3.9. Vrub byl vytvořen konvenčním obráběním pomocí protahovacího hřebene, který je umístěn v jednoúčelovém zařízení VRE 55 (od firmy Labortech s.r.o.) názorně ukázaného na obr. 3.18.



Obr. 3.16 Stroj LabTest 450J-I



**Obr. 3.17** Umístění zkušební tyče na podpěrách





TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Obr. 3.18 Zařízení VRE 55 pro vytvoření vrubu

V tab. 3.6 jsou uvedeny hodnoty spotřebované nárazové práce KC [J] a vrubové houževnatosti KCV [J.cm<sup>2</sup>] pro vzorky kalené a popouštěné při teplotě 300 a 475 °C. Výsledky testů na vzorcích kalených a popouštěných při teplotě 575 °C a vzorků vyrobených metodou SLM jsou uvedeny v tab. 3.7.

	ocel AISI H13						
	Kal	eno	Kaleno				
Teplota RT	+	-	+				
	Popouštěno 3	600 °C ,2 hod.	popouštěno 475 °C, 2 hod.				
	KC [J]	KCV [J.cm <sup>2</sup> ]	KC [J]	KCV [J.cm <sup>2</sup> ]			
Vzorek - 1	66,6	53,3	45,1	36,1			
Vzorek - 2	74,3	59,4	40,7	32,6			
Vzorek - 3	72,8	58,3	46,9	37,6			
Průměr	$71,2 \pm 4,6$	57,0 ± 3,7	$44,2 \pm 3,5$	35,4 ± 2,8			



	ocel AISI H13						
	Kal	eno	SLM				
Teplota RT	+		+				
	Popouštěno 5	75 °C ,2 hod.	Žíháno 320 °C, 4 hod.				
	KC [J]	KCV [J.cm <sup>2</sup> ]	KC [J]	KCV [J.cm <sup>2</sup> ]			
Vzorek - 1	51,2	40,9	24,4	19,5			
Vzorek - 2	39,4	31,5	23,5	18,8			
Vzorek - 3	-	-	23,8	19,1			
Průměr	45,3 ± 45,9	$36,2 \pm 4,7$	23,9 ± 3,9	19,1 ± 3,1			

Tab. :	3.7	Tabulka	naměřený	ch hodno	t nárazové	práce KC a	vrubové ho	uževnatosti KCV
		1 00 0011100	mannen	•		pre		alle i marcobil i i co i

## 3.4 Zkoušení tribologických vlastností

Podstata zkoušky tribologických vlastností metodou Ball-on-disc je specifikována v kapitole 2.3.4.1 a v experimentální části byla realizována v souladu s normou ASTM G99. Vlastní měření se uskutečnilo na vzorcích se čtvercovým tvarem a rozměry 25 x 25 x 6 mm z materiálu AISI H13, viz obr. 3.19. Vzorky tvářené i 3D tisknuté byly tepelně zpracované obdobným způsobem jako vzorky pro mechanické zkoušení. Zkoušení bylo uskutečněno při teplotách 300, 400 a 500° pro všechny tvářené vzorky s rozdílným TZ a pro SLM vzorky.



Obr. 3.19 Zkušební vzorek pro tribologické měření

Po umístění vzorků mezi dvě podpory zamezující jeho případný pohyb při zkoušení, byl stoleček se vzorkem vložen do zkušebního zařízení CETR UMI Multi Specimen Test System – Tribometr znázorněného na obr. 3.20. Tímto zařízením je umožněno zkoušené díly testovat při zvýšených teplotách až do 1000 °C. Softwarovým nastavením byly definovány počáteční podmínky experimentu, jmenovitě obvodová



rychlost, teplota, délka experimentu aj. Vzhledem k počtu zkoušených dílů byla délka experimentu nastavena na jednu hodinu (60 minut), přičemž délkou experimentu se rozumí doba přitlačování "pinu" s kuličkou kolmo na plochu otáčejícího se vzorku. Vzorek byl zatěžován silou 10 N. Do testovacího času se započítává i délka ohřevu na požadovanou teplotu (přibližně 10-18 min.) a zároveň po ukončení experimentu i chlazení ohřívací komory se zkoušeným dílem zpět na teplotu okolí (přibližně 50 minut). Celková doba trvání jednoho experimentu tedy činí cca 2 hodiny a 5 minut.



Obr. 3.20 Zkušební zařízení CETR UMI Multi Specimen Test System - Tribometr

Pro zkoušení dílů z oceli AISI H13 při pokojové teplotě bylo použito jiného tribometru pro suché a kapalné prostředí (od firmy Anton Paar), viz obr. 3.21.



Obr. 3.21 Tribometr pro mazané a nemazané povrchy

# 3.4.1 Hodnocení koeficientu tření v závislosti na teplotě a způsobu výroby materiálu

Měření bylo realizováno jako suché, při teplotě RT i za zvýšených teplot 300, 400 a 500 °C pro vzorky tvářené a vzorky zhotovené metodou SLM. Průběhy koeficientu tření v závislosti na čase při různých teplotách jsou ukázány na obr. 3. 22 až obr. 3.26. Naměřené hodnoty všech vzorků byly shrnuty do tab. 3.8, jako průměrné hodnoty.



Obr. 3.22 Průběh koeficientu tření u materiálu AISI H13 při TZ kaleno na vzduchu



**Obr. 3.23** Průběh koeficientu tření u materiálu AISI H13 při TZ 300 °C





Obr. 3.24 Průběh koeficientu tření u materiálu AISI H13 při TZ 475 °C



Obr. 3.25 Průběh koeficientu tření u materiálu AISI H13 při TZ 575 °C



Obr. 3.26 Průběh koeficientu tření u materiálu AISI H13 SLM

ocel	Zkoušení při teplotě [°C]					
occi			RT	300	400	500
		Kalené	0,747	0,606	0,534	0,421
م الم ملا ما مع	Tvářené	300 °C	0,656	0,594	0,433	0,338
ø koeficient tření	1 varene	475 °C	0,716	0,571	0,511	0,469
		575 °C	0,626	0,627	0,462	0,424
	SL	Μ	0,672	0,736	0,481	0,508
		Kalené	0,033	0,154	0.12	0,142
	Tvářené	300 °C	0,114	0,208	0,166	0,133
SMODCH	1 var ene	475 °C	0,068	0,16	0,097	0,153
		575 °C	0,094	0,213	0,104	0,115
	SLM		0,042	0,265	0,175	0,121

Tab. 3.8 Průměrné hodnoty koeficientu tření SLM a tvářených vzorků zkoušených při různých teplotách

# 3.4.2 Hodnocení míry opotřebení třecí dvojice v závislosti na teplotě a způsobu zpracování materiálu

V průběhu vtlačování kuličky do povrchu zkoušeného vzorku byla postupně vytvářena tzv. stopa, pomocí které je charakterizována míra opotřebení. Stopa opotřebení, která se vytvořila v důsledku kontaktu materiálové dvojice je charakterizována



geometrickým profilem, na kterém je měřena šířka a hloubka. Opotřebení třecí dvojice bylo vyhodnoceno pomocí konfokálního mikroskopu SENSOFAR S Neox znázorněného na obr. 3.27. Jeho princip je založen na bezkontaktním skenováním povrchu pomocí konfokální a interferometrické metody.



Obr. 3.27 Konfokální mikroskop SENSOFAR S Neox pro měření opotřebených povrchů

#### 3.4.2.1 Hloubka profilu opotřebení zkoušeného materiálu

Hloubka geometrického profilu byla měřena ve čtyřech místech vzájemně pootočených o 90°. Z naměřených hodnot byly vypočteny průměrné hodnoty hloubky jednotlivých profilů. Na obr. 3.28 je znázorněna finální detekce povrchu a profil stopy opotřebení u tvářené oceli (kaleno a popouštěno 475 °C) a na obr. 3.29 je ukázán příklad oceli zhotovené metodou SLM.V obou případech se jedná o stopu opotřebení po testu při teplotě 500 °C.





**Obr. 3.28** Analýza opotřebení zkušebního tělesa TZ 475 °C při zkoušecí teplotě 500 °C



Obr. 3.29 Analýza opotřebení zkušebního tělesa aditivně zhotoveného při zk. teplotě 500 °C



V následující tab. 3.9 jsou shrnuty průměrné hodnoty hloubky profilu stopy opotřebení, které byly vypočteny ze čtyř měřených bodů testovaného povrchu jak pro vzorky kalené, tak pro vzorky kalené a popouštěné při různých teplotách. V tabulce jsou zahrnuty i průměrné hodnoty pro 3D tisknutou ocel.

ocel AISI H13			Zkoušení při teplotě [°C]					
			RT	300	400	500		
	Tvářené	Kalené	1,7	7,02	13,89	23,64		
4 Illoubbo		300 °C	1,02	9,37	14,23	15,69		
ø нюцока profilu [µm]		475 °C	1,18	9,32	15,1	11,64		
1 1, 3		575 °C	0,88	8,87	13,84	11,3		
	SLM		1,82	5,74	6,9	4,01		
	Tvářené	Kalené	0,7	7,17	14,73	21,7		
		300 °C	0,07	0,03	0,03	0,04		
SMODCH		475 °C	0,32	0,34	0,61	1,9		
		575 °C	0,7	0,81	1,03	0,74		
	SLM		0,84	1,28	2,5	0,6		

Tab. 3.9 Průměrné hodnoty hloubky profilů pro všechny TZ i pro SLM vzorky při různých teplotách

#### 3.4.2.2 Šířka profilu opotřebení zkoušeného materiálu

Šířka stopy opotřebení byla, stejně jako hloubka, měřena ve čtyřech místech vzájemně pootočených o 90°. Z naměřených údajů byly vypočteny průměrné hodnoty šířky stopy opotřebení pro všechny druhy TZ dílů i pro SLM vzorky, viz tab. 3.10.

ocel AISI H13			Zkoušení při teplotě [°C]					
			RT	300	400	500		
	Tvářené	Kalené	0,93	0,99	0,77	0,8		
e III auklaa		300 °C	0,69	0,88	0,78	0,81		
ø нюцока profilu [µm]	1 var ene	475 °C	0,75	0,9	0,77	0,88		
		575 °C	0,71	0,96	0,76	0,79		
	SLM		0,79	1	0,82	0,58		

Tab. 3.10 Průměrné hodnoty šířky profilu pro všechny TZ i pro SLM vzorky při různých teplotách



ocel AISI H13			Zkoušení při teplotě [°C]					
			RT	300	400	500		
	Tvářené	Kalené	0,06	0,05	0,04	0,06		
		300 °C	0,07	0,03	0,03	0,04		
SMODCH		475 °C	0,1	0,04	0,02	0,05		
		575 °C	0,06	0,08	0,01	0,06		
	SLM		0,07	0,05	0,04	0,06		

Pro představu jsou na obr. 3.30 porovnány vzorky tvářené oceli (kaleno a popouštěno 300 °C) zkoušené za různých teplot a na obr. 3.31 jsou vzorky z 3D tisknuté oceli zkoušené při různých teplotách.



**Obr. 3.30** Vliv teploty okolí při tribologickém zkoušení na tvar stopy opotřebení (tvářené vzorky TZ 300 °C)



**Obr. 3.31** Vliv teploty okolí při tribologickém zkoušení na tvar stopy opotřebení (3D tisknuté vzorky)





#### 3.4.2.3 Opotřebení zkušební kuličky

Při kontaktu materiálové dvojice se neprojevuje opotřebení pouze na zkoušeném povrchu, ale i na tělese do něj vtlačovaném. Tímto tělesem je kulička z materiálu Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> a vyhodnocení jejího opotřebení bylo provedeno rovněž na konfokálním mikroskopu v souladu s normou ČSN EN 1071-13. Pro demonstraci opotřebení zkušební kuličky jsou na obr. 3.32 porovnány dvě vytvořené plošky po zkušebním testu provedeném na tvářeném a 3D tisknutém materiálu. Zkušební kuličky byly vybrány ze sady - měření při teplotách okolí RT.



**Obr. 3.32** Analýza opotřebení zkušební kuličky z materiálu Si3N4 po vykonaném tribologickém testu při teplotě RT (Pro tvářenou ocel vlevo, pro ocel zhotovenou 3D tiskem vpravo)

Opotřebení kuličky (pinu) se může matematicky vyjádřit z chybějícího objemu, který lze vypočíst pomocí následujícího vztahu (7) vycházejícího z nejmenšího průměru opotřebované plošky a z průměru na něj kolmém.

$$V_{pin} = \frac{\pi \cdot A^{3} \cdot B}{32 \cdot D} \tag{7}$$

kde značí: V<sub>pin</sub> - objem opotřebení kulového vzorku [mm<sup>3</sup>],

A - nejmenší průměr brusné stopy [mm],

B - průměr kolmý na nejmenší průměr [mm],

D - průměr zkušební kuličky [mm].

Výsledné hodnoty chybějícího objemu "pinu" jsou jako průměrné hodnoty shrnuty v tab. 3.11 pro tvářené vzorky s rozdílným tepelným zpracováním a při odlišných teplotách. V tabulce jsou zahrnuta data i pro zkušební kuličku aplikovanou na vzorky zhotovené SLM metodou.



Chybějící	Ocel AISI H13						
objem kuličky		SLM					
[mm <sup>3</sup> ]	300 °C	475 °C	575 °C	Kalena	300 °C		
RT	0,0065	0,0081	0,0071	0,0130	0,0105		
300 °C	0,0065	0,0043	0,0041	0,0065	0,0121		
400 °C	0,0028	0,0024	0,0033	0,0016	0,0046		
500 °C	0,0049	0,0062	0,004	0,0028	0,0041		

Tab.	3.11	Průměrné	hodnoty	opotřebení	zkušební k	culičkv z	materiálu	SI <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
			nounorj	00000000	Line Com i	content j L		~1)1 14



## 4 Diskuze dosažených výsledků

V bakalářské práci byla posuzována možnost náhrady tvářených dílů z nástrojové oceli AISI H13 díly tisknutými metodou SLM. Posuzovány byly mechanické vlastnosti pomocí měření tvrdosti dle Vickerse, statické zkoušky tahem a rázové zkoušky ohybem. Tribologické vlastnosti byly stanoveny pomocí metody Ball-on-disc. Pro testy byly použity tvářené vzorky s rozdílným způsobem tepelného zpracování.

Z výsledných průměrných hodnot tvrdosti dle Vickerse, viz obr. 4.1, je patrné, že největší tvrdost vykazují vzorky kalené na vzduchu a vzorky kalené a popouštěné při teplotě 475 °C po dobu 2 hod. Pro SLM díly byla, i po aplikaci žíhání na snížení zbytkových napětí, zjištěna průměrná hodnota tvrdosti menší pouze o 44 HV oproti zakaleným tvářeným vzorkům, tedy o necelých 8 %.



#### Tvrdosti dle Vickerse

Obr. 4.1 Průměrné hodnoty tvrdosti HV30 pro tvářenou a SLM zhotovenou ocel H13

Dále byla provedena zkouška tahem při pokojové teplotě RT a za zvýšených teplot, přičemž byly porovnány hodnoty meze kluzu  $R_{p0,2}$ , meze pevnosti  $R_m$ , tažnosti na mezi pevnosti  $A_g$  a celkové tažnosti A. Na obr. 4.2 jsou souhrnně zobrazeny hodnoty meze kluzu  $R_{p0,2}$  při teplotě okolí RT a na obr. 4.3 jsou souhrnně zobrazeny hodnoty meze kluzu  $R_{p0,2}$  při zvýšených teplotách. Analogicky jsou na obr. 4.4 a na obr. 4.5 zobrazeny hodnoty meze pevnosti  $R_m$  a na obr. 4.6 a obr. 4.7 zobrazeny hodnoty homogenní tažnosti  $A_g$ .





## Smluvní mez kluzu při teplotě okolí RT

**Obr. 4.2** Průměrné hodnoty smluvní meze kluzu R<sub>p0,2</sub> při teplotě okolí RT pro tvářenou a SLM zhotovenou ocel H13



## Smluvní mez kluzu při zvýšených teplotách

**Obr. 4.3** Změna smluvní meze kluzu R<sub>p0,2</sub> v závislosti na zvýšených teplotách pro tvářenou a SLM zhotovenou ocel H13





#### Mez pevnosti při teplotě okolí RT

**Obr. 4.4** Průměrné hodnoty meze pevnosti R<sub>m</sub> při teplotách okolí RT pro tvářenou a SLM zhotovenou ocel H13



#### Mez pevnosti při zvýšených teplotách

**Obr. 4.5** Průměrné hodnoty meze pevnosti R<sub>m</sub> při zvýšených teplotách pro tvářenou a SLM zhotovenou ocel H13

Z výsledků měření meze kluzu a meze pevnosti při teplotě okolí lze získat několik zajímavých údajů. Hodnoty meze kluzu  $R_{p0,2}$  jsou u tvářených vzorků značně rozdílné. Zajímavé je, že nejnižší hodnoty meze kluzu bylo dosaženo u kalených vzorků, i když popouštěním zpravidla hodnoty meze kluzu klesají. Důvodem je v tomto případě fakt, že u oceli H13 dochází při popouštění k sekundárnímu vytvrzování (viz obr. 3.1), což ovlivňuje jak mez kluzu, tak hodnoty tažnosti. Mez kluzu SLM vzorků je srovnatelná s hodnotami dosaženými u kalených a popouštěných vzorků.



V případě hodnot meze pevnosti  $R_m$  zjištěných při RT. Kopíruji popouštěné vzorky křivku vytvrzování z obr. 3.1. Vzorky vytvořené metodou SLM pak mají hodnotu meze pevnosti  $R_m$  nižší o cca 15 %. Zkoušky tahem při vyšších teplotách byly z tvářených vzorků realizovány pouze pro vzorky kalené a popouštěné při teplotě 475 °C. Důvodem byl nejlepší dosažený poměr pevnostních vlastností a homogenní tažnosti. Za vyšších teplot dosáhly SLM vzorky vyšších hodnot meze kluzu v rozmezí od 6 do 14 % v závislosti na teplotě zkoušení. Z pohledu meze pevnosti za vyšších teplot byl trend obrácený a SLM vzorky dosáhly hodnot nižších o 6 až 11 % oproti vzorkům tvářeným.



## Homogenní tažnost při teplotě okolí RT

**Obr. 4.6** Průměrné hodnoty homogenní tažnosti A<sub>g</sub> při teplotách okolí RT pro tvářenou a SLM zhotovenou ocel H13



## Homogenní tažnost při zvýšených teplotách

**Obr. 4.7** Změna homogenní tažnosti A<sub>g</sub> v závislosti na zvýšených teplotách pro tvářenou a SLM zhotovenou ocel H13





Jako největší problém se tak u SLM vzorků jeví homogenní tažnost A<sub>g</sub>, která je velmi nízká jak při teplotě okolí, tak i za zvýšených teplot. Při teplotě RT je oproti vzorkům kaleným a popouštěným při teplotě 475 °C nižší 3,7 násobně a při zvýšené teplotě 200 °C dokonce 6,7 násobně. S rostoucí teplotou se rozdíl snižuje, ale i tak je při teplotě 500 °C více než trojnásobný. Obdobné je to i s hodnotou energie spotřebované na přeražení zkušebního vzorku na Charpyho kladivu. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u vzorků kalených a popouštěných při 300 °C, kde průměrná hodnota KCV dosahovala 57 J·cm<sup>-1</sup>. Vzorky popouštěné při 475 a 575 °C měly hodnotu KCV nižší o 37 %. Přesto to bylo přibližně dvakrát tolik než u vzorků vyrobených metodou SLM.



## Vrubová houževnatost při teplotě okolí RT

Obr. 4.8 Vrubová houževnatost u různých TZ pro tvářenou a SLM zhotovenou ocel H13

Při hodnocení tribologických vlastností byl stanoven jednak koeficient tření zkoušeného materiálu a následně opotřebení třecí dvojice vyjádřené šířkou a hloubkou stopy opotřebení na zkoušeném vzorku a opotřebením zkušební kuličky. Testy byly realizovány jak při teplotě RT, tak za zvýšených teplot 300, 400 a 500 °C. Na obr. 4.9 jsou shrnuty změřené hodnoty koeficientu tření pro všechny typy vzorků a testovací teploty. Z výsledku je patrné, že s rostoucí teplotou koeficient tření klesá, což je dáno snižující se třecí silou a je tedy kladen menší odpor vůči pohybu. Koeficient tření se u tvářených a SLM vzorků pohybuje v obdobném rozmezí hodnot. U SLM vzorků je ale znát větší rozptyl hodnot a nejednoznačnost trendu. To je pravděpodobně způsobeno dílčí nekompaktností, případně dílčí porozitou, která se u SLM vzorků může vyskytovat.





TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta stroiní

**Obr. 4.9** Závislost koeficientu tření na druhu TZ a na různých teplotách okolí pro tvářenou a SLM zhotovenou ocel H13

Při hodnocení velikosti opotřebení materiálové dvojice je třeba si uvědomit, že šířka stopy opotřebení není primárně dána odolností testovaného materiálu proti opotřebení, ale že závisí na intenzitě opotřebení třecí kuličky. Proto je šířka stopy opotřebení, viz obr. 4.10, přibližně stejná pro všechny testované vzorky. Mnohem větší vypovídající schopnost má hloubka stopy opotřebení. Čím bude menší, tím má materiál větší odolnost proti opotřebení. Do porovnání změny hloubky profilu, viz obr. 4.11, nebylo zahrnuto zkoušení při teplotě okolí RT, protože při této teplotě dochází pouze k opotřebení protikusu (zkušební kuličky) z důvodu větší tvrdosti zkoušeného materiálu. Z výsledků na obr. 4.11 je zřejmé, že SLM vzorky mají vyšší odolnost proti opotřebení než vzorky tvářené. To potvrzují i údaje na obr. 4.12. Opotřebení třecí kuličky je po testování SLM vzorků větší než po testování na tvářených vzorcích.



**Obr. 4.10** Závislost šířky profilu opotřebení na druhu TZ a na různých teplotách okolí pro tvářenou a SLM zhotovenou ocel H13





**Obr. 4.11** Závislost hloubky opotřebeného profilu na druhu TZ a na různých teplotách okolí pro tvářenou a SLM zhotovenou ocel H13



**Obr. 4.12** Závislost opotřebení kuličky na druhu TZ a na různých teplotách okolí pro tvářenou a SLM zhotovenou ocel H13



# Závěr

Cílem bakalářské práce bylo posouzení možností nahradit stávající tvářené díly z oceli AISI H13 díly vyrobenými aditivně metodou SLM. V teoretické části je popsáno základní rozdělení nástrojových ocelí, s podrobnou charakterizací oceli H13 (1.2344). Dále je vysvětlena podstata aditivních technologií s popisem základních metod 3D tisku z kovových prášku a rešerše stávajících znalostí při 3D tisku nástrojových ocelí. Závěr teoretické části je věnován popisu podstaty mechanických a tribologických zkoušek, které byly využity v experimentální části práce.

Praktická část práce byla rozdělena do dílčích etap zahrnujících optimalizaci tepelného zpracování tvářených vzorků, 3D tisku zkušebních vzorků metodou SLM a následných mechanických a tribologických testů při RT i za zvýšených teplot. Změřené a souhrnně diskutované výsledky je možné shrnout v následujících bodech:

- Jako nejoptimálnější způsob tepelného zpracování tvářených dílů, se z pohledu mechanických vlastnosti jeví kalení z austenitizační teploty 1040 °C s následným popouštěním a sekundárním vytvrzováním při teplotě 475 °C po dobu 2 hodin.
- Jako nejoptimálnější způsob tepelného zpracování tvářených dílů se z pohledu tribologických vlastností jeví kalení z austenitizační teploty 1040 °C s následným popouštěním a sekundárním vytvrzováním při teplotě 300 °C po dobu 2 hod.
- Výsledky tvrdosti u SLM vzorků jsou přibližně o 7,6 % nižší, než u nejlépe vycházejících tvářených dílů (kaleno + popouštěno při 475 °C).
- Mez kluzu SLM vzorků při RT je srovnatelná s hodnotami dosaženými u kalených a popouštěných vzorků. Za vyšších teplot dosáhly SLM vzorky vyšších hodnot meze kluzu v rozmezí od 6 do 14 % v závislosti na teplotě zkoušení.
- Vzorky vytvořené metodou SLM pak mají hodnotu meze pevnosti R<sub>m</sub> nižší o cca 15 % oproti tvářeným vzorkům. Za vyšších teplot se snížení meze pevnosti pohybuje v rozmezí od 6 do 11 %.
- SLM vzorky mají velmi nízkou hodnotu homogenní tažnosti Ag. Při RT i při zvýšených teplotách je více jak o trojnásobek nižší.
- SLM vzorky mají také velmi nízké hodnoty KCV. V porovnání s tvářenými vzorky je hodnota KCV přibližně poloviční.
- Z pohledu tribologie mají SLM vzorky přibližně dvakrát vyšší odolnost proti opotřebení než tvářené vzorky kalené a popouštěné při teplotě 475 °C."



Na základě výsledků provedených experimentů je možné konstatovat, že náhrada tvářených dílů aditivně vytvořenými díly je možná, ovšem s určitými omezeními. Ta omezení jsou dána především velmi nízkými hodnotami tažnosti a houževnatosti. Využití SLM dílů lze tedy doporučit pro aplikace pracující za vyšších teplot, u který převažuje statické zatížení.





# Zdroje a literatura

[1] Roberts, G., G. KRAUSS a R. KENNEDY. *TOOL STEELS*. Fith Edition. USA: ASM International, 2000. ISBN 0-87170-599-0.

[2] Macek, K., P. Zuna a kolektiv. *Nauka o materiálu*. 1. České vysoké učení technické v Praze: ČVÚT, 1999. ISBN 80-01-01507-6.

[3] TOOLSTEEL. *Toolsteel.cz* [online]. Czech republic: [cit. 2020-10-19]. Dostupné z: http://toolsteel.cz/1-2344-x40crmov5-1-19554-h13-tlh/

[4] *Qiluspecialsteel.com* [online]. Čína, 1986 [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: http://www.qiluspecialsteel.com/cs/about-us

[5] Lkalloy [online]. ČR, 2002 [cit. 2020-11-18]. Dostupné
z: https://lkalloy.com/cs/about-us/

[6] Azom.com [online]. UK, 2019 [cit. 2020-11-18]. Dostupnéz: www.azonetwork.com

[7] ASTM Steel [online]. Čína, 1999 [cit. 2020-11-18]. Dostupné
 z: https://www.astmsteel.com/about-us/

[8] Noorani, R. *Rapid Prototyping: principles and applications*. Hoboken: John Wiley and Sons, 2006 pdf

[9] Negi, S., S. Dhiman. a R. Sharma. *Basics, applications and future of additive manufacturing technologies*: a review. Journal of manufacturing technology research. 2013, (5), 75-96. ISSN 1943-8095.

[10] Tatarczak, J., Z. Krzysiak, Z. Kaliniewicz. a L. Krzywonos. *A review of the newest* 3D printing technology for metal objects. 2017, (90), 611-614. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.89

[11] Evans, R. S., D.L. Bourell, J. J. Beaman a M. I. Campbell. *SLS materials development method for rapid manufacturing*. The University of Texas at Austin, 2005, (78712), 184-196.







[12] Vijay V., K. a V. V. Nandini. *Direct metal laser sintering: A digitised metal Casting technology*. J. indian prosthodont society, 2013, 13(4), 389-392. Dostupné z: doi:10.1007/s13191-013-0256-8

[13] Kumar, S. Selective laser sintering: A qualitative and objective approach, 2003,
(55), 43-47. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/s11837-003-0175-y

[14] Sekerka, V. Výroba dílů technologií DMLS a jejich porovnání s jinými konvenčními technologiemi z hlediska ekonomické náročnosti. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Josef S., Ph.D.

[15] Khaing, M. W., M., J. Y. H. FUH a L. LU. *Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts*. Journal of Materials Processing Technology. 2001, 1-3(113), 269-272. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00584-2

[16] Bass, B. S. Validating the arcam EBM process as an alternative fabrication *method for Titanium-6Al-4V alloys.* Raleigh, North Carolina, 2007. Master thesis. North Carolina State University. Vedoucí práce Denis C., Carl K.

[17] *Isaacanderson.co.uk* [online]. United Kingdom:, [cit. 2020-10-19]. Dostupné z: https://www.isaacanderson.co.uk/portfolio/electron-beam-melting

[18] Spears, T. G. a S. A. Gold. *In-process sensing in selective laser melting (SLM)* additive manufacturing. Integrating Materials and Manufacturing Innovation. 2016, (5), 16-40. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1186/s40192-016-0045-4

[19] Song, B., X. Zhao, S. Li, Ch. Han, Q. Wei, S. Wen, J. Liu. a Y. Shi. *Differences in microstructure and properties between selective laser melting and traditional manufacturing for fabrication of metal parts*: A review. Bo SONG et al. 2015, 2(10), 111-125. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/s11465-015-0341-2

[20] Gong, H., D. Snelling, K. Kardel. a A. Carrano. *Comparison of Stainless Steel 316L Parts Made by FDM and SLM-Based additive manufacturing processes*. Solid freeform fabrication. Department of manufacturing engineering, Georgia Southern University, Statesboro, GA 30460, USA: 2018 The Minerals, Metals & Materials Society, 2018, 3(71), 880-885. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/s11837-018-3207-3

63 I


Cyr, E., H. Asgari, S. Shamsdini, M. Purdy, K. Hosseinkhani. a M. Mohammadi. [21] Fracture behaviour of additively manufactured MS1-H13 hybrid hard steels. University New Brunswick, 174-177. of Canada, 2018. (212),Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.10.097

Čapková, V. Omezující parametry 3D tisku. ZČU - FST - KTO, 2015. Diplomová [22] práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[23] Dzukey, G. A., K. Yang, Q. Wang., B. Zhuang. a W. Hou. Porosity, hardness, friction and wear performance analysis of H13 SLM - Formed samples. Journal of materials engineering and performance. 2020, (29), 4957-4966. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/s11665-020-04999-0

[24] Benda, A. Mikrostruturní a únavové charakteristiky oceli AISI 316L připravené 3D tiskem. Ostrava, 2019. Diplomová práce. Vysoká škola Baňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. M. Kraus, Ph.D.

[25] Kurtynowski, T., W. Stopyra, K. Gruber, G. Ziólkowski., B. Kuźnicka. a E. Chlebus. Effect of scanning and support strategies on relative density of SLM-ed H13 Steel in relation to specimen size. Materials. faculty of mechanical engineering, Centre for advanced manufacturing technologies (CAMT/FPC), Wroclaw university of science and technology, 50-371 Wrocław, Poland, 2019, 12(2) (239), 1-18. Dostupné z: doi:doi.org/10.3390/ma12020239

Sames, W. J., F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff a S. S. Babu. *The metallurgy* [26] and processing science of metal additive manufacturing. International Materials Reviews. 2016, (19), 1-46. ISSN 0950-6608. Dostupné z: doi:http://dx.doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649

[27] Robinson, J., I. Ashton, P. Fox, E. Jones a C. Sutcliffe. Determination of the effect of scan strategy on residual stress in laser powder bed fusion additive manufacturing. Additive manufaturing. School of engineering, University of Liverpool, 2018, /(23), Liverpool, L69 3GH. United Kingdom, 13-24. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.07.001





[28] ISO 6892-1. Kovové materiály - zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

[29] Sobotová, J. a kolektiv. *Nauka o materiálu I. a II.: Cvičení*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.

[30] Maděra, J. *Posouzení mechanických vlastností 3D tisknutých a tvářených dílů z materiálu AISI 316L*. Liberec, 2020. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.

[31] Skálová, J., R. Kovařík. a V. Benedikt. Základní zkoušky kovových materiálů. 1.Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-417-8.

[32] Stachoviak, G. W. a A. W. Batchelor. *Engineering tribology*. Fourth edition. USA: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-397047-.

[33] Bakalová, T. Vliv materiálových a technologických parametrů obrábění na napětí v povrchové vrstvě a vlastnosti dynamicky namáhaných strojních součástí. Liberec, 2010. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.

[34] Hutchings, I. a P. Shipway. Tribology: *Friction and wear of engineering materials*. 2. UK: Elsevier etd., 2017. ISBN 978-0-08-100910-9.

[35] Pilous, V. *Technologie kovových materiálů*. *1*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001. ISBN 80-7082-811-0.

[36] Kaleli, H. New Universal Tribometr as Pin or Ball–on-Disc and reciprocating Pin–on-Plate types. Tribology in industry. 2016, 2(38), 235-240.

[37] Palič, M. Vliv doby aplikace monovrstvy z vícevrstvé TiN/ CrN struktury na mechanické vlastnosti a tribologické vlastnosti povlaku. Liberec, 2020. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.

[38] ČSN EN ISO 6507-1. Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda. Praha: Český normalizační institut, 2006.

[39] ČSN EN ISO 14 556. *Ocel - Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho - Část 1: Zkušební metoda (V a U vruby)*. ČMI Brno: Český normalizační institut, 2000.

[40] ASTM G99-95. Standartní zkušební metoda pro testovaní opotřebení pomocí zařízení Pin-on-Disk. ASTM International,2000.