

## VLIV TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA ABRAZIVNÍ OPOTŘEBENÍ

J. Votava, M. Černý, J. Filípek

**Došlo: 29. července 2005**

### Abstract

VOTAVA, J., ČERNÝ, M., FILÍPEK, J.: *Influence of heat treatments on the abrasive wear*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2005, LIII, No. 5, pp. 175–186

The particular samples were made of the steel 14 260 and were exposed to following different heat treatments – soft annealing, normalizing, heat refining and hardening. After these heat treatments the samples were exposed both laboratory tests and also field tests. The wear test particles was carried out on the device with abrasive canvas. The laboratory test was realized in room temperature and normal atmospheric pressure. Measured values were statistically and graphically analyzed and interpreted. Results of the tests confirmed our preliminary expectations that the extent of the wear would depend on the value of hardness of the used materials. The hardest structure of the hardened steel had the smallest material decrease compared to the largest decrease of the soft annealing steel.

Tested samples were fixed to a cutting edge of a ploughing aggregate which performed work in previously determined sector area. At intervals of each 400 meters there were measured decreases of weights and surfaces of the samples and consequently were evaluated and graphically interpreted relating abrasive wear of the particular samples. Also in this test the results form previous laborator test were confirmed and the smallest wear had the hardened steel samples.

On the basis of the measured values we can deduce the high importance of the right choice of the adequate material which is able to resist to the wearing process best. This decision will significantly affect not only the length of the service life of the particular parts but also the whole machinery as well as its economic operation.

abrasive wear, tillage, heat treatments, Czech Standard steel 14 260

Na základní prvky strojů působí během provozu řada fyzikálních, chemických či jiných procesů, které vedou ke vzniku poruchy nebo ztráty funkce součástí, tzv. integrální mechanismus poruchy. Ten je obvykle synergickou funkcí všech vlivů, které na elementární prvek strojního celku působí. K základním mechanismům poruch lze přiřadit (HAVLÍČEK, 1989): opotřebení, korozi, únavu materiálu, působení vnějších silových účinků, tepelnou degradaci apod. Vnější projev těchto mechanismů vytváří poškození (defekt) součástí.

K nejmarkantnějším defektům patří:

- **opotřebení** jako nežádoucí změna funkčních rozměrů nebo celkové geometrie (otupení, zadření apod.)
- **koroze** materiálu představující zásadní a nepřipustnou změnu povrchu součástí vytvořené projevem rovnoměrné nebo nerovnoměrné korozní degradace materiálu
- **deformace** vlivem extrémní aktivity vnější silové soustavy působící na součást, která vytváří předpo-

klad mezního stavu plastické deformace, tj. trvalé změny tvaru součástí

- **trhlina a lom** jako výsledek kombinace zatížení a stavu materiálu dávající předpoklady ke konečné fragmentaci prvku strojní soustavy.

V tomto pojednání je prioritní snahou sledovat opotřebení materiálu, které lze v souladu s ČSN 01 5050 rozdělit na: adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové, vibrační a jiné opotřebení.

Příprava a zpracování půdy v zemědělství vytváří podmínky především pro abrazivní opotřebení (NEUBAUER, 1987). To je charakterizováno separací částic povrchu při jeho rýhování a řezání tvrdými volnými částicemi. Odolnost proti němu je u různých materiálů rozdílná (BLÁŠKOVÍČ et al., 1987). U tepelně nezpracovaných ocelových i litinových materiálů je

přímo úměrná přirozené tvrdosti. U tepelně zpracovaných konstrukčních materiálů se projeví v odolnosti proti abrazivnímu opotřebení i chemické složení materiálů a jejich struktura. Tímto směrem je orientován i experiment v předkládané práci, jejímž cílem je souhrnně zhodnotit chování tepelně zpracované pružinové oceli 14 260 v podmínkách půdního opotřebení.

## MATERIÁL A METODY

### Zkušební tělesa

Zkušební tělesa pro provozní i laboratorní zkoušky jsou vyrobená z pásové oceli 40 x 6 ČSN 42 5342 – 14 260.3. Křemíkchromová ocel 14 260 (dle ČSN EN 10027-1 ocel 54SiCr6) byla zvolena z důvodu dostatečné zakalitelnosti a prokalitelnosti. Směrné chemické složení oceli dle ČSN 41 4260 je uvedeno v Tab. I.

I: Chemické složení pružinové oceli 14 260

C	Mn	Si	Cr	Ni <sub>max</sub>	Cu <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>
0,50	0,50	1,30	0,50	0,50	0,30	0,035	0,035
0,60	0,80	1,60	0,70				

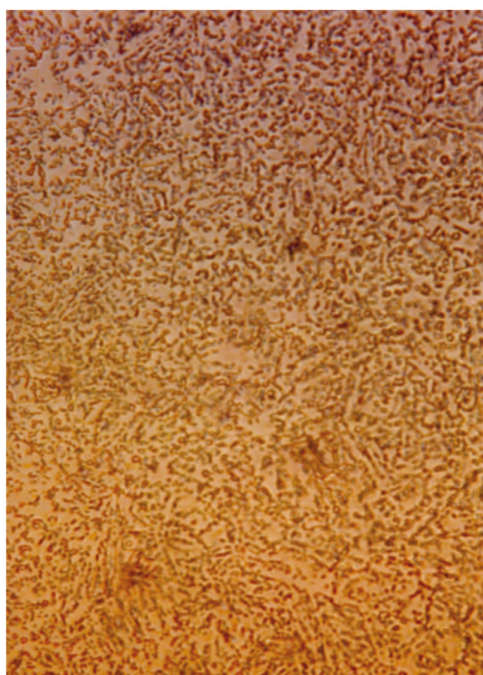
Zkušební tělesa **pro orební zkoušky** byla nařezána z pásové oceli na délku 77 mm a následovalo vyvrtání otvoru o průměru 10 mm. Každý vzorek se obrousil ze všech stran na rovinné brusce s minimálním úběrem materiálu. Pak se provedlo nanášení ochranné vrstvy KALSEN (SVÚM Praha) a tepelné zpracování v ochranné atmosféře (Tab. II). Získaná výsledná struktura je znázorněna na Obr. 1. Po tepelném

zpracování byly vzorky opět obroušeny ze všech stran o 0,5 mm (odstranění oduhličené vrstvy) s drsností Ra = 0,4 μm. Na závěr se na vzorcích vyznačilo 24 měřicích bodů pro stanovení úbytku tloušťky (Obr. 2).

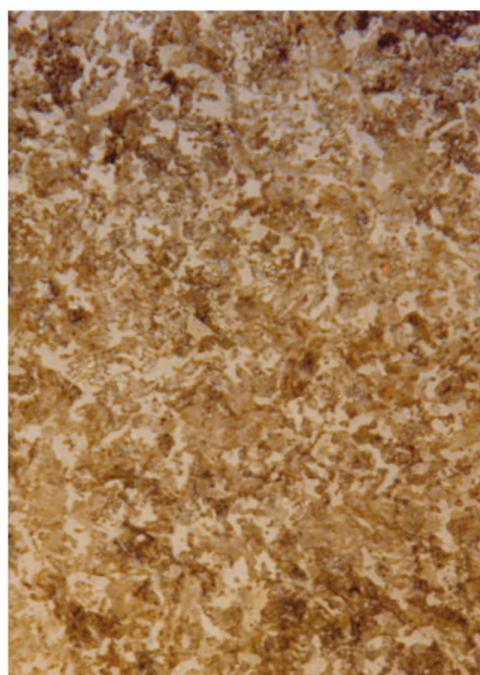
Ke zkouškám **na brusném plátně** byla zhotovena tepelně zpracovaná zkušební tělíska o rozměrech 10 x 10 x 10 mm.

II: Tepelné zpracování oceli 14 260

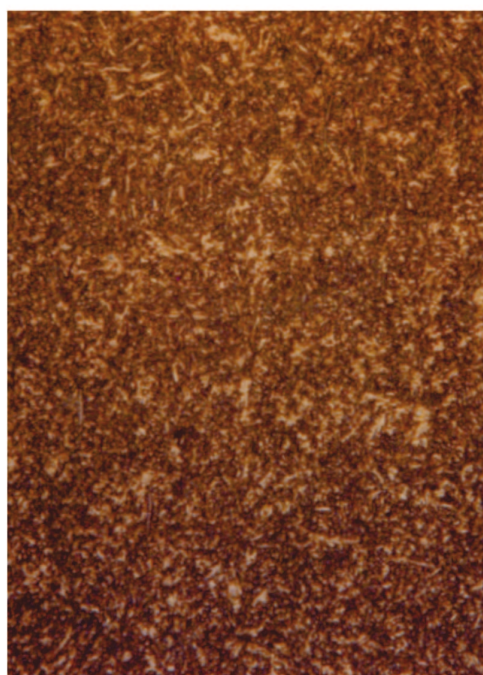
Tepelné zpracování	Ohřev (°C)	Výdrž (min)	Ochlazení	Tvrdost HV	Struktura
žihání na měkko	dodáno z válcoven			190	ferit + globulární perlit
žihání normalizační	870 ± 20	40	vzduch	240	ferit + lamelární perlit
zušlechťení	850 ± 20 500 ± 20	30 40	olej vzduch	399	sorbit
kalení	850 ± 20	30	olej	629	martenzit + (zbyt. austenit)



Žiháno na měkko



Žiháno normalizačně

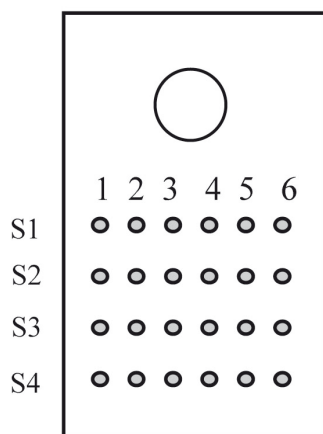


Zušlechtěno



Kaleno





2: Zkušební vzorek s kontrolními body

### Zkoušky abrazivního opotřebení

Pro experimentální část byly zvoleny dvě metody abrazivního opotřebení:

- laboratorní zkouška na brusném plátně dle ČSN 01 5084
- provozní orební zkouška.

#### **Laboratorní zkouška na brusném plátně**

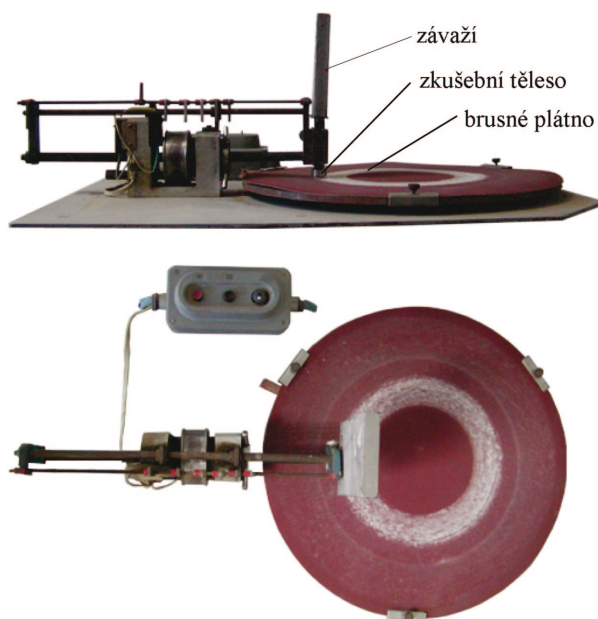
Zkušební přístroj s brusným plátnem (Obr. 3) je tvořen rovnoměrně se otáčející vodorovnou kruhovou deskou, na kterou se upevňuje korundové brusné plátno o zrnitosti 120. Zkušební těleso o rozměrech 10 x 10 x 10 mm je drženo upínací hlavicí a tlačeno závažím k brusnému plátnu měrným tlakem

0,32 MPa. Testované těleso je během zkoušky posouváno od středu ke kraji brusného plátna a částí svého povrchu neustále přichází do styku s čerstvým abrazivem. Po uplynutí dráhy v délce 50 m jsou vzorky očištěny a následným vážením na elektronických vahách je zjištěn hmotnostní úbytek s přesností 0,001 g. Jakmile délka dráhy dosáhne 250 m, je stávající brusné plátno nahrazeno plátnem novým. Kritériem odolnosti proti abrazivnímu opotřebení je poměr objemových úbytků etalonu z vyžíhané oceli 12 014 o tvrdosti HV = 100±5 a objemových úbytků vzorků zkoušených materiálů na třecí dráze 50 m.

#### **Provozní zkoušky opotřebení**

Pro zkoušky byl použit šestiradičkový polonesený pluh B 201 s hydraulickým jištěním orebních těles. Pluh pracoval v soustavě s traktorem Zetor 162 45. Orební souprava (Obr. 4) byla nasazena na pozemcích s abrazivní hlinitopísčitou půdou v zemědělském podniku Farma Nedvězí.

Testováno bylo 24 zkušebních vzorků o rozměrech 75 x 38 x 5 mm. Byly vytvořeny čtyři série po šesti vzorcích tak, aby v každé sérii byly zastoupeny všechny způsoby tepelného zpracování (Tab. II). Před zahájením zkoušky byly všechny vzorky zváženy s přesností 0,001 g a pomocí upraveného posuvného měřidla se změřila jejich tloušťka v kontrolních bodech (přesnost 0,02 mm). Vzorky byly uchyceny šroubem M 10 x 30 k provrtané plužní čepeli (Obr. 5). Housenky navařené na plužní čepel zabraňovaly otočení vzorku. Vlastní čepel se připevnila na slupici orebního tělesa pomocí šroubů se zapuštěnou kuželovou hlavou.



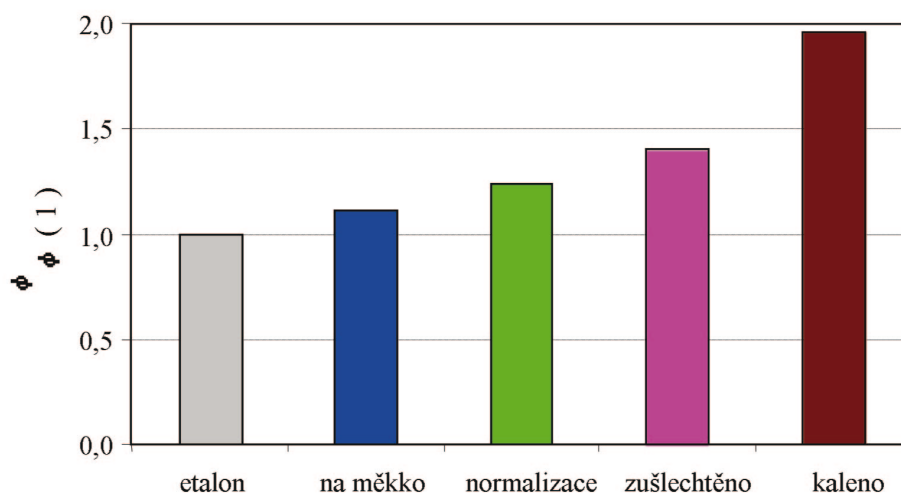
3: Zkouška abrazivního opotřebení na brusném plátně



4: Orební souprava



5: Plužní čepel se zkušebním vzorkem kaleno



6: Relativní odolnost oceli proti abrazi na brusném plátně

Úbytek hmotnosti a tloušťky opotřebením byl zjišťován vždy po 400 m zorané brázdy. Hmotnostní úbytky byly vypočteny pomocí vztahu:

$$\Delta G_i = G_1 - G_i$$

kde:

$\Delta G_i$  – úbytek hmotnosti vzorku při i-tém měření

$G_1$  – hmotnost nového vzorku

$G_i$  – hmotnost vzorku při i-tém měření.

Úbytky tloušťky vzorku byly určeny podle vztahu:

$$\Delta h_{ij} = h_{1j} - h_{ij}$$

kde:

$\Delta h_{ij}$  – úbytek tloušťky vzorku při i-tém měření v j-tém místě

$h_{1j}$  – tloušťka nového vzorku v j-tém místě

$h_{ij}$  – tloušťka vzorku při i-tém měření v j-tém místě

$j = 1 \div 24$ .

Abychom zajistili stejné pracovní podmínky, byl po každém měření vzorek posunut o jedno orební těleso.

Po zorání brázdy o délce 2400 m byl každý vzorek umístěn na každém orebním tělese.

## VÝSLEDKY

### Měření tvrdosti

Naměřené hodnoty tvrdosti jsou závislé na druhu tepelného zpracování (Tab. II). Nejměkčí jsou původní vzorky žíhané na měkko se strukturou feritu a globulárního perlitu, které vykazují tvrdost 190 HV. Tepelným zpracováním se tvrdost podstatně zvýšila (normalizační žíhání – 240 HV, zušlechťení – 399 HV, kalení 629 HV). Tzn., že tvrdost kalených vzorků je 3,3krát větší než u vzorků žíhaných na měkko. Už na první pohled lze předpokládat, že kalený vzorek převážně s martenzitickou strukturou bude mít nejmenší abrazivní opotřebení.

### Opotřebení na brusném plátně

Hmotnostní úbytky vzorků na brusném plátně na dráze 50 m jsou zřejmé z Tab. III. Relativní odolnost proti abrazivnímu opotřebení vzhledem k etalonu se zvyšuje v pořadí žíhání na měkko, žíhání normalizační, zušlechťení a kalení (Obr. 6).

III: Opotřebení na brusném plátně (mg) – ČSN 01 5084

Číslo měření	Etalon 12014.21	Ocel 14 260			
		Na měkko	Normalizace	Zušlechtěno	Kaleno
1	204	189	179	163	110
2	252	213	204	171	123
3	254	220	182	168	122
4	228	208	200	167	119
5	235	224	185	170	126
<b>Průměr</b>	<b>235</b>	<b>211</b>	<b>190</b>	<b>168</b>	<b>120</b>
<b>Pravděp. chyba</b>	6	4	4	1	2

### Opotřebení orební zkouškou

Z Obr. 7 je zřejmé, že existuje přímá úměrnost mezi velikostí opotřebení a délkou zorané brázdy. Největší abrazivní opotřebení dosáhly vzorky žíhané na měkko. Na vzdálenosti 2400 m činí průměrné opotřebení 29,48 g, což představuje 29,1 % počáteční hmotnosti vzorku. Nejmenší abrazivní ztráty vykazují vzorky kalené – 11,83 g (12,08 % z původní hmotnosti vzorku).

Různým zatížením a třecí dráhou částic se zkoumaný povrch opotřebovává nerovnoměrně. U všech zkušebních vzorků bez ohledu na tepelné zpracování je největší opotřebení v dolní části. Z Obr. 8 je zřejmé, že po 2400 m orby je největší úbytek tloušťky u vzorků žíhaných na měkko, naopak nejmenší u zakalených.

### DISKUSE

Experimentální část obou dílčích měření prokázala vliv tepelného zpracování na degradační proces abrazivního opotřebení. Výsledky provozních zkoušek potvrdily, že průměrné hmotnostní úbytky oceli posuzované t-testem ( $\alpha = 0,05$ ) mezi jednotlivými způsoby tepelného zpracování jsou statisticky významné. Páry spolehlivosti střední hodnoty (Obr. 9) se částečně prolínají pouze u vzorků žíhaných.

Odolnost proti opotřebení na brusném plátně (ČSN 01 5084) i při orební zkoušce do značné míry závisí na tvrdosti (Obr. 10). Nejedná se ovšem o přímou úměru (Obr. 11). Zatímco kalením se zvýšila tvrdost vzorku žíhaného na měkko 3,3krát, poměrná odolnost proti opotřebení při orební zkoušce vzrostla 2,5krát a na brusném plátně jen 1,8krát (Obr. 11).

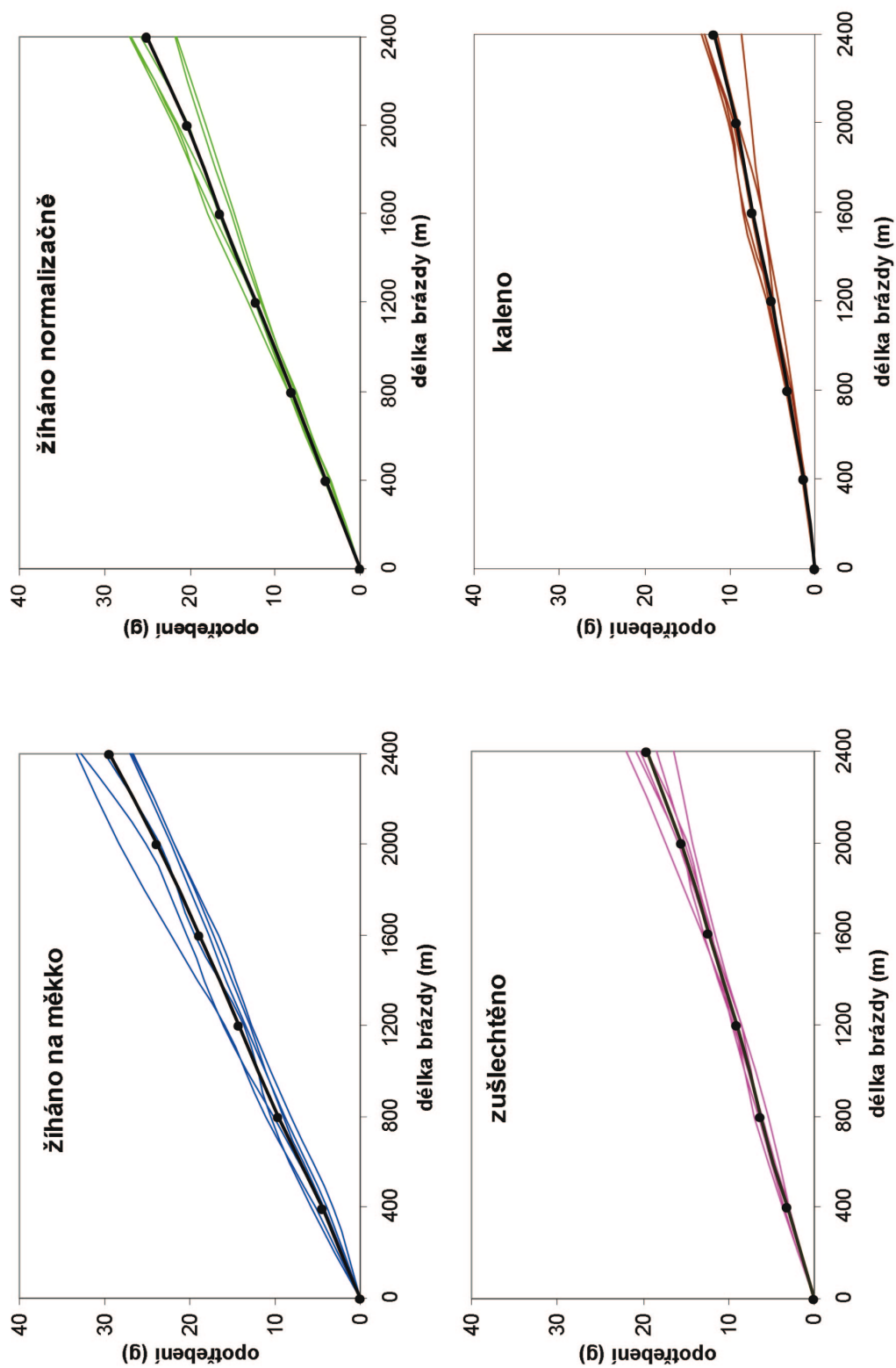
Vhodné tepelné zpracování je jedním ze základních požadavků na bezporuchovou funkci strojního zařízení. Vystává otázka, kterým směrem se orientovat při volbě správné struktury pro plužní čepele a jiné prvky pracující v půdě. U těchto součástí nelze klást

jediný důraz na enormní tvrdost (z důvodu minimalizace abraze), ale je zapotřebí volit kompromis mezi tvrdostí a houževnatostí. Tyto dva aspekty musíme zohlednit především proto, že plužní čepel není vystavena pouze statickému namáhání, ale přistupuje zde řada dalších faktorů jako např. vibrace, rázy apod.

Nejlépe abrazivnímu opotřebení odolává ocel kalená s velmi tvrdou martenzitickou strukturou (deskový, resp. jehlicový martenzit). Vliv na tuto strukturu má především fakt, že při prudkém ochlazení nastává pouze přeměna mřížky tuhého roztoku  $\gamma$  (austenit) v martenzit. Uhlík násilně uzavřený v mřížce železa  $\alpha$  vyvolává vysoké vnitřní pnutí, což se projeví sice vysokou tvrdostí, ale dochází ke ztrátě houževnatosti, s čímž souvisí velké riziko vzniku štěpného porušení a následné fragmentace tělesa.

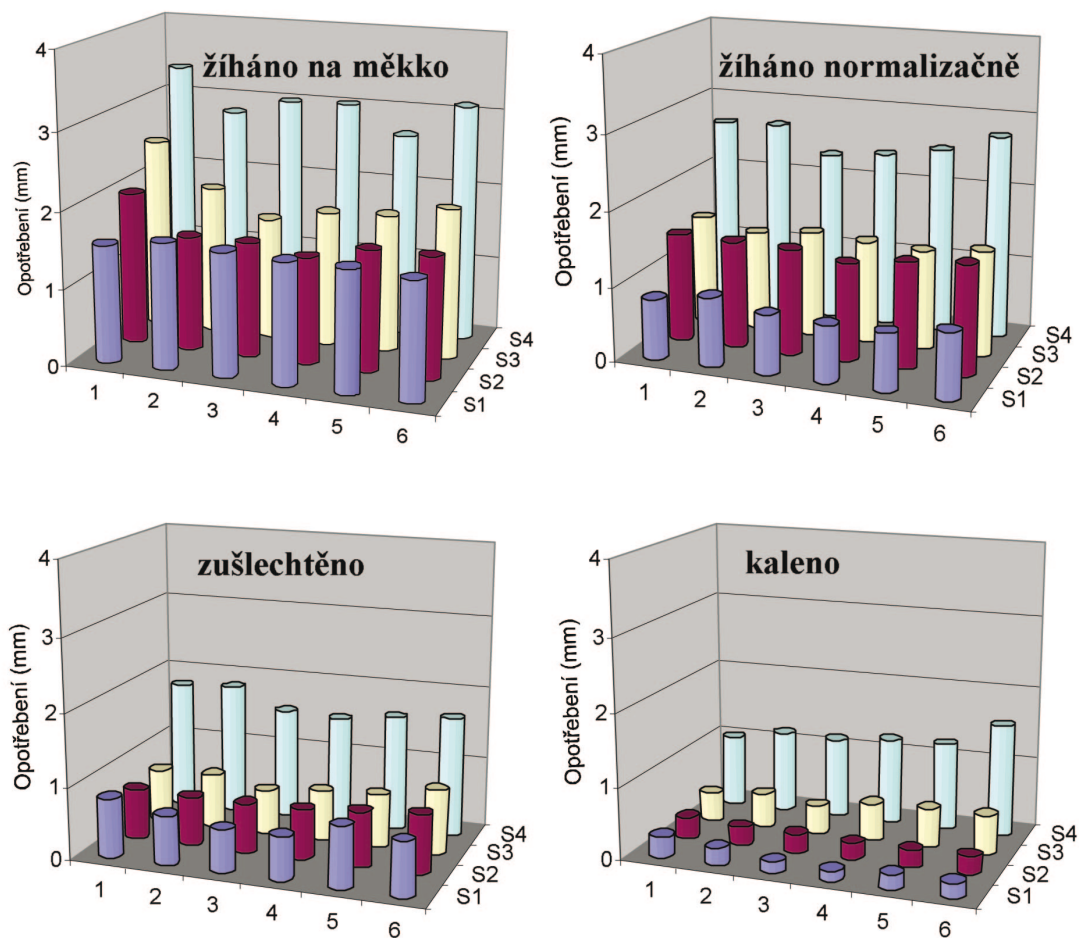
Naopak materiály s vysokou houževnatostí, u kterých je volena feriticko-perlitická struktura, najdou své opodstatnění v kamenitých půdách, v níž hrozí vznik lomu a tudíž znehodnocení celé součásti. Feritická struktura (intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe alfa) odolává abrazivnímu opotřebení velice málo z důvodu nedostatečné tvrdosti. Maximální rozpustnost uhlíku za eutektoidní teploty je pouze 0,018 %, proto při postupném ochlazování dochází k minimálnímu zbytkovému napětí, a tudíž výsledný stav součásti je vysoce houževnatý.

Dostatečnou houževnatostí se ovšem vyznačuje i sorbitická struktura u vzorků zušlechtěných. Tato struktura s jemným cementitem v základní feritické hmotě by mohla být vhodným kompromisem při volbě tepelného zpracování. Její dostatečná tvrdost spolu s výbornou houževnatostí a malým středním průměrem zrna zaručují spolehlivé pracovní podmínky v půdním prostředí. U masivních součástí lze doporučit i kombinaci zušlechťování s povrchovým kalením.

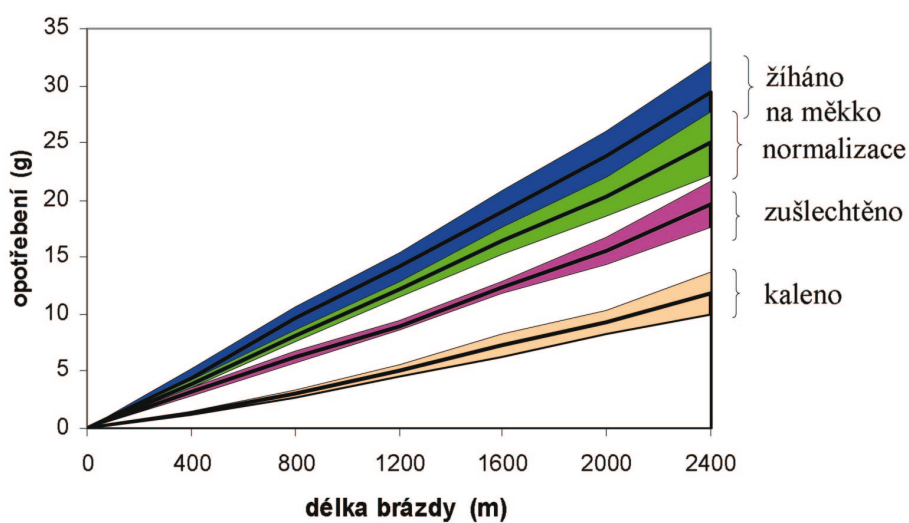


7: Opořebení zkušebních vzorků v provozních podmínkách

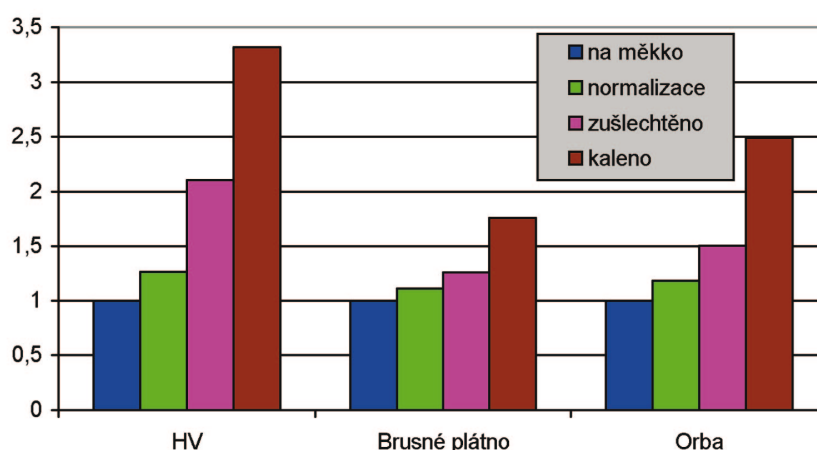




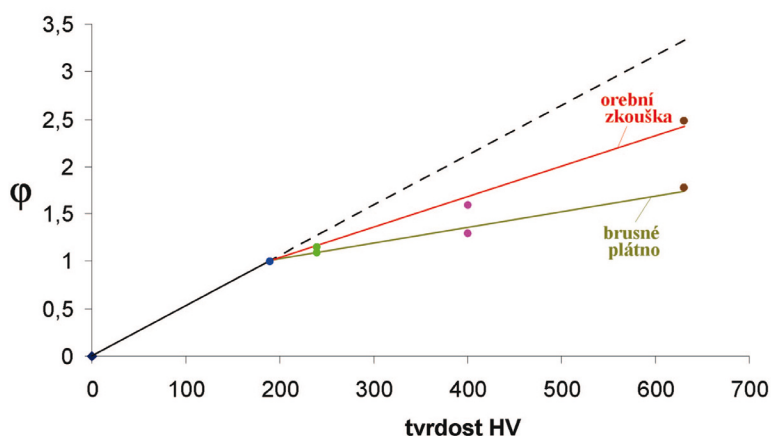
8: Úbytky tloušťky tepelně zpracovaných vzorků po 2 400 m orby



9: Pásky spolehlivosti (95 %) střední hodnoty



10: Relativní tvrdost a odolnost proti abrazivnímu opotřebení

11: Závislost poměrné odolnosti proti opotřebení  $\phi$  na tvrdosti tepelně zpracované oceli

Veškeré způsoby zpracování pudy se vyznačují společným faktorem, a to pohybem tělesa v puditě.

A právě tento aspekt bude mít vždy za následek výrazné abrazivní opotřebení strojních součástí.

## SOUHRN

Diskutované výsledky experimentálních prací jednoznačně potvrdily, že odolnost materiálu pracovního tělesa je funkcí převážně jeho tvrdosti. Tento závěr potvrzuje shoda výsledků z pracovního experimentu v puditě s výsledky provedenými na brusném plátně dle ČSN 01 5084. Tzn., že největší tvrdost a nejmenší opotřebení byly zjištěny u vzorku, který byl zakalen, zatímco u vzorku žíhaného na měkko je opotřebení v obou případech největší. Úbytky tloušťky jsou i z hlediska vizuálního pozorování kumulovány do spodní části vzorku, tj. místa, kde naráží volné částice pudního abraziva. Tímto dochází k významnému rýhování a tím i značnému úbytku materiálu.

Předkládaná práce potvrzuje vliv strukturního složení oceli (v závislosti na jeho tepelném zpracování) na odolnost proti abrazi. Z uvedeného plyne mimořádná důležitost volby materiálu a jeho následné strukturní modifikace jako funkce hodnoty degradačního procesu v konkrétním pudním prostředí.

Rozhodnutí ovlivňuje nejen predikci životnosti součástí, ale i celého zařízení z hlediska ekonomického hodnocení jeho provozu.

abrazivní opotřebení, orba, tepelné zpracování, ocel

#### LITERATURA

- HAVLÍČEK, J. a kol.: *Provozní spolehlivost strojů*. SZN Praha, 1989. 610 s., ISBN 80-209-0029-2.
- NEUBAUER, K. a kol.: *Stroje pro rostlinnou výrobu*. SZN Praha, 1987. 720 s., ISBN 80-209-0075-6.
- BLÁŠKOVIC, P. BALLA, J. DZIMKO, M.: *Tribológiá*. ALFA Bratislava, 1990. 360 s., ISBN 80-05-006330.
- PLUHAR, J. a kol.: *Nauka o materiálu*. SNTL Praha, 1989. 522 s.
- JECH, J.: *Tepelné zpracování oceli*. SNTL Praha, 1977. 400 s.
- ČSN 01 5084: Stanovení odolnosti kovových materiálů proti opotřebení na brusném plátně.
- ČSN 01 5050: Opotřebení materiálu – názvosloví.

#### Adresa

Ing. Jiří Votava, Doc. Ing. Michal Černý, CSc., Doc. Ing. Josef Filípek, CSc., Ústav techniky a automobilové dopravy, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika

