

Využití tvrdokovu pro omezení abrazivního opotřebení pasivních částí u sklízečů cukrové řepy

USING HARD METAL TO ELIMINATE ABRASIVE WEAR OF PASSIVE PARTS OF SUGAR BEET HARVESTERS

Jiří Votava, Radim Šmak, Adam Polcar, Vojtěch Kumbár – Mendelova univerzita v Brně

Sklizeň cukrové řepy patří mezi finální operace a je třeba minimalizovat ztráty, které mohou vzniknout špatným seřízením nebo nadměrným opotřebením sklízecího stroje. Jelikož sklízecí „hartvestory“ jsou zatíženy značným abrazivním a erozivním opotřebením v důsledku kontaktu s vysoce abrazivními anorganickými i organickými částicemi, je nutné funkční plochy opatřit materiálem s nízkým koeficientem tření. Jedná se především o funkční prvky vyorávacího, dopravního nebo čistícího zařízení (1). Jedním z klíčových mechanismů je rovněž ořezávací ústrojí. Pro jeho správnou funkci je nutné nejen přesné ostří rezného nástroje, ale rovněž i seřízení výšky skrojku, které nezanedbatelně ovlivňuje výnos plodiny. Proto je nutná vhodná geometrie hmatače, který slouží k nastavení požadované výšky nože tak, aby byl proveden optimální řez s ohledem na výšku části bulvy, nacházející se nad povrchem půdy (2). Při konstruování dnešních sklízečů se využívá zejména bubnových a plazových hmatačů, viz obr. 1. Pro oba mechanismy ovšem platí stejné degradační podmínky i změny tvaru v důsledku působení především půdních částic (3).

Z tohoto pohledu je velice obtížné zvolit správný technický materiál pro danou strojní součást. Jelikož se jedná o mechanismus, který může být zatížen i vysokým dynamickým namáháním, není tedy možné volit tepelné zpracování v celém

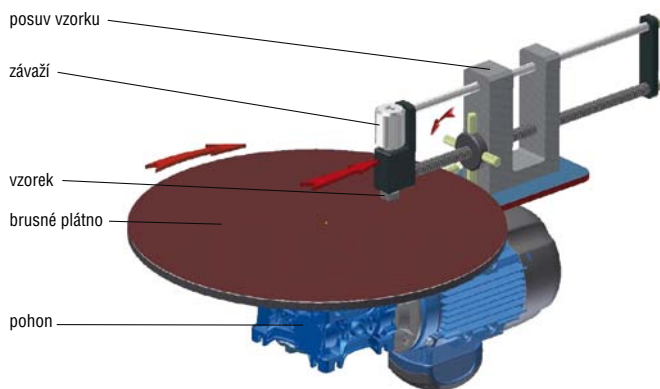
průřezu, jelikož by se snižovala celková houževnatost součásti. I když používané ocele disponují dostatečným procentem uhlíku i ostatních legujících prvků pro maximální zušlechtnění, zbytkové vnitřní pnutí může způsobit celkovou fragmentaci nástroje (4, 5). Je proto nutné eliminovat možnosti vzniku trhlin v základním materiálu a ponechat ho v jemné sorbitické struktuře. Na tento základní materiál je pak nutné vhodnou technologií nanést pouze omezené množství svarového kovu s vysokou odolností vůči abrazivnímu působení (6). Strukturální fáze v daném návaru jsou tvořeny především ledeburitickým nebo martenzitickým uspořádáním. Značnou výhodou dané technologie je možnost jak renovace, tak aplikace svarové housenky na novou součást. Třískovým obráběním a broušením se vyrobí součást s požadovanými tvarovými parametry pro správnou funkci celého mechanismu.

Jelikož existuje široká škála možností návarových systémů, je nutné provádět jak laboratorní, tak provozní testy opotřebení. Laboratorní testy lze rozdělit do dvou následujících skupin: jedná se o analýzu s pevnými částicemi korundu, nebo s volnými částicemi půdních frakcí (7, 8). Na základě prvotních výsledků je tedy možné vyseparovat vhodné chemické složení i technické parametry aplikace návarového materiálu, ale i materiálu základního.

Obr. 1. Systém plazového hmatače u strojů Holmer



Obr. 2. Laboratorní zařízení s brusným plátnem



Materiál a metody

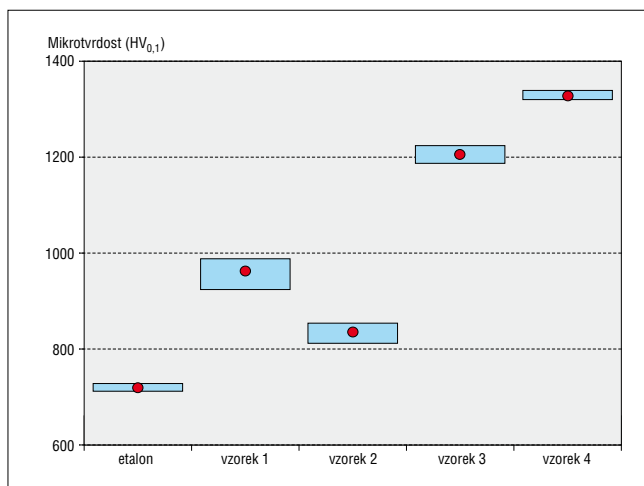
Předložený experiment je orientován na využití nových alternativ tvrdokovových materiálů se zvýšením odolnosti proti abrazivnímu opotřebení u pasivních hmatačů. Byly zvoleny materiály jak ledeburitického, tak martenzitického typu. Důležitým aspektem je ovšem obal tvrdokovové elektrody. Z tohoto důvodu byly pro testy použity elektrody s obalem základním a rutilovým. Tyto elektrody byly aplikovány dle pokynů výrobce na běžnou uhlíkovou ocel bez tepelného zpracování. Jako etalon byl zvolen originální díl hmatače pro stroje Holmer, běžně dostupný na našem trhu. Prioritou byla analýza strukturních fází návaru. Rovněž byla sledována celková tvrdost svarové housenky, ale také mikrotvrdost jednotlivých složek.

Podmínky laboratorní zkoušky

Analýza vhodnosti testovaných materiálů pro aplikaci na pasivní hmatače byla provedena na brusném plátně (obr. 2.). Principem abrazivního opotřebení je tzv. interakce dvou těles. Rovněž lze tuto zkoušku zařadit do analýz s pevnými abrazivními částicemi. Jedná se o částice oxidu hlinitého (Al_2O_3) které odebírají „třísku“ z testovaného materiálu. Rotující pohyb kotouče a radiální posuv vzorku zajišťuje neustálý kontakt testovaného materiálu s ostrými částicemi korundu.

Tvar zkušebních vzorků pro abrazivní opotřebení na brusném plátně s pevnými částicemi byl zvolen $10 \times 10 \times 10$ mm. Od každého testovaného materiálu byly vyrobeny tři sady vzorků.

Obr. 3. Hodnoty mikrotvrdosti jednotlivých vzorků



Jako porovnávací etalon byly připraveny vzorky z originálního hmatače. Metodou přesného dělení byly odebrány vzorky svarové housenky s nosnou ocelovou částí původní součásti. Pro jeden testovaný cyklus byla zvolena délka třecí dráhy 50 m. Celkový test se skládal z pěti dílčích měření. Vzorky byly zatíženy abrazivní drahou 250 m. Celkový průměr otáčející se desky je 480 mm. Maximální kluzná rychlost zkušebního tělesa nesmí přesáhnout $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Přítlačný měrný tlak, který je vyvozen na zkušební vzorek, byl stanoven na $0,32 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Radiální posuv zkušebního tělesa je dimenzován na $3 \text{ mm}\cdot\text{ot}^{-1}$. Abrazivní médium na brusném plátně je tvořeno korundem. Dle normy ČSN 01 5084 je základní parametr korundového plátna stanoven na zrnitost 120 jednotek. Hmotnostní úbytky byly váženy na digitálních vahách s přesností 0,01 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:

$$\psi_{abr} = \frac{m_{et}}{m_{vzo}}$$

kde m_{et} – hmotnostní úbytek etalonu (g),

m_{vzo} – hmotnostní úbytek vzorku (g).

Zásadní pro tvorbu strukturních fází je chemické složení (tab. I.). V závislosti na procentu uhlíku je při navarování dosaženo

Tab. I. Chemické složení testovaných materiálů

Testované materiály		Chemické složení testovaných materiálů (%)							
		C	Si	Mn	Cr	V	Mo	Nb	Fe
Elektroda s bazickým obalem (martenzit)	vzorek 1	0,50	2,30	0,50	9,00	–	–	–	základ
	vzorek 2	0,50	0,80	1,30	7,00	–	1,30	0,50	základ
Elektroda s rutilovým obalem (ledeburit)	vzorek 3	3,20	1,00	–	29,00	–	–	–	základ
	vzorek 4	3,50	1,00	–	35,00	0,20	–	–	základ
Etalon		0,35	0,20	1,10	4,10	0,20	–	–	základ

martenzitické struktury, která je charakteristická vysokou tvrdostí s možností tepelné úpravy, nebo ledeburitické struktury, která se svými parametry blíží charakteristice bílé litiny.

Výsledky

Tvrdost svarové housenky má značnou vypovídající schopnost o její životnosti a celkovém opotřebení. V podmínkách kontaktu daného materiálu s půdními frakcemi ovšem do značné míry záleží na schopnosti adhezni i kohezni síly udržet danou strukturu v základní kovové matici (9).

Měření tvrdosti bylo provedeno na pěti vzorcích od každého materiálu metodou HV se zatěžovací silou 294 N. Z aritmetického průměru (tab. II.) je zřejmé, že na výslednou tvrdost má zásadní vliv chemické složení daného materiálu.

Vnikacím tělískem pro tuto zkoušku je diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Zkouška tedy spočívá v tom, že indentor je vtlačován silou F do zkušební tělesa. Důležitá je nejen časová prodleva, ale hlavně i délka úhlopříček, které indentor po sobě zanechá.

Měření mikrotvrdosti bylo provedeno pomocí Hannemanna mikrotvrdoměru, který je součástí metalografického mikroskopu Neophot 21. Jedná se o klasickou metodu dle Vickerse. Zatěžovací síla je 0,1 N. Výsledky jsou zaznamenány na obr. 3.

Zkoušky abrazivního opotřebení prováděné v laboratorních podmínkách mají významný porovnávací charakter jednotlivých testovaných materiálů. Výhodou jsou především stále konstantní podmínky během celého testu. Jelikož se v daném experimentu jedná o hodnocení svarového kovu, který může obsahovat nejen různé nehomogenity strukturních fází, ale také například póry či dutiny, je normalizovaná zkouška na brusném plátně jednou z prvotních ukazatelů vhodnosti daného materiálu pro využití

Tab. II. Měření tvrdosti testovaných materiálů

Testované materiály	Číslo měření					Průměrná hodnota (HV ₃₀)	Směrodatná odchylka (HV ₃₀)	Variační koeficient (%)
	1	2	3	4	5			
	Makrotvrdost (zatěžovací síla 294 N) (HV ₃₀)							
vzorek 1	662	671	652	645	622	650,4	16,7	2,6
Vzorek 2	564	556	538	549	529	547,2	12,5	2,3
Vzorek 3	707	689	699	700	714	701,8	8,4	1,2
Vzorek 4	930	905	915	924	917	918,2	8,5	0,9
Etalon	457	560	433	458	426	466,8	48,3	10,3

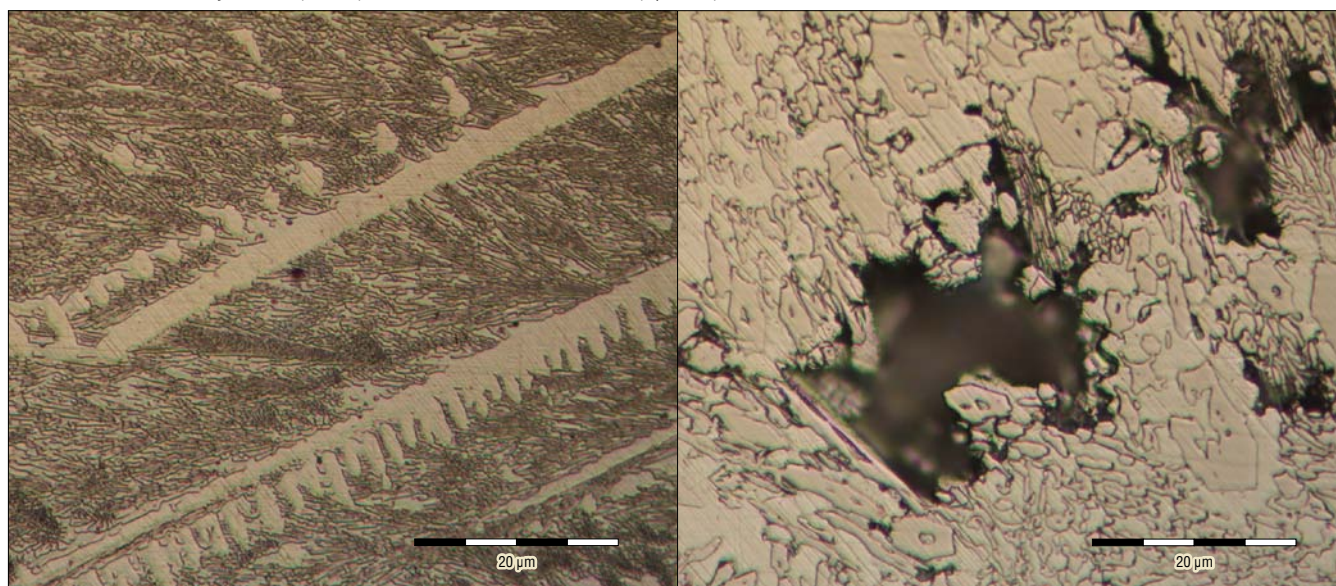
v konkrétních provozních podmínkách zatížených zvýšenou abrazivitou půdních částic.

Jako etalon k hodnocení abrazivní odolnosti byl použit návar a část základního materiálu z originálního hmatače pro stroje Holmer. Základní materiál (tělo hmatače) je tvořeno standardní uhlíkovou ocelí, jejíž základní mikrostrukturu tvoří sorbit. Tato struktura byla získána zušlechtěním materiálu za vyšších teplot. Takto tepelně zpracovaný materiál zaručuje odolnější fragmentační koeficient i při zvýšeném dynamickém namáhání. Abrazivní odolnost takto zušlechtěného materiálu je ale na velmi nízké úrovni.

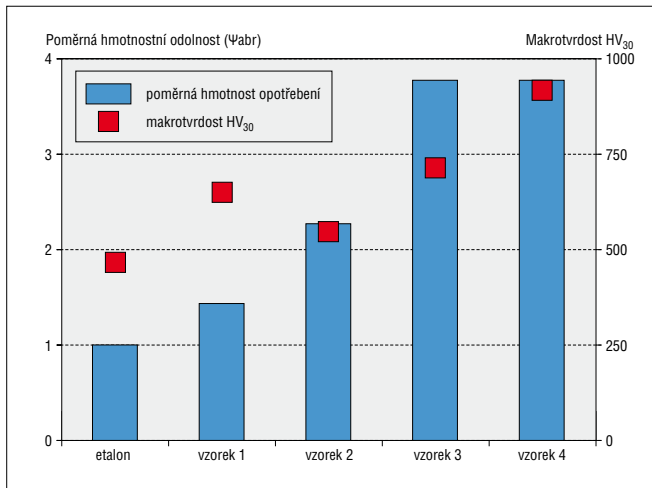
Jak již bylo konstatováno v úvodu, zásadní vliv na tvrdost testovaných vzorků má především chemické složení. Kvantitativně se jedná o množství uhlíku v dané slitině. Tento prvek se železem vytváří karbid Fe₃C, který je nositelem základních mechanických vlastností (10, 11). Rovněž výrazný podíl na tvrdosti má chrom. Při zvýšeném množství je slitina schopna vytvářet (Fe, Cr)₃C₂ (karbid K₂), později (Fe, Cr)₂₃C₆ (karbid K₁). Kombinací těchto strukturních složek lze tedy vytvořit návarový kov, který je značně odolný vůči mechanickému namáhání ořezových částic.

Dle provedených analýz základní návarový kov vykazoval nejnižší hodnoty tvrdosti, ale rovněž i maximální hmotnostní úbytek po abrazivním testu. Tento úbytek se pohyboval přibližně

Obr. 4. Ledeburitický návar (vlevo), dutina ve svarovém kovu (vpravo)



Obr. 5. Poměrná hmot. odolnost dle zkoušky na brusném plátně



0,98 g po uplynutí trajektorie 250 m na brusném plátně. K tomuto materiálu jsou tedy vztaheny veškeré výsledky a tuto hodnotu lze považovat za relativní odolnost $\psi_{abr} = 1$. Graficky jsou znázorněny relativní abrazivní odolnosti všech vzorků na obr. 5.

Nejlepších hodnot abrazivní odolnosti vůči etalonu dosahovaly vzorky č. 3. Jedná se o ledeburitický návar, kdy ochranu svarového kovu tvoří rutilový obal. Tento návarový kov vykazoval 3,79× vyšší abrazivní odolnost vůči vzorkům z originálního hmatače. Tato hodnota je výsledkem značného množství chromu a uhlíku v daném materiálu. Nevýhodou ovšem může být nutnost předehřevu základního materiálu před aplikací samotného návaru. Dle metalografického pozorování lze ale



konstatovat vysokou stálost a homogenitu návaru. Promíšení návarového kovu se základním materiálem bylo naprosto minimální. Při dodržení daných technických zásad by bylo možné tedy aplikovat pouze jednu svarovou housenku a tím minimalizovat spotřebu materiálu.

Rovněž dobrých výsledků vykazovaly vzorky č. 4. Také se jedná o ledeburitický návar s primárními karbidy chromu a železa. I když tento návar vykazoval vyšší hodnoty tvrdosti (918 HV), byla jeho abrazivní odolnost nižší než vzorků č. 3. Důvodem jsou jednoznačně drobné nitkovité trhliny i póry v základní kovové matici (obr. 4.). Dle metalografické analýzy je základní kovová hmota přesycena karbidy, které již nejsou schopny být pevně ukotveny v základním materiálu. Jednoznačně tedy dochází k vytrhávání celých karbidických zrn. Na základě pnutí v krystalické mřížce lze rovněž předpokládat rozvoj centrální trhliny, která bude mít za následek fragmentaci návarového kovu od základního materiálu.

Návarové materiály, které na základě svého chemického složení tvoří martenzitickou strukturu, vykazovaly mnohem menší abrazivní odolnost než tvrdokov s ledeburitickými částicemi. Vzorky č. 2 jsou tvořeny především jehlicemi martenzitu, který je ve své primární struktuře tetragonální. Na abrazivní odolnost tohoto materiálu má vliv především legování molybdenem a niobem. Poměr těchto dvou legujících prvků je velice dobře fixovaný v základní kovové matici. Tvrdost těchto strukturálních fází je sice menší než u vzorků č. 1, ale na základě metalografické analýzy lze konstatovat rovnoměrnější rozložení v celém průřezu návaru. Odolnost tohoto návaru byla 2,27× vyšší než u etalonu. Této hodnotě odpovídá hmotnostní úbytek 0,43 g po 250 m na brusném plátně.

Materiál martenzitického typu u vzorku č. 1 vykazoval rovněž vyšší poměrnou abrazivní odolnost než etalon, odolnost tohoto materiálu byla 0,45× vyšší než původní martenzitická struktura etalonu. Tomuto tedy odpovídá hmotnostní úbytek 0,68 g po uplynutí dané dráhy. I když tyto vzorky obsahují 9 % chromu, projevila se zde poměrně značná řádkovitost karbidů v kombinaci se zbytkovým austenitem v základní kovové hmotě. V daném uspořádání nejsou tyto strukturální fáze schopny maximálně odolávat mnohabřítým elementům abrazivních částic.

Závěr

Strojní mechanismy a funkční prvky, které přichází do styku s půdními částicemi, jsou v daném prostředí jednoznačně zatíženy abrazivním a erozivním opotřebením. Z tohoto důvodu lze stroje pro sklizeň cukrové řepy zařadit do kategorie s enormním opotřebením jak pasivních, tak i aktivních prvků. Tyto stroje lze charakterizovat jako mobilní linky, které jsou schopny řepné bulvy vyorat, ořezat, očistit a transportovat až do kontejneru transportního mobilního prostředku. Značné ztráty v tomto procesu mohou vzniknout opotřebením primárních segmentů již v procesu vyorávání a ořezu bulev.

Článek je zaměřen na využití nových tvrdokovových návarů, pro aplikaci na strojní součásti s přesnou geometrií, která je zásadní pro správnou funkci stroje. Požadavkem je tedy co nejméně ovlivnit svarovým návarem tvar i polohu dané součásti. Dle výsledků laboratorních testů je možné konstatovat tyto výsledky: – Návarové housenky martenzitického typu chráněné bazickým obalem se vyznačují velmi jednoduchou aplikací na danou

součást. Rovněž i finanční náročnost je asi poloviční oproti jiným návarům, jak austenitického tak ledeburitického typu. Snadno zapalují elektrický oblouk a není třeba předehřevu základního materiálu. Je ovšem nutné zvolit správné chemické složení s vyšším procentem legujících prvků. Vliv pouze samotného uhlíku, který vytváří karbid železa Fe₃C, není dostatečný. Tuto martenzitickou strukturu je nutné obohatit o další karbidotvorné prvky, které ale musí být pevně fixovány v základní kovové matici.

– Ledeburitické návary chráněné rutilovým obalem vyžadují již mnohem vyšší technologickou kázeň i samotnou přípravu před aplikací tvrdokovu. Jedná se především o předehřev samotné součásti, a to v průměru až na cca 200 °C. Kombinace vysokého procenta uhlíku a chromu zajišťuje přímou tvorbu cementitu a karbidů K₁ a K₂ bezprostředně z taveniny. Tento proces má ale za následek snížení houževnatosti daného systému. Laboratorní testy potvrdily u těchto materiálů velmi dobrou odolnost vůči abrazivnímu opotřebení. Jelikož tento materiál má rovněž po aplikaci minimální promíšení se základním kovem, lze aplikovat tento návar opravdu jen v nezbytném množství a na opotřebované místo daného nástroje. Při aplikaci těchto materiálů na novou součást mohou výrobci již předem konstrukčně navrhnout nástroj, který bude rozměrově doplněn návarovým systémem na předepsaný rozměr.

Tento příspěvek byl vytvořen s podporou projektu ZETOR (EG15_019/0004799 – Zetor Tractors, a.s.) – Optimální agregace strojů s traktorem.

Souhrn

V procesu sklizně cukrové řepy jsou stroje zatíženy značným abrazivním opotřebováním pasivních i aktivních částí. Jedná se především o mechanismy, které jsou v přímém kontaktu jak s biologickým materiálem, tak především s tvrdými půdními částicemi.

Předložený příspěvek je zaměřen na testování nových návarových systémů pro využití u nástrojů vystavených enormnímu abrazivnímu opotřebování. Primární cíl je využití tohoto návaru u pasivních hmatačů, které přímo ovlivňují výšku řepného skrojku. Výrobci strojů již dodávají tyto strojní součásti opatřené tvrdokovovým náwarem. Důležitým kritériem je profil a tvar samotného hmatače. Z tohoto důvodu musí být tvrdokov nanesen v omezeném množství a pouze na patřičné partie z důvodu zachování geometrie celého nástroje. Pro testování byly zvoleny tvrdokovové materiály martenzitického i ledeburitického typu. Daná struktura je výsledkem chemického složení návaru, a to především množstvím uhlíku ve svarovém kovu. Jednotlivé materiály byly podrobeny zátěžovému testu abrazivního opotřebování s pevnými částicemi dle normy ČSN 01 5084. Jako etalon byl použit originální díl hmatače s tvrdokovovým náwarem, který je běžně dostupný jako spotřební materiál k daným sklízečům cukrové řepy. Na základě metalografické analýzy, mikrotvrdosti strukturních fází a abrazivní odolnosti lze doporučit určité materiály nejen k renovaci, ale i k základní aplikaci na nový výrobek.

Klíčová slova: stroje pro sklizeň cukrové řepy, pasivní hmatače, tvrdokovový návar, abrazivní opotřebování, geometrie nástroje, půdní částice.

Literatura

1. ČÍČO, P. ET AL.: Zlepšenie odolnosti vyorávacích radlíc cukrovej repy renováciou. *Acta technol. agricult.*, 14, 2011 (2), s. 29–31.
2. VOTAVA, J. ET AL.: Aplikace tvrdokovových nástřiků u nožového segmentu ořezávacího ústrojí sklízečů cukrové řepy. *Listy cukrov. řepář.*, 131, 2015 (11), s. 341–346.

3. BEDNÁŘ, R. ET AL.: Suitability of technical materials for machinery subsoilers for soil tillage. *Acta Universitatis Agricult. et Silvicult. Mendelianae Brunensis*, 61, 2013 (1), s. 9–16.
4. VOTAVA, J. ET AL.: Minimalizace abrazivně-erozivního opotřebování u sklízečů cukrové řepy. *Listy cukrov. řepář.*, 131, 2015 (9–10), s. 284–289.
5. VIŠŇAS, J. ET AL.: Application of hard surfacing for repairing of agricultural parts. *Research in Agricult. Eng.*, 59, 2013 (2), s. 61–67.
6. KOTUS, M.; POULÍČEK, T.; HOLOTA, T.: Resistance of Coated Electrodes Applicable for the Renovation of Tillage Tools. *J. Central Europ. Agriculture*, 14, 2013 (4), s. 1295–1302.
7. POULÍČEK, T.; VOTAVA, J.; KOTUS, M.: Abrasive resistance of filler metals in laboratory conditions. *J. Central Europ. Agriculture*, 15, 2014 (1), s. 208–213.
8. VOTAVA, J. ET AL.: Využití tvrdokovových návarů u sklízečů cukrové řepy. *Listy cukrov. řepář.*, 135, 2019 (9–10), s. 297–302.
9. STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W.: Engineering tribology. 3rd edition. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005, 775 s., ISBN 0-7506-7836-4.
10. KAZEMPOUR, M.; SHOKROLLAHI, H.; SHARAFI, S.: The influence of the matrix microstructure on abrasive wear resistance of heat-treated Fe-32Cr-4.5C wt% hardfacing alloy. *Tribology Letters*, 39, 2010, s. 181–192.
11. BERGMAN, F.; HEDENQVIST, P.; HOGMARK, S.: The influence of primary carbides and test parameters on abrasive and erosive wear of selected PM high speed steels. *Tribology Int.*, 30, 1997 (3), s. 183–191.

Votava J., Šmak R., Polcar A., Kumbár V.: Using Hard Metal to Eliminate Abrasive Wear of Passive Parts of Sugar Beet Harvesters

During the process of sugar beet harvesting, machines are subject to high abrasive wear of both passive and active parts. These involve particularly those mechanisms which are in direct contact not only with biologic material but also with hard soil particles.

This paper focuses on testing new welding systems used for tools which are subject to enormous abrasive wear. The primary aim is to use this weld deposit in passive touchers which directly influence the height of beet heel. These machine parts have already been supplied by its producers with hard-metal weld but the profile and shape of the toucher itself are important criteria. For this reason and in order to preserve the geometry of the whole tool, hard-metal has to be applied in a very limited amount and only to particular parts. Two different hard-metal materials were selected for the testing purposes: martensite type and ledeburitic type. The structure is the result of the chemical composition of the weld deposit, mostly influenced by the amount of carbon in the welded metal. The individual materials were subject to stress test of abrasive wear with solid particles according to the ČSN 01 5084 standard. An original part of the toucher with hard-metal weld was used as the etalon; it is a common spare part of sugar beet harvesters. Based on metallographic analysis, microhardness of structural phases and analysis of abrasive wear, it is possible to make recommendations of materials suitable not only for renovations but also for applications on new products.

Key words: sugar beet harvesters, passive touchers, hard-metal weld deposit, abrasive wear, tool geometry, soil particle.

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