

Zvýšení abrazivní odolnosti pomocí vícevrstevných návarů u strojů pro manipulaci s cukrovou řepou

INCREASING ABRASION RESISTANCE OF SUGAR BEET HANDLING MACHINES USING MULTI-LAYERED COATING

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

Stroje pro sklizeň a manipulaci s cukrovou řepou jsou zatíženy různými typy opotřebení. Mezi primární lze řadit mechanické opotřebení, které postupně přispívá ke změně funkčních ploch strojních součástí. S tím souvisí především nedokonalá funkce stroje, či možnost vzniku prvních závad v důsledku změny geometrie funkčních ploch. Současné technologie i technologická řešení jsou především zaměřena na využití maximálního potenciálu technických materiálů a jejich chemického složení i tepelného zpracování z důvodu eliminace právě tvarových a mechanických změn funkčních součástí (1).

V současné době je často pro snížení opotřebení využíváno navařování, a to zejména z ekonomických důvodů. Vhodným navařem lze nanést nový homogenní materiál na povrch základního kovu (2, 3). Na základě vhodně zvolených parametrů a správné volby chemického složení aplikovaného materiálu lze docílit povrchových vrstev, jejichž odolnost proti působení vnějších abrazivních částic je daleko vyšší než odolnost základního materiálu (4).

Díky preciznímu navržení procesů navařování a výběru optimálních materiálů lze dosáhnout výrazného zlepšení výkonnosti a spolehlivosti opotřebitelných součástí. Kromě toho může být technologie navařování využita i k renovaci již opotřebovaných dílů, což představuje efektivní a ekonomicky výhodnou alternativu oproti úplné výměně celé součásti (5). Tvrdokovové návarů jsou využívány u šnekových dopravníků příjmového stolu čistících nakladačů cukrové řepy (obr. 1.). Z ekonomického

důvodu je obecně mnohem výhodnější aplikovat tvrdokovový návar než následně měnit celou strojní součást.

Při aplikaci tvrdokovových návarů je ovšem nutné striktně dodržovat optimální technologické parametry z důvodu maximálního využití chemického potenciálu aplikovaného materiálu. Při nevhodně zvoleném svařovacím proudu dochází nejen ke zvýšenému promísení se základním kovem, ale rovněž i k masivnímu vypalování legujících prvků (6). Znalost a studium strukturálních fází je u aplikovaného svařového kovu zásadní, jelikož dentritické uspořádání karbidických sloučenin primárně ovlivňuje především schopnost materiálu odolávat rýhování a plastické deformaci vyvolané abrazivními částicemi (7). Díky důkladné analýze transformačních diagramů tvrdokovových návarů je možné lépe porozumět procesům, které probíhají během navařování, a tím lépe optimalizovat výsledné vlastnosti materiálu obdobně jako u tepelného zpracování základního kovu (8).

Materiál a metody

Při aplikaci tvrdokovových návarů dochází k promísení základního materiálu se svařovým kovem, a tedy i změně chemického složení svařové housenky. Zásadní vliv na změnu mechanických vlastností mají rovněž i parametry zvolené pro samotné navařování. Tyto parametry mají ovšem poměrně

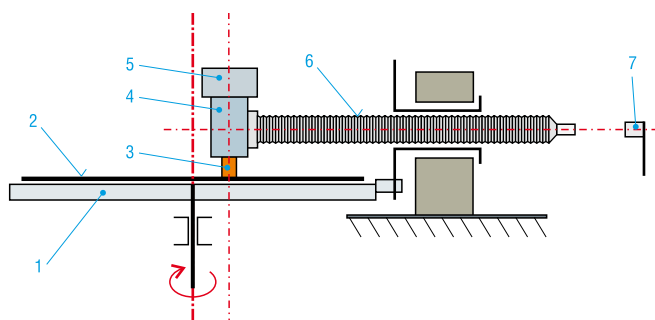
Obr. 1. Šnekové válce příjmového stolu čistícího nakladače cukrové řepy



Tab. I. Chemické složení testovaných materiálů

Typ elektrody	C	Si	Mn	Cr	Mo	AC/DC+	Tvrđost
	(%)					(A)	(HRC)
Martenzitický	0,8	1,5	0,7	10,0	1,5	70–110	45
Chrom karbidický	3,5	0,5	0,4	30,0	3,0	70–110	65

Obr. 2. Zkušební zařízení s brusným plátnem



1 – ocelová deska, 2 – brusné plátno, 3 – testované těleso, 4 – pohyblivá upínací hlavice, 5 – závaží, 6 – vodičí šroub, 7 – koncový vypínač

široké tolerance (svařovací proud, rychlost posuvu, ochrannou atmosféru). Při nevhodně zvolených podmínkách však razantně klesá kvalita návaru. U tvrdokovových návarů je to především schopnost odolávat ostrohranným částicím způsobujícím abrazivní i erozivní opotřebení. Primárním cílem experimentu je tedy analýza vlivu vstupních parametrů při navařování na abrazivní odolnost tvrdokovových návarů.

Pro přípravu vzorků byly využity tvrdokovové materiály určené pro renovace zařízení zatížených vysokou abrazivní zátěží (tab. I.). Na základě chemického složení byl zvolen systém

ledeburitického a martenzitického typu. Jednotlivé návary byly provedeny pomocí poloautomatického svařovacího agregátu Picomig 180 plus TKG. Jako základní substrát byla zvolena ocel S 235 JRG1 (11 373), která zajišťuje zaručenou svařitelnost. Pro nastavení svařovacích parametrů byly využity krajní meze doporučené výrobcem. Jedná se tedy o proudovou zátěž 70 A a 110 A. U každého systému návaru byly hodnoceny vzorky v provedení s jednou a dvěma svarovými housenkami.

Hodnocení abrazivní odolnosti na brusném plátně

Pro hodnocení kvality a odolnosti svarových housenek byla zvolena zkouška na brusném plátně. Jedná se o normalizovaný test (ČSN 01 5084), který byl proveden pomocí konstantní zatěžovací síly. Stanovení odolnosti je zařazeno do kategorie s vázanými abrazivními částicemi s interakcí dvou těles (9).

Zkouška proběhla na zařízení (obr. 2.), jehož primární částí je normalizovaná ocelová deska, která vykonává rovnoměrný otáčivý pohyb v závislosti převodového ústrojí s variabilní převodovkou. Brusný element v podobě brusného plátna je upevněn třemi samosvornými šrouby, aby nedošlo k samovolnému uvolnění plátna. Testované zkušební těleso je upevněno do pohyblivé upínací hlavice a pomocí závaží přitlačováno k brusnému plátnu. Radiální posuv je zajištěn pomocí vodičího šroubu, který je spojen s koncovým vypínačem. Přístroj má tyto parametry:

- délka třecí dráhy: 50 m,
- max. kluzná rychlost zkušebního tělesa: 0,5 m·s⁻¹,
- rozsah měrných tlaků: 0,32 N·mm⁻²,
- brusné plátno korundové – zrnitost: 180.

Metodika testu spočívá v analýze úbytků hmotnosti zkušebního tělesa. Po ujetí dráhy 50 m jsou vzorky očištěny v ultrazvukové čisticí lázni a následně ošetřeny lihem. Dále je provedeno vážení na digitálních elektronických vahách s přesností 0,001 g. Jakmile vzorky dosáhnou dráhy 250 m je brusné plátno nahrazeno novým (10).

Tab. II. Hodnoty mikrotvrđosti jednovrstvého návaru ve vertikálním směru

Typ návaru	70 A martenzit	110 A martenzit	70 A ledeburit	110 A ledeburit
	Hodnoty mikrotvrđosti (HV _{0,1})			
1	709	652	914	898
2	688	633	898	877
3	613	588	894	856
4	574	554	855	816
5	550	544	850	773
6	550	512	798	760
7	512	498	788	758
8	461	432	674	698
9	458	387	583	641
10	401	358	498	578

Tab. III. Hodnoty mikrotvrđosti dvouvrstvého návaru ve vertikálním směru

Typ návaru	70 A martenzit	110 A martenzit	70 A ledeburit	110 A ledeburit
	Hodnoty mikrotvrđosti (HV _{0,1})			
1	752	750	899	858
2	748	742	870	860
3	750	760	875	868
4	743	712	869	860
5	698	697	870	812
6	690	651	856	800
7	654	630	832	792
8	660	628	840	787
9	620	599	839	789
10	600	546	821	774

Výsledky

Analýza mikrotvrdomosti svarového kovu

Na základě promísení svarového kovu byla zvolena analýza mikrotvrdomosti základní kovové matrice dle metody Vickersse $HV_{0,1}$. Indentor byl umístěn na metalografickém mikroskopu Neophot 21, který umožňuje identifikovat mikrostruktury s možností lineárního posunu testovaného vzorku. Měření byla prováděna ve dvouřádkové vertikální linii s rozstupem 0,5–1,0 mm. Základní normativy testu jsou: vrcholový úhel $136^\circ \pm 0,5^\circ$, síla vtlačení indentoru 0,9807 N a časová prodleva 5 s.

Jak je patrné z obr. 3. až 5., svarový kov se liší základní morfologií uspořádání strukturních částí. V ledeburitickém systému jsou uspořádány kulovité útvary převážně karbidů chromu v základní kovové matrici. Z tohoto důvodu je zřejmé, že mikrotvrdomost dané struktury bude dosahovat mnohem vyšších hodnot. Martenzitická struktura je tvořena přesyceným tuhým roztokem uhlíku v železe alfa. Jelikož se jedná o svarový kov vzniklý z taveniny, je množství zbytkového austenitu minimální.

Maximální hodnoty jsou v oblasti vrcholu svarové housenky, jak je patrné z tab. II. a III. Směrem k základnímu materiálu pozvolna dochází ke snižování tvrdosti.

V oblasti dvouvrstvých návarů byly zaznamenány rovněž korelující hodnoty mikrotvrdomosti a chemického složení daného materiálu. I při nižších hodnotách v oblasti rozhraní svarových kovů jsou tato místa tvořena vysokým podílem primárních karbidů.

Analýza promísení svarových kovů ledeburitického typu

Promísení svarového kovu má zásadní vliv na mechanické vlastnosti nejen základního materiálu (mohou se tvořit podpo- vrchové trhliny v důsledku zvýšeného pnutí po navařování), ale především na odolnost proti opotřebení samotného návaru. V důsledku nevhodně zvolených parametrů může docházet k tzv. vypalování legujících prvků, nebo naopak vysokému ředění se základním materiálem.

Při analýze jednovrstvých ledeburitických návarových systémů (obr. 3.) byla zaznamenána maximální oblast difuze chromu do základního materiálu v rozmezí cca 5 až 10 μm . V této oblasti klesá množství karbidických sloučenin a zásadně roste podíl Fe.

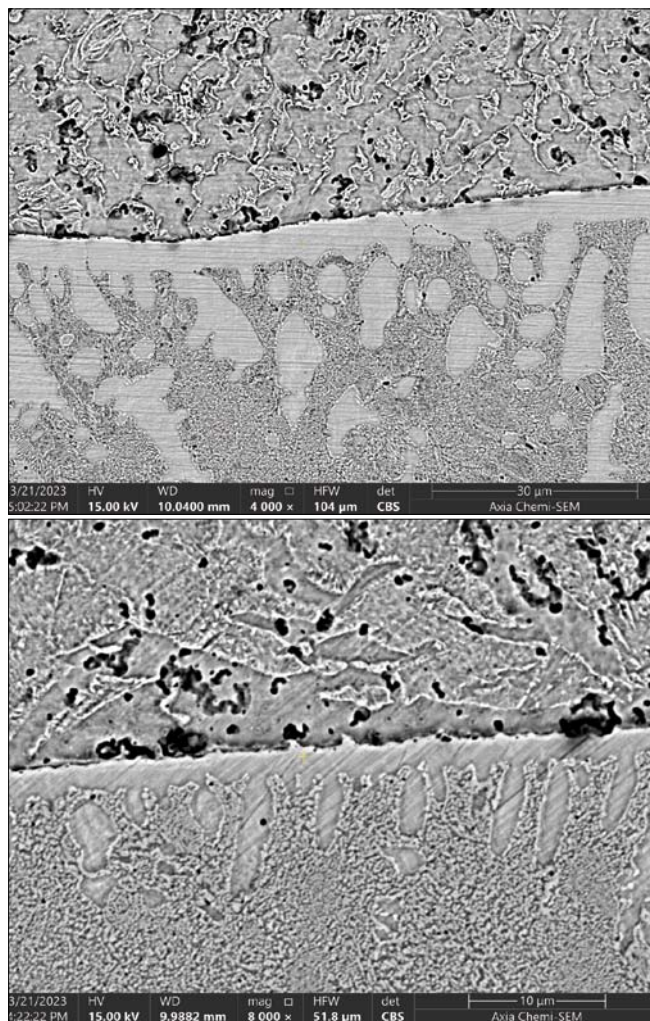
Při použití vyšší proudové hodnoty během navařování dochází k většímu promísení nejen svarového kovu, ale rovněž bylo zaznamenáno zvýšené množství chromu v podpo- vrchové vrstvě.

Při použití vyššího proudu při navařování dochází k mnohem vyššímu rozptýlení karbidů v základní kovové matrici a je potlačen proces dendritického uspořádání. Tyto karbidy tvoří nehomogenní směs, kdy během opotřebení může docházet k jejich vytrhávání ze základní kovové matrice. Tímto se jednoznačně snižuje mechanická odolnost vůči abrazivnímu opotřebení, což zcela potvrdily i výsledky na brusném plátně.

Ledeburitické návary s využitím dvou vrstev svarového kovu vykazují mnohem vyšší pravidelnost dendritických útvarů, ale především na základě analýzy EDS bylo prokázáno rovnoměrné chemické složení daného svarového kovu. Zvýšené množství chromu bylo pozorováno v oblasti cca 3 μm nad základním materiálem.

V procesu navařování vzorků s proudovou zátěží 110 A byly zaznamenány i některé vady v podobě bublin v podpo- vrchové vrstvě (obr. 4.). I právě z tohoto důvodu je krajní hodnota využití maximálního proudu nevhodná.

Obr. 3. Jednovrstvé ledeburitické návary: přechodová oblast pro proud 70 A (nahore) a 110 A (dole)



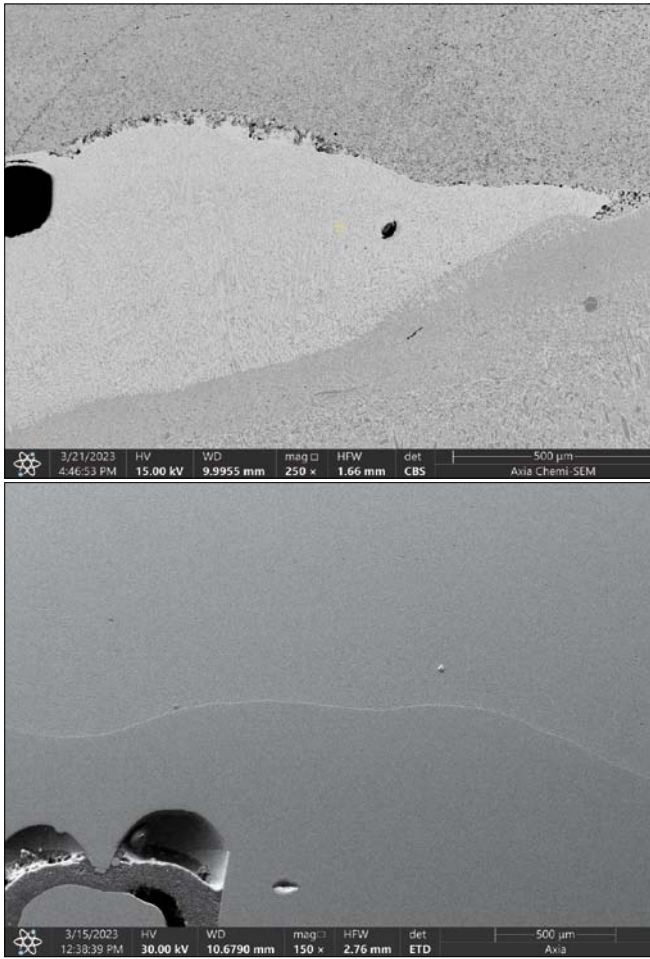
Analýza promísení svarových kovů martenzitického typu

Tvrdokovové návary na bázi martenzitického typu využívají principu přesyceného tuhého uhlíku v základní atomové mřížce alfa. Jejich tvrdost je výrazně nižší než u ledeburitického typu, jelikož v základní kovové matrici nejsou v takové míře zastoupeny karbidy legujících prvků. Při analýze jednovrstvých návarů byl pozorován rovnoměrný rozptyl legujících prvků do základní kovové matrice.

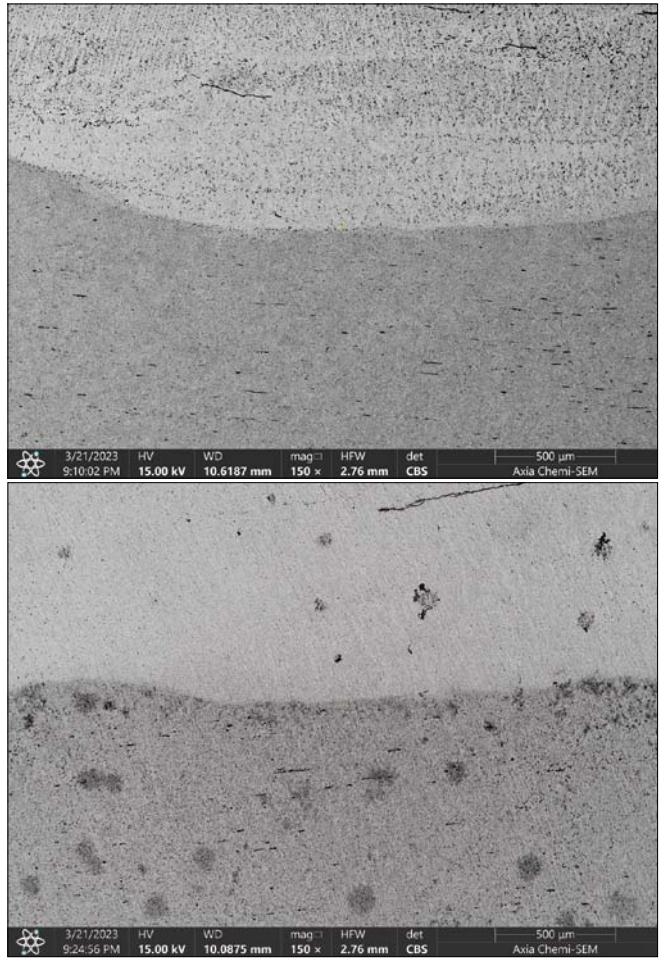
Jednovrstvé martenzitické návary, které byly zhotoveny s proudovou zátěží 110 A jsou do značné míry ovlivněny ředěním ze základního kovu. Toto bylo rovněž prokázáno u abrazivních zkoušek opotřebení, ve kterých tyto vzorky vykazovaly nejvyšší opotřebení. Korelace byla rovněž zaznamenána s hodnotami mikrotvrdomosti $HV_{0,1}$. Při využití maximálního svařovacího proudu je ředění základních prvků značné. Dle chemického složení má obsahovat návarový systém cca 10 % Cr. Dle prvkové mapy se ovšem tento prvek vyskytuje ve spodní části s maximální hodnotou do 5 %.

Dvouvrstvé tvrdokovové martenzitické návary tvoří mnohem více homogenní svarový kov než návary jednovrstvé. V přechodové oblasti svarových kovů je dobře patrná rozdílná orientace primárních jehlic martenzitické struktury, což ale nijak neovlivňuje výslednou tvrdost navařeného kovu.

Obr. 4. Podpovrchové vady svarového kovu



Obr. 5. Trhliny ve svarovém kovu dvouvrstvých návarů 110 A



Jak již bylo uvedeno v předchozí části, proudová hodnota 110 A značně zvyšuje ředění svarového kovu se základním materiálem, ale při využití těchto parametrů rovněž hrozí vznik nehomogenit a vad svarového kovu. To se projevilo i u části vzorků, u kterých se především na povrchu i v podpovrchových oblastech vyskytovaly trhliny (obr. 5.).

Na základě analýzy prvkového složení linie v průřezu celého návaru lze konstatovat nárůst karbidotvorných prvků především v rozhraní jednotlivých svarových housenek. Z tohoto důvodu je tedy vhodné aplikovat více návarů s menší proudovou zátěží pro eliminaci ředění svarového kovu.

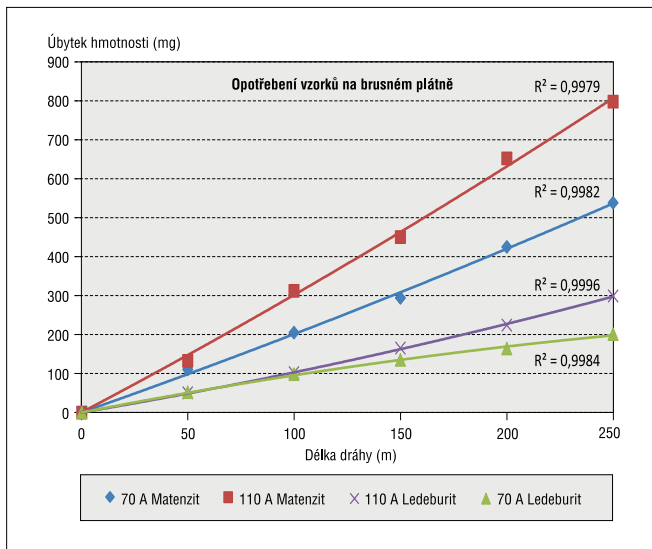
Hodnocení abrazivní odolnosti na brusném plátně

Na základě provedeného testu lze jednoznačně konstatovat vyšší abrazivní opotřebení u vzorků při použití proudu 110 A. Tyto výsledky byly zaznamenány jak u návarů s martenzitickou, tak i karbidickou (ledeburitickou) strukturou.

Jak je patrné z obr. 6., nejsou hmotnostní úbytky lineární. Jednotlivé body jsou proloženy polynomem druhého stupně. Nejmenší úbytky jsou v první fázi zkoušky. Tyto výsledky korelují s naměřenými hodnotami tvrdosti, kde povrch svarového kovu s minimální proudovou zátěží (70 A) vykazoval vždy největší hodnoty tvrdosti. Směrem k základnímu materiálu tvrdost svarového kovu klesá, což se projevilo ve vyšší míře hmotnostního úbytku především v závěru abrazivního testu. Tento aspekt byl potvrzen i dle metody EDS, kde směrem k základnímu materiálu výrazně klesal procentuální podíl nejen uhlíku, ale především karbidotvorných prvků. Z tohoto důvodu byly zastoupeny v základní kovové hmotě pouze základní strukturální fáze.

Hmotnostní úbytky u dvouvrstvých návarových systémů vykazovaly mnohem vyšší rovnoměrnost opotřebení než u systémů jednouvrstvých. Nejvyšší hmotnostní úbytky byly zaznamenány

Obr. 6. Analýza hmotnostních úbytků – jedna vrstva



opět u vzorků, kde byl použit svařovací proud 110 A. Je to zřejmý důsledek promísení svarové lázně se základním materiálem. Dle obr. 7. je však zřejmé, že oba systémy mají obdobný charakter opotřebení. Jedná se především o nižší hmotnostní úbytky ke konci abrazivního testu. Důvodem je právě překrytí svarových kovů, které zaručuje optimální chemické složení pro tvorbu strukturních fází na bázi karbidů chromu, molybdenu i železa.

Závěr

Aplikace tvrdokovových návarů patří mezi základní možnosti renovace strojní součásti určené do prostředí se zvýšenými nároky na odolnost vůči mechanickému opotřebení. Lze konstatovat, že využití tvrdokovových návarů je efektivnější než tepelné zpracování celé strojní součásti. Důvodem je úspora materiálu s vysokým podílem legujících prvků, ale především možnost kombinací více materiálů s rozličným chemickým složením, a tedy i jinými mechanickými vlastnostmi.

Analýza připravených tvrdokovových materiálů jednoznačně potvrdila vliv legujících prvků na výsledné mechanické vlastnosti svarového kovu. Byly testovány jak ledeburitické, tak martenzitické návary s rozdílnými parametry vstupního proudu. V závislosti na parametrech svařovacího procesu se mění nejen obsah chromu a uhlíku v základní kovové hmotě, ale především je ovlivňováno rozložení legujících prvků v matici a morfologie jednotlivých strukturních fází. Na základě metalografických výbrusů, byla prokázána nejen změna morfologie, ale rovněž také byly zaznamenány rozdílné hodnoty mikrotvrdosti v určitých oblastech svarové housenky. Nejlepší výsledky vykazovaly ledeburitické dvouvrstvé návary s proudovou zátěží 70 A. Dendrity ve svarovém kovu byly rovnoměrně uspořádány a dle prvkových map docházelo k rovnoměrnému podílu rozmístění jednotlivých legujících prvků v průřezu celé housenky. Na základě výsledků abrazivních testů na brusném plátně je zřejmé, že návar vytvořený rovnoměrně rozloženými karbidy bohatými na chrom a molybden představuje mnohem vyšší odolnost proti abrazivnímu opotřebení než pouze martenzitická struktura. Základním parametrem pro uspořádání a morfologii karbidů v kovové matici je proudová zátěž při které byla svarová housenka aplikována na základní materiál. Jednoznačně byl potvrzen vliv svařovacího proudu na promísení se základním materiálem. Jednovrstvé martenzitické návary vykazovaly nejnižší odolnost vůči abrazivnímu opotřebení a zároveň i nejvyšší rozptyl mikrotvrdostí ve svarovém kovu. U dvouvrstvých návarových systémů se sice chemické složení druhé vrstvy částečně stabilizovalo, ale rovněž lze konstatovat krajní hranici svařovacího proudu 110 A za nevhodnou.

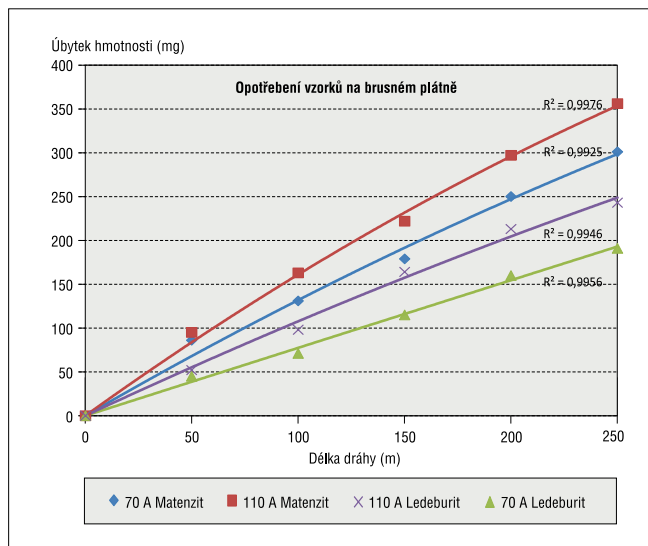
Tento příspěvek byl vytvořen s podporou projektu ZETOR (EG15_019/0004799 – ZETOR TRACTORS, a. s.) – Optimální agregace strojů s traktorem.

Souhrn

Cukrová řepa patří mezi tradiční plodiny, které mají i v současné době značný ekonomický potenciál. Stroje využívané nejen pro její sklizeň, ale rovněž i manipulaci jsou ovšem zatíženy značným abrazivním a erozivním opotřebením funkčních částí. Důvodem je především technologický proces sklizně a manipulace nejen s řepnými bulvami, ale také s vysokým podílem rostlinných zbytků a půdních frakcí.

Cílem předloženého experimentu je vyhodnotit vhodné parametry

Obr. 7. Analýza hmotnostních úbytků – dvě vrstvy



navarovacího proudu, pro vytvoření optimálních strukturních fází, které maximálně odolávají abrazivnímu opotřebení. Zásadním faktorem je vliv promísení svarového kovu a vznik karbidických sloučenin, odolných vůči zvýšenému mechanickému namáhání. Metodický postup zahrnuje přípravu vzorků z tvrdokovových elektrod ledeburitického a martenzitického typu a jejich následnou analýzu pomocí elektronové a světelné mikroskopie. Pro získání přesných výsledků se budou využívat moderní metody obrazové analýzy, které umožní stanovení chemického složení a množství karbidů v návarech. Výsledky ukazují, že promísení svarového kovu má vliv nejen na tvorbu karbidů, ale také na vznik samotné kovové matrice, kde jsou karbidické sloučeniny uloženy. Tato matrice rovněž do značné míry ovlivňuje odolnost proti opotřebení, jelikož v důsledku nevhodného chemického složení dochází k vytrhávání karbidů přímo z jejich kotvícího profilu. Kvalita návaru je analyzována rovněž pomocí mikrotvrdosti strukturních fází i na základě abrazivního opotřebení na brusném plátně.

Na základě získaných výsledků lze tedy doporučit nejen vhodné tvrdokovové materiály pro aplikaci na opotřebované součásti, ale rovněž také i vstupní parametry svařovacího proudu.

Klíčová slova: abrazivní opotřebení, tvrdonávar, strukturní fáze, tvrdost, promísení svarového kovu, stroje pro sklizeň cukrové řepy.

Literatura

- 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.
- BAHOOSH, M.; SHAHVERDI, H. R.; FARNIA, A.: Abrasive Wear Behavior and Its Relation with the Macro-indentation Fracture Toughness of an Fe-Based Super-Hard Hardfacing Deposit. *Tribology letters*, 67, 2019, (3), s. 1–14.
- CORONADO, J. J.; CAICEDO, H. F.; GÓMEZ, A.: The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits. *Tribology international*, 42, 2009, (5), s. 745–749.
- VOTAVA, J. ET AL.: Využití tvrdokovových návarů u sklízečů cukrové řepy. *Listy cukrov. řepář.*, 135, 2019, (9–10), s. 297–302.
- KOTUS, M.; POULÍČEK, T.; HOLOTA, T.: Resistance of Coated Electrodes Applicable for the Renovation of Tillage Tools. *J. Cent. Eur. Agric.*, 14, 2013, (4), s. 1295–1302.
- SRIKARUM, B. ET AL.: Influence of Different Welding Processes on Microstructure, Hardness, and Wear Behavior of Martensitic Hardfaced Cladding. *J. Mater. Eng. Perform.*, 30, 2021, (12), s. 8984–8995.

7. JILLEH, A. ET AL.: Microstructural and wear investigation of high chromium white cast iron hardfacing alloys deposited on carbon steel. *Journal of alloys and compounds*, 857, 2021, 157472
8. 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.
9. 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.
10. VOTAVA, J. ET AL.: Využití tvrdokovu pro omezení abrazivního opotřebení pasivních částí u sklízečů cukrové řepy. *Listy cukrov. řepář.*, 136, 2020 (9–10), s. 313–317.

Votava J., Polcar A., Kumbár V.: Increasing Abrasion Resistance of Sugar Beet Handling Machines Using Multi-Layered Coating

Sugar beet is one of the traditional crops that still have considerable economic potential. However, the machinery used not only for harvesting but also for its handling is subject to considerable abrasive and erosive wear of functional parts. This is mainly due to the technological process of harvesting and handling not only the beet tubers but also the high proportion of crop residues and soil fractions.

The aim of the presented experiment is to evaluate the appropriate welding current parameters in order to create optimal structural phases that maximally resist abrasive wear. A crucial factor is the effect of weld metal mixing and the formation of carbide compounds resistant to increased mechanical stress. The methodological procedure involves the preparation of samples from carbide electrodes of the ideburitic and martensitic type and their subsequent analysis by electron and light microscopy. To obtain accurate results, modern methods of image analysis were used to determine the chemical composition and amount of carbides in the coatings. The results show that the mixing of the weld metal affects not only the formation of carbides but also the formation of the metal matrix itself, where the carbide compounds are deposited. This matrix also largely influences the wear resistance, as inappropriate chemical composition results in the carbides being pulled directly out of their anchor profile. The pattern quality is also analysed by means of the microhardness of the structural phases as well as by abrasive wear on the abrasive screen.

Based on the obtained results, it is possible to recommend not only suitable carbide materials for application on worn parts, but also the input parameters of the welding current.

Key words: abrasive wear, carbide, structural phase, hardness, weld metal mixing, sugar beet harvesting machines.

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