

M E L I T E L N O S T A E N E R G I E Z D R O B Ň O V Á N Í

LUDVÍK JIROUSEK*, KAREL ŠPIČÁK

Katedra technologie silikátů, Vysoká škola chemicko-technologická,
Suchbátarova 5, 166 28 Praha 6

*Výzkumný ústav elektrotechnické keramiky, Pospíšilova 281, 500 64 Hradec Králové

Došlo 12. 2. 1986

Při dlouhodobém suchém i mokrému mletí písku v laboratorním mlýnu a určování měrného povrchu různými metodami bylo konstatováno, že naměřené hodnoty technické melitelnosti závisí nejen na podmínkách mletí, ale i na metodách posuzování výsledků mletí.

Pro posouzení se ukázal být vhodným měřítkem měrný povrch určený ze sedimentační analýzy a z adsorpce dusíku.

Technická melitelnost není materiálovou konstantou, mění se v průběhu zdrobňování. Je vyjádřena pro dané stadium mletí jako melitelnost efektivní, diferenciální, resp. differenční nebo pro celý interval mletí jako dvouparametrová mocninová funkce měrného povrchu.

Poměr melitelnosti standardního materiálu za sledovaných podmínek k melitelnosti téhož materiálu za standardních podmínek je označen jako melivost. Melivost mokrého mletí je větší ve srovnání se suchým mletím a je přibližně lineární funkcí měrného povrchu.

ÚVOD

Téměř každá publikace o zdrobňování se dotýká palčivé otázky vysoké spotřeby energie této operace. Zvláště při jemném mletí je tato spotřeba neúměrně velká a docílený výsledek (posuzovaný obvykle příruškem povrchu nebo poklesem příslušné střední velikosti zrna) neekonomický. Vynaložená práce je závislá nejen na materiálu samém, ale velmi výrazně i na zařízení a jeho provozních parametrech určujících předávání energie. Stanovit melitelnost jako materiálovou vlastnost, tj. od pracovních podmínek izolovanou schopnost materiálu mechanicky se zdrobňovat, je prakticky nemožné. Výsledky jsou kromě toho poplatně zvolenému kritériu účinku mletí i metodě jeho určování [23]. Při mletí probíhá vedle zdrobňování též amorfizace povrchu zrn a celkové zvýšení vnitřní energie produktu. Je-li toho využíváno v následujících technologických operacích, vychází účinnost a tedy i melitelnost mletí podstatně větší [18].

Melitelnost materiálu bude v této práci pojata z technického hlediska (jako technická, resp. standardní charakteristika), jako přírušek povrchu docílený vynaloženou prací [1] za zvolených podmínek. Závisí na celém komplexu fyzikálně mechanických vlastností, jako jsou pevnost, pružnost, tvrdost, křehkost, štěpnost, houzevnatost. Uvedené vlastnosti jsou určovány u silikátových materiálů nejen mineralogickým složením, strukturou, texturou, nehomogenitami a poruchami, ale i způsobem nanáhání, jako je tah, tlak, smyk, a orientace sil, neboť zmíněné vlastnosti materiálu nejsou izotropní. Tyto vlastnosti ovlivňuje i rychlosť zatěžování a panující teplota a mechanické „zpracování“ během mletí. Práce při mletí závisí dále na zrnitosti kolektivu sestávajícího zpravidla z různě velkých zrn a jeho pohybových vlastnostech, vnitřním tření, kohezi. Energetické vztahy mají proto charakter statistický. Při mletí má důležitý vliv i prostředí [20]. Rozdílná situace je při suchém a mokrému mletí v suspenzi. Významně se uplatňují malá množství intenzifikátorů mletí, která zpra-

vidla potlačují aglomeraci, zvyšují sypkost — tekutost produktu nebo peptizují a dispergují suspenzi.

Pro obtížnost určování melitelnosti se volí často relativní koeficient melitelnosti K_m , který je vyjádřen poměrem převrácených mlecích prací, tj. poměrem miecí práce standardu W_{st} k mlecí práci vzorku W při mletí za stejných podmínek. Vychází se obvykle ze stejně velkých navážek i ze stejné počáteční jemnosti standardu a vzorku a mele se na stejnou konečnou jemnost. Pro splnění stejných podmínek mletí nutno volit standard tak, aby jeho vlastnosti byly blízké zkoušeným látkám. Má pak např. při stejné výchozí zrnitosti i stejnou sypnou hmotnost. Za standard nutno volit proto materiál příbuzný zkoušenému vzorku.

Protože koeficient melitelnosti je poměrem prací W nebo měrných prací w ($\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$), stačí k jeho vyjádření použít veličinu jím úměrných, jako jsou u obvykle používaného kolového mlýna mlecí doba $t(h)$, počet vykonaných otáček $z(1)$, nebo výrobnost Q ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$), která je práci nepřímo úměrná:

$$K_m = \frac{W_{st}}{W} = \frac{w_{st}}{w} = \frac{t_{st}}{t} = \frac{z_{st}}{z} = \frac{Q}{Q_{st}}.$$

Relativní koeficient melitelnosti standardu je tedy jednotkový, materiál snáze melitelný má koeficient melitelnosti větší než 1.

Jemnost vsázky a produktu se někdy posuzuje nepříliš dokonale zbytkem na zvoleném sítu (R_x). Vhodnějším měřítkem je „měrný povrch vztažený na objem“ — (povrchová hustota) S_V (m^{-1}), který je za předpokladu kulového nebo krychlového zrna šestinásobkem převrácené hodnoty harmonického průměru velikostí zrn počítaného na základě objemového nebo hmotnostního zastoupení zrn. Harmonický průměr takto definovaný bývá právě pro tento vztah k měrnému povrchu nazýván přirozeným (natárním) průměrem x_{nat} (v západní literatuře Sauterovým průměrem)

$$S_V = 6 \frac{1}{x_{nat}} = \frac{6}{100} \sum_j \frac{p_j}{x_j},$$

kde x_j je střední hodnota mezi j -té frakce s mezemi x_i a x_j ,

p_j procentové zastoupení této frakce

Měrný povrch se obvykle určuje některou z přímých metod, nejlépe plynovou adsorpci. Různé metody dávají však podstatně rozdílné hodnoty [9].

Vhodnějším vyjádřením melitelnosti, než je relativní koeficient melitelnosti, by byla převrácená hodnota měrné mlecí práce, která je koeficientem v tzv. mlecích „zákonech“, přesněji mlecích hypotézách [4,14].

Nejčastěji používaná je klasická povrchová hypotéza Rittingerova, podle níž je teoretická práce W_0 úměrná nově vzniklému povrchu A :

$$W_0 = \lambda A.$$

Koeficientem úměrnosti je měrná povrchová práce λ , která odpovídá energii nového povrchu. Její převrácená hodnota je teoretická povrchová melitelnost podle Rittingerova vztahu Me_R . Je přírůstkem povrchu získaným jednotkou práce

$$Me_R = \frac{1}{\lambda} = \frac{A}{W_0}.$$

Povrchová energie však nepočítá s energií na pružné deformace nevedoucí k rozrušení, která se v konečné formě projeví v ohřátí a je u reálných materiálů významná [19]. Podobně neuvažuje i ostatní energetické ztráty.

Oproti tonu převratná hodnota technické nebo standardní zdrobňovací práce, při které se uvažuje součet všech prací W spojených se zdrobňováním, je prakticky určitelná technická nebo standardní povrchová melitelnost. Respektuje práci nejen na nový povrch, ale i veškeré práce ostatní:

$$Me = \frac{1}{\lambda_{tech}} = \frac{A}{W} = \frac{S}{w} \quad Me = \eta \frac{1}{\lambda} = \eta Me_R,$$

kde η je účinnost.

Technická melitelnost je mnohem menší než teoretická ($\eta \ll 1$), neboť neúčinné ztráty energie značně převažují. U křemene je udávána [5] hodnotou $9500 \text{ m}^2 \cdot \text{kWh}^{-1}$, resp. $2,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{J}^{-1}$. V. P. Romanin [22] uvádí účinnost v kulovém mlýnu 0,06 %, ve válcovém mlýnu 0,4 %, v přístroji s padající koulí 0,9 %.

Povrchová teorie platí jen přibližně a pouze do určité meze, která je definovatelná např. příslušnou hodnotou měrného povrchu. Nad ní roste měrný povrh méně progresivně, než by odpovídalo vynakládané práci. Podle Olevského [5] na základě dat Tovarova, který sledoval mletí do $640 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, platí u píska pro mez proporcionality $S_p = 250 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, $w_p = 0,025 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$, u ostatních materiálů, vápence, slínku, uhlí, strusky jsou hodnoty w_p menší než poloviční ($0,005 - 0,012 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$). Z uvedených dat S_p a w_p plyne pro melitelnost křemene $1 \cdot 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{kWh}^{-1}$, což je v dobré shodě s výše uvedenou hodnotou $9,5 \cdot 10^3 \text{ m}^2 \cdot \text{kWh}^{-1}$. Hukki uvádí, že Rittingerův vztah se dá dobře použít v rozmezí $10 \mu\text{m}$ až 1 mm [21].

Většina pozdějších prací vychází opět z teorie povrchové, jako např. Zeisel [11]. O objemovou teorii se opírá Lesin [12], ale respektuje zpevnování s rostoucím měrným povrchem.

Při těchto úvahách je třeba rozlišovat energii na vlastní zdrobňování a na pohon zařízení. Energie na pohon mlýna není sama charakteristikou materiálu. Velikost částic nemá prakticky žádný vliv na příkon mlýna, tento zůstává i při periodickém mletí konstantní; energetická spotřeba je úměrná době mletí [16].

Protože technická melitelnost závisí na podmínkách zdrobňování, je nezbytné pro její určování volit standardní přístroj. Takovým zařízením je vhodný laboratorní mlýn [23]. Sovětská metoda VTI používá kulový mlýn. Kroužkový axiální kuloběžný mlýn je používán klasickou metodou podle Hardgrova v USA [19]. Z něho se vyvinul moderní Segerův přístroj, na němž sledovali melitelnost slínků R. Froněk [6], F. Kůrka [7, 13], Z. Žadák a J. Žežulká [8]. Tlukadlový mlýn byl zaveden ve Výzkumném ústavu energetickém v Brně [3, 17].

Vzhledem k předcházejícím problémům s definováním jednoznačného vztahu pro mletí práci, pokusili jsme se v tomto sdělení o jiný přístup k řešení.

Uvážili jsme obecný vztah mezi prací a vzniklým povrchem:

$$W = f(A).$$

Po vztažení práce a povrchu na hmotnost m (kg) platí

$$w = f(S) \Rightarrow S = S(w),$$

kde w je měrná práce ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) nebo ($\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Derivace této funkce je funkce melitelnosti. Cílem je určit její parametry

$$Me(w) = S'(w) = \frac{ds}{dw}.$$

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Materiál a pracovní postup

Za pokusné melivo byl vybrán úzce vytrídený křemičitý písek T 25. Jeho zrnitost byla určena sítovým rozbořem provedeným za mokra (tabulka I). Hlavní podíl zrn má mezi 0,1 až 0,4 mm, a to 91 %. Vypočtený měrný povrch za předpokladu kulových zrn je $12 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$.

Tabulka I

Sítový rozbor křemičitého píska T 25

| Průměr x (mm) | Podíl p (%) | Propad y (%) |
|--------------------|------------------|-------------------|
| 0,71—1,00 | 0,40 | 100,00 |
| 0,40—0,71 | 5,80 | 99,60 |
| 0,20—0,40 | 42,10 | 93,80 |
| 0,10—0,20 | 48,90 | 51,70 |
| 0,08—0,10 | 1,30 | 2,80 |
| 0,063—0,08 | 0,50 | 1,50 |
| 0,040—0,063 | 0,20 | 1,00 |
| pod 0,040 | 0,80 | 0,80 |

$$\text{měrný povrch } S_0 = 12,2 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Mletí bylo prováděno v laboratorním bubnovém mlýnku typu L 224/1 o objemu 5 litrů s vnitřním průměrem 210 mm (ČSN 72 5621). Mlelo se směsi porcelánových koulí průměru 35 mm (1,1 kg) a průměru 20 mm (0,9 kg). Frekvence otáček byla 75 min⁻¹.

Podle vztahu

$$n_k = 42,3(D - d_k)^{-1/2},$$

kde n_k jsou kritické otáčky (min^{-1}),

D průměr mlecího prostoru (m),

d_k průměr koule (m),

odpovídá tato frekvence 74,2 % frekvence kritické pro uvedené velké koule a 77,3 % kritické frekvence pro koule malé. Objemový stupeň plnění mlýna mlecími tělesy byl $f = 0,317$; stupeň zaplnění mezer mezi koulemi melivem [2] (tj. poměr sypného objemu meliva k objemu mezer v náplni mlecích koulí) byl na počátku mletí 2,041. Vyplývá z 2,0 kg mlecích těles uvedených rozměrů a stejné hmotnosti meliva. Mlýn byl poháněn elektromotorem o jmenovitém příkonu 260 W, napojeným přes stabilizátor napětí.

Sledované mleci doby byly zvoleny v geometrické posloupnosti od 4 do 250 h s kvocientem 2. Vždy po uplynutí příslušného času bylo melivo vyjmuto, zhomogenizováno a odebrán vzorek pro stanovení zrnitosti a měrného povrchu. Takto bylo získáno 7 vzorků — pokusných bodů. Spoběba práce W (kWh) byla odečítána na elektroměru. Mletí za mokra bylo prováděno stejným způsobem, ale po přidavku ještě 2 l vody, takže tzv. mlecí poměr byl $m_k : m_m : m_v = 1 : 1 : 1$. V uvedené časové posloupnosti bylo melivo zachycováno na filtru v Büchnerově nálevce, vysoušeno a určována zrnitost a měrný povrch.

Zrnitost byla určována jednak sítovým rozborem prováděným za mokra, jednak pipetovací sedimentační metodou podle Andreasena. Výsledky byly přepočteny na měrný povrch. Měrný povrch byl pak určován přímou metodou adsorpce dusíku, tzv. chromatografickým způsobem podle Nelsena a Eggertsena.

Výsledky měření a jejich interpretace

Získaná číselná data jsou sestavena v tabulce II a graficky znázorněna ve formě časových závislostí určeného měrného povrchu S_u na době mletí t v obr. 1.

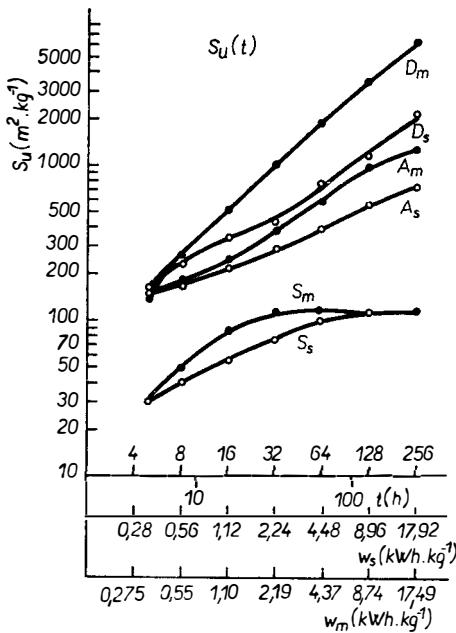
Tabulka II

Průběh mletí

| Způsob mletí | Čís. měř. | Doba mletí t (h) | Měrná mleci práce w (kWh . kg ⁻¹) | S_u určený měrný povrch (m ² . kg ⁻¹) | | |
|--|-----------|--------------------------|---|--|---------------|--------------|
| | | | | sítový rozbor (S) | Andreasen (A) | Adsorpce (D) |
| Za sucha | 1 | 4 | 0,228 | 29,2 | 143,8 | 155 |
| | 2 | 8 | 0,56 | 39,0 | 171,8 | 225 |
| | 3 | 16 | 1,12 | 53,4 | 213,2 | 335 |
| | 4 | 32 | 2,25 | 73,9 | 280,0 | 526 |
| | 5 | 64 | 4,48 | 96,7 | 385,0 | 775 |
| | 6 | 128 | 8,96 | 109,9 | 550,0 | 1 113 |
| | 7 | 256 | 17,92 | 112,5 | 722,3 | 2 080 |
| Za mokra | 1 | 4 | 0,275 | 30,0 | 142,2 | 140 |
| | 2 | 8 | 0,55 | 49,0 | 178,0 | 260 |
| | 3 | 16 | 1,10 | 85,6 | 246,0 | 510 |
| | 4 | 32 | 2,19 | 111,5 | 369,0 | 995 |
| | 5 | 64 | 4,37 | 112,1 | 594,2 | 1 860 |
| | 6 | 128 | 8,74 | 112,6 | 959,7 | 3 385 |
| | 7 | 256 | 17,49 | 113,1 | 1 234,0 | 6 033 |
| Počáteční měrný povrch 12,2 ≈ 12 m ² . kg ⁻¹ | | | | | | |

Z tabelárních dat i grafů vyplývá diametrální odlišnost měrných povrchů stanovených různou metodou [9, 10]. Čím je metoda jemnější, schopnější reagovat i na nejmenší částice a případně jejich nerovnosti, tím je určený povrch větší.

Sítový rozbor je pro posuzování jemného mletí málo vhodný. Za poměrně krátkou dobu, asi po 50 h mletí nevykazuje již další růst měrného povrchu, dosahuje se zdánlivé meze mletí. U dat ze sedimentačních rozborů se dospívá do obdobné situace teprve po cca 250 h mletí. Data měrných povrchů z adsorpce dusíku mají však v této době při docílovaných hodnotách při suchém mletí přes 2, při mokrému přes 6 tisíc m² . kg⁻¹ ještě vysoko vzestupný charakter, který v nejmenším nesvědčí o dosahování meze mletí.



Obr. 1. Růst měrného povrchu; S_u — určený měrný povrch, t — doba mletí, w — měrné mleci práce, D — adsorpce, A — Andreasen, S — sítový rozbor. Indexy: s — suché mletí, m — mokré mletí.

Relativní koeficient melitelnosti a melivosti

Vezme-li se suché mletí za standardní, je možné počítat relativní koeficient melitelnosti K_m pro mokré mletí z jednotlivých měrných prací w_s a w_m , potřebných k dosálení stejného nového měrného povrchu S , získaného z pokusně určeného měrného povrchu odečtením počátečního měrného povrchu S_0 , který je cca $12 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. Hodnoty nového měrného povrchu $S = S_u - S_0$ jsou uvedeny v tabulce III a IIIa.

Relativní koeficient melitelnosti závisí na měrném povrchu

$$K_m(S) = \frac{w_s(S)}{w_m(S)},$$

kde w_s je měrná práce ($\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$) pro standardní mletí, za které bylo zvoleno mletí za sucha,

w_m měrná práce posuzovaného mletí, tj. mletí za mokra.

Takto vypočtené relativní koeficienty melitelnosti je možno označovat jako relativní koeficienty melivosti neposuzuje-li se materiál, ale různé podmínky mletí. Podmínkami mletí mohou být např. různé konstrukce mlýna nebo různá mleci tělesa. Jedná se pak o různou melivost mlýnů nebo mlecičích těles, určovanou prostřednictvím vhodně zvoleného standardního materiálu.

Tytéž koeficienty by bylo možné vyjádřit rovněž z efektivních melitelností a podobné z diferenčních nebo diferenciálních melitelností. Diferenční melitelnosti jsou přibližným vyjádřením diferenciální melitelnosti ve středech uvažovaných intervalů měrných povrchů.

Tabulka III

Nové měrné povrchy S ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) a diferenční melitelnosti Me_{ij} ($\text{m}^2 \cdot \text{kWh}^{-1}$)

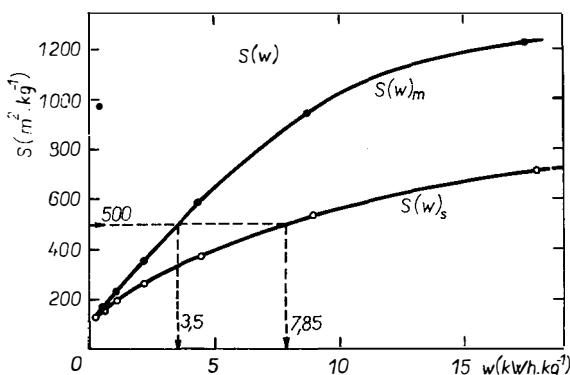
| Způsob mletí | Čís. | Měrná práce w (kWh) | Nový měrný povrch $S = S_{\text{změřený}} - S_0$ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) $Me_{ij} = (S_j - S_i)/(w_j - w_i)$ $S = (s_i + s_j)/2$ | | | | | | | | |
|--------------|------|-----------------------|---|------|------|---------------|------|-------|--------------|-------|---------|
| | | | sítový rozbor (S) | | | Andreasen (A) | | | adsorpce (D) | | |
| | | | S | Me | S | S | Me | S | S | Me | S |
| Za sucha | | | 0 | 60,7 | 8,5 | 0 | 470 | 65,8 | 0 | 510,7 | 71,5 |
| | 1 | 0,28 | 17,0 | 35,0 | 21,9 | 131,6 | 100 | 145,6 | 143 | 250,0 | 178,0 |
| | 2 | 0,56 | 26,8 | 25,7 | 34,0 | 159,6 | 73,9 | 180,3 | 213 | 196,4 | 268,0 |
| | 3 | 1,12 | 41,2 | 18,3 | 51,5 | 201,0 | 59,6 | 234,4 | 323 | 170,5 | 418,5 |
| | 4 | 2,24 | 61,7 | 10,2 | 73,1 | 267,8 | 46,9 | 320,3 | 514 | 111,2 | 638,5 |
| | 5 | 4,48 | 84,5 | 2,95 | 91,2 | 372,8 | 36,8 | 455,3 | 763 | 75,4 | 932,0 |
| | 6 | 8,96 | 97,7 | 0,29 | 99,0 | 537,8 | 19,2 | 624,0 | 1 101 | 107,9 | 1 584,5 |
| | 7 | 17,92 | 100,3 | | | 710,0 | | | 2 068 | | |

Tabulka IIIa

Nové měrné povrchy S ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) a diferenční melitelnosti Me_{ij} ($\text{m}^2 \cdot \text{kWh}^{-1}$)

| Způsob mletí | Čís. | Měrná práce w (kWh) | Nový měrný povrch $S = S_{\text{změřený}} - S_0$ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) $Me_{ij} = (S_j - S_i)/(w_j - w_i)$ $S = (s_i + s_j)/2$ | | | | | | | | |
|--------------|------|-----------------------|---|------|-------|---------------|-------|---------|--------------|-------|---------|
| | | | sítový rozbor (S) | | | Andreasen (A) | | | adsorpce (D) | | |
| | | | S | Me | S | S | Me | S | S | Me | S |
| Za mokra | | | 0 | 64,7 | 8,9 | 0 | 472,7 | 65,0 | 0 | 465,5 | 64,0 |
| | 1 | 0,275 | 17,8 | 69,1 | 27,3 | 130,0 | 130,2 | 147,9 | 128 | 436,4 | 188,0 |
| | 2 | 0,55 | 36,8 | 66,5 | 55,1 | 165,8 | 123,6 | 123,6 | 248 | 454,5 | 373,0 |
| | 3 | 1,10 | 73,4 | 23,8 | 86,4 | 233,8 | 112,8 | 295,3 | 498 | 445,0 | 740,5 |
| | 4 | 2,19 | 99,3 | 0,28 | 99,6 | 356,8 | 103,3 | 469,4 | 983 | 396,8 | 1 415,5 |
| | 5 | 4,37 | 99,9 | 0,11 | 100,2 | 582,0 | 83,6 | 764,8 | 1 848 | 349,0 | 2 610,5 |
| | 6 | 8,74 | 100,4 | 0,06 | 100,7 | 947,5 | 31,1 | 1 084,7 | 3 373 | 302,6 | 4 697,0 |
| | 7 | 17,49 | 100,9 | | | 1 221,8 | | | 6 021 | | |

Hodnoty měrné práce vždy pro tentýž měrný povrch získaný mletím za sucha a za mokra je možno odečíst z graficky vyrovnaných vztahů $S(w_s)$ a $S(w_m)$, jak je ukázáno na výsledcích měrných povrchů určených Andreasenovou sedimentační metodou. Příslušný graf je na obr. 2, odečtená data a vypočtená K_m jsou v tabulce IV.

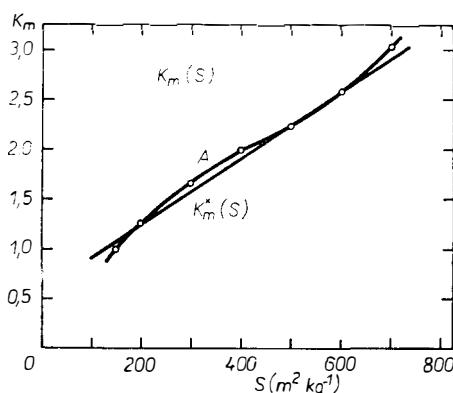


Obr. 2. Nový měrný povrch v závislosti na měrné práci; S — nový měrný povrch, ostatní symboly viz obr. 1.

Tabulka IV

Relativní koeficient melitelnosti $K_m(S)$ pro měrné povrhy z Andreasenovy metody z grafu $S(w)$

| Číslo | S ($m^2 \cdot kg^{-1}$) | w_s | w_m | K_m (l) | K_m^* (l) |
|-------|--------------------------------|-------------------------|-------|--------------|----------------|
| | | ($kWh \cdot kg^{-1}$) | | | |
| 1 | 150 | 0,35 | 0,35 | 1,00 | 1,074879 |
| 2 | 200 | 1,00 | 0,80 | 1,25 | 1,242164 |
| 3 | 300 | 2,75 | 1,65 | 1,67 | 1,576735 |
| 4 | 400 | 5,10 | 2,55 | 2,00 | 1,911306 |
| 5 | 500 | 7,85 | 3,50 | 2,24 | 2,245877 |
| 6 | 600 | 10,50 | 4,50 | 2,33 | 2,580448 |
| 7 | 700 | 17,10 | 5,60 | 3,05 | 2,916019 |



Obr. 3. Koefficient melivosti v závislosti na vzniklému měrném povrchu.

V uvažovaném rozpětí společných hodnot měrných povrchů, které je omezeno (nižším měrným povrchem získaným mletím za sucha při nejdelsí sledované době mletí) na interval cca 150 až 700 m². kg⁻¹ zvolený relativní koeficient melitelnosti mokrého mletí prakticky lineárně stoupá podle regresního vztahu

$$K_m^z = 0,003\ 345\ 71S + 0,573\ 022$$

s hodnotou korelačního koeficientu $r = 0,982\ 424$. Odtud vypočtené hodnoty tzv. odhadu K_m^z jsou rovněž v citované tabulce. Situaci názorně ukazuje obr. 3.

Větší melitelnost při mokrému mletí plyne též ze známého přepočtu Bondových energetických indexů [21] W_t

$$W_t \text{ za sucha} = \frac{W_i \text{ za mokra}}{1,3}.$$

Konstanta 1,3 odpovídá řadově relativnímu koeficientu melitelnosti, resp. melivosti, který se v našem případě pohybuje od cca 1 do 3.

Technická melitelnost

Technickou melitelnost je možné vyjádřit poměrem přírůstku povrchu A na spotřebovanou mlecí práci W , nebo přírůstku měrného povrchu S na měrnou práci w podle vztahů

$$Me = \frac{A}{W} = \frac{A/m}{W/m} = \frac{S}{W} m = \frac{S}{w},$$

kde m je hmotnost meliva (kg).

Za předpokladu nelineárního průběhu $S(w)$ je vhodné označit takto vypočtenou melitelnost jako celkovou nebo zdánlivou, případně efektivní. Je to melitelnost, která by platila pro dané podmínky, tj. S_j a w_j při platnosti Rittingerova vztahu přímé úměrnosti

$$Me_{0j} = \frac{S(w_j)}{w_j} = \frac{S_j}{w_j}.$$

Tyto efektivní melitelnosti pro suché a mokré mletí značené stručně Me_s a Me_m pro měrné povrchy určené ze sedimentačních dat a desorpce jsou v tabulce V.

Oproti tomu diferenční melitelnost vyjádřená pro jednotlivé intervaly ij odpovídá poměru přírůstků

$$Me_{ij} = \frac{S_j - S_i}{w_j - w_i} = \frac{\Delta S}{\Delta w}.$$

Z tohoto hlediska je efektivní melitelnost diferenční melitelností pro interval, jehož dolnímez je počátek $i = 0$.

Limita diferenční melitelnosti pro infinitesimální interval je diferenciální melitelnost

$$Me(w) = \lim_{\Delta w \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta w} = \frac{dS}{dw} = S'(w).$$

Diferenciální melitelnost je úměrná při konstantním příkonu okamžité rychlosti mletí

$$\frac{dS}{dw} \sim \frac{dS}{dt}.$$

Tabulka V

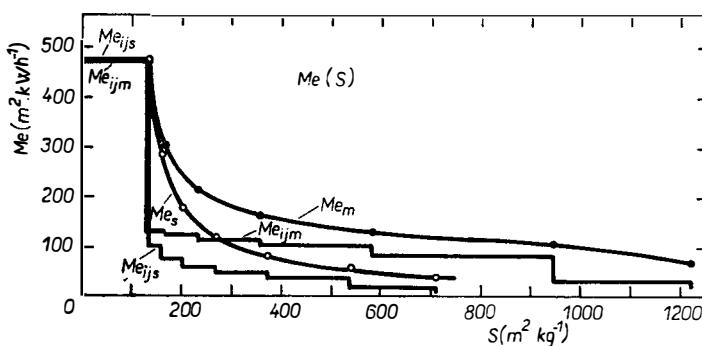
Efektivní melitelnosti Me ($\text{m}^2 \cdot \text{kWh}^{-1}$) z naměřených dat

| Způsob mletí | Čís. | Měrná práce kWh | $Me = Me_{0j} = S_j/w_j$ | | | | | |
|--------------|------|-----------------|--------------------------|------|-----------|-------|----------|-------|
| | | | sítový rozbor | | Andreasen | | adsorpce | |
| | | | S | Me | S | Me | S | Me |
| Za sucha | 1 | 0,28 | 17,0 | 60,7 | 131,6 | 26,3 | 143 | 510,7 |
| | 2 | 0,56 | 26,8 | 44,9 | 159,6 | 31,9 | 213 | 380,4 |
| | 3 | 1,12 | 41,2 | 36,8 | 201,0 | 40,2 | 323 | 288,4 |
| | 4 | 2,24 | 61,7 | 27,5 | 267,8 | 53,6 | 514 | 229,5 |
| | 5 | 4,48 | 84,5 | 18,9 | 372,8 | 74,6 | 763 | 170,3 |
| | 6 | 8,96 | 97,7 | 10,9 | 537,8 | 107,6 | 1 101 | 122,9 |
| | 7 | 17,92 | 100,3 | 5,60 | 710,1 | 142,0 | 2 068 | 115,4 |
| Za mokra | 1 | 0,275 | 17,8 | 64,7 | 130,0 | 472,7 | 128 | 465,5 |
| | 2 | 0,55 | 36,8 | 66,9 | 165,8 | 301,5 | 248 | 450,9 |
| | 3 | 1,10 | 73,4 | 66,7 | 233,8 | 212,5 | 498 | 452,7 |
| | 4 | 2,19 | 99,3 | 45,3 | 356,8 | 162,9 | 983 | 448,9 |
| | 5 | 4,37 | 99,9 | 22,9 | 582,0 | 133,2 | 1 848 | 442,9 |
| | 6 | 8,74 | 100,4 | 11,5 | 947,5 | 108,4 | 3 373 | 385,9 |
| | 7 | 17,49 | 100,9 | 5,8 | 1 221,8 | 69,9 | 6 021 | 344,3 |

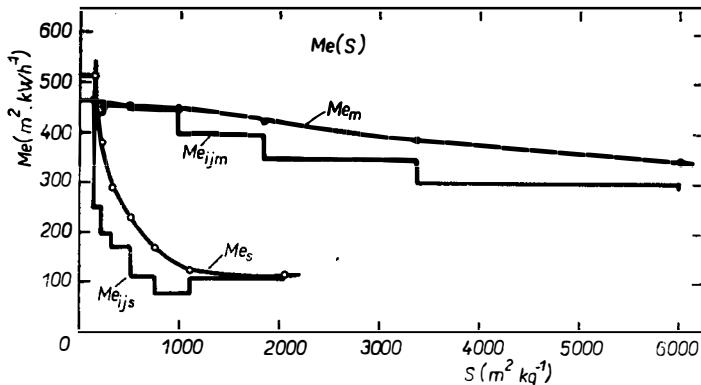
Pro případ platnosti povrchové hypotézy Rittingerovy by všechny tyto melitelnosti byly v celém rozpětí mleci doby stejné a konstantní.

Diferenční melitelnosti z dat sedimentace a desorpce odpovídající intervalům technické měrné práce, jsou zaneseny v již uvedené tabulce dat s novými měrnými povrhy (viz tab. III).

Efektivní melitelnosti platí pro příslušné hodnoty měrných povrchů. Oproti tomu diferenční melitelnosti jsou počítány jako konstantní v příslušných intervalech měrných povrhů. Takto vynesené hodnoty jsou na obr. 4 (data z Andreasena) a 5 (data z adsorpce).



Obr. 4. Efektivní a diferenční melitelnosti v závislosti na měrném povrchu určeném sedimentací; z aproximálních dat; Me_s — efektivní melitelnost při mletí za sucha, Me_m — efektivní melitelnost při mletí za mokra, Me_{ijm} — diferenční melitelnost při mletí za mokra, Me_{ijjs} — diferenční melitelnost při mletí za sucha.



Obr. 5. Efektivní a diferenční melitelnost v závislosti na měrném povrchu určeném adsorpci.
Vysvětlivky viz obr. 4.

Vyplývá z nich pokles melitelností s rostoucím měrným povrchem. U dat z adsorpce jsou však dvě odchylky: 1. malá odchylka blízko počátku mokrého mletí, prudší pokles a přechodný malý vzestup diferenční melitelnosti, který se jeví jako nepatrný přechodný vršek efektivní melitelnosti, 2. poněkud větší odchylka u sušého mletí, která vykazuje konečný vzestup diferenční melitelnosti, jenž se však neprojevuje na efektivní melitelnosti. Jev je vysvětlitelný rozpadem aglomerátů, které vznikají zvláště při suchém jemném mletí. Aglomeráty nejprve rostou, mletí se zpomaluje, měrný povrch může dokonce přechodně klesat, dosáhnou-li však určité velikosti, rozpadají se, což se může periodicky opakovat, jak bývá pozorováno zvláště u dlouhodobého vibračního mletí [15]. U výsledků z Andreasena se nemůže tento efekt očekávat, neboť metoda pracuje se suspenzí po dokonalé dispergaci.

Funkce melitelnosti

Uváží-li se, že spotřeba měrné práce na elementární účinek měrného povrchu je úměrná mocnině měrného povrchu, tj. $dw/dS \sim S^{\kappa}$ pak integrací v mezích S_0 až $S \rightarrow \infty$ dostane

$$w = \frac{1}{\kappa + 1} (S^{\kappa+1} - S_0^{\kappa+1}).$$

Zanedbá-li se počáteční měrný povrch $S_0 \approx 0$ a zavedou-li se nové konstanty, vznikne po vyjádření měrného povrchu vztah:

$$S = cw^k = \left(\frac{w}{w_K} \right)^{\frac{1}{k}},$$

kde S je přírůstek měrného povrchu, nový měrný povrch ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)

c, n — parametry

$w_K = c^{-1/k}$ má význam měrné práce při jednotkovém měrném povrchu

k — stupeň funkce; pro $k = 1$ přechází vztah v Rittingerovu rovnici, pak $w_K = \lambda$ (měrná technická povrchová mlečí práce kWh m^{-2}).

Tento jednoduchý dvouparametrový mocninový vztah se transformuje logaritmováním na lineární

$$\log S = \log c + k \log w.$$

• Označí-li se $\log S = Y$, $\log w = X$ a $\log c = Q$, mohou se řešit parametry této regresní přímky $Y = Q + kX$ metodou nejmenších čtverců. Pro parametry pak platí vztahy (vypustíme-li u proměnných a symbolu Σ indexy)

$$k = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum x^2 - (\sum X)^2} \quad Q = \log c = \frac{1}{n} (\sum Y - k \sum X),$$

kde n je počet pokusných bodů, dvojic (w, S) .

Pro výpočtem odhadnutou hodnotu S z proložené křivky platí

$$S^* = cw^k.$$

Výběrový korelační koeficient r je dán poměrem výběrové kovariance s_{xy} k součinu výběrových směrodatných odchylek s_x a s_y :

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} = \frac{1}{n-1} \frac{(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{s_x \cdot s_y}.$$

Čím je hodnota $|r|$ bližší 1, tím je vztah $S(w)$ lépe vystižen křivkou $S^*(w)$. Je-li v intervalu 0,950 až 0,999, je to potvrzení uvažované hypotézy.

Melitelnost jako derivace funkce $S(w)$ pro uvedenou mocninovou funkci je dána vztahem:

$$Me(w) = \frac{dS}{dw} = ck w^{k-1} = aw^{-b}.$$

Má-li se melitelnost vyjádřit v závislosti na S , provede se to vyřešením w z původního vztahu

$$w = \left(\frac{S}{c} \right)^{1/k},$$

a jeho dosazením do předcházející rovnice, která pak přejde na funkci $Me(S)$

$$Me(S) = ck \left(\frac{S}{c} \right)^{\frac{k-1}{k}} = k \frac{1}{ck} S^{-\left(\frac{1}{k}-1\right)} = AS^{-B}.$$

Místo mocninové funkce je možné použít lineární funkce, tj. rovnice obecné přímky

$$S^* = \alpha + \beta w,$$

kde S^* na rozdíl od S^* je odhad z lineární funkce.

Z derivace této funkce vyplývá, že koeficient β je přímo melitelností, melitelnost je pak konstantou

$$Me(w) = Me(S) = \beta.$$

V mnohých případech však není nutné znát průběh melitelnosti v celém zde sledovaném rozptěti mlecích časů, které bylo v našem případě (4 až 256 h) značně široké. Je možné zaměřit se na dílčí interval, např. od 4 do 128 h, což odpovídá našim experimentálním bodům 1 až 6, tj. polovině celého intervalu, a volit vyjádření přilehlavější zpravidla s větším r v tomto nižším intervalu.

Dále jsou shrnutý parametry vztahů měrných povrchů $S(w)$ a funkcí melitelnosti $Me(w)$, opírající se o data získaná sedimentační metodou (tabulka VI a VIIa) a o data z desorpce (tabulka VII a VIIa).

Tabulka VI

Parametry funkcí měrných povrchů a melitelností ze sedimentačních dat

Suché mletí

| Pro body | $S^* = cw^k$ | | | $S^x = \alpha + \beta w$ | | |
|-----------------|--------------|----------|----------|--------------------------|---------|----------|
| | c | k | r | α | β | r |
| 1—3 | 192,943 | 0,305518 | 0,998679 | 110,900 | 81,3776 | 0,996873 |
| 1—4 | 198,538 | 0,340771 | 0,996031 | 118,626 | 67,9753 | 0,995533 |
| 1—5 | 202,531 | 0,375118 | 0,994211 | 129,117 | 56,1310 | 0,993459 |
| 1—6 | 204,786 | 0,406867 | 0,993175 | 143,653 | 45,8437 | 0,991267 |
| 1—7 | 205,044 | 0,417572 | 0,995393 | 174,437 | 32,6108 | 0,973580 |
| $Me = aw^{-b}$ | | | | | | |
| | a | b | — | $Me = \beta$ | | |
| 1—6 | 83,3212 | 0,593133 | | | | |
| 1—7 | 85,6208 | 0,582428 | | | | |
| $Me = AS^{*-B}$ | | | | | | |
| | A | B | — | | | |
| 1—6 | 1950,67 | 1,457807 | | | | |
| 1—7 | 1435,94 | 1,394796 | | | | |

Tabulka VIa

Parametry funkcí měrných povrchů a melitelností ze sedimentačních dat

Mokré mletí

| Pro body | $S^* = cw^k$ | | | $S^x = \alpha + \beta w$ | | |
|-----------------|--------------|----------|----------|--------------------------|---------|----------|
| | c | k | r | α | β | r |
| 1—3 | 220,825 | 0,423806 | 0,995155 | 96,000 | 125,506 | 0,999917 |
| 1—4 | 232,879 | 0,487441 | 0,992805 | 100,294 | 117,916 | 0,999578 |
| 1—5 | 240,961 | 0,544421 | 0,991694 | 107,324 | 109,815 | 0,999251 |
| 1—6 | 244,445 | 0,583465 | 0,992910 | 125,836 | 96,423 | 0,997220 |
| 1—7 | 244,132 | 0,574077 | 0,995190 | 197,225 | 65,019 | 0,966968 |
| $Me = aw^{-b}$ | | | | | | |
| | a | b | — | $Me = \beta$ | | |
| 1—6 | 142,628 | 0,416535 | | | | |
| 1—7 | 140,151 | 0,425923 | | | | |
| $Me = AS^{*-B}$ | | | | | | |
| | A | B | — | | | |
| 1—6 | 7229,65 | 0,713899 | | | | |
| 1—7 | 8280,11 | 0,741927 | | | | |

Tabulka VII

Parametry funkcí měrných povrchů a melitelnosti z adsorpčních dat

Suché mletí

| Pro body | $S^* = cw^k$ | | | $S^z = \alpha + \beta w$ | | |
|-------------------------|--------------|--------------|----------|--------------------------|-------------|----------|
| | c | k | r | α | β | r |
| 1—3 | 301,2850642 | 0,5877595089 | 0,999919 | 88,0000000 | 211,4346939 | 0,998046 |
| 1—4 | 307,7129685 | 0,6137940372 | 0,999371 | 102,6956522 | 186,2422360 | 0,997781 |
| 1—5 | 307,0768610 | 0,6102250749 | 0,999665 | 138,9583333 | 145,3004992 | 0,989940 |
| 1—6 | 305,7287975 | 0,5976102902 | 0,999503 | 191,3731343 | 108,2064169 | 0,980904 |
| 1—7 | 306,770806 | 0,6265133771 | 0,997950 | 198,7873563 | 105,0193618 | 0,995251 |
| $M_e = aw^{-b}$ | | | | | | |
| | a | b | — | | | |
| 1—6 | 182,7066754 | 0,4023897089 | | | | |
| 1—7 | 192,1960137 | 0,3734866229 | | | | |
| $M_e = A \cdot S^{*-B}$ | | | | | | |
| | A | B | — | | | |
| 1—6 | 8614,085013 | 0,6733312937 | | | | |
| 1—7 | 5837,428003 | 0,5961351131 | | | | |

Tabulka VIIa

Parametry funkcí měrných povrchů a melitelnosti z adsorpčních dat

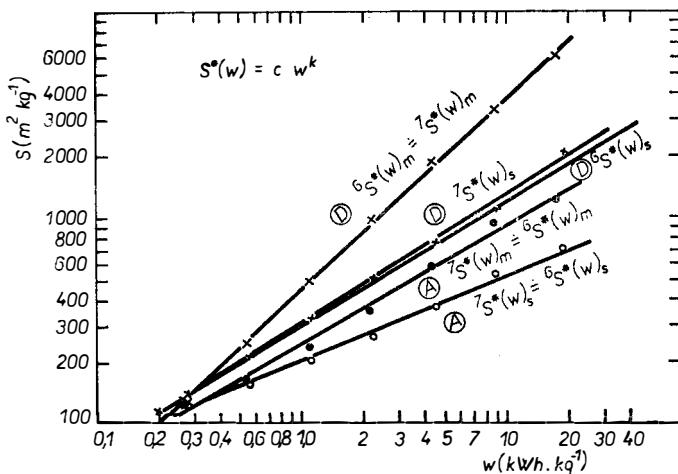
Mokré mletí

| Pro body | $S^* = cw^k$ | | | $S^z = \alpha + \beta w$ | | |
|------------------|--------------|---------------|----------|--------------------------|-------------|----------|
| | c | k | r | α | β | r |
| 1—3 | 450,8947163 | 0,98000009661 | 0,999885 | 3,000000000 | 449,3506494 | 0,999950 |
| 1—4 | 452,7049385 | 0,9848303595 | 0,999946 | 4,2454271 | 447,1490381 | 0,999989 |
| 1—5 | 449,1321319 | 0,9715970868 | 0,999879 | 27,33028592 | 420,5478574 | 0,999516 |
| 1—6 | 446,0682894 | 0,96297856369 | 0,999674 | 78,39261573 | 383,6077971 | 0,998637 |
| 1—7 | 444,8925873 | 0,9336761439 | 0,999433 | 171,0867897 | 342,8314121 | 0,997604 |
| $M_e = aw^{-b}$ | | | | | | |
| | a | b | — | | | |
| 1—6 | 425,0934867 | 0,0470214631 | | | | |
| 1—7 | 415,3855954 | 0,0663238561 | | | | |
| $M_e = AS^{*-B}$ | | | | | | |
| | A | B | — | | | |
| 1—6 | 574,3942562 | 0,049341576 | | | | |
| 1—7 | 640,5760892 | 0,0710351834 | | | | |

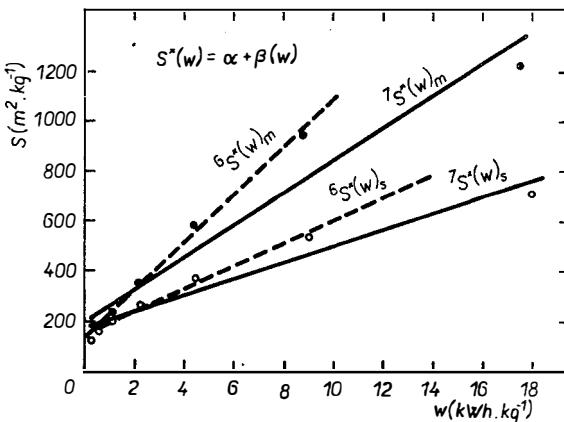
Grafické vyjádření mocninových funkcí $S^*(w)$ spolu s pokusnými body je v logaritmické síti v obr. 6.

Parametry regresních přímek jsou počítány jednak z prvních šesti bodů ${}^6S(w)$, jednak ze všech sedmi bodů ${}^7S^*(w)$.

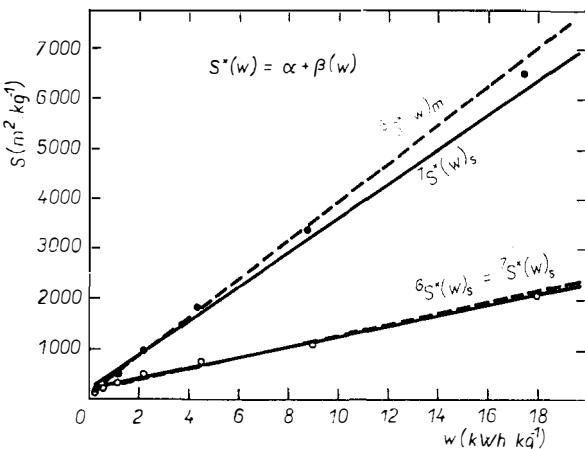
Parametry lineárních funkcí jsou opět ze šesti a sedmi bodů ${}^6S^x(w)$ a ${}^7S^x(w)$. Jsou pro výsledky se sedimentace na obr. 7 a na obr. 8 pro výsledky z adsorpce.



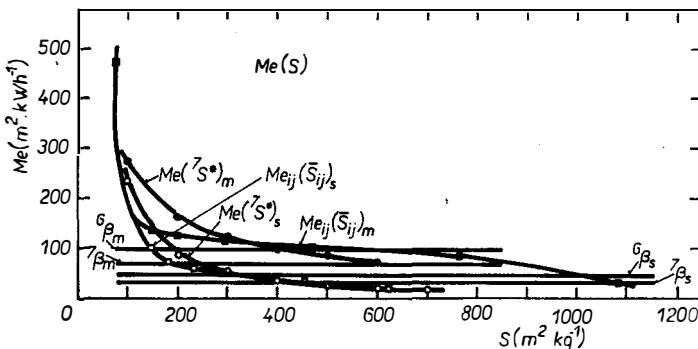
Obr. 6. Mocninové funkce růstu měrného povrchu s měrnou prací. Vynesené body odpovídají experimentálním datům. Přímky A ze sedimentace, přímky D z adsorpce. ${}^6S^*(w)$ — korelační přímka z prvních 6 bodů, ${}^7S^*(w)$ — korelační přímka ze všech 7 bodů. Indexy: s — za sucha, m — za mokra.



Obr. 7. Lineární funkce růstu měrného povrchu ze sedimentačních dat — ${}^6S^*(w)$ — korelační přímka z prvních 6 bodů, ${}^7S^*(w)$ — korelační přímka ze všech 7 bodů. Indexy: s — za sucha, m — za mokra.



Obr. 8. Lineární funkce růstu měrného povrchu s měrnou prací z dat adsorpce.
Vysvětlivky viz obr. 7.



Obr. 9. Průběh melitelností v závislosti na měrném povrchu ze sedimentace; $Me_{ij}(S_{ij})$ — diferenční melitelností z experimentálních dat pro střed intervalu \bar{S}_{ij} , $Me({}^7S^*)$ — diferenční melitelností z mocninové funkce ze 7 bodů, 7β — melitelnost z lineární funkce ze 7 bodů, 6β — melitelnost z lineární funkce ze 6 bodů. Indexy: s — suché mletí, m — mokré mletí.

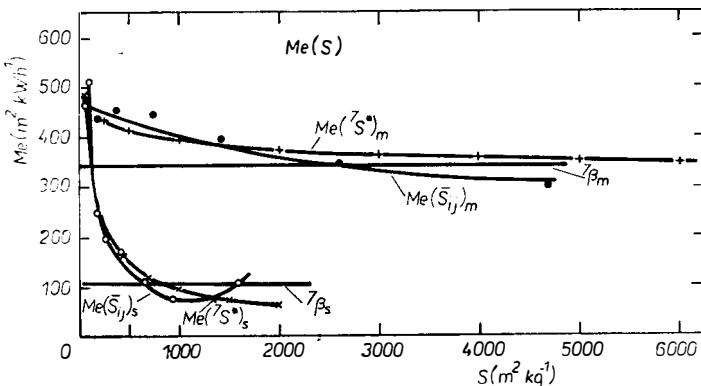
Průběhy melitelností Me/S opírající se o sedimentační data ukazuje obr. 9, data z adsorpce jsou na obr. 10. Vynášeny jsou:

1. diferenční melitelnosti počítané z experimentálních dat proti aritmetickým středům intervalů měrných povrchů \bar{S}_{ij} ,
2. diferenční melitelnosti z mocninové funkce,
3. konstantní melitelnosti plynoucí z lineární funkce.

Hodnoty melitelností určené při mletí za sucha leží pod hodnotami určenými při mletí za mokra, kromě jediného případu na počátku mletí při měrném povrchu určovaném adsorpci. Počátek krivek, tj. prvé body po 4 h mletí za mokra i za sucha, jsou si blízké, neboť se vychází ze stejného materiálu a poměrně krátká doba a prin-

cipelněstejný způsob mletí nevede ještě k podstatně rozdílným výsledkům. Se vztahujícím měrným povrchem převažuje melitelnost za mokra, jak je to zvlášť výrazné u výsledků z adsorpce.

Mocninové funkční vyjádření průběhu suchého mletí je vesměs výstižnější než lineární. U mokrého mletí je situace jiná. Pro data z adsorpce je vhodnější lineární vyjádření pro první 3 až 4 body, v ostatních případech je lepší vyjádření mocninové. U dat ze sedimentace je dokonce prvních 6 bodů lépe vystižitelných lineárním vztahem; pro soubor všech 7 bodů je však lepší mocninová funkce.



Obr. 10. Průběh melitelnosti v závislosti na měrném povrchu z adsorpce.
Vysvětlivky viz obr. 9.

Vyjádří-li se relativní koeficient melitelnosti, resp. melivosti z funkci melitelnosti $Me(S)$, dostane se funkce stejného typu.

Pro mocninovou funkci platí

$$K_m = \frac{Me(S)_m}{Me(S)_A} = \frac{A_m S^{-B_m}}{A_s S^{-B_s}} = \frac{A_m}{A_s} S^{B_s - B_m}.$$

Pro lineární vztah vychází opět konstanta

$$K_m = \frac{\beta_m}{\beta_s}.$$

Zvolí-li se jako příklad pro vyhodnocení K_m ze sedimentačních dat, dostane se

$$K_m^*(S) = \frac{8\,280,11}{143\,594} \cdot S^{1,494\,796 - 0,741\,927} = 0,057\,663\,3 S^{0,652\,879}.$$

Pro data z adsorpce platí obdobně

$$K_m^*(S) = \frac{640,576\,089}{5\,837,428} \cdot S^{0,596\,135 - 0,071\,035\,2} = 0,109\,736 S^{0,525\,100}.$$

Výsledky těchto vztahů pro stoupající hodnoty měrného povrchu jsou v tabulce VIII.

Tabulka VIII

Relativní koeficient melivosti K_m^* a funkci melitelnosti $Me(S)$

| Měrný povrch ($m^2 \cdot kg^{-1}$) | Sedimentace K_m^* | Adsorpce K_m^* |
|---|------------------------|---------------------|
| 150 | 1,519 156 | 1,524 104 |
| 200 | 1,833 036 | 1,772 637 |
| 300 | 2,388 556 | 2,193 236 |
| 400 | 2,882 067 | 2,550 884 |
| 500 | 3,334 062 | 2,867 983 |
| 600 | 3,755 508 | 3,156 140 |
| 700 | 4,153 136 | 3,422 236 |
| K_m^* | 1,993 787 | 3,264 459 |

Pro lineární vztah ze sedimentace se získá konstantní hodnota

$$K_m^* = \frac{65,019\ 0}{32,610\ 8} = 1,993\ 787$$

pro data z adsorpce podobně

$$K_m^* = \frac{342,831}{105,019} = 3,264\ 459.$$

Hodnota K_m^* z adsorpce je cca 1,64krát větší, než je ze sedimentace. Oproti tomu $K^*(S)$ je kromě prvé uvedené hodnoty pro $150\ m^2 \cdot kg^{-1}$ vesměs menší než ze sedimentace.

Rovněž efektivní melitelnosti je možné vyjádřit ze známých funkcí. Položí-li se měrný povrch z mocninové hypotézy rovný měrnému povrchu z Rittingerovy hypotézy

$$S = cw^k \quad S = Me_w,$$

dostane se efektivní melitelnost Me_{0j}

$$cw^k = Me_{0j} \cdot w \quad Me_{0j}^* = cw^{k-1}.$$

Melitelnosti vypočtené prostřednictvím korelačních vztahů se liší od efektivní melitelnosti počítané přímo z pokusných dat.

Kromě uvedené mocninové funkce byl zkoušen Zeiselův vztah [11], který je exponenciální rovnicí

$$w = w_0 e^{cS}.$$

Jeho zlogaritmováním, úpravou a zavedením $k = c^{-1}$ se dostane vztah

$$S = k \ln w - k \ln w_0 = k \ln \frac{w}{w_0},$$

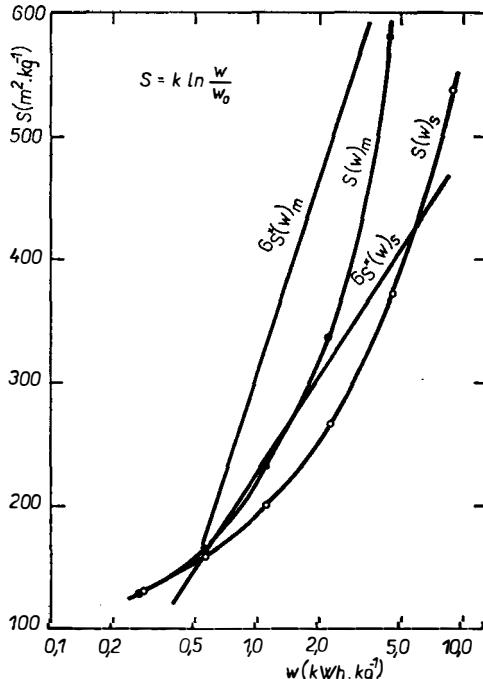
který je lineární pro $Y = S$, $X = \ln w$, pak $Q = -k \ln w_0$, $k = k$. Metodou nejmenších čtverců pro našich 6 pokusných bodů suchého mletí z měrných povrchů určených sedimentací se získají hodnoty parametrů $Q = 226,540$, $k = 112,835$, korelační koeficient $r = 0,952\ 598$. Odtud $w_0 = 0,134\ 296$, takže pro odhad měrného povrchu platí

$${}^6S^*(w) = 112,835 \ln \frac{w}{0,134\ 296}.$$

Pro mokré mletí bylo určeno obdobně z $w = 0,931\ 991$

$${}^6S^*(w) = 225,560 \ln \frac{w}{0,260\ 209}.$$

Situaci znázorňuje obr. 11.



Obr. 11. Experimentální křivky a korelační přímky pro Zeiselův vztah ze 6 experimentálních bodů pro data ze sedimentace. Indexy: s — suché mletí, m — mokré mletí.

Vztah Olevského [5] je možné rovněž snadno transformovat na lineární pro

$$Y = \frac{S}{w} \quad \text{a} \quad X = \ln w,$$

$$S = Kw \ln \frac{c}{w} \quad \frac{S}{w} = K \ln c - K \ln w,$$

pak $k = K$, $Q = K \ln c$.

Pro sedimentační data vedlo našich 7 pokusných bodů při koleračním koeficientu $r = -0,920\ 882$ k rovnicím pro mletí za sucha

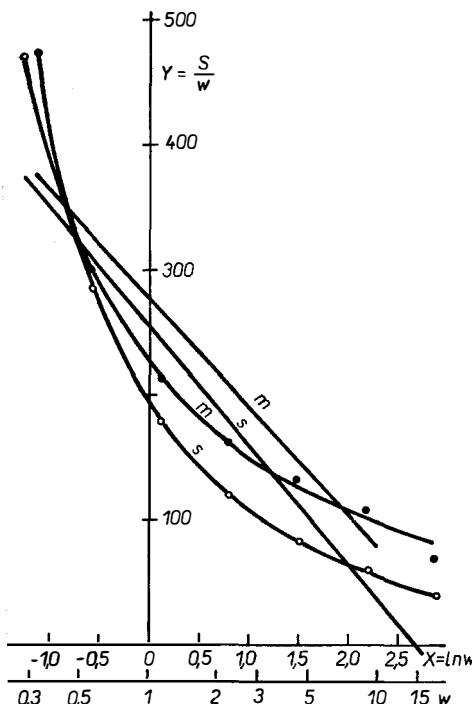
$${}^7S^*(w) = 94,667\ 9w \ln \frac{0,069\ 046\ \bar{s}}{w},$$

za mokra při $r = -0,931\,103$

$$\gamma S^*(w) = 86,436 \bar{2} w \ln \frac{24,527\,15}{w}.$$

Průběh těchto funkcí je na obr. 12.

S těmito vztahy nebylo dále počítáno pro nižší hodnoty korelačních koeficientů.



Obr. 12. Experimentální křivky a korelační přímky pro Olevského vztah ze 7 bodů. Indexy: s — suché mletí, m — mokré mletí.

ZÁVĚRY

1. Technická, resp. standardní melitelnost závisí nejen na fyzikálně mechanických vlastnostech materiálu a podmínkách mletí, ale i na volbě účinku mletí a na volbě metody jeho určování.

Za míru účinku byl zvolen nově vzniklý měrný povrch S . Jeho hodnoty určené výpočtem z běžných síťových rozborů se ukázaly nedostatečné. Podstatně rozdílné byly nalezeny i měrné povrhy počítané ze sedimentační analýzy a přímo měřené adsorpcí, což vede k různým hodnotám melitelnosti.

2. Relativní koeficient K_m určený na standardním materiálu poměrem prací za standardních podmínek k práci za podmínek sledovaných nebo převráceným poměrem melitelností je relativní účinností, melivostí. Může sloužit k posuzování různých mlýnů, mlecích těles, aktivátorů mletí apod. Zde bylo sledováno mokré mletí vzhledem k suchému. Melivosti mokrého způsobu jsou přibližně lineární funkcí měrného povrchu.

3. Zavedení nelineární funkce melitelnosti $Me = AS^{-B}$ vede k definování melitelnosti efektivní a diferenční nebo diferenciální.

4. Pro křemičitý písek určeny parametry lineárních i mocninových funkcí vyjadřujících závislosti měrných povrchů na měrné práci $S(w)$ a melitelnosti na měrné práci $Me(w)$ a měrném povrchu $Me(S)$. Jejich prostřednictvím vyjádřeny koeficienty melivosti $K_m(S)$ a efektivní melivosti a srovnány s daty počítanými přímo z naměřených hodnot.

5. Pro suché mletí je mocninová funkce vhodnější než lineární.

Literatura

- [1] ČSN 72 1085 — Stanovení melitelnosti — schváleno 25. 10. 1972, účinnost od 1. 10. 1973.
- [2] Jirousek L., Špičák K., Valenta L.: II. Celostátní konference — Mletí v silikátovém průmyslu — Sborník, Brno, 25.—26. 6. 1968, str. 46a—55.
- [3] Vodáček O.: Celostátní konference — Mletí v silikátovém průmyslu — Sborník, Brno, 25.—26. 6. 1968, str. 24—29.
- [4] Špičák K.: Výrobní procesy a zařízení v technologii silikátů I., SNTL, Praha, 1964 (skripta VŠCHT).
- [5] Olevskij A. V.: Razmolnoje oborudovanije obogatitel'nych fabrik, Gosgortchnizdat, Moskva 1963, 223.
- [6] Froněk R.: Stavivo, 44, 95 (1966), str. 95—97.
- [7] Zadák Zd., Kurka F.: Silikáty 13, 241 (1969).
- [8] Zadák Zd., Žežulka J.: Silikáty 14, 45 (1970).
- [9] Jirousek L., Mangel A., Špičák K.: Silikáty 12, 97 (1968).
- [10] Růžek J.: Silikáty 15, 283 (1971).
- [11] Zeisel H. G.: Sborník přednášek „Mletí v cementárskom priemysle“, Dom techniky ČSVTS Žilina (1965).
- [12] Lesin A. D.: Vibracionnoje izmělčanije matérrialov Promstrojizdat, Moskva 1957.
- [13] Kurka F.: Sborník přednášek z celostátní konference „Mletí v silikátovém průmyslu“, Dům techniky ČSVTS Brno, 1966, (104—140).
- [14] Špičák K.: Sborník přednášek z celostátní konference „Mletí v silikátovém průmyslu“, Dům techniky ČSVTS, Brno 1966, (str. 25—57).
- [15] Naeser G., Scholz W., Fiedler A.: Kolloid-Zeitschrift 147 (1963).
- [16] Rose H. E., Sullivan E. M. E.: A treatise on the internal mechanics of ball, tube and rod mills, Constable, London, 1958, str. 258.
- [17] ČSN 44 1332 — Stanovení melitelnosti tuhých paliv metodou VÚK — schváleno 1976, účinnost 1. 10. 1977.
- [18] Dinter O.: Drení a mletí nerostných surovin, SNTL, Praha 1984, 244 str.
- [19] Reményi K.: The theory of grindability and the comminution on binary mixtures: Académie Kaidó, Budapest 1974, 144 str.
- [20] Špičák K., Růžek J., Fárník K.: Sborník VŠCHT B 10 (1967), str. 43—54.
- [21] Lowrison G. Ch.: Crushing and Grinding Butterworths, London, 1974, 286 str.
- [22] Romadin V. O.: Pyleprigotovlenije, Gosenergoizdat, Moskva—Leningrad 1953, 519 str.
- [23] Andrejev S. Je.: Tovarov V. V., Perov V. A.: Zakonomernosti izmelenija i issledovaniya charkteristik granulometricheskogo sostava. Metallurgizdat, Moskva 1959, 437 str.

СПОСОБНОСТЬ К РАЗМАЛИВАНИЮ И ЭНЕРГИЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Лудвик Ироусек*, Карел Шпицак

кафедра технологий силикатов Химико-технологического института,
16628 Прага 6

*Научно-исследовательский институт электротехнической керамики,
50064 Градец Кралове

С теоретической точки зрения, опираясь на закономерности измельчения, авторами приводится проблематика определения способности к размаливанию в качестве константы материала.

Для экспериментальной работы использовали кварцевый песок, обрабатываемый в лабораторной барабанной мельнице. Материал измельчали от 4 до 250 часов мокрым и сухим путем. Для технической способности к размаливанию послужила поверхностная теория. Удельную поверхность определяли расчетом просеивания, седиментационного анализа и прямо с использованием адсорбции азота. Ход удельной поверхности изображается на рис. 1 и 2.

Способность к размаливанию понимается как функция удельной поверхности. На рис. 4 приводится эффективная и разностная способность к размаливанию в зависимости от удельной поверхности, рассчитанной на основании гранулометрического состава. На рис. 5 изображается способность к размаливанию в виде функции удельной поверхности, установленной с помощью адсорбции. В случае нелинейной зависимости удельной поверхности от удельной работы способность к разваливанию характеризуется параметрами деривации данной функции или приводится эффективная или разностная способность к размаливанию.

Ход зависимостей удельной поверхности от удельной работы аппроксимированный двухпараметровой степенной функцией $S^*(w)$ приводится на рис. 6, линейная аппроксимация $S^*(w)$ на рис. 7. Параметры приводимых функций и из них вытекающих функций способности к размаливанию (рис. 9 и 10) вместе с коэффициентами корреляции r приводятся в табл. VI и VII.

В качестве способности к размаливанию или условий всей операции приводится относительный коэффициент эффективности, установленный на стандартном материале соотношением способностей к размаливанию при исследуемых условиях к способности к размаливанию, установленной при стандартных условиях. Способность к размаливанию мокрым путем больше по сравнению к размаливанию сухим путем и является приближенно линейной функцией удельной поверхности.

Рис. 1. Рост удельной поверхности; S_u — установленная удельная поверхность, t — время размаливания, w — удельные работы размаливания, D — адсорбция, A — Андреасен, S — анализ просеиванием, s — размаливание сухим путем, m — размаливание мокрым путем.

Рис. 2. Новая удельная поверхность в зависимости от удельной работы; S — новая удельная поверхность, дальнейшие обозначения согласно рис. 1.

Рис. 3. Коэффициент способности к размаливанию в зависимости от возникшей удельной поверхности.

Рис. 4. Эффективная и разностная способность к размаливанию в зависимости от удельной поверхности, установленной седиментацией; из аппроксимальных данных: M_{es} — эффективная способность к размаливанию при размаливании сухим путем, M_{em} — эффективная способность к размаливанию при размаливании мокрым путем, M_{ejm} — разностная способность при размаливании мокрым путем, M_{ejS} — разностная способность к размаливанию при размаливании сухим путем.

Рис. 5. Эффективная и разностная способности к размаливанию в зависимости от удельной поверхности, установленной адсорбцией.

Рис. 6. Степенные функции роста удельной поверхности с удельной работой. Вынесенные точки отвечают экспериментальным данным. Прямые A из седиментации, прямые D из адсорбции, $b_s^*(w)$ — прямая корреляция из первых 6 точек, $7_s^*(w)$ — прямая корреляция из всех 7 точек, s — сухим путем, m — мокрым путем.

Рис. 7. Линейные функции роста удельной поверхности с удельной работой, из седиментационных данных — $S^*(w)$ — прямая корреляция из первых 6 точек, $7^*(w)$ — прямая корреляция из всех 7 точек; s — сухим путем, m — мокрым путем.

Рис. 8. Линейная функция роста удельной поверхности с удельной работой из данных адсорбции. Обозначения см. рис. 7.

Рис. 9. Ход способностей к размаливанию в зависимости от удельной поверхности из седиментации: $M_{ej(S)}$ — разностные способности к размаливанию из экспериментальных данных для среды интервала S_{ij} , $M_e(7^*)$ — разностные способности к размаливанию из степенной функции из 7 точек, 7β — способность к размаливанию из линейной функции из 7 точек, 6β — способность к размаливанию из линейной функции из 6 точек; s — размаливание сухим путем, m — размаливание мокрым путем.

Рис. 10. Ход способности к размаливанию в зависимости от удельной поверхности из адсорбции. Обозначения см. рис. 9.

Рис. 11. Экспериментальные кривые и корреляционные прямые для отношения Цейзела из 6 экспериментальных точек при данных из седиментации; S — размаливание сухим путем, t — разваливание мокрым путем.

Рис. 12. Экспериментальные кривые и корреляционные прямые для отношения Олевского из 7 точек; s — размаливание сухим путем, t — размаливание мокрым путем.

GRINDABILITY AND THE DIMINUTION THEORY

Ludvík Jirousek*, Karel Špičák

Department of the Technology of Silicates, Institute of Chemical Technology
166 28 Prague 6

*Research Institute of Electrotechnical Ceramics, 500 64 Hradec Králové

The problems involved in the defining and determination of grindability as a material constant are demonstrated in a theoretical discussion based on the laws of grinding.

The experimental work was carried out on silica sand in a laboratory drum mill. The sand was ground both dry and wet for periods of from 4 to 250 hours. Technical grindability was assessed on the basis of the surface theory. The specific surface area was calculated from sieving analyses, sedimentation analyses and determined directly by nitrogen adsorption. The course of the specific surface area is shown in Figs. 1 and 2.

The grindability was expressed as a function of specific surface area. Fig. 4 shows effective and differential grindability in terms of specific surface area calculated from the grain size distribution data, while Fig. 5 demonstrates grindability as a function of specific surface area determined by nitrogen adsorption. For the case of non-linear dependence of specific surface area on specific work, grindability is characterized by parameters of the derivative of this function, or effective and differential grindability are expressed.

The course of the dependence of specific surface area on specific work, approximated by two-parameter power function $S^*(w)$, is plotted in Fig. 6, and its linear approximation $S^*(w)$ in Fig. 7. The parameters of these functions and the respective grindability functions (Figs. 9 and 10) together with correlation coefficients are listed in Tables VI and VII.

The grinding efficiency of grinding equipment or of the entire operation is expressed as a relative efficiency coefficient determined on a standard material by means of a grindability ratio, namely of grindability established under the conditions in question to that determined under standard conditions. The grinding efficiency of wet grinding exceeds that of dry grinding, and is approximately a linear function of specific surface area.

Fig. 1. Increase in specific surface area;

S_u — specific area determined, t — time of grinding, w — specific work of grinding, D — adsorption, A — Andreesen, S — sieving analysis;
Subscripts: s — dry grinding, m — wet grinding.

Fig. 2. New specific surface area in terms of specific work S — new specific area, for the other symbols refer to Fig. 1.

Fig. 3. Grinding efficiency coefficient in terms of the specific area obtained.

Fig. 4. Effective and differential grindability in terms of specific surface area determined by sedimentation; from approximative data;
 M_{es} — effective dry grindability, M_{em} — effective wet grindability, M_{esm} — differential wet grindability, M_{ets} — differential dry grindability.

Fig. 5. Effective and differential grindability in terms of specific area determined by adsorption. For symbols refer to Fig. 4.

Fig. 6. Power functions of increase in specific area in terms of specific grinding work. The points plotted correspond to experimental data. Straight lines A from sedimentation, lines D from adsorption.

${}^6S^*(w)$ — correlation straight line from the first 6 points, ${}^7S^*(w)$ — correlation straight line from all seven points Subscripts: s — dry grinding, m — wet grinding.

Fig. 7. Linear function of increase in specific area in terms of specific grinding work, from sedimentation data

${}^6S^*(w)$ — correlation straight line from the first 6 points, ${}^7S^*(w)$ — correlation straight line from all 7 points. Subscripts: s — dry grinding, m — wet grinding.

Fig. 8. Linear function of increase in specific surface area in terms of specific work from adsorption data. For symbols refer to Fig. 7.

Fig. 9. The course of grindability in terms of specific surface area obtained from sedimentation analysis.

Me_g(S_{ij}) — differential grindability from experimental data for interval centre S_{ij}, Me(7S) — differential grindability from the power function from 7 points, 7β — grindability from the linear function provided by 7 points, 6β — grindability from linear function provided by 6 points. Subscripts: s — dry grinding, m — wet grinding.*

Fig. 10. The course of grindability in terms of specific surface area obtained from adsorption measurements. For symbols refer to Fig. 9.

Fig. 11. Experimental curves and correlation straight lines for Zeisel's equation for 6 experimental points obtained from sedimentation analysis. Subscripts: s — dry grinding, m — wet grinding

Fig. 12. Experimental curves and correlation straight lines for Olevski's equation obtained from 7 points. Subscripts: s — dry grinding, m — wet grinding.

JAROSLAV VLČEK: METODY SYSTÉMOVÉHO INŽENÝRSTVÍ,
SNTL Praha, 1984, 340 str.

V současné době se velmi často setkáváme s pojmem systémové inženýrství, obzvlášť ve spojitosti se záměry a požadavky při řešení problémů složitého řízení organizací, výrobních procesů, projektů nových investičních komplexů, mezinárodních i meziorganizačních vztahů.

Kniha Metody systémového inženýrství se zabývá teorií systémů, metodami a technikami projektování, zavádění a udržování systémů.

V oblasti teorie systémů se popisují vlastnosti systému, a to základní vlastnosti, odvozené vlastnosti, hierarchické uspořádání a klasifikace systémových vlastností. Podrobně je rozebrán systém jako model a dále definice systému, a to z hlediska algebraického a topologického přístupu. Přehlednou formou je vysvětlován stav a chování systému a cílové chování systému.

Je charakterizován proces identifikace systému od podstaty identifikace přes metodiku identifikace, specifické problémy identifikace až po uplatnění identifikace.

Jsou rozvedeny vztahy mezi systémovou analýzou a projektováním systémů. Na příkladech je znázorněno řešení úloh systémové analýzy. Podrobně jsou rozebrány kapacitní úlohy, strukturní úlohy a stanovení cíle úlohy. Vzhledem k rozlehlym systémům je názorně popsána potřebná oblast dekompozice systémů.

Projektování systémů je vysvětleno v těchto krocích: obsah projektování systémů, metody projektování včetně algoritmů a aplikaci inženýrských principů.

Realizace systémů je rozebrána s cílem uplatnění systémového inženýrství v aplikační oblasti se zřetelem na funkční schopnost systému, spolehlivost a životnost systému.

Kniha je psána velmi přehledně a je potřebnou pomůckou pro pracovníky vytvářející projekty složitých technických objektů, rozlehlych technologických soustav a automatizovaných systémů řízení.

P. Zemánek

A. F. CHALMERS: WEGE DER WISSENSCHAFT (Cesty vědy), 240 str. cena 32 DM Springer Verlag, Berlin 1986.

Chalmersova kniha s původním názvem „What is This Thing Called Science?“ vyšla anglicky již ve dvou vydáních (1976 a 1982) a druhé vydání vychází nyní německy v překladu N. Bergmann a J. Prümpera.

Kniha představuje znamenitý úvod do teorie vědy zejména pro studující přírodních věd. Autor nepředpokládá u čtenáře žádné předchozí filozofické vzdělání a jednoduchou snadno srozumitelnou formou doplněnou vždy řadou příkladů jej seznamuje s teoriemi vědy od jejich základů až po nejaktuálnější otázky.

Německé vydání je doplněno seznámenem doporučené německé literatury včetně odborných časopisů a knihu lze vřele doporučit studujícím i zájemcům o tuto vědní oblast.

V. Šatava