

Abrazivní opotřebení ocelových materiálů v kvasném průmyslu

Abrasive Wear of Steel Materials in Fermentation Industry

JIŘÍ VOTAVA

Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno / Mendel University in Brno, Zemědělská 1, 613 00 Brno
e-mail: xvotava@node.mendelu.cz

Votava, J.: Abrazivní opotřebení ocelových materiálů v kvasném průmyslu. Kvasny Prum. 58, 2012, č. 9, s. 264–268.

Strojní zařízení kvasného průmyslu je značně zatěžováno mechanickým opotřebením jednotlivých pohyblivých prvků a korozní degradací. Jedná se především o linky na plnění keglů, lahví, ale i etiketovací stroje. Snahou konstruktérů je tedy nahrazovat klasické oceli korozivzdornými materiály. Cílem příspěvku je porovnat abrazivní odolnost standardně používané oceli C45E s antikorozií ocelí X20Cr13 a X5CrNi 18-10. Testy jsou prováděny na vzorcích, které byly tepelně zpracovány dle doporučení výrobce. Jako etalony slouží tepelně nezpracované vzorky. Abrazivní opotřebení je testováno na zařízeních s pevnými částicemi dle normy ČSN 01 5084. Před samotným testem byl proveden metalografický výbrus jednotlivých vzorků a změřena mikrotvrdost strukturních fází daného materiálu. Pro porovnání bylo provedeno měření i celkové makrotvrdosti metodou HRC.

Votava, J.: Abrasive wear of steel materials in fermentation industry. Kvasny Prum. 58, 2012, No. 9, p. 264–268.

Machine equipment in fermentation industry suffers from the mechanical wear of mobile elements and from the corrosion degradation. Especially concerned are lines for filling kegs and bottles and labelling machines. Thus the effort of technical designers is to replace classic steels by corrosion-proof materials. The aim of this paper is to compare corrosion resistance of standard used steel C45E with the anticorrosion steel X20Cr13 and X5CrNi 18-10. Tests were carried out on samples which were heat treated according to the producer's recommendations. Samples which were non heat treated serve as measurement standards. Abrasive wear was tested using the equipment with solid particles according to the norm ČSN 01 5084. Metallographic scratch pattern of the individual samples was pursued before the test itself, microhardness of structure phases of the material was measured. For comparison, total macrohardness (method HRC) was measured as well.

Votava, J.: Der abrasive Verschleiß der Metallstoffen in der Gärungsindustrie. Kvasny Prum. 58, 2012, Nr. 9, S. 264–268.

Durch den mechanischen Verschleiß von einzelnen beweglichen Elementen und durch die Korrosionsdegradation werden die maschinellen Anlagen in der Gärungsindustrie wesentlich belastet. Vor allem handelt es sich nicht nur um die Fass- und Flaschenabfüllungsanlagen aber auch um die Etikettierungsmaschinen. Die Ersetzung des klassischen Stahles durch den Rostfreistahl ist die Bestrebung von Konstrukteuren. Der Artikel befasst sich dem Vergleich der Abrassionsbeständigkeit des standards angewandten Stahles C45E mit den Rostfreistählen X20Cr13 und X5CrNi 18-10. Die Versuche wurden auf den laut Herstellungsempfehlungen thermisch verarbeitenden Mustern durchgeführt. Als Etalonen wurden die Muster ohne thermischer Verarbeitung angewandt. Die Abrassionsbeständigkeit wurde an einer laut tschechischem Standard ČSN 01 5084 konstruierten Prüfanlage mit den festen Partikeln getestet. Vor dem Test wurde ein metallographischer Schliff einzelner Muster durchgeführt und die Mikrohärtigkeit der Strukturphasen geprüften Materials festgestellt. Zum Vergleich wurde auch durch die HRC Methode die Messung der gesamten Makrohärtigkeit durchgeführt.

Klíčová slova: abrazivní opotřebení, ocel, tvrdost, nerez oceli

Keywords: abrasive wear, steel, hardness, anticorrosion steel

1 ÚVOD

Základním prvkem každé výroby je přeprava materiálů. Pivovarský průmysl není výjimkou. První operací v tomto provozu je příprava a manipulace se sladovým ječmenem. Využití pásových, šnekových i korečkových dopravníků je tedy nezbytné. Jelikož se jedná o pohyb materiálů, hlavní příčinou poruch těchto strojních zařízení způsobuje abrazivní opotřebení pohyblivých i pevných dílů (Blaškovič et al., 1990). Při výrobě sladového šrotu jsou opotřebený převážně válce šrotovníku. Pro přípravu kvalitní „sladové tluče“ se tyto válce musí ostřit (rýhovat) a vždy správně seřadit (Chládek, 2007). Životnost těchto dílů je závislá především na použitém materiálu a jeho tepelném zpracování.

Dalším nepříznivým faktorem je i vysoká vzdušná vlhkost, která urychluje korozní napadení. Tento negativní aspekt se projevuje především u strojních linek v konečné fázi výroby piva. Jedná se o plnění piva do lahví a keglů. V této části výroby jsou kladeny i zvýšené hygienické nároky na samotné strojní zařízení. Vysoká vzdušná vlhkost, kyselé nebo alkalické čisticí prostředky zvyšují mechanický i korozní tlak na celou strojní linku (Zvoníček et al., 1972).

Cílem příspěvku je porovnat abrazivní odolnost běžně používané oceli C45E, která se využívá na vyměnitelné části dopravníků, s abrazivní odolností nerez oceli X20Cr 13 a X5CrNi 18-10. Tyto materiály budou testovány na zařízeních s brusným plátnem dle ČSN 01 5084 (1974).

Mezi hlavní výhody nerez ocelí patří zvýšená odolnost vůči koroznímu tlaku i zachování kvality povrchu. Nízká drsnost povrchu zaručuje odolnost proti vytváření úsad biologického materiálu, který by mohl ohrozit hygienu daného prostředí (Číhal, 1999).

1 INTRODUCTION

Basic condition of any production is transport of material. Brewing industry is not an exemption in this. First stage in brewing operation is preparation of and handling with malted barley; using belt, screw and tray conveyors is necessary. As it is a movement of material, the main reason of defects of the machine works is caused by abrasive wear of fixed and moving machine works (Blaškovič et al., 1990). In malt grist production are grinder rollers most worn parts. In order to prepare a quality malt beating, the rollers have to be sharpened (channelled) and set (Chládek, 2007). Service life of these machine works depends on the material used for its production and its heat treatment.

Further negative effect is high air humidity, which accelerates corrosion attack. This negative effect appears in machine transport lines in the final phase of beer production, where beer is filled to bottles and kegs. In this production part is also place emphasis on hygienic standards of the production equipment. High air humidity, acid or alkaline cleaners increase corrosion pressure on the whole production line (Zvoníček et al., 1972).

The aim of this paper is to compare abrasive resistance of commonly used steel C45E, which is used for the replaceable parts of conveyors, to stainless steel X20Cr 13 and X5CrNi 18-10. These materials will be tested on the equipment with abrasive cloth according to the norm ČSN 01 5084.

To the main advantages of stainless steels belong increased resistance towards corrosion pressures and surface quality preservation. Low surface roughness guarantees resistance to sediments of biological materials, which could endanger hygiene of the environment (Číhal, 1999).

2 MATERIÁL A METODY

Životnost mechanicky namáhaných dílů je dána především použitým materiálem a jeho tepelným zpracováním. Pro pohyblivé mechanismy se doporučuje použít ocel třídy 12 (Řasa, 2007).

V experimentu byla testována ocel C45E a antikorozi oceli X20Cr 13 a X5CrNi 18-10. Jedná se o standardně používané materiály v technické praxi. Tepelné zpracování bylo provedeno dle doporučení výrobce (viz tab. 1). Jako porovnávací etalon slouží tepelně nezpracovaná ocel C45E.

Po tepelném zpracování byl proveden metalografický výbrus a analyzovány strukturní složky. Následovalo měření mikrotvrdosti jednotlivých fází pomocí Hannemanova mikrotvrdoměru. Rovněž bylo provedeno měření makrotvrdosti metodou HRC. Pro porovnání abrazivních vlastností daných materiálů byl proveden test dle ČSN 01 5084.

3 VÝSLEDKY

3.1 Metalografická analýza

Cílem metalografického pozorování je určit kvalitu dané oceli. Jedná se především o čistotu a strukturní složky po tepelném zpracování. Pro tuto analýzu byl použit metalografický mikroskop Neophot 21. Zvětšení struktur je 800x. Metalografické preparáty jsou dále použity k měření mikrotvrdosti.

Čistota materiálu C45E je na vysoké úrovni. Na testovaných výbrusech nebyly shledány žádné siričky ani oxidy z výroby. Jak je patrné na obr. 1, strukturu tepelně nezpracované oceli tvoří směsice feritu a perlitu. Po tepelném zpracování (obr. 2) se razantně zvýší disperzita perlitu. Tento aspekt má zásadní vliv na tvrdost materiálu a rovněž na abrazivní odolnost. Je nutné si ovšem uvědomit, že následkem tepelného zpracování se mění i houževnatost daného materiálu.

2 MATERIAL AND METHODS

Service life of mechanically stressed fitments depends on material used for its production and its heat treatment. There is recommended to use steel of the class 12 for the mobile fitments (Řasa, 2007).

In the experiment, there was tested steel C45E and anticorrosion steels X20Cr 13 and X5CrNi 18-10. These are standardly used materials in technical praxis. Heat treatment was carried out according to the producer's recommendations, see Tab. 1. Non-heat treated steel C45E serves as a measurement standard.

After the heat treatment, metallographic scratch pattern was pursued and the structure elements were analyzed. Afterwards, microhardness of the individual phases by Hanneman's microhardness measurement was carried out as well as measurement of macrohardness by the HRC method. In order to compare the abrasive features of the individual materials, test according to the norm ČSN 01 5084 was carried out.

3 RESULTS

3.1 Metallographic analysis

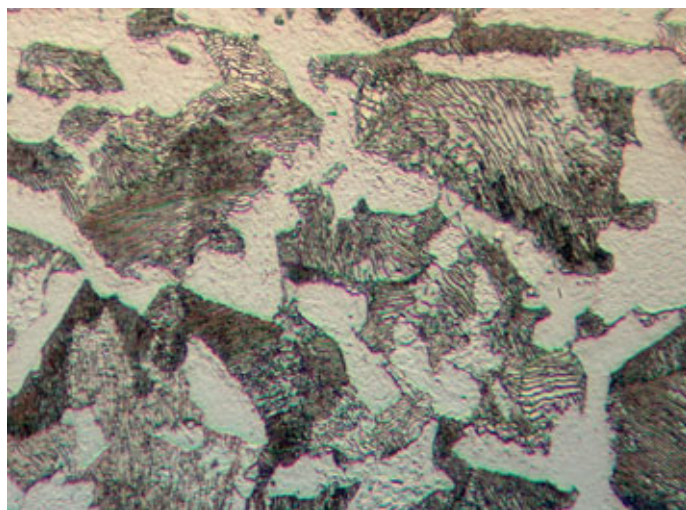
The goal of the metallographic observation is to assess the quality of analyzed steel, especially cleanness and structure elements after heat treatment. Metallographic microscope Neophot 21 was used for this analysis. Magnified 800x. Metallographic specimens are used for microhardness measurements afterwards.

Purity of the material C45E is on a high level. Neither sulphides nor oxides were found in the material. As is apparent from the Fig. 1, structure of not-heat treated steel is formed by a mixture of ferrite and pearlite. After the heat treatment (Fig. 2), the density of pearlite increases rapidly which affects significantly material hardness as well as abrasive tolerance. However, material ductility changes as a result of heat treatment as well.

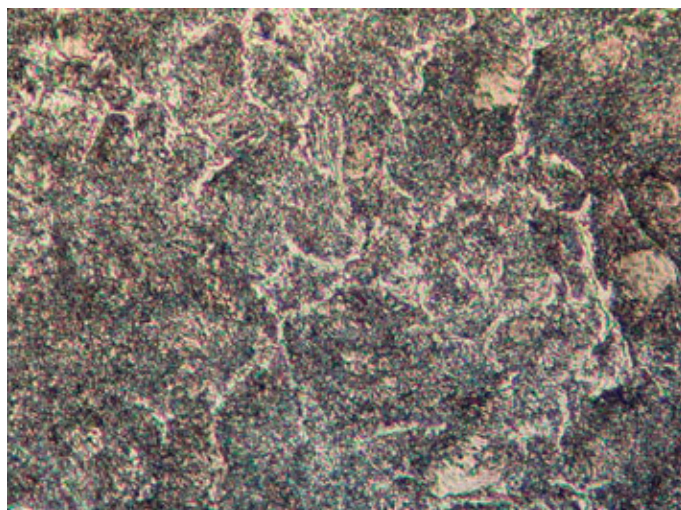
Tab. 1 Tepelné zpracování ocelových vzorků / Heat treatment of steel samples

Použitá ocel / Steel used	Kalení / Quenching			Popouštění / Tempering	
	Austenitizace / Austenitization [°C]	Výdrž / Soaking time [min]	Ochlazovací médium / Coolant	Ohřev / Heating [°C]	Ochlazování médium / Coolant
C45E	800	20	Oil	550	vzduch / air
X20Cr 13	1000	20	Oil	600	vzduch / air
X5CrNi 18-10	Dodáno od výrobce / Delivered by the producer				

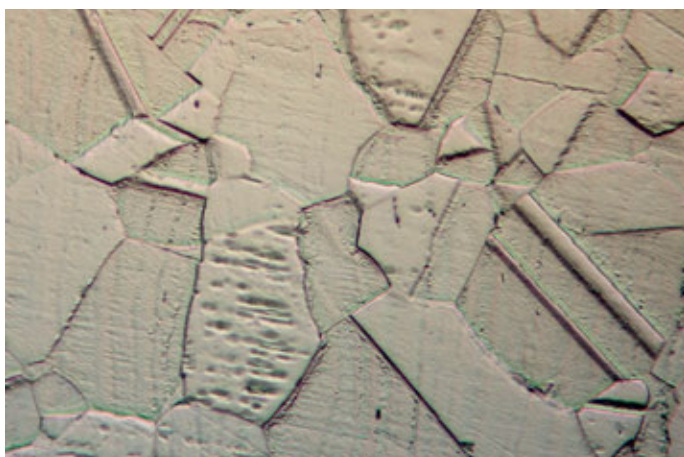
Obr. 1 Ocel C45E bez tepelné úpravy / Fig. 1 Steel C45E without heat treatment



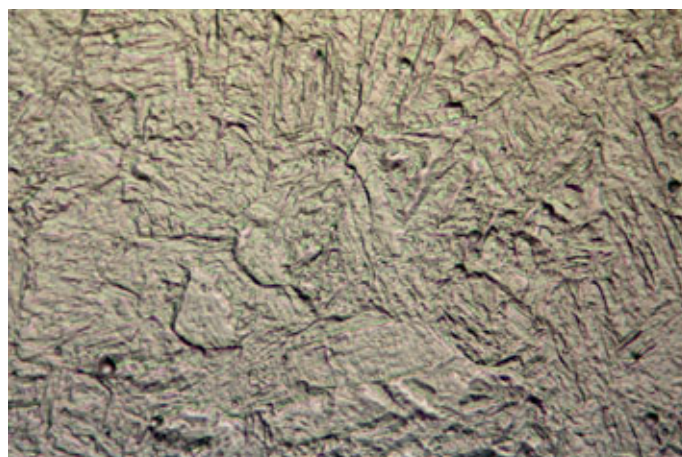
Obr. 2 Ocel C45E kaleno + popouštěno / Fig. 2 Steel C45E quenched + tempered



Obr. 3 Ocel X20CrNi 18-10 od výrobce / Fig. 3 Steel X20CrNi 18-10 from a producer



Obr. 4 Ocel X20 Cr13 kaleno + popuštěno / Fig. 4 Steel X20 Cr13 quenched + tempered



Nerezové oceli třídy 17 můžeme rozdělit do tří kategorií. Jedná se o oceli austenitické, martenzitické a feritické. Pro experiment byla zvolena ocel austenitická (viz obr. 3), kde je struktura tvořena pouze austenitem. Tento materiál se vyznačuje výbornou korozní odolností. Druhá testovaná ocel je typu martenzitického, kdy po vhodném tepelném zpracování lze dosáhnout strukturu typu popuštěného martenzitu, viz obr. 4. Tyto oceli jsou vhodné do slabě agresivního prostředí.

3.2 Mikrotvrdost testovaných vzorků ČSN EN ISO 6507-1

Měření mikrotvrdosti bylo provedeno pomocí Hannemannova mikrotvrdoměru, který je součástí metalografického mikroskopu Neophot 21. Jedná se o klasickou metodu dle Vickerse. Do materiálu je vtlačován diamantový jehlan o vrcholovém úhlu 136° silou 0.9806 N. Podle délky úhlopříček je následně odečtena mikrotvrdost HV.

Měření mikrotvrdosti bylo provedeno na souboru tří vzorků od každého materiálu. Jednotlivé hodnoty mikrotvrdosti, viz tab. 2.

3.3 Měření makrotvrdosti ČSN EN ISO 18265

Výsledná tvrdost ocelové součásti má značnou vypovídající schopnost o její životnosti a celkovém opotřebení (Dillinger et al., 2007). Měření tvrdosti bylo provedeno na pěti vzorcích metodou HRC, viz tab. 3. Z výsledného aritmetického průměru je zřejmé, že na výslednou tvrdost má zásadní vliv obsah uhlíku obsažený v oceli.

Stainless steels class 17 can be divided into three categories; there are austenite, hardenite and ferritic steels. Austenite steel (see Fig. 3), whose structure is formed by austenite only, was used for the experiment. This material has outstanding corrosion tolerance. Further tested steel is the hardenite type; where by using an appropriate heat treatment structure of tempered hardenite can be achieved, see Fig. 4. Both of these steels are suitable in poor aggressive environments.

3.2 Microhardness ČSN EN ISO 6507-1

Microhardness was measured with Hanneman microhardness device, which is a part of a metallographic microscope Neophot 21, using a standard Vickers method. A diamond-tipped cone of 136° using the force of 0.9806 N is indented into the material. According to the length of diagonals the HV microhardness value is read.

The measurement was undertaken using three samples for each metal layer. The individual microhardness readings are shown in Tab. 2.

3.3 Macrohardness ČSN EN ISO 18265

Resulting hardness of a steel part correlates with its service life and total wear (Dillinger et al., 2007). The measurement was pursued on five samples using the HRC method, the results were put in Tab. 3. From the average is apparent that the resulting hardness is affected significantly by the carbon content in the steel.

Tab. 2 Mikrotvrdosti jednotlivých strukturních fází / Microhardness of the individual structure phases

Použitá ocel / Used steel	Ferit / Ferrite [HV]	Perlit / Pearlite [HV]	Popuštěný martenzit / Tempered hardenite [HV]	Austenit / Austenite [HV]	Austenit zbytkový / Austenite residual [HV]
C45E bez TU / without heat treatment	194	305	—	—	—
C45E kaleno + popuštěno / quenched + tempered	—	481	—	—	227
X20CrNi 18-10 od výrobce / from a producer	—	—	—	188	—
X20 Cr13 kaleno + popuštěno / quenched + tempered	—	—	908	—	218

Tab. 3 Tvrdost použitých materiálů / Hardness of used materials

Použitá ocel / Used Steel	Počet měření / Order of measurement					Průměr / Average [HRC]
	1 [HRC]	2 [HRC]	3 [HRC]	4 [HRC]	5 [HRC]	
C45E bez TU / without heat treatment	4	5	5	4	4	4.4
C45E kaleno + popuštěno / quenched + tempered	32	30	29	32	32	31.0
X20CrNi 18-10 dodáno od výrobce / from a producer	Touto metodou nelze daný materiál měřit / This material cannot be measured by this method					
X20 Cr13 kaleno + popuštěno / quenched + tempered	28	27	27	28	28	27.6

3.4 Zkouška opotřebení dle ČSN 01 5084

Laboratorní zkouška opotřebení na brusném plátně vychází z ČSN 01 5084 (obr. 5). Zkušební vzorek je uchycen v držáku a je přitlačován závažím k brusnému plátnu. Během zkoušky se horizontální kotouč s brusným plátnem otáčí, přitom se testované těleso posunuje od středu k okraji brusného plátna. Po stanovené délce třecí dráhy koncový spínač stroj zastaví. Vzorky jsou očištěny a zvážením je stanoven hmotnostní úbytek, viz tab. 4.

Poměrná odolnost proti opotřebení Φ byla stanovena podle vztahů:

$$\text{hmotnostní} - \Phi_m = \frac{m_{et}}{m_{vzo}}$$

kde: m_{et} – hmotnostní úbytek etalonu [g]
 m_{vzo} – hmotnostní úbytek vzorku [g]

Podmínky laboratorní zkoušky:

- tvar zkušební vzorku: krychle $10 \times 10 \times 10$ mm
- počet vzorků každého testovaného materiálu: 3
- porovnávací etalon: tepelně nezpracovaná ocel C45E
- délka třecí dráhy: 250 mm
- průměr otáčející se desky: 480 mm
- max. kluzná rychlost zkušební tělesa: $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- měrný tlak: $0,32 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
- radiální posuv zkušební tělesa: $3 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$
- brusné plátno: korundové, zrnitost 120

3.4 Testing of wear according to the norm ČSN 01 5084

The laboratory testing of the wear on abrasive cloth is based on the norm ČSN 01 5084 (Fig. 5). The tested sample is held in a holder and pressed by a weight to the abrasive cloth. During the testing, the horizontal disk with the abrasive cloth is rotated and the tested body is moved from the centre to the edging of the abrasive cloth. After the given length of the wearing course, the terminal switch will stop the machine. The specimens are cleaned and the weight decrease determined by weighing, see Tab. 4.

Proportional resistance against wear Φ was set according to relation:

$$\text{by weight} - \Phi_m = \frac{m_{et}}{m_{vzo}}$$

where: m_{et} – etalon weight decrease [g]
 m_{vzo} – specimen weight decrease [g]

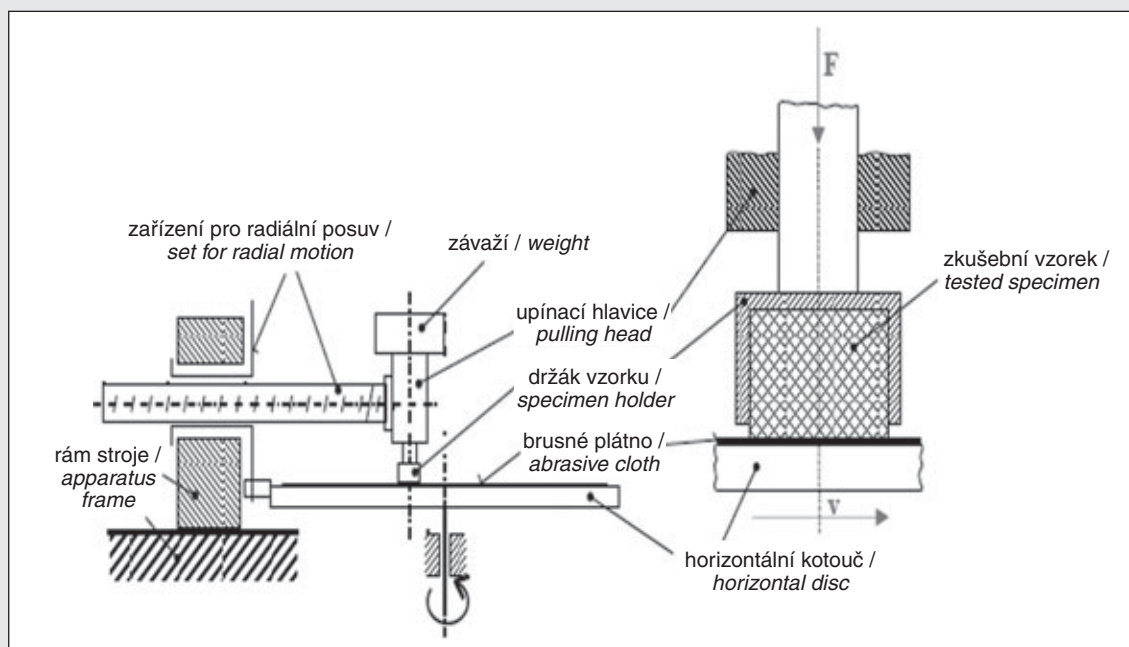
Conditions of the laboratory test:

- form of the testing specimen: cube $10 \times 10 \times 10$ mm
- specimen number of each tested material: 3
- comparing etalon: steel C45E without heat treatment
- length of the friction course: 250 mm
- diameter of the revolving disc: 480 mm
- max. sliding speed of the tested body: $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- specific pressure: $0.32 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
- radial motion of the tested body: $3 \text{ mm} \cdot \text{turns}^{-1}$
- abrasive cloth: corundum, granularity 120

Tab. 4 Hmotnostní úbytky testovaných materiálů / Weight decreases of tested materials

Číslo měření / Number of the measurement	Hmotnostní úbytky testovaných vzorků [mg] / Weight decreases of tested samples [mg]			
	Etalon / Etalon C45E	C45E kaleno + popuštěno / quenched + tempered	X20CrNi 18-10 od výrobce / from a producer	X20 Cr13 kaleno+popuštěno / quenched + tempered
1	241	145	362	138
2	245	142	371	139
3	237	145	368	135
Průměrná hodnota ze 3 měření / Average value from 3 measurings	241	144	367	137
Poměrná odolnost proti opotřebení Φ / Proportional resistance against wear Φ	1.00	1.67	0.65	1.75

Obr. 5 Zařízení k určení abrazivní odolnosti technických materiálů / Fig. 5 Equipment used for determination of abrasive tolerance of technical materials



4 DISKUSE

Vlivem opotřebení dochází až k 80 % poruch strojů a jejich součástí. Opotřebení je nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a média (Suchánek et al., 2007).

Zásadní vliv na životnost strojní linky má použitý materiál a jeho tepelné zpracování. Trendem je používat materiály, které jsou odolné jak abrazivní degradaci, tak i dalším degradačním vlivům, jako je například koroze či mechanická únava (Bartoniček et al., 1966).

Jednou z možností je použití vhodných antikoročních ocelí. Je nutné si ovšem uvědomit, že hlavním faktorem je chemické složení dané oceli a její tepelné zpracování. Testy jednoznačně prokázaly nízkou abrazivní odolnost austenitické oceli X20CrNi 18-10. S tímto koreluje i hodnota naměřené mikrotvrdosti, kdy se naměřené hodnoty pohybují pouze okolo 188 HV. Opotřebení testovaných vzorků dosahovalo až 367 mg, což je o 126 mg více než u etalonové oceli C45E. Typy austenitických ocelí nejsou vhodné na výroby strojních prvků, které jsou enormně abrazivně namáhány. Naopak druhá antikoroční martenzitická ocel X20 Cr13 po tepelném zpracování dosáhla hodnot mikrotvrdosti až 908 HV. Tato ocel dosáhla rovněž nejnižších hmotnostních úbytků na brusném plátně (137 mg). Použitelnost tohoto materiálu pro strojní linky je ovšem dána i jeho obrobiteľností a houževnatostí. Dílčí výsledky poukazují na možné využití antikoročních martenzitických ocelí u strojních linek pracujících ve zvýšených koročních podmínkách v prostředí kvasného a pivovarského průmyslu. Ekonomická náročnost je ovšem cca 2x vyšší než při použití běžných ocelí.

5 ZÁVĚR

Odstávka výrobní linky je vždy nežádoucím faktorem ve výrobním procesu. Jelikož výrobní operace na sebe musí plynule navazovat, může výpadek dílčí části vést ke značným ekonomickým ztrátám celého procesu. V prostředí pivovarského a kvasného průmyslu je případná nečekaná odstávka horší z důvodu práce s potravinou.

Od počáteční fáze dovozu sladového ječmene až po konečné plnění lahví a keglů se vždy jedná o pohyb materiálu. I když každé technické zařízení má svoji životnost, je zapotřebí věnovat pozornost použitým technickým materiálům. Jelikož pivovarství patří do kategorie výroby potravin, musí splňovat přísná hygienická kritéria. Odolnost použitých materiálu vůči agresivním čisticím prostředkům je tedy nezbytná.

4 DISCUSSION

Wear is a reason of 80 % defects of machines and their parts. Wear is a parasitic change of surface or size of solids caused either by mutual working of functional surfaces or functional surface and medium (Suchánek et al., 2007).

Used material and its heat treatment influence fundamentally the service life of the production line. The trend is to use materials which are both resistant towards abrasive wear and other degradation influences, such as corrosion or mechanical fatigue (Bartoniček et al., 1966).

One option is to use appropriate anticorrosion steels. However, the main factor is chemical structure of the steel and its heat treatment. The experiment has showed that the austenite steel X20CrNi 18-10 has a very low abrasive tolerance. Microhardness values around 188 HV are a proof. The abrasive wear of these samples were up to 367 mg, which is by 126 mg more than by the etalon steel C45E. Austenite steels are not suitable for production of machine parts which are enormously stressed.

On the other hand, martensite steel X20 Cr13 after heat treatment reached microhardness of values up to 908 HV. This steel showed the smallest weight decrease on the abrasive cloth (137 mg). Usage of this material for machine lines is also given by its workability and ductility. Partial results show a possible usage of anticorrosion martensite steels in machine lines operating in the environment with high corrosion pressure, such as the environments of fermentation and brewing industries. However, economic costs are double comparing to common types of steel.

5 CONCLUSION

Cut off a production line is an unwelcome factor in the production anytime. As the individual production operations have to concur to the other, any failure can lead to economic losses of the whole process. In the food industry, fermentation and brewing industries including, is any unexpected fallout even worse because of the work with rapidly spoiling materials (food).

From the opening stage of supply of malted barley to the final stage of filling bottles and kegs, movement of material is omnipresent. Even though every technical device has its own service life, it is necessary to take into consideration the materials used for production of machines and its parts. As the brewing trade belongs to the food production, it has to follow strict hygiene standards and thus the materials used in production lines have to be tolerant to aggressive cleaners.

Literatura / References

- Bartoniček, R. et al., 1966: Koroze a protikoroční ochrana kovů. Vyd. 1. Academia, Praha, 720 s.
Blaškovič, P., Balla, J., Dzimko, M., 1990: Tribológia. ALFA, Bratislava, 360 s.
Číhal, V., 1999: Korozivzdorné oceli a slitiny. Vyd. 1. Academia, Praha, 440 s.
ČSN 01 5084, 1974: Stanovení odolnosti kovových materiálů proti abrazivnímu opotřebení na brusném plátně.
Dillinger, J. et al., 2007: Moderní strojírenství pro školu i praxi. Vyd. 1. Europa – Sobotáles cz, Praha, 612 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
Chládek, L., 2007: Pivovarnictví. Vyd. 1. Grada Publishing, Praha, 207 s. ISBN 978-80-247-1616-9.

- Řasa, J.: Strojnické tabulky 2, 2007: Scientia, Praha. 586 s. ISBN 978-80-86960-20-3.
Suchánek, J., Kuklík, V., Zdravecká, E., 2007: Abrazivní opotřebení materiálu. ČVUT, Praha, 162 s. ISBN 978-80-01-03659-4.
Zvoníček, J., et al., 1972: Potravinářské stroje a zařízení – konstrukce. Vyd. 1. SNTL, Praha, 366 s.

Recenzovaný článek / Reviewed paper

Do redakce došlo / Manuscript received: 17. 5. 2012

Přijato k publikování / Accepted for publication: 27. 7. 2012