

Eliminace opotřebení funkčních ploch u sklízečů cukrové řepy

WEAR ELIMINATION ON SUGAR BEET HARVESTER FUNCTIONAL SURFACES

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

Sklizeň cukrové řepy patří mezi sezónní operace, ve kterých je stroj mnohdy nasazen i v třísměnném provozu. Proto není možné přistoupit k odstávce pouze z důvodu opotřebení jednotlivých funkčních částí, například vyorávacího systému sklízeče. Z tohoto důvodu je vždy nutná aplikace trdokovových návarů u součástí s enormní abrazivní zátěží. Je nutné si uvědomit, že úroveň daného namáhání je obdobná jako u strojů na zpracování půdy (1). U sklizně totiž nedochází pouze k interakci dvou těles (funkčních součástí), ale rovněž k interakci tří těles, kdy do procesu vstupují půdní částice a rostlinné zbytky (2). Správná funkce daného zařízení je přitom závislá nejenom na seřízení jednotlivých funkčních celků, ale také i na správné geometrii konkrétního nástroje. Technologie aplikace trdokovových návarů se běžně stala metodou nejen pro renovaci opotřebovaných součástí, ale rovněž také pro zvýšení odolnosti součástí nových (3, 4). Jedním z příkladů je aplikace trdokovové housenky na obvod vodícího kola vyorávací jednotky (obr. 1.). Jak je patrné z detailního pohledu (na tomto obrázku vpravo), dochází jednak ke značnému opotřebení na vrcholu svarové housenky, ale často rovněž k masivnímu vytrhávání základního materiálu vodícího kola v okolí návaru. Důvodem je jednoznačně chemické

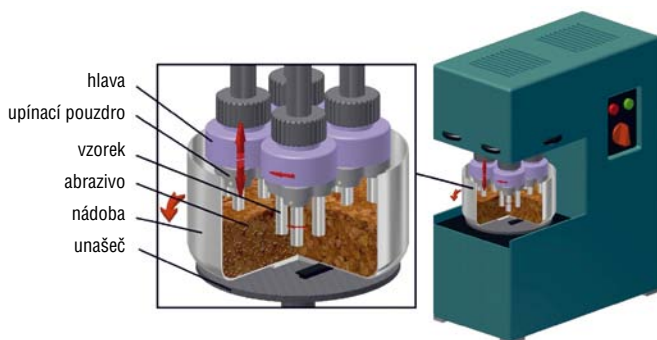
složení a tepelné zpracování dané součásti. Je nutné si ovšem uvědomit, že tepelné zpracování musí být určitým kompromisem mezi opotřebováním součásti a její houževnatostí (5). Schopnost materiálu pohltit určité množství energie bez vnější deformace nebo dokonce destrukce je nutnou podmínkou v pracovních procesech s dynamickou zátěží. A proto je značně obtížné zvolit správný materiál pro konkrétní strojní součást.

Na základě testování a výzkumu materiálů vhodných do podmínek se zvýšeným abrazivním opotřebováním byla jednoznačně stanovena vhodnost karbidických struktur pro zvýšení odolnosti vůči otěru. Problémem ovšem může být vylamování celých karbidických útvarů z důvodu nevhodné matrice, kde jsou karbidy uloženy. Cesta k odstranění tohoto problému může pak být například v předehřevu základního materiálu s následným pozvolným chladnutím po aplikaci svarového kovu. Rovněž velmi důležitým aspektem je promísení svarového kovu se základním materiálem. Tato problematika je řešena především s otázkou proudové zátěže a vypalování legujících prvků (6). V předchozích výzkumech bylo jednoznačně potvrzeno kritérium dvou návarů. Na základě využití prvkových map z elektronového mikroskopu lze následně konstatovat ostrou linii, kdy ve druhé

Obr. 1. Vodící kolo u sklízecích strojů Holmer



Obr. 2. Zkouška opotřebení v brusné nádobě



svarové housence je eliminováno ředění prvky ze základního materiálu.

Materiál a metody

Technologie navařování patří jak mezi primární metody renovace, tak i technologického postupu výroby nové součásti (7). V předloženém experimentu jsou analyzovány nové tvrdokovové materiály vhodné do prostředí s nadměrnou zátěží abrazivního opotřebení nejen v půdních podmínkách. Vzorky byly připraveny metodou tavného navařování MAG v prostředí ochranné atmosféry CO₂. Pro přípravu vzorků byl použit pulsní svařovací agregát Picomig 180 plus TKG.

Jelikož tloušťka materiálu pro výrobu testovaných vzorků byla z důvodu dostatečného tepelného přenosu stanovena na 8 mm, parametry nastavení stroje jsou:

- svařovací proud 170 A,
- svařovací napětí 26,5 V,
- posuv drátu 11,5 m·min⁻¹ při tloušce 0,8 mm.

Přídavný materiál byl zvolen na základě legujících prvků v základní kovové matici použitého tavného drátu (tab. I.). Jedná se o nízkolegované martenzitické systémy, které jsou schopny odolávat zvýšené dynamické zátěži, a o systémy karbidické, u kterých lze předpokládat vyšší odolnost nejenom proti abrazivnímu vytrhávání částic, ale rovněž také proti erozivní degradaci.

Jako etalon byl zvolen originální díl vodicího kola pro stroje Holmer. Prioritou byla analýza strukturních fází základního

ocelového substrátu. Rovněž byla sledována celková tvrdost a houževnatost daného materiálu.

Podmínky laboratorní zkoušky

Zkouška opotřebení v brusné nádobě patří mezi základní testy, podle kterých lze predikovat vhodnost daného materiálu pro využití součástí v prostředí s nadměrnou abrazivní zátěží. Jelikož se jedná o interakci dvou těles, lze podmínky testu dobře definovat (8). Na základě použitého abrazivního média jsou tyto testy rovněž využívány nejen ke sledování abrazivních úbytků testovaných materiálů, ale také k analýze změn fyzikálních vlastností půdy, které mají zásadní vliv na správný růst kulturních rostlin. Drobtovité částice totiž koreluje s mechanismem utužení půdy těžkou technikou. (9). Podmínky testu jsou: Vzorky ve tvaru válečku o průměru 15 mm a délce 65 mm jsou upnuty ve třech upínacích pouzdrech, rotujících otáčkami 0,82 ot·s⁻¹. Pouzdra se vzorky jsou součástí rotační hlavy, která s rotujícími vzorky vykonává další rotaci ve stejném směru o otáčkách 0,5 ot·s⁻¹. Proti směru rotace hlav se otáčí nádoba vyplněná abrazivním materiálem (obr. 2.). Otáčky nádoby jsou 1,55 ot·s⁻¹. Zkouška může být použita podobně jako u Bondova přístroje pro testy materiálů, ale rovněž i pro analýzu opotřebení návarových systémů. Pro analýzu opotřebení byly zvoleny dva druhy abraziva – a to keramická drolenka s frakcemi do 5 mm a 2 mm. Důvodem je analýza poměrného opotřebení, obdobného jako v půdních podmínkách. Objem abraziva pro každou výměnu činil 1 000 cm³. Výhodou dané metodiky je jednoznačně jak abrazivní, tak erozivní zatížení testovaných vzorků.

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:

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

kde: m_{et} – hmotnostní úbytek etalonu (g),
 m_{vzo} – hmotnostní úbytek vzorku (g).

Zásadní pro tvorbu strukturních fází je chemické složení testovaných materiálů, které uvádí tab. I. Dalším důležitým aspektem je promíšení svarového kovu se základním materiálem. Na vznik tvrdých karbidických částic má jednoznačně vliv

Tab. I. Chemické složení testovaných materiálů

Testované materiály	Vzorek	Chemické složení testovaných materiálů (%)					
		C	Si	Mn	Cr	Ti	Fe
Nízkolegovaný drát (martenzitický typ)	1	0,30	1,10	1,00	1,00	—	základ
	2	0,40	2,40	0,70	1,30	—	základ
Středně legovaný drát (karbidický typ)	3	0,70	0,40	2,00	1,55	0,20	základ
	4	1,10	0,40	2,00	9,00	0,20	základ
Etalon (původní materiál)		0,42	0,85	2,14	1,25	—	základ

procentuální hodnota uhlíku a množství karbidotvorných prvků dodaných ve svarovém kovu. Tyto aspekty jednoznačně ovlivňují celkovou odolnost materiálu vůči degra-dačnímu procesu opotřebení.

Výsledky

Zkouška rázem v ohybu na Charpyho kladivu ČSN EN 10045-1

Pro stanovení užitečných vlastností materiálu při dynamickém namáhání slouží zkouška rázem v ohybu. Je zdrojem velice důležitých údajů, na jejichž základě lze do jisté míry předpokládat chování technického materiálu v reálných podmínkách, např. v dynamickém zatížení v oblasti půdních podmínek. Získané výsledky korelují s chováním zkoušeného materiálu z hlediska odolnosti vůči křehkému porušení.

Pro stanovení houževnatosti technických materiálů lze použít jednoduchý mate-matický vztah. Míra houževnatosti Kc je spotřebovaná práce na porušení zkušebního tělesa, vztažená k počátečnímu průřezu S_0 zkušebního tělesa v místě vrubu.

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

Spotřebovaná práce K je dána rozdílem potenciálních energií kladiva před a po rázu.

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

Výsledek zkoušky stanoví náchylnost testovaného materiálu ke křehkému, nebo naopak houževnatému lomu (tab. II.).

Zkouška tvrdosti podle Vickerse ČSN EN ISO 6507-1

Jelikož tvrdost lze charakterizovat jako odolnost materiálu proti vnikání cizích těles a porušení základního materiálu, jedná se tedy o zkoušku s vysokou vypovídající schopností pro určení odolnosti testovaných materiálů. Důležitým aspektem pro odolnost návaru je ale rovněž uspořádání kovové matrice návaru jako celku.

Měření tvrdosti bylo provedeno na pěti vzorcích od každého materiálu metodou HV se zatěžovací silou 294 N (tab. III.). Vnikacím tělískem pro tuto zkoušku je diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Zkouška spočívá v tom, že indentor je vtlačován silou F do zkušebního tělesa. Důležitá je nejen časová prodleva, ale hlavně i délka úhlopříček, které indentor po sobě zanechá.

Na testovaných vzorcích byl proveden soubor laboratorních měření potřebných pro analýzu nejen mechanických vlastností návarového kovu, ale především pro sledování odolnosti materiálu odolávat abrazivnímu opotřebení. Značnou výhodou laboratorního měření je zajistit konstantní podmínky v celém průřezu měření. Na základě metalografických výbrusů lze konstatovat dobrou kvalitu tavného materiálu

Tab. II. Výsledky houževnatosti KV +20 °C

Testované materiály	Vzorek	Měření					Průměr	Směro-datná odchylna	Variační koefi-cient
		1	2	3	4	5			
Míra houževnatosti (J·cm ⁻²)									
Nízkolegovaný drát (martenzitický typ)	1	12,6	14,2	11,1	12,5	13,1	12,7	0,9	7,2
	2	15,2	14,2	14,0	13,6	14,1	14,2	0,5	3,4
Středně legovaný drát (karbidický typ)	3	13,5	13,2	14,3	13,2	14,6	13,8	0,5	3,9
	4	8,7	8,2	6,9	7,5	6,2	7,5	0,8	10,9
Etalon (původní materiál)		12,1	12,9	11,8	12,9	12	12,3	0,4	3,5

Tab. III. Hodnoty tvrdosti jednotlivých vzorků

Testované materiály	Vzorek	Měření					Průměr	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
		1	2	3	4	5			
		Tvrdost (HV ₃₀)							
Nízkolegovaný drát (martenzitický typ)	1	229	249	281	237	254	250,0	16,3	6,5
	2	293	334	321	345	322	323,0	15,9	4,9
Středně legovaný drát (karbidický typ)	3	390	410	399	441	408	409,6	15,7	3,8
	4	626	630	654	629	633	634,4	9,2	1,4
Etalon (původní materiál)		312	328	331	324	318	322,6	6,3	1,9

u všech vzorků. Ve svarovém kovu nebyly zaznamenány žádné nehomogenity, ani zvýšený výskyt pórů či dutin. Sledované strukturální fáze odpovídali jednotlivým typům kovových matic uváděných výrobcem. Pro vzorky 1 a 2 jsou tedy typické jehlice martenzitické struktury, kdežto u vzorků 3 a 4 se jedná o karbidy chromu K₁ a K₂. Mezi jednotlivými vrstvy návarů nebyly zaznamenány podstatné rozdíly, i když jednotlivé parametry se mohou lišit především v mikrotvrdosti (10). Jednotlivé strukturální fáze jsou uvedeny na obr. 3.

Pro analýzu poměrného opotřebení byl použit etalon vyrobený ze základního materiálu originálního vodícího kola určeného do sestavy vyorávacího ústrojí. Materiálem je nízkolegovaná uhlíková ocel, kde základní mikrostrukturu tvoří primárně perlitické lamely. Výhodou dané struktury je jednoznačně vyšší houževnatost a schopnost odolávat vyššímu dynamickému zatížení. Nižší abrazivní odolnost je eliminována návarovou housenkou, která tvoří zvýšený profil na celé součásti.

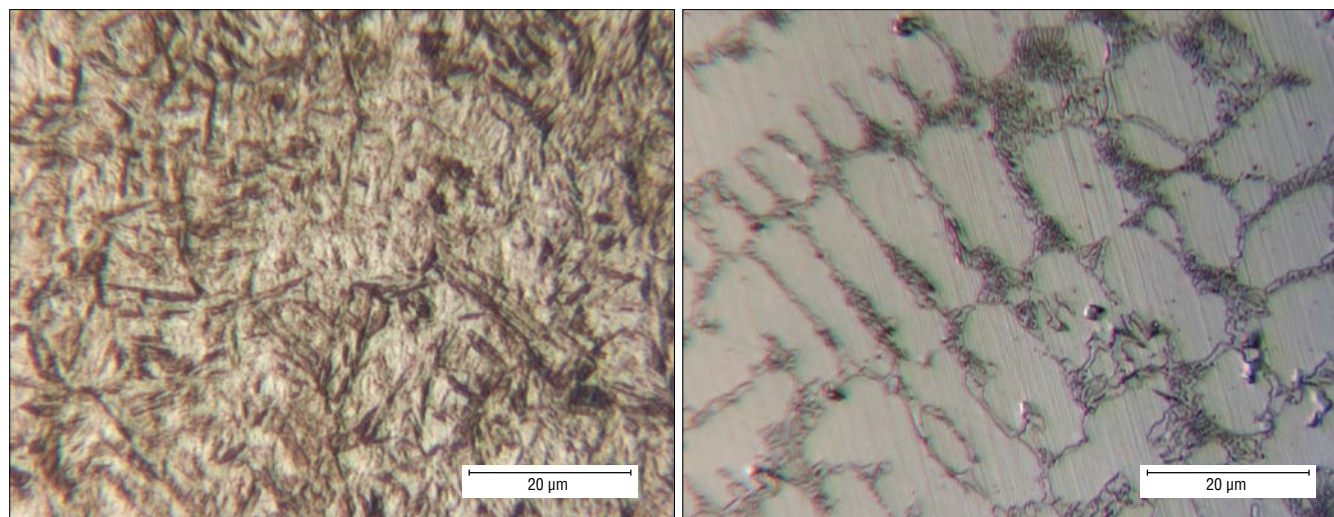
Jelikož byla stanovena kombinace tří základních zkoušek (tvrdosti, houževnatosti a abrazivního opotřebení), lze ze získaných výsledků stanovit nejvýhodnější chemické složení návarového kovu. Tento materiál musí být odolný nejenom vůči mechanickému namáhání otěrových částic, ale také si musí zachovat schopnost odolávat rázovému zatížení během pracovního procesu.

Jak již bylo uvedeno v úvodu, etalonem pro testování návarů byl stanoven základní materiál odebraný z původního vodícího kola sklízecího stroje. K tomuto materiálu jsou vztaheny hmotnostní úbytky testovaných svařenců. Relativní abrazivní odolnost tohoto materiálu je tedy $\psi_{abr} = 1$. Porovnání konkrétních hmotnostních úbytků je graficky znázorněno na obr. 4. a obr. 5. Jsou zde zaznamenány hmotnostní úbytky testovaných materiálů v násobném intervalu 30 min provozu zkoušky.

Nejlepší výsledky během testů abrazivního opotřebení vykazovaly středně legované vzorky s karbidickými zrny v základní kovové matici (jedná se o vzorek č. 4). Podle metalografických výbrusů lze konstatovat, že přidáním titanu v oceli dispergují intermetalické sloučeniny Fe₂Ti, které zlepšují pevnost i otěruvzdornost daného materiálu. Primární výhodou je ovšem velké množství Cr v základním návaru. Tento prvek tvoří karbidy K₁ a K₂, které jsou jednoznačně schopny odolávat rýhování nejen pudních částic (11). Daný návarový kov vykazoval 4,9× lepší abrazivní opotřebení v keramické drolence se zrnitostí T₅ než vzorky ze základního materiálu vodícího kola.

Výborné výsledky vykazoval rovněž vzorek č. 3. Jedná se také o středně legované návarové systémy, kde je snížen procentuální podíl uhlíku a chromu. Nevýhodou je tedy menší podíl karbidických tvrdých částí v základní kovové matici, ale toto omezení příznivě zvyšuje houževnatost daného systému.

Obr. 3. Strukturální fáze testovaných materiálů (vlevo) martenzit (vpravo) karbidy



Jelikož houževnatost lze charakterizovat jako schopnost materiálu pohlcovat mechanickou energii, lze předpokládat odolnost tohoto materiálu při dynamickém zatížení. Poměrné opotřebení tohoto materiálu bylo 2,66× lepší proti základnímu materiálu. Hodnoty opotřebení i rázové houževnatosti jsou na obr. 6.

Nízkolegované materiály martenzitického typu (vzorky č. 1 a 2) se vyznačují obdobnou charakteristikou jako základní materiál. Důležitým aspektem je srovnatelná houževnatost se základním materiálem, která se pohybuje v rozmezí 13 J·cm⁻². Odolnost proti abrazivnímu opotřebení ovšem nijak výrazně nepřevyšuje hodnotu základního materiálu. Obdobných výsledků bylo dosaženo jak u keramické drolenky T2, tak i u média T5. Testované vzorky číslo 2 měly průměrně 1,3× vyšší odolnost než etalon. Vzorky číslo 1 však pouze jen 1,1× než původní materiál vodícího kola. Z tohoto důvodu lze konstatovat nízkou přidanou hodnotu tohoto návarového systému.

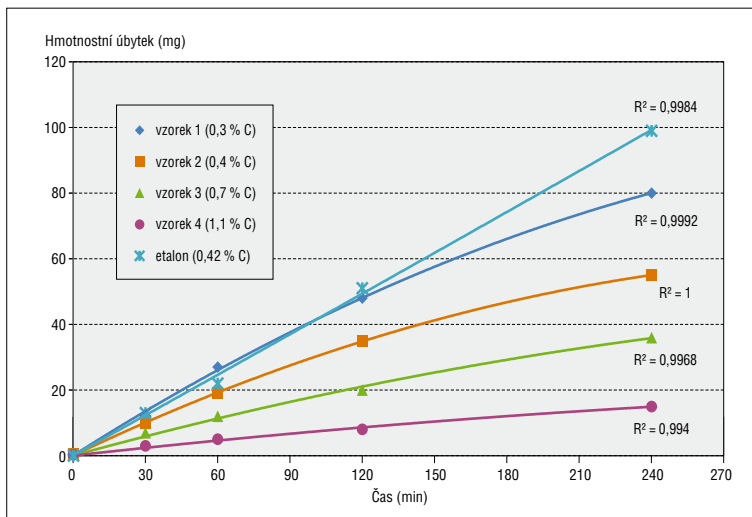
Závěr

Mezi možností eliminace nadměrného abrazivního i erozivního opotřebení jednoznačně patří technologie navaření tvrdokovových materiálů. U strojů pro sklizeň cukrovky se navařují nejen již opotřebené součásti, ale pro zaručení životnosti v průběhu celé sklizně i nové funkční prvky. Výhodou je především aplikace karbidových návarů, které mají nízkou mez opotřebení i nízkou hodnotu odolnosti vůči dynamickému namáhání. Návarem však lze provést vhodnou kombinaci promísení svarového kovu se základním materiálem a tím optimalizovat mechanické vlastnosti celé součásti.

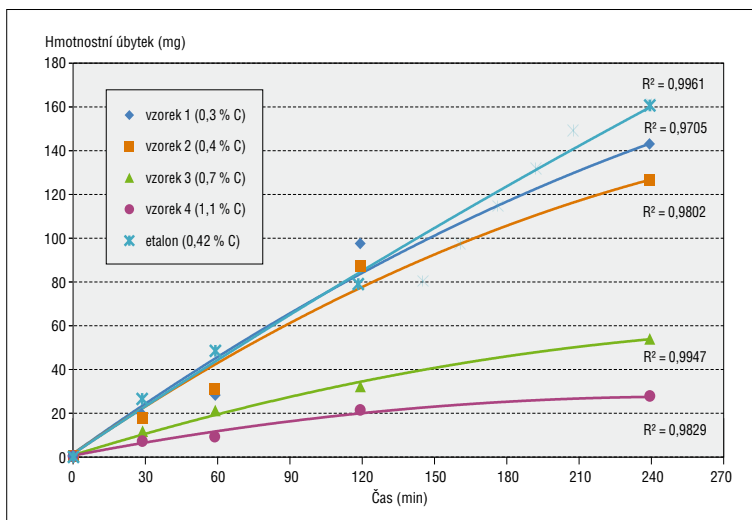
Na základě laboratorních testů lze konstatovat, že nízkolegované materiály, kde je uhlík a součet legujících prvků obsažen do 2 %, vykazují nízké hodnoty odolnosti vůči abrazivnímu a erozivnímu opotřebení. Důvodem může být nepřiměřené promísení se základním materiálem, nebo martenzitická matrice výchozí struktury. I když tyto materiály disponují dobrou houževnatostí, která činí cca 12 J·cm⁻², jejich tvrdost nepřesáhla 350 jednotek HV₃₀. Výhodou těchto materiálů je ovšem jednoduchá aplikace na základní materiál. Při použití technologie MAG ochranná atmosféra zaručuje hladký povrch housenky i minimální rozstřík svarového kovu.

U středně legovaných materiálů lze konstatovat již mnohem vyšší odolnost vůči agresivnímu prostředí keramického granulátu. Jedním z důvodů je především vyšší podíl karbidů chromu i částic cementitu Fe₃C. Tyto tvrdé karbidické částice jsou jednoznačně patrné jak z metalografických výbrusů, tak i při analýze tvrdosti, kdy u vzorků č. 4 byly zaznamenány hodnoty až 650 jednotek HV₃₀. Jistým omezením je ale zásadní pokles houževnatosti, kdy u těchto vzorků bylo dosaženo cca 7,5 J·cm⁻². Rovněž z důvodu vysoké pevnosti návarového drátu je aplikace pomocí metody MAG obtížnější. Také byly zaznamenány na povrchu svarové housenky drobné nitkovité trhliny, které signalizují zvýšené pnutí svarového kovu.

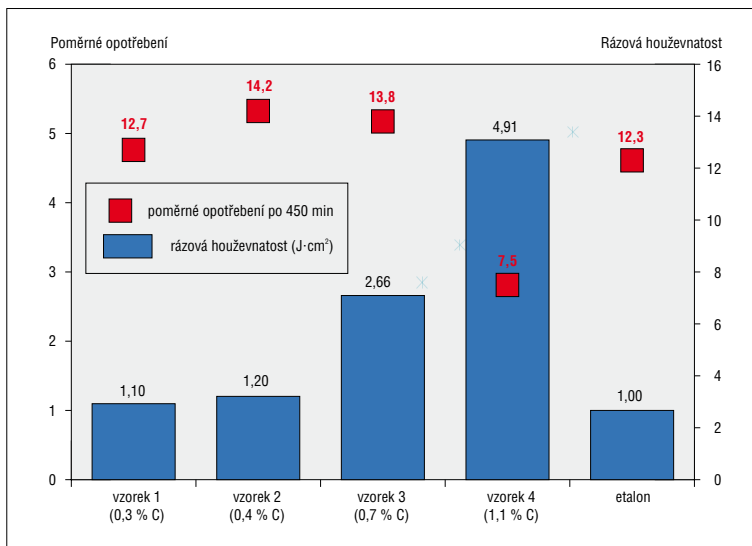
Obr. 4. Hmotnostní úbytky testovaných materiálů – keramická drolenka frakce 2 mm



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



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



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

Souhrn

Stroje pro sklizeň cukrové řepy patří do kategorie enormně namáhaných strojních sestav, u kterých hlavní opotřebení tvoří abrazivní a erozivní degradace. Předložený experiment představuje výsledky testů nových tvrdokovových systémů, které jsou aplikovány u součástí s enormní abrazivní a erozivní zátěží. Primárním cílem je tedy analýza daného materiálu v podmínkách enormní abrazivní zátěže. Pro testy byly zvoleny materiály s nízkým a středním ekvivalentem legujících prvků. Aplikace tvrdokovových návarů byla provedena metodou MAG bez předehřevu základního materiálu. Etalonem k jednotlivým materiálům byl zvolen originální díl z vodícího kola sklízecího stroje. Mezi doprovodné testy bylo zařazeno sledování houževnatosti na Charpyho kladivu. Získání výsledky mají zásadní vliv na predikci chování materiálu při dynamickém namáhání. Se získanými výsledky rovněž korelují hodnoty tvrdosti měření metodou HV při zátěži 294 N. Pro přesnější identifikaci strukturálních fází aplikovaného tvrdokovu byla rovněž provedena metalografická analýza, která jednoznačně potvrdila rovnoměrné rozmístění karbidických částí v základní kovové matici. Pro zátěžový test abrazivního opotřebení byla zvolena metoda s brusnou nádobou a keramickou drolenkou. Velikost jednotlivých frakcí byla stanovena na 2 a 5 mm. Důvodem je relevantní hodnocení, např. pro půdy s vyšší skeletovitostí. Na základě provedených mechanických testů lze tedy predikovat a doporučit jednotlivé testované materiály nejen k renovaci, ale rovněž také k základní aplikaci na nový výrobek.

Klíčová slova: abrazivní opotřebení, laboratorní testy, degradace, MAG, navařování, strukturální fáze, tvrdost, stroje pro sklizeň cukrové řepy.

Literatura

1. JANKAUSKAS, V. ET AL.: Effect of WC grain size and content on low stress abrasive wear of manual arc welded hardfacings with low-carbon or stainless steel matrix. *Wear*, 328–329, 2015, s. 378–390, doi:10.1016/j.wear.2015.02.063.



2. TROZENA, R. I.; ALLSOP, D. N.; HUTCHINGS, I. M.: Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. *Wear*, 225–229, 1999 (1), s. 205–214.
3. VOTAVA, J. ET AL.: Využití tvrdokovových návarů u sklízecích cukrové řepy. *Listy cukrov. řepář.*, 135, 2019 (9–10), s. 297–302.
4. CHANG, C.; CHEN, Y.; WU, W.: Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe-Cr-C hardfacing alloy. *Tribology Int.*, 43, 2010 (5–6), s. 929–934, doi:10.1016/j.triboint.2009.12.045.
5. 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.
6. KULU, P. ET AL.: Abrasive wear resistance of recycled hardmetal reinforced thick coating. *Key Eng. Materials*, 527, 2012, s. 185–190.
7. ŠMAK, R. ET AL.: Stability of intermetallic phases in the heat affected zone depending on shielding gases. In *MendelNet 2021: Proc. of 28th Int. PhD Students Conf.*, 28, 2021, s. 436–441.
8. 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.
9. ŠIMEČKOVÁ, J. ET AL.: Changes to the physical properties of the soil after the passage of an agricultural tractor. *International agrophysics*, 35, 2021 (1), s. 97–105.
10. GUALCO, A.; SVOBODA, H. G.; SURIAN, E. S.: Study of abrasive wear resistance of Fe-based nanostructured hardfacing. *Wear*, 360–361, 2016, s. 14–20, doi:10.1016/j.wear.2016.04.011.
11. KANG, A. S.; CHEEMA, G. S.; SINGLA, S.: Wear behavior of hardfacings on rotary tiller blades. *Paper presented at the Procedia Engineering*, 97, 2014, s. 1442–1451, doi:10.1016/j.proeng.2014.12.426.

Votava J., Šmak R., Lozrt J., Polcar A., Kumbár V.: Wear Elimination on Sugar Beet Harvester Functional Surfaces

Sugar beet harvesters belong to a category of highly stressed machines, where the highest stress is abrasive and erosive. The presented experiment introduces the results of tests of new hard metal systems which are applied on components under enormous abrasive and erosive stress; its primary objective thus was material analysis under such conditions. The tests worked with materials with low and middle equivalent of alloying elements. Hard metal was applied by the MAG method without preheating the base material. An original part of the harvester guiding wheel was used as an etalon. One of the tests consisted of toughness monitoring using Charpy impact testing. The results have a crucial impact on the prediction of the material behaviour under dynamic stress. There is also a correlation with the hardness values measured using HV method (294 N). For more accurate identification of the structural phases of the applied hard metal, metallographic analysis was also performed, which clearly confirmed the uniform distribution of carbide parts in the base metal matrix. The stress test was carried out using abrasive container with ceramic fractions; the individual fractions were between 2 to 5 mm in size, which were selected in order to simulate soils with higher fragmentation. Based on the results of the mechanical tests, it is possible to predict and recommend the individual tested materials not only for renovation but also for application on a new product.

Key words: abrasive wear, laboratory tests, degradation, MAG, welding, structural phases, hardness, sugar beet harvesters.

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, Česko, e-mail: jiri.votava@mendelu.cz