

Mikrostruktura a mechanické vlastnosti slitiny Ti6Al4V připravené metodou selektivního laserového tavení

Microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy prepared by selective laser melting

Ing. Vojtěch Kubeš¹; doc. Dr. Ing. Monika Losertová¹; Ing. Kamila Dostálová²; prof. Vittorio Di Cocco³; prof. Francesco Iacoviello³

¹ VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálově-technologická, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava- Poruba, Česká republika

² VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava- Poruba, Česká republika

³ Università degli Studi Cassino e del Lazio Meridionale, Department of Mechanics, Structures, Environment and Territory, Viale dell'Università, Cassino, Italy

Aditivní technologie výroby, mezi něž patří selektivní laserové tavení, představují pokročilé výrobní metody umožňující snižovat počet výrobních kroků, efektivně využívat materiál a vyrábět přesné tvary přímo z 3D modelů. I přes potenciálně široké uplatnění v různých průmyslových odvětvích zůstává stále problémem procesu selektivního laserového tavení výskyt výrobních vad spojených s velkými teplotními gradienty v důsledku krátkodobých interakcí a vysoce lokalizovaných teplotních přenosů. Produkt připravený touto metodou tak může obsahovat póry, fázovou nehomogenitu nebo zbytkové pnutí, které vedou k odlišnému mechanickému a lomovému chování.

Studium v této práci bylo zaměřeno na srovnání mechanických vlastností v tahu vzorků ze slitiny Ti6Al4V vyrobených pomocí selektivního laserového tavení a připravených konvenčním litím a kování. Materiál bez tepelného zpracování byl podroben tahové zkoušce a pomocí fraktografické analýzy byly studovány lomové plochy. Mez kluzu a mez pevnosti vykazovaly vyšší hodnoty v případě vzorků připravených selektivním laserovým tavením, a to 1021 MPa a 1163 MPa, oproti kovaným vzorkům s 863 MPa a 978 MPa. Naopak tažnost byla o 40 % vyšší v případě materiálu připraveného litím a kování. Výsledky fraktografického studia obou typů vzorků byly hodnoceny v souvislosti s mikrostrukturními charakteristikami. Lom vzorků připravených selektivním laserovým tavením vykazoval křehčí charakter v souladu s mikrostrukturou tvořenou téměř pouze martenzitem, na rozdíl od konvenčně připravené slitiny, u které rovnoosá ($\alpha+\beta$) mikrostruktura vedla k tvárnému lomu.

Klíčová slova: selektivní laserové tavení; mikrostruktura; výrobní vady; pnutí; pevnost v tahu; martenzit

Additive manufacturing including selective laser melting are advanced manufacturing technologies that allow minimization of producing steps, effectiveness of material use and produce net shape parts directly from 3D computer models. Although these technologies can be potentially used in many industries, the main problem of the selective laser melting process is existence of manufacturing defects related with high temperature gradients due short time interactions and localised heat transfers. Thus, product prepared by this method can contain voids, phase inhomogeneities or residual tensions providing variant mechanical properties and fracture behaviour.

The tensile mechanical properties of specimens prepared of Ti6Al4V alloy produced by selective laser melting technology or by conventional casting and forging were compared in this paper. Material in non-heat treated condition was tensile tested and fracture surfaces were analysed. The values of yield strength and ultimate tensile stress of selective laser melted specimens reached 1021 MPa and 1163 MPa, respectively, which was higher than for forged material with values of 863 MPa and 978 MPa. Conversely, the ductility was higher by 40 % for traditionally prepared material. The results of the fractography observation for both types of the samples were evaluated on the base of the microstructure analysis. The fracture surface of selective laser melted specimens showed more brittle feature due to the microstructure composed almost fully of martensite unlike conventionally prepared alloy with equiaxed ($\alpha+\beta$) microstructure and more ductile character of fracture surfaces.

Key words: selective laser melting; microstructure; manufacturing defects; tensions; tensile strength; martensite

1. Úvod

Mezi nejčastěji používané biokompatibilní materiály v traumatologii nebo ortopedii patří ocel AISI 316L

(ASTM F55 nebo F138), slitiny CoCr (ASTM F75 nebo F90) a slitiny Ti6Al4V (ASTM F136) [1-3]. Vzhledem k rostoucí citlivosti lidského těla na přítomnost niklu v materiálech je většina implantátů nyní vyráběna ze

slitiny Ti6Al4V, která má vyšší biologickou kompatibilitu, vyšší odolnost proti korozi a příznivé mechanické vlastnosti ve srovnání s ocelí 316L. Spolehlivost a bezpečnost implantátů jsou ovlivněny mechanickými vlastnostmi a rozložením napětí v materiálu, což závisí na mikrostruktuře slitiny Ti6Al4V, a tedy na tepelné mechanické historii zpracování [1, 4]. Biomechanická kompatibilita kovového materiálu s lidskou kostí je určena hodnotou Youngova modulu pružnosti, která by měla být co nejnižší a ideálně co nejbližší hodnotě kosti. Vlivem malých rozdílů v modulech je možné potlačit tzv. „stínění napětí“ při zatěžování léčené kosti a urychlit proces osteosyntézy. Modul pružnosti implantátů vyrobených konvenční metodou ze slitiny Ti6Al4V se pohybuje okolo 112 GPa, což je sice téměř poloviční oproti oceli 316 L (206 GPa), přesto je stále ještě vysoký v porovnání s modulem pružnosti lidské kosti (10-40 GPa) [1].

Nové nebo inovované materiály lze připravit pomocí progresivních technologií nebo legujících prvků. Proces selektivního laserového tavení (dále uváděno jako SLM – z anglického Selective Laser Melting) představuje pokročilou výrobní techniku, která umožňuje snižování počtu výrobních operací, efektivní využití materiálu a výrobu přesných tvarů přímo z 3D modelů [5-8]. SLM umožňuje tvorbu dílů s vysokou geometrickou složitostí postupným vrstvením (building) materiálu, a nabízí tak široké uplatnění v různých průmyslových odvětvích. Konečné produkty však mohou vykazovat některé problémy a vady spojené s velkými teplotními gradienty, které se vyskytují v procesu SLM vlivem krátkých intervalů interakcí a vysoce lokalizovanému přenosu tepla. Materiál připravený touto metodou může tedy obsahovat některé výrobní vady, jako jsou póry, fázová nehomogenita nebo zbytkové pnutí [5-7], což může vést k odlišnému mechanickému a lomovému chování ve srovnání s konvenčně připravenými výrobky. Kvalita výsledného produktu SLM závisí na vhodném nastavení parametrů výroby, jako jsou skenovací rychlost, výkon laseru, tloušťka vrstvy, skenovací strategie, vzdálenost šrafování a další. Tyto parametry ovlivňují například velikost roztavené lázně, tepelně ovlivněné oblasti nebo množství neroztavených částic, a tím také výslednou hustotu či drsnost povrchu.

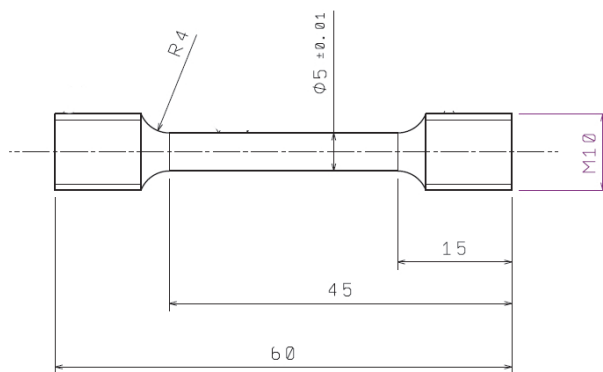
Vliv parametrů procesu SLM i post - building tepelného zpracování je předmětem zvláštního zájmu zejména u slitiny Ti6Al4V [6, 7], která je široce používána pro biokompatibilní implantáty v ortopedii a traumatologii. Proces SLM vytváří vrstvu po vrstvě, takže dochází k tvorbě vysoce směrové mikrostruktury. Vyrobený materiál v dodaném stavu obsahuje jemný, acikulární α' martenzit, který po tepelném zpracování transformuje na bimodální nebo lamelární rovnovážnou strukturu tvořenou fázemi α a β . Relaxace zbytkového pnutí a modifikace rychle ztuhlé mikrostruktury po žhání vedou k zajištění vhodnější kombinace pevnosti a houževnatosti materiálu.

Tato práce, která je součástí výzkumu mechanických vlastností v tahu i při cyklickém zatěžování implantátů vyrobených pomocí SLM, je zaměřena na vyhodnocení lomových ploch po tahové zkoušce ve vztahu

k mikrostrukturním charakteristikám a mechanickým vlastnostem u vzorků v dodaném stavu po SLM. Výsledky hodnocení byly srovnány s výsledky pro materiál připravený tradiční metodou, tedy litím a kováním.

2. Experimentální metody a materiál

Byly studovány dvě série vzorků z Ti6Al4V, jejichž rozměry pro tahovou zkoušku jsou uvedeny na obr. 1. První skupinu tvořilo pět zkušebních vzorků, které byly připraveny z tradičně kovaných tyčí, dodávaných společností BIBUS METALS CZ, a jsou dále uváděny jako *kované*. Druhá skupina zahrnovala pět zkušebních vzorků, které byly připraveny selektivním laserovým tavením ve společnosti ProSpon, spol. s r.o. a jsou dále uváděny jako *SLM*. Stavba vzorků SLM byla prováděna ve vertikální orientaci (v ose tahového zatěžování) se stanovenými parametry: výkon laseru 200 W, tloušťka vrstvy 30 μm , velikost skenovacích ostrůvků $5 \times 5 \text{ mm}$ – s úhlem 45° , skenovací rychlost 800-900 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Před tahovou zkouškou byl povrch SLM vzorků dodatečně vyhlazen a hlavy byly u obou sad opatřeny závity.



Obr. 1 Schéma tahové tyče pro obě sady vzorků
Fig. 1 Schematic of tensile test rod for both specimen sets

Tahová zkouška obou sad byla provedena se zatížením při $F = 17,3 \text{ kN}$, rychlosti deformace $\dot{\epsilon} = 0,0025 \text{ s}^{-1}$ na zařízení GALDABINI, Sun 10 za pokojové teploty. Pro metalografické hodnocení mikrostruktury byly vzorky, které byly odebrány z hlav tahových zkoušek, broušeny, leštěny a leptány pomocí Krollova činidla (roztok 6 % HF, 8 % HNO_3 , 86 % H_2O) po dobu 10–60 sekund. Mikrostruktura byla studována pomocí optického mikroskopu OLYMPUS GX51, přičemž pro vyhodnocení pórovitosti bylo využito softwaru Image-Pro Plus společnosti Media Cybernetics. Lomové povrchy byly dokumentovány pomocí skenovacího elektronového mikroskopu PHILIPS SEM 505.

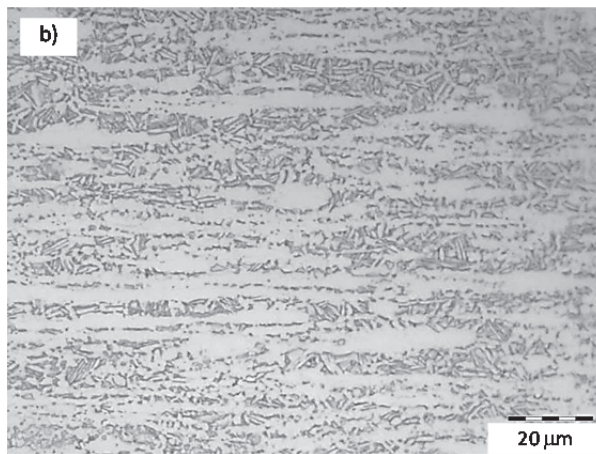
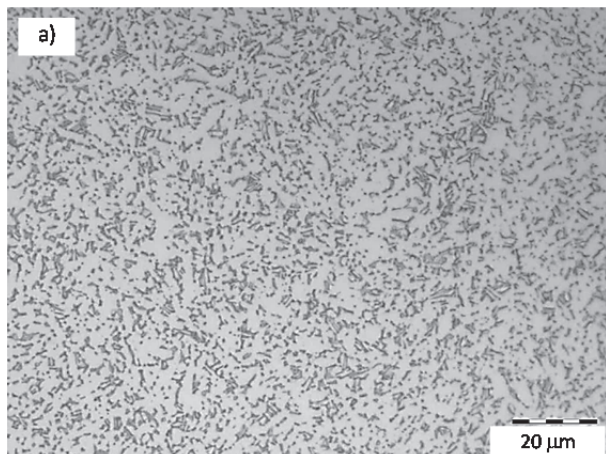
3. Výsledky a diskuse

Mikrostruktura kovaných vzorků v příčném a podélném řezu je zobrazena na obr. 2. Velmi jemná rovnoosá zrna v příčném řezu (obr. 1a) jsou tvořena α fází (světlá fáze) o velikosti 5 μm , mezi nimi se vyskytuje původní β fáze

transformovaná na $\alpha+\beta$ lamely (tmavě šedé oblasti). V podélném řezu (obr. 2b) jsou odpovídající zrna protažena kováním za tepla.

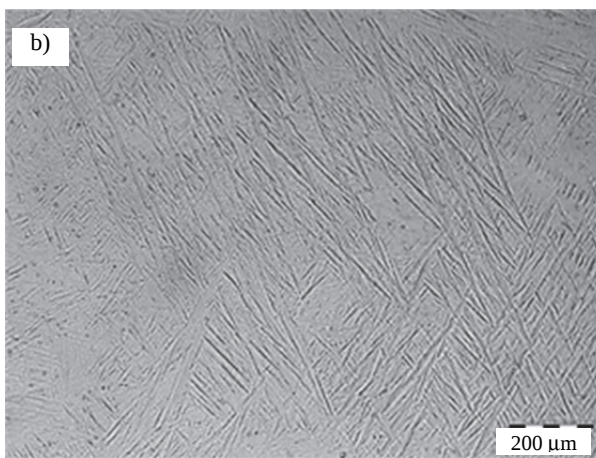
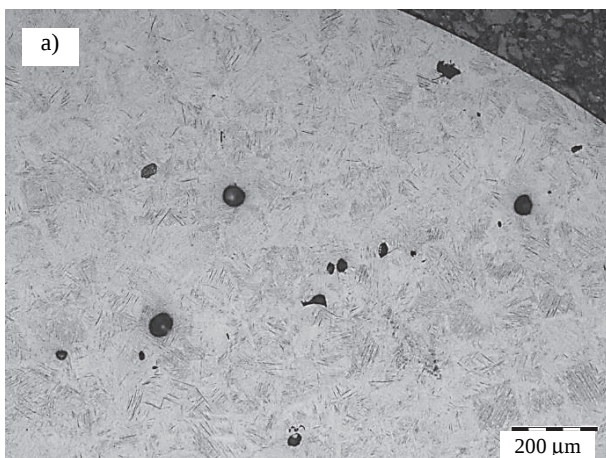
Makrostruktura SLM vzorků obsahovala v podélném řezu charakteristické vzory související s roztavenými lázněmi slitiny během procesu stavby vzorku, zatímco v příčném řezu byla pozorována textura odpovídající skenovací strategii laserového natavování (obr. 3a).

Mikrostruktura SLM vzorků v dodaném stavu je tvořena martenzitickými jehlicemi v původní fázi β , které vznikly v důsledku rychlého ochlazování roztavených lázní, jak je vidět na obr. 3b. Po tepelném zpracování jsou martenzitické jehlice transformovány na lamelární $\alpha+\beta$ strukturu, jak bylo potvrzeno v [6]. Velikost pórů se pohybovala od 1,8 do 159,3 μm , přičemž střední hodnota pórovitosti měřená u dodaného stavu (obr. 3a) dosáhla 3 %.



Obr. 2 Mikrostruktura kovaných vzorků z Ti6Al4V: a) rovnoosá zrna α fáze a velmi jemná zrna původní β fáze transformované na ($\alpha+\beta$) lamely v příčném řezu a b) detail protažených α a transformovaných β zrn v podélném řezu

Fig. 2 Microstructure of Ti6Al4V forged sample: a) equiaxed α grains with fine ($\alpha+\beta$) lamellae in the cross section and b) detail of elongated α and β transformed grains in the longitudinal section



Obr. 3 Mikrostruktura Ti6Al4V vzorků po SLM: a) příčný řez s póry, morfologie skenovací strategie a martenzitické jehlice; b) detail acikulární martenzitické struktury

Fig. 3 Microstructure of Ti6Al4V sample after SLM: a) cross section with pores, scanning strategy morphology and martensite needles; b) detail of acicular martensite structure



Obr. 4 Makroskopický pohled na přetržené vzorky po tahové zkoušce: a) vzhled lomových ploch (vlevo – kovaný a vpravo – SLM); tvorba krčku u vzorků b) kovaných ($\epsilon_f = 13,6 \%$) a c) SLM ($\epsilon_f = 7,2 \%$)

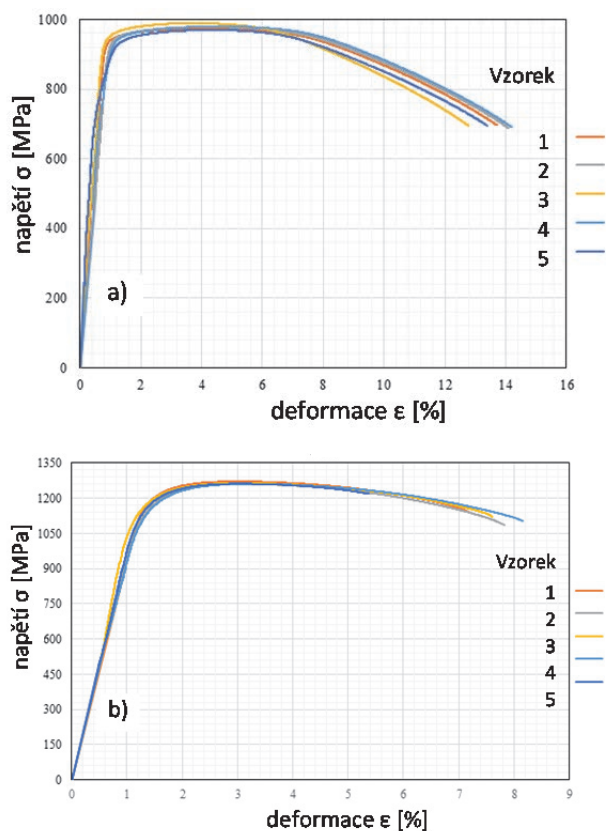
Fig. 4 Macrographs of tensile tested specimens: a) view of fracture surfaces (left – forged and right – SLM); necking feature for specimens b) forged ($\epsilon_f = 13.6 \%$) and c) SLM ($\epsilon_f = 7.2 \%$)

Tab. 1 Mechanické vlastnosti obou sérií vzorků Ti6Al4V v kovaném stavu a po SLM

Tab.1 Mechanical properties of both sets of Ti6Al4V specimens in forged and SLM state

Vzorek	σ_y	σ_m	ϵ_f	E
	[MPa]	[MPa]	[%]	[GPa]
<i>Kovaný</i>				
1	881	974	13,69	118
2	897	978	14,08	101
3	903	989	12,79	126
4	806	979	14,19	111
5	828	969	13,39	117
Průměr	863 ± 43	978 ± 7	13,6 ± 0,6	115 ± 9
<i>SLM</i>				
1	1091	1271	7,23	93
2	1005	1260	7,82	95
3	924	1263	7,61	102
4	1052	1260	8,16	92
5	1033	1261	5,34	91
Průměr	1021 ± 63	1263 ± 5	7,2 ± 1,1	95 ± 4

Pozn.: σ_y – mez kluzu v tahu, σ_m – mez pevnosti v tahu, ϵ_f – deformace do lomu; E – Youngův modul



Obr. 5 Tahové diagramy Ti6Al4V vzorků: a) kované a b) SLM

Fig. 5 Tensile test graphs of Ti6Al4V samples: a) forged and b) SLM

Průběh plastické deformace se pro obě sady lišil. Zatímco kované vzorky tvořily během zkoušky v tahu krček, jak je patrné z obr. 4, SLM vzorky vykazovaly makroskopicky křehčí rys porušení s velmi slabým náznakem vzniku krčku, což odpovídá martenzitické mikrostruktuře.

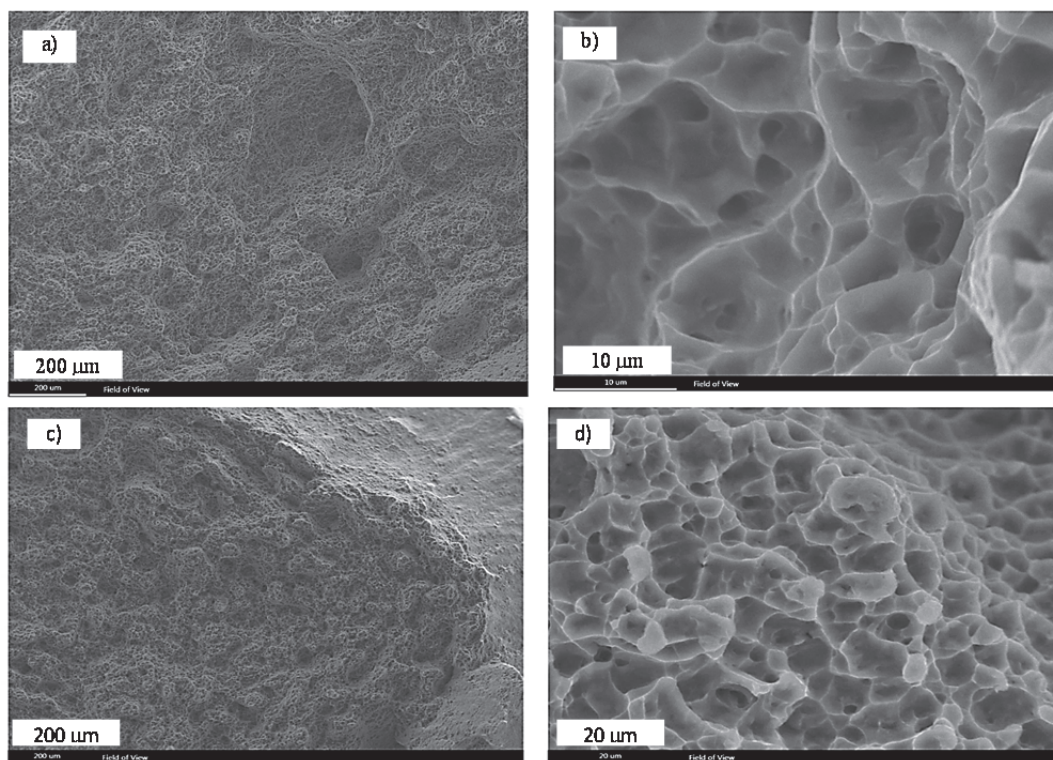
Výsledky mechanických vlastností v tahu obou sérií vzorků jsou shrnuty v tab. 1. Ze srovnání středních hodnot je zřejmé, že mikrostruktura martenzitu vedla k vyšší mezi kluzu (1021 MPa) a mezi pevnosti v tahu (1263 MPa). Oproti vzorkům s rovnoosou mikrostrukturou ($\alpha+\beta$), u níž mez kluzu dosahovala 863 MPa a meze pevnosti 978 MPa, se v materiálu po SLM zvýšily díky martenzitické mikrostruktuře průměrné hodnoty meze kluzu o 18 % a meze pevnosti v tahu o 29 %. Na obr. 5 jsou uvedeny typické křivky průběhu tahové zkoušky pro obě série vzorků Ti6Al4V, zatěžovaných až do přetržení. Z grafů pro zatížení do lomu je zřejmé, že se úroveň plasticity, a tedy i deformační chování obou materiálů, liší. Vzorek s rovnoosou mikrostrukturou ($\alpha+\beta$) vykazoval větší prodloužení ($\epsilon_f = 13,6$ %) ve srovnání se vzorkem SLM s martenzitickou strukturou ($\epsilon_f = 7,2$ %).

Z tabulky 1 je rovněž patrné snížení Youngova modulu o 17 % (z 115 na 95 GPa) vlivem přítomné pórovitosti, která vzniká během procesu SLM v objemu vzorku. Vyšší elasticita materiálu po SLM může být prospěšná pro lékařské aplikace, nicméně zatím není dostatečně prozkoumán vliv morfologie a četnosti pórovitosti na únavové a korozní chování pro tento typ mikrostruktury.

Zjevné rozdíly v lomových plochách vzorků zkoušených tahem spočívaly v charakteru jamek a smykových ploch (obr. 6 a 7). Tvárné porušení s hlubokými důlky je charakteristické pro středovou část lomové plochy u kovaných vzorků, kde existující dutiny odpovídají křehčí fázi α , zatímco na okraji vzorku byla pozorována přechodová oblast mezi tažným a smykovým lomem (obr. 6a a 6b).

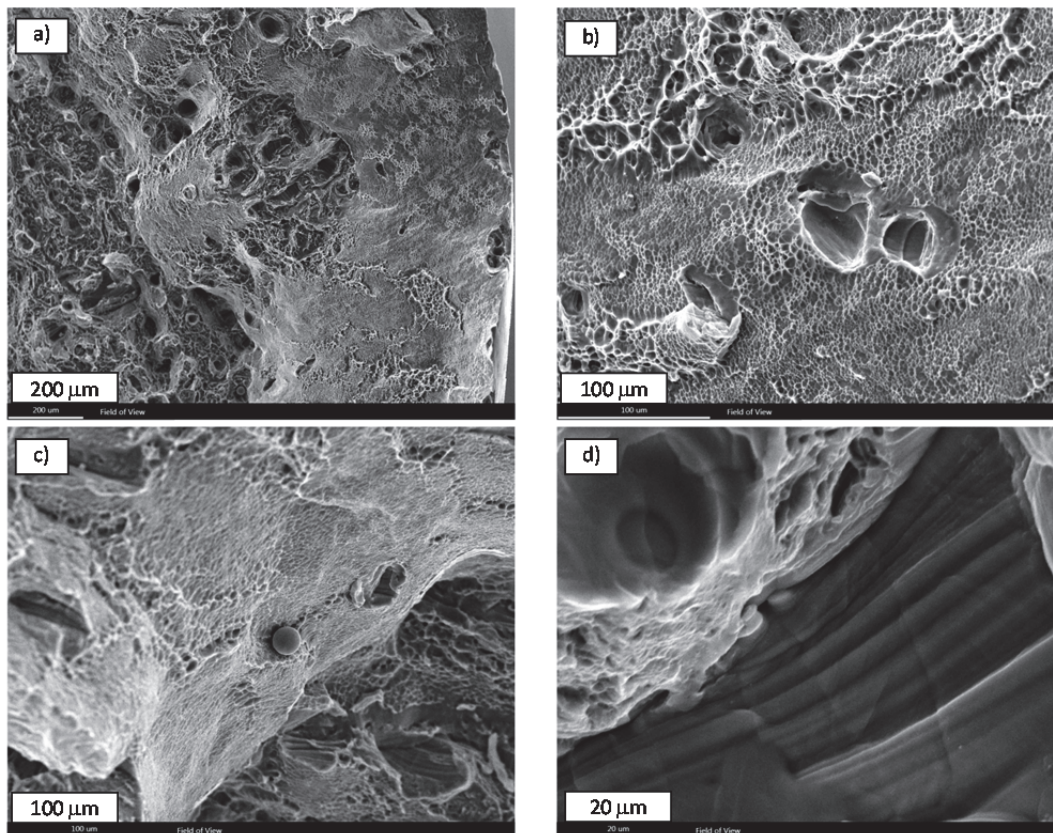
V některých oblastech lomů SLM vzorků byly pozorovány dutiny s neroztavenými částicemi prášku (obr. 7b a 7c). Mělké prohlubně s prasknutými jehlicemi martenzitu obklopenými tvárnou β fází na lomových plochách SLM vzorků (obr. 7d) odpovídají křehčímu typu porušení.

Z fraktografického pozorování je zřejmé, že vady vzešlé ze SLM procesu byly v mikroskopickém měřítku hnacím faktorem pro iniciaci trhliny. Kromě toho se při zatížení koncentrovalo napětí také v okolí pórů (obr. 3a a 7a), zejména pokud se vyskytovaly na povrchu vzorků, kde tak představovaly nežádoucí vruby. Slitina Ti6Al4V vykazuje obecně ve srovnání s austenitickými oceli nižší plasticitu, ale proces SLM může v důsledku výskytu zbytkového napětí, pórovitosti a metastabilních fází v rychle ochlazené mikrostruktuře přispívat k dalšímu zvyšování koncentrace napětí a k poklesu plastických vlastností.



Obr. 6 Charakter lomových ploch kovaných vzorků Ti6Al4V po tahové zkoušce: a) tvárné porušení ve středové části lomu; b) detail jamek a dutin souvisejících s křehčí fází α ; c) přechod tvárního a smykového porušení materiálu na okraji vzorku; d) detail hlubokých jamek a smykových faset v přechodové oblasti

Fig. 6 SEM fractography of tensile tested Ti6Al4V specimens produced by forging: a) ductile failure in central part of fracture surface; b) detail of dimples and voids related with more brittle α phase; c) transition of ductile and shear fracture at the specimen edge; d) detailed deep dimples and shear facets at the transition area



Obr. 7 Charakter lomových ploch u SLM vzorků Ti6Al4V po tahové zkoušce: a) smykový lom s póry na okraji vzorku; b) detail velmi mělkých jamek a pórů na smykovém lomu; c) detail částice nepřetaveného prášku; d) detail martenzitu a póru

Fig. 7 SEM fractography of tensile tested Ti6Al4V specimens prepared by SLM method: a) shear fracture with pores at specimen edge; b) detail of very shallow dimples and pores on shear surface; c) detail of powder particle not re-melted; d) detail of martensite and pore

4. Závěr

Na základě výsledků studia mechanických vlastností v tahu, mikrostruktury a fraktografické analýzy vzorků Ti6Al4V připravených z kovaných tyčí a selektivním laserovým tavením je možné vyvodit následující závěry:

- 1) Pro dodaný stav kovaných vzorků je charakteristická velmi jemnozrnná rovnoosá mikrostruktura složená z α a $(\alpha+\beta)$ zrn v důsledku předchozího tepelně mechanického zpracování. Hodnoty mechanických vlastností dosáhly 863 MPa pro mez kluzu, 978 MPa pro mez pevnosti a 13,6 % deformace do lomu. V důsledku vyšší plasticity byl charakter lomu tvárnější s hlubokými jamkami.
- 2) Mikrostruktura vzorků vyrobených pomocí technologie SLM sestávala z jemných martenzitických jehlic, vzniklých v původních β zrnech, což vedlo k vyšším hodnotám meze kluzu a pevnosti, tedy 1021 a 1263 MPa, zatímco deformace do lomu se snížila o 40 % na 7,2 %. Vlivem martenzitické struktury, pórovitosti a dalších technologických vad měly lomové plochy křehčí charakter s velmi mělkými důlky a popraskanými martenzitickými lamkami.

Poděkování

Tato práce byla zpracována v rámci projektu; FV40306 „Vývoj nových implantátů pro regulaci růstu dolní končetiny ve sterilním provedení“, za podpory ministerstva průmyslu a obchodu

České republiky; RRC/10/2018 „Podpora vědy a výzkumu v Moravskoslezském kraji 2018“, financovaného z rozpočtu Moravskoslezského kraje; SGS projekty SP2019/128 a SP2019/43, financované ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

- [1] NIINOMI, M. Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications. *J Mech. Behav. Biomed. Mater.* (2008), 1, 30–42.
- [2] GEETHA, M., SINGH, A-K., ASOKAMANI, R. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants. *Progress in Materials Science* (2009), 54, 397–425.
- [3] ENDERLE, J-D., BROZINO, J-D., BLANCHARD, S-M. *Introduction to Biomedical Engineering* (Second ed.). Elsevier Academic Press, Amsterdam (2005); 1253 s.
- [4] *Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications.* Ed. by Ch. Leyens, M. Peters, 2003 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 513 s. ISBN 3-527-30534-3.
- [5] CRAEGHS, T., THIJS, L., VERHAEGHE, F., KRUTH, J-P., VAN HUMBEECK, J. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V. *Acta Mater.* (2010), 58, 3303–3312.
- [6] SUN, J., YANG, Y., WANG, D. Parametric optimization of selective laser melting for forming Ti6Al4V samples by Taguchi method. *Optics & Laser Technology* (2013), 49, 118–124.
- [7] LOSERTOVÁ, M., KUBEŠ, V. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V alloy. *IOP Confer.Ser.: Mater. Sci. Eng.* (2017), 266, 012009.
- [8] LOSERTOVÁ, M., KUBEŠ, V., DRÁPALA, J., DOSTÁLOVÁ, K., SEVOSTYANOV, M.A., DI COCCO, V., IACOVIELLO, F. Influence of microstructure on fracture feature of Ti6Al4V alloy prepared by 3D printing. *IOP Confer.Ser.: Mater. Sci. Eng.* (2020), 726, 012020.

Svaz průmyslu si určil priority na rok 2020

Svaz průmyslu a dopravy ČR má nové programové prohlášení na rok 2020. Schválili ho delegáti listopadové valné hromady, kterou hostily v listopadu 2019 Třinecké železářny. „**Výsledky HDP tomu zatím nenavědčují, ale pro oceláře je tato doba těžká. Evropa si klade přehnané cíle, chce být uhlíkově neutrální. Na světových emisích se ale podílí jen 9 procenty. Dopad na průmysl může být velký. EU ani nebrání dovozu ocelářských výrobků s vysokou uhlíkovou stopou, i když na to nástroje má,**“ zmínil při přivítání delegátů jedno z témat programového prohlášení Jan Czudek, generální ředitel Třineckých železáren a viceprezident Svazu průmyslu.

Programové prohlášení obsahuje prioritní témata, jimiž by se měla zabývat vláda, a střednědobé cíle, které zajistí dlouhodobou konkurenceschopnost českého průmyslu. Dosažení klimatické neutrality je jedním z nich. Svaz průmyslu nicméně zdůrazňuje, že politická opatření ke snižování emisí je nutné uskutečňovat racionálně s ohledem na zachování dlouhodobé a udržitelné konkurenceschopnosti evropského průmyslu a socioekonomické stability. Zároveň připomíná, že je třeba hledat globální řešení klimatických změn. Moderní výrobu oceli a ocelářských výrobků si mohli prohlédnout i delegáti valné hromady. Dvě dopolední exkurze je zavedly do provozu kontinuálního válcování drátu. Na několikasetmetrové válcovací trati se drát prohání rychlostí více než 400 kilometrů za hodinu. Parametry výroby hlídá řada senzorů, které předávají informace do velína, kde celou výrobu řídí jen dva operátoři.

Budoucnost země je vzdělanost

V programovém prohlášení na rok 2020 se Svaz průmyslu soustřeďuje na třináct oblastí. „**Klíčová pro budoucnost země je vzdělanost. Ta rozhodne o tom, že nebudeme zemí levné práce, ale posuneme se v produktivitě práce díky novým technologiím a digitalizaci,**“ uvedl na valné hromadě jedno z témat prezident Svazu průmyslu Jaroslav Hanák.

– red –