

Využití aditivní technologie 3D tisku s možností povrchové úpravy součástí pro stroje na sklizeň a manipulaci s cukrovou řepou

USE OF ADDITIVE 3D PRINTING TECHNOLOGY WITH SURFACE TREATMENT OF COMPONENTS FOR SUGAR BEET HARVESTING AND PROCESSING EQUIPMENT

Jiří Votava, Jaroslav Lozrt, Radovan Henzl, Petr Dostál, Jiří Čupera – Mendelova univerzita v Brně

Stroje na sklizeň a manipulaci s cukrovou řepou patří do kategorie mobilních prostředků, které musí splňovat přísná technická i technologická kritéria. Na jejich výrobu je využito nejen tradičního konvenčního obrábění, ale v současnosti je již možné se setkat i s využitím aditivního tisku součástí, které jsou tvarově složité a vlivem prostředí podléhají zvýšenému abrazivnímu opotřebení. Mezi tyto součásti patří například funkční elementy dopravníků sklizených bulev cukrové řepy (obr. 1.).

Nespornou výhodou technologie 3D tisku je nejen poměrně vysoká rychlost výroby, ale jak bylo uvedeno, možnost modelovat značně tvarově složité součásti, které by bylo obtížné vyrobit konvenčním způsobem (1).

Další nespornou výhodou je možnost využití široké škály materiálů (filamentů), které se pro 3D tisk využívají. V současné době lze zaznamenat i technologické kombinace dvou filamentů, popřípadě využití kompozitních materiálů (2). Kombinací více materiálů lze dosáhnout obdobného efektu jako u navařování tvrdokovů. Jedná se například o možnost aplikovat na houževnatější materiál jádra výrobku odolnější tvrdou vrstvu jiného filamentu.

Obr. 1. Dopravníky řepných bulev sklizňového vyorávače



U mobilních strojů, které v sobě zahrnují technologie na sklizeň biologických materiálů a především jejich čištění a přepravu, dochází vlivem kontaktu s půdními částicemi ke značnému abrazivnímu i erozivnímu opotřebení. Velký podíl na abrazivním opotřebení mají rovněž rostlinné zbytky a vysoká vlhkost okolního prostředí. Jestliže je sklizeň cukrové řepy řazena mezi sezonní operace, kdy samotný sklízecí stroj pracuje mnohdy i v třísměnném provozu, je nutné, aby veškeré funkční prvky nepřesáhly hranici životnosti. Z tohoto pohledu je tedy výhodná i výměna součástí, která nevykazuje 100% opotřebení, jelikož odstávka celého stroje by znamenala mnohem vyšší finanční ztráty. Možnosti aditivních technologií tedy spočívají v databázi jednotlivých součástí, jejichž zhotovení lze provést na průmyslových 3D tiskárnách ve velmi krátkém časovém úseku. Pro vytvoření co nejvíce odolné součásti je důležitý nejen materiál filamentu, ale rovněž volba parametru 3D tisku. Těmito parametry jsou zejména hustota výplně, orientace součásti během procesu tisku, tloušťka vrstvy, styl nanášení a rychlost vytlačování materiálu (3, 4). Uvedené parametry lze standardně nastavovat a měnit na veškerých 3D tiskárnách. Ke zlepšení mechanických vlastností rovněž vede využití povrchových úprav. Tento efekt byl zaznamenán v případě chemického vyhlazování povrchu 3D výtisků např. dimethylketonem (5, 6). Mezi další technologií post processingu řadíme žlhaní. Tímto procesem je uvolněno zbytkové tepelné napětí, čímž dochází ke zvýšení pevnosti mezi jednotlivými vrstvami 3D tiskových dílů. Výsledný produkt je tedy odolnější vůči působení vnějších vlivů (7).

Materiál a metody

Primárním cílem experimentální části je porovnat mechanické vlastnosti standardizovaných vzorků vyrobených metodou 3D tisku z filamentu PLA a PETG s polyamidem PA6. Oba tyto filameny jsou testovány jak v základním provedení, tak s povrchovou úpravou, která spočívá v chemickém vytvrzení

povrchové vrstvy, označení upravených vzorků je pak PLA_U a PETG_U. Chemická úprava je uvedena v tab. I. Postupem částečného naleptání povrchu lze docílit jeho vyšší tvrdosti se zachováním původních mechanických vlastností jádra (8). Polyamid PA6 se využívá jak pro renovace, tak k výrobě nových součástí nejen u strojů pro sklizeň a manipulaci s cukrovou řepou, ale také pro strojní linky převážně dopravního charakteru. Z tohoto pohledu jsou tedy komponenty zatíženy nejen třením sdružených součástí, ale rovněž také abrazivním opotřebením v důsledku interakce cizích částic (částice skeletu půdy, rostlinné zbytky).

Výroba zkušebních vzorků byla provedena pomocí technologie FFF (Fused Filament Fabrication). Software pro modelování vzorků byl zvolen CAD Autodesk Fusion 360. Jedná se o obdobný program, který se využívá i pro obráběcí centra. Jednotlivé testované materiály lze charakterizovat:

- **PLA** (polylaktid): jedná se o polyester z rostlinných materiálů. Je biologicky velice dobře odbouratelný. Tento materiál je vhodný na prototypovou výrobu. Neodolává ovšem vysokým teplotám a již nad hodnotou 60 °C měkne a ztrácí svoji mechanickou charakteristiku. Na základě chemického leptání lze vytvořit na povrchu součásti vrstvu, která zvyšuje povrchovou tvrdost za konstantní houževnatosti jádra.
- **PETG** (polyethylentereftalát – glykol): Jedná se o technický filament, který má velmi malou tepelnou roztažnost. Velká výhoda je tedy tepelná stálost, která zaručuje vysokou přesnost tištěné součásti. Další výhodou tohoto materiálu je odolnost vůči UV záření a eliminace pohlcování vzdušné vlhkosti. Tento materiál se dá rovněž chemicky leptat z důvodu úpravy mechanických vlastností povrchu součásti.
- **PA6** (polyamid): jedná se o technický plast vyráběný polymerizací kaprolaktamu. Tento polyamid se vyznačuje vysokou pevností R_m min. 65 MPa, tvrdostí a odolností proti otěru. Rovněž u sdružených součástí lze konstatovat nízký koeficient tření i tlumící účinek. Polyamid je vhodný pro tiskové obrábění s nižšími řeznými rychlostmi.

K určení houževnatosti materiálů byla použita zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu *Charpy* (tab. II.). Důvodem tohoto testu je chování určitých materiálů, které se při statickém zatěžování chovají s vysokou mírou houževnatosti, avšak při dynamické

Tab. I. Testované materiály a parametry výroby 3D tisku

Materiál	Teplota tisku (°C)	Teplota podložky (°C)	Průměr trysky (mm)	Chemická úprava
PLA	220 ± 5	60 ± 5	0,6	
PLA_U	220 ± 5	60 ± 5	0,6	acetonové výpary
PETG	240 ± 5	90 ± 5	0,4	
PETG_U	240 ± 5	90 ± 5	0,4	dichlormethan
PA6	jedná se o komerční materiál			

zátěži se u nich může vyskytnout porušení bez předchozí deformace (9, 10). Proto byla u vzorků sledována především rázová houževnatost. Na základě specifikace daných materiálů byly vzorky opatřeny pouze rýhou jako iniciátorem spouštěcího mechanismem k tvorbě podpovrchových trhlin s důsledkem následné fragmentace součásti. Jelikož byly testovány materiály vyrobené technologií 3D tisku, kde lze nastavit požadovaný směr vláken, byla rýha modelována vždy kolmo na vlákna daného vzorku. Nastavení sklonu i směru vláken, patří mezi primární výhody, jelikož z konstrukčního hlediska lze namodelovat součást s nejuvhodnějšími mechanickými parametry.

Pro stanovení houževnatosti byl použit jednoduchý matematický vztah. Míru houževnatosti lze definovat jako spotřebovanou práci na porušení zkušebního tělesa. Zmařená energie se vztahuje k počátečnímu průřezu S_0 .

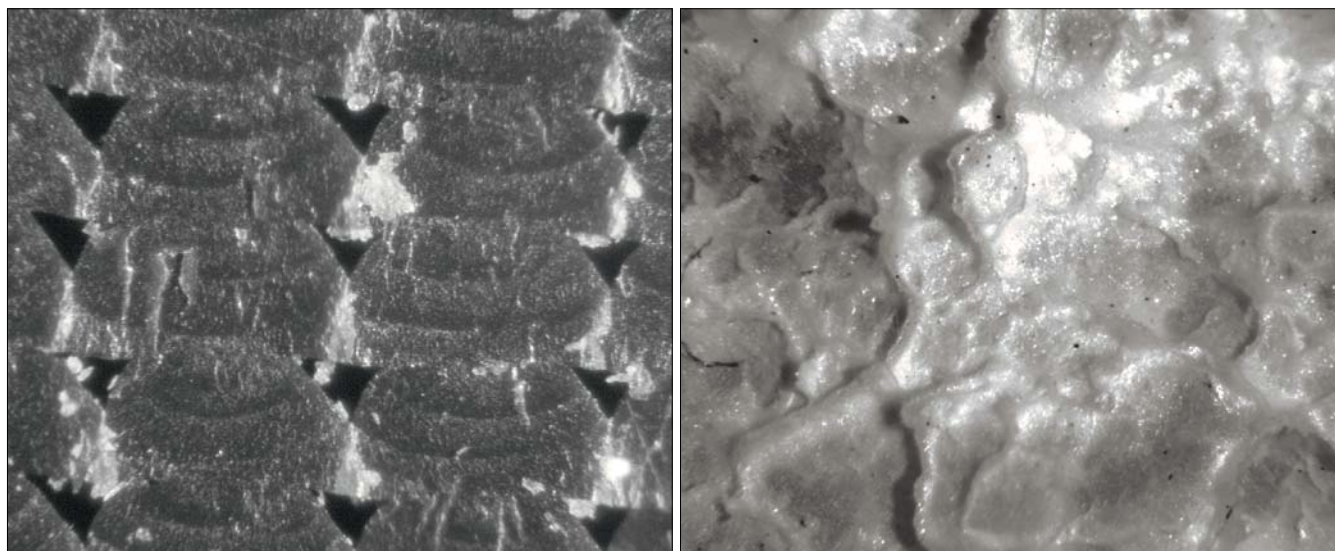
$$Kc = \frac{K}{S_0} \quad (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}).$$

Spotřebovaná práce Kc je dána rozdílem potenciálních energií kladiva před a po rázu. Hmotnost kladiva byla zvolena v závislosti na charakteru materiálu 5 kg.

$$K = G \cdot (H - b) \quad (\text{J}).$$

Na základě výsledků lze predikovat náchylnost daných materiálů ke křehkému nebo naopak houževnatému lomu (obr. 2.).

Obr. 2. Lomová plocha PAL (vlevo) a PA6 (vpravo)



Tab. II. Výsledky houževnatosti KV + 20 °C

Testované materiály	Měření					Průměr	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
	1	2	3	4	5			
	Houževnatost (J·cm ⁻²)							
PLA	3,28	3,01	2,29	2,75	2,91	2,85	0,33	0,11
PLA_U	2,67	3,51	2,78	2,64	2,93	2,91	0,32	0,10
PETG	9,78	8,15	8,09	7,23	6,17	7,88	1,19	1,41
PETG_U	8,16	7,35	6,17	8,5	9,42	7,92	1,10	1,21
Etalon (materiál PA6)	1,78	2,05	2,04	1,34	1,69	1,78	0,26	0,07

Stanovení tvrdosti dle Brinella ČSN EN ISO 2039-1 (vtlačování kuličky)

Tvrdość technických materiálů je jednou ze základních charakteristik při stanovení nejen životnosti již konkrétních součástí, ale především se jedná o ukazatel odolnosti proti abrazivnímu i erozivnímu opotřebení (11). Podstata zkoušky spočívá ve vtlačení ocelové kuličky pod specifickým zatížením do povrchu zkušební tělesa. Průměr kuličky d musí být $5,0 \pm 0,05$ mm. Plocha vtlačení se následně vypočítá z dané hloubky. Jednotlivé hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v tab. III.

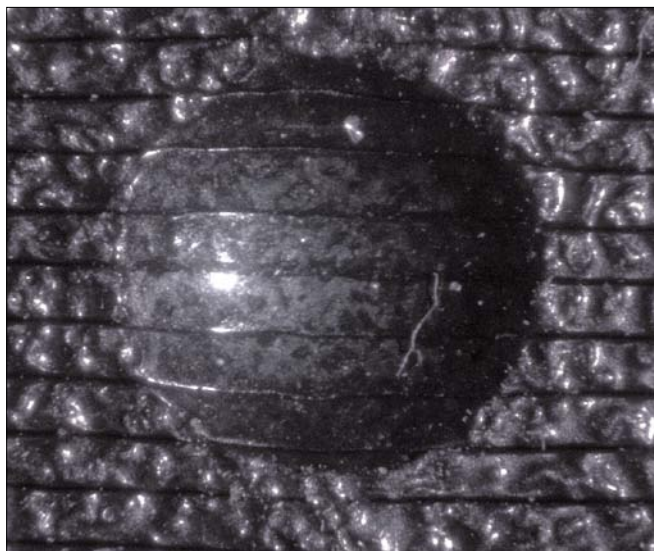
Pro stanovení tvrdosti byla připravena sada vzorků o rozměrech $20 \times 20 \times 5$ mm. Měření bylo prováděno opakovaně v 5 cyklech, vždy minimálně 10 mm od hrany vzorku (obr. 3.). Počáteční zatěžovací síla byla zvolena $F_0 = 9,8 \pm 0,1$ N. Hlavní zatěžovací síla F_m je odvozena dle průměru vtlačovaného indentoru, což činí 961 N s tolerancí ± 1 %. Doba působení hlavní zatěžovací síly se pohybuje v rozmezí 2–3 s.

Redukované zkušební zatížení F_r se následně vypočítá dle vztahu:

$$F_r = F_m \times \frac{\alpha}{(b - b_r) + \alpha} \quad (\text{N}).$$

Hodnoty b a b_r představují hloubku vtlačení kuličky skutečnou a redukovanou. Koeficient α představuje hodnotu konstanty

Obr. 3. Vtisk indentoru pro měření tvrdosti



odvozenou v závislosti na průměru kuličky. Pro daný vztah činí 0,21.

Hodnota tvrdosti HB , která představuje výslednou hodnotu, je odvozena z rovnice:

$$HB = \frac{F_r}{\pi d b_r} \quad (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}).$$

Tvrdość vtlačení kuličky HB lze definovat v jednotkách $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$. V odborné literatuře se lze setkat pouze i s číselnou hodnotou a zkratkou HB .

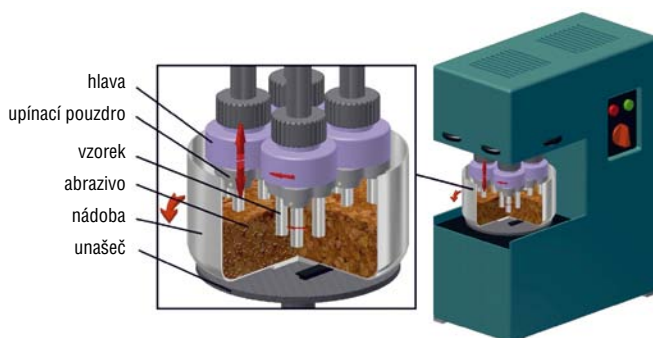
Zkouška opotřebení v brusné nádobě

Aplikovanou zkoušku lze charakterizovat jako základní test, dle kterého lze predikovat vhodnost daného materiálu pro využití součásti v prostředí kluzného uložení s obsahem abrazivních částí v podobě pŕdních částic skeletu. Jelikož polyamidy řadíme mezi technické materiály s nízkou tvrdostí (ve srovnání např. s ocelí), spočívá tak mechanismus opotřebení daného materiálu v procesu mikrorýhování. Jedná se o vznik rýhy současně s plastickou deformací jejího okolí. Před abrazivní částicí se tvoří nárůstek a okolní materiál je tlačěn do boku, kde již nastává delaminace deformovaného materiálu (12).

Vzorky jsou vyrobeny ve tvaru válečku o průměru 15 mm a délce 65 mm. Upnutí je provedeno ve třech upínacích pouzdech rotujících otáčkami $0,82 \text{ s}^{-1}$. Pouzdra se vzorky jsou součástí rotační hlavy, která s rotujícími vzorky vykonává další rotaci ve stejném směru o otáčkách $0,5 \text{ s}^{-1}$. Proti směru rotace hlav se otáčí nádoba vyplněná abrazivním materiálem (obr. 4.). Otáčky nádoby jsou $1,55 \text{ s}^{-1}$. Objem abraziva pro každou výměnu činil $1\,000 \text{ cm}^3$.

Metoda testování v brusné nádobě s keramickou drolenkou je vhodná především pro materiály, u kterých se hodnotí i koeficient tření. Důvodem je využití těchto materiálů pro kluzná ložiska a pohyblivé mechanismy uložené s vůlí. Pro analýzu opotřebení byla zvolena keramická drolenka o velikosti 10 mm. Důvodem je sledování mikrorýhování a mikroúnavy materiálu, ale především analýza poměrného opotřebení obdobného jako při provozu sdružených součástí zatížených abrazivním opotřebením částicemi pŕdního skeletu. Výhodou dané metodiky je jednoznačně jak abrazivní, tak erozivní zatížení testovaných vzorků.

Obr. 4. Zkouška opotřebení v brusné nádobě



Hmotnostní úbytky byly váženy na digitálních vahách s přesností 0,001 g. Pro statistický výpočet průměrné hodnoty byla u každého materiálu provedena tři měření.

U testovaných vzorků byla vypočítána poměrná hmotnostní odolnost proti abrazivnímu opotřebení ψ_{abr} podle vztahu:

$$\psi_{abr} = \frac{m_{et}}{m_{vzo}} \quad (-),$$

kde m_{et} je hmotnostní úbytek etalonu (g) a m_{vzo} je hmotnostní úbytek vzorku (g).

Na základě provedených mechanických testů (houževnatosti, tvrdosti a abrazivního opotřebení) lze získat soubor výsledků, ze kterého lze jednoznačně predikovat možnosti využití technických materiálů (13). Nicméně je nutné konstatovat, že majoritní vliv (právě na mechanické výsledky) má zadání vstupních parametrů pro 3D tisk součástí. Jedná se především o směr vláken a tloušťku tištěné vrstvy.

Hmotnostní úbytky testovaných materiálů po jednotlivých etapách jsou zaznamenány na obr. 5. Časový úsek pro jednotlivé intervaly změny hmotnosti byl zvolen dle publikovaných studií na 60 min (14). Nejnižších hmotnostních úbytků dosahoval povrchově ošetřený materiál PLA_U. Celkový hmotnostní úbytek po 8 hodinách testu činil cca 0,3 g z původní hmotnosti. U polyamidu PA6, který se standardně používá v mechanických sestavách, činil tento úbytek 0,35 g. Z tohoto pohledu lze konstatovat obdobné schopnosti obou materiálů odolávat abrazivnímu opotřebení. U vzorků vyrobených z materiálu PETG a PETG_U byly hmotnostní úbytky cca 1,7× vyšší než u filamentu PLA.

Jak již bylo uvedeno v úvodu, jednotlivé výsledky testů se vztahují k etalonu vyrobenému ze standardního technického polyamidu PA6. Z tohoto důvodu je tedy relativní odolnost vyjádřena hodnotou $\psi_{abr} = 1$. Výsledky poměrného opotřebení jsou graficky znázorněny na obr. 6. Pro porovnání jsou zde uvedeny i hodnoty rázové houževnatosti jednotlivých materiálů. Nejlepších výsledků opět dosahoval materiál PLA_U. Hodnoty poměrné odolnosti dosahovaly srovnatelných výsledků jako etalon a rázová houževnatost byla cca o 1,1 J·cm⁻² vyšší než u materiálu PA6. Další testovaný materiál PETG_U vykazoval sice menší schopnost odolávat abrazivnímu opotřebení (hodnota poměrného opotřebení činila 0,71), ale houževnatost daného materiálu a tudíž schopnost pohlcovat rázovou energii při dynamickém zatížení se pohybovala k hodnotě 7,9 J·cm⁻². Z tohoto pohledu lze konstatovat mnohem vyšší využití daného filamentu než u materiálu PLA_U.

Závěr

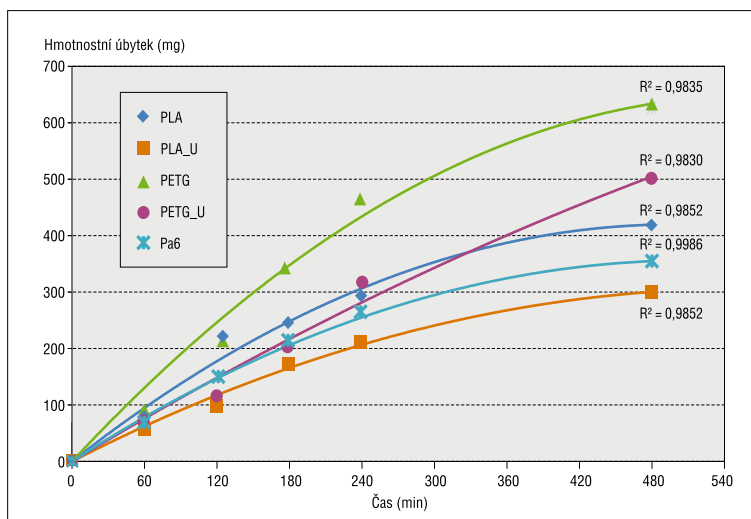
Využití technologie 3D tisku patří mezi dynamicky se rozvíjející se disciplínu ve strojírenství. Technologie tisknutí náhradních dílů s využitím různých druhů filamentů je již běžně zaváděna přímo do praxe. Výhodou je široké spektrum využití vyrobených součástí i ve značně agresivním prostředí i chemického charakteru.

Tab. III. Výsledky tvrdosti dle Brinella

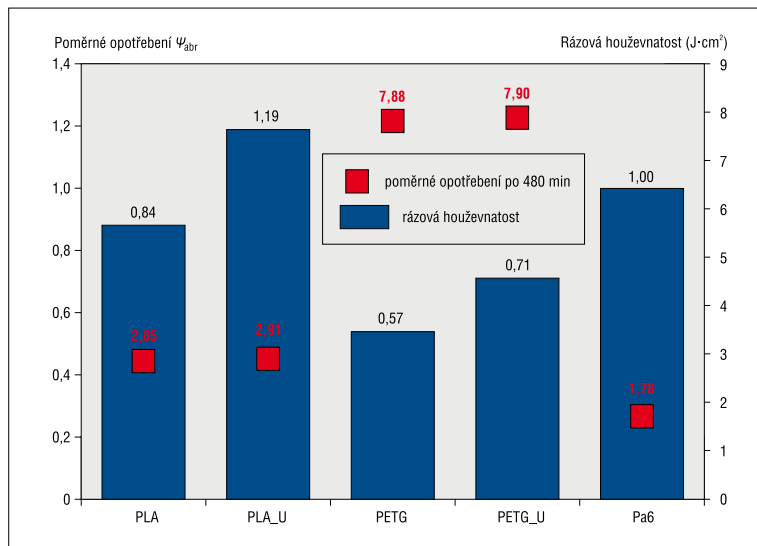
Testované materiály	Měření					Průměr	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
	1	2	3	4	5			
	Tvrdost (MPa)							
PLA	162,64	159,34	153,91	157,64	161,02	158,91	3,01	9,03
PLA_U	173,15	174,67	175,35	174,12	174,66	174,39	0,73	0,54
PETG	122,65	121,95	118,34	114,12	117,52	118,92	3,11	9,69
PETG_U	138,31	139,45	138,68	138,88	137,97	138,66	0,50	0,25
Etalon (materiál PA6)	148,67	150,21	149,36	149,64	155,87	150,75	2,61	6,80

V předložené publikaci byly testovány pouze dva nejvýznamnější filameny a lze konstatovat jejich obdobné mechanické vlastnosti se standardním technickým polyamidem PA6. Nicméně je nutné si uvědomit i jistá technická omezení daných materiálů. Jedná se především o určitou absorpci vlhkosti či sklon k degradaci a tvorbě trhlin za působení UV záření. Jelikož materiál PLA se vyrábí jako polyester z rostlinných materiálů, je jeho přidanou hodnotou výborná biologická odbouratelnost především v půdních podmínkách. I když filament PETG je již zařazen do plně syntetických materiálů, je možné pro výrobu součástí použít i tzv. recyklát, který obsahuje určitý podíl tříděných plastů. Mechanické vlastnosti těchto materiálů zůstávají obdobné, jen se částečně mění barevný odstín. Optimalizace mechanických vlastností je dána nejen samotným materiálem, ale rovněž i nastavením vstupních parametrů tisku. Jedná se především o směr kladení jednotlivých vláken během procesu tisku a pohybu tiskové hlavy. Konstruktor sám si tak může navrhnout struktury výplně s ohledem na místa s maximálním namáháním součástí. Přesnost výroby u průmyslových 3D tiskáren patří dle ISO 2768 do kategorie f „jemná“. Toto kritérium udává přesnost výrobních tolerancí tvaru i polohy od jmenovitého rozměru. Z tohoto pohledu je možné pomocí 3D tisku vyrábět i poměrně složité technické výrobky jako např. ozubená kola, kónická uložení nebo například sružené součásti.

Obr. 5. Hmotnostní úbytky testovaných materiálů – keramická drolenka frakce 10 mm



Obr. 6. Poměrná hmotnostní odolnost dle zkoušky v brusné nádobě



Jelikož sklizeň cukrové řepy je sezónní záležitostí, na kterou navazuje další zpracovatelská linka, je nutné, aby stroj nemusel mít zbytečnou odstávku v důsledku špatné logistiky náhradních dílů. Z tohoto pohledu lze využít technologii 3D tisku pro rychlou výrobu náhradních dílů zatížených nadměrným opotřebením.

Poděkování: Výzkum byl finančně podpořen Interní grantovou agenturou Agronomické fakulty Mendelovy univerzity v Brně. Grantový projekt č. AF-IGA2023-IP-049.

Souhrn

Stroje pro sklizeň cukrové řepy i jednotlivé posklizňové linky jsou zatíženy značným abrazivním i erozivním opotřebením z důvodu interakce pevných i sypkých částic. Proto se testují nejen materiály, které jsou schopny odolávat zvýšenému abrazivnímu zatížení, ale rovněž i technologie, které mohou pružně reagovat na poptávku převážně složitých součástí či sestav.

Předložený experiment porovnává výsledky mechanických testů standardního polyamidu PA6 se vzorky vyrobenými pomocí aditivní technologie 3D tisku. Filament pro výrobu vzorků byl zvolen v podobě polyakrylátových vláken PLA a polyethylentereftalát-glykolu PETG. U obou těchto materiálů byly provedeny i post processingové úpravy v podobě chemického vyhlazení. Mechanické testování bylo provedeno dle EN ISO 2039-1 (vtlačování kuličky) a zkouškou rázem v ohybu na Charpyho kladivu EN 10045-1. Pro zátěžový test abrazivního opotřebenění byla zvolena metoda s brusnou nádobou. Jako abrazivní médium byla použita keramická drolenka o velikosti frakce 10 mm. Jedná se o poměrně agresivní abrazivní médium, které způsobuje převážně v měkkých materiálech značné mikrorýhování. Důvodem volby tohoto média je obdobná abrazivní charakteristika jako u půdních částic s vyšší skeletovitostí.

Na základě získaných výsledků lze konstatovat dobrou korelaci mezi jednotlivými testy. Byl jednoznačně potvrzen vliv chemického vyhlazení povrchových vrstev na snížení abrazivního opotřebenění testovaných materiálů. Nicméně je nutné si uvědomit, že veškeré testy proběhly v ideálních laboratorních podmínkách, kde na vzorky působí přesně definované fyzikální podmínky. Z této příčiny jsou reálné provozní podmínky nenahraditelné.

Klíčová slova: technologie 3D tisku, filament, abrazivní opotřebenění, mikrorýhování, tvrdost, houževnatost, dopravní linky, stroje pro sklizeň a manipulaci s cukrovou řepou.

Literatura

- KRANZ, J.; HERZOG, D.; EMMELMANN, C.: Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. *Journal of Laser Applications*, 27, 2015 (1), s. 1–16.
- CISNEROS-LÓPEZ, E. ET AL.: Recycled poly(lactic acid)-based 3D printed sustainable biocomposites: a comparative study with injection molding. *Materials Today Sustainability*, 7–8, 2020 (1), s. 1–12.
- ELMUSHYAKHI, A.: Freeze-thaw stabilization of fused deposition modeling 3D-printed SABIC structures. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 34, 2022 (2), s. 116–125.
- BARDIYA, S.; JERALD, J.; SATHEESHKUMAR, V.: The impact of process parameters on the tensile strength, flexural strength and the manufacturing time of fused filament fabricated (FFF) parts. *Materials Today: Proceedings*, 39, 2021 (4), s. 1362–1366.
- TUAZON, B. J.; ESPINO, M. T.; DIZON, J. R.: Investigation on the Effects of Acetone Vapor-Polishing to Fracture Behavior of ABS Printed Materials at Different Operating Temperature. *Materials Science Forum*, 1005, 2020 (1), s. 141–149.
- RAO, A. S.; DHARAP, M. A.; VENKATESH, J. V. L.: Experimental Study of the Effect of Post Processing Techniques on Mechanical Properties of Fused Deposition Modelled Parts. *Int. J. Manufacturing, Materials, and Mech. Eng. (IJMMME)*, 5, 2015, (1), s. 1–20.
- CAO, L. ET AL.: Effect of post-process treatments on mechanical properties and surface characteristics of 3D printed short glass fiber reinforced PLA/TPU using the FDM process. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 41, 2023 (1), s. 135–143.
- Wang, J. et al.: A novel approach to improve mechanical properties of parts fabricated by fused deposition modeling. *Materials and Design*, 105, 2016, (1), s. 152–159.
- ŠMAK, R.; VOTAVA, J.; POLCAR, A.: The cooling media influence on selected mechanical properties of steel. *Acta technologica agriculturae*, 23, 2020 (4), s. 183–189.
- VOTAVA, J. ET AL.: Minimalizace abrazivně-erozivního opotřebenění u sklizečů cukrové řepy. *Listy cukrov. řepář.*, 131, 2015 (9–10), s. 284–289.
- ŠMAK, R. ET AL.: Analysis of the Degradation of Pearlitic Steel Mechanical Properties Depending on the Stability of the Structural Phases. *Materials*, 16, 2023 (2), s. 1–14.
- POULÍČEK, T.; VOTAVA, J.; KOTUS, M.: Abrasive resistance of filler metals in laboratory conditions. *Journal of Central European Agriculture*, 15, 2014 (1), s. 208–213.
- KOTUS, M. POULÍČEK, T. HOLOTA, T.: Resistance of Coated Electrodes Applicable for the Renovation of Tillage Tools. *In Journal of Central European Agriculture*, 14, 2013 (4), s. 1295–1302.
- VOTAVA, J. ET AL.: Eliminace opotřebenění funkčních ploch u sklizečů cukrové řepy. *Listy cukrov. řepář.*, 138, 2022 (11), s. 357–362.

Votava J., Lozrt J., Henzl R., Dostál P., Čupera J.: Use of Additive 3D Printing Technology with Surface Treatment of Components for Sugar Beet Harvesting and Processing Equipment

Sugar beet harvesting machinery and individual post-harvest lines are subject to considerable abrasive and erosive wear due to the interaction of solid and loose particles. For this reason, tests were performed not only using materials that are able to withstand the increased abrasive load, but also technologies that can respond flexibly to the demand of predominantly complex components or assemblies.

The presented experiment compares the mechanical test results of a standard PA6 polyamide with samples produced using additive

Obr. 7. Doprvník řepných bulev navazující na paprsková kola vyorávače



3D printing technology. The filament chosen for the production of the samples was in the form of polylactide filaments PLA and polyethylene terephthalate glycol PETG. Both materials underwent post processing treatment in the form of chemical smoothing. Mechanical testing was performed according to EN ISO 2039-1 (ball indentation) and Charpy hammer bending impact test EN 10045-1. As for the abrasive wear stress test, the grinding jar method was opted for. The used abrasive medium was ceramic grit with a fraction size of 10 mm; that is a relatively aggressive abrasive medium that causes significant micro-roughening, mainly in softer materials. The reason this medium was chosen are its similar abrasive characteristics to soil particles with higher skeletonisation.

Based on the results obtained, the tests show a good correlation. They clearly confirmed the effect of chemical smoothing of the surface layers on the reduction of the abrasive wear of the tested materials. However, it is important to note that all tests were carried

out under ideal laboratory conditions where well-defined physical conditions are applied to the samples. For this reason, real operating conditions are irreplaceable.

Key words: 3D printing technology, filament, abrasive wear, micro-creasing, hardness, toughness, conveyor lines, sugar beet harvesting and handling equipment.

Kontaktní adresa – Contact address:

doc. Ing. Jiří Votava, Ph. D., Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav techniky a automobilové dopravy, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika, e-mail: jiri.votava@mendelu.cz