

# Recenzované vědecké články

## Materiálové vlastnosti a creepová odolnost plechu z oceli AISI 316L vyrobeného aditivní technologií (3D tiskem)

## Material Properties and Creep Resistance of AISI 316L Plate Produced by Additive Technology (3D Printing)

Ing. Šárka Hermanová; Dr. Ing. Zdeněk Kuboň; Ing. Petr Čížek, Ph.D.

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM, s.r.o., Pohraniční 31/639, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

*Přestože se aditivní výroba (3D tisk) kovových materiálů velmi rychle vyvíjí, jde stále o relativně novou technologii a stále neexistuje dostatek informací zabývajících se chováním velkých součástí a/nebo produktů vyrobených 3D tiskem. Tato práce je proto zaměřena na srovnávací studium materiálových vlastností včetně odolnosti proti tečení bloku z oceli AISI 316L vyrobeného aditivní technologií a zkoušeného ve dvou alternativách (přímo po 3D tisku a po rozpouštěcím žíhání) ve srovnání s plechem vyrobeným konvenčním válcováním za tepla. Zkoušení mechanických a creepových vlastností bylo doplněno o rozbor mikrostruktury a fraktografickou analýzu lomových ploch. Společně s konvenční tahovou zkouškou byly pro hodnocení mechanických vlastností použity i penetrační SP zkoušky a výsledky obou metod byly navzájem srovnány. Výsledky provedených zkoušek prokázaly, že mechanická i creepová odolnost 3D tištěného bloku této oceli je vynikající a dobře srovnatelná s plechem válcovaným za tepla. Bylo také zjištěno, že 3D tištěná ocel má nižší plasticitu, což je výsledkem přítomnosti většího množství defektů ve struktuře 3D tištěného materiálu. Její struktura se tak přibližuje více svarovému kovu než tvářenému základnímu materiálu.*

**Klíčová slova:** 3D tisk; technologie SLM; austenitická ocel; materiálové vlastnosti; creep; zkoušení malých vzorků

*Although additive manufacturing (3D printing) of metallic materials is developing very quickly, it is still a relatively new technology and there is not enough information about the behaviour of large parts and/or real products produced by 3D printing. This work is focused on the study of the material properties, including creep resistance, of a block of AISI 316L steel produced by additive technology and tested in two states (in the as-printed state and after solution annealing) in comparison to a plate of the same steel produced by hot rolling. The testing of mechanical and creep properties was supplemented by the analysis of the microstructure and the fracture surfaces. Together with the conventional tensile tests, small punch tests were also used to evaluate the mechanical properties, and the results of both methods were compared. The results showed that the mechanical and creep resistance of the 3D printed block of this steel is excellent and compares well with the hot rolled plate. It was found that the 3D printed steel has lower plasticity, which is the result of presence of more defects in the structure of the 3D printed material and its microstructure is similar more to the weld metal than to the wrought base material.*

**Key words:** 3D printing; SLM technology; austenitic steel; material properties; creep; small punch tests

Trojrozměrný (3D) tisk je relativně nová technologie aditivní výroby, při kterém vzniká výrobek vytvářením trojrozměrného objektu z digitálního souboru (CAD) nanášením materiálu ve vrstvách, které se vzájemně spojují např. lepením nebo tavením. Umožňuje tak vyrábět složité tvary, které nelze vyrobit konvenčními metodami. Tento způsob výroby byl nejdříve použit pro plasty a výrobu modelů, resp. prototypů. Historie procesu 3D tisku, která sahá do 80. let minulého století, je popsána například v [1-3]. Jednou ze dvou nejčastěji používaných technologií 3D tisku pro kovy je metoda tavení práškového kovu (Selective Laser Melting – SLM)

dle klasifikace ISO/ASTM 52900 [4], která využívá data z 3D CAD modelu virtuálně rozřezaného na velmi tenké 2D vrstvy. Pro každý takový řez je nejprve na podkladovou desku přesně nanášena rovnoměrná vrstva jemného práškového kovu, který je pak roztaven laserem. Tento postup se opakuje vrstvu po vrstvě, dokud není celý výrobek hotový. 3D tisk kovových materiálů je tak velmi perspektivní cestou, jak zefektivnit zejména výrobu tvarově složitých dílů při významné úspoře nákladů jak materiálových, tak i zpracovatelských. Než však bude možné zařadit tyto inovativní technologie, byť jen do malosériové výroby, musí být známy vlastnosti takto

vyrobených dílů a také musí být garantována jejich shoda s požadavky příslušných materiálových norem.

Protože hlavní výhodou technologie SLM spočívá ve výrobě malých a tvarově složitých výrobků, kdy vlastnosti materiálu nelze testovat standardizovanými zkušebními tělesy, je vhodné mít k dispozici i další možnosti studia mechanických vlastností buď v dodaném stavu, nebo i za provozu. Jedním ze způsobů, jak testovat součástky malých rozměrů, je metoda SPT (Small Punch Test) [5]. SPT je progresivní zkušební metoda miniaturních zkušebních vzorků a velmi často se používá například v jaderných elektrárnách a elektrárnách na fosilní paliva pro stanovení zbytkové životnosti jejich klíčových částí [6, 7]. K dispozici jsou rozsáhlé a dlouhodobé zkušenosti s jejím použitím u tvářených i litých ocelí a objevují se také informace o jejím využití i pro aditivně vyráběné (3D tištěné) materiály [8, 9].

Je všeobecně známo, že ocel vyráběná 3D tiskem obsahuje více či méně pórů, které mají významný vliv na její pevnost i lomové vlastnosti. Ocel vyráběná touto technologií má také speciální texturu s mikrostrukturou velmi podobnou svarům [10], proto jsou materiálové vlastnosti v různých směrech tisku odlišné [11], a to včetně creepu [12] a únavy [13], přičemž se udává zejména nižší životnost materiálů vyrobených 3D tiskem ve srovnání s konvenční výrobou. V literatuře je také mnoho informací o vlivu poréznosti, směru tisku, rychlosti a výkonu laseru na materiálové vlastnosti, které byly získány na záměrně touto technologií připravených zkušebních tělesech, ale jen málo o vlastnostech skutečných produktů. Je známo a prokázáno, že na mikrostrukturu a vlastnosti má vliv rychlost ochlazování spojená mimo jiné s odvodem tepla, který závisí také na

velikosti produktu. To je důvod, proč bylo rozhodnuto zkoumat rovněž dlouhodobé chování austenitické oceli na bloku vyrobeném SLM technologií a studovat rozdíl mezi záměrně vyrobenými vzorky a masivním blokem.

Tento článek shrnuje a porovnává materiálové vlastnosti bloku vyrobeného z oceli AISI 316L technologií SLM s plechem stejné jakosti válcovaným za tepla jak pomocí konvenčních zkušebních metod, tak i s využitím zkoušek SPT.

## 2. Experimentální materiál a postup

Pro účely materiálových analýz byl metodou SLM vyroben blok z austenitické korozivzdorné oceli AISI 316L s rozměrem tiskové základny (tloušťka x délka) 15 × 280 mm a výškou 170 mm. Blok byl vyroben v centru 3D tisku Protolab VŠB – TU Ostrava na zařízení Renishaw AM400 za použití prášku SS 316L-0407 téhož výrobce. Parametry SLM výroby byly: výkon laseru 200 W, tloušťka vrstvy 50 μm, rychlost skenování 650 mm·s<sup>-1</sup> a pro výrobu byla použita šachovnicová strategie bez nosných prvků. Takto vyrobený blok byl rozřezán na dvě poloviny, první zůstala ve stavu po vytištění (dále označovaná jako 3D) a druhá (dále označovaná jako 3DS) byla podrobena rozpouštěcímu žihání v elektrické peci při teplotě 1050 °C s dobou výdrže 15 minut a následným ochlazením ve vodě. Srovnávacím zkušebním materiálem byl za tepla válcovaný plech z téže oceli a s podobnými rozměry jako 3D tištěný blok (tloušťka 16 mm). Plech byl dodán ve stavu po rozpouštěcím žihání u výrobce při teplotě 1050 °C s ochlazením ve vodě. Chemické složení obou zkušebních kusů je uvedeno v tab. 1 spolu s požadavky na ocel AISI 316L.

Tab. 1 Chemické složení testovaných výrobků (hm. %)

Tab. 1 Chemical composition of tested products (mass. %)

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	O	N
SLM	0,025	0,49	0,66	0,016	0,005	16,60	12,70	2,36	0,039	0,001	<0,001
Plech	0,019	1,85	0,26	0,037	0,0014	16,99	10,00	2,02	-	-	0,0298
316L	≤0,03	≤2,00	≤1,00	≤0,045	≤0,030	16,0-18,0	10,0-14,0	2,0-3,0	-	≤0,10	≤0,10

Z obou materiálů byla vyrobena zkušební tělesa a byly provedeny srovnávací materiálové analýzy zahrnující:

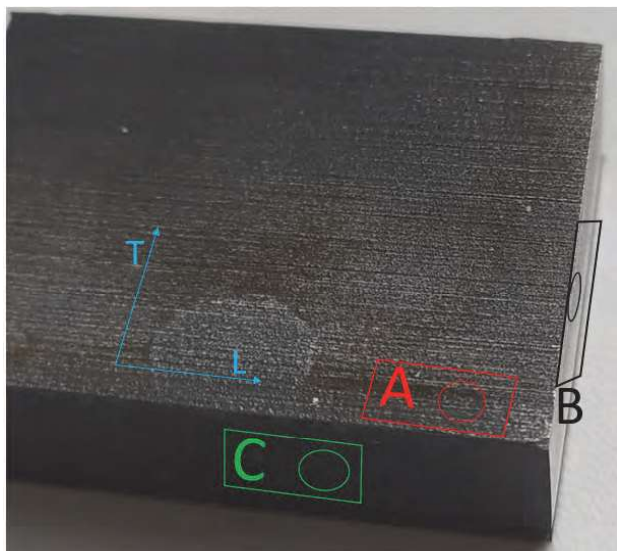
- zkoušku tahem při pokojové teplotě, zkoušky SPT, stanovení profilu tvrdosti HV30,
- zkoušky rázem v ohybu,
- analýzu mikrostruktury,
- analýzu substruktury zaměřenou na nalezení rozdílů v množství, velikosti a distribuci sekundárních částic mezi oběma vzorky,
- creepové zkoušky do lomu a srovnání mezi pevností při tečení
- fraktografickou analýzu lomových ploch zkoušek SPT a creepových zkoušek.

### 2.1 Analýza mechanických vlastností

Studium vlivu použité technologie na mechanické vlastnosti plechu, resp. 3D tištěného bloku, bylo provedeno konvenčními zkouškami tahem a také pomocí zkoušek SPT. Zkušební tělesa pro konvenční zkoušku tahem byla z 3D i 3DS tištěného bloku odebrána v rovnoběžném (L) a kolmém (T) směru k základně tisku, obr. 1. V případě plechu byly vyrobeny vzorky s orientací v podélném (L) a příčném (T) směru ke směru válcování. Zkušební vzorky SPT byly ve tvaru disku o průměru 8 mm a tloušťce 0, mm připraveny z každého směru a obou stavů tištěného materiálu čili 3D i 3DS, z planžet odebraných rovnoběžně s povrchem (A), z příčného směru (B) a podélného směru (C), obr. 1. Základna tisku je označena písmenem C, výška

tisku T a směr tisku L. SPT vzorky plechu pak byly připraveny pouze z povrchu (A), jak uvádí zkušební norma [5]. Bylo připraveno a testováno pět vzorků SPT pro stejný stav a směr, aby se získala rovněž informace o rozptylu hodnot.

Výsledky tahových zkoušek (mez kluzu –  $R_{p0,2}$ , mez pevnosti –  $R_m$ , tažnost – A, kontrakce – Z) a zkoušek rázem v ohybu (nárazová práce – KV) provedených na konvenčních zkušebních tělesech při pokojové teplotě jsou uvedeny v tab. 2.



Obr. 1 Orientace odběru těles SPT a těles pro zkoušku tahem z 3D a 3DS desky  
Fig. 1 Orientation of specimens for SPT and tensile test from 3D and 3DS block

Tab. 2 Výsledky zkoušek tahem a rázem v ohybu při pokojové teplotě  
Tab. 2 Results of tensile and Charpy-V tests at room temperature

Vzorek	Směr	$R_{p0,2}$	$R_m$	A	Z	KV
		[MPa]		[%]		[J]
3D	L	557	690	46,5	59,5	82
	T	473	591	22,0	35,0	67
3DS	L	373	621	46,5	46,5	91
	T	352	532	22,5	30,5	-
Plech	L	259	644	79,0	80,5	394
	T	258	643	76,0	81,5	298

Zásadní rozdíl mezi 3D tištěným a za tepla válcovaným materiálem je v hodnotách meze kluzu, která je u vzorku 3D dvakrát vyšší ve srovnání s plechem válcovaným za tepla a u vzorku 3DS vyšší o více než 100 MPa. Rozdíl v hodnotách meze pevnosti v tahu je naopak zcela nepatrný. Zatímco materiálové vlastnosti za tepla válcovaného plechu jsou prakticky totožné bez ohledu na směr zkoušení, dochází u 3D tištěného bloku v obou stavech tepelného zpracování k poklesu meze kluzu i pevnosti v tahu v příčném směru (T) ve srovnání s podélným směrem (L). Výrazný pokles byl zaznamenán také u plasticity a vrubové houževnatosti, kdy tažnost 3D

tištěného materiálu byla jen asi poloviční v podélném směru a dokonce jen čtvrtinová v příčném směru oproti za tepla válcovanému plechu. Rozpouštěcí žhání pak dále snížilo mechanické vlastnosti (mez kluzu i pevnost v tahu) a dokonce snížilo i hodnotu tažnosti a kontrakce. Výsledky zkoušek rázem v ohybu také ukazují, že 3D tištěný materiál dosáhl pouze 30 % hodnot absorbované energie za tepla válcovaného plechu, a dokonce nedošlo téměř k žádnému zvýšení vrubové houževnatosti po rozpouštěcím žhání 3D tištěného bloku.

Výsledky zkoušek SPT pak potvrdily vyšší mez kluzu a velmi dobře srovnatelnou pevnost v tahu u 3D tištěného bloku ve srovnání se za tepla válcovaným plechem, viz tab. 3. Pokles houževnatosti u 3D tištěného materiálu oproti desce je asi 22 %, křivky SPT i jejich výsledky vykazují navíc velký rozptyl výsledků. Nicméně z pohledu praktického uplatnění této zkušební metody na reálných výrobcích je pozitivním zjištěním to, že nejmenší rozptyl výsledků byl zjištěn u vzorků orientovaných rovnoběžně s povrchem desky (směr A), tedy u vzorků se stejnou orientací, jakou mají vzorky odebrané in situ z povrchu reálné součásti a třeba i za provozu.

Tab. 3 Výsledky zkoušek SPT při pokojové teplotě  
Tab. 3 Results of SPT tests at room temperature

Vzorek	3D			3DS		Plech
	A	B	C	A	C	A
$R_{p0,2}$ [MPa]	602	578	595	436	413	283
$R_m$ [MPa]	798	788	776	723	723	637

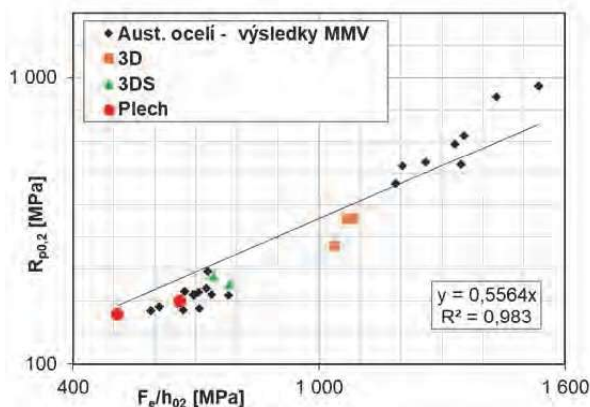
Pevnostní charakteristiky získané z SPT zkoušek jsou stanoveny na základě korelace mezi výsledky konvenčních tahových zkoušek a SPT zkoušek malých vzorků podle rovnic (1) a (2):

$$R_{p0,2} = \alpha \cdot \frac{F_e}{h_0^2} = 0.5564 \cdot \frac{F_e}{h_0^2} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

$$R_m = \beta \cdot \frac{F_m}{h_0 \cdot d_m} = 0.4089 \cdot \frac{F_m}{h_0 \cdot d_m} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

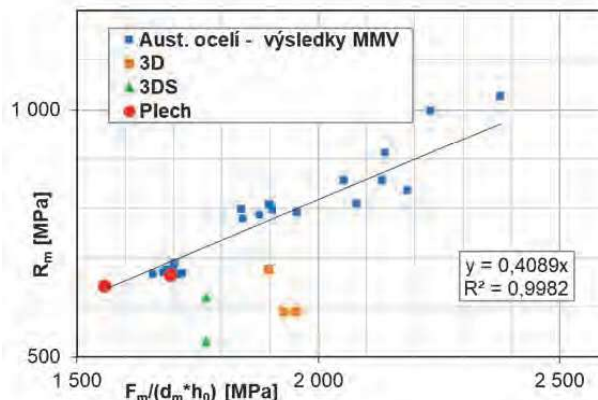
kde  $R_{p0,2}$  a  $R_m$  jsou mez kluzu a pevnost v tahu,  $h_0$  je přesně změřená tloušťka každého vzorku před zkouškou,  $F_e$  je síla odpovídající přechodu z elastické do plastické oblasti deformace,  $F_m$  je maximální síla při SPT zkoušce a  $d_m$  představuje posunutí hrotu razníku, které odpovídá síle  $F_m$ .  $\alpha$  a  $\beta$  jsou korelační koeficienty.

Na obr. 2 jsou ukázány příslušné korelace mezi tahovými a SPT zkouškami trubek z austenitických korozivzdorné oceli vytvořené ve společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. (MMV) a ty jsou doplněny o výsledky zkoušených vzorků. Z obrázků je zřejmé, že tyto výsledky leží pod příslušnými korelacemi, což znamená, že při použití této korelace dochází bohužel k silnému nadhodnocení reálných výsledků, jak je ostatně patrné i ze srovnání dat v tab. 2 a 3.



Obr. 2a Korelace výsledků SPT a konvenčních tahových zkoušek pro austenitické oceli; závislost pro mez kluzu

Fig. 2a Correlation between SPT and conventional tensile test for austenitic stainless steel – chart for yield strength



Obr. 2b Korelace výsledků SPT a konvenčních tahových zkoušek pro austenitické oceli - závislost pro mez pevnosti

Fig. 2b Correlation between SPT and conventional tensile test for austenitic stainless steel – chart for tensile strength

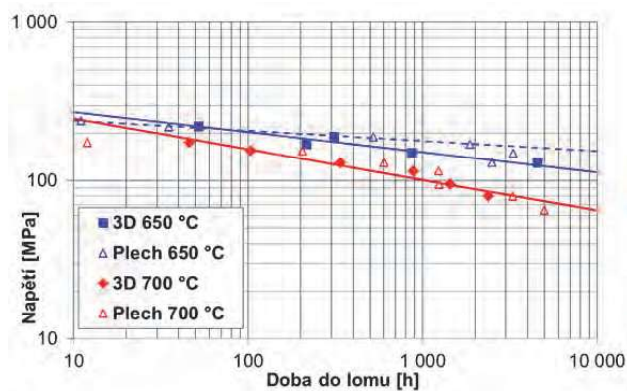
## 2.2 Výsledky analýzy creepových zkoušek do lomu

Srovnání creepové odolnosti 3D tištěného bloku (ve stavu as-printed) a za tepla válcovaného plechu bylo provedeno creepovými zkouškami do lomu při 650 a 700 °C a jejich výsledky jsou vyneseny na obr. 3 jako napětíová závislost doby do lomu, kterou lze popsat Nortonovou rovnicí ve tvaru:

$$t_r = A_r \cdot \sigma^{-n_r} \quad (3),$$

kde  $A_r$  a  $n_r$  jsou teplotně závislé konstanty

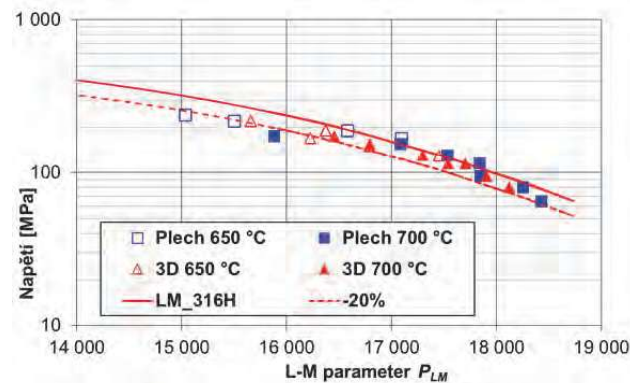
Bez ohledu na malou závislost napětí na době do lomu při 650 °C u válcovaného plechu (obr. 3 modrá přerušovaná čára), která může být způsobena pouze omezeným rozsahem experimentálních dat a relativně krátkými dobami do lomu ukončených zkoušek, jsou výsledky creepových zkoušek do lomu obou materiálů velmi dobře srovnatelné, pro teplotu 700 °C se téměř neliší (v obr. 3 – červená čára pro oba materiály).



Obr. 3 Srovnání výsledků creepových zkoušek do lomu 3D tištěného bloku a za tepla válcovaného plechu, čáry odpovídají Nortonovým rovnicím

Fig. 3 Comparison of stress rupture tests results for hot rolled plate and 3D block – the lines representing corresponding Norton equations

Srovnání ukazuje, že výsledky creepových zkoušek do lomu, jakkoli jsou jen relativně krátkodobé a bez ohledu na výše uvedené rozdíly v napětíové závislosti doby do lomu, leží v rozmezí mezi střední hodnotou (plná čára na obr. 4) a -20 % toleranční mezí (přerušovaná čára na obr. 4) oceli AISI 316H. Přestože získané výsledky zatím neumožňují spolehlivě odhadnout meze pevnosti při tečení ani za 10 000 hodin, je vidět, že 3D tištěný blok má poměrně dobré vyhlídky na dosažení creepové odolnosti odpovídající za tepla válcovanému plechu.



Obr. 4 Srovnání výsledků creepových zkoušek do lomu 3D tištěného bloku a plechu z oceli AISI 316L se střední hodnotou meze pevnosti při tečení a 20% tolerančním pásmem oceli AISI 316H

Fig. 4 Comparison of the results of stress rupture tests of the 3D-printed block and plate from AISI 316 L steel with the mean value and 20% tolerance limit of creep rupture stress (CRS) for AISI 316H steel

Aby bylo možné oba testované materiály porovnat a výsledky napětíových lomových zkoušek konfrontovat také s údaji uvedenými v materiálové normě oceli AISI 316H, byla tato data také přepočtena pomocí Larson-Millerova parametru, který umožňuje kombinovat teplotu a dobu do lomu ve tvaru:

$$P_{LM} = T \cdot [C + \log(t)] \quad (4),$$

kde  $T$  je teplota v Kelvinech a  $t$  doba do lomu v hodinách. Hodnota Larson-Millerova parametru ( $C = 15,2$ ) byla

vypočtena metodou nejmenších čtverců ze středních hodnot meze pevnosti při tečení uvedených v materiálové normě pro ocel X6CrNiMo17-13-2 (AISI 316H).

## 2.2 Výsledky analýzy mikrostruktury creepových zkoušek do lomu

Materiálové vlastnosti, ale zejména houževnatost a plasticita, vždy odráží stav mikrostruktury a přítomnost defektů v ní. Také v případě creepových zkoušek je zajímavé posoudit, jak technologie 3D tisku ovlivní charakter lomu a jeho průběh. Proto byla provedena srovnávací metalografická a fraktografická analýza vždy jedné creepové zkoušky z obou sérií se stejnými parametry zkoušení (tab. 4).

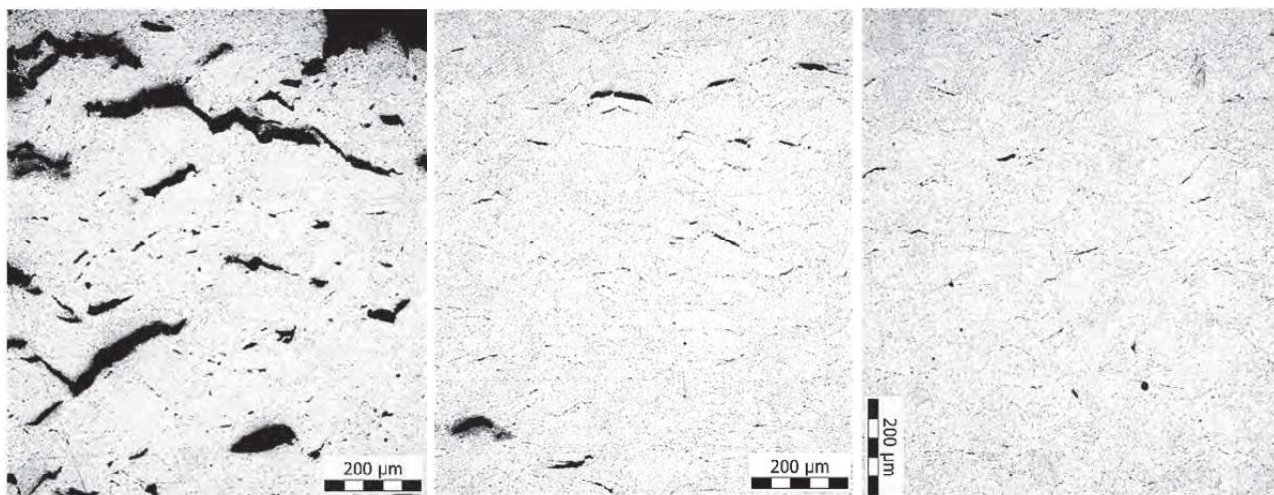
Cílem metalografické analýzy bylo posoudit rozsah a rovnoměrnost creepového poškození, v případě analýzy fraktografické pak hlavně výskyt tiskových defektů na lomové ploše a jejich vazby na creepové poškození. Těsně pod lomovou čarou se u 3D tištěného materiálu nacházejí četné spojené mikrotrhliny, jejich hustota

a velikost však s rostoucí vzdáleností od lomu klesá (obr. 5), ovšem i tam jsou tyto defekty významně četnější a větší ve srovnání s tvářeným plechem (obr. 6). Oba materiály se ovšem lišily i v rozložení částic karbidů a absencí  $\delta$ -feritu u 3D tištěného materiálu, obr. 7. Podobný rozdíl byl také zjištěn u lomové plochy obou zkoušek, kdy v případě tvářeného plechu převládá výskyt transkrystalických tvárných hřebenů (obr. 8), kdežto 3D tištěný blok vykazoval nejen větší podíl interkrystalického lomu, ale zároveň se na lomové ploše nacházely kulíčky nenataveného kovového prášku (obr. 9).

Tab. 4 Parametry creepových zkoušek pro detailní mikrostrukturní analýzu

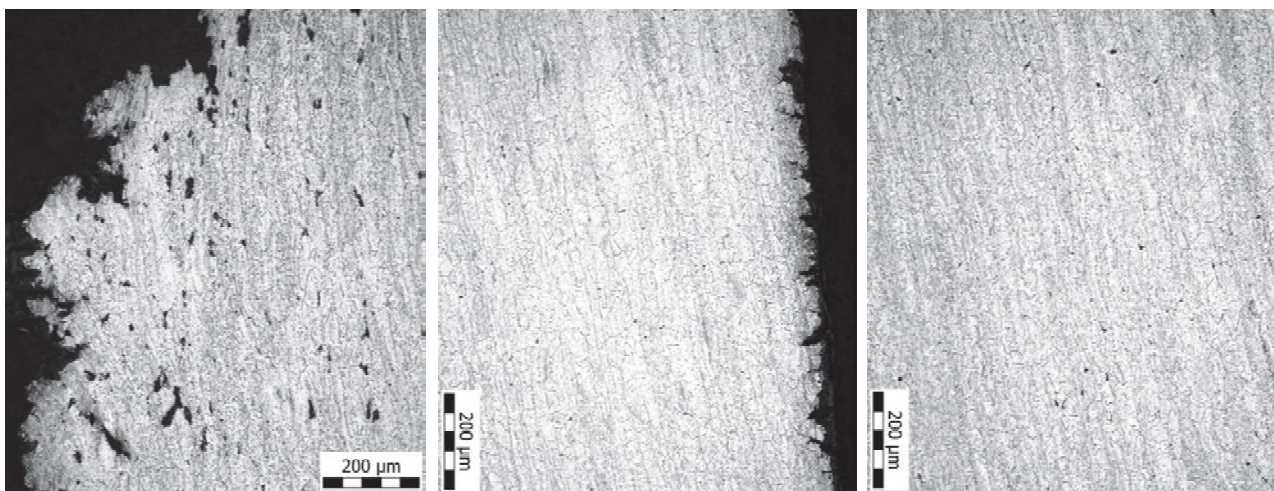
Tab. 4 Parameters of stress rupture tests for detailed structural analysis

Vzorek	Teplota	Napětí	Doba do lomu	Tažnost	Kontrakce
	[°C]	[MPa]	[h]	[%]	
Plech	700	80	3288	44.8	66.1
3D	700	80	2384	20.2	10.8



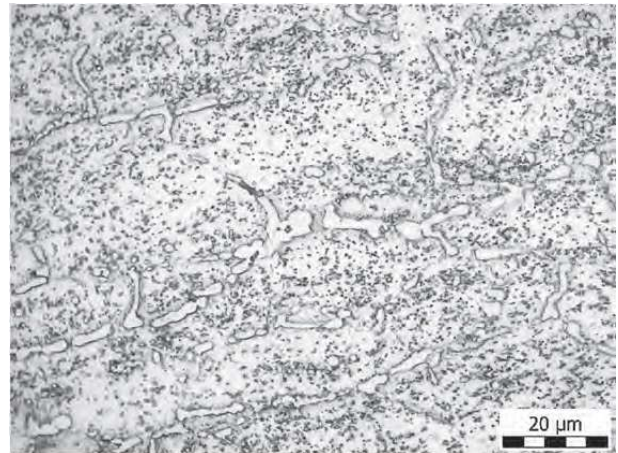
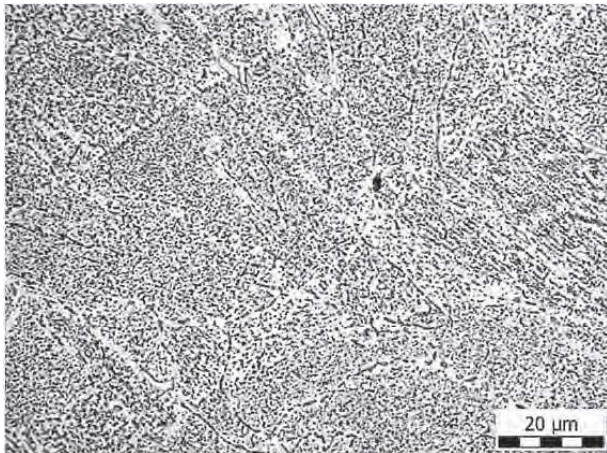
Obr. 5 Creepový lom tělesa zkoušky z bloku vyrobeného 3D tiskem ve vzdálenosti 0, 10 a 15 mm pod lomovou čarou

Fig. 5 Creep fracture of test specimen of the block produced by 3D printing at the fracture line and at 10 and 15 mm under it

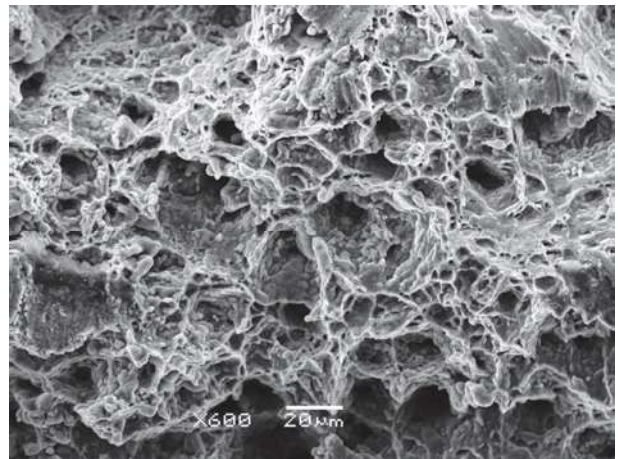
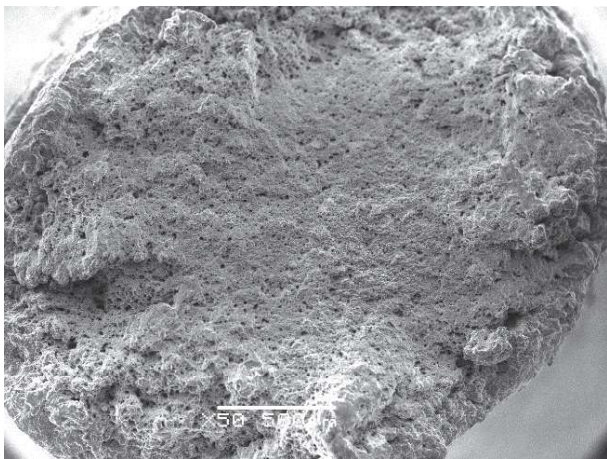


Obr. 6 Creepový lom tělesa zkoušky z válcovaného plechu (u lomové čáry a 10, resp. 15 mm pod ní)

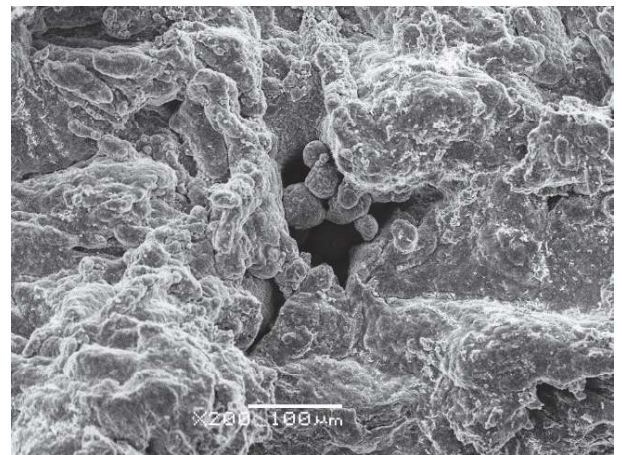
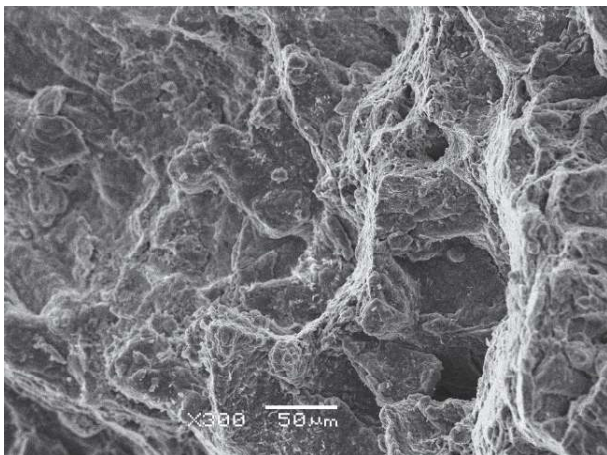
Fig. 6 Creep fracture of test specimen of the hot rolled plate (at the fracture line and at 10 and 15 mm under it)



Obr. 7 Detail mikrostruktury creepových zkoušek: vlevo - 3D tištěný materiál, vpravo – válcovaný plech  
Fig. 7 Detail of microstructure: left - 3D printed block, right – hot rolled plate



Obr. 8 Lomová plocha creepové zkoušky z válcovaného plechu, celkový pohled – vlevo, detail jamek – vpravo  
Fig. 8 Fracture surface of creep test specimen from hot rolled plate, overview – left, detail of dimples – right



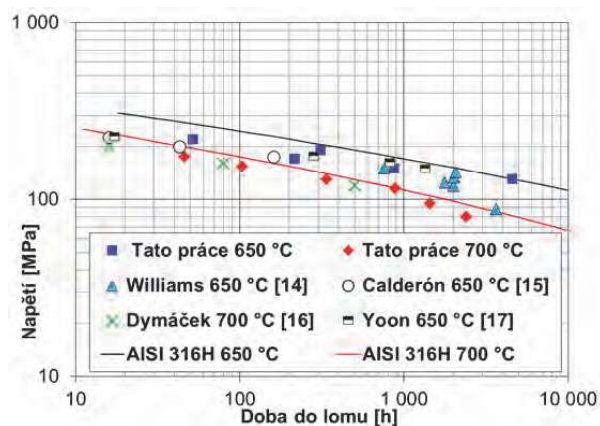
Obr. 9 Lomová plocha creepové zkoušky z 3D tištěné desky, kombinace lomů – vlevo, kuličky neroztaveného prášku – vpravo  
Fig. 9 Fracture surface of creep test specimen of 3D printed steel, combination of fracture – left, balls of unmolten powder – right

### 3. Diskuze výsledků

Výsledky mechanických zkoušek i zkoušek SPT potvrdily, že 3D tištěný materiál má vyšší mez kluzu při srovnatelné mezi pevnosti v tahu jako za tepla válcovaný plech ze stejné oceli, oproti ní má ale výrazně nižší

plasticitu a lomovou houževnatost. Takové chování je důsledkem technologie výroby 3D tiskem, který se vyznačuje speciální strukturou, vypadající jako rybí šupiny, které jsou tvořeny malými částicemi roztaveného kovu a které jsou uspořádané do tavných pásů ohraničených kolumnárními zrny. Nízká plasticita

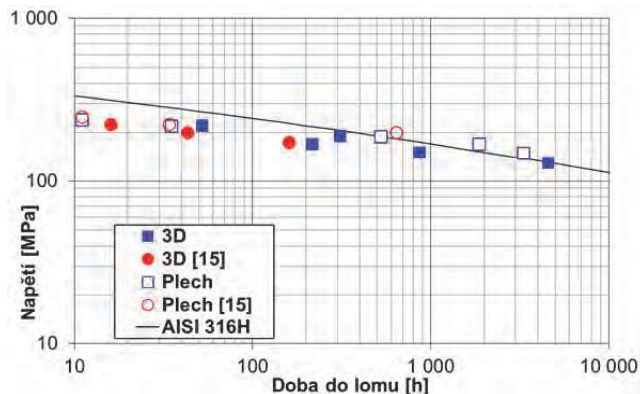
3D tištěných materiálů je pak způsobena četnými defekty, zejména póry a kuličkami neroztaveného prášku. Tato speciální kombinace vlastností materiálu a mikrostruktury je typickým znakem materiálů vyrobených 3D tiskem [11]. Defekty v mikrostruktuře překonaly v našem případě u 3D tištěného bloku pozitivní vliv jemného zrna a přes několikanásobně menší velikost důlků na lomové ploše vedly k poklesu plasticity jak při tahové, tak i creepové zkoušce. Výsledky creepových zkoušek jsou pak dobře srovnatelné s publikovanými údaji a zároveň se blíží střední hodnotě meze pevnosti při tečení materiálové normy pro ocel AISI 316H, která je nejbližším žárupevným ekvivalentem k AISI 316L.



Obr. 10 Porovnání závislosti napětí – doba do lomu pro 3D tištěnou ocel 316L, čáry jsou střední hodnoty meze pevnosti při tečení oceli AISI 316H

Fig. 10 Comparison of stress–time to rupture dependence for 3D-printed steel 316L, lines represent the mean CRS of AISI 316H steel

Všechna experimentální data uvedená na obr. 10 byla získána na zkušebních tělesech, která byla odebrána kolmo k rovině tisku (PB) a získané výsledky ukazují, že odolnost proti tečení 3D tištěného materiálu není negativně ovlivněna velikostí vzorku/výrobku. Protože jak dislokační, tak i difúzní creep závisí na difúzi atomů a hranice zrn představují tzv. kanály vysoké difuzivity, je jasné, že rychlost tečení a recipročně také doba do lomu budou silně záviset na velikosti zrna; čím menší bude velikost zrna, tím větší bude podíl hranic zrn, a tedy i rychlost difúze a creepu. Kolumnární zrna rostou při tisku ve směru tisku. Vertikálně orientované zkušební vzorky jsou zatěžovány rovnoběžně se směrem jejich růstu a maximální hlavní napětí je tedy rovnoběžné s hranicemi zrn. V tomto případě je velikost zrna ve směru zatěžování relativně velká a difúzní dráhy delší. Vertikálně orientované vzorky by tak měly mít delší dobu do lomu ve srovnání se vzorky horizontálními [14] a mohly by mít proto odolnost proti tečení nejvíce podobnou tvářenému materiálu. Zdá se, že výsledky Calderóna [15] a této práce to potvrzují, alespoň pro dobu do lomu do 10 000 hodin, obr. 11. Rozdíl mezi 3D tištěným a válcovaným materiálem ale jinak dobře zapadá do obvyklého rozptylového pásma výsledků zkoušek tečení, a dokonce se blíží střední hodnotě pro ocel AISI 316H.



Obr. 11 Závislost napětí–doba do lomu pro plech a 3D tištěnou ocel AISI 316L při 650 °C

Fig. 11 Comparison of stress–time to rupture dependence for 3D-printed steel 316L at 650 °C

#### 4. Závěr

Komplexní analýza materiálových vlastností a struktury bloku z oceli AISI 316L vyrobeného pomocí metody 3D tisku prokázala vcelku dobrou shodu jak s referenčním za tepla válcovaným plechem z téže oceli, tak i s požadavky, které jsou na tuto jakost oceli kladeny. Dobrá shoda s vlastnostmi referenčního plechu a požadavky, které jsou na tuto jakost oceli kladeny byla dosažena navzdory skutečnosti, že se v její struktuře vyskytují četné defekty, které mají původ právě ve specifickém způsobu výroby. V případě creepových vlastností se plně uplatnění těchto strukturních defektů a nehomogenit zřejmě projeví až po delší době zkoušení, kdy se budou ve větší míře uplatňovat degradační procesy spojené s hranicemi zrn.

#### Poděkování

*Tento příspěvek vznikl v rámci Institucionální podpory dlouhodobého a koncepčního rozvoje výzkumné organizace v roce 2022, kterou poskytlo Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky.*

#### Literatura

- [1] GUO, N. and LEU, M. C. Additive Manufacturing: Technology, Applications and Research Needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8 (2013).
- [2] ATTARAN, M. The rise of 3D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional, *Business Horizons*, 60 (2017), 677-688.
- [3] GU D. D., MEINERS, W., WISSENBACH, K. and POPRAWA, R. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms, *International Materials Reviews*, 57 (2012) 3, 133-164.
- [4] ISO/ASTM 52900 Additive manufacturing - General principles – Terminology, August 2017, ISO technical committees, Geneva, Switzerland.
- [5] ČSN EN 10371. Kovové materiály - Metoda penetrační SP zkoušky. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2021.
- [6] LUCON, E., BENZIG, J. and HRABE, N. Testing of Small-Sized Specimens. *Comprehensive Materials Processing*, 1 (2014), 135-163.

- [7] HOLMSTRÖM, S. et al. Creep strength and minimum strain rate estimation from Small Punch Creep tests. *Materials Science and Engineering*. 731 (2018), 161-172.
- [8] TORRES, J. and GORDON, A. Mechanics of the small punch test: a review and qualification of additive manufacturing materials, *Journal of Materials Science*, 2021, pp. 56. 1-38.
- [9] WANG, L. Y., et al. Small punch creep performance of heterogeneous microstructure dominated Inconel 718 fabricated by selective laser melting, *Materials & Design*, 195 (2020), pp. 109042.
- [10] CHOO, H., SHAMA, K.-L., BOHLING, J., NGOA, A., XIAO, X., RENB, Y., DEPOND, F. D., MATTHEWS, J. M. and GARLEA, E. Effect of laser power on defect, texture, and microstructure of a laser powder bed fusion processed 316L stainless steel, *Materials and Design*, 164 (2019), pp. 107534.
- [11] ZHOU, B., XU, P., LI, W., LIANG, Y. and LIANG, Y. Microstructure and Anisotropy of the Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting. *Metals*. 11 (2021) 775.
- [12] DAO, V. H., YU, J. M. and YOON, K. B. Anisotropic creep behaviour of stainless steel produced by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 796 (2020), pp. 140040.
- [13] SURYAWANSHI, J., PRASHANTH, K.G. and RAMAMURTY, U. Tensile, fracture, and fatigue crack growth properties of a 3D printed maraging steel through selective laser melting, *Journal of Alloys and Compounds*, 725 (2017), pp. 355-364.
- [14] WILLIAMS, R., AL-LAMI, J., HOOPER, P., PHAM, M.S. and DAVIES, C.M. Creep deformation and failure properties of 316L stainless steel manufactured by laser powder bed fusion under multiaxial loading conditions. *Additive Manufacturing*, (2020), 101706. 10.1016/j.addma.2020.101706.
- [15] CALDERÓN, A., et al. Creep and creep damage behavior of stainless steel 316L manufactured by laser powder bed fusion. *Materials Science & Engineering A*. 830 (2022). pp. 142223.
- [16] DYMÁČEK, P., KLOC, L., GABRIEL, D., MASÁK, J., PAGÁČ, M. and HALAMA, R. Creep Behaviour of 316L Stainless Steel Prepared by 3D Printing. In *58th International Conference on Experimental Stress Analysis – EAN2020*, October 19–22, 2020, online, Czech Republic
- [17] YOON, K.B., DAO, V.H. and YU, J.M. Effects of Build Direction on Tensile and Creep Properties of 316L Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43 (2020) 11, 2623-2636.

## Huť spouští do sítě první dvě fotovoltaické elektrárny

trz.cz, tisková zpráva 23. 11. 2022

Třinecké železářny spolu s dceřinou společností Energetika Třinec budou od prosince 2022 vyrábět elektrickou energii ze slunce ve dvou fotovoltaických elektrárnách.

První pokryla plochu odpovídající zhruba polovině fotbalového hřiště na hale v areálu hutě. Druhá jde do chodu v těchto dnech na hale odloučeného provozu Tažirna oceli ve Starém Městě na Uherskohradištsku.

Třinecká elektrárna s instalovaným výkonem 350 kWp, což za ideálních podmínek odpovídá roční výrobě přesahující 330 000 kWh, bude sluneční energii zachycovat na 760 panelů umístěných na střeše rozměru 3333 m<sup>2</sup>. Investice firmu vyšla na 12 milionů korun, bezmála 3 miliony pokryje dotace ministerstva financí.

„Zelená energie z našich solárních panelů by v Třinci měla pokrýt více než polovinu spotřeby elektřiny pro výrobu horké vody pro vytápění,“ upřesňuje ředitel Energetiky Třinec. Energetika Třinec zajišťuje vytápění pro zhruba 9000 domácností, pro školy, nemocnice a další zařízení. Jde o teplo vyráběné z kombinované výroby elektřiny a tepla, kde část paliva pochází z výroby oceli.

Obdobně bude sloužit energie vyrobená ze slunce v areálu odloučeného provozu ve Starém Městě. Hala by měla v ideálním případě energii ze slunečního záření v předpokládaném objemu 230 000 kWh ročně využít pro napájení pomocných zařízení. Přebytky vyrobené elektrické energie je možno posílat do sítě.

V Tažirně oceli fotovoltaické panely pokryly 2500 m<sup>2</sup> plochy střechy nové výrobní haly, kde jsou umístěny nové návazné technologie loupání a broušení. Výše investice nepřesáhla šest milionů korun, dotace pokryla náklady ve výši dvou milionů.

Není to jediný zdroj zelené energie, kterou huť pro snížení uhlíkové stopy využívá. Už od roku 2020 nakupuje energii z větrných, vodních či solárních elektráren pro osvětlení i provoz klimatizací veškerých administrativních budov v Třineckých železářnách. Stejně tak je na zelenou energii celoročně provozována chemická úpravná vody. Na kompenzaci emisí CO<sub>2</sub> obě firmy pracují i v dalších oblastech, část z nich cílí na oblast energetiky. Při výrobě elektřiny například firma Energetika Třinec nahradila část paliva biomasou.