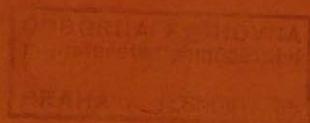




ÚSTAV ZEMĚDĚLSKÝCH A POTRAVINÁŘSKÝCH INFORMACÍ

ZEMĚDĚLSKÁ TECHNIKA

Agricultural Engineering



ČESKÁ AKADEMIE ZEMĚDĚLSKÝCH VĚD

1

VOLUME 41 (LXVIII)
PRAHA 1995
CS ISSN 0044-3883

Mezinárodní vědecký časopis vydávaný z pověření České akademie zemědělských věd a s podporou Ministerstva zemědělství České republiky

An international journal published by the Czech Academy of Agricultural Sciences and with the promotion of the Ministry of Agriculture of the Czech Republic

Redakční rada – Editorial Board

Předseda – Chairman

Ing. Jiří Fiala, DrSc. (Výzkumný ústav zemědělské techniky, Praha, ČR)

Členové – Members

Doc. RNDr. ing. Jiří Blahovec, DrSc. (Česká zemědělská univerzita, Praha, ČR)

Doc. ing. Karel Brzkovský, CSc. (České vysoké učení technické, Praha, ČR)

Univ.-Prof. Dr. habil. Manfred Estler (Technische Universität München, Institut für Landtechnik, Freising, BRD)

Prof. ing. Ján Jech, CSc. (Vysoká škola poľnohospodárska, Nitra, SR)

Ing. Petr Jevič, CSc. (Výzkumný ústav zemědělské techniky, Praha, ČR)

Doc. ing. Jan Mareček, CSc. (Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno, ČR)

Ing. Richard Markovič, CSc. (Štátna skúšobňa poľnohospodárskych a lesných strojov, Rovinka, SR)

Ing. Zdeněk Pastorek, CSc. (Výzkumný ústav zemědělské techniky, Praha, ČR)

Doc. ing. František Ptáček, CSc. (Státní kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno, ČR)

Prof. M. N. Rifai, Ph.D. (Nova Scotia Agricultural College, Truro, Nova Scotia, Canada)

Vedoucí redaktorka – Editor-in-Chief

Ing. Jovanka Václavíčková

Cíl a odborná náplň: Časopis publikuje původní vědecké práce a studie typu review z oboru zemědělská technika, zemědělské technologie a zpracování zemědělských produktů.

Abstrakty z časopisu jsou zahrnuty v těchto databázích: Agris, CAB Abstracts, Czech Agricultural Bibliography, WLAS.

Periodicita: Časopis vychází čtvrtletně (4x ročně), ročník 41 vychází v roce 1995.

Přijímání rukopisů: Rukopisy ve dvou vyhotoveních je třeba zaslat na adresu redakce: Ing. Jovanka Václavíčková, vedoucí redaktorka, Ústav zemědělských a potravinářských informací, Slezská 7, 120 56 Praha 2, tel.: 02/25 75 41–9, fax: 02/25 70 90. Den doručení rukopisu do redakce je publikován jako datum přijetí k publikaci.

Informace o předplatném: Objednávky na předplatné jsou přijímány pouze na celý rok (leden–prosinec) a měly by být zaslány na adresu: Ústav zemědělských a potravinářských informací, vydavatelské oddělení, Slezská 7, 120 56 Praha 2. Cena předplatného pro rok 1995 je 140 Kč.

Aims and scope: The journal publishes scientific papers and reviews dealing with the study agricultural engineering, agricultural technologies and processing the agricultural products. Abstracts from the journal are comprised in the databases: Agris, CAB Abstracts, Czech Agricultural Bibliography, WLAS.

Periodicity: The journal is published quarterly (4 issues per year), Volume 41 appearing in 1995.

Acceptance of manuscripts: Two copies of manuscript should be addressed to: Ing. Jovanka Václavíčková, editor-in-chief, Institute of Agricultural and Food Information, Slezská 7, 120 56 Praha 2, tel.: 02/25 75 41–9, fax: 02/25 70 90. The day the manuscript reaches the editor for the first time is given upon publication as the date of reception.

Subscription information: Subscription orders can be entered only by calendar year (January–December) and should be sent to: Institute of Agricultural and Food Information, Slezská 7, 120 56 Praha 2. Subscription price for 1995 is 35 USD (Europe), 37 USD (overseas).

VLIV RYCHLOSTI Kladívek A Částic Na Proces A Energetickou Náročnost Mletí

THE EFFECT OF SPEED OF HAMMERS AND PARTICLES ON THE PROCESS AND DEMAND OF ENERGY IN GRINDING

P. Hnilica

Czech University of Agriculture, Praha, Czech Republic

ABSTRACT: Theoretically, the physical importance of constants in a previously experimentally confirmed relation between specific consumption of energy and increase in specific surface in grinding of cereals in the hammer mill is approximately derived. Both the quantities, characterizing the material and process, and the above-mentioned constants depend on a speed of hammers. Approximate derivation is based on Rebinder's theory of grinding applied to disintegration of individual particles and used in energy balance of impact. The balance has been accomplished through Newton's theory of inelastic impact. There are indicated changes in relations following wave theory of impact for plastic materials and from Hertz's theory of impact and Mises's hypothesis for lower circumferential speed of hammers. The result is influenced as by circumferential speed of hammers, as by circumferential speed of circulation of particles in a grinding chamber and rheological properties of grain. Another way of transfer of energy to particles is an air flow. There are also results of measurements of speed dependence of theoretically studied quantities and relations, as well as the grindability of the material. The grindability of wheat and barley within circumferential speeds of hammers 33 to 98 m.s⁻¹ grows with speed and was not influenced by the size of sieve meshes. This is recommended as an indicator of technological quality of cereals. Derived theoretical relations and previous and new author's experimental results presented here were used for estimate of specific breaking energy of grain and efficiency of energy transfer through the air. This inefficient process transfers 50 to 60% of energy. Moreover, the efficiency of making of new surfaces during grinding by impact is calculated, both the ideal and actual ones for the experimental mill used. In the ideal case it is almost ten times higher. Based on the results of the study, the discussion presents some of possibilities of design of grinding devices aimed at energy saving.

hammer mill; specific consumption of energy; specific surface; theory of grinding; grinding capacity of cereals; technological quality of cereals; speed of hammers; circulation of materials; efficiency of grinding; design of grinding devices

ABSTRAKT: Teoreticky je přibližně odvozen fyzikální význam konstant ve dříve experimentálně potvrzeném vztahu mezi měrnou spotřebou energie a přírůstkem měrného povrchu při mletí obilí na kladívkovém mlýně. Obě veličiny, charakterizující materiál i proces, i zmíněné konstanty jsou závislé na rychlosti kladívek. Přibližné odvození vychází z Rebinderovy teorie mletí aplikované na desintegraci jednotlivých částic a využití v energetické bilanci rázu. Bilance je provedena s využitím Newtonovy teorie nepružného rázu. Jsou naznačeny změny ve vztazích plynoucích z vlnové teorie rázu pro plastické materiály a z Hertzovy teorie rázu a Misesovy hypotézy pro menší obvodové rychlosti kladívek. Vliv na výsledek má jak obvodová rychlost kladívek, tak obvodová rychlost cirkulace částic v mlecí komoře a reologické vlastnosti zrna. Druhou cestou přenosu energie na částice je vzdušný proud. Jsou uvedeny také výsledky měření rychlostní závislosti teoreticky zkoumaných veličin a vztahů, jakož i melitelnosti materiálu. Melitelnost pšenice a ječmene v rozmezí obvodových rychlostí kladívek 33 až 98 m.s⁻¹ s rychlostí roste a nebyla ovlivněna velikostí ok mlecích sít. Doporučuje se jako ukazatel technologické kvality obilí. Odvozených teoretických vztahů a zde uvedených i dřívějších autorových experimentálních výsledků je využito k odhadu specifické lomové energie zrna a účinnosti přenosu energie vzduchem. Tímto neefektivním způsobem se přenáší 50 až 60 % energie. Dále je vypočtena účinnost tvorby nových povrchů při mletí rázem, ideální a skutečná u použitého experimentálního mlýna. V ideálním případě je téměř desetkrát vyšší. Na základě výsledků práce jsou v diskusi uvedeny některé možnosti řešení mlecích zařízení s cílem energetických úspor.

kladívkový mlýn; měrná spotřeba energie; měrný povrch; teorie mletí; melitelnost obilí; technologická kvalita obilí; rychlost kladívek; cirkulace materiálu; účinnost mletí; řešení mlecích zařízení

Mletí představuje technologický proces s velkou měrnou spotřebou energie. Ta závisí na mnoha faktorech – na fyzikálních vlastnostech mletého materiálu a celkové změně jeho zrnitosti, na použitím principu mletí a na konstrukci mlýna a mlecí linky. Poslední tři vyjmenované faktory určují cestu, jakou se energie na materiál přenáší. Účinnost přenosu je měřítkem úspěšnosti konstrukce mlýna a vyřešení technologického procesu.

Závislosti procesu mletí na fyzikálních vlastnostech materiálu se využívá k testování technologické kvality obilí. Výsledkem testu je tzv. mlecí tvrdost, vyjadřovaná např. jako index tvrdosti pšenice (wheat hardness index) (O b u c h o v s k í , B u s h u k , 1980). Vzhledem ke složitosti procesu vzniká otázka, jaký je přesný fyzikální smysl této veličiny. Zde vypracovaná teorie na ni pomůže odpovědět a také posoudit, zda by lepším ukazatelem nebyla tzv. melitelnost. Používá se u nerostných surovin a je snadno měřitelnou veličinou. Melitelnost je úměrná účinnosti využití energie potřebné ke tvorbě nových povrchů, jak bude ukázáno dále. Může být proto důležitou informací pro konstrukční praxi.

Mlecí test na laboratorním mlýně poskytuje odhad o chování materiálu v technologickém zařízení průmyslových rozměrů, stejně jako obrušovací test na laboratorní loupáče. Kvůli porovnatelnosti výsledků různých měření se testy musí dělat na standardních strojích standardním postupem (C h u n g et al., 1975). K elementárním dějům ve mlýnech mají nejbližší testy využívající řez nebo drcení jednotlivých zrn. Méně často používané penetrační testy se nejvíc přibližují obvyklým metodám měření tvrdosti konstrukčních materiálů ve strojírenství. Jejich výsledky mají všeobecně vžitý význam, ale u zrna vyžadují dražší aparatury. Měly by mít přednost ve vědecké práci, neboť jsou nejlépe fyzikálně definovány. Umožňují např. zjistit distribuci tvrdosti v zrnu (K a t z et al., 1959).

Výsledky procesu mletí i mletý materiál jsou poměrně dobře charakterizovány přírůstkem měrného povrchu a měrnou spotřebou energie. Melitelnost je podle ČSN 72 1085 definována jejich poměrem. Více o ní uvádí literatura (D i n t e r , 1984). Pro měření melitelnosti obilí by mohl být vhodný kladívkový mlýn dohodnuté konstrukce, protože ke krmeným účelům se převážně mele na strojích tohoto principu. Ke standardizaci testovací metody je třeba znát veličiny, které výsledek ovlivňují.

V kladívkových mlýnech je lom zrna dynamický. Desintegrace probíhá při krátkodobých a intenzivních zatíženích, protože rázové rychlosti jsou obvykle dost vysoké. Tato zatížení vyvolávají v materiálu velmi složité děje (C u r r a n et al., 1977): nukleaci a růst trhlin nebo dutin a jejich propojení vedoucích k fragmentaci.

Mlecí proces v kladívkovém mlýně má dvě fáze – desintegrační a segregační. Obě jsou ovlivněny pohybem částic materiálu v mlecím prostoru. Díky němu se

distribuuje rázová rychlost, na níž záleží desintegrační účinky. Segregační fáze je ovlivněna proto, že statistickými charakteristikami pohybu je určena frekvence dopadů a distribuce úhlů dopadu částic na síto. Pohyb částic proto rozhodujícím způsobem ovlivňuje rychlostní konstanty obou dějů (H n i l i c a , 1984, 1985, 1988b). Závisí na proudění vzduchu v mlecí komoře.

Vzdušný proud vyvolává otáčející se kladívkový rotor. Díky proudění vzduchu a pohybu částic v něm vzniká závislost mlecího procesu na parametrech konstrukce mlecího prostoru. Lze odhadovat, které z konstrukčních parametrů mohou mít vliv na zlepšení účinnosti mletí, ale ty, které mají vliv největší, mohou ukázat až experimenty a teoretické výpočty. Ty také ukáží pravděpodobný směr dalšího konstrukčního vývoje mlecích strojů a zařízení.

Výsledky zde uvedené byly získány pro účely výzkumného úkolu, který sledoval problém snížení energetických vstupů výroby krmených směsí. Jednu jeho etapu autor řešil, proto lze některé další podrobnosti najít v příslušných výzkumných zprávách (H n i l i c a , K a c e r o v s k ý , 1987; N o v o t n ý , 1988). Tento příspěvek navazuje na předchozí práci (H n i l i c a , 1994) s důrazem na analýzu příčin vysoké energetické náročnosti kladívkových mlýnů. K tomu je nutné znát vliv rychlosti kladívek. S tím vším je automaticky spojen problém testování kvality zrna.

Teorie rychlostní závislosti

Teoretické vyřešení závislosti měrné spotřeby energie mlýna na přírůstku měrného povrchu a rychlosti kladív předpokládá:

- dostatečnou znalost fyziky fragmentace jednotlivých částic při různých rychlostech rázu,
- dostatečně přesný teoretický popis přenosu energie na mleté částice,
- znalost statistiky pohybu částic v mlecím prostoru, nebo pro přibližné řešení alespoň průměrné komodové rychlosti cirkulace částic.

Dosavadní výsledky autorova výzkumu procesu mletí i fyzikálních vlastností zrna umožňují určitě zpfesnění pohledu na tuto záležitost.

Energetickou spotřebu mletí se v jednoduché a kompaktní formě pokoušely zdůvodnit už klasické teorie Rittingerova a Kickova, později Bondova, Rebindřova, Charlesova a dalších. Velmi zajímavý je Rumpfův pokus (R u m p f , 1973) formulovat zákon mletí velkých skupin jednotlivých částic s použitím teorie podobnosti a poznatků Griffithovy lomové mechaniky. Výsledkem jeho úvah je bezrozměrová kritériální funkce

$$S_E \cdot \beta_{\max} = f_2 \left(\frac{E_v x}{\beta_{\max}}, \frac{l_i}{x} \right) \quad (1)$$

kde: S_E – nový povrch vytvořený na jednotku dodané energie (měřítko využití energie)

- β_{\max} – maximální specifická povrchová energie materiálu (lomu-
mová energie); je to materiálová konstanta
 x – velikost (charakteristický rozměr) drcené částice
 E_v – energie dodaná na jednotku objemu částice
 l_i – charakteristický rozměr i -té, už existující trhliny
 v částici; přesnější distribuce velikostí takových trhlin

Rumpf neuvádí tvar funkce f_2 , který není jednodu-
ché odvodit. Zjevně je těžké znát distribuci l_i . Uvádí
některé experimentální výsledky S_E s různě velkými
částicemi při různém způsobu zatěžování a dokumen-
tuje složitost problému.

Velkým pokrokem jsou studie fragmentačních procesů při rázovém zatěžování kovů (B a r b e e et. al, 1972), polymerů (C u r r a n et al., 1973) a hornin (S h o c k e y et al., 1974) při jednorozměrném šíření
deformačních vln. Růst trhlin a dutin v materiálu má za
následek pokles průměrného modulu pružnosti v da-
ném místě a velmi zložitý obraz v šíření deformačních
vln. Na základě získaných experimentálních poznatků
s modelem, který citovaní autoři vypracovali, se poda-
řilo pro tento relativně jednoduchý případ vyřešit dis-
tribuci velikostí fragmentů v dobré shodě s experimen-
tem. Lze říci, že funkce f_2 v rovnici (1) bude řešením
právě popsaneého problému šíření vln v trojrozměrném
tělese. Zatím je bohužel nutné se spokojit s experimen-
tálními funkcemi a přibližnými způsoby řešení (lomo-
vé funkce s energetickou bilancí).

K první aproximaci řešení přenosu energie v kladív-
kovém mlýně se nabízí klasická Rebinděrova hypotéza,
aplikovaná na lom jednotlivých částic. Je jednoduchá
a z klasických hypotéz nejpřesnější. Podle ní se energie
dodaná na jednotku hmoty E_v/ρ spotřebovává na pruž-
né deformace této hmoty k mezi pevnosti w a na tvorbu
nového měrného povrchu Δs_1

$$E_v/\rho = w + \beta_{\max} \cdot \Delta s_1 \quad (2)$$

$$w = \sigma_p^2/2E\rho \quad (3)$$

- kde: σ_p – mez pevnosti materiálu (při mletí většinou v tlaku)
 E – Youngův modul pružnosti mletého materiálu
 ρ – hustota mletého materiálu

Je třeba mít na zřeteli, že hypotéza má nepřesnosti.
Neuvažuje hlavně:

- že k tvořícímu se novému povrchu je energie do-
dávána vždy prostřednictvím pružných deformací a na
jejich úkor,
- že u křehkých materiálů klesá mez pevnosti s ve-
likostí tělesa, neboť roste pravděpodobnost výskytu vět-
ších trhlin.

Při rázovém namáhání je energie absorbovaná v jed-
notce hmoty tělesa rovna

$$w_{\text{abs}} = v_r^2 (1 - e_r^2)/2 \quad (4)$$

- kde: v_r – relativní rychlost rázu
 e_r – koeficient restituace

Relativní rychlost rázu je

$$v_r = v_k - v \quad (5)$$

- kde: v_k – obvodová rychlost konců kladívek
 v – střední obvodová rychlost cirkulace částic v mlecí ko-
moře

Na jednotku hmoty částice je k dispozici energie E_v/ρ
 $= (v_k - v)^2/2$. S využitím rovnice (2) jakožto nejdůleži-
tějšího předpokladu přibližného řešení se dostane pro
koeficient restituace $e_r = \sqrt{2w}/(v_k - v)$. Současně je pří-
tomen předpoklad, že elastické deformace kompletně
vypruží. Složka $\beta_{\max} \cdot \Delta s_1$ představuje energetické
ztráty trvalých deformací, které vedou kompletně ke
tvorbě nových povrchů. Je tedy přibližně

$$\beta_{\max} \cdot \Delta s_1 \approx (v_k - v)^2/2 - w \quad (6)$$

Pro rychlost fragmentů po rázu vyjde hodnota
 $v_k + \sqrt{2w}$.

Existují přibližná experimentální ověření rychlostní
závislosti v rovnicích (4) a (6) (O k u d a , C h o i ,
1980) provedená na polymerech. Citovaní autoři namě-
řili úměru přírůstu měrného povrchu mocnině rychlosti
rázu koulí nastřelovaných na tuhé terč. Mocnitel byl
blízký dvoje, pouze u velmi plastického nylonu byl
1,5 až 1,6. Absorbovanou energii naměřili přibližně
úměrnou 2,1 až 2,3 mocnině rázové rychlosti. Tyto em-
pirické úměry jsou nutně přibližné, jinak by $w_{\text{abs}}/\Delta s_1$
nemohla mít lokální minimum, jak jejich citovaná prá-
ce také uvádí. Existenci minima této veličiny ukázaly
i Priemerovy experimenty na anorganických materiá-
lech (P r i e m e r , 1965).

Rychlost fragmentů zrna po rázu není ve skutečnosti
stejná. Je distribuována co do směru i velikosti (H e n-
d e r s o n , H a n s e n , 1974). Jejich celková měrná
kinetická energie je podle použité hypotézy po rázu rovna

$$w_{\text{kin},2} = (v_k + \sqrt{2w})^2/2 \quad (7)$$

Před rázem je

$$w_{\text{kin},1} = v^2/2 \quad (8)$$

takže jedním nárazem kladívka se na jednotku hmoty
částice dodá energie

$$w_{1k} = w_{\text{kin},2} - w_{\text{kin},1} + w_{\text{abs}} = v_k (v_k - v + \sqrt{2w}) \quad (9)$$

Kladívky odražené částice se ještě teoreticky mohou
rozbítet o statorové části a o jiné částice, ale podle po-
zorování rychlokamerou (K r a s n o v , S y r-
o r o v a t k a , 1966) lze soudit, že tento efekt není vel-
ký. Úhel dopadu na síto (měřený od kolmice) je
většinou velký a let částic je brzděn. Částice zůstanou
většinou v cirkulující vrstvě. Celkový desintegrační
efekt jednoho rázu kladívka s ohledem na případný úči-
nek druhotných nárazů lze zapsat rovnicí

$$\beta_{\max} \cdot \Delta s_1 = (v_k - v)^2/2 - w + \eta_m [(v_k + \sqrt{2w})^2/2 - w] \quad (10)$$

kde: η_m – mlecí účinnost druhotných nárazů

Protože Rebinděrova teorie zjednodušeně chápe w
jako materiálovou konstantu nezávislou na velikosti
částic, musí být jako důsledek považovány za nezávislé
na jejich velikosti také w_{abs} , Δs_1 i w_{1k} . Závisí však na
rychlosti kladívek. Zjednodušující skutečností lze vy-
užít k přibližnému odvození závislosti mezi měrnou
spotřebou energie mlýna a celkovým přírůstkem měr-
ného povrchu. Ke zjemňování může dojít jen opaková-
ním dějů.

Fragmenty neopouštějí mlecí prostor ihned. Je vždy určitá pravděpodobnost, že některé z nich budou zasaženy znov. Materiál je proto vždy mlet o něco více než jedním zásahem (H n i l i c a , 1981a, b; H n i l i c a et al., 1986). Přibližně platí

$$\beta_{\max} \cdot \Delta s = \left\{ (v_k - v)^2/2 - w + \eta_m [(v_k + \sqrt{2w})^2/2 - w] \right\} \cdot \bar{i} \quad (11)$$

kde: $\bar{i} = \Delta s / \Delta s_1 > 1$ - střední počet zásahů

Přenos energie při nárazu kladívek se děje téměř se 100% účinností, neboť modul pružnosti oceli je víc než 200krát větší než modul pružnosti endospermu. Během \bar{i} rázů se takto na jednotku hmoty přenesou energie $w_{1k} \cdot \bar{i}$. Další cestou přenosu energie na částice je vzduch; tento přenos se ovšem děje s horší účinností η_{vzd} . Celková měrná spotřeba energie je

$$w_m = (v^2/2 + w_{vzd}) / \eta_{vzd} + w_{1k} \cdot \bar{i} \quad (12)$$

Energie dodaná jednotce hmoty složené z částic o velikosti (průměru) x silovými účinky vzdušného proudu za střední dobu zdržení v mlecím prostorem τ je v průměru přibližně

$$w_{vzd} = \pi \frac{x^2}{4} c \frac{1}{2} (\Psi v_k - v)^2 \rho_{vzd} v \tau \left(\frac{4}{3} \pi \frac{x^3}{8} \rho \right) = \frac{1}{8} c (\Psi v_k - v)^2 \rho_{vzd} v \tau s_x \quad (13)$$

kde: c - tvarový součinitel odporu
 ρ_{vzd} - hustota vzduchu
 $\Psi < 1$ - součinitel pro přepočítání v_k na střední rychlost vzdušného proudu v oblasti výskytu částic (závisí na rychlostním profilu)
 $s_x = 6/x\rho$ - měrný povrch materiálu v mlecím prostoru

Výsledek platí také pro polydisperzní materiál.

Vzorec (13) je odvozen pro konstantní rychlost cirkulace všech částic v . Sledování pohybu pomocí rychlokamery (K r a s n o v , S y r o v a t k a , 1966) však ukazuje, že rychlost cirkulace závisí na velikosti částic. Větší částice se pohybují pomaleji než menší. Vzhledem k tomu, že se rychlost cirkulace ve vzorci projeví se třetí mocninou, je k dosažení přijatelné přesnosti třeba odlišovat od sebe alespoň rychlost celých zrn a rychlost částic po jejich semletí. Z technického hlediska je zajímavé brát v úvahu také případ rozdílné pravděpodobnosti zásahu zrna kladívky během prvního pokusu o zásah po vpadu do mlecí komory. Ten totiž může nastat při vyšší relativní rychlosti.

Střední doba zdržení τ i rychlostní konstanty desintegrace λ a segregace na síť α jsou měřitelné pomocí radioaktivního traceru (H n i l i c a et al., 1986). Obecně jsou obě konstanty funkcí velikosti částic x . Pro případ mletí snadněji melitelných materiálů vysokými rychlostmi na hrubých sítích však stačí počítat jen s jejich efektivními hodnotami. Pak mezi nimi platí vztahy (H n i l i c a , 1981a, 1982)

$$\tau = \frac{1}{\alpha} + (1 + \pi_{1z}) \frac{1}{\lambda} \quad (14)$$

$$\bar{i} = \lambda \tau \quad (15)$$

kde: π_{1z} - pravděpodobnost zásahu zrna v prvním pokusu o zásah

Přesnější výsledky jsou

$$\beta_{\max} \cdot \Delta s = \pi_{1z} [(v_k - v_o)^2 - (v_k - v)^2]/2 + \left\{ (v_k - v)^2/2 - w + \eta_m [(v_k + \sqrt{2w})^2/2 - w] \right\} \cdot \bar{i} \quad (16)$$

$$w_{vzd} = \frac{1}{8} c \rho_{vzd} [(\Psi v_k - v'_o)^2 v'_o \cdot \frac{\alpha (1 - \pi_{1z})^2}{\lambda + \alpha (1 - \pi_{1z})}] \cdot \frac{1}{\lambda} s_o + (\Psi v_k - v'_p)^2 v'_p \cdot \frac{\lambda}{\lambda + \alpha (1 - \pi_{1z})} \cdot \frac{1}{\alpha} (s_o + \Delta s) \quad (17)$$

kde: v_o - střední obvodová rychlost zrn v okamžiku prvního rázu
 v'_o - střední obvodová rychlost celých zrn
 v'_p - střední obvodová rychlost fragmentů zrn po semletí
 s_o - měrný povrch celých zrn
 $s_o + \Delta s$ - měrný povrch produktu mletí

Střední obvodová rychlost cirkulující hmoty je

$$v = v'_o \cdot \frac{\alpha (1 - \pi_{1z})}{\lambda + \alpha (1 - \pi_{1z})} + v'_p \cdot \frac{\lambda}{\lambda + \alpha (1 - \pi_{1z})} \quad (18)$$

Rovnice (17) je založena na rozkladu střední doby zdržení na složku před semletím $(1 - \pi_{1z})/\lambda$ a po semletí $1/\alpha$, kdy jednotlivé hmotnostní podíly mají různý měrný povrch. Hmotnostní podíl neseletého materiálu v cirkulující zadržuje je $\alpha (1 - \pi_{1z})/[\lambda + \alpha (1 - \pi_{1z})]$ a semletého materiálu $\lambda/[\lambda + \alpha (1 - \pi_{1z})]$. Podíly jsou vahami v rovnici (18) pro výpočet v zcela analogicky by se sečetly s_o a $s = s_o + \Delta s$ při výpočtu s_x . Měrná spotřeba energie mlyna je potom přibližně

$$w_m = \left[\pi_{1z} \cdot \frac{1}{2} v_o^2 + (1 - \pi_{1z}) \cdot \frac{1}{2} v_o^2 + w_{vzd} \right] / \eta_{vzd} + \pi_{1z} v_k (v - v_o) + v_k (v_k - v + \sqrt{2w}) \cdot \bar{i} \quad (19)$$

Energie přenášená na částice vzdušným proudem má složku závislou na původní velikosti zrna a na přírůstku měrného povrchu. Pravděpodobnost π_{1z} lze určit buď na základě statistické analýzy snímků z rychlokamery, nebo vypočítat řešením pohybu zrna po vpadu do proudu vzduchu s dříve změřeným rychlostním profilem a z rozměrových parametrů mlecího prostoru.

Za cenu větší komplikovanosti by bylo možné pomocí uvedených hmotnostních podílů ještě poněkud zpřesnit rovnici (16). Pomocí rovnic (15) a (17) lze z rovnice (19) vyloučit \bar{i} . Získá se hledaná závislost $w_m - \Delta s$ ve tvaru

$$w_m = a + b \cdot \Delta s \quad (20)$$

kde: a, b - konstanty následujícího významu

$$b = \frac{1}{8} c \rho_{vzd} (\Psi v_k - v'_p)^2 v'_p \cdot \frac{\lambda}{\alpha [\lambda + \alpha (1 - \pi_{1z})]} / \eta_{vzd} + \frac{\beta_{\max} \cdot v_k (v_k - v + \sqrt{2w})}{(v_k - v)^2/2 - w + \eta_m [(v_k + \sqrt{2w})^2/2 - w]} \quad (21)$$

$$a = \left\{ \pi_{1z} \frac{1}{2} v_o^2 + (1 - \pi_{1z}) \frac{1}{2} v_o^2 + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{8} c \rho_{\text{vzd}} [(\Psi v_k - v'_n)^2 v'_n \cdot \frac{\alpha (1 - \pi_{12})^2}{\lambda [\lambda + \alpha (1 - \pi_{12})]} + \\
& + (\Psi v_k - v'_p)^2 v'_p \cdot \frac{\lambda}{\alpha [\lambda + \alpha (1 - \pi_{12})]}] s_n / \eta_{\text{vzd}} + \\
& + \pi_{12} v_k (v_k - v_n) - \\
& - \frac{\pi_{12} v_k (v_k - v + \sqrt{2w}) [(v_k - v_n)^2 - (v_k - v)^2] / 2}{(v_k - v)^2 / 2 - w + \eta_m [(v_k + \sqrt{2w})^2 / 2 - w]} \quad (22)
\end{aligned}$$

Výsledek je v souladu s poznatkami vlnové teorie rázu. Konstanta b musí být kladná. Jelikož η_m je malá, musí být $(v_k - v)^2 / 2 > w$. Dosazením za w z rovnice (3) a úpravou dostaneme

$$v_k - v > \sqrt{2w} = \frac{\sigma_p}{E} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = v_{\text{KR}} \quad (23)$$

Zde je v_{KR} tzv. Karmánova rychlost rázu, při které v oblasti rozšíření deformační vlny vznikají v materiálu napětí na mezi pevnosti. V uvedeném tvaru platí pro křehké materiály. Pro materiály s výraznější oblastí plasticity je v_{KR} třeba počítat z celé deformační křivky podle rovnice (R a c h m a t u l i n , D e m j a n o v , 1961)

$$v_{\text{KR}} = \rho^{-1/2} \int_0^{\epsilon_p} (d\sigma/d\epsilon)^{1/2} d\epsilon \quad (24)$$

kde: ϵ_p – relativní deformace ϵ na mezi pevnosti

Pro takové materiály by bylo v rovnicích (21) a (22) třeba dosadit za w hodnotu $v_{\text{KR}}^2/2$ s v_{KR} podle rovnice (24), ale ve výrazu pro rychlostní složku $\sqrt{2w}$ ponechat w podle rovnice (3). Plastické deformace se šíří od kontaktu s kladívkem pomaleji než elastické.

Vzorce (23) a (24) jsou odvozeny pro kontakt rovných ploch. Povrchy reálných částic jsou však zakřivené. Maximální deformace se proto koncentrují do malé oblasti blízko pod plochou kontaktu s kladívkem, kde je také iniciován lom. To je třeba vzít na zřetel při menších rychlostech rázu. Průměrná relativní deformace tělesa je při něm mnohem menší než σ_p/E a tedy potřebná měrná energie pružných deformací je mnohem menší než w podle rovnice (3).

Za předpokladu, že platí Misesova hypotéza o porušení soudržnosti materiálu, lze s využitím Hertzova řešení kontaktního problému a Hertzovy teorie rázu vypočítat minimální kritickou rychlost rázu, při které může započít mletí únavovým lomem

$$v_{r, \text{krit}} = p_{o, \text{krit}}^{3/2} \frac{\pi^2}{2} (10\rho)^{-1/2} \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right) \quad (25)$$

kde: $p_{o, \text{krit}}$ – kritická hodnota tlaku v centru kontaktní plošky zrna s kladívkem

E – Youngův modul pružnosti zrna

μ – Poissonovo číslo (endospermu zrna)

$$p_{o, \text{krit}} = \sigma_{p, \text{ef}} (3 \cdot \max \dot{w}_{\text{dist}})^{-1/2} \quad (26)$$

kde: $\max \dot{w}_{\text{dist}}$ – maximální hodnota bezrozměrové hustoty distorzí složky deformační energie v mleté částici v blízkosti kontaktu; závisí jen na Poissonově čísle (hodnoty viz H n i l i c a , 1988a)

$\sigma_{p, \text{ef}}$ – efektivní hodnota pevnosti v tlaku

Zavedením $\sigma_{p, \text{ef}}$ se dělá určitá korekce na plasticitu materiálu. Toto napětí leží mezi σ_p a $E\epsilon_p$ a je ho třeba určit experimentálně. Odvození rovnice (26) lze najít v předchozích pracích (H n i l i c a , 1988a, 1990).

Z Hertzovy teorie rázu vyplývá, že při malých rychlostech kladívek je v rovnicích (21) a (22) třeba za w dosazovat spíše hodnotu $v_{r, \text{krit}}^2/2$ než hodnotu podle rovnice (3). Měrná energie w je tedy vlastně funkcí rychlosti rázu, jejíž fyzikální povaha je zřejmá z úvah a jsou známy její určité meze. Prozatím vyžaduje experimentální měření.

MATERIÁL A METODA

Měřené materiály

K experimentům byla použita pšenice odrůdy Zdar II a ječmen odrůdy Rubín, vyčištěné, v osivové kvalitě a o běžné skladovací vlhkosti. Pšeničné zrno lze charakterizovat těmito údaji: hmotnost 1 000 zrn – 39,16 g; objem jednoho zrna v průměru – 29,89 mm³; měrný povrch – 1,19 m².kg⁻¹; v toluenu měřená pyknometrická hustota – 1 310,4 ± 9,5 kg.m⁻³. Hodnoty těchto významu pro ječné zrno byly v uvedeném pořadí: 42,87 g; 33,29 mm³; 1,17 m².kg⁻¹; 1 287 ± 5,8 kg.m⁻³. Podle zkušenosti jsou pšenice *Triticum aestivum* poměrně snadno melitelné, ječmen je melitelný hůře.

Experimentální zařízení

Vývoj pracoviště pro výzkum mletí na technické fakultě VŠZ v Praze, včetně konstrukce použitého experimentálního mlýna a pomocných zařízení, zatím podrobně popisují jen příslušné výzkumné zprávy (např. K r u p i č k a et al., 1982, 1984). Vzhledem k tomu, že v souvislosti s tímto vývojem byly získány obecněji využitelné výsledky, uvažuje se o jejich samostatné publikaci.

Měření se uskutečnila na experimentálním kladívkovém mlýně, který byl poháněn tyristorovým dynamometrem. Stroje byly spojeny pružnou spojkou. Tyristorový dynamometr umožňuje nastavit pracovní režim s konstantními otáčkami až do 8 000 min⁻¹, zařazení však bylo provozováno jen do 6 000 min⁻¹. Záznam otáček i krotičkého momentu byl digitální.

Mlecí komora experimentálního mlýna měla průměr 320 mm, délku 250 mm. Úhel obklopení mlecí komory kazetovými síty činil 280°, s celkovou síťovou plochou 0,196 m². K dispozici bylo celkem šest dvojic kazetových sít s oky o průměrech 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 a 4,5 mm; perforační poměr ok byl 0,3. Na rotoru bylo osazeno celkem 28 kladívek uspořádaných ve čtyřech řa-

dách, rovnoměrně po sedmi v řadě s roztečí 37,5 mm. Tloušťka kladívek byla 3,9 mm, poloměr otáčení jejich konců v radiální poloze 156 mm. Šířka mlecí spáry byla 4 mm.

Dávkování do mlýna se provádělo ze zásobníku pásovým dávkovačem s nastavitelnou výkonností změnou výšky hradítka a rychlosti pásu. Přesnost určení výkonnosti byla 1,3 %.

Metody měření

Měrná spotřeba energie k vlastnímu mletí byla počítána ze vztahu

$$w_m = \frac{P - P_o}{Q} \quad (27)$$

kde: P a P_o – výkony na hřídeli dynamometru při zatížení a volném chodu
 Q – výkonnost stroje

Výkony byly počítány z krouticího momentu M a otáček n

$$P = \pi M n / 30 \quad (28)$$

Aby byla zaručena co největší přesnost, byla výkonnost mlýna stanovována přímou metodou jako podíl hmotnosti sešrotovaného materiálu a doby šrotování při každém měření. Ukázalo se totiž, že výkonnost dávkovače pevně spojeného s mlýnem je při vyšších otáčkách silně ovlivněna vibracemi. Předběžné ocejchování nelze použít.

Měrný povrch celých zrn byl počítán z jejich rozměrů

$$s_o \approx 6/x_o \rho \quad (29)$$

kde: ρ – pyknometrická hustota zrna
 x_o – ekvivalentní průměr zrna (koule o hmotnosti shodné se zrnem)

Měrný povrch šrotů byl měřen propustností metodou, která spočívá ve změření tlakové difference (ztráty) ve vrstvě sypkého materiálu zformované do známých rozměrů, o známé poréznosti a při známém průtoku vzduchu. Měrný povrch se pak vypočítá ze vztahu odvozeného Kozenym a Karmánem

$$s = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \cdot \frac{S}{k \eta l} \cdot \frac{\Delta p}{Q_v} \right]^{1/2} \quad (30)$$

kde: Δp – tlaková difference mezi horním a spodním povrchem vrstvy při objemovém průtočném množství vzduchu Q_v
 S – plocha příčného průřezu vzorku
 l – výška vrstvy
 η – dynamická viskozita vzduchu
 ρ – hustota (pyknometrická) zrn před rozemletím
 ϵ – vnější poréznost
 $k = 5 \pm 0,5$ (vzato $k = 5$) – bezrozměrová konstanta; podle zdokonalené teorie (W a s a n et al., 1976) je třeba ji považovat za známou funkci ϵ a závisí také na tvaru částic

Více podrobností o propustnostní metodě uvedl H n i l i c a (1994).

Postup všech měření byl veden snahou minimalizovat rozptyl všech výsledků, neboť měření byla časově dosti náročná.

Vliv výkonnosti na proces byl testován při otáčkách 3 000 a 4 000 min^{-1} na sítěch s oky 2,5 a 3,5 mm u pšenice a 2,0 a 3,0 mm u ječmene.

Pro změření rychlostní závislosti melitelnosti byla zvolena řada otáček rotoru od 2 000 do 6 000 min^{-1} , odstupňovaná po 500 min^{-1} . Při poloměru otáčení konců kladívek 156 mm odpovídá obvodovým rychlostem kladívek 32,7 až 98,0 m.s^{-1} .

Po nastavení otáček rotoru na hodnotu blízkou ve zvolené řadě a ustálení chodu byl zapsán moment a otáčky volného chodu. Pak byla nastavena vhodná rychlost pásu pásového dávkovače při konstantní výšce vynášeč šterbiny a najeto šrotování. Asi po 10 sekundách práce mlýna byl pohyb pásu mžikově zastaven a dokončeno šrotování materiálu v mlecí komoře, což je indikováno zvukem mlýna a dosažením momentu chodu naprázdno. Zásuvka na šrot pod strojem byla vyprázdněna. Tímto způsobem bylo připraveno každé měření při zatížení mlýna materiálem, aby výsledky nebyly zatíženy počátečními nepřesnostmi dávkování.

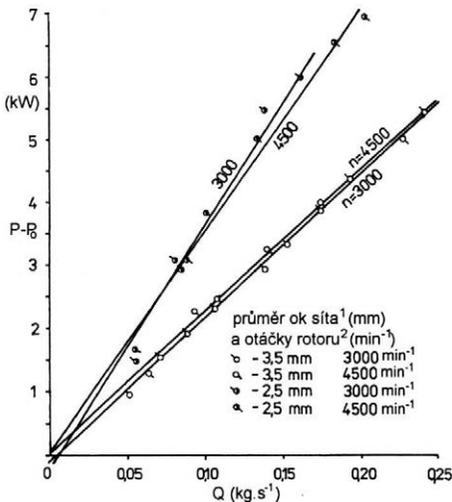
V další fázi bylo k měření doby mletí použito stoppek, které byly spouštěny současně s mžikovým uvedením pásu dávkovače do chodu s dřívě nastavenou rychlostí pásu (tj. výkonností dávkování). Na digitálním ukazateli dynamometru byl pak sledován průběh krouticího momentu a s periodou asi 2 s odečítány a zapisovány otáčky hnacího bubnu dávkovače. Po ustálení krouticího momentu mlýna byl pak zapnut digitální záznam momentu a otáček, který probíhal téměř až do okamžiku mžikového zastavení dodávky materiálu do mlýna. Mletí při nastavených otáčkách rotoru mlýna a výkonnosti trvalo 1 až 2 min (podle výkonnosti). Sešrotovaný materiál v zásuvce pod strojem byl pak zvážěn a byl z něj odebrán vzorek o váze asi 1 kg pro změření měrného povrchu a síťové analýzy.

Komůrka pro měření měrného povrchu byla plněna porcemi odebíranými z různých míst ve vzorku, aby se omezil vliv samotřídění na výsledek každého měření. Během plnění byl materiál v komůrce mírně setřásán poklepy o dřevěnou podložku a pravítkem nakonec zarovnan s horním okrajem. Dosahovaná vnější poréznost materiálu v komůrce byla u pšenice $\epsilon = 0,5104 \pm 0,0064$, u ječmene $\epsilon = 0,4937 \pm 0,0072$. Pak byla komůrka i s materiálem vložena do upínacího tělesa a změřeny další potřebné veličiny pro výpočet měrného povrchu podle vzorce (30). Celá popsaná procedura byla pro každý odebraný vzorek semletého materiálu opakována pětkrát. Z pěti hodnot naměřeného měrného povrchu byl vypočten průměr.

VÝSLEDKY

Experimenty s mletím

Naměřené výsledky jsou vedeny v grafech. Na obr. 1 je ukázána závislost výkonu potřebného na mletí



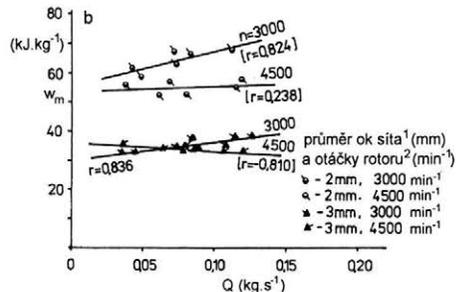
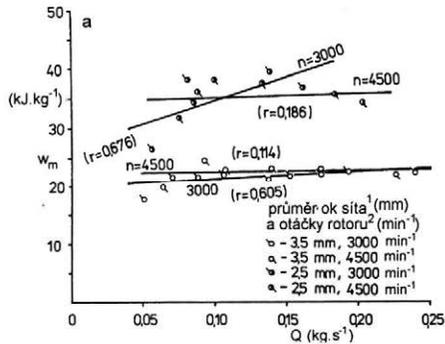
1. Závislost výkonu spotřebovaného na vlastní mletí pšenice (po odečtu výkonu na volný chod stroje) na výkonnosti experimentálního kladivkového mlýna – Dependence of power output consumed for the proper wheat grinding (after subtraction of that for free running of machine) on feeding rate of experimental hammer mill

¹screen mesh diameter, ²rotor revolutions

na výkonnosti mlýna pro pšenici. Pro ječmen je charakter závislosti velmi podobný. Naměřenými body bylo možné proložit přímky s koeficientem korelace nejméně $r = 0,966$, průkazným na 1% hladině významnosti. Počátek souřadnic byl považován za samozřejmý experimentální bod. Proložené přímky neprocházejí přesně počátkem, ale úseky na svislé ose jsou malé a neprůkazné. To svědčí o zřejmě malé závislosti měrné spotřeby energie na výkonnosti a o nepříliš velké zadrželi materiálu v mlecím prostoru v rozmezí měřených výkonností.

Závislost $w_m - Q$ (měrné spotřeby k vlastnímu mletí na výkonnosti) byla přesto statisticky testována samostatně. Naměřené body a jimi proložené přímky jsou pro pšenici a ječmen uvedeny na obr. 2a, b. U proložených přímek je uveden koeficient korelace r s průkazností naznačenou typem závorek. V kulaté závorce jsou uváděny koeficienty neprůkazné na 5% hladině významnosti, v hranaté neprůkazné na 1%, ale průkazné na 5% hladině, bez závorek průkazné na 1% hladině významnosti. Výraznější závislost je zřejmě jen u nejméně síta při otáčkách 3 000 min⁻¹.

Závislost tvorby nového povrchu na výkonnosti je pro obě měřené plodiny ukázána na obr. 3a, b. U pšenice jsou korelační koeficienty neprůkazné. U ječmene bylo možné závislost statisticky prokázat na 1% hladině významnosti u tří variant měření. Neprůkazný na 5% hladině byl korelační koeficient jen pro $n = 4\,500\text{ min}^{-1}$ a s oky o průměru 3 mm.



2. Závislost měrné spotřeby energie k vlastnímu mletí pšenice (a) a ječmene (b) na výkonnosti, změřená na experimentálním kladivkovém mlýně – Dependence of specific consumption of energy to the proper wheat (a) and barley (b) grinding on feeding rate, measured on experimental hammer mill

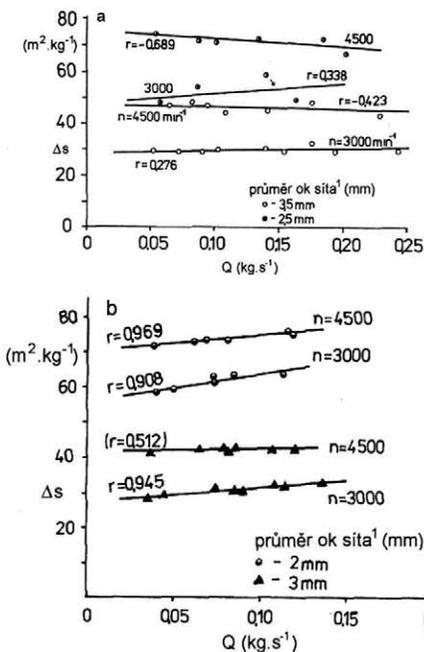
¹screen mesh diameter, ²rotor revolutions

Rychlostní závislosti měrné spotřeby energie w_m k mletí pšenice a ječmene na různých sítích jsou uvedeny na obr. 4a, b. Na těchto závislostech je zajímavá existence minima, jehož poloha (souřadnice n) nezávisí příliš na materiálu a přesouvá se od otáček asi 2 750 min⁻¹ pro síto s oky o průměru 4,5 mm k otáčkám asi 4 000 min⁻¹ pro síto s oky o průměru 2,0 mm.

Rychlostní charakteristiky tvorby nového povrchu jsou zobrazeny na obr. 5a, b. Na křivkách pro síta s různými průměry ok existuje minimum, jehož poloha tentokrát velmi závisí na materiálu a poněkud i na velikosti ok.

Z teoretického hlediska je nejzajímavější závislost měrné spotřeby energie na přírůstku měrného povrchu pro jednotlivá síta za různé rychlosti mletí. Průběhy pro jednotlivá síta jsou dost podobné a jsou ukázány na obr. 6a, b. Svědčí o tom, že přírůstek měrné spotřeby a měrného povrchu jsou způsobeny aditivními ději, jak se taky předpokládalo v teoretické části této práce.

V dřívějších experimentech na mlýně s jednou frekvencí otáčení rotoru (H n i l i c a , 1994) bylo prokázáno, že závislost $w_m - \Delta s$ je lineární, dobře popsatelná rovnicí (20). Naměřené výsledky umožňují doplnit ten-



3. Závislost přírůstu měrného povrchu na výkonnosti při mletí pšenice (a) a ječmene (b) na experimentálním kladívkovém mlyně – Dependence of increase of specific surface on feeding rate in grinding of wheat (a) and barley (b) on experimental hammer mill

¹screen mesh diameter

to poznatek. Při mletí nižšími rychlostmi je tato závislost mírně zakřivená, jak je patrné z experimentálních bodů pro otáčky 2 000 a 2 500 min⁻¹ na obr. 5 a 6. Linearita $w_m - \Delta s$ byla také separátně testována statisticky pro každou z použité řady otáček. Výsledky jsou uvedeny v tab. I. Z tabulky je patrná celková tendence k poklesu obou koeficientů s otáčkami, zvláště koeficientu b . Je z nich současně vidět, že směrnice přímk b jsou v rámci každé plodiny při nejvyšších otáčkách 5 000, 5 500 a 6 000 navzájem velmi blízké, přičemž úseky a na osách jsou malé a neprůkazné (na 5% hladině významnosti). Pro tyto nejvyšší otáčky lze výsledky proložit společně přímkami s vysokým korelačním koeficientem, konkrétně:

$$w_m = -0,011 + 0,473 \Delta s \quad r = 0,983$$

$$\text{nebo jen } w_m = 0,474 \Delta s$$

pro ječmen

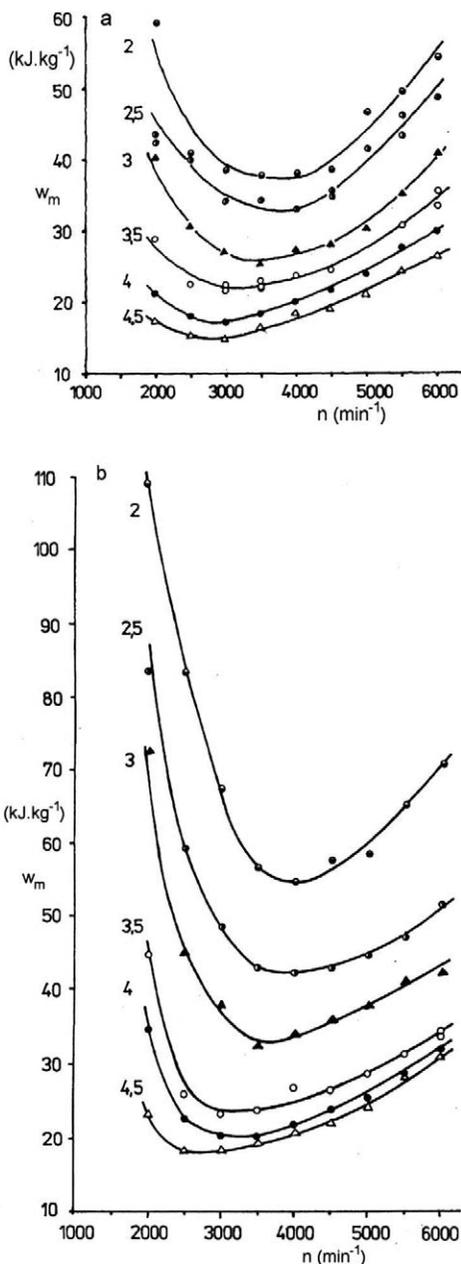
$$w_m = 1,556 + 0,667 \Delta s \quad r = 0,983$$

$$\text{nebo jen } w_m = 0,691 \Delta s$$

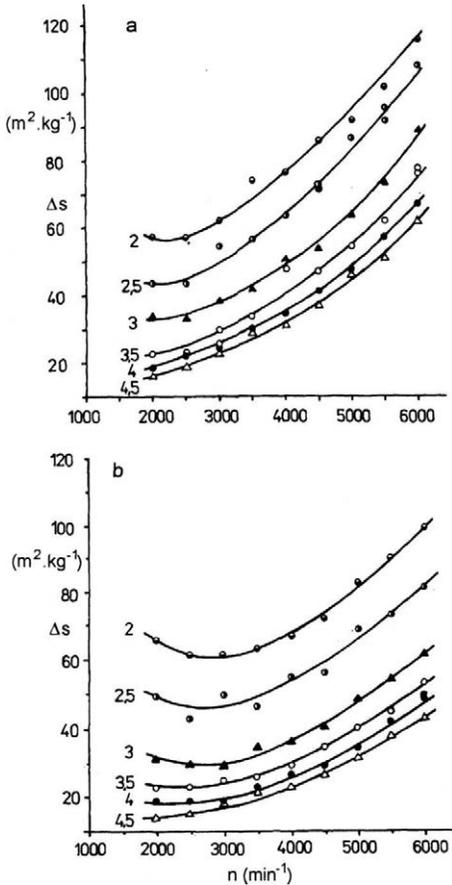
Na obr. 7a, b je vynesena závislost melitelnosti použitých odrůd pšenice a ječmene na otáčkách rotoru experimentálního mlyna

$$Me = \Delta s / w_m = f(n)$$

(31)



4. Rychlostní závislost měrné spotřeby energie k vlastnímu mletí pšenice (a) a ječmene (b) na experimentálním kladívkovém mlyně; při otáčkách 6 000 min⁻¹ mají konce kladívek obvodovou rychlost 98 m.s⁻¹ – Speed dependence of specific consumption of energy to the proper grinding of wheat (a) and barley (b) on experimental hammer mill; at revolutions of 6,000 min⁻¹ tops of hammer have circumferential speed of 98 m.s⁻¹

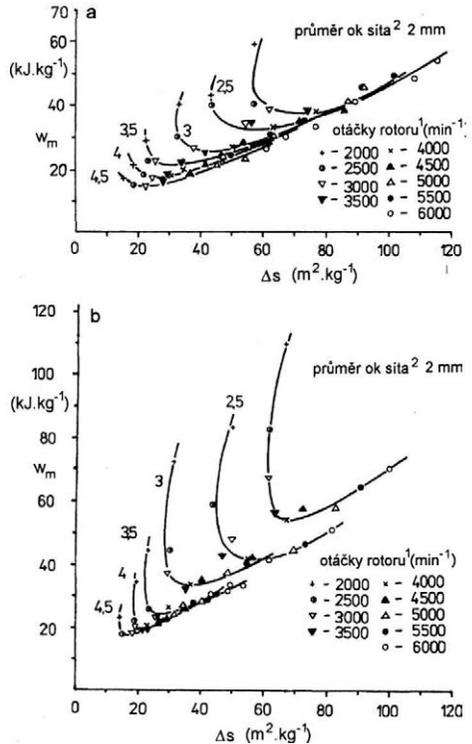


5. Rychlostní závislost přírůstu měrného povrchu při mletí pšenice (a) a ječmene (b) na experimentálním kladívkovém mlýně; při otáčkách 6 000 min⁻¹ je obvodová rychlost konců kladívek 98 m.s⁻¹ – Speed dependence of increase of specific surface in grinding of wheat (a) and barley (b) on experimental hammer mill; at revolutions of 6,000 min⁻¹ the circumferential speed of tops of hammers is 98 m.s⁻¹

Body z různě hrubých sít jsou graficky odlišeny. Vliv průměru ok na melitelnost není patrný. Křivky proložené body nemají ostrý lokální extrém a při vysokých otáčkách spějí k limitním hodnotám. Maximální melitelnost pšenice je asi 2,2 m².kJ⁻¹, ječmene asi 1,5 m².kJ⁻¹.

Fyzikální měření na zru

Některé výsledky dřívějších dosti podrobných měření fyzikálních vlastností zrna (Hnilica, 1988a, 1990) mohou sloužit i pro účely této práce. Budou zde uvedeny bez metodických podrobností a jen nejpotřebnější z nich. Jsou shrnuty v tab. II. Efektivní hodnoty



6. Závislost měrné spotřeby energie na přírůstu měrného povrchu pro pšenici (a) a ječmene (b) mleté na experimentálním kladívkovém mlýně při různých otáčkách rotoru a různém průměru ok mletího síta – Dependence of specific consumption of energy on increase of specific surface for wheat (a) and barley (b) ground on experimental hammer mill at various revolutions of the rotor and various diameters of mesh sieves

1 – rotor revolutions, 2 – screen mesh diameter

meze pevnosti v tlaku $\sigma_{p,ef}$ pro pšenici a ječmene byly vypočteny za použití korekčního součinitele na plasticitu, naměřeného na hrachu. Tento součinitel byl měřen prostřednictvím energie k lomu celého zrna stlačovaného mezi paralelními deskami. Použita byla rovnice (26), vzorec z řešení Hertzova kontaktního problému

$$p_o = \frac{2}{\pi} \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right)^{-1/2} \cdot R^{-2/3} \cdot \left(\frac{15}{8} W \right)^{1/3} \quad (32)$$

kde: p_o – tlak v centru kontaktní plošky

R – poloměr křivosti zrna (koule o ekvivalentní hmotnosti)

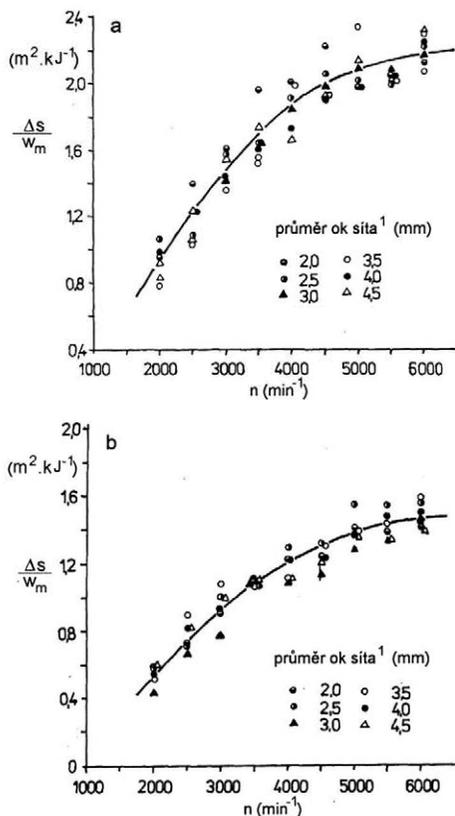
W – deformační energie dodaná na jeden kontakt

a vzorec zde navržený pro korekci na plasticitu

$$\sigma_{p,ef} = \sigma_p + \xi (E \epsilon_p - \sigma_p) \quad (33)$$

kde: ξ – korekční koeficient

Na hrachu byl naměřen $\xi = 0,569$. Korekce je provedena jinak než v původních pracích.



7. Závislost melitelnosti pšenice (a) a ječmene (b) na otáčkách rotoru, změřená na experimentálním kladívkovém mlýně; otáčkám 6 000 min⁻¹ odpovídá obvodová rychlost konců kladívek 98 m.s⁻¹ – Dependence of grindability of wheat (a) and barley (b) on revolution of the rotor, measured on experimental hammer mill; circumferential speed of tops of hammers of 98 m.s⁻¹ corresponds to revolutions of 6,000 min⁻¹

¹screen mesh diameter

DISKUSE A ZÁVĚRY

V použitém rozmezí výkonnosti nejsou výsledky výrazněji ovlivňovány zádrží mléec komory, ale určitá závislost existuje. Větší tendence k jejím projevům se objevují u obtížněji melitelného ječmene. Ten pravděpodobně vyžaduje větší střední dobu zdržení v mléecí prostoru než pšenice a vzniká také větší zádrž.

Z průběhu křivek $w_m - n$ a $\Delta s - n$ na obr. 4 a 5 je dobře patrné, že v blízkosti minima křivek je regulátorem jemnosti mletí i měrné spotřeby energie hlavně síto, při vyšších rychlostech kladív se jím stává také tato rychlost. Poloha minima (souřadnice n) na křivkách pro jednotlivá síta se posouvá k vyšším otáčkám. U závislosti $\Delta s - n$ závisí poloha také na limitní melitelnosti.

I. Výsledky regresní analýzy závislosti $w_m = a + b \cdot \Delta s$ pro pšenici odrůdy Zdar II (A) a ječmene odrůdy Rubín (B), naměřené na experimentálním kladívkovém mlýně – Results of regression analysis of dependence of $w_m = a + b \cdot \Delta s$ for wheat, the variety Zdar II (A) and barley, the variety Rubín (B), measured on experimental hammer mill

	Otáčky rotoru ¹ (min ⁻¹)	Regresní koeficienty ²		Koeficient korelace ³
		a (kJ.kg ⁻¹)	b (kJ.m ⁻²)	
A	2 000	4,75	0,960	0,978
	2 500	4,70	0,704	0,950
	3 000	7,69	0,493	0,914
	3 500	5,53	0,463	0,974
	4 000	4,70	0,437	0,994
	4 500	5,20	0,407	0,992
	5 000	-0,41	0,498	0,993
B	5 500	1,33	0,468	0,989
	6 000	-2,49	0,483	0,991
	2 000	7,40	1,577	0,970
	2 500	-3,46	1,430	0,993
	3 000	-0,12	1,060	0,976
	3 500	1,12	0,881	0,999
	4 000	3,78	0,743	0,988
4 500	1,21	0,771	0,991	
5 000	3,77	0,639	0,986	
5 500	0,73	0,689	0,985	
6 000	-1,39	0,697	0,986	

¹rotor revolutions, ²regression coefficients, ³correlation coefficient

w_m – specific energy consumption
 Δs – specific surface

Z průběhu všech křivek na obr. 4 až 6 je dále patrné, že při nižších rychlostech kladívek není materiál dostatečně drcen jedním úderem a že narušení struktury (především tvorbou větších trhlín) se mohou v materiálu akumulovat. Efekt zvětšení vnějšího měrného povrchu se projevuje až v dalším nebo dalších rázech. Při nejnižších otáčkách 2 000 min⁻¹ byl, obzvláště na jemných sítích, vytvářen větší měrný povrch než při otáčkách 3 000 min⁻¹, při nichž lze bezpochyby očekávat větší desintegrační účinky rázu. Pozorovaný efekt může být vyvoláván také otěrem, protože doba zdržení cirkulujícího materiálu v mléecí prostoru je při nižších otáčkách podstatně delší. Na podporu názoru o vlivu akumulace poruch v materiálu, které jsou příčinou únavového lomu, hovoří pravděpodobně také výsledky jednodušších experimentů autorů Ruppel a Brauer (1986). Dva rychle po sobě následující rázy skleněných kuliček na sešikmené desky při téměř stejné rychlosti vyvolaly desintegraci většího počtu z nich než ráz jeden.

Naměřená závislost rázové melitelnosti na otáčkách (obr. 7) může být odhadnuta exponenciálně nebo hyperbolou s posunutými počátky. Jde o formální odhad. Je totiž možné, že při ještě vyšších rychlostech, než jaké byly použity, existuje na křivkách maximum, jaké se objevuje v již citovaných experimentech s polymer-

II. Veličiny vypočtené z výsledků fyzikálních měření na zrnech hrachu a obilí, důležité v souvislosti s vypracovanou teorií mletí v kladívkových mlýnech (pro $\rho = 1\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) – Quantities calculated from results of physical measurements on pea and cereal grains, important in connection with developed theory of grinding in hammer mills (for $\rho = 1\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

Plodina a odrůda ¹	w (kJ.kg ⁻¹)	$\sqrt{2w}$ (m.s ⁻¹)	v _{KR} (rov. 25) (m.s ⁻¹)	v _{r,krit} (m.s ⁻¹)	v _{r,krit} ² /2 (J.kg ⁻¹)
Hrách Jupiter ²	1,330	52	70	5,9	17,4
Pšenice Zora ³	0,479	31	37	1,8	1,6
Ječmen Favorit ⁴	0,925	43	54	3,5	6,1
Ječmen Ametyst ⁵	1,353	52	68	7,9	31,2

w – hustota energie pružných deformací na mezi pevnosti – density of energy of elastic deformations at the strenght point

v_{KR} – Karmánova rychlost rázu; dochází při ní k desintegraci – Karmán's velocity of impact; appears in disintegration

v_{r, krit} – kritická rychlost rázu na zakřivenou plochu, při které začíná poškozování – critical velocity of impact to curved surface at which damage starts

¹crop and variety, ²pea Jupiter, ³wheat Zora, ⁴barley Favorit, ⁵barley Ametyst

III. Vypočtené koeficienty v lineární závislosti $w_m = a + b \cdot \Delta s$, vypočtené odhady účinnosti přenosu energie vzdušným proudem η_{vzd} a specifické lomové energie pšeničného zrna β_{max} – Calculated coefficients in linear dependence $w_m = a + b \cdot \Delta s$, calculated estimates of efficiency of energy transfer by air flow η_{vzd} and specific breaking energy of wheat grain β_{max}

Otáčky rotoru ¹ n (min ⁻¹)	Účinnost ² η_{vzd}	Lomová energie ³ β_{max} (J.m ⁻²)	Koeficienty ⁴	
			a (kJ.kg ⁻¹)	b (kJ.m ⁻²)
5 000	0,44	13,6	3,4	0,40
5 500	0,49	16,6	3,7	0,41
6 000	0,62	19,0	3,5	0,39

¹rotor revolutions, ²efficiency, ³breaking energy, ⁴coefficients

ními kulíčkami (Okuda, Choi, 1980) na křivkách $\Delta s_1/w_{abs} - v_r$. Extrapolací závislosti k nulové melitelnosti se získá odhad minimálních otáček, při kterých může mletí vůbec začít. U pšenice je to asi 950 min⁻¹, u ječmene asi 980 min⁻¹, což odpovídá rychlostem konců kladívek 15,5 a 16,0 m.s⁻¹. U ječmene tato rychlost odpovídá dvojnásobku $v_{o, krit}$ pro odrůdu Ametyst a 4,5násobku pro odrůdu Favorit; u pšenice osminásobku $v_{o, krit}$ pro odrůdu Zora. Vypočtená rychlost počátku poškozování zrna, jaká se uvádí zde, se zhruba sblíží pozorovaným hodnotám in jiných odrůdách (Billanski, 1966). Limitních hodnot melitelnosti se dosahovalo při rychlostech kladívek blízkých dvojnásobku Karmánovy rychlosti pro elastický (nebo nepříliš plastický) materiál. Výsledky jsou v dobré shodě s fyzikálními představami, jestliže je obvodová rychlost kladívek alespoň dvojnásobkem obvodové rychlosti cirkulace částic, jak bylo dříve naměřeno v zóně síta pomocí rychlokamery (Krasnov, Syrovatka, 1966). V zóně drhlic byl naměřen až čtyřnásobek.

Melitelnost je závislá na podmínkách, za kterých se mletí uskutečňuje. Měla by být využita jako ukazatel kvality nejen u nerostných surovin, ale také u krmného a potravinářského obilí. Při standardizaci testovacího zařízení je třeba mít na zřeteli způsob a také rychlost při desintegraci. Melitelnost je veličinou přesněji definovanou než používaná mlecí tvrdost. Je rovněž snadno a rychle měřitelná.

Průběhy $\Delta s - n$ i $w_m - \Delta s$ z různých sít jsou si dost podobné a podobný charakter měly i závislosti namě-

řené pro individuálně mleté skleněné kulíčky (Berenš, 1964). Jevy při mletí různých materiálů rázovými silami jsou proto podobné. Růst w_m i Δs vlivem síť je způsoben hlavně aditivností účinků rázu (Hnilica, 1987) a souvisí s přenosem energie na mleté částice a s lomovým chováním materiálu.

S využitím naměřených závislostí $w_m - \Delta s$ a výsledků měření fyzikálních vlastností zrna lze diskutovat i teorii konstant a, b v rovnici (20). Je k tomu nutné využít také měření rychlostních konstant procesu α, λ a středního počtu zásahů \bar{i} z dřívější práce (Hnilica et al., 1986). Pro mlýno téměř stejném průměru mlecí komory, stejném počtu řad kladívek, ale s jiným poměrem jejich tloušťky k rozteči v řadě (byl 0,079 proti zde použitému poměru 0,11) a o stejném průměru ok mlecího síta 4 mm bylo při mletí pšenice naměřeno $\alpha = 1,38\text{ s}^{-1}$; $\lambda = 0,87\text{ s}^{-1}$ a $\bar{i} = 1,64$. Vliv fyzikálních vlastností závislých na odrůdě se v ní nesledoval. Jiná měření α a λ za podmínek natolik srovnatelných nejsou k dispozici. Jejich měření pro ječmen se uskutečnila na mlýně provozních rozměrů.

Dále lze využít výsledků fyzikálních měření pro pšenici Zora. Tyto výsledky se blíž k průměrným hodnotám a zahrnují ještě tři odrůdy polských pšenic (Liwilla, Grana Panda). Lze předpokládat, že byly blízké i s výsledky u odrůdy Zdar II.

Vlastní měření obvodové rychlosti cirkulace celých zrn a částic z nich se nedělala. Podle měření rychlokamerou (Krasnov, Syrovatka, 1966) je průměrná rychlost cirkulace v oblasti síta $v = 0,4$ až $0,5\text{ v}_k$ a je větší u jemnějších částic než u hrubších. Volí se

proto odhady $v'_o/v_k = 0,45$ a $v'_p/v_k = 0,55$. Dále je běžné $\pi_{1z} = 0$ a $\eta_m = 0$. Vychází se z předpokladu, že $v_o = v'_o$. Za předpokladu, že rychlostní profil vzduchu v mlecí spáře je přibližně parabola 2. stupně, je $\psi = 0,67$ (se stupněm křivky roste). Tvarový součinitel odporu pro turbulentně obtékanou kouli je $c = 0,4$ (T e s a ř í k, 1961). Rychlostní konstanty α a λ jsou teoreticky přibližně úměrné úhlové rychlosti cirkulace částic, a tedy otáčkám mlýna (H n i l i c a, 1985).

Za použití všech uvedených faktů a hodnot z tab. II byly z rovnic (16), (18), (19), (21) a (22) vypočteny údaje shrnuté v tab. III. Použity byly také otáčkám odpovídající naměřené veličiny w_m a Δs pro pšenici.

Vypočtené koeficienty a , b se od naměřených liší poměrně málo. Rozdíl je způsoben nepřesností v odhadu poměru ztrát na cirkulaci celých zrn a produktu, jak vyplývá z diskuse. Všechny hodnoty v tabulkách jsou ovlivněny i neúplností matematického popisu.

Neúplnost popisu spočívá především v nedostatku přesnějších informací o statistických charakteristikách pohybu částic v mlecí komoře a rychlostním profilu vzdušného proudu. Výpočtové odhady však dostatečně spolehlivě ukazují, že lomové energie zrna jsou v desítkách $J \cdot m^{-2}$ a účinnosti přenosu energie vzduchem jsou v desetinách (v desítkách procent).

Vypočtená rychlostní závislost materiálové konstanty β_{max} je, alespoň z části, důsledkem odhadu v'_p/v_k konstantou. Ve skutečnosti poměr konstant není. Náraz kladívek při větší rychlosti vytvoří jemnější částice, jak také ukazují výsledky, a ty se pohybují rychleji. Ztráty na cirkulaci jsou největší při $v/v_k = \psi/3$, tj. při použitím odhadu ψ při $v/v_k = 0,22$. Totéž platí pro v'_o a v'_p .

Podobně je tomu s rychlostní závislostí η_{vzd} , která je také pravděpodobně odhadnutá celkově výše. Důvod je v tom, že při statistickém hodnocení snímků z rychlokamery je obtížné zahrnout ve správném poměru i nejjemnější částice. Lze proto očekávat ve skutečnosti hodnoty v/v_k vyšší, než jaké uvádějí ve své práci K r a s n o v a S y r o v a t k a (1966). Nepřesný může být i odhad ψ . Střední počet zásahů by se při vyšších rychlostech neměl příliš měnit, zato při nevelkých desintegračních účincích pomalých rázů prudce poroste.

Přesnější než výpočet účinnosti η_{vzd} je zpětný výpočet celého členu $(v'^2_o/2 + w_{vzd}/\eta_{vzd})$ i druhého členu $v_k(v_k - v + \sqrt{2w})$. \bar{v} v rovnici (19), protože odhadované v je v druhém členu v prvé mocnině. Zjistí se, že vzduchem se na materiál dodává 50 až 60 % a rázy 40 až 50 % z celkové energie dodané na vlastní mletí. Přitom cirkulace semletého materiálu má význam hlavně pro segregaci. Energii na segregaci mohou daleko efektivněji mechanicky předat peruté prosévačky než vzduch.

Nejmenší spotřeby energie na desintegraci se dosáhne tehdy, když budou zrna dostatečně mletá jediným úderem. V tomto případě je ideálně $\pi_{1z} = 1$, $\bar{v} = 1$, $v = v_o = v'_o = v'_p = 0$. Je-li materiál po semletí takovým úderem rychle odstraněn bez cirkulace, je α velké, takže $w_{vzd} = 0$. Dále jsou $w_m = v_k(v_k + \sqrt{2w})$, $\beta_{max} \cdot \Delta s = v'^2_k/2 - w$.

Vlastní tvorba nového povrchu rázovými silami by se ideálně dala s účinností

$$\eta_{s, id} = \frac{v'^2_k/2 - w}{v_k(v_k + \sqrt{2w})} \quad (34)$$

která při $v_k = 90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ činí u pšenice asi 0,33. U reálného mlýna je tato účinnost rovna

$$\eta_s = \frac{\beta_{max} \cdot \Delta s}{w_m} \quad (35)$$

Účinnost použitého experimentálního mlýna činila jen asi 0,035, tj. byla asi desetkrát menší než v ideálním případě. Po odstranění segregace by se asi zdvojnásobila. Velkou, 20 až 30% úsporu energie přineslo dvoustupňové nebo okrouhové mletí, při němž se materiál mele na velmi hrubém síte a třídění obstarává prosévačka. Jak bylo uvedeno, velmi univerzální princip rázového mletí není příliš efektivní. Zůstávají však ještě velké rezervy ve zdokonalení jeho uspořádání a v konstrukci strojů. Rozbor naznačuje pravděpodobný směr dalšího vývoje.

Snadno měřitelná melitelnost materiálu je úměrná účinnosti η_s

$$Me = \eta_s / \beta_{max} \quad (36)$$

Vypracovaná teorie dobře postihuje fyzikální realitu a umožnila provedení úvahy. K dalšímu zpřesnění výpočtů je třeba mít alespoň experimentálně změřené rychlostní závislosti w , v'_p/v_k , popř. i v'_o/v_k v závislosti na velikosti částic.

Poděkování

Autor děkuje za technickou spolupráci ing. J. M a l o u n o v i, který v letech 1976 až 1984 konstruoval experimentální mlýn, pásový dávkovač a instaloval tyristorový dynamometr. Účastnil se také ověřovacích a předběžných měření na zařízení. Doc. ing. J. J í l k o v i, CSc., děkuje za pomoc při měření energetické spotřeby při mletí pšenice. Bývalým diplomantům ing. K. P l u c a r o v i a ing. Z. B e r n a t o v i děkuje za pomoc se všemi měřeními měrné spotřeby a síťovými analýzami, ing. P. B r o ž o v i za nakreslení obrázků.

LITERATURA

- BARBEE Jr., T. W. – SEAMAN, L. – CREWDSON, R. – CURRAN, D. R.: Dynamic fracture criteria for ductile and brittle metals. *J. Mater., JMLSA*, 7, 1972 (3): 393–401.
- BEHRENS, D.: Über die Prallzerkleinerung von Glaskugeln und unregelmässig geformten Teilchen aus Scherspan, Kalkstein und Quarzsand im Korngrößenbereich zwischen 0,1 und 0,5 mm. *Fortschr.-Ber. VDI-Z.*, R. 3., 1965 (8).
- BILANSKI, W. K.: Damage resistance of seed grains. *Trans. ASAE*, 9, 1966 (3): 360–363.
- CURRAN, D. R. – SHOCKEY, D. A. – SEAMAN, L.: Dynamic fracture criteria for a polycarbonate. *J. appl. Phys.*, 44, 1973 (9): 4025–4038.
- CURRAN, D. R. – SEAMAN, L. – SHOCKEY, D. A.: Dynamic failure in solids. *Physics Today*, 30, 1977 (1): 46–55.

- DINTER, O.: Drcení a mletí nerostných surovin. SNTL, Praha 1984.
- HENDERSON, S. M. – HANSEN, R. C.: The comotron – a rotating disk single particle impeller. *Trans. ASAE*, 17, 1974 (2): 315–318, 322.
- HNILICA, P.: Pravděpodobnostní model procesu úderového mletí. *Zeměd. Techn.*, 27, 1981a (3): 167–175.
- HNILICA, P.: Kinetika úderového mletí a granulometrické složení semletého materiálu. *Zeměd. Techn.*, 27, 1981b (5): 269–278.
- HNILICA, P.: Náhodnost dějů a přenos energie při úderovém mletí. In: *Sborník k 30. výr. založ. MF VŠZ v Praze, díl 1.*, Praha 1982: 125–135.
- HNILICA, P.: Theory of grinding process and energy transfer in an impact mill. 8th Congress CHISA, Prague, 1984, full text 14 pp., CHISA annals ö pp. 16–17 abstracts, sect. Powder Technol.
- HNILICA, P.: Comminution characteristics of hammer mill for approximate statistical model of particle movements. In: *Proc. 3rd Int. Conf. Phys. Properties Agric. Mater. and Products*, Aug. 19–23, Prague, 1985, (R. Řezníček ed.), Hemisphere Publ. Corp., A subsid. Harper and Row Publ. Inc., Washington-New York-London 1987: 1023–1030.
- HNILICA, P.: Reologie zrna v technologických procesech a manipulaci. [Monografie.] VŠZ Praha ve VN MON, Praha 1988a.
- HNILICA, P.: Theory of grinding in impact mills. In: *Sborník MF VŠZ v Praze, Praha 1988b*: 83–95.
- HNILICA, P.: Reologie a lomový mechanismus zrna, procesy jeho zpracování a transport. [Doktorská disertace.] Praha 1990 – Vysoká škola zemědělská.
- HNILICA, P.: Energetika kladívkového mlýna a charakter jeho lomové funkce pro obilnín zrna. *Zeměd. Techn.*, 40, 1994 (3): 203–218.
- HNILICA, P. – KACEROVSKÝ, O.: Některé rychlostní a energetické charakteristiky procesu úderového mletí a jeho vliv na kvalitu šrotů při skladování. [Výzkumná zpráva.] Pečky, VÚKPS 1987. 87 s.
- HNILICA, P. – THÝN, J. – PECHLÁK, B.: Analysis of hammer mill response to impulse inlet of radioactive tracer. *Powder Technol.*, 45, 1986: 183–190.
- CHUNG, C. J. – CLARK, S. J. – LINDHOLM J. C. – MCGINTY, R. J. – WATSON, C. A.: The pearlograph technique for measuring wheat hardness. *Trans. ASAE*, 18, 1975 (1): 185–189, 193.
- KATZ, R. – CARDWELL, A. B. – COLLINS, N. D. – HOSTETTER, A. E.: A new grain hardness tester. *Cereal. Chem.*, 36, 1959 (5): 393–401.
- KRASNOV, V. S. – SYROVATKA, V. I.: Zmelčenie zerna v molotkovej drobilke. *Mechaniz. i Elektriz. sel. Choz.*, 1966 (9): 14–15.
- KRUPÍČKA, B. – MALOUN, J. – HNILICA, P.: Pracoviště pro výzkum energetiky drcení zrnin. Některé ukazatele k hodnocení provozního stavu úderových mlýnů s ohledem na konstrukci hlavních funkčních prvků. [Výzkumná zpráva.] Praha, Vysoká škola zemědělská 1982. 49 s.
- KRUPÍČKA, B. – HNILICA, P. – MALOUN, J.: Rychlostní charakteristiky energetické náročnosti úderového mletí. [Výzkumná zpráva.] Praha, Vysoká škola zemědělská 1984. 34 s.
- NOVOTNÝ, L.: Snížení energetických vstupů technologických operací výroby krmených směsí. [Výzkumná zpráva.] Pečky, VÚKPS 1988. 255 s.
- OBUCHOWSKI, W. – BUSHUK, W.: Wheat hardness: Comparison of methods of its evaluation. *Cereal Chem.*, 1980 (6): 421–425.
- OKUDA, S. – CHOI, W. S.: Grinding characteristics of polymeric materials by target type fluid-energy mill. *Proc. Europ. Symp. Particle Technol.*, 1980, Amsterdam, Nederland, June 3–5, 1980: 171–183, vol. A.
- PRIEMER, J.: Untersuchungen zur Prallzerkleinerung von Einzelteilchen. *Fortschr.-Ber. VDI – Z., Reihe 3, Nr. 8*. VDI-Verlag, Düsseldorf 1965.
- RACHMATULIN, C. A. – DEMJANOV, J. A.: Pročnosť pri intenzívnych i karatkovremenných negruzkach. *Gisizdat fizmat. Lit., Moskva* 1961.
- RUMPF, H.: Physical aspects of comminution and new formulation of a law of comminution. *Powder Technol.*, 7, 1973 (3): 145–159.
- RUPPEL, P. – BRAUER, H.: Comminution of single particles by repetitive impingement on solid surfaces. 1st Congress Particle Technol., Part II, Comminution, Nürnberg, 16–18 April, 1986.
- SHOCKEY, D. A. – CURRAN, D. R. – SAEMAN, L. – ROSENBERG, J. T. – PETERSEN, C. F.: Fragmentation of rock under dynamic loads. *Int. J. Rock Mech. Sci. and Geomech. Abstr.*, 11, 1974: 303–317.
- TESAŘÍK, I.: Prodění tekutiny pórovitým prostředím. *Nakl. ČSAV, Praha* 1961.
- WASAN, D. T. – WNEK, W. – DAVIES, R. – JACKSON, M. – KAYE, B. H.: Analysis and evaluation of permeability techniques for characterizing fine particles. Part I. Diffusion and flow through porous media. *Powder Technol.*, 14, 1976: 209–228.
- ČSN 72 1085. Stanovení melitelnosti. 1973.

Došlo 21. 2. 1994

Kontaktní adresa:

Doc. ing. Petr Hnilica, DrSc., Česká zemědělská univerzita, 165 21 Praha 6-Suchbát, Česká republika

Upozornění pro autory vědeckých časopisů

Z důvodu rychlejšího a kvalitnějšího zpracování grafických příloh (grafů, schémat apod.) příspěvků zasílaných do redakce Vás žádáme o jejich dodání kromě tištěné formy i na disketách.

Týká se to samozřejmě těch grafických příloh, které byly vytvořeny v nějakém programu PC (např. CorelCHART, Quatro Pro, Lotus 1-2-3, MS Excel). Vzhledem k tomu, že nejsme schopni upravit a použít pro tisk všechny typy (formáty) grafických souborů, žádáme Vás, abyste nám také kromě originálních souborů (např. z MS Excel typ *.XLS) zaslali grafické předlohy vyexportované jako bodovou grafiku v jednom z těchto formátů:

Bitmap	*.BMP
Encapsulated Postscript	*.EPS
Graphic Interchange Format	*.GIF
Mac paint	*.MAC
MS Paint	*.MSP
Adobe Photoshop	*.PSD
Scitex	*.SCT
Targa	*.TGA
Tag Image File Format	*.TIF

Redakce časopisu

SOUČINTEL SMYKOVÉHO TŘENÍ NETRADIČNÍCH KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ VHODNÝCH PRO VÝROBU REDLERŮ

COEFFICIENT OF SMOOTHING FRICTION OF NON-TRADITIONAL CONSTRUCTION MATERIALS SUITABLE FOR PRODUCTION OF BULK CONVEYERS

P. Cyrus

University of Education, Hradec Králové, Czech Republic

ABSTRACT: The paper concerns with the tribological properties of non-traditional construction materials designed for production of some components for bulk conveyers. The research was aimed at limitation of the values of passive resistances and reaching the savings of input energy, or reduction of wear of mobile parts of the conveyer. A tribometer with sliding movement, designed by the author, has been used for this purpose. The tribometer enables to measure a coefficient of smoothing of loose and solid materials. According to the coexistence of materials measured, experiment uses appropriate construction-adjusted test bodies. These are designed and constructed in order to fix tested materials. Tribometer enables: change in load of test material, change in velocity of smoothing from 0 to 0.2 m.s⁻¹, insertion of test material in test body, easy replacement of test materials, record of frictional force in dependence on the path of smoothing. Ten materials were chosen for experiment, out of which sliding pads were made (non-glazed and glazed stainless sheet, novodur, perspex, polypropylene, non-stick, Murlubric, Werkstoff S, Fluepox and spruce wood. In addition, ten various materials for production of test samples intended for smoothing on sliding pads (wood-beech, Nerafen, Alkamid, Spolamid, non-stick, Werkstoff S – green, black, natur and bunt, Murlubric). The paper presents the results of measurements for winter wheat of moisture 14% in smoothing on mentioned materials of sliding pads. The lowest value of the coefficient of smoothing friction shows non-stick ($f = 0.17$), followed by Murlubric, Werkstoff S green and Fluepox. The highest value of the coefficient of smoothing friction had the glazed stainless sheet, $f = 0.34$. Of all tested materials usable for production of bottom sliding table and lateral sling tables of the bulk conveyer, the best should be the sheet with surface spraying of the Fluepox layer. The best materials suitable for production of driving tables of the bulk conveyer, as follows from the experiment, should be Alkamid, Spolamid, Werkstoff S, or Murlubric.

frictional properties; coefficient of smoothing friction; coefficient of internal smoothing friction; tribometer

ABSTRAKT: V článku jsou uvedeny vybrané výsledky měření součinitele smykového tření pšenice při smyku po materiálech nerez plech, teflon, plexi, novodur, polypropylen, Murlubric, Werkstoff S, Fluepox, Spolamid, dřevo. Z měřených materiálů mají nejnižší hodnoty součinitele smykového tření teflon, Murlubric, Fluepox a Werkstoff S. Dále jsou uvedeny výsledky měření součinitele smykového tření pro agrobiologické sypké materiály ječmen, proso, kukuřice, řepka a pro vybrané konstrukční materiály při smyku po podložce z nerezového plechu. V článku je také popsáno autorem navržené experimentální zařízení (tribometr s posuvným pohybem) i metodika měření.

třecí vlastnosti; součinitel vnějšího smykového tření; součinitel vnitřního smykového tření; tribometr

ÚVOD

Každé snížení hodnot pasivních odporů při pohybu přepravovaného sypkého zemědělského materiálu nebo pohybujících se pracovních částí redleru přináší úsporu vstupní energie nutné pro pohon. Jednou z cest jak snížit příkon těchto dopravních zařízení je použití nových vhodných konstrukčních materiálů pro výrobu některých exponovaných součástí dopravníku. Tím se hodnota pasivních odporů zmenší a zákonitě se uspoří i provozní energie.

V posledních letech se důležitými otázkami zjišťování tribologických vlastností různých materiálových dvojic vhodných pro použití v zemědělském strojírenství zabývalo u nás i v zahraničí více autorů (např. Fiala, 1977; Szeri, 1980; Anděl, 1981; Budíček, Kavan, 1981; Majzlík, 1984; Polzer, Meisner, 1984; Balassy, 1985; Sedláček et al., 1985; Cyrus, 1989a, 1990b, 1992; Bogdanowicz, 1989).

Většina výzkumných prací je věnována důležitým úzkým specializovaným úkolům zaměřeným na problémy praxe. Dosažené výsledky v mnoha případech nelze zevše-

obecnit a jejich použití v konstrukční práci je omezeno rozdílnými podmínkami, při kterých bylo měření uskutečněno. U některých nových materiálů (např. na bázi plastických hmot) chybí některé fyzikální údaje. Mezi takové patří i třecí vlastnosti a zejména součinitel smykového tření.

Příspěvkem k řešení této problematiky je i výzkum týkající se zjišťování tribologických vlastností netradičních konstrukčních materiálů navrhovaných pro výrobu některých součástí redlerů.

MATERIÁL A METODY

Třecí vlastnosti různých materiálových dvojic byly zjišťovány na tribometru s posuvným pohybem (Cyrus, 1990c).

Tribometr umožňuje měřit součinitel smykového tření sypkých i pevných materiálů. Podle koexistence měřených materiálů se při experimentu používají příslušná konstrukčně uzpůsobená zkušební tělesa. Ta jsou navržena a zkonstruována tak, aby bylo možné fixovat dané zkoušené materiály.

Tribometr umožňuje:

- změnu zatížení zkoušeného materiálu,
- změnu rychlosti smyku,
- uložení zkoušeného materiálu ve zkušebním tělese,
- snadnou výměnu zkoušených materiálů,
- zřadnou třecí síly v závislosti na dráze smyku.

Technické údaje tribometru: délka 1 100 mm, šířka 450 mm, výška 800 mm, rychlost posuvu – plynule měnitelná v rozsahu 0–0,3 m.s⁻¹.

Měření vnějšího a vnitřního součinitele smykového tření sypkých materiálů

Pro sypký materiál uložený ve zkušebním tělese (Cyrus, 1986) a pro danou kluznou podložku lze určovat součinitel vnějšího smykového tření za pohybu i za klidu. Při zjišťování součinitele smykového tření za klidu určujeme maximální hodnotu třecího odporu v okamžiku, kdy dojde k pohybu zkušebního tělesa z předcházejícího klidu.

Součinitel smykového tření vypočteme ze vztahu

$$f = \frac{F_t}{F_n} \quad (1)$$

kde: f – součinitel smykového tření (1)

F_n – normálové zatížení sypkého materiálu (N)

F_t – třecí odpor (N)

Na obr. 1 je patrný detail pracovní části tribometru uzpůsobeného pro určování součinitele vnějšího smykového tření sypkých materiálů při smyku po kluzné podložce.

Metoda určení vnitřního součinitele smykového tření sypkého materiálu

Na obr. 2 je uvedeno zařízení tribometru pro stanovení vnitřního součinitele smykového tření sypkých materiálů.

Obrázek ukazuje částečně sestavené zařízení před smykovou zkouškou. Vnitřní prostor tělesa válce (1) a kroužku (6) je vyplněn sypkým materiálem (5). Přítlačný válec (2), přítlačná hvězdice (3) a závaží (8) jsou umístěny mimo zařízení na základové desce (9).

Součinitel vnitřního smykového tření sypkého materiálu určíme ze vztahu (2) – (Fedá, 1977)

$$f = \frac{\tau}{\sigma} \quad (2)$$

kde: σ – normálové napětí vzniklé v sypkém materiálu od zatížení F_n (Pa)

$$\sigma = \frac{F_n}{S} \quad (3)$$

τ – tečné napětí vzniklé v rovině smyku sypkého materiálu (Pa)

$$\tau = \frac{F_t}{S} \quad (4)$$

kde: F_n – zatížení sypkého materiálu (N)

F_t – třecí odpor (N)

S – plocha průřezu odpovídající vnitřnímu průměru tělesa válce vyplněného sypkým materiálem (m²)

Metoda určení součinitele smykového tření pro dvojici tuhých kluzných materiálů

Zkušební těleso podle obr. 3 bylo zkonstruováno tak, aby bylo možné upínat zkoušené kluzné materiály různé tloušťky t_1 . Pomocí šroubů (5) se nastaví spojovací deska (2) do takové polohy, která umožňuje, aby kluzný materiál (6) byl vysunut o hodnotu t . Tím je zaručeno pouze styk zkoušeného kluzného materiálu (6) s kluznou podložkou (4) (Cyrus, 1990a).

Součinitel smykového tření pro danou dvojici materiálů se vypočte ze vztahu (1).

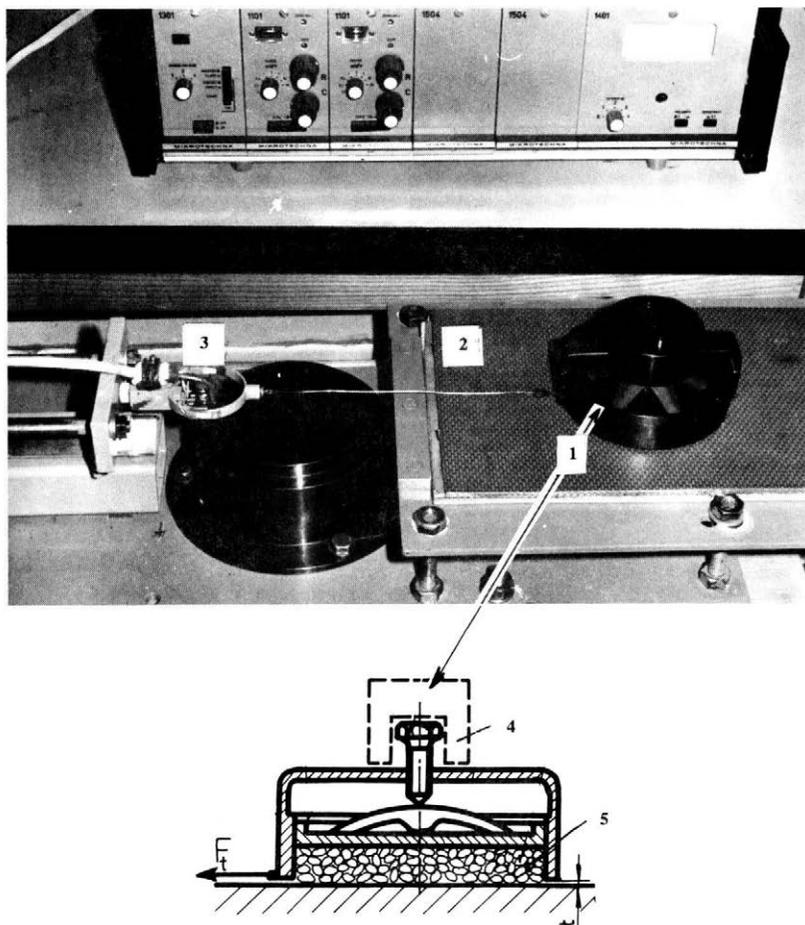
Hodnota t se nastaví pomocí listové měřky na hodnotu 0,5 mm. Zkoušený materiál se položí na kluznou podložku a na něj se nasune zkušební těleso II tak, aby spojovací deska přiléhala na zkoušený materiál, přičemž boční šrouby jsou nedotaženy. Měrkou se postupně podloží pravá a levá čelní deska zkušebního tělesa II a následně se dotáhnou boční šrouby (5) zajišťující pravou a levou čelní desku.

Měřicí čidlo

Pro snímání a možnost záznamu třecí síly v závislosti na dráze smyku měřeného materiálu bylo navrženo měřicí tenzometrické čidlo (Cyrus, 1989b). Elektrický signál, úměrný snímané třecí síle F_t , byl přiveden na vstup zesilovače systému M 1000. Záznam třecí síly F_t na dráze smyku byl pořízen souřadnicovým zapisovačem BAK 4 TK.

Pohonná jednotka

Pro pohon tribometru byla zvolena elektrická ruční vrtačka typu EV 513 D s možností nastavení dvou stupňů rychlostí pomocí mechanické převodovky s ozubenými koly. Pro větší rozsah otáček byl použit tyristorový regulátor, který umožňoval plynulou změnu



1. Celkový pohled na tribometr uzpůsobený pro měření vnějšího smykového tření – General view of tribometer adjusted for measurement of external smoothing friction

1 – zkušební těleso, 2 – kluzná podložka, 3 – měřicí čidlo, 4 – závaží, 5 – sypká hmota: 1 – test body, 2 – sliding pad, 3 – measuring sensor, 4 – weight, 5 – loose material

otáček vřetene vrtačky. Ve vřetenu vrtačky byla upnuta řemenice pro navržený řemenový převod.

Charakteristika materiálů

Vzorky sypkých zemědělských materiálů

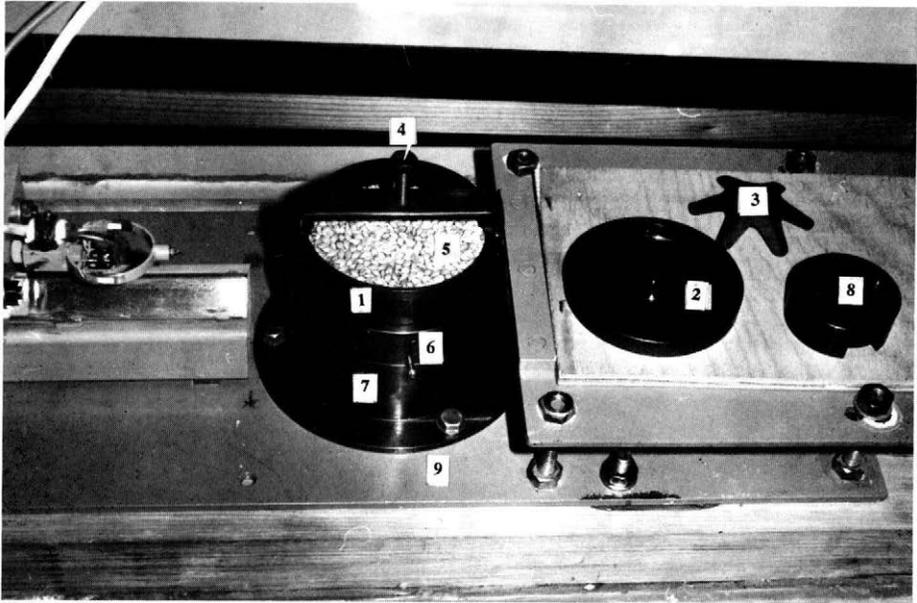
Původ vzorků a popis odběru materiálu je popsán v předešlé práci (Cyrus, 1994).

Hmotnost sušiny tisíce zrn

Postup při výpočtu hmotnosti sušiny a při zjišťování vlhkosti obilí uvádí Cyrus (1994).

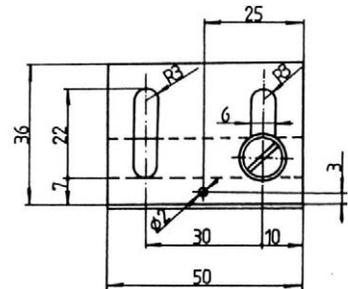
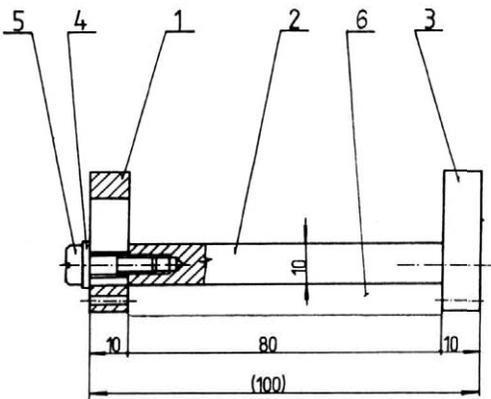
Rozměry zrn

Základní rozměrové parametry zrn sypkého zemědělského materiálu (Cyrus, 1994) jsou shrnuty v tab. I.



2. Zařzení pro stanovení vnitřního součinitele smykového tření sypkých materiálů – Device for determination of internal coefficient of smooth friction of loose materials

1 – těleso válce, 2 – přitlačný válec, 3 – přitlačná hvězdice, 4 – šroub, 5 – sypký materiál, 6 – kroužek, 7 – těleso, 8 – závaží, 9 – základová deska; 1 – body of roll, 2 – pressure roll, 3 – pressure spider, 4 – screw, 5 – loose material, 6 – ring, 7 – body, 8 – weight, 9 – basic table



3. Zkušební těleso II – Test body II

1 – levá čelní deska, 2 – spojovací deska, 3 – pravá čelní deska, 4 – podložka, 5 – šroub, 6 – zkoušený kluzný materiál; 1 – left frontal table, 2 – connecting table, 3 – right frontal table, 4 – pad, 5 – screw, 6 – test sliding material

I. Základní rozměrové parametry zrn sypkého zemědělského materiálu – Basic size parameters of grains of loose agricultural material

Agrobiologický materiál ¹	a (mm)	b (mm)	c (mm)	m_s (g)
Pšenice Viginta ²	6,4 ± 0,25	3,5 ± 0,20	3,0 ± 0,14	37,7
Oves Pan ³	9,8 ± 0,40	2,4 ± 0,20	3,0 ± 0,25	28,2
Ječmen Kredit ⁴	7,6 ± 0,30	2,8 ± 0,25	3,7 ± 0,20	41,0
Proso ⁵	2,8 ± 0,11	2,2 ± 0,10	1,7 ± 0,10	7,4
Řepka ⁶	2,3 ± 0,12	1,8 ± 0,10	1,9 ± 0,10	4,9
Kukuřice Dea ⁷	9,8 ± 0,20	8,4 ± 0,40	5,9 ± 0,30	238,5

počet měření $n = 10$ – number of measurements $n = 10$

¹agrobiological material, ²Viginta wheat, ³Pan oats, ⁴Kredit barley, ⁵millet, ⁶rape, ⁷Dea corn

II. Materiál pro výrobu kluzných podložek – Material for production of sliding pads

Číslo	Materiál	Tloušťka ¹ t_1 (mm)	Jakost povrchu ² R_a (μm)
1	nerez plech neleštěný ³	4	1,60
2	nerez plech leštěný ⁴	4	0,04
3	novodur	5	0,06
4	plexi (polymethylmetakrylát)	5	0,04
5	polypropylen	5	0,05
6	teflon	10	1,5
7	Murlubric (NSR)	10	–
8	Werkstoff S (NSR)	10	–
9	Fluepox (nástřík na základní materiál) ⁵	4	–
10	smrkové dřevo (vlhkost 8 %) ⁶	10	–

¹thickness, ²quality of surface, ³non-glazed stainless sheet, ⁴glazed stainless sheet, ⁵spraying to base material, ⁶spruce wood (moisture of 8%)

Vzorky konstrukčních materiálů

Pro experiment bylo vybráno deset různých materiálů, z kterých byly vyrobeny kluzné podložky o rozměrech 350 mm x 170 mm. U některých kluzných podložek byla určována drsnost povrchu. Blíže údaje jsou uvedeny v tab. II.

Dále bylo vybráno deset materiálů pro výrobu zkušebních vzorků o rozměrech 80 mm x 40 mm, určených pro smykání po kluzných podložkách (tab. III).

Drsnost povrchu

Jakost povrchu vybraných kluzných podložek byla určena stejným postupem, jaký je popsán v dřívější práci (Cyrus, 1994).

III. Materiál pro výrobu zkušebních vzorků – Material for production of test samples

Číslo	Materiál	Tloušťka ¹ t_1 (mm)
I	tvrdé bukové dřevo ²	10
II	Nerafen	3
III	Alkamid	12
IV	Spolamid	10
V	teflon	12
VI	Werkstoff S (zelený) ³	13
VII	Werkstoff S (černý) ⁴	5
VIII	Werkstoff S (natur)	7
IX	Werkstoff S (bunt)	9
X	Murlubric	11

¹thickness, ²hard beech wood, ³green, ⁴red

VÝSLEDKY A DISKUSE

Počáteční podmínky měření

Z provozních podmínek redleru bylo stanoveno normálové zatížení sypkého materiálu v rozsahu 10 až 15 N. Tato hodnota zatížení odpovídá vrstvě použité pšenice 0,2 až 0,3 m.

Normálové zatížení působící na zkoušený kluzný materiál určený pro výrobu unášecích desek bylo stanoveno na hodnotu 22 až 30 N pro rozměr plochy vzorku 3 200 mm². Tato plocha odpovídá průměru zkušebního tělesa I 100 mm.

Rychlost smyku byla zvolena na hodnotu 0,2 m.s⁻¹, a to s ohledem na technické parametry tribometru a uložení obílek ve zkušebním tělese.

Počet měření $n = 7$ byl určen na základě dvoufázového náhodného výběru pro požadovanou přesnost měření 0,01 a pro spolehlivost $p = 95 \%$.

Obílkly byly do zkušebního tělesa nasypány rovnoměrně a objem byl předem odměřen v laboratorní kádince. Další postup zkoušky byl proveden přesně podle popsané metodiky měření. Vzájemná poloha obílek ve zkušebním tělese nebyla již měněna (např. stlačováním, vibracemi apod.).

Vliv materiálu kluzné podložky

V tab. IV jsou shrnuty výsledky pro ozimou pšenici o vlhkosti 14 % (a) při smyku po různých typech ma-

IV. Vliv materiálu kluzné podložky na smyk ozimé pšenice o vlhkosti v_v 14 % a zatížení $F_N = 12$ N (a) a o vlhkosti v_v 19 % a zatížení $F_N = 12$ N (b); počet měření $n = 7$ - The effect of material of a sliding pad on smoothing of winter wheat of moisture v_v of 14% and load $F_N = 12$ N (a) and of moisture v_v of 19% and load $F_N = 12$ N (b); number of measurements $n = 7$

Položka č.	Materiál	Střední hodnota ¹ f (I)		Směrodatná odchylka ²		Rozsah f pro spolehlivost ³ $p = 95 \%$	
		a	b	a	b	a	b
1	nerez plech neleštěný ⁴	0,27	0,44	0,017	0,007	0,261–0,283	0,433–0,450
2	nerez plech leštěný ⁵	0,34	0,50	0,024	0,022	0,314–0,357	0,485–0,520
3	novodur	0,32		0,018		0,309–0,336	
4	plexí ⁶	0,34		0,010		0,324–0,352	
5	polypropylen	0,28		0,013		0,264–0,286	
6	teflon	0,17		0,007		0,166–0,173	
7	Murlubric	0,20		0,006		0,199–0,214	
8	Werkstoff S	0,20		0,009		0,195–0,215	
9	Fluepox	0,20	0,30	0,010	0,009	0,199–0,215	0,290–0,310
10	smrkové dřevo ⁷ (ve směru vláken)	0,25		0,012		0,235–0,256	

¹mean value, ²standard deviation, ³range f for reliability, ⁴non-glazed stainless sheet, ⁵glazed stainless sheet, ⁶perspex, ⁷spuce wood (in the direction of fibres)

teriálů kluzných podložek. Nejnižší hodnotu součinitele smykového tření má teflon (č. 6) $f = 0,17$. Dále následují podložky vyrobené z materiálů Murlubric (č. 7), Werkstoff S (č. 8), Fluepox (č. 9), u kterých byla zjištěna hodnota $f = 0,2$. U podložky ze dřeva (č. 10) je $f = 0,25$, u nerez plechu neleštěného (č. 1) $f = 0,27$, u polypropylenu (č. 5) $f = 0,28$. Nejvyšší hodnotu součinitele smykového tření má naopak nerez plech leštěný (č. 2), kde $f = 0,34$.

Porovnáme-li výsledky měření pro nerez plech neleštěný (č. 1) a nerez plech leštěný (č. 2), zjistíme, že hladší povrch v tomto případě působí negativně na snížení hodnoty součinitele smykového tření. Tato skutečnost je způsobena adhezní složkou tření.

Z měřených materiálů reálně použitelných pro výrobu spodní kluzné desky a bočních kluzných desek by nejlépe vyhovoval plech s povrchovým nástřikem vrstvy Fluepoxu.

Pro komplexnější pohled na třecí proces sypkého materiálu (pšenice) dopravovaného redlerem byla také určena hodnota vnitřního součinitele smykového tření $f_v = 0,49$.

V tab. IV jsou uvedeny také výsledky měření pro ozimou pšenici s vlhkostí 19 % (b). Podmínky měření jsou stejné jako u pšenice s vlhkostí 14 %. Nejnižší hodnotu součinitele smykového tření vykazuje podložka (č. 9) s fluepoxovou vrstvou. Naopak nejvyšší je u podložky z nerezového plechu leštěného (č. 2), kde hodnota součinitele vzrostla na $f = 0,5$.

Porovnáme-li výsledky z tab. IV, je zřejmé, že s rostoucí vlhkostí pšenice vzrůstá i hodnota součinitelů smykového tření měřených materiálů. U podložky s fluepoxovou vrstvou se zvýší hodnota součinitele z 0,2 na 0,3. U podložky č. 2 a č. 1 (nerez plech) je vzrůst hodnoty ještě patrnější.

V tab. V jsou uvedeny hodnoty příslušející nerezovému plechu neleštěnému (č. 1) (a) a kluzným materiálům I až X. Nejnižší hodnotu součinitele smykového tření má opět teflon (V), následují materiály Werkstoff

(VI, VII, VIII, IX) s hodnotou $f = 0,12$, Alkamid (III) $f = 0,175$ a Spolamid (IV) $f = 0,18$. Murlubric (X) má hodnotu součinitele $f = 0,155$.

Výsledky uvedené v tab. V ukazují na vhodnou volbu materiálů Alkamid a Spolamid (výroba ČR pro zhotovení unašecích desek). Pokud bychom měli k dispozici materiály Werkstoff firmy MURTFELD (NSR) a pokud by byly cenově dostupné, je možné je s výhodou použít. Třecí odpory od unašecích desek budou potom nižší a lze zákonitě předpokládat i úsporu příkonu.

V tab. V jsou také uvedeny hodnoty součinitelů smykových tření pro podložku vyrobenou s fluepoxovou vrstvou (č. 9) (b) a kluzné materiály I, II, III, IV, V, VI, X. Nejnižší hodnota součinitele tření je u Spolamidu (VI) $f = 0,12$ a dále u Murlubricu (X) $f = 0,13$ a Alkamidu (III) $f = 0,14$.

Výsledky měření ukazují na vhodnost použití fluepoxové vrstvy pro nástřik na spodní kluznou podložku i na boční desky dopravníku. Její příznivé kluzné vlastnosti se projeví i ve vztahu k materiálům vhodným pro výrobu unašecích desek redleru.

Podle údajů výrobce, VÚ materiálu Praha-Počernice, je spotřeba nástřikové hmoty Fluepox 1 kg na 5 m².

V tab. VI jsou pro porovnání uvedeny výsledky měření součinitele smykového tření pro sypké materiály – pšenici, ječmen, oves, kukuřici a řepku – při smyku po kluzné podložce vyrobené z nerezového neleštěného plechu.

ZÁVĚR

Použitý tribometr i jednotlivá zkušební tělesa zkonstruovaná pro fixování zkoušených materiálůvých dvojic se osvědčily.

Uvedené výsledky měření součinitele smykového tření pšenice dosažené při experimentu pro ocelový plech nerezový a součinitel vnitřního smykového tření korespondují s výsledky, které uvádějí např. B a l a s -

V. Součinitele smykového tření u podložky z neleštěné oceli (a) a u podložky s fluepoxovou vrstvou (b) při zatížení F_N 26 N; počet měření $n = 7$ – Coefficients of smoothing friction in pad made of non-glazed stainless steel (a) and in pad with fluepox layer (b) at load $F_N = 26$ N; number of measurements $n = 7$

Vzorek č.	Materiál	Střední hodnota ¹ f (1)		Směrodatná odchylka ²		Rozsah f pro spolehlivost ³ $p = 95$ %	
		a	b	a	b	a	b
I	tvrdé bukové dřevo ⁴	0,19	0,17	0,010	0,011	0,182–0,197	0,160–0,180
II	Nerafen	0,20	0,17	0,011	0,008	0,193–0,206	0,162–0,177
III	Alkamid	0,175	0,14	0,009	0,012	0,168–0,181	0,135–0,154
IV	Spolamid	0,18	0,12	0,009	0,008	0,176–0,183	0,103–0,126
V	teflon	0,09	0,14	0,011	0,013	0,084–0,100	0,135–0,155
VI	Werkstoff S (zelený)	0,12	0,14	0,006	0,011	0,114–0,126	0,131–0,148
VII	Werkstoff S (černý)	0,125		0,005		0,110–0,125	
VIII	Werkstoff S (natur)	0,12		0,006		0,113–0,126	
IX	Werkstoff S (bunt)	0,125		0,008		0,118–0,132	
X	Murlubric	0,155	0,13	0,008	0,011	0,150–0,160	0,120–0,136

¹mean value, ²standard deviation, ³range f for reliability, ⁴hard beech wood

VI. Součinitele smykového tření pro sypké materiály při smyku po kluzné podložce z nerezového neleštěného plechu (kluzná podložka č. 1) při zatížení $F_N = 12$ N – Coefficients of smoothing friction for loose materials at smoothing on sliding pad made of non-glazed stainless sheet (sliding pad 1) at load $F_N = 12$ N

Materiál	Vlhkost ¹ v_v (%)	Střední hodnota ² (1)	Směrodatná odchylka ³	Rozsah f pro spolehlivost ⁴ $p = 95$ %
Pšenice ⁵	14,0	0,27	0,017	0,261–0,283
Ječmen Kredit ⁶	14,2	0,24	0,016	0,232–0,254
Oves Pan ⁷	13,2	0,25	0,024	0,243–0,269
Proso ⁸	14,5	0,19	0,016	0,187–0,193
Kukuřice Dea ⁹	13,5	0,25	0,012	0,244–0,262
Řepka ¹⁰	13,1	0,20	0,005	0,208–0,211

¹moisture, ²mean value, ³standard deviation, ⁴range f for reliability, ⁵wheat, ⁶Kredit barley, ⁷Pan oats, ⁸millet, ⁹Dea corn, ¹⁰rape

sy (1985), Cyrus (1990) nebo Sedláček et al. (1988).

U materiálů Murlubric a Werkstoff jsou dosaženy výsledky pro ocelový plech rovněž srovnatelné s hodnotami, které uvádí firma Murdfeldt Kunststoffe. Agrobiologický sypký materiál ještě měřen ve dvojici s materiály Murlubric, Werkstoff S, Fluepox, teflon a jinými uvedenými plastickými hmotami nebyl. Jsou to tedy původní výsledky.

LITERATURA

- ANDĚL, A.: Mechanické pochody a pochody zpracování partikulárních látek. Praha, ČVUT 1981. 142 s.
- BALASSY, Z.: On friction properties of corn crops. In: Sborník mechanizační fakulty VŠZ v Praze. Praha, MON 1985.
- BOGDANOWICZ, J. – FRONTCAK, J. – KRAN, B.: Testing method of triticale grain kinetic friction on various structural materials. In: 4th international conference Physical properties of agricultural materials. Rostock 1989: 83–87.
- BUDÍČEK, L. – KAVAN, V.: Mechanické vlastnosti krmiv pro konstrukci a provoz krmivářské techniky. Zeměd. Techn., 27, 1981 (5): 279–297.

- CYRUS, P.: Zařízení pro měření vnějšího součinitele smykového tření sypkých materiálů. A. O. č. 243 361. 1986.
- CYRUS, P.: Coefficient of shearing friction of grain and a set of grains during the shearing on sliding support plate. In: 4rd international conference Physical properties of agricultural materials. Rostock 1989a: 118–112.
- CYRUS, P.: Zařízení pro upevnění deformačního prstence tensometrického siloměrného čidla. A. O. č. 266 443. 1989b.
- CYRUS, P.: Tribometr pro měření tribologických vlastností sypkých zemědělských materiálů. [Závěrečná výzkumná zpráva.] Hradec Králové 1990a. 25 s.
- CYRUS, P.: Zjišťování tribologických vlastností vhodných materiálůvých dvojic navrhovaných pro výrobu redlerů z hlediska snižování hluku a minimalizace třecích odporů. [Výzkumná zpráva.] Hradec Králové 1990b. 39 s.
- CYRUS, P.: Tribometr pro měření třecích vlastností sypkých zemědělských materiálů. Zeměd. Techn., 36, 1990c (3): 151–160.
- CYRUS, P.: The coefficient of shearing friction of wheat at shear against Werkstoff S and Murlubric materials. In: The international scientific conference Trends in agricultural engineering. Praha 1992: 86–90.
- CYRUS, P.: Součinitel smykového tření obiliek pšenice při smyku po materiálech nerez plech, plexi, novodur, polypropylen. Zeměd. Techn., 40, 1994 (3): 161–176.

- FEDA, J.: Základy mechaniky partikulárních látek. Praha, ČSAV 1977. 347 s.
- FIALA, J.: Tření zemědělských materiálů. Zeměd. Techn., 11, 1965 (4): 205–220.
- MAJZLÍK, R.: Řešení technologie skladování surovin a krmných směsí v zásobnících. [Závěrečná zpráva.] Pečky, Výzkumný ústav krmivářského průmyslu a služeb 1984. 75 s.
- POLZER, G. – MEISNER, F.: Osnovy trenia a iznašivania. Moskva, Mašinstrojenie 1984. 264 s.
- SEDLÁČEK, V. – PROCHÁZKA, S. – SCHELLER, R. – CYRUS, P. – BAYER, J.: Tribologické vlastnosti agrobiologických materiálů. [Závěrečná výzkumná zpráva.] Praha, Vysoká škola zemědělská 1985. 132 s.
- SEDLÁČEK, V. – PROCHÁZKA, S. – SCHELLER, R. – CYRUS, P. – NOVÁK, L. – BAYER, J.: Měření koeficientu smykového tření agrobiologických materiálů. [Dílčí zpráva výzkumného úkolu.] Praha, Vysoká škola zemědělská 1988. 72 s.
- SZERI, Z.: Tribology. Washington, New York, London, Hemisphere Publishing Corporation 1980. 548 s.
- ČSN 01 4450. Drsnosti povrchu. 1961.
- Prospekty firmy Murdfeldt, Dortmund, NSR.

Došlo 10. 2. 1994

Kontaktní adresa:

Doc. ing. Pavel C y r u s , CSc., Vysoká škola pedagogická, nám. Svobody 30, 501 91 Hradec Králové, Česká republika

SPEVNENIE KOVOVÝCH MATERIÁLOV V PROCESE OPOTREBENIA V PÔDE

HARDENING OF METALLIC MATERIALS IN THE PROCESS OF WEAR IN SOIL

R. Tolnai, M. Hammad

University of Agriculture, Nitra, Slovak Republic

ABSTRACT: Due to intensive abrasive wear in soil particles of abrasive cause a permanent deformation by means of shifts inside the crystals and mutual displacements of the whole crystals. Crystals of metals deform and rank in certain direction, grain softens, internal torsion rises which increases strength a reduces formability of metal. This mechanism of workable deformation results in hardening. Experiments conducted study the effect of mechanic and chemical factors of soil wearing environment on mechanic properties of worn surfaces of metallic materials and quantify a rate of increase of micro-hardness, depth and size of hardening of surface layer. The results of an experiment performed with ferrite-perlite, ferrite-sorbite, austenitic and martensitic steel and white cast iron confirmed that hardening is manifested in different way on each investigated material what depends on physico-chemical properties of the given material. Intensity of hardening depends on a size of worn pressures, but is affected also by character of soil environment. Results of chemical analysis of materials used as well as results of measurement of macro- and micro-hardness are in Tables and assessed in Figures. Micro-hardness of worn surface of a sample, depth of hardening and degree of hardening depend not only on size of acting load, but on the character and chemical composition of soil wearing environment as well. Materials of the ferrite-perlite, ferrite-sorbite and austenitic structures harden in connection with their plasticity. Materials of the martensitic and ledeburitic types of structures (white cast iron) did not show any hardening.

abrasive wear; hardening; soil; mechanic factors

ABSTRAKT: Opotrebenie kovových materiálov v pôdnych podmienkach je proces zložitý a diskretný. Opotrebúvajúci proces má vplyv na zmenu mechanických vlastností povrchovej vrstvy materiálov. Pre vysvetlenie degračných procesov prebiehajúcich v povrchovej vrstve opotrebovávaných materiálov je dôležité hodnotenie mechanických účinkov prostredia na materiál a následného spevnenia materiálu. Vykonané experimenty sú orientované na kvantifikáciu mechanických účinkov prostredia na mikrotvrdosť a na spevnenie v povrchovej vrstve súboru materiálov opotrebovávaných v definovaných podmienkach.

abrazívne opotrebenie; spevnenie; pôda; mechanické faktory

ÚVOD

Vplyvom intenzívneho abrazívneho opotrebenia v pôde spôsobujú častice abrazíva trvalú deformáciu posuvmi vo vnútri kryštálov a vzájomnými posuvmi celých kryštálov. Kryštály kovov sa deformujú a zaraďujú v určitom smere, zrno sa zjemňuje, stúpa vnútorné pnutie, ktoré zvyšuje pevnosť a znižuje tvárnosť kovu. Výsledkom tohto mechanizmu tvárnej deformácie je spevnenie.

Doterajšie výsledky výskumu autora (Tolnai et al., 1990) jednoznačne uvádzajú, že v abrazívnom procese opotrebenia pôsobí abrazívne médium súborom mechanických a chemických vplyvov na materiál. Medzi pôsobiacimi vplyvmi sú vzájomné súvislosti, napr. mechanické účinky podmieňujú intenzitu chemických vplyvov a tým aj intenzitu procesu opotrebenia.

Na posúdenie oteruvzdornosti je dôležitá kvantifikácia mechanických vplyvov na materiál v procese opotrebenia. Podľa autorov Chruščov, Babičev (1966) nie sú významné z hľadiska oteruvzdornosti zmeny mechanických vlastností materiálov v povrchovej vrstve, lebo pri oddeľovaní častíc z opotrebovávaného materiálu sa musí prekročiť pevnosť materiálu, čo znamená maximálne plasticky deformovať materiál, a teda ho i spevniť.

Z toho vyplýva, že žiadna predchádzajúca plastická deformácia nemôže viac ovplyvniť opotrebovaný povrch ako vlastný abrazívny proces opotrebenia. Túto teóriu možno považovať za správnu, ale len v podmienkach abrazívneho opotrebovacieho procesu pri pôsobení výlučne mechanických faktorov opotrebovacieho procesu.

Zmeny mechanických vlastností povrchu opotrebovaného materiálu závisia od podmienok a parametrov

procesu opotrebenia a od chemického zloženia a štruktúrného stavu materiálov.

Pri štúdiu procesov abrazívneho opotrebenia možno aplikovať i poznatky z procesov trieskového obrábania kovov. B u d a et al. (1983) uvádzajú, že pri oddeľovaní triesky z obrábaného materiálu sa materiál do určitej hĺbky plasticky deformuje. Deformácia je najväčšia tesne pod povrchom a postupne s hĺbkou zaniká.

MATERIÁL A METÓDA

Experimenty boli vykonané na nasledovných materiáloch:

1. oceľ 12 060 bola použitá i ako porovnávací etalón, štruktúry feriticko-perlitickej s feritom ohraničujúcim zrná jemného lamelárneho perlitu, HV 230, lom: dominantným typom porušenia je transkryštalický štiepný lom s riečkovým mikroreliefom, KCU2 = 25 J.cm⁻²;

2. oceľ 12 060 v kalenom stave, štruktúry heterogénnej martenzitickej, HV 685, lom: dominantným typom porušenia je interkryštalický lom, KCU2 = 7,5 J.cm⁻²;

3. oceľ 17 027 je oceľ korozivzdorná, štruktúry homogénnej feriticko-sorbitickej, HV 260, lom: dominantným typom porušenia je interkryštalický lom a transkryštalický kvazištiepný lom, hranice zŕn nesú znaky mikroplastickej deformácie, KCU2 = 40 J.cm⁻²;

4. oceľ 17 348 je oceľ odolná voči medzikryštálovej korózii, štruktúry austenitickej s výraznými hranicami

zŕn, HV 185, lom: dominantným typom porušenia je transkryštalický jamkový lom nasvedčujúci o vyššej húževnatosti materiálu, KCU2 = 125 J.cm⁻²;

5. biela liatina (Cr, Mo, Ni) v stave po odliatí, štruktúry tvorenej primárnymi kryštálmi ledeburitického cementitu uloženého v pretransformovanom ledeburite (nadeutektická biela liatina), HV 720, lom: prebieha prevažne dekohéziou fázového rozhrania, KCU2 = 1,3 J.cm⁻².

Výsledky chemickej analýzy použitých materiálov sú uvedené v tab. I a makrotvrdosti v tab. II.

Príprava vzoriek na meranie spevnenia bola vykonaná opotrebením funkčnej plochy vzoriek na zariadení pôdny kanál – PK 2000 (T o l n a i et al., 1978).

Opotrebovacie prostredia a podmienky opotrebenia boli nasledovné:

A1 – hnedozem + kremičitý piesok v pomere 3 : 1, zvlhčené H₂O, vlhkosť W = 14 %, tlak P = 0,05 MPa;

A2 – hnedozem + kremičitý piesok v pomere 3 : 1, zvlhčené H₂O, vlhkosť W = 14 %, tlak P = 0,15 MPa.

Relatívna rýchlosť pohybu vzoriek bola 3 km.h⁻¹. Vzorky vykonali relatívnu dráhu 1 000 m.

Htбка spevnenia bola určená meraním makrotvrdosti na šikmých rezoch (obr. 1). Makrotvrdosť bola meraná makrotvrdomerom PMT-3 zaťažovacou silou 1 N podľa ČSN 42 0375. Vzhľadom na to, že pri meraní makrotvrdosti štruktúry môže pri jednotlivých zrnách tej istej fázy vzniknúť pomerne veľký rozptyl tvrdosti, ktorý je spôsobený rôznou kryštalografickou orientáciou a nerovnakou hrúbkou meraných zŕn, a aby bola dosiahnutá

I. Výsledky chemickej analýzy skúšaných materiálov – Results of chemical analysis of tested materials

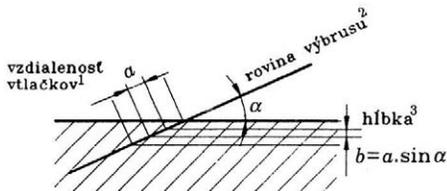
Prvky ¹	Obsah prvkov (%) v materiáloch ²			
	12 060	17 027	17 348	biela liatina ³
C	0,75	0,26	0,03	3,28
Mn	0,69	0,374	0,97	0,934
Si	0,31	0,35	0,35	0,325
P	0,01	0,033	0,028	0,05
S	0,04	0,035	0,017	0,05
Cr	0,09	16,96	17,54	28,18
Ni	0,064	1,66	13,5	1,34
Mo	0,086	0,12	2,46	1,98
V	0,011	0,035	–	0,16
Ti	–	–	0,03	–
Cu	0,1	0,24	–	0,14
Al	0,15	0,2	–	–
Pb	–	0,06	–	0,124
Zn	0,079	–	–	–
Ag	0,039	0,075	–	–

¹elements, ²content of elements (%) in materials, ³white cast iron

II. Hodnoty makrotvrdosti použitých materiálov – Values of macro-hardness of tested materials

Material ¹	12 060	12 060 kalená ²	17 027	17 348	Biela liatina ³
Tvrdosť ⁴ HV 30	230	685	260	185	720

¹material, ²cast steel, ³white cast iron, ⁴hardness



1. Spôsob prípravy a umiestnenia vtláčkov pri meraní mikrotvrdości povrchovej vrstvy – The method of preparation and placement of impressions during measurement of micro-hardness of surface layer

¹distance of impressions, ²level of thin section, ³depth

žadovaná preukaznosť výsledkov, mikrotvrdość bola meraná v troch rovinách vzdialených od seba 1 mm a postavených kolmo na okraj exponovaného povrchu. Vpichy skúšobným telieskom mikrotvrdomeru boli postupne za sebou od spevneného povrchu smerom k základnému materiálu dovtedy, kým nebola dosiahnutá mikrotvrdość základného materiálu (určená hĺbka spevnenia). Stupeň spevnenia bol vyjadrený pomocou ukazovateľa relatívneho spevnenia podľa vzťahu:

$$\varphi = \frac{MH_s - MH_z}{MH_z} \cdot 100 \quad (\%)$$

kde: φ – relatívne spevnenie (%)
 MH_s – mikrotvrdość spevnenej vrstvy (HVM)
 MH_z – mikrotvrdość základného materiálu (HVM)

VÝSLEDKY

Výsledky meraní mikrotvrdości feriticko-perlitickej, feriticko-sorbitickej, austenitickej, martenzitickej ocele a bielej liatiny po opotrebení v použitých opotrebovacích prostrediach sú uvedené v tab. III a vyhodnotené na obr. 2 až 7. U martenzitickej ocele a bielej liatiny

nebolo zistené nijaké mechanické ovplyvnenie povrchovej vrstvy. Hodnoty mikrotvrdości v celom rozsahu merania boli konštantné.

Mechanické účinky abrazívneho média v procese opotrebenia jednoznačne ovplyvnili povrchové vrstvy skúšaných materiálov. Dôsledok spevnenia tvárnych štruktúrnych zložiek sa prejavil výrazným rastom tvrdosti v povrchovej vrstve do určitej hĺbky.

Zo získaných výsledkov sú pozoruhodné prírastky mikrotvrdości povrchov skúšaných materiálov po opotrebení v definovaných podmienkach.

V podmienkach A1 a A2 sú viditeľné rozdiely mikrotvrdości skúšaných materiálov v závislosti na tlakoch.

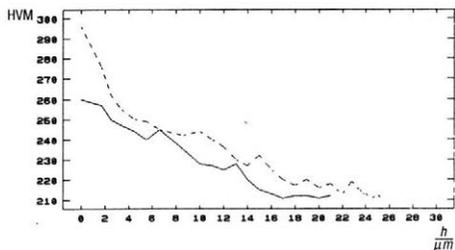
U feriticko-perlitickej ocele maximálna mikrotvrdość na povrchu po opotrebení v podmienkach A1 dosiahla hodnotu 260 HVM a zvýšenie tlaku pôsobiaceho na materiál z 0,05 MPa na 0,15 MPa spôsobilo nárast mikrotvrdości na hodnotu 296 HVM. Pri sledovaní priebehu mikrotvrdości u feriticko-perlitickej ocele v závislosti na vzdialenosti od povrchu (obr. 2) vidno, že vplyvom vyššieho tlaku (0,15 MPa) sa výrazne zvýšila mikrotvrdość na povrchu a prejavuje sa do hĺbky 4 μ m od povrchu do vnútra materiálu. Ďalej je pokles plynulý do hĺbky 20 μ m po mikrotvrdość základného materiálu. Zvýšením tlaku na vzorku z 0,05 MPa na 0,15 MPa vzrástla mikrotvrdość na povrchu feriticko-perlitickej ocele, čo malo za následok aj zvýšenie stupňa spevnenia z 22,6 % na 39,6 %.

Priebeh mikrotvrdości v závislosti na vzdialenosti od povrchu u feriticko-sorbitickej štruktúry (obr.3) po opotrebení poukazuje na to, že pokles mikrotvrdości od povrchu dovnútra materiálu je pomerne plynulý. Feriticko-sorbitická oceľ v porovnaní s oceľou feriticko-perlitickou dosiahla nižší prírastok mikrotvrdości a nižšiu hĺbku spevnenia. Maximálna mikrotvrdość na povrchu po opotrebení v podmienkach A1 je 245 HVM, zvýšenie mikrotvrdości sa prejavilo do hĺbky 5 μ m a v podmienkach A2 je hodnota 282 HVM a zvýšenie sa prejavuje

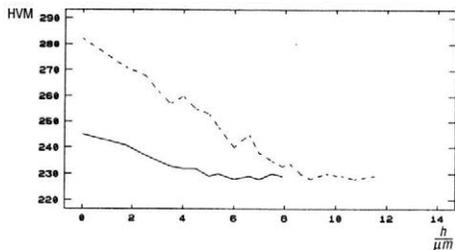
III. Hodnoty mikrotvrdości opotrebených povrchov materiálov a neovplyvneného (základného) materiálu a hodnoty relatívneho spevnenia skúšaných materiálov v definovaných podmienkach – Values of micro-hardness of worn materials and uninfluenced (fundamental) material and values of relative hardening of tested materials in defined conditions

Materiál ¹	Prostredie ²	HVM na povrchu ³	HVM _z	Relatívne spevnenie ⁴ φ (%)
Feriticko-perlitická oceľ ⁵	A1	260	212	22,6
	A2	296	212	39,6
Feriticko-sorbitická oceľ ⁶	A1	245	229	7,0
	A2	282	229	23,1
Martenzitická oceľ ⁷	A1	536	536	0
	A2	536	536	0
Austenitická oceľ ⁸	A1	262	176	48,9
	A2	330	176	87,5
Biela liatina ⁹	A1	702	702	0
	A2	702	702	0

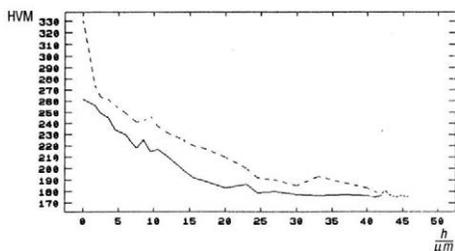
¹material, ²environment, ³HVM on surface, ⁴relative hardening, ⁵ferrite-perlite steel, ⁶ferrite-sorbite steel, ⁷martensitic steel, ⁸austenitic steel, ⁹white cast iron



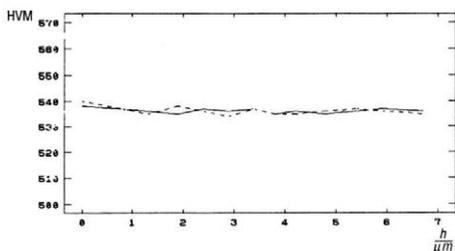
2. Závislosť mikrotvrdosti od vzdialenosti od povrchu po opotrebení feriticko-perlitickej ocele v podmienkach A1 a A2 – Dependence of micro-hardness on distance from the surface after wear of ferrite-perlite steel in conditions A1 and A2



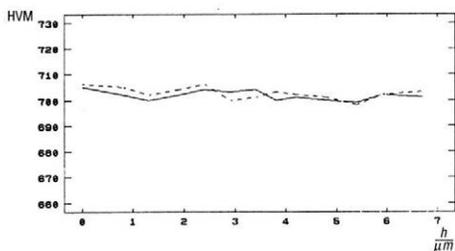
3. Závislosť mikrotvrdosti od vzdialenosti od povrchu po opotrebení feriticko-sorbiteickej ocele v podmienkach A1 a A2 – Dependence of micro-hardness on distance from the surface after wear of ferrite-sorbite steel in conditions A1 and A2



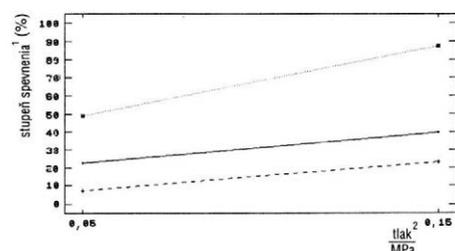
4. Závislosť mikrotvrdosti od vzdialenosti od povrchu po opotrebení austenitickej ocele v podmienkach A1 a A2 – Dependence of micro-hardness on distance from the surface after wear of austenitic steel in conditions A1 and A2



5. Závislosť mikrotvrdosti od vzdialenosti od povrchu po opotrebení martenzitickej ocele v podmienkach A1 a A2 – Dependence of micro-hardness on distance from the surface after wear of martensitic steel in conditions A1 and A2



6. Závislosť mikrotvrdosti od vzdialenosti od povrchu po opotrebení bielej liatiny v podmienkach A1 a A2 – Dependence of micro-hardness on distance from the surface after wear of white cast iron in conditions A1 and A2



7. Schematické znázornenie stupňa spevnenia skúšaných oceľí v závislosti na tlaku – The diagram of the degree of hardening of tested steels in dependence on pressure

—●— oceľ feriticko-perlitická – ferrite-perlite steel
 - - - - - oceľ feriticko-sorbiteická – ferrite-sorbite steel
*..... oceľ austenitickej – austenitic steel
¹degree of hardening, ²pressure

K obr. 2–6:

A1 – hnedozem + kremičitý piesok v pomere 3 : 1, zvlhčené H₂O, vlhkosť W = 14 %, tlak P = 0,05 MPa
 A2 – hnedozem + kremičitý piesok v pomere 3 : 1, zvlhčené H₂O, vlhkosť W = 14 %, tlak P = 0,15 MPa

— po opotrebení v A1
 - - - - - po opotrebení v A2

HVM – mikrotvrdosť meraná metódou Vickersovou
 h – hĺbka

For Figures 2–6:

A1 – luvisol + siliceous sand in ratio 3 : 1, moistened by H₂O, moisture W = 14%, pressure P = 0.05 MPa
 A2 – luvisol + siliceous sand in ratio 3 : 1, moistened by H₂O, moisture W = 14%, pressure P = 0.15 MPa

— after wear in A1
 - - - - - after wear in A2

HVM – micro-hardness measured by Vicker's method
 h – depth

do hĺbky 9 μm . Feriticko-sorbitická oceľ má vyššie mechanické vlastnosti ako oceľ feriticko-perlitická a spevnenie u nej prebieha obtiažnejšie. Rastom tlaku rastie mikrotvrdosť na povrchu, hĺbka spevnenia a stupeň spevnenia zo 7,0 % na 23,1 %.

Zaujímavé výsledky boli dosiahnuté u húževnatej austenitickej ocele, ktorá v porovnaní s feriticko-perlitickou a feriticko-sorbitickou oceľou dosiahla po opotrebení v podmienkach A1 a A2 najvyššie hodnoty mikrotvrdoosti na povrchu, hĺbky spevnenia a stupňa spevnenia. Po opotrebení tejto ocele v podmienkach A1 dosiahla maximálna mikrotvrdosť hodnotu 262 HVM a zvýšenie mikrotvrdoosti sa prejavilo do hĺbky 25 μm , v A2 dosiahla na povrchu hodnotu 330 HVM a toto zvýšenie sa prejavilo do hĺbky až 44 μm (obr. 4). Spevnenie pri tlaku 0,05 MPa bolo 48,9 % a zvýšilo sa pri tlaku 0,15 MPa na 87,5 %.

Výsledky meraní mikrotvrdoosti u martenzitickej ocele ukazujú na to, že takéto tvrdá a krehká štruktúra sa pri abrazívnom opotrebení v pôde nemôže spevňovať a proces opotrebenia u nej prebieha bez následkov plastického pretvárania (obr. 5). Túto skutočnosť potvrdzujú i výsledky merania mikrotvrdoosti u bielej liatiny (obr. 6).

Výsledky skúšok poukazujú na výrazný vplyv zaťaženia na mechanické vlastnosti povrchových vrstiev skúšaných materiálov po opotrebení a tiež na vzájomnú súvislosť medzi fyzikálno-mechanickými vlastnosťami materiálov a intenzitou ich spevnenia. Výsledky ukázali, že austenit s nízkou hodnotou základnej tvrdosti (176 HVM) sa spevňuje do väčšej hĺbky a miera relatívneho spevnenia je v porovnaní s feriticko-perlitickou oceľou približne dvojnásobne vyššia.

ZÁVER

Pri skúmaní vplyvu opotrebenia v pôdnych prostrediach pri tlakoch 0,05 a 0,15 MPa na mechanické vlastnosti povrchových vrstiev sa ukázalo, že účinky abrazívnych prostredí jednoznačne ovplyvnili v procese opotrebenia povrchové vrstvy u feriticko-perlitickej, feriticko-sorbitickej a austenitickej ocele. To sa prejavilo zvýšením tvrdosti a spevnením povrchových vrstiev.

Mikrotvrdosť opotrebeného povrchu vzorky, hĺbka spevnenia a stupeň spevnenia závisia nielen od veľkosti pôsobiaceho zaťaženia, ale aj od charakteru a chemického zloženia pôdneho opotrebovávacieho prostredia.

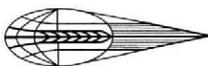
LITERATÚRA

- BUDA, J. – SOUČEK, J. – VASILKO, K.: Teória obrábania. Bratislava, ALFA 1983.
- CHRUŠČOV, M. M. – BABIČEV, M. A.: Issledovanie iznašivaniya metalov. Moskva, Izd. AN – SSSR 1966.
- TOLNAI, R. a kol.: Spevňovanie materiálov v procese abrazívneho opotrebenia. Acta technologica Agric. Nitra, XXX. Bratislava, Príroda 1990.
- TOLNAI, R. a kol.: Zariadenie na skúšanie opotrebenia funkčných častí pôduspracujúcich strojov. AO č. 185 740. Úrad pre vynálezy a objavy, Praha 1978.
- ČSN 42 0375.

Došlo 6. 6. 1994

Kontaktná adresa:

Doc. Ing. Rudolf Tolnai, CSc., Vysoká škola poľnohospodárska, Tr. A. Hlinku 2, 949 01 Nitra, Slovenská republika



ÚZPI

ÚSTAV ZEMĚDĚLSKÝCH A POTRAVINÁŘSKÝCH INFORMACÍ

(Slezská 7, 120 56 Praha 2, fax: 25 70 90)

vydává v roce 1995 v edici

METODIKY PRO ZAVÁDĚNÍ VÝSLEDKŮ VÝZKUMU DO ZEMĚDĚLSKÉ PRAXE

tyto publikace:

1. Systém hubení plevelů v oblastech s narušenými plevelnými společenstvy (*Mikulka J. a kol.*)
2. Technologické postupy pro racionální pěstování jednotlivých užitkových směrů brambor (*Vokál B. a kol.*)
3. Metodika konverze podniku na ekologické zemědělství (*Petr J. a kol.*)
4. Metody použití kombinací herbicidů a hnojiv (*Mikulka J. a kol.*)
5. Hořčice (*Vašák J. a kol.*)
6. Cukrovka – úsporné technologie (*Šroller J. a kol.*)
7. Pěstování pohanky a prosa (*Petr J. a kol.*)
8. Výživa a hnojení zemědělských plodin (*Neuberg J. a kol.*)
9. Využití sonografie v reprodukci hospodářských zvířat (*Petelíková J. a kol.*)
10. Výživa dojníc v průběhu mezidobí z hlediska ekonomické efektivity výroby mléka (*Lossmann J. a kol.*)
11. Doporučené potřeby minerálních látek a jejich nové zdroje u skotu a ovcí (*Šimek M. a kol.*)
12. Alternativní využití progesteronového testu u hospodářských zvířat, zvláště u plemenic skotu (*Pöschl M. a kol.*)
13. Chov masných plemen skotu (*Golda J. a kol.*)
14. Jak vyrobit kvalitní mléko (*Kratochvíl L.*)
15. Technika v postupech ochranného zpracování půdy k širokořádkovým plodinám (*Hůla J. a kol.*)
16. Malotonážní zpracování řepky olejné (*Jevič P. a kol.*)
17. Optimalizace parametrů palivové soustavy motoru při použití metylesteru řepkového oleje jako paliva (*Křepelka V. a kol.*)
18. Stanovení a ekonomické hodnocení nákladů na mechanizované práce v zemědělství (*Abrahám Z. a kol.*)
19. Snižování spotřeby energie ve sklenících (*Šrámek F.*)
20. Přírozená obnova lesa (*Vacek S. a kol.*)
21. Podsadby lesních porostů (*Vacek S. a kol.*)
22. Finanční řízení zemědělských podnikatelských subjektů (*Novák J. a kol.*)

WATER CONSUMPTION AND THE AMOUNT OF WASTE WATER GENERATED IN MILKING PLANTS AND DAIRY HOUSES OF LARGE DAIRY CATTLE FARMS

SPOTŘEBA VODY A MNOŽSTVÍ ODPADNÍ VODY U DOJICÍCH ZAŘÍZENÍ A MLÉČNIC VE VELKOKAPACITNÍCH DOJÍRNÁCH

G. Hörnig, E. Scherping

Institute of Agricultural Engineering, Bornim, Germany

ABSTRACT: In five farms formerly with nearly 2,000 cows, and today with 500 and between 1,060 and 1,270 cows, a one-year investigation of water consumption and wastewater generated, as well as of contents and their freights was realized. Using the investigation results it is proposed to include new guide numbers for water consumption in worksheet 702: for herringbone milking parlours with 2 x 10 places 20 l per cow and day, for milking carousels 28 l per cow and day. For farms of this size separate collection of the only slightly polluted sewage and its utilization in plant production would be an alternative. Suitable areas for the utilization (grassland) near the cowshed with transportation distances of less than 2 km are needed. Biological treatment of wastewater from dairy farms with about 1,000 cows should be tested in a farm in the new German states employing the new technological possibilities which the compact biological purification plants offer.

water; waste water; milking plant; dairy house; large dairy cattle farms

ABSTRAKT: V pěti provozních jednotkách dříve se 2 000, nyní s 500, popř. mezi 1 060 až 1 270 ustájenými dojniciemi, jsme po dobu jednoho roku zkoumali spotřebu vody a množství odpadní vody a zároveň její složení a využití. Na základě výsledků tohoto výzkumu navrhuje nová směrná čísla pro spotřebu vody, a to u rybinových dojíren 20 litrů na dojnici a den a u karuselových dojíren 28 litrů na dojnici a den. Pro ustájení tohoto typu by mohl být alternativou oddělený sběr odpadní vody s malou příměsí živin a nečistot a její využití pro rostlinou výrobu na vhodných pozemcích (pastvinách) s dopravní vzdáleností do dvou kilometrů. Na jedné mléčné farmě v některé z nových zemí Spolkové republiky Německo by mělo být novými technologickými postupy, které poskytují kompaktní biologické čistírny, vyzkoušeno biologické čištění vody z dojíren.

voda; odpadní voda; dojící zařízení; mléčnice; velkokapacitní dojírna

INTRODUCTION

In dairy cattle farms large quantities of drinking water are needed during milking as well as for the storage and cooling of the milk. Different reasons speak in favour of searching for ways and means to reduce water consumption and thus the amount of the resultant waste water and liquid manure:

- Drinking water as the number one of the necessities of life is increasingly becoming a scarce natural resource.

- With a view to improving the economic performance, the expenses for water and/or for its disposal as waste water or liquid manure (storage, treatment, transportation, distribution) have to be minimized.

- The percentage of solids in the liquid manure is reduced through the addition of the waste water to the liquid manure and results in the deposition of solid matter in storage tanks as well as in the piping system.

In 1989, almost 100 dairy cattle farms with 1,930 animal places were in operation in the East of Germany. The supplied themselves with water from their own wells; an absolute necessity to use water sparingly did not seem to exist. When planning the projects, provision was made for the storage of the liquid manure over a brief of 12 days which made its ecological utilization in crop production difficult or even impossible. As an alternative, some enterprises used this waste water on nearby areas used for grass and forage crops. In a few cases, the waste water was treated biologically. The regulations valid at that time for the admission of the treated waste water into drainage ditches were observed in principle (E b e r t , H ö r n i g , 1985).

The size of the livestock existing on the territory of the former GDR occasioned the working-out of legal regulations and recommendations concerning the consumption of water/the generation of waste water. They served as a kind of guideline for an economical use of

water as well as for the efficient storage, spreading and use of liquid manure and/or an efficient treatment and utilization of waste water (-, 1983; -, 1987). In the former Federal Republic of Germany the Kuratorium fuer Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft - KTBL - (Governing Body for Technology and Construction in Agriculture) issued guidelines for small dairy cattle farms (Marten, 1987).

Beginning in 1990, larger enterprises of the above-mentioned type were modernised in the new Federal States. The number of animals kept in them has gone down; their water consumption, their waste water generation and the substances contained therein are not known under the new conditions of production now prevailing in them. For that very reason, special investigations in enterprises with more than 500 cows and with differing milking and milk processing equipment were made in order to provide information on

- the consumption of water for the major processes,
- the quantity of the resultant waste water and the substances contained therein,
- the reduction of water consumption and of the generation of waste/liquid manure and/or the cost-effective and non-polluting utilisation or treatment of the resultant waste water.

MATERIAL AND METHODS

These investigations were made in 5 enterprises in the State of Brandenburg (Tab. I) that were built in accordance with the project planning concept of the „dairy cattle farm AP 1930“ (excluding enterprise C). Modernisation measures were aimed at an improved and ecologically more acceptable cattle breeding and at a higher milk production. At the same time, the number of cattle was reduced. During the investigation period of 11 to 14 months, approximately 400 lactating cows were kept in enterprise C, in the other enterprises the number of lactating cows ranged from 820 to 1,060.

The water consumption as a whole as well as in the different sections was measured by means of meters which were installed in the enterprises at different times. The interval between two readings was called „measuring period“. The average daily consumption was calculated on the basis of the values „m³/measuring period“ and the number of days per measuring period and then put in relation to the average number of cows milked (l/gK and day) (gK = cows milked).

The amount of waste water generated resulted from the product of the operating time of the pump and the quantity pumped into the waste-water reservoir. The volumetric delivery of the pump (m³/h) was determined at least once a month. This delivery is affected by the differing percentages of solid matter contained in the waste water. The average volumetric delivery of the pump obtained by the readings from all calibrated meters served as the basis for calculating the amount of waste water generated in the measuring periods.

Mixed samples were taken from the waste water reservoirs of the enterprises B to E determine waste water parameters. Apart from the TS contents (TS = dry matter) and the pH value, the total nitrogen content (N_{tot}), ammonium-nitrogen (NH₄-N), phosphorus (P), the biological oxygen requirement (BSB₅) and the chemical oxygen requirement (CSB) were determined according to the „Deutsche Einheitsverfahren...“ (German Uniform Valuation Systems) (DIN 38409). The loads of BSB₅, and of CSB were determined on the basis of the mean concentration value during the entire measuring time and the mean waste water amount generated during the measuring periods.

RESULTS

WATER CONSUMPTION AND WASTE WATER GENERATION

Total water consumption includes the consumption of both cold and warm water in the enterprises A, B, C and E. In enterprise D only the amount of waste water generated could be determined (Fig. 1). In addition to that, in enterprise E the consumption of cooling water, the consumption of water needed for cleaning the milking parlour and the amount of waste water generated were determined.

There are enormous differences in water consumption between the different enterprises. For comparing figures, the consumption standard of 33 l/gK and day for dairy cattle farms of the AP 1930 type with rotary milking parlour can be used (-, 1987).

The lowest consumption is reached in enterprise C with approximately 17 l/gK and day (Fig. 2). The following reasons were stated:

- use of the udder douche only for cows with a dirty udder that do not lie on rubber mats, otherwise dry cleaning with disinfecting paper;
- considerable reduction of the use of water in milk tank cleaning;
- lower consumption in the herringbone milking parlour 2 x 10 when compared to the rotary milking parlour.

Enterprise B reached an average consumption of 33.5 l/gKday after its milk cooling was switched to a closed system (Fig. 1). At the end of the measuring period, the consumption rose again by approximately 15 l/gKday when the hot water used in cleaning and disinfection was replaced by cold and warm water. Enterprises A and E have an extremely high consumption averaging 63.8 l/gKday and 91.7 l/gKday, respectively. As far as enterprise A is concerned, the reasons for that cannot be properly explained, but are supposed to be the following:

- higher consumption for cleaning and disinfection with cold and warm water in the milking area,
- open cooling system with fresh water which, however, is partly utilised for warm water generation by means of heat recycling,

I. The different processes in the dairy cattle farms A to E

Process	Enterprise				
	A	B	C	D	E
Keeping	Covered yard/lie-down boxes		Separate feeding and lie-down areas, 50 head of cattle for 80 lie-down places	Covered yard/lie-down boxes	
Feeding	Stationary		Mixer-feeder wagon	Stationary	
Water supply (drinking water losses ¹⁾)	50% individual automatic waterers, 50% water throughs (low water losses)	Individual automatic waterers (choking up of passages, overflowing > water losses)	2 large water tanks for one loose box (considerably reduced losses)	Individual automatic waterers, regularly maintained (lower water losses)	Individual automatic waterers, as an experiment 2 group boxes with 50-70 l drinking bowls (lower water losses)
Cattle shed cleaning	Twice a year		Once a year before housing the cows that lactate for the first time	Twice a year	
	Cold-water high-pressure device(s)				
	about 1.5 m ³ /d	about 3 m ³ /d	about 0.5 m ³ /d	about 2 m ³ /d	about 2 m ³ /d
Manure removal	Gutters are kept operational by permanently pumping out the liquid manure			The end of the drainage channel is choked up by fodder from the conveyor belt; at present waste water in pump well for improving flowability during pumping-out operation	Drainage problems in channel sections which are far away from the pump well > cleansing by means of tanks trucks (waste water from the rotary milking parlour)
Milk production	Rotary milking parlour 40 places		Herringbone milking parlour 2 x 10	Rotary milking parlour 40 places	
	Milking equipment: Impulsa; cleaning and disinfection: cold, warm water	Lemmer-Fullwood; hot water (water-saving)	SAC; cold, lukewarm, hot water	Leemer-Fullwood; hot water (water-saving)	SAC; cold, lukewarm, hot water
Milking cooling	Open cooling system; warmed-up water is utilised in the rotary milking parlour	Closed cooling system; heat recycling for warm water (rotary milking parlour)		Ice-water cooling	Ice-water cooling; further utilisation is planned!
Drainage of milking parlour and milk house waste water	To the liquid manure; sewage treatment plant communal utilization (?)	To the liquid manure; liquid manure treatment plant under construction; treatment to turn in into water for industrial use	To the liquid manure		
Liquid manure generated m ³ /a ²⁾	about 35,000	about 36,500	about 20,000	about 36,500	about 35,000-40,000
TS content % ²⁾	about 8	about 7	about 7	about 7	about 7
Liquid manure storage space m ³	3 x 7,500	7,200	2 x 3,000	2 x 1,000 1 x 5,000 1 x 4,000	2 x 5,000

¹⁾oral information provided by the managers; in comparison to 1989

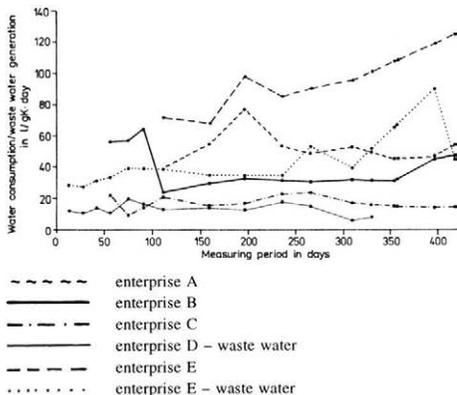
²⁾oral information provided by the managers

– continuous cleaning at the entrance to the rotary milking parlour.

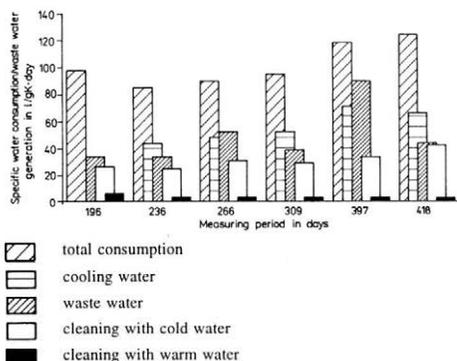
The high consumption in enterprise E is caused by the cooling of the milk (Fig. 3). More than 50% of the total water consumption is made up by cooling water which – after passing the technically obsolete cooling system – flows into the rain water drainage system. Its

future use in watering places for the cattle is, however, being considered.

The waste water resulting in enterprise E can partly be accepted (Figs 1 and 3). It results from the consumption for cleaning with cold and warm water and ranges from 28 to 39 l/gKday during the period from February to October 1992. Thereafter cooling water flowed into



1. Specific water consumption/waste water generation in the enterprise in which the investigations were made



2. Specific water consumption/waste water generation during the measuring period and for the consumers (enterprise E)

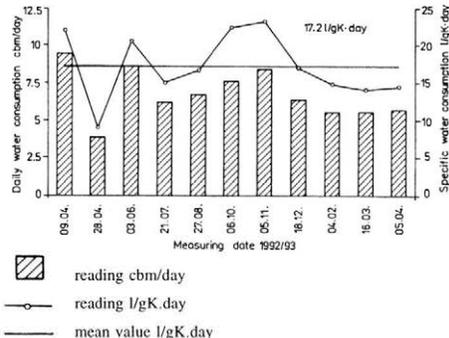
the waste water reservoir (!) which causes the amount of waste water to rise to more than 90 l/gKday.

The small amount of waste water averaging 16.3 l/gKday in enterprise D (Fig. 1) is remarkable. It is an indication of an economical use of water for cleaning and disinfection in the rotary milking parlour and of a careful use of water in general. Considerable quantities (not recorded by us) are, however, needed for the cooling of the milk.

SUBSTANCES CONTAINED IN WASTE WATER

Consistency and colour of the mixed samples taken from the waste differed quite considerably seasonally as well as from enterprise to enterprise, as is reflected by the results of the analyses made (Tab. II).

In enterprise B (TS = 0.33%) and enterprise D (TS = 0.25%) the mean TS value reaches the figure of earlier



3. Daily and specific total water consumption (enterprise C)

investigation results in dairy cattle farms with 1,930 animal places.

The pH value is mostly below 7.0 which points to a sour fermentation due to the percentage of milk. In enterprise E where approximately 300 l of fore-milk and of milk from sick cows get into the waste water per day, the pH value reaches only a range of between $5.1 \leq \text{pH} \leq 6.2$. The substances contained are, in principle, in line with the TS content. The specially marked figures in Tab. II show their conformity with the figures provided by Ebert and Hörnig (1985). The BSB₅ and CSB loads as essential parameters for waste water treatment are listed in Tab. III.

On one hand, the figures provide information about the low degree of contamination of the waste water when compared to the liquid manure, and, on the other hand, they also provide information regarding the required degree of BSB₅ degradation in treatment plants. When multiplied with the respective heads of cattle, the BSB₅ loads in enterprises B to D come to 12 to 27 kg/day, in enterprise E to about 60 kg/day.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The dairy cattle farms for investigating water consumption and the amount of the resultant waste water were chosen at random. There are large differences in consumption between the various enterprises. It is, however, assumed that the figures ascertained are typical of the large dairy cattle farms in the East of Germany and that the conclusions can, therefore, be generalised. Each manager of such a dairy cattle farm must find out for himself which of the following recommendations could lead to a reduction of water consumption depending on the conditions prevailing on his farm.

The enormous differences in water consumption depend upon the available equipment and personnel. Water can be saved by taking the following measures:

- It is imperative that open milk-colling systems in which the water is not used for a second time - as is

the case in enterprise E – are replaced by a more efficient and water-saving cooling system.

– Cleaning the milk pipelines and the milk tanks with hot water reduces the amount of water needed.

– While adhering to the requirements of hygiene and milk quality, only udders that are very dirty are to be cleaned by using an udder douche.

– The continuous cleaning of the entrance to the rotary milking parlour with a water jet is to be carefully re-examined. If it is an absolute must during milking, a controlled operation in phases should possibly be considered.

– Waiting barns before and after milking – provided they have gutters in the floor – can in many cases be cleaned with mechanical devices, even without water.

– For all places that have to be cleaned with water, water-saving high-pressure equipment should be used by all means. The frequently applied procedure of cleansing with a hose using the water pressure of the water supply system is ineffective, and a lot of water is needed.

All proposals for reducing the consumption of water will only work when everyone employed in a dairy cattle farm is aware of the need to use the natural resource „water“ sparingly. One of the reasons for the great differences in water consumption and the high consumption in general is, amongst others, the „generous“ use of water.

Consequently, the resulting costs are higher, and more storage space and transport capacities are needed. If we assume a water price of 2.80 DM/m³, the annual costs for cooling water alone in enterprise E will come to 41,000.– DM.

On the basis of the investigations made, a consumption of ≤ 20 l/gK.day with herringbone milking parlour with 2 x 10 places and ≤ 28 l/gK.day with a rotary milking parlour with 40 places is recommended as a guideline.

The generation of waste water can be reduced, it can, however, not be avoided. For large dairy cattle farms the separate collection of the waste water and its utilisation in crop production would provide an alternative. This, however, would require suitable areas for its utilisation (fodder grass) in the vicinity of the enterprise with transport distances of less than 2 km. The area required – proceeding from a permissible gross nitrogen amount of 160 kg N/ha.year is about 100 m²/gK. The benchmark figures for the enterprises in which the investigations were made ranged from 75 to 200 m²/gK. Another advantage would be the reduction of the required storage space by storing the waste water over a period of three months only (December to February).

Another alternative is the waste water treatment in jointly operated or compact treatment plants. This requires a precise analysis and a quantification of the respective site conditions. As far as BSB₅ degradation is concerned, compact treatment plants are designed in such a way that the ascertained range of the daily loads of about 15 kg to 30 kg is covered. The degradation of the organic matter contained in the waste water is effected by microorganism populations on balls or loops of thread that are supplied with oxygen from the air through the rotation of the drum or the impeller (biofilter drum system and sling procedure). To a large extent, such systems are resistant to overloading and require little investment and operating expenses. The storage space is reduced to the volume needed for

II. Average values of substances contained in waste water

Substance	Dimension	Enterprise B	Enterprise C	Enterprise D	Enterprise E
TS-cont	%	0.33 ± 0.11	1.18 ± 1.04	0.25 ± 0.16	0.84 ± 0.88
pH-value	–	6.1 ± 0.66	6.5 ± 0.26	6.61 ± 0.52	5.64 ± 0.43
N _{tot}	mg/kg OS ²⁾	225 ± 79.9	543 ± 297.9	172 ± 34.3	415 ± 310.3
NH ₄ -N	mg/kg OS	59 ± 28.7	148 ± 76.8	41 ± 14.9	90 ± 68.3
P _{tot}	mg/kg OS	27 ± 20.5	54 ± 179.2	18 ± 10	28 ± 20.1
BSB ₅	mg/kg OS	1,020 ± 443.8	1,507 ± 749.1	705 ± 193.9	1,866 ± 1,279.2
CSB	mg/kg OS	4,095 ± 2,655	15,342 ± 11,779	3,230 ± 2,225	11,712 ± 12,037

²⁾ original substance

III. Mean loads of the substances contained in the waste water from four dairy cattle farms and in liquid manure

Substance	Enterprise B	Enterprise C	Enterprise D	Enterprise E	Waste water (v. d. EMDE, 1991)
	g/gK.day				g/E ³⁾ .day
BSB ₅	34.4 ± 7.24	25.4 ± 5.2	12.4 ± 3.37	75.5 ± 29.26	60
CSB	138.0 ± 29.08	258.4 ± 52.95	56.7 ± 15.42	474.1 ± 183.67	120
N	8.25 ± 1.04	9.56 ± 0.94	3.19 ± 0.33	15.04 ± 0.99	11
P	2.89 ± 0.98	5.26 ± 0.85	1.25 ± 0.17	12.2 ± 0.67	2.5

³⁾ inhabitants

buffering and obtaining a uniform inflow. This is only a fraction of what is needed for a 90-day storage of the waste water before its agricultural utilisation or a 180-day storage with liquid manure.

SUMMARY

The water consumption and the resultant waste water, the substances contained therein and their loads were investigated over a period of one year in 5 enterprises with about 400 and between 820 and 1,060 lactating cows, respectively.

On the basis of the results obtained, it is proposed to recommend as a water consumption guideline 20 l/gK.day for enterprises with a herringbone milking parlour with 2 x 10 places, and 28 l/gK.day for enterprises with a rotary milking parlour.

For enterprises of that size, a separate collection and utilisation in crop production of waste water containing only little nutritive and polluting substances would constitute an alternative. This, however, requires suitable areas for utilisation (fodder grass) in the vicinity of the enterprise with transport distances of less than 2 km.

A biological cleaning of waste water from milking parlours and dairies from enterprises with about 1,000 cows should be tested in a milk production enterprise of the new Federal States in view of the new technological possibilities that are offered by compact biological treatment plants.

LITERATURE

EBERT, K. – HÖRING, G. et al.: Gewinnung und Aufbereitung von trockensubstanzreicher Rindergülle. [Forschungsbericht des Institut für Düngungsforschung Postdam und Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft.] Postdam, Section 06/1985.

MARTEN, J.: Abgänge und Abwässer aus landwirtschaftlichen Betrieben. KTBL-Arbeitsblatt 1075. Darmstadt 1987. – Rationelle Wasserverwendung in der Tierproduktion – Milchproduktion. Fachbereichsstandard TGL 28761/02. July 1983.

– Abwasser aus Rinderproduktionsanlagen. Fachbereichsstandard TGL 35250. March 1987.

Received on January 26, 1994.

Contact Address:

Prof. Dr. sc. techn. Günter H ö r n i g, Institut für Agrartechnik Bornim e. V. (ATB), Max-Eyth-Allee 1, D-14467 Potsdam-Bornim, Germany

RECONSTRUCTION OF LARGE HORIZONTAL FORAGE SILOS

REKONSTRUKCE VELKOKAPACITNÍCH SILÁŽNÍCH ŽLABŮ

G. Otto, K. Bendull

Institute of Agricultural Engineering, Bornim, Germany

ABSTRACT: In 1986 on the territory of Germany's new federal lands there were horizontal forage silos of a total volume of 37 million m³. Their construction quality, storage capacity and the location at animal farms are assessed. In order to use these silos, recommendation are given concerning machines and procedures for storage and withdraw forage. Rules are presented which determine the relationship between storage capacity as well as the capacity needed for taking into and removal from storage. They consider the conditions of fermenting biology and the number of animals to be fed with the forage. Examples are presented and assessed of the reconstruction of huge horizontal silos for 100, 200, 300 and 400 cows to be supplied on one animal farm. Proposals are also made to improve the management of such silos.

horizontal forage silos; reconstruction; rules of reconstruction

ABSTRAKT: Na území nových zemí Spolkové republiky Německo byla v roce 1986 k dispozici horizontální sila o celkovém objemu 37 milionů m³ silážovaného materiálu. Výstavba těchto zařízení, jejich uskladňovací kapacita i jejich umístění k farmám se řídí potřebami živočišné výroby. V příspěvku jsou uvedena doporučení, jakého strojního vybavení a jakých pracovních postupů použít, aby sila byla správně využívána. Při stanovení kapacity rekonstruovaných sil se vychází z biologických požadavků ustájených zvířat a z počtu ustajovacích míst. Byly vypracovány a vyhodnoceny varianty přestavby pro farmy s ustájením 100, 200, 300 a 400 dojnic. Zároveň jsou předloženy návrhy, jak zlepšit využití horizontálních silážních žlabů.

horizontální silážní žlaby; rekonstrukce; varianty přestavby

INTRODUCTION

Horizontal forage silos in the new Federal Lands of Germany had been designed to supply with forage up to 2,000 head of cattle and more. The structural changes in agriculture brought about a reduction in livestock as whole and partly also a reduction in the number of animals kept a cattle-shed. Under these conditions, large horizontal forage silos cannot be managed any longer as would be required.

The silo space needed for the preparation of high-quality silage is very large, especially for smaller livestock units. For that reason, proposals for the reconstruction of large horizontal silos are submitted, and investments involved are ascertained and described below.

MATERIAL AND METHODS

STARTING CONDITIONS

In 1986, approximately 37 million cubic metres of silo space for the production of coarse forage silage existed on the territory of what are now the new Federal Lands (-, 1987). The age structure of the horizontal

forage silos as well as the percentage of the different types of construction of such silos are shown in Tabs I and II.

Out these, the horizontal silos that were built after 1970 are in a state of repair that makes them still usable. They form 84% of the total horizontal silo space that is available. Approximately 60% of the total silo space built after 1975 up to 1985. (Tab. I).

About 91% of the total silo space is available in horizontal silos. Approximately 60% are horizontal silos of a storage volume of more than 5,000 m³. The percentage of vertical silos of the total silo space available is about 5% (Tab. II).

TASKS TO BE ACCOMPLISHED

Proposals for the reconstruction of large horizontal forage silos should be worked out taking into account the requirements of fermentation biology and the number of animals that have to be supplied with silage. Taking into account the results obtained for the management of horizontal silos, that is in line with requirements, the silo space needed and its dimensions are to be determined as the basis for the reconstruction of large horizontal silos.

I. Age structure of the horizontal silos

Year of construction	Total silo space	
	m ³	%
Until 1950	66,306	0.2
1951-1960	471,695	1.2
1961-1965	1,295,940	3.5
1966-1970	4,945,635	13.2
1971-1975	8,154,758	21.8
1976-1980	11,021,384	29.4
1981-1985	11,201,609	30.0
1986-1990	274,992	0.7

II. Types of construction of silos (—, 1987)

Situation	Storage capacity total		Out of it in silos > 5,000 m ³	
	1,000 m ³	%	1,000 m ³	%
1. Total silo space	37,391.7	100.0	23,791.5	63.6
2. Type of silo:				
horizontal silos	34,007.6	90.9	21,642.9	57.8
vertical silos (tower silos)	1,777.5	4.8	1,409.5	3.8
others	1,606.6	4.3	739.1	2.0

The investments required for different reconstruction version of existing horizontal forage silos as well as for the construction of concrete slabs for the production of silage and for the construction of new horizontal silos are determined and described, taking into consideration different livestock sizes. The calculation of these investments is based on costing data provided by scientific institutions and building companies.

RESULTS

SILO SPACE REQUIRED

The size of the silos – as the basis for the reconstruction of existing horizontal silos or for the construction of new silos – must be derived from the amount of forage needed for the number of animals to be supplied and from the requirements that are placed on silo management by fermentation biology.

The silo capacity required, including the capacity needed, when loading the silo, was determined as follows (Freitag, 1989):

$$m_N = \frac{GV \cdot R \cdot n_F}{1000} \quad (1)$$

The effective quantity of silage needed annually m_N (t TS/a)

TS – dry matter
with GV – number of large cattle units
R – portion allotted (kg TS/GV.d)
 n_F – silage fodder days (d/a)

$$A_{\max} = \frac{GV \cdot R}{d_A \cdot \rho_L} \quad (2)$$

Maximal permissible first cut area A_{\max} (m²) with
 d_A – daily minimal layer for unloading (m/d)
 ρ – mean storage density (kg TS/m³)

Determination of A

Cross-cut A of silo to be accomplished A (m²) form

SB – width of silo (m)
SH – height of silo (m)

$$ER = \frac{m_N}{\eta_F \cdot \eta_S \cdot \rho_L} \quad (3)$$

Built-in silo space required ER (m³) with

η_F – silo loading degree (-)
 η_S – degree of losses at ensilage (-)
 ρ_L – storage density (kg TS/m³)

$$SL = \frac{ER}{A} \quad (4)$$

silo length required SL (m)

$$m_E = \frac{m_N}{\eta_G} \quad (5)$$

Harvest volume required for ensilaging annually m_E

(t TS/a) with
 η_G – degree of total loss (-)

$$Ka_E = \frac{m_E}{n_E} \quad (6)$$

capacity needed when loading the silo Ka_E (t TS/d) with
 n_E – number of loading days (d/a)

The starting figure is provided by the quantity of the material for ensilage required annually for a specific number of animals. This figure results from the number of animals to be supplied with forage, the allotted portion of silage and the number of days on which they are fed silage. The permissible fodder stock first cut area is determined by the daily minimal layer unloaded from the silo, the silage requirement and the mean storage density (Thöns et al., 1990)

As the next step, the cross-cut of the silo to be built must be determined. It results from the width and from the height of the silo. This determination calls for concessions. On one hand, the daily minimal layer unloaded should be observed, on the other hand, the width of the silo should be dimensioned in such a way that a trouble-free management of the silo is ensured.

The required built-in silo space is calculated by taking into consideration the volume of the material for ensilage, the silo loading degree, the degree of losses

at ensilage and the storage density. The silo loading degree is, above all, influenced by the equipment used in silo management and by the valid industrial safety regulations. In general, it has to be stated that the silo loading degree decreases with an increasing height of the silo and increases with an increasing length of the silo (Thöns et al., 1990).

Standard values for the density have been published (Weise, Rombusch, 1988). The storage density is, above all, influenced by the type of silage and by the stacking height. The harvesting and transport equipment as well the loading equipment within the silo are determined by the percentage of the harvest required annually for silaging and the capacity needed for loading the silo. The loading, compacting and covering of the material for ensilage within the silo must be completed within the shortest possible time.

PROPOSALS FOR THE RECONSTRUCTION

On the basis interactions described above, the fodder requirement, the silo space and the daily first cut area have been determined for 100, 200, 300 and 400 cows, and ten variants were deduced therefrom for the reconstruction of large horizontal silos with a width of 21 m. An average amount of 32.5 kg OS¹/GV.d (OS – original substance), was taken as the basis for the calculation of the amount of fodder to be unloaded from the silo per day (Tab. III).

As a result of these calculations, the versions described below for the reconstruction of horizontal silos with a width of 21 m were worked out.

Version 1.1 (for 100 cows), (Fig. 1)

One silo unit, with a width of 21 m, partitioned longitudinally by two new walls. On the front side the silo is closed off by means of a new wall. On the loading side an operating area with a length of 5 m, for instance for the dumping of the material for ensilage. The material for ensilage is pushed in and compressed by means of tractors driving over it. Three silo compartments.

Version 1.2 (for 100 cows)

One silo unit, with a width of 21 m, partitioned longitudinally by two new walls. Open at the front side.

At both ends of the silo an operating area with a length of 5 m each. The material for ensilage is pushed in or transported onto the fodder stock and dumped. Three silo compartments. In contrast to Version 1.1, the cross-wall is abolished, instead of it a second operating area is set up.

Version 2.1 (for 200 cows)

One silo unit, with a width of 21 m, partitioned longitudinally by means of one new wall. In the centre of the storage area another subdivision by means of a new cross-wall. At both ends of the silo an operating area with a length of 5 m each. The material for ensilage is pushed in and compressed by means of tractors driving over it. Four silo compartments.

Version 2.2 (for 200 cows), (Fig. 2)

One silo unit, with a width of 21 m, partitioned longitudinally by means of one new wall. At both ends of the silo an operating area with a length of 5 m each. The material for ensilage is pushed in or transported onto the fodder and dumped. Then it is compressed by means of tractors driving over it. Two silo compartments. In contrast to Version 2.1, abolition of the cross-wall.

Version 3.1 (for 300 cows), (Fig. 3)

Utilization of three silos located side by side, with a width of 21 m each. With such an animal concentration, a longitudinal subdivision of the silos is no longer required. On the front side the silo is closed off by a new wall. On the loading side an operating area with a length of 5 m. The material for ensilage is pushed in and compressed by means of tractors driving over it. Three silo compartments.

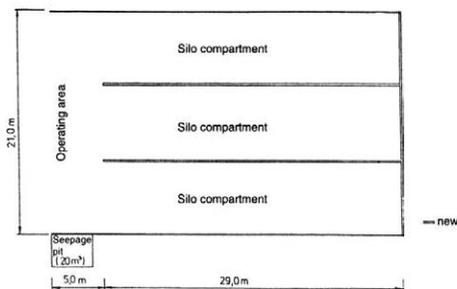
Version 3.2 (for 300 cows)

Utilization of two silos located side by side, with a width of 21 m each. In the centre of the storage area a subdivision by means of a new cross-wall. At both ends of the silos an operating area with a length of 5 m each. The material for ensilage is pushed into the compartments and compressed by means of tractors driving over it. Four silo compartments. In contrast to version 3.1 reduction of the new cross-wall by 21 m, instead of it a second operating area is set up.

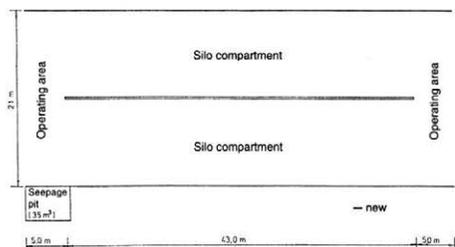
III. Fodder requirement, daily first cut areas and subdivision of the silo reaching the first cut areas

Cows	Silage needed (OS, Ø 30% TS)		Built-in silo space needed (density 600 kg/m ³)	Daily first cut area with a cutting depth of 0.20 m	Daily first cut area per silo with an unloading of 2 layers	Silo subdivision	
	per d ¹⁾	per a				number of compartments in 21 m quantity	average fodder stacking height
(head)	(t)	(t)	(m ³)	(m ²)	(m ²)	(quantity)	(m)
100	3.25	698.8	1,165	27.1	13.6	3 x 6.7 m	2.0
200	6.50	1,397.5	2,329	54.2	27.1	2 x 10.3 m	2.6
300	9.75	2,096.3	3,494	81.3	40.7	1 x 21 m	2.0
400	13.00	2,975.0	4,658	108.3	54.2	1 x 21 m	2.6

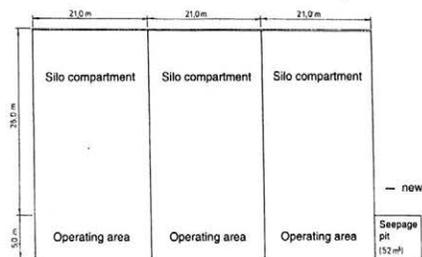
¹⁾based on 32.5 kg OS/GV.d



1. Reconstruction version 1.1, 100 cows



2. Reconstruction version 2.2, 200 cows



3. Reconstruction version 3.1, 300 cows

Version 3.3 (for 300 cows)

Utilization of three silos located side by side, with a width of 21 m each. No cross-walls. At both ends of the silos an operating area with a length of 5 m each. The material for ensilage is pushed in or transported onto the fodder stock, dumped and compressed by means of tractors driving over it. Three silo compartments. In contrast to version 3.1, all cross-walls are abolished; this necessitates a second operating area.

Version 4.1 (for 400 cows) – same as version 3.1

Version 4.2 (for 400 cows) – same as version 3.2

Version 4.3 (for 400 cows) – same as version 3.3, but with a greater length of the silos.

Taking into consideration the number of animals to be supplied with fodder, the above versions provide for silo dimensions with which – if the silos are

adequately managed – the requirements of fermentation biology for the production of high-quality silage can be met and the animals can at any time be supplied with fresh, unspoiled fodder (Otto, Bendull, 1993), (Figs 1–3).

Alternatives for these reconstruction versions for existing large horizontal silos are silo concrete slabs and the construction of new horizontal silos. The decision which of the variants is to be given preference should be based on a comparison of the expenses involved.

EXPENSES FOR RECONSTRUCTION

The prices of constructional changes to be undertaken were ascertained from different sources in order to be able to assess the reconstruction variants proposed (Gaerths, 1992; –, 1990; –, 1991/1992; – 1992). The results described below are the outcome of the inquiries made (Tab. IV).

The capital investment needs have been ascertained for the versions worked out (Tab. V). These expenses include the costs for the erection of partition walls, the application of a base flooring, of the wall painting and the construction of a seepage pit. When looking at these results, a downward tendency in the following sequence can be noted in general in relation to the financial burden per animal place (DM/animal place) – (Tab. V):

- new construction, horizontal silo with side walls,
- reconstruction versions for existing large horizontal silos,
- new construction of silo concrete slab without side walls.

In comparison with the construction of new horizontal silos with side walls, the cost per animal place for the reconstruction of existing large horizontal silos for larger livestock units, starting approximately from 200 cows upwards, is in the range of 30 to 50% and for the construction of a new silo concrete slab without side walls it is roughly 30%.

PROPOSALS FOR IMPROVING THE MANAGEMENT OF HORIZONTAL SILOS

– Dumping of the material for ensilage in front of the silage stack and spreading in on the fodder stack by means of tractors with sweep rakes attached at the rear. This technique makes it possible to store large quantities and to load the silo quickly (Thöns et al., 1990). The storage operation and the silo space should be coordinated in such a way that the loading period for a horizontal silo does not exceed two, at the utmost three days.

– Depending upon the TS contents of the material for ensilage, storage densities of 160 to 200 kg TS/m³ are required. The following procedure is to be applied in order to obtain the required storage density (Hertwig et al., 1992).

IV. Prices for the reconstructions of existing and the construction of new horizontal silos for coarse fodder

Item	Price
1. Erection of a reinforced concrete wall, 1 m – wall height 3.60 m; – depth of foundation 0,60 m; – thickness of wall 0.25m	1,200.– DM
2. Demolition of silo wall, 1 m, including removal of the rubble – height 3.60 m; length 1 m – height 5.00 m; length 1 m	300.– DM 400.– DM
3. Base flooring, 1 m ² – upper cement layer 5 cm + bond course 5 cm or – mastic asphalt, 2 x 25 mm	71.– DM 100.– DM
4. Wall painting, 1 m ²	15.– DM
5. Construction of seepage pits – 50 m ³ effective capacity, for each m ³ – 100 m ³ effective capacity, for each m ³ – 150 m ³ effective capacity, for each m ³ – 250 m ³ effective capacity, for each m ³	480.– DM 375.– DM 360.– DM 340.– DM
6. Construction of a silo concrete slab without side walls for the silaging of coarse forage, including the operating area For each cow approximately 10 m ² for 12 m ³ of silage (without seepage pit)	500.– DM up to 550.– DM/cow
7. Construction of a new horizontal silo for coarse forage with side walls For each cow 12 m ³ of silage (without seepage pit)	to 1,800.– DM/cow ¹⁾ to 1,500.– DM/cow ²⁾

¹⁾Silo with one compartment

²⁾Silo with several compartments

V. Investments needed for the reconstruction of existing horizontal silos and the construction of new ones (Reconstructions using the example of the existing horizontal silo type SH 3600)

Version	Animal places (head)	Reconstructions versions	Alternative solutions		
			New construction silo slab without walls	New construction horizontal silo with walls	
				silo with one compartment	silo with several compartments
			(DM/animal place)		
1.1.	100	1,675	595	1,895	1,535
1.2.	100	1,405	595	1,895	1,535
2.1.	200	935	585	1,885	1,525
2.2.	200	800	585	1,885	1,525
3.1.	300	875	580	1,880	1,520
3.2.	300	805	580	1,880	1,520
3.3.	300	690	580	1,880	1,520
4.1.	400	690	580	1,880	1,520
4.2.	400	645	580	1,880	1,520
4.3.	400	550	580	1,880	1,520

Spreading of a layer of the material for ensilage with a thickness of 30 to 50 cm

- 2 to 3 minutes compressing time by tractor/t wilted fodder – the objective is to drive four or five times over this layer of the material for ensilage,
- for one permanently operating forage harvester which prepares the material for ensilage, the standard is to have one tractor in operation in the horizontal silo which compresses the material for ensilage over 70 to 80% of its operating time.

– The formation of seepage is, amongst others, connected with the loss of nutritive substances, it affects the silo structure, and its utilization and its removal involves considerable expenses. For this reason, the procedure of silaging should be such that the formation of seepage is prevented to the greatest possible extent. This however, does not mean a release from adhering to valid rules and regulations. In order to definitely prevent the leaking of such seepage, the objective in silaging should be to reach a TS-contents of > 35% in

horizontal silos and a TS-contents of > 40% in vertical silos. When silaging maize, the sap that is formed by fermentation can be bound by mixing the maize with straw (Fürll, 1993).

– For covering the fodder stack, polyethylene foil should preferably be used that has been tested by the German Agricultural Society. This foil meets requirements in respect of strength and gas impermeability (Braun, 1992). Physical and chemical properties as well as the aging process are essential in determining or not a specific foil is suitable for fodder conservation. In order to achieve a complete covering of the fodder stack, an overlapping of the foil is required. The fluttering of the foil shall be prevented by putting weights on the entire surface of the covering foil. In order to prevent birds from eating the fodder, nets are fastened over worn-out tyres serving as spacers (Hertwig, 1992).

– Machines and devices with a different degree of mechanisation have been developed and successfully used for the unloading of silage from horizontal silos and its distribution. In the first place, these machines facilitate work and save working hours, they prevent the loosening-up of the forage stack, thereby reducing losses of fodder owing to secondary fermentation. The use of various machines and devices for the unloading of silage from horizontal silos has been examined (Weghe, 1989). The results of these examinations make it possible to choose the appropriate means of mechanisation for grass and maize silages that were chopped to differing sizes.

– It may be taken for granted that in reconstructed horizontal silos more favourable conditions of fermentation biology and less fermentation losses can be achieved than on silo concrete slabs without side walls. It is, therefore, suggested to opt for reconstruction solutions, above all when it comes to concentrations with approximately 200 cows or large cattle. With a concentration of 200 cows, reconstruction is about one third more expensive than silo concrete slabs, but only half as expensive as newly constructed horizontal silos. For 400 cows the expenditure for reconstruction solutions is about the same as for silo concrete slabs, whereas the expenditure comes to about one third of that for newly constructed horizontal silos.

SUMMARY

In 1986, about 37 million cubic metres of horizontal silo space were available on the territory of what is now the new Federal States of Germany. The state of repair of these horizontal silos, the storage capacity and their

incorporation into livestock farming plants and facilities are being evaluated. For the management of these horizontal silos, data are being communicated regarding devices and equipment for the storage of material for ensilage and for the unloading of silage. Starting from the requirements placed on fermentation biology and the number of livestock to be supplied with forage, the interactions for determining the silo storage capacity and for ascertaining the capacity needed in the loading of silos and the unloading of silage are being described. In order to supply 100, 200, 300 and 400 cows in one plant different variants for the reconstruction of large horizontal silos were elaborated and assessed.

Literature

- BRAUN, 1992 –
FREITAG, H.: Methodik zur Größen- und Standortbestimmung von Horizontalsilos. Berichtsmanuskript zur Silobewirtschaftung. 1989 (unpublished).
FÜRL, Chr.: Silagesickersäfte möglichst vermeiden. Neue Landwirtschaft, 6/1993, p. 82–83.
GAERTHS, E.: Persönliche Mitteilung zu Baupreisen. BQG. Bauakademie GmbH Berlin, 1992 (unpublished).
HERTWIG, F.: Optimale Silobewirtschaftung. Neue Landwirtschaft, 5, 1992, p. 98–99.
THÖNS, H. et al.: Ökonomie- und ökologiegerechte Welksilage- und Heuproduktion einschliesslich des Einsatzes chemischer Silierzusätze aus der eigenen Produktion. [Forschungsbericht.] Institut für Futterproduktion, Paulinenaue, 1990.
WEGHE VAN DEN, H.: Maschinen und Geräte für Entnahme, Transport und Vorlage von Grünfütter aus Flachsilo – Bauarten. KTBL – Arbeitsblatt Nr. 1082, 1989.
WEISE, G. – ROMBUSCH, H.: Produktionsüberwachung und Qualitätssicherung; Normative Silokartei. Agrarbuch, 1988, 44 pages.
GROUP OF AUTHORS: KTBL – Taschenbuch Landwirtschaft (Daten für die Betriebskalkulation in der Landwirtschaft). 1990.
GROUP OF AUTHORS: Richtpreise für den Neu- und Umbau landwirtschaftlicher Wirtschaftsgebäude. Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Bauwesen Hessen e. V. Kassel, edition 1991/92.
– Listentyp 3 der Bausubstanzanalyse des Ministeriums für Land-, Forst- und Nahrungsgüterwirtschaft und dem Institut für Agrarökonomie der AdL vom 05. 11. 1987.
– Kalkulationen des ATB. Anlehnung an persönliche Mitteilung des Baubetriebes E. Leider. Bornim, 9, 1992.

Received on February 16, 1994

Contact Address:

Prof. dr. G. Otto, Institut für Agrartechnik, Bornim e. V., (ATB), Max-Eyth-Allee 1, D-14467 Potsdam-Bornim, Germany

POKYNY PRO AUTORY

Časopis uveřejňuje původní vědecké práce, krátká sdělení a výběrově i přehledné referáty, tzn. práce, jejichž podkladem je studium literatury a které shrnují nejnovější poznatky v dané oblasti. Práce jsou uveřejňovány v češtině, slovenštině nebo angličtině. Rukopisy musí být doplněny krátkým a rozšířeným souhrnem.

Autor je plně odpovědný za původnost práce a za její věcnou i formální správnost. K práci musí být přiloženo prohlášení autora o tom, že práce nebyla publikována jinde.

O uveřejnění práce rozhoduje redakční rada časopisu, a to se zřetelem k lektorským posudkům, vědeckému významu a přínosu a kvalitě práce.

Rozsah vědeckých prací nemá přesáhnout 10 stran psaných na stroji včetně tabulek, obrázků a grafů. V práci je nutné používat jednotky odpovídající soustavě měrových jednotek SI (ČSN 01 1300).

Vlastní úprava rukopisu má odpovídat státní normě ČSN 88 0220 (formát A4, 30 řádek na stránku, 60 úhozů na řádku, mezi řádky dvojitě mezery). Tabulky, grafy a fotografie se dodávají zvlášť, nepodlepují se. Na všechny přílohy musí být odkazy v textu.

Název práce (titul) nemá přesáhnout 85 úhozů. Je nutné vyvarovat se v něm obecných názvů. Jsou vyloučeny podtitulky článků.

Krátký souhrn (Abstrakt) je informačním výběrem obsahu a závěru článku, nikoliv však jeho pouhým popisem. Musí vyjádřit všechno podstatné, co je obsaženo ve vědecké práci, a má obsahovat základní číselné údaje včetně statistických hodnot. Nemá překročit rozsah 170 slov. Je třeba, aby byl napsán celými větami, nikoliv heslovitě. Je uveřejňován a měl by být dodán ve stejnému jazyce jako vědecká práce.

Rozšířený souhrn (Abstract) je uveřejňován v angličtině, měly by v něm být v rozsahu cca 2 strojopisných stran komentovány výsledky práce a uvedeny odkazy na tabulky a obrázky, popř. na nejdůležitější literární citace. Je nutné jej (včetně názvu práce a klíčových slov) dodat v angličtině, popř. v češtině či slovenštině jako podklad pro překlad do angličtiny.

Úvod má obsahovat hlavní důvody, proč byla práce realizována a velmi stručnou formou má být popsán stav studované otázky.

Literární přehled má být krátký, je třeba uvádět pouze citace mající úzký vztah k problému. Doporučuje se co nejnižší počet citovaných autorů.

Metoda se popisuje pouze tehdy, je-li původní, jinak postačuje citovat autora metody a uvádět jen případné odchylky. Ve stejné kapitole se popisuje také pokusný materiál.

Výsledky – při jejich popisu se k vyjádření kvantitativních hodnot dává přednost grafům před tabulkami. V tabulkách je třeba shrnout statistické hodnocení naměřených hodnot. Tato část by neměla obsahovat teoretické závěry ani dedukce, ale pouze faktické nálezy.

Diskuse obsahuje zhodnocení práce, diskutuje se o možných nedostatcích a práce se konfrontuje s výsledky dříve publikovanými (požaduje se citovat jen ty autory, jejichž práce mají k publikované práci bližší vztah). Je přípustné spojení v jednu kapitolu spolu s výsledky.

Literatura musí odpovídat státní normě ČSN 01 0197. Citace se řadí abecedně podle jména prvních autorů. Odkazy na literaturu v textu uvádějí jméno autora a rok vydání. Do seznamu se zařadí jen práce citované v textu. Na práce v seznamu literatury musí být odkaz v textu.

Na zvláštním listě uvádí autor plné jméno (i spoluautorů), akademické, vědecké a pedagogické tituly a podrobnou adresu pracoviště s PSČ, číslo telefonu a faxu.

Pokud autor používá v práci zkratky jakéhokoliv druhu, je nutné, aby byly alespoň jednou vysvětleny (vypsány), aby se předešlo omylům. V názvu práce a v souhrnu je vhodné zkratky nepoužívat.

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

Original scientific papers, short communications, and selectively reviews, that means papers based on the study of technical literature and reviewing recent knowledge in the given field, are published in this journal. Published papers are in Czech, Slovak or English. Each manuscript must contain a short and a longer summary.

The author is fully responsible for the originality of his paper, for its subject and formal correctness. The author shall make a written declaration that his paper has not been published in any other information source.

The board of editors of this journal will decide on paper publication, with respect to expert opinions, scientific importance, contribution and quality of the paper.

The paper extent shall not exceed ten typescript pages, including tables, figures and graphs.

Manuscript layout shall correspond to the State Standard ČSN 88 0220 (quarto, 30 lines per page, 60 strokes per line, double-spaced typescript). Tables, figures and photos shall be enclosed separately. The text must contain references to all these annexes.

The **title** of the paper shall not exceed 85 strokes. It is necessary to avoid in the title the usage of common expressions. Subtitles of the papers are not allowed either.

Abstract is an information selection of the contents and conclusions of the paper, it is not a mere description of the paper. It must present all substantial information contained in the paper. It shall not exceed 170 words. It shall be written in full sentences, not in form of keynotes, and comprise base numerical data including statistical data. It should be submitted in English and if possible also in Czech or Slovak.

Introduction has to present the main reasons why the study was conducted, and the circumstances of the studied problems should be described in a very brief form.

Review of literature should be a short section, containing only literary citations with close relation to the treated problem. It is recommended to cite the lowest possible number of authors.

Only original method shall be described, in other cases it is sufficient enough to cite the author of the used method and to mention modifications of this method. This section shall also contain a description of experimental material.

In the section **Results** figures and graphs should be used rather than tables for presentation of quantitative values. A statistical analysis of recorded values should be summarized in tables. This section should not contain either theoretical conclusions or deductions, but only factual data should be presented here.

Discussion contains an evaluation of the study, potential shortcomings are discussed, and the results of the study are confronted with previously published results (only those authors whose studies are in closer relation with the published paper should be cited). The sections Results and Discussion may be presented as one section only.

The citations are arranged alphabetically according to the surname of the first author. References in the text to these citations comprise the author's name and year of publication. Only the papers cited in the text of the study shall be included in the list of references. All citations shall be referred to in the text of the paper.

If any abbreviation is used in the paper, it is necessary to mention its full form at least once to avoid misunderstanding. The abbreviations should not be used in the title of the paper nor in the summary.

The author shall give his full name (and the names of other collaborators), academic, scientific and pedagogic titles, full address of his workplace and postal code.

OBSAH – CONTENT

Hnilica P.: Vliv rychlosti kladívek a částic na proces a energetickou náročnost mletí – The effect of speed of hammers and particles on the process and demand of energy in grinding	1
Cyrus P.: Součinitel smykového tření netradičních konstrukčních materiálů vhodných pro výrobu redlerů – Coefficient of smoothing friction of non-traditional construction materials suitable for production of bulk conveyers	15
ToInai R., Hammad M.: Spevnenie kovových materiálův v procese opotrebenia v pôde – Hardening of metallic materials in the process of wear in soil	23
Hörnig G., Scherping E.: Water consumption and the amount of waste water generated in milking plants and dairy houses of large dairy cattle farms – Spotřeba vody a množství odpadní vody u dojicích zařízení a mléčnic ve velkokapacitních dojárnách	29
Otto G., Bendull K.: Reconstruction of large horizontal forage silos – Rekonstrukce velkokapacitních silážních žlabů	35