INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

ZÁKLADY ZAŘÍZENÍ ÚPRAVEN

Učební text předmětu „Zařízení úpraven“

doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.

Ostrava 2011

Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu OP VK CZ.1.07/2.3.00/09.0147 „Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu“.

Název: Základy zařízení úpraven

Autor: doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.

Vydání: první, 2011

Počet stran: 91

Náklad: 5

Studijní materiály pro studijní obor Dopravní a manipulační technika Fakulty strojní a obory Hornicko-geologické fakulty

Jazyková korektura: nebyla provedena.

EVROPSKÁ UNIE MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.

Název: Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu

Číslo: CZ.1.07/2.3.00/09.0147

Realizace: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

© Aleš Slíva

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-2732-2

POKYNY KE STUDIU

Zařízení zařízení úpraven

Pro studium problematiky zařízení úpraven jste obdrželi studijní balík obsahující:

- integrované skriptum pro distanční studium obsahující i pokyny ke studiu,
- přístup do e-learningového portálu obsahující doplňkové animacemi vybraných částí kapitol,
- CD-ROM s doplňkovými animacemi vybraných částí kapitol

Prerekvizity

Žádné

Cíl

Cílem je seznámení se základními pojmy k problematice procesní úpravy sypkého materiálu. Po prostudování modulu by měl student být schopen navrhnout a vypočítat základní konstrukci drtiče a mlýna včetně jejich teoretických úvah o systému drcení a dozvědět se informace o základních vlastnostech částicových/sypkých materiálů

Pro koho je předmět určen

Modul je zařazen do bakalářského a magisterského studia studentů Fakulty strojní a Hornicko-geologické fakulty, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru..

Skriptum se dělí na části, kapitoly, které odpovídají logickému dělení studované látky, ale nejsou stejně obsáhlé. Předpokládaná doba ke studiu kapitoly se může výrazně lišit, proto jsou velké kapitoly děleny dále na číslované podkapitoly a těm odpovídá níže popsaná struktura.

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:

Čas ke studiu: xx hodin

Na úvod kapitoly je uveden čas potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají bohaté zkušenosti.

Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Popsat …
- Definovat …
- Vyřešit …

Ihned potom jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.

Výklad

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady, odkazy na animace.

Shrnutí pojmů

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou.

Otázky

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.

Úlohy k řešení

Protože většina teoretických pojmů tohoto předmětu má bezprostřední význam a využití v praxi, jsou Vám nakonec předkládány i praktické úlohy k řešení. V nich je hlavním významem předmětu schopnost aplikovat čerstvě nabyté znalosti pro řešení reálných situací.

Klíč k řešení

Výsledky zadaných příkladů i teoretických otázek jsou uvedeny v závěru učebnice v Klíči k řešení. Používejte je až po vlastním vyřešení úloh, jen tak si samokontrolou ověříte, že jste obsah kapitoly skutečně úplně zvládli.

Úspěšné a příjemné studium s tímto učebním textem Vám přeje autor.

Aleš Slíva

OBSAH

1 MECHANICKO-FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI ČÁSTICOVÝCH SYSTÉMŮ CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.

1.1. Klasifikace částicových materiálů dle standardu FEMChyba! Záložka není definována.

1.2. Kusové materiály [1,2] 12

2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI SYPKÉHO MATERIÁLU 14

2.1 Zrnitost 14

2.2 Vlhkost 16

2.3 Měrná, objemová a sypná hmotnost částicového materiálu 18

2.4 Sypný úhel (úhel přirozeného svahu za klidu a za pohybu) 18

2.5 Úhel vnitřního a vnějšího tření sypkého materiálu 19

2.6 Soudržnost sypkých hmot 20

2.7 Napěťový stav sypkého tělesa 22

2.8 Stanovení tlaků v sypkém tělese 25

3 ZÁKLADNÍ POJMY V DESINTEGRACI MATERIÁLU 28

3.1 Rozpojování, rozpojitelnost a stupeň rozpojení 28

3.2 Základní druhy a způsoby mechanického rozpojování 29

3.3 Teorie rozpojování 31

3.3.1 Kickova hypotéza (objemová) 32

3.3.2 Rittingerova hypotéza (povrchová) 34

3.3.3 Kick-Standlerova hypotéza 36

3.3.4 Bondova hypotéza 37

3.4 Obecná diferenciální rovnice rozpojování 37

4 DRTÍCÍ STROJE 40

4.1 Rozdělení a použití drtících a mlecích strojů 41

4.2 Kuželový drtič 42

4.2.1 Základní parametry ostroúhlých kuželových drtičů 44

4.2.2 Výpočet drtiče Symons 46

4.3 Válcový drtič 50

4.3.1 Parametry válcového drtiče 51

4.4 Čelisťový drtič 54

4.4.1 Výpočet čelisťového drtiče 57

4.5 Kulový mlýn 62
4.5.1 Výpočet a návrh kulového mlýna 63
4.5.2 Výpočet úhlu odpadu koule 64
4.5.3 Kritické otáčky kulového mlýna 64
4.5.4 Optimální otáčky kulového mlýna 65
4.5.5 Pracovní otáčky kulového mlýna 65
4.5.6 Režimy pohybu koulí podle otáček 65
4.6 Perlový mlýn 68
4.7 Kladivový a nárazový drtič 69
4.7.1 Návrh kladivového/nárazového drtiče 70
5 TŘÍDĚNÍ MATERIÁLU 72
5.1 Klasifikace třídících agregátů 74
5.2 Vibrační třídiče 76
5.3 Podávaný výkon třídiče 77
5.4 Pohyb materiálu po sítě s přímočarým pohybem [4] 78
5.4.1 Vodorovné síto (β=0°) [4] 78
5.4.2 Síto nakloněné pod úhlem β [4] 81
5.5 Pohyb materiálu po sítě s rotačním pohybem [4] 84
5.5.1 Vodorovné síto (β=0°) [4] 84
5.5.2 Síto nakloněné pod úhlem β [4] 85
5.6 Speciální třídiče 87

1 VLIVY NA PROCESY ZPRACOVÁNÍ, DOPRAVU A MANIPULACI

Čas ke studiu: 2 hodiny

Cíl: Po prostudování této kapitoly budete umět

- Definovat základní vlastnosti materiálů dle předpisů skupiny FEM
- Určit základní mechanicko-fyzikální vlastnosti sypkých materiálů

Výklad

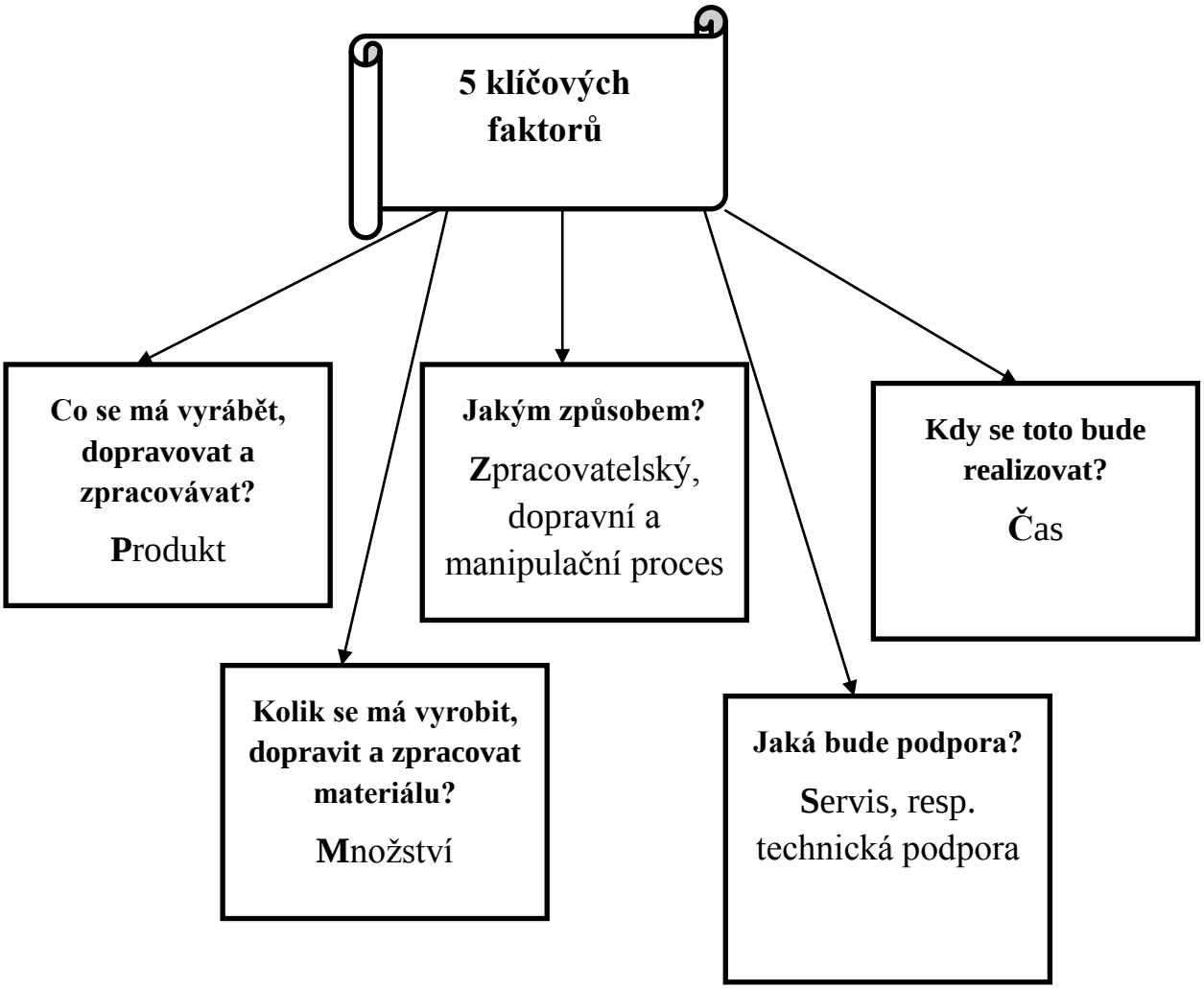
1.1 Základní klíčoví činitelé při zpracování, dopravě, manipulaci a skladování sypkých hmot

Z pohledu dopravy, manipulace, zpracování a skladování materiálu a to jak sypkých, tak kusovitých, má materiál největší vliv na použití **manipulační metody. Pro manipulační metodu je charakteristické použití jednoho prostředku manipulace, manipulační jednotky a jednoho systému manipulace**. Pro **jednu manipulační metodu vytváříme materiálovou skupinu**, ve které se nachází celá řada různodruhového materiálu (obvykle až cca 15 materiálů), pro kterou je typické použití právě **jednoto manipulačního prostředku**, manipulační jednotky a systému manipulace. Snažíme se tímto způsobem tedy v maximální možné míře vytížit použití prostředku, manipulační jednotky a v neposlední řadě sloučit materiálové toky pro vytýčení jasných tras s největším materiálovým tokem. V této souvislosti hovoříme o snaze systematicky vytvářet manipulační metody na logickém základě pro minimalizaci pořizovacích a provozních nákladů. Jedná se tedy o snahu realizovat **systémové projektování dopravy a procesních postupů založených na bázi logistických systémů v dopravě [8]**.

Pro již existující nebo se rodící **systémové projektování dopravy, zpracovatelských, výrobních a procesních postupů** je typické vytváření cíleného postupu pro navržení vhodné manipulační metody pro daný okruh manipulovaného materiálu.

V prvopočátku plánování je nutné **shromáždit do položek veškerý dopravovaný manipulovaný a skladovaný materiál** pro zodpovězení základní otázky typu: „**S čím se bude dopravovat, manipulovat, skladovat a zpracovávat?**“ „**O jaký materiál se jedná a jaké má vlastnosti?**“ „**Je materiál křehký, toxický, exprozivní či např. korozovní?**“ „**Kolik se má toho materiálu dopravit a zpracovat?**“. Určení a popsání materiálu včetně jeho **množství resp. obratu** v podniku je podstatné pro základní vstup do procesu navrhování manipulace s materiálem. Další důležitou veličinou vstupující do procesu systémového navrhování dopravy, dopravních a zpracovatelských procesů je základní znalost o samotném **dopravním a zpracovatelském procesu**, tzn. jakým způsobem se bude výrobek dopravovat a

jak se s ním bude manipulovat, jaký dopravního nebo manipulačního prostředek bude použit po jakých dopravních trasách. V neposlední řadě důležitým klíčovými faktory je **servis tzn. tzv. technická podpora, resp. zázemí** a bezesporu **čas**, za který se má zpracování materiálu, resp. doprava resp. manipulace materiálu realizovat.



Obr. č. 1.1 Klíčové faktory při zpracování, dopravě a manipulaci [8]

<u>Podrobný popis klíčových faktorů</u>

Produkt-„Co se má vyrábět, dopravovat a zpracovávat?“

Patří mezi základní faktor společně neoddělitelně spjatý s množstvím. Produktem se má na mysli výrobek, který je vyráběný, zpracovávaný, dopravovaný, manipulovaný nebo skladovaný v určitém podniku, provozu, dílně apod. Do této kategorie zejména patří vstupní materiál, dále pak materiál v rozpracované výrobě v rámci polotovarů, materiál ve skladě a na meziskladě až po výstupní materiál v podobě hotových výrobků.

Množství-„ Kolik se má vyrobit, dopravit a zpracovat materiálu?“

Množství je neodmyslitelné bez samotného produktu a je s ním úzce spjato v podobě např. položkovém rozpisu materiálu. Množstvím materiálu chápeme množství vstupního

materiálu, materiálu v rozpracované výrobě v podobě např. polotovarů, materiál na skladě a na meziskladě, hotové výrobky apod. Obvykle se materiál vyjadřuje počtem kusů, objemem tj. v jednotkách kg, tun, m^3 nebo peněžní hodnotou materiálu v Kč.

Zpracovatelský, dopravní a manipulační proces-„Jakým způsobem?“

Rozumíme tím proces, resp. sled postupů pro zpracování, dopravu a manipulaci materiálu a to v jakémkoliv jeho stavu. Jedná se tedy o činnosti, které přetvářejí materiál nebo mu dávají místní hodnotu v podobě změny místa a to tím, že materiál se dostane na „správné“ místo. Pohyb materiálu resp. materiálový tok je dán zpracovatelským postupem. Jedná se tedy o přesně určený sled operací vedoucí k utváření materiálu správným směrem včetně přínosu místa.

Servis, resp. technická podpora-„ Jaká bude podpora?“

Do servisu patří veškeré podpůrné činnosti a prostředky, které jsou nezbytné pro hladký průběh celého zpracovatelského, dopravního a manipulačního procesu. Je nutné na tyto činnosti myslet již v základním řešení uskupení provozů, dílem apod. Zejména se jedná o pomocné pracovní prostředky, podpůrné funkce a pomocné činnosti jako např. údržba strojů a vybavení, nářaďovna, WC, šatny, vlečka, rampy, expedice apod [8].

Čas- **„**Kdy se toto bude realizovat?“

Čas se prolíná přímo nebo nepřímo všemi faktory a to v podobě např. taktování výrobního, zpracovatelského, manipulačního, dopravního nebo skladovacího procesu. Je podstatný pro dlouhodobý přehled procesu vedoucího např. k inovaci zpracovaného materiálu k hotovému výrobku, představě vývoje a potřeby rozvoje těchto procesů s uvažovaným navýšením zpracování materiálu. Čas je také spjatý i s pomocnými službami společně s rozvojem podniku.

1.2 Základní klíčoví činitelé při zpracování, dopravě, manipulaci a skladování sypkých hmot

Pro roztřídění materiálu do skupin z pohledu dopravy, manipulace a skladování sypkých hmot byla stanovena klasifikace podle **FEM** (Fédération Européenne de la Manutention).

Dle této skupiny, je materiál, který je dopravován, skladován a manipulován rozdělen do pěti základních skupin podle [1, 2]:

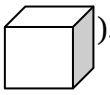
a) zrnitosti	A $\rightarrow$ K a I $\rightarrow$ VI
b) soudržnosti	1 $\rightarrow$ 6
c) chování během dopravy	o $\rightarrow$ x
d) objemové hmotností	ρ_v [$kg \cdot m^{-3}$]
e) teploty	[°C]

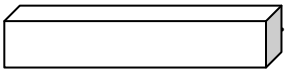
Zrnitost je charakterizována dvěma znaky. **První znak** je charakteristický pro velikost zrna, resp. rozměr zrna a je označen velkým písmenem **A** až **K** (viz. tab. 1.2).

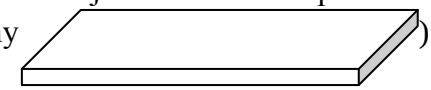
Označení	Většina zrn má rozměr (mm)	
A		do 0,4
B	od 0,4	do 1,0
C	od 1	do 3
D	od 3	do 10
E	od 10	do 25
F	od 25	do 50
G	od 50	do 75
H	od 75	do 150
J	od 150	do 300
K	od 300 výše	

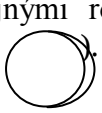
Tab. č. 1.2: Označení velikosti zrn [1,2]

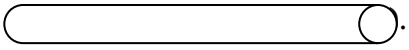
Druhý znak je charakterizován římskými číslicemi, udává tvar zrna takto:

I. Ostré hrany s přibližně stejnými rozměry ve všech rozměrech (příklad: kostky ).

II. Ostré hrany, kde jeden rozměr je viditelně větší než ostatní (příklad: hranoly  .

III. Ostré hrany, u nichž jeden rozměr podstatně menší než ostatní (příklad: desky, šupiny ).

IV. Zaoblené hrany s přibližně stejnými rozměry ve všech třech rozměrech (příklad: předměty kulového tvaru ).

V. Oblé hrany mající jeden rozměr viditelně větší než ostatní (příklad: válce, tyče  .

VI. Oblé hrany, kde jeden rozměr je podstatně menší než ostatní rozměry (příklad: disk, CD apod. .

Soudržnost je spjata s mezipartikulárními silami částic a tudíž kohézní síly, elektrostatické síly, kapilární síly apod. mají vliv na tuto vlastnost (viz. obr. č. 4.1). **Soudržnost** je udávána arabskými číslicemi v tomto odstupňování:

1. materiál ve vzduchu se **vznášející a tekoucí spontánně jako tekutina** (vysoká flowabilita) ,
2. **lehce tekoucí materiál**, sypný úhel menší než 30° (dobrá flowabilita),
3. **normálně tekoucí**, sypný úhel mezi 30 a 45°(střední flowabilita) ,
4. **těžko tekoucí** se sypným úhlem mezi 45 a 60° (špatná flowuabilita),
5. **soudržný materiál**, sypný úhel větší než 60°(velmi špatná flowabilita),

6. **materiál netvořící skluzy, netekoucí**, se sklonem ke tvoření kleneb a těžko od sebe oddělitelný (žádná flowabilita).

Chování materiálu během dopravy je charakterizováno a označováno malými písmeny a zahrnuje celkem 10 skupin vlastností, které jsou pro dopravu významné a uvádí je tab. č. 1.2 [1,2].

Označení	Vlastnost	Příklady
o	abrazivní (obrusivý)	koks, křemen, vysokopecní struska
p	korozivní	kuchyňská sůl
q	rozbitelný, křehký	mýdlové vločky
r	explozivní	uhelný prach
s	hořlavý	dřevěné hobliny a třísky
t	prachovitý	cement
u	vlhký (v %)	
v	lepivý	vlhká hlína
w	hygroskopický	sádra, kuchyňská sůl
x	páchnoucí	odpadky

Tab. č. 1.2: Označení vlastností materiálu při dopravě [1,2]

Objemovou hmotnost sypkého materiálu je nutno vyjádřit jako podíl hmotnosti v tunách a příslušného objemu v kubických metrech (viz. dále). Nutno zdůraznit, že ještě rozlišujeme několik typů charakterizujících hmotnost sypkého materiálu (měrná/partikulární hmotnost, sypná).

Teplota dopravovaného materiálu je dána symbolem udávajícím počet stupňů současně s doplňkem údaje o stupnici (C, F). Tato hodnota je důležitá pro zvolení příslušného prvku technologické uzlu dopravního systému.

1.1. Kusové materiály [1,2]

Kusové materiály jsou charakteristické definovaných a neměnných chováním během dopravy, manipulace a skladování na rozdíl od sypkých materiálů. Klusové materiály je možno klasifikovat rovněž podle předpisu skupiny **FEM**. Ten obsahuje celkem osm kritérií:

1. Tvarovitost-tvar přepravovaného materiálu
- geometrický tvar: krychlový, válcový, jehlancovitý nebo kuželový, kulový
- běžné tvary přepravovaných předmětů: palety, desky, balíky, pytle

- nepravidelné tvary, např. obrobky, montážní jednotky, palety na kolečkách, přepravky

2. Poloha předmětu vzhledem k dopravě-rozdělení podle polohy předmětu při přepravě a stability přepravovaných kusů
- poloha přepravovaného kusového materiálu vůči směru dopravy: paralelně s dopravou, příčně k dopravě, šikmá vůči směru dopravy
- poloha těžiště vzhledem k dosedací ploše

3. Hmotnost-rozdělení podle hmotnosti přepravované dopravní jednotky
- 0 až 50 g; 50-500 g; 0,5 až 2,5 kg; 2,5 až 10 kg; 10 až 25 kg; 25 až 100 kg; 100 až 250 kg; 250 až 1000 kg; 1 t až 5 t; nad 5 t

4. Objem-rozdělení podle objemu dopravované jednotky
- 0 až 10 cm^3; 10 až 100 cm^3; 100 až 1000 cm^3; 1 až 10 dm^3; 10 až 100 dm^3; 100 až 1000 dm^3; 1 až 10 m^3; nad 10 m^3

5. Charakter materiálu-druh přepravovaného materiálu, který přichází do styku s dopravníkem
- kov, dřevo, papír, lepenka, textil, pryž, plastická hmota, sklo, porcelán, keramika apod.

6. Tvar dosedací plochy a jiné vlastnosti povrchu dopravovaných předmětů
- geometrický tvar dosedací plochy: rovný, vypuklý, vydutý, nepravidelný, nestejnosměrný, zborcený, s přesahujícím okrajem, se žebry, lištami, drážkami rovnoběžnými, příčnými či šikmými ke směru dopravy
-ostatní mechanické vlastnosti dosedacích ploch: hladké-lehce kluzné, hrubé-obtížně kluzné, měkké-poddajné-flexibilní, tuhé-tvrdé-pevné-nepoddajné, elastické apod.

7. Další pozoruhodné vlastnosti dopravovaných předmětů:
-převážně fyzikální vlastnosti-abrazivní-obrusivé, korozivní-agresivní, prašné, vlhké-mokré, mastné-olejnaté, horké (přes 80° C), chladné (pod -5° C), lehce rozbitné, s ostrými hranami
-další, např. chemické vlastnosti: lehce zápalné, výbušné, hygroskopické, lepivé, jedovaté, páchnoucí, radioaktivní-zářivé, vyvozující statickou elektřinu, vlastnosti měnící se během dopravy

8. Citlivost dopravovaného kusového materiálu

-citlivost k mechanickým účinkům: tlak, ráz-pád, přesýpání, změna polohy, zrychlení-zpoždění, proudění vzduchu
-citlivost k ostatním účinkům: chlad, teplo, světlo, záření, vlhkost, vysušení, znečištění, zestárnutí-zkažení.

2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI SYPKÉHO MATERIÁLU

Sypká/partikulární hmota je tvořena částicemi různého tvaru, velikosti, ovšem stejné sypné/objemové/partikulární hmotnosti. Částice tvoři v podstatě statistický soubor a z toho důvodu je chování hmoty naprosto nepředvídatelné. Studováním chování materiálu lze zjistit indicie, které pomáhají předvídat chování materiálu. Mechanické chování sypké/partikulární hmoty je složitým odrazem její struktury, tj. v podstatě charakteru pohybu každé částice (autonomie částice). Pohyb jedné částice může vyvolat dominový efekt pohybu celé masy hmoty. Chování sypké/partikulární hmoty se zásadně liší od mechanického chování spojitého materiálu (kontinua), tvořeného pevnými částicemi.

Pro techniky, stavaře, konstruktéry a provozovatele dopravních zařízení jsou důležité tyto následující parametry materiálu:

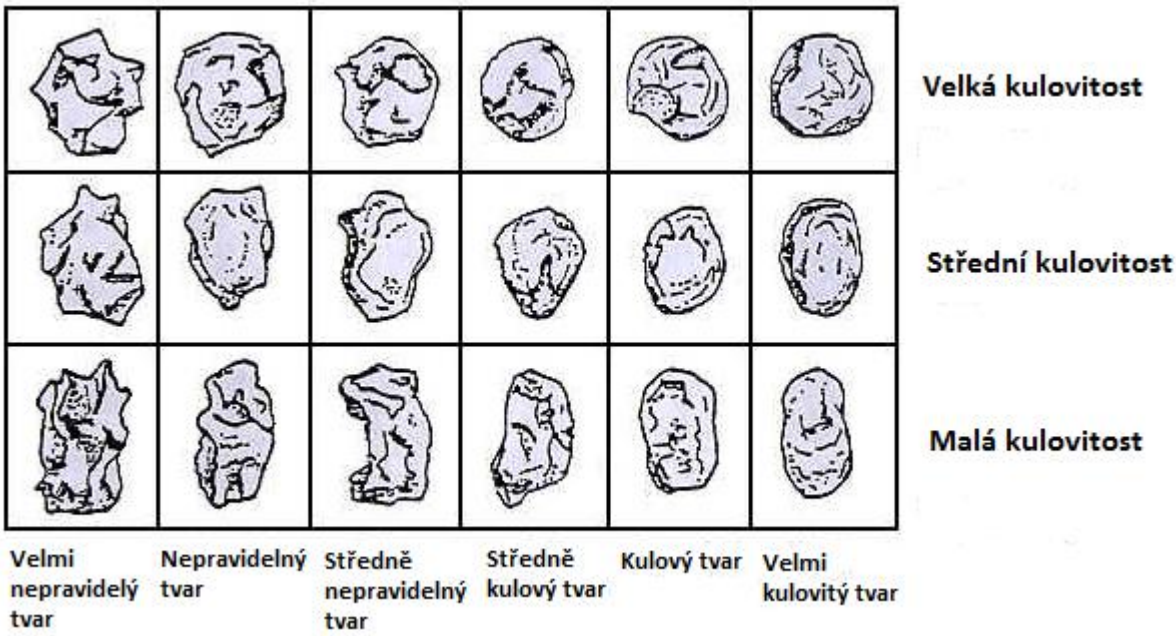
a) zrnitost
b) vlhkost
c) měrná, objemová a sypná hmotnost
d) sypný úhel
e) úhel vnitřního a vnějšího tření
f) soudržné napětí
g) napěťový stav sypkého tělesa

2.1 Zrnitost

Zrnitost/granulometrie je složení sypké hmoty podle velikosti zrna vyjádřené buď procentuálním obsahem zvolených tříd zrnitosti (tzn. tabulkou) nebo křivkou zrnitosti (frekvenční a součtová křivka, obr. č. 2.2).

Velikost zrna/částice *u* [mm; μm]

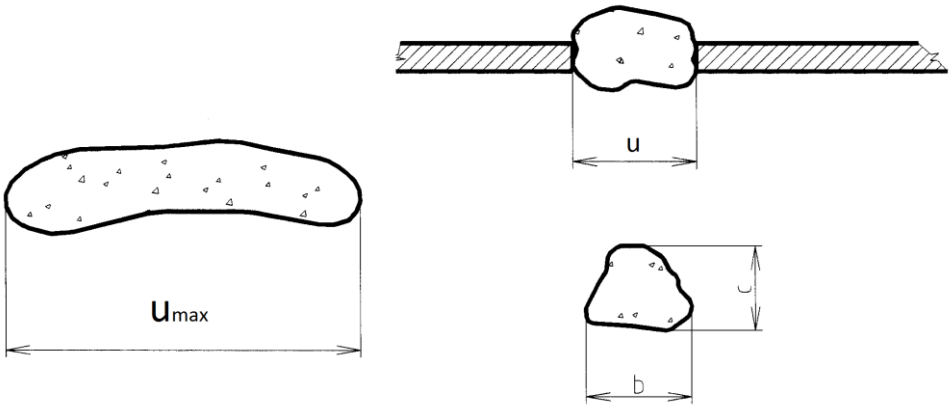
Protože sypká hmota je tvořena různými velikostmi zrna různého tvaru, je velice obtížné stanovit velikost byť jen jediného zrna vzorku. Kromě toho je velice obtížné zajistit homogenitu vzorku, tak aby částice byla reprezentativní. Nejčastěji se bere v úvahu maximální rozměr zrna $\mathbf{u_{max}}$ (obr. č. 2.1) nebo největší rozměry ve dvou na sobě kolmých rovinách (bxc), eventuálně rozměr reprezentativní částice-koule mající stejný objem (povrch, délku, počet) jako skutečné zrna sypké hmoty. Odlišení od kulovitosti se pak vyjadřuje součinitelem odklonu od sféricity.



Tab. č. 2.1 Wadellova tabulka sféricity částic

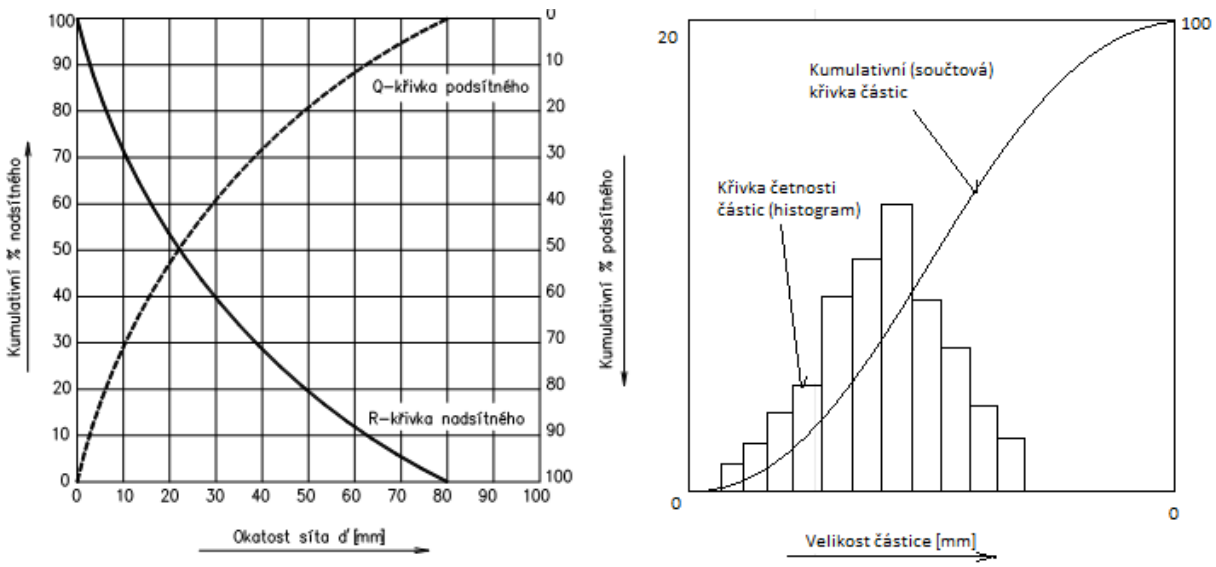
Dostupný z: http://www.agcsa.com.au/static/atm_articles/html/2_4f.html (4.7.2011)

Sítový rozbor / rozsev je stanovení zrnitosti sypká hmoty na soustavě konkrétních sít podle různé okatosti seřazených od nejmenší po největší okatost síta a umístěných na vibrujícím zařízení. Znázornění rozboru udávají tzv. rozsévové křivky (obr. 1.2).



Obr. č. 2.1: Stanovení velikosti částice (zrna) pro nepravidelný tvar [2]

Rossin - Ramlerovy rovnice (2.1 a 2.2) udávají analytické vyjádření rozsévových křivek jako kumulativní procenta nadsítného a podsítného v závislosti na velikosti okatosti sít (obr. č. 2.2). **Frekvenční křivka (histogram) a kumulativní (součtová) křivka** výskytu částic jsou základní křivky vyjádření zrnitosti sypké hmoty.



Obr. 2.2 Rozsévové křivky sypké hmoty (vlevo) a křivky četnosti a kumulativní výskytu částic ve vzorku sypké hmoty (vpravo) [2]

$$R = 100 \cdot e^{-\left(\frac{d'}{d}\right)_n} \qquad [\%] \qquad (2.1)$$

$$Q = 100 \cdot e \left[1 - e^{-\left(\frac{d'}{d}\right)^n} \right] \qquad [\%] \qquad (2.2)$$

kde d' – velikost zrna při výnosu nads

n – parametr stejnoměrnosti zrna $\in$ (0,7÷1,4)

Tyto analyticky vyjádřené křivky (2.1 a 2.2) často v logaritmických souřadnicích přechází v přímky se sklonem daným parametrem stejnoměrnosti *n*.

Maximální kusovitost (velikost zrna) $\boldsymbol{u_{max}}$ [mm] je jmenovitá velikost strany čtvercového síta, kterým propadne 95 % hmotnosti zrniva.

2.2 Vlhkost

Vlhkost je vyjádřena obsahem vody ve vzorku v procentech jeho hmotnosti.

Obsah vody se během dopravy, manipulace a skladování sypkých hmot neustále mění.

Sypkému materiálu schopnému zadržovat určitý obsah vody říkáme vlhký, jedná se vlastně o materiál, ve kterém voda ulpívá na zrnech. Vlhkost a nasákavost (schopnost přijmout vodu) je důležitá k posouzení náchylnosti k nalepování a namrzání sypké hmoty na dopravních systémech. V podmínkách podnebí ČR je vzdušná vlhkost, která vstupuje do sypkého materiálu významná, protože sypký materiál pojímá tuto vlhkost a tudíž mění vlastnosti sypkého materiálu.

Obsah vody a nasákavosti v uhlí a lignitech uvádějí normy ČSN 44 1377, 44 1375, 44 1376 a nejdůležitější pojmy a názvosloví jsou uvedeny v následujících odstavcích.

Voda - **přimíšená (gravitační) Wg** se dá mechanicky oddělit (filtrace, odstředění),

- **hrubá Wex** podíl, který se po odstředění přimíšené vody volně vypaří do vzduchu,
- **zbylá Wh** kapilárně vázaná, sušení při 110 °C.

Voda veškerá Wt je souhrn hrubé a zbylé vody, kdy vzorek je v přirozeném stavu. Zjištění je možné porovnáním hmotností původního a vysoušeného vzorku.

Nasákavost Wmax je schopnost sypkých hmot přijímat vodu až do ustavení rovnovážného stavu.

Volná voda je rozdíl mezi obsahem veškeré vody a nasákavostí.

Materiál	Sypná hmotnost ρ_s [kg.m^{-3}]	Dynamický sypný úhel ψ_d [°]	Největší úhel sklonu dopravníku ε_{max} [°]
Antracit drcený	592 až 672	max. 15	18
Bauxit	1100 až 1400	10 až 15	15
Beton škvárový	1440 až 1600	25	-
Břidlice lámaná	1440 až 1600	10	18
Cement sypaný	1200 až 1400	5	5
Hlína suchá	960 až 1200	20	20
Hlína těžená	1200	20	18
Kámen drcený	1500 až 2100	15	15
Koks	400 až 600	15	17
Lignit	640 až 720	20	18
Obilí	500 až 800	10	12
Písek mokrý	1800 až 2100	10 až 15	15 až 18
Písek suchý	1300 až 1600	10 až 15	12 až 15
Popílek mokrý	750 až 900	15	18
Popílek suchý	500 až 650	10	16
Popílek vysokopecní	1760 až 2000	20	-
Ruda železná	2100 až 3000	15	18
Skrývka	1300 až 1800	12 až 20	12 až 20
Struska drcená	2080 až 2880	15	18
Škvára	1200 až 1500	10 až 15	18
Štěrk říční	1440 až 1600	25	15
Štěrk suchý	1390 až 1440	25	20
Štěrkopísek	1700 až 1950	18	-
Uhlí černé	850 až 1100	15 až 18	18
Uhlí hnědé	700 až 1000	15 až 20	18
Vápenec drcený	1360 až 1440	15	15
Zemina těžená	1120 až 1280	10 až 20	18 až 20
Zemina s jílem, vlhká	1600 až 1760	25	20

Tab. č. 2.2 Mechanicko-fyzikální parametry vybraných sypkých hmot [2]

2.3 Měrná, objemová a sypná hmotnost částicového materiálu

Měrná hmotnost ρ $[kg \cdot m^{-3}]$ je hmotnost objemové jednotky tuhé substance zrn materiálu (veškerý materiál vyplňuje meziprostor částic). Zjišťuje se po rozemletí materiálu na velikost zrna menší než 0,125 mm a zahřátí na 105-110 °C. V literatuře se často setkáváme s měrnou hmotností pevného materiálu (např. ocel ρ=7850 kg.m^{-3}).

Objemová hmotnost ρ_v $[kg \cdot m^{-3}]$ je hmotnost objemové jednotky materiálu **v rostlém stavu**, tj. s jeho dutinami, póry a kavernami. Laboratorně se zjišťuje stejným způsobem jako sypná hmotnost s tím rozdílem, že je nejprve nutné změřit objem meziprostoru částic např. zaplněním prostoru kapalinou známého objemu resp. hmotnosti.

Sypná hmotnost ρ_s $[kg \cdot m^{-3}]$ je hmotnost objemové jednotky rozpojeného, volně sypaného materiálu, tj. materiálu ve stavu, ve kterém se dopravuje (tab. č. 2.1). Měří se laboratorně naplněním sypké hmoty do nádoby známého objemu změřením její hmotnosti.

Součinitel nakypření udává poměr mezi objemovou a sypnou hmotností

$$k_N = \frac{\rho_v}{\rho_s} \qquad [-] \qquad (2.3)$$

Všeobecně platí, že

$$\rho_s \langle \rho_v \langle \rho \qquad [kg.m^{-3}] \qquad (2.4)$$

Ve výpočtech se s výhodou často uplatňuje odvozená veličina-**sypná tíha**. Jedná se vlastně o tíhu objemové jednotky 1 m^3 materiálu v rozpojeném stavu a určí se ze vztahu:

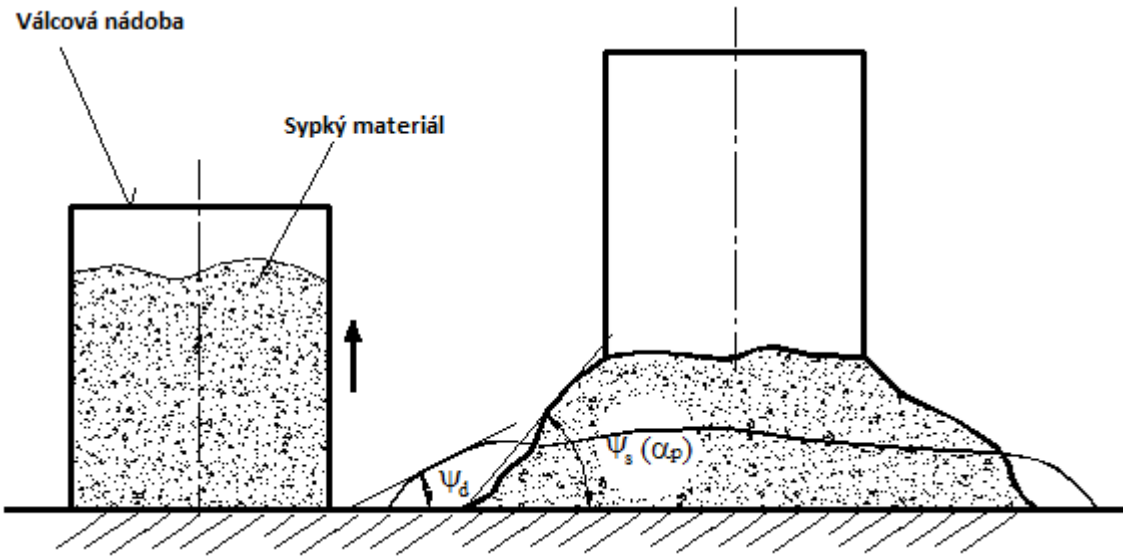
$$\gamma_s = \rho_s \cdot g \qquad [N.m^{-3}] \qquad (2.5)$$

2.4 Sypný úhel (úhel přirozeného svahu za klidu a za pohybu)

Přirozený sypný úhel (klidový) ψ_s je úhel, který svírá tečna ke svahu volně nasypaného materiálu s vodorovnou rovinou podložky. Laboratorně se zjišťuje tak, že do válcové nádoby se nasype sypký materiál, otočí se dnem vzhůru a postupným zvedáním válcové nádoby od podložky se vytvoří svah volně sypaného materiálu (obr. č. 2.3)

Při kmitání podložky (pohyb, doprava) dochází ke zmenšení sypného úhlu a vzniku tzv. dynamického sypného úhlu ψ_d (uplatnitelný např. při stanovení průřezu náplně dopravníku), pro který platí:

$$\psi_d \langle \psi_s \qquad [deg] \qquad (2.6)$$



Obr. 2.3 Znázornění měření úhlu přirozeného svahu sypké hmoty vysypáváním z válcové nádoby (vpravo) [2]

2.5 Úhel vnitřního a vnějšího tření sypkého materiálu

Úhel vnitřního tření φ zahrnuje tření mezi jednotlivými zrny materiálu. Má souvislost s interpartikulárními silami a tudíž závisí na velikosti a stavu partikulárního materiálu (obr. č. 4.1). U téhož materiálu závisí na normálovém tlaku a na míře konsolidace (zhutněnosti) materiálu. S rostoucím vertikálním napětím σ_1 úhel vnitřního tření sypké hmoty roste.

Měření se provádí na smykovém a rotačním stroji (Jenikeho typ a Schutzeho typ) na čerstvém a konsolidovaném materiálu (event. časově konsolidovaném materiálu). Výsledky smykových zkoušek sypkého materiálu (černé uhlí) na přímočarém smykovém stroji jsou zachyceny na obr. č. 2.4 včetně dalších tokových vlastností měřené sypké hmoty a tokové křivky (obálka Mohrových kružnic, obr. č. 2.8).

V obrázku č. 2.4 symboly znamenají:

φ_e - efektivní úhel vnitřního tření (za klidu) a

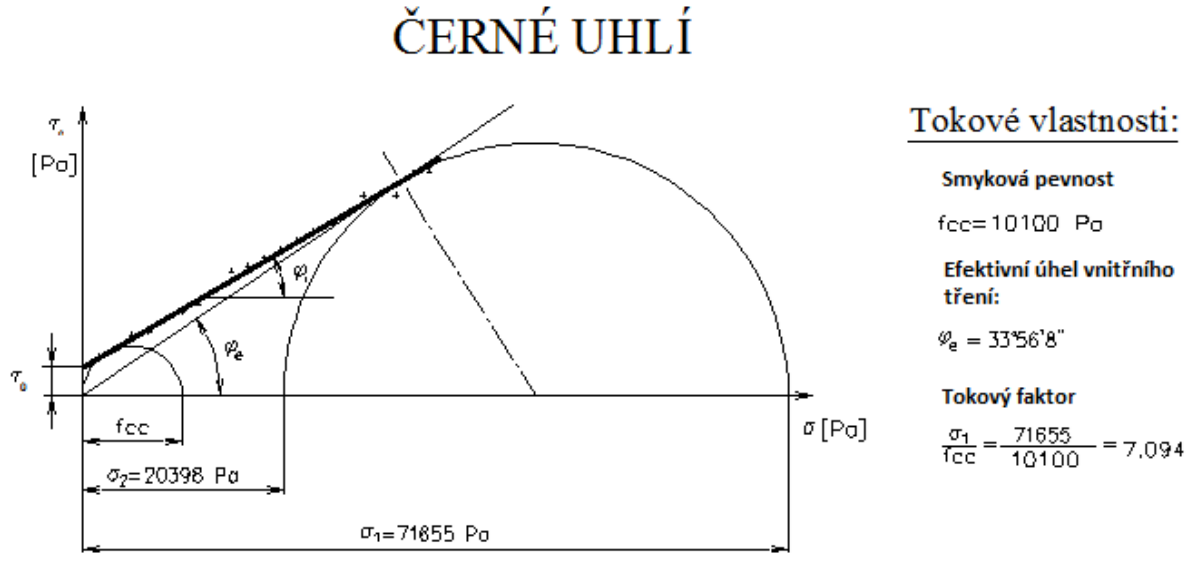
φ_i – okamžitý (instantní) úhel vnitřního tření sypké hmoty (za pohybu).

Úhel vnitřního tření sypké hmoty φ lze přibližně vyjádřit z přirozeného sypného úhlu [3] ψ_S

$$\varphi \div arctg.(0{,}9 tg\psi_s) \qquad [°] \qquad (2.7)$$

Součinitel vnitřního tření z úhlu vnitřního tření je vyjádřen následujícím vztahem

$$f = tg\varphi \qquad [-] \qquad (2.8)$$



Obr. č. 2.4 Úhel vnějšího, vnitřního tření a další tokové parametry černého uhlí [2]

Úhel vnějšího tření je úhlem, při kterém sypký materiál začíná klouzat po podložce a je třeba odlišovat úhel vnějšího tření

- **za klidu** $tg\nu = \mu$, kde μ -součinitel vnějšího tření za klidu;
- **za pohybu** $tg\nu_d = \mu_d$, kde μ_d - součinitel vnějšího tření za pohybu.

Vzájemnou relaci mezi úhlem vnějšího tření za klidu a za pohybu lze vyjádřit následujícím vztahem

$$\mu_d \langle \mu \Rightarrow \nu_d \langle \nu \qquad [°] \qquad (2.9)$$

Součinitel vnějšího tření se mění s velikostí normálového tlaku. Výrazně závisí na typu podkladového materiálu. (např. stěny zásobníku). Měření se provádí na stejném zařízení jako u úhlu vnitřního tření.

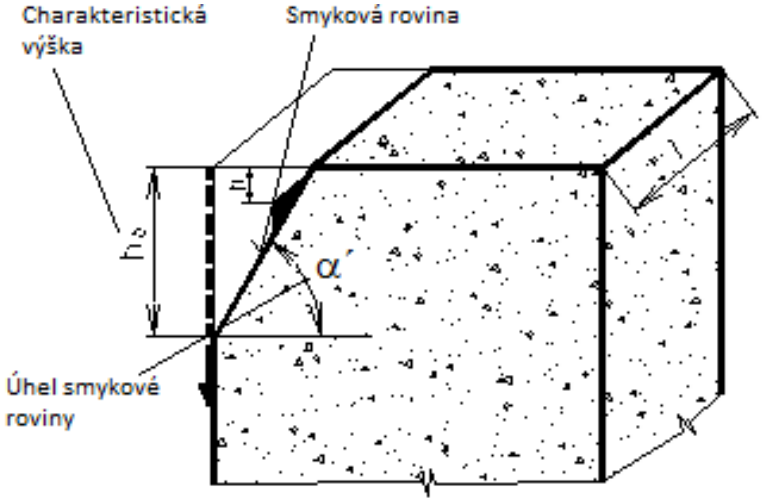
2.6 Soudržnost sypkých hmot

Soudržnost sypkých hmot (obr. č. 2.5) spojená s kohezivitou materiálu (obr. č. 4.1) je jedna z jejich základních vlastností. Jedná se o schopnost přenášet vnitřním třením nejen smyková a tlaková namáhání, ale i malá tahová a krutová namáhání.

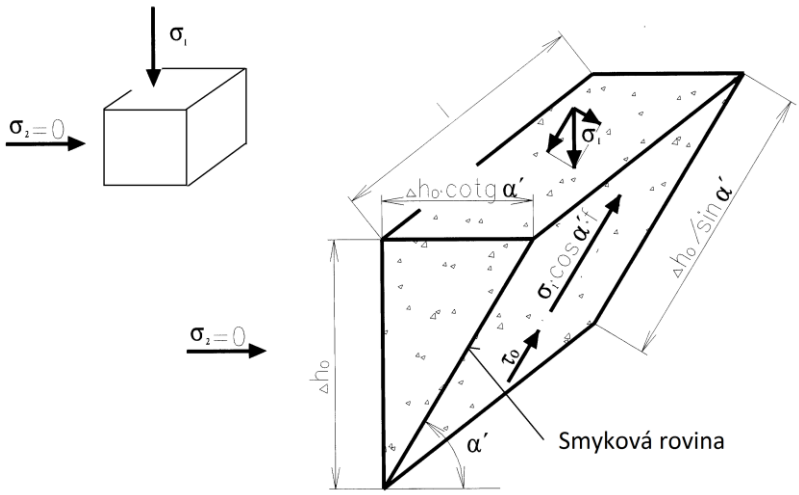
Ideální sypké hmoty přenášejí jen smyk a tlak.

Počáteční soudržné napětí τ_o udržuje sypké těleso pohromadě. Působí s vnitřním třením na smykových plochách. Je závislé na sypné tíze γ_S, charakteristické výšce $\boldsymbol{h_o}$, součiniteli vnitřního tření $\boldsymbol{f}$ a na úhlu smykové roviny α'.

Měření charakteristické výšky a úhlu smykové roviny se provádí na upravené nádobě v zásobníku s jednou posuvnou stěnou směrem dolů. Princip měření spočívá v nasypání sypké hmoty o jisté sypné hmotnosti a posouvání boční stěny až dojde k sesmeknutí klínu materiálu (obr. č. 2.5). Následně je potřebné změřit charakteristickou výšku $\boldsymbol{h_o}$ a úhel smykové roviny α'.



Obr. č. 2.5: Měření charakteristické výšky a úhlu smykové roviny [2]



Obr. č. 2.6 Znázornění stanovení počátečního smykového napětí z výseče elementu sypké hmoty [2]

V obr. č. 2.6 symboly znamenají:

α' - úhel smykové roviny [°]
τ_o - počáteční soudržné napětí [Pa]
σ_1 - napětí ve svislém směru [Pa]

σ_2 - napětí ve vodorovném směru [Pa] (při utržení klínu $\sigma_2=0$)
h_o - charakteristická výška [m] (laboratorně změřena)

Z rovnováhy sil na zvoleném elementu (klín) (obr. č. 2.6)

$$\tau_o \cdot \frac{\Delta h_o}{\sin\alpha'} \cdot l + \sigma_1 \cdot f \cdot \Delta h_o \cdot \cot g\alpha' \cdot \cos\alpha' = \sigma_1 \cdot \Delta h_o \cdot l \cdot \sin\alpha' \cdot \cot g\alpha' \quad \text{[Pa]} \quad (2.10)$$

$$\sigma_1 = \gamma_s \cdot h_o$$

$$\tau_o = \gamma_s \cdot h_o \underbrace{\left(0{,}5 \cdot \sin 2\alpha' - f \cdot \cos^2 \alpha'\right)}_{\div 0{,}25} \quad \text{[Pa]} \quad (2.11)$$

$$\tau_o \div \frac{\gamma_s \cdot h_o}{4}$$

Lze odvodit skluzovou plochu max. klínu:

$$\alpha' = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} = 45° + \frac{\varphi}{2}$$

a pak

$$\tau_o = \frac{\gamma_s \cdot h_o}{2} \cdot \frac{1 - \sin\varphi}{\cos\varphi} \quad \text{[Pa]} \quad (2.12)$$

Za předpokladu goniometrické úpravy vztahu (2.12) lze pak dospět ke vztahu

$$\tau_o = \frac{\gamma_s \cdot h_o}{2} \cdot tg(90° - \varphi) \quad \text{[Pa]} \quad (2.13)$$

2.7 Napěťový stav sypkého tělesa

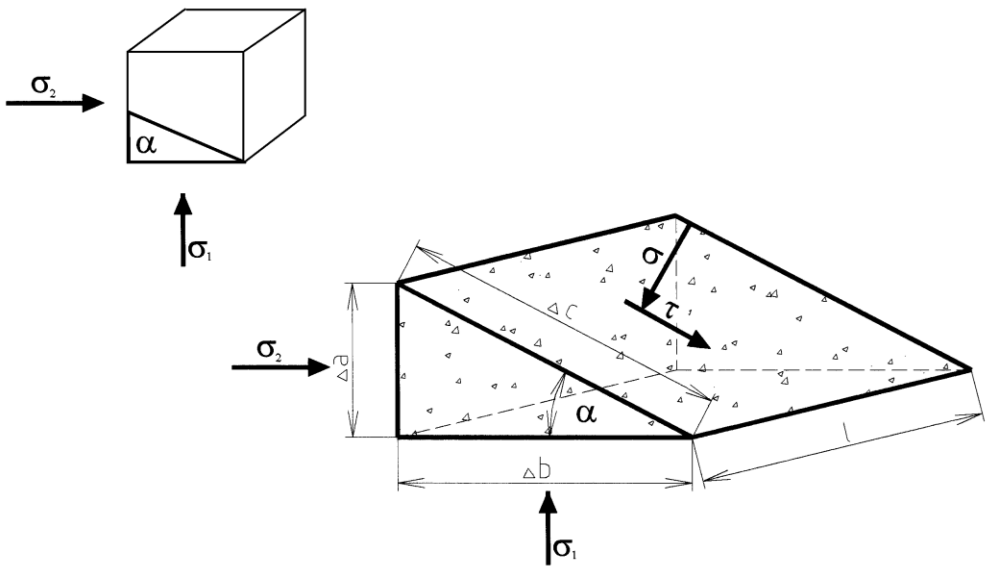
Sypký materiál volně ložený nebo uložený v zásobníku vytváří tzv. **sypké těleso**, které podléhá napěťovému stavu.

Budeme-li hledat velikosti napětí v obecné rovině ze sypkého tělesa vyjmeme nejprve malý element tvaru trojbokého hranolu a nahradíme účinek oddělených částic příslušnými silami (obr.č. 2.7).

Pro rovnováhu sil platí

$$\sum F_{i\sigma} = 0 \Rightarrow l \cdot \left(\Delta c \cdot \sigma - \Delta a \cdot \sigma_2 \cdot \sin\alpha - \Delta b \cdot \sigma_1 \cdot \cos\alpha\right) = 0 \quad (2.14)$$

$$\sum F_{i\tau} = 0 \Rightarrow l \cdot \left(\Delta c \cdot \tau + \Delta a \cdot \sigma_2 \cdot \cos\alpha - \Delta b \cdot \sigma_1 \cdot \sin\alpha\right) = 0 \quad (2.15)$$



Obr. č. 2.7 Působící síly na vyjmutý element materiálu sypké hmoty (vlevo nahoře) [2]

$$\Delta a = \Delta c \cdot \sin\alpha \qquad \Delta b = \Delta c \cdot \cos\alpha \qquad (2.16)$$

úpravou tj. dosazením (2.16) do (2.14) a (2.15):

$$\sigma = \sigma_1 \cdot \cos^2\alpha + \sigma_2 \cdot \sin^2\alpha \qquad [\text{Pa}] \qquad (2.17)$$

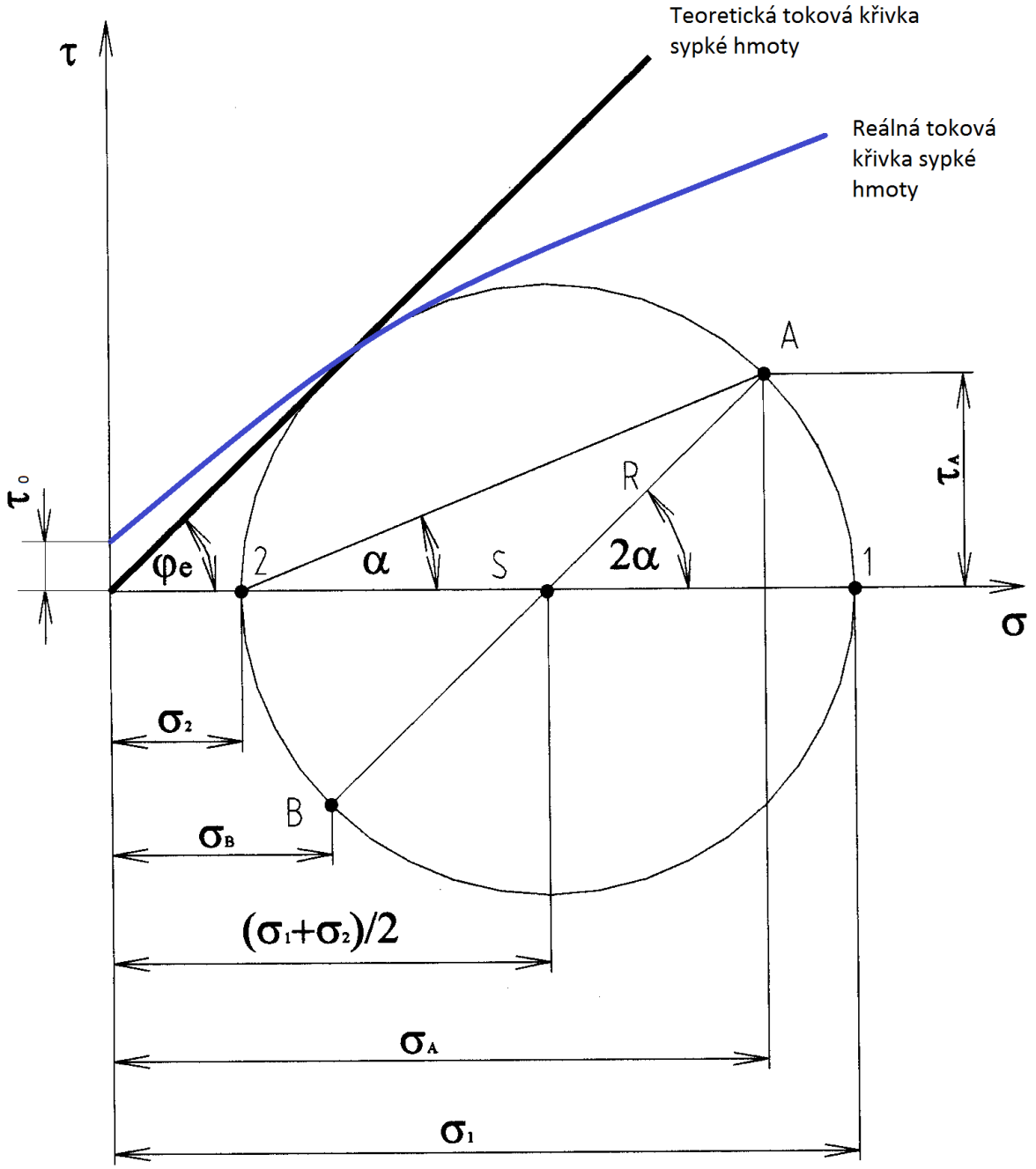
$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \sin 2\alpha \qquad [\text{Pa}] \qquad (2.18)$$

Úpravou první rovnice (2.17) využitím trigonometrických operací dostaneme tvar

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos 2\alpha \qquad [\text{Pa}] \qquad (2.19)$$

a umocněním rovnic (2.18) a (2.19) jejich sečtením dostaneme rovnici Mohrovy kružnice napětí (2.20, viz. obr. č. 2.8).

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right)^2 \qquad [\text{Pa}] \qquad (2.20)$$



Obr. č. 2.8 Mohrova kružnice znázorňující napěťový stav sypké hmoty s teoretickou a skutečnou tokovou čárou sypké hmoty [2]

Kromě hlavních napětí při výpočtech potřebujeme znát i napětí kolmá, nebo boční σ_B.

Součinitel bočního tlaku

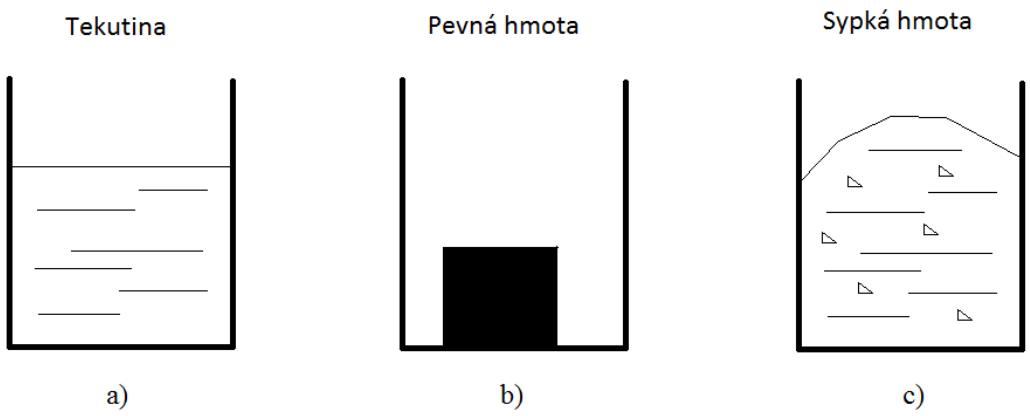
$$k_b = \frac{\sigma_B}{\sigma_A} \qquad [-] \qquad (2.21)$$

Minimální hodnota součinitele bočního tlaku (2.21) se nazývá <u>součinitel sypnosti (koeficient sypnosti)</u> a je vyjádřen následujícím vztahem:

$$k = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \qquad (2.22)$$

2.8 Stanovení tlaků v sypkém tělese

Pro stanovení tlaků v sypném tělese není možno použít *Pascalova zákona* uvažujícího rovnoměrné šíření tlaku všemi směry (platí pouze pro tekutiny). **Sypká hmota je** charakteristická širokým rozsahem úhlu vnitřního tření φ =(0, 90°) na rozdíl od kapalin, kde úhel vnitřního tření je blízko nulové hodnotě ($\varphi \approx 0°$) a pevné hmoty, kde úhel vnitřního tření φ =90°. V literatuře se často uvádí, že se jedná o **čtvrté skupenství** (pevné, kapalné, plynné, plasma, sypká hmota) [6].



Obr. č. 2.9 Charaktery hmoty a jejich úhel vnitřní tření φ a koeficient tření f

a) tekutina φ≈0°, f=0, b) pevná hmota φ=90°, f=1, c) sypká hmota φ≠ 0°, f≠ 0

Zdroj: [6, str. 110, obr. 9.6]

Pro vyjádření napětí v sypké hmotě se nejjednodušeji používá **Rankinova** teorie, která zanedbává vnitřní tření materiálu i tření po stěnách zásobníku a tudíž uvažuje svislé napětí na vodorovnou plochu jako hydrostatický tlak, který se dá vyjádřit následujícím vztahem:

$$\sigma_1 = \gamma_s \cdot h \qquad [\text{Pa}] \qquad (2.23)$$

a pro svislou plochu pak vodorovným napětím

$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot k = k \cdot \gamma_s \cdot h \qquad [\text{Pa}] \qquad (2.24)$$

Tato teorie se dá s dostatečnou přesností využít pro mělké zásobníky do výšky $h \leq (8 \div 10).R$, kde R je hydraulický poloměr. Velikost hydraulického poloměru se určí ze vztahu:

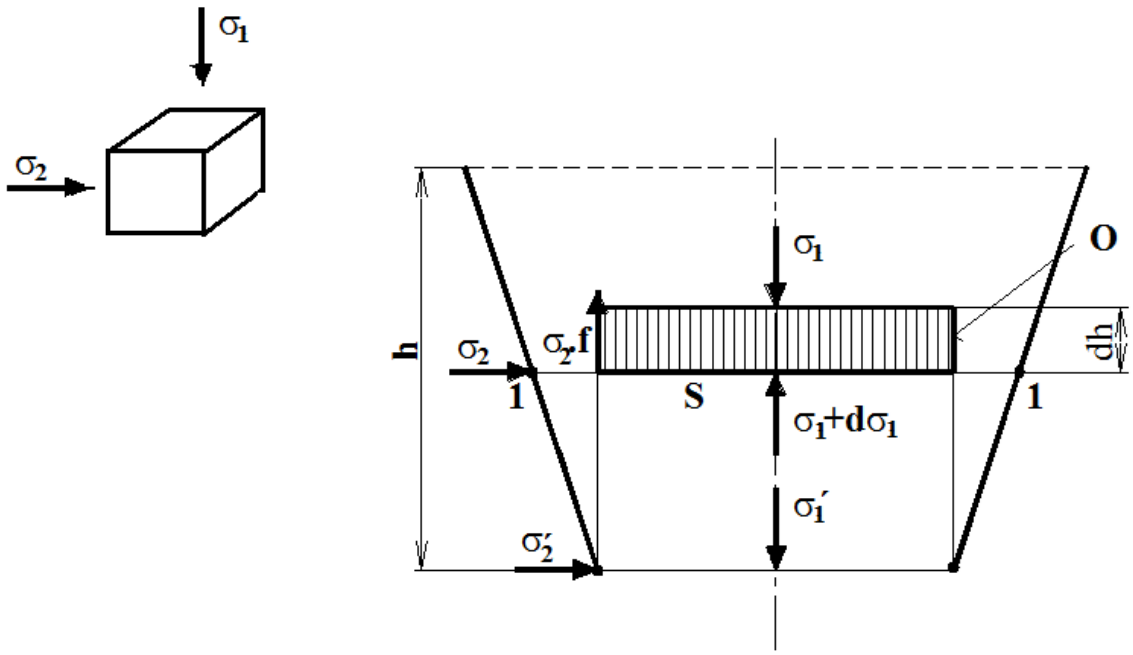
$$R = \frac{S}{O} \qquad [\text{m}] \qquad (2.25)$$

Přesnější je teorie **Jansenova,** která předpokládá, že sloupec uvnitř zásobníku je zavěšen na ostatních vrstvách materiálu a jejich prostřednictvím na stěnách**.** Bere tudíž v úvahu vnitřní i vnější tření materiálu. Velikost hlavních napětí se dá odvodit dle obr. č. 2.10.

Pro rovinu 1- 1 platí $\sum F_{iy} = 0$

$$\sigma_1 \cdot S + \gamma_s \cdot S \cdot dh - \sigma_2 \cdot O \cdot f \cdot dh = (\sigma_1 + d\sigma_1) \cdot S \qquad |: S \qquad (2.26)$$

Po dosazení do (2.26) a úpravě



Obr.č. 2.10 Stanovení Jansenovy síly působící na stěny zásobníku [2]

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_2}{k} \text{ , } d\sigma_1 = \frac{d\sigma_2}{k} \text{ a } \frac{O}{S} = \frac{1}{R}$$

dostáváme vztah

$$\frac{\sigma_2}{k} + \gamma_s \cdot dh - \frac{\sigma_2}{R} \cdot f \cdot dh = \frac{\sigma_2}{k} + \frac{d\sigma_2}{k}$$

Následnou separací proměnných na levé a pravé straně neurčitého integrálu lze dospět ke vztahu

$$\int dh = \int \frac{d\sigma_2}{\gamma_s \cdot k - \frac{k \cdot f}{R} \cdot \sigma_2}$$

Po integraci a zavedení okrajových podmínek tj. $h = 0 \Rightarrow \sigma_2 = 0$ **a pro** $h = h \Rightarrow \sigma_2 = \sigma'_2$ dostáváme tzv. **Jansenovo napětí**

$$\sigma'_2 = \frac{\gamma_s . R}{f} . \left(1 - e^{-\frac{k.f.h}{R}}\right) \quad \text{[Pa]} \qquad (2.27)$$

$$\sigma'_1 = \frac{\gamma_s . R}{f.k} . \left(1 - e^{-\frac{k.f.h}{R}}\right) \quad \text{[Pa]} \qquad (2.28)$$

a pro $h \to \infty$ dostáváme přibližné hodnoty z rovnic (2.27) a (2.28)

$$\sigma'_2 \div \frac{\gamma_s \cdot R}{f} \quad \text{[Pa]} \qquad (2.29)$$

$$\sigma'_1 \div \frac{\gamma_s \cdot R}{f \cdot k} \quad \text{[Pa]} \qquad (2.30)$$

Pro výpočet **skutečných tlaků** $\boldsymbol{p_1'}$ **a** $\boldsymbol{p_2'}$, které se vyskytují v reálných zásobnících při otevírání a zavírání výpustě za vzniku rázových špiček, se používají opravní součinitelé $\boldsymbol{k_o}$ a $\boldsymbol{k_d}$.

$$p'_1 = \sigma'_1 \cdot k_o \cdot k_d \quad \text{[Pa]} \qquad (2.31)$$

$$p'_2 = \sigma'_2 \cdot k_o \cdot k_d \quad \text{[Pa]} \qquad (2.32)$$

kde k_o - součinitel závěsu $\in (1 \div 2)$

k_d - dynamický součinitel $\in (1{,}1 \div 1{,}6)$

Teoretický tlak je samozřejmě jiný než reálný, který vyjadřuje i další vlivy působící na sypký materiál. Tyto vlivy se odrážejí v součiniteli závěsu a dynamickém součiniteli. V reálné praxi se často setkáváme při porovnání teoretických napětí (2.27 a 2.28) a skutečných tlaků (2.31 a 2.32) s hodnotou poměru skutečných tlaků a teoretických napětí blízkých hodnotě 2,3, proto se doporučuje zvětšovat veškerá teoretická napětí o tuto hodnotu.

Lze tedy teoreticky napsat:

$$\frac{p'_1}{\sigma'_1} = 2{,}3 = k_0 . k_d$$

$$\frac{p'_2}{\sigma'_2} = 2{,}3 = k_0 . k_d$$

3 ZÁKLADNÍ POJMY V DESINTEGRACI MATERIÁLU

3.1 Rozpojování, rozpojitelnost a stupeň rozpojení

Čas ke studiu: 3 hodiny

Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Definovat pojmy z oblasti rozpojování
- Znát základní hypotézy rozpojování

Výklad

Rozpojování (zdrobňování, zmenšování, drcení) je technologický proces úpravy surovin, při kterém dochází k desintegraci částic sypkého materiálu (paliv, rud, kameniva apod.). Hlavním cílem tohoto procesu je zmenšení velikosti částic na požadované rozměry z důvodu:

- *dopravních a manipulačních procesů* (zařazuje se zpravidla bezprostředně za dobývací stroj)
- *přípravy zrn* pro vlastní úpravárenský proces rozdružení jednotlivých složek suroviny z hlediska velikosti zrn
- *zhotovení zrnitosti* zrn podle požadavků odběratele

Rozpojování nerostných surovin je proces (pracovní pochod), při němž dochází působením vnějších sil k porušení vnitřních mezimolekulárních sil soudržnosti částic a rozpadu zrna. Výsledkem je pak vznik souboru menších zrn při současné vzrůstu *měrného povrchu zrn* [$m^2.m^3$, $m^2.kg^{-1}$]. V tomto procesu se jedná především o mechanické rozpojování materiálu.

Hlavními pracovními pochody rozpojování je *drcení a mletí*. *Hranice mezi drcením a mletím není jednoznačně určena*. Hraniční zrno po rozpojení je 1-3 mm; podle normy ČSN 44 7010 je 1,25 mm.

Rozpojitelnost (drtitelnost, melitelnost) je schopnost partikulárních materiálů k separaci a oddělení jednotlivých zrniček (partikulí) sypkého materiálu včetně jejich rozpojení (tj. rozdělení částice na několik jednotlivých částic menších velikostí). *Rozpojování* (drcení, mletí) obvykle vyjadřujeme *koeficientem drtitelnosti*. *Koeficient drtitelnosti* je definován poměrem času potřebného k rozdrcení (rozemletí) určitého materiálu k etalonu-k základnímu materiálu. Obvykle za základní materiál-etalon je brán *diabas*, tzv. *moravská droba*. *Koeficient drtitelnosti* je nutno definovat za stejných podmínek, tzn. stejná velikost vstupního zrna a výstupního zrna a stejné množství ve stejném typu drtiče při stejném opotřebení stroje.

Rozpojitelnost je dána zejména vlastnostmi materiálu. Mezi ty nejdůležitější patří: pevnost, tvrdost, houževnatost, křehkost, stlačitelnost, voděodolnost, složení materiálů (obsah prvků S, C, N), tepelná vodivost, elektrické vlastnosti, štěpnost, abrazivzdornost apod. Další vlastnosti, které nepřímo *ovlivňují* rozpojitelnost materiálu patří: konstrukce stroje určeného k rozpojení (drtič, mlýn) a jeho materiálu, interpartikulární síly, které jsou funkcí velikosti částic (kohezní a smykové síly, Van der Waalsovy síly, tekuté můstky apod., obr. č. 4.1) a především vlivy okolního prostředí (teplota, vlhkost) apod.

Stupeň rozpojení i je definován poměrem velikosti vstupního zrna *U* a výstupního zrna *u* v procesu drcení, resp. poměrem velikosti vstupního středního zrna a výstupního středního zrna , tj. poměr zrna před a po rozpojení

$$i = \frac{U}{u} = \frac{U_{stř}}{u_{stř}} \tag{3.1}$$

Redukovaný stupeň rozpojení je vztažen k 80% nerozpojeným a rozpojeným množstvím, která projdou kruhovým otvorem, tj.

$$i = \frac{D_{80}}{d_{80}} \tag{3.2}$$

Zajímavost k tématu

Rozdílné hodnoty rozpojitelnosti je možné výhodně využít pro separaci jednotlivých složek tvořících sypký materiál.

3.2 Základní druhy a způsoby mechanického rozpojování

Působením vnějších sil na částicový materiál dochází k narušení vnitřní soudržnosti materiálu na jednotlivých plochách. Jedná se o proces, při kterém dochází k rozpadnutí materiálu na menší zrna. Rozdrcení je možné dosáhnout:

1) tlakem,
2) rázem,
3) nárazem,
4) ohybem,
5) střihem,
6) štípáním

Pro každý druh materiálu je nutné volit určitý druh drcení (např. materiál houževnatý, křehký apod.).

Výsledek drcení je posuzován srovnáváním zrnitosti materiálu, kde bereme v úvahu největší zrna frakcí před a po drcení a podle zrna konečného produktu dělíme drcení podle stupně rozpojení na hrubé, střední, jemné, mletí, jemné mletí a velmi jemné mletí.

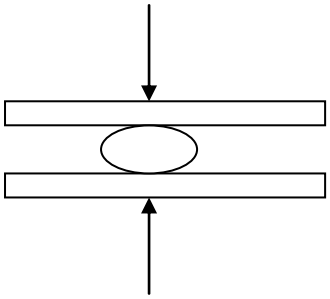
Druh	i	Velikost rozpojených částic [mm]
Primární (hrubé, předběžní drcení)	3-6	zrna převážně >125
Sekundární (střední) drcení	cca 10	zrna převážně >25
Terciání (jemné) drcení	cca 15	zrna převážně <25
Mletí	10-50	zrna převážně <1,25
Jemné mletí	100	zrna převážně <0,08
Velmi jemné mletí	>100	zrna cca 0,08

Tab. č. 3.1. Druh drcení na stupni drcení a velikosti rozpojených částic

Jednotlivé druhy drcení se vždy překrývají a není přesně určena hranice jednotlivých způsobů drcení materiálu.

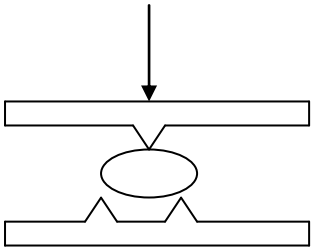
Způsoby drcení:

1) **mačkání-tlak**



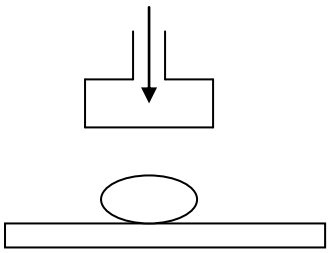
Drtící stroje: čelisťové s hladkými čelistmi, kuželové a válcové)

2) **štípání- střih a ohyb**



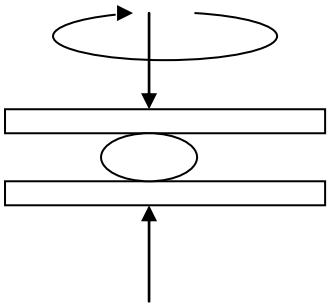
Drtící stroje: čelisťové s ozub. čelistmi, kuželové, válcové s rýhovanými válci

3) rázem-úder



Drtící stroje: kladivové, válcové a kulové mlýny, desintegrátory

4) roztíráním-střih



Drtící stroje: čelisťové, kuželové, válcové, kulové mlýny, válcové mlýny

Rozpojování je velice energeticky náročný proces. Exaktní určení potřebné velikosti práce pro rozpojení je velmi obtížné a náročné a především záleží na vlastnostech rozpojovaného materiálu. Spotřeba energie pro drcení podle Guillot R [3].

Hrubé drcení	10,8-14,4	$MJ.t^{-1}$ ($kJ.kg^{-1}$)
Jemné drcení	18,0-21,6	$MJ.t^{-1}$ ($kJ.kg^{-1}$)
Mletí	72,0-108,9	$MJ.t^{-1}$ ($kJ.kg^{-1}$)
Jemné mletí	360,0-3600,0	$MJ.t^{-1}$ ($kJ.kg^{-1}$)

Tab. č. 3.2. Druh drcení v závislosti na spotřebované energii [3]

3.3 Teorie rozpojování

Ke stanovení velikosti potřebné energie k rozpojování částic a dimenzování strojních částí rozpojovacích strojů je nezbytné nalezení vztahů mezi spotřebou energie a dosaženým výsledkem rozpojování.

Vzhledem k složitosti problematiky určení vnitřních sil a jejich velikosti u reálných materiálů a přes řadu hypotéz pro stanovení potřebného množství rozpojovací práce není problematika determinace velikosti energie řešena uspokojivě.

Rozpojovací práce závisí na:

-rozpojitelnosti materiálu,

- zrnitostním složení vstupního materiálu
- na stupni rozpojení i
- na tvaru zrna (štěpnosti)

Přibližné určení velikosti potřebné rozpojovací práce však dovoluje stanovit hypotézy:

- **Kickova** (Kirpičevova) **hypotéza** (objemová) pro primární a sekundární drcení
- **Rittingerova hypotéza** (povrchová) pro jemné drcení a mletí
- **Kick-Standlerova hypotéza**
- **Bondova hypotéza**

3.3.1 Kickova hypotéza (objemová)

Hypotéza je založena na předpokladu, že **deformační práce při rozpojování je rozhodující položkou spotřeby energie** (zveřejnění teorie v r. 1885). Podle této hypotézy je práce potřebná k rozpojení pevných částic přímo úměrná objemu vstupního materiálu. K odvození základních vztahů se používá **Hookův zákon**, i když tento platí pro oblast pružných deformací.

Základní vztah pro Hookův zákon pro oblast pružných deformací:

$$\sigma = \varepsilon . E = \frac{F}{S} \tag{3.3}$$

Poměrná deformace je definována:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta U}{U} \tag{3.4}$$

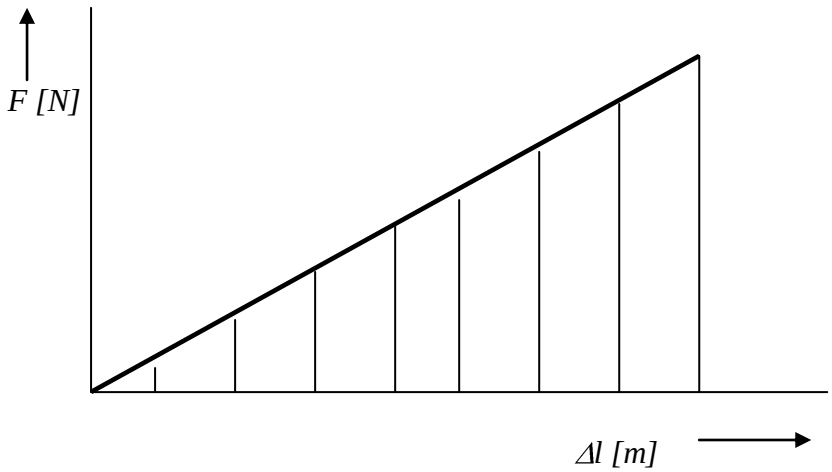
kde

σ- mez pevnosti materiálu v tlaku [Pa]
E- modul pružnosti v tlaku [Pa]
ε- poměrná deformace [-]
F- síla způsobující deformaci [N]
S- průřez materiálu [m^2]
Δl-deformace [m], ΔU-deformace částice [m]
l- rozměr částice [m], U-velikost počáteční částice [m]

Po úpravě dostáváme Hookův zákon ve tvaru:

$$\frac{F}{S} = E . \frac{\Delta l}{l} \rightarrow \Delta l = \frac{F . l}{E . S} \tag{3.5}$$

Deformační práce je přímo úměrná působící síle dle obr. č. 3.1.



Obr. č. 3.1. Deformace v závislosti na působící síle

Potřebná deformační práce je dána vztahem:

$$W_k = \frac{1}{2}.F.\Delta l = \frac{1}{2}.F.\frac{F.l}{E.S} \qquad (3.6)$$

Dosadíme-li vztah F=σ.S do vztahu (3.6) dostaneme:

$$W_k = \frac{1}{2}.\frac{\sigma^2.S^2.l}{E.S} = \frac{\sigma^2}{2.E}.V \qquad (3.7),$$

kde $V=S.l$ je objem částice

Práce potřebná k k rozdrcení jednotkového objemu:

$$w_k = \frac{\sigma^2}{2.E} \qquad [J.m^{-3}] \ (3.8)$$

Hodnoty meze pevnosti σ a modulu pružnosti v tlaku E jsou běžně používané hodnoty v nauce o pružnosti a pevnosti materiálu a je možné je experimentálně stanovit. **Kickova hypotéza je založena na faktu velikosti deformační práce při procesu rozpojování materiálu**, ovšem neuvažuje ostatní energetické položky (práce potřebná na zvětšení povrchu, ztráty třením apod.). **Hypotéza nebere v potaz závislost výsledku rozpojování částic na spotřebě energie**.

Materiál:	**σ [MPa]**	***E* [GPa]**
Žula	160	55
Čedič	260	77
Vápenec	110	75
Křemen	240	60
Černé uhlí	7-24	0,67-3,2
Andezit	210	23
Železná ruda	100-150	72
Břidlice	115	15
Pískovec	75	40

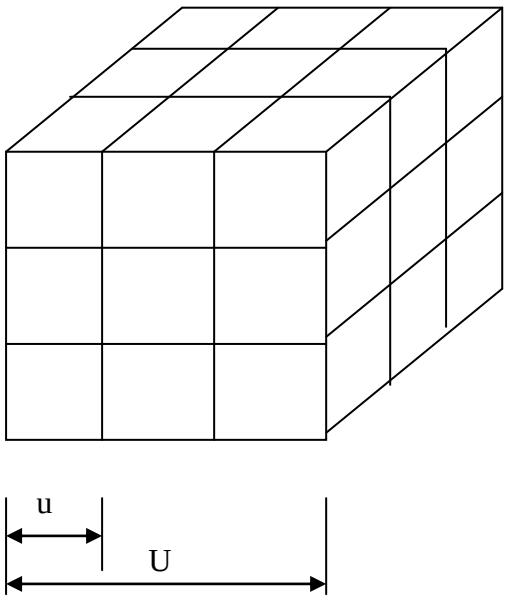
Tab. č. 3.3. Materiál a hodnoty meze pevnosti σ a modulu pružnosti v tlaku E

3.3.2 Rittingerova hypotéza (povrchová)

Rittingerova hypotéza patří mezi jednou z nejstarších metod a předpokládá, že práce spojená s rozpojováním materálu je úměrná zvětšením povrchu při samotném procesu rozpojování.

Řešený příklad

Odvození nově vzniklého povrchu je provedeno na krychli představené velikosti částice U, kde předpokládáme podrcení stupněm i na velikost částice u po drcení.



Původní povrch $S=6.U^2$

Pro *i=3*

Nově vzniklý povrch: $S'=(6+12).U^2=18.U^2$

Pro *i=4*

Nově vzniklý povrch: $S'=24.U^2$

Pro *i=5*

Nově vzniklý povrch: $S'=30.U^2$

Počet dílčích rovin:

$$\left(\frac{U}{u}-1\right).3$$

Počet nových ploch:

$$\left(\frac{U}{u}-1\right).3.2$$

Pro *i=10*

$$U=10 \rightarrow S=6.U^2=600$$

$$u=1, i=10 \rightarrow S'=6.(10-1).10^2=5400$$

Zajímavost k tématu

U krychle roste povrch $\left(\frac{U}{u}-1\right)$, u koule $\left(\frac{D}{d}\right)$ (3.9)

Výklad

Při stanovení hypotézy rozdělíme krychli o hraně „U“ na menší krychle o hraně „u“. **Nově vzniklý povrch je dán:**

$$S'=3.2.\left(\frac{U}{u}-1\right).U^2=6.\left(\frac{U}{u}-1\right).U^2 \quad [J] \quad (3.10)$$

Označíme-li měrnou práci potřebnou pro vytvoření jednotky nově vzniklého povrchu $w_{r'}$ $[J.m^{-2}]$, pak **práce pro vytvoření nové plochy**:

$$W_R=w'_r.S'=6.w'_r.\left(\frac{U}{u}-1\right).U^2 \quad [J] \quad (3.11)$$

Práce potřebná k rozpojení hmotnostní jednotky materiálu:

$$w_r = \frac{W_R}{\rho.U^3} = \frac{6.w'_r}{\rho.U}.\left(\frac{U}{u} - 1\right) \qquad [\mathrm{J.kg^{-1}}] \qquad (3.12)$$

Praktické pokusy neprokazují obecnou platnost Rittingerovy hypotézy. Energie potřebná k rozpojování není úměrná pouze nově vzniklému povrchu, ale je nutno vzít v potaz, že určitá část energie se spotřebuje na deformaci částic a na překonávání tření mezi částicemi atd. Tyto energetické ztráty hypotéza nebere v potaz.

Obě uvedené hypotézy nevystihují v plném rozsahu všechny fyzikální děje, které ovlivňují spotřebu energie při rozpojování. **Tyto teorie lze považovat za teorie, které objasňují hlavní principy mechanismu rozpojování** a určují zásadní energetické požadavky na rozpojování.

Při praktickém srovnání těchto teorií bylo zjištěno, ž povrchová teorie vyhovuje drobnému rozpojování (střední a jemné drcení, mletí), přičemž vzniká velký povrch. Objemová teorie dává přesnější výsledky při hrubém rozpojování.

Zajímavost k tématu

Rozpojitelnost (drtitelnost, melitelnost) se liší i u materiálu ze stejné lokality. Hodnoty rozpojitelnosti se získávají zkouškami různých materiálů na stejném stroji a porovnávají se s rozpojitelnosti *diabasu*.

3.3.3 Kick-Standlerova hypotéza

Kick-Standlerova hypotéza doplňuje Kickovou hypotézu a to z pohledu stupně rozpojení. Hypotéza bere v potaz, že účinkem práce W_k u Kickovy hypotézy dochází k rozpadu zrn se stupněm rozpojení i=2, to znamená, že roste-li stupeň rozpojení i řadou geometrickou, roste spotřeba práce řadou aritmetickou.

Pro i=n tý stupeň rozpojení platí

$$i = 2^n \qquad W = n.W_k \qquad (3.13)$$

Odtud plyne

$$i = 2^{(W/W_k)} \rightarrow \tan i = \frac{W}{W_k}.\tan 2 \qquad (3.14)$$

Úpravou získáme

$$W = \frac{W_k}{\tan 2}.\tan i = w'_{KS}.\log\frac{U}{u} \qquad (3.15), \text{ kde}$$

$$w'_{KS} = \frac{w_k}{\tan 2} = 1,443.w_k \qquad (3.16)$$

Práce potřebná k rozpojení hmotnostní jednotky:

$$w_{KS=}w'_{KS}.\tan\frac{U}{u}.\frac{1}{\rho} = 1,443.\frac{\sigma^2}{2E}.\tan\frac{U}{u}.\frac{1}{\rho} \qquad (3.17)$$

$$w_{KS=}0,721.\frac{\sigma^2}{E.\rho}\tan\frac{U}{u} \qquad [J.kg^{-1}] \qquad (3.18)$$

Jedná se o objemovou hypotézu upravenou předpokladem stupně drcení i=2. Může být aplikována pouze na rozpad ideálně homogenních těles.

Za předpokladu srovnání s Kickovou hypotézou:

$$w_{K=}0,5.\frac{\sigma^2}{E.\rho} \qquad [J.kg^{-1}] \qquad (3.19)$$

3.3.4 Bondova hypotéza

Bondova hypotéza (zveřejněna v r. 1952) vychází z předpokladu, že v první fázi rozpojování je energie úměrná objemu tělesa (U^3), v závěru rozpojování je potřebná energie úměrná nově vznikajícímu povrchu (U^2).

Pro střední drcení platí:

$$W = W_D + W_P = k_o.\sqrt{U^3.U^2} = k_o.U^{2,5} \qquad (3.20)$$

Potřebná práce pro *Q[t]* o počtu *N* zrn o rozměru *U* při stupni drcení *i*

$$W_Q = k_o.U^{2,5}.N = k_o.U^{2,5}.\frac{Q}{\rho.U^3} = k_B.\frac{Q}{\sqrt{U}} \qquad (3.21)$$

Množství drtící práce potřebné pro rozdrcení jednoho zrna při určitém stupni drcení:

Kick $W_K = k_k.U^3$ pro malý stupeň drcení

Bond $W_B = k_o.U^{2,5}$ pro střední stupeň drcení

Rittinger $W_R = k_R.U^2$ pro vysoký stupeň drcení

Obecně:

$W = k_P.U^m$ kde m=2-3

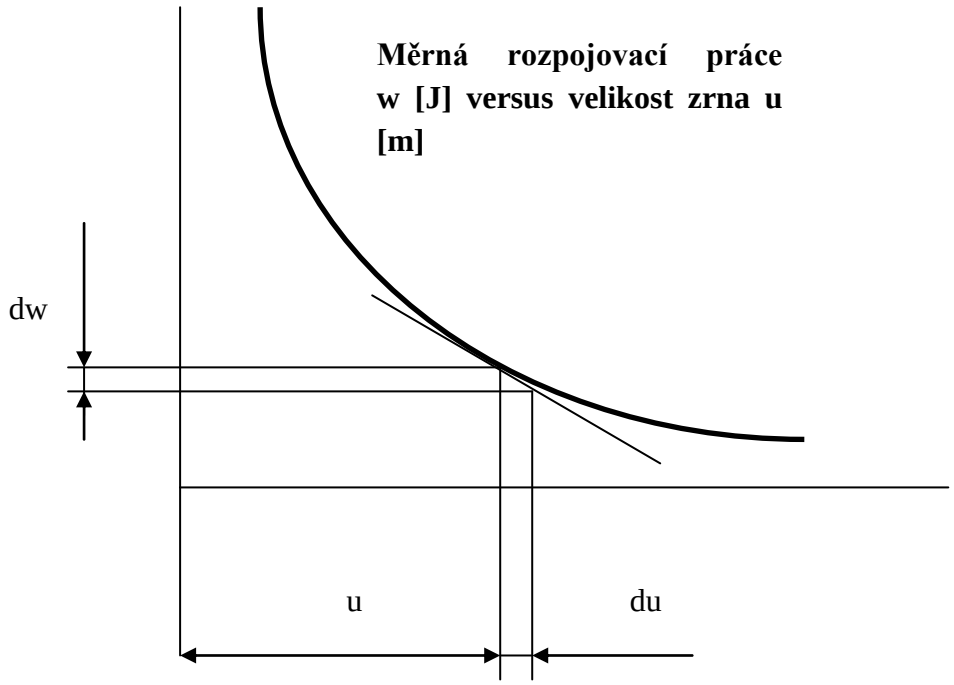
3.4 Obecná diferenciální rovnice rozpojování

Charlesova rovnice rozpojování (zveřejněna v r. 1957) zahrnuje všechny známé teorie a zobecňuje tyto rovnice rozpojování.

Charlesova rovnice je definována změnou měrné rozpojovací práce w v závislosti na velikosti zrna u, platí tedy:

$$dw = -C.\frac{du}{u^m} \qquad (3.22), \text{ kde}$$

w-měrná rozpojovací práce
u-rozměr částic
C-konstanta úměrnosti
m-exponent



Obr. č. 3.2. Měrná rozpojovací práce w v závislosti na velikosti částice u

Kickova hypotéza, m=1

$$dw = -C.\frac{du}{u}$$

$$w = -C.\int_u^U \frac{du}{u} = -C.\ \ln u\ \Big|_u^U$$

$$w = -C.\ \ln U - \ln u\ = -C.\ln\frac{U}{u}$$

$$w = -C.\ln\frac{U}{u} = C.\ln\frac{u}{U} \qquad (3.23)$$

Rittingerova hypotéza, m=2

$$dw = -C.\frac{du}{u^2}$$

$$w = -C.\int_u^U u^{-2}.du = C.\left[\frac{1}{u}\right]_u^U$$

$$w = C.\left(\frac{1}{U} - \frac{1}{u}\right) \qquad (3.24)$$

Bondova hypotéza, m=3/2

$$dw = -C.\frac{du}{u^{3/2}}$$

$$w = -C.\int_u^U u^{-3/2}.du = 2.C.\left[\frac{1}{u^{1/2}}\right]_u^U$$

$$w = 2.C.\left[\frac{1}{\sqrt{u}}\right]_u^U = 2.C.\left(\frac{1}{\sqrt{U}} - \frac{1}{\sqrt{u}}\right) \qquad (3.25)$$

Konstanta C charakterizuje pevnost materiálu a obecně vlastnosti rozpojeného materiálu, kdežto exponent m je závislý na druhu dodávané energie (povrchová, deformační apod.).

Jak již bylo zdůrazněno v předešlých odstavcích, hypotézy neumožňují praktické použití, protože jednak nelze dosáhnout stavu, aby se dodával jen určitý druh energie a nutno zdůraznit, že vstupní a výstupní materiál je vždy polydisperzní.

Shrnutí pojmů z kapitoly 3.3 a 3.4

Existují 4 nejdůležitější hypotézy drcení-**Kickova** objemová **hypotéza** (práce potřebná k rozpojení pevných částic přímo úměrná objemu vstupního materiálu), **Rittingerova** povrchová **hypotéza** (práce spojená s rozpojováním materálu je úměrná zvětšením povrchu při samotném procesu rozpojování), **Kick-Standlerova hypotéza**, která bere v potaz, že účinkem práce W_k u Kickovy hypotézy dochází k rozpadu zrn se stupněm rozpojení i=2, to znamená, že roste-li stupeň rozpojení i řadou geometrickou, roste spotřeba práce řadou aritmetickou a **Bondova hypotéza** (v první fázi rozpojování je energie úměrná objemu tělesa (U^3), v závěru rozpojování je potřebná energie úměrná nově vznikajícímu povrchu (U^2)).

Tyto hypotézy lze definovat pomocí **obecné diferenciální rovnice rozpojování** se základním vztahem $dw = -C.\frac{du}{u^m}$ pro relaci měrné energie do procesu rozpojování projevující se změnou granulometrie materiálu u za předpokladu materiálové konstanty úměrnosti C .

Otázky ke kapitole 3.3 a 3.4

1. Definujte nejzákladnější teorie rozpojování
2. Jak se tyto teorie od sebe liší?
3. Vyjádřete Bondovu hypotézu v rámci obecné diferenciální rovnice rozpojování.

4 DRTÍCÍ STROJE

Čas ke studiu: 3 hodiny

Cíl: Po prostudování této kapitoly budete umět

- Rozlišit základní mlecí a drtící stroje
- Určit kapacitu mlecího a drtícího stroje

Výklad

Drcení (rozpojování) je velice energeticky náročný proces, což vyplývá také z obr. č. 3.2, kde je zřejmý enormní nárůst měrné drtící práce v závislosti na vstupní a požadované velikosti drceného materiálu. Kromě toho je stále více patrný vliv interpartikulárních sil zvláště u jemných a superjemných materiálů velikosti mikrometrů (obr. č. 4.1).

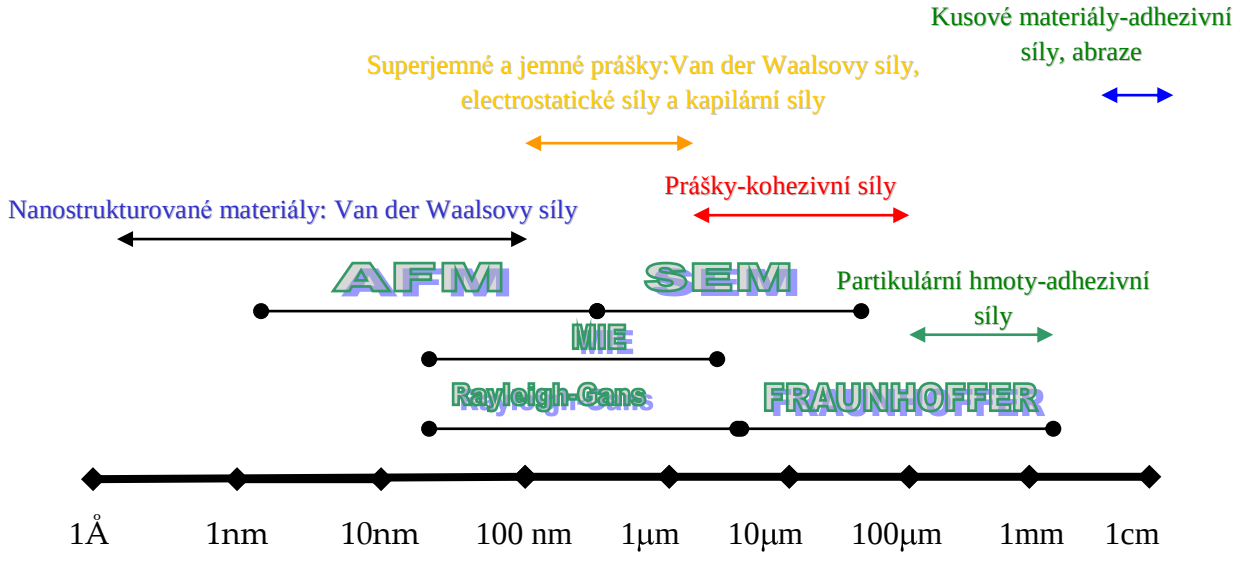
U kusovitých materiálů (cca 2 mm a více) a partikulárních materiálů (100 μm-3 mm) jsou důležité adhezivní síly způsobující abrazi, kdežto u prášků (1 μm-100 μm) jsou dominantní kohezivní síly z pohledu interpartikulárních interakcí. Elektrostatické, kapilární a Van der Waalsovy síly jsou typické pro jemné a superjemné částice (100 nm-1 μm) a mají vliv na výsledek samotného procesu rozpojování. Samostatnou kapitolu tvoří nanopartikulární a nanostrukturované materiály (1Å-100 nm), kde převládají Van der Waalsovy přitažlivé a odpudivé síly závisející na vzdálenosti obou částic (partikulí).

Rozpojování kusovitých a partikulárních materiálů je realizovatelné běžnými typy primárních a sekundárních drtičů (čelisťový a kuželový drtič, válcový drtič apod.), kdežto práškové materiály je nutné rozpojovat speciálními typy mlecích zařízení (viz také Tab. 3.1) s mlecími tělísky (kulový mlýn, perlový mlýn apod.). Mletí materiálu pod cca 2-5 μm je velice obtížné běžnými dostupnými suchými technologiemi, protože dochází k automatickému spojování materiálu vlivem Van der Walsových přitažlivých sil, proto je nutné použít pro mletí médium pro separaci částic.

Zajímavost k tématu

1 Ångström Units (Å)=0,0001μm.

Vlivem zmiňovaných Van der Waalsových sil dochází ke spojování podrcených částic s velikosti okolo 5-10 μm při zpracování částic suchou cestou. Z tohoto důvodu při drcení pod tuto velikost (perlový mlýn, kap. 4.6) používáme další separační procesní postupy (např. unášecí médium apod.).



Obr. č. 4.1 Částicové systémy a jejich interpartikulární síly. Metody identifikace velikosti částic

Výklad

Další způsob mletí pod 1 µm je možné pouze speciálními nejmodernějšími technologiemi spojujících několik mechanizmů mletí zároveň -např. **mletí vodním paprskem –Water Jet Mill** (mletí se střední částicí okolo 80 nm), kde se degradace materiálu uplatňuje 3 metodami:

- **rázem** při rychlostech paprsku okolo 800 m.s^{-1} na terčík z wolframu,
- **kavitací** bubliny při této rychlosti na povrch částice a
- **obrovskými smykovými silami** při této rychlosti.

4.1 Rozdělení a použití drtících a mlecích strojů

Nejběžnějšími stroji pro primární drcení materiálu jsou **čelisťové a kladivové nebo rázové drtiče, kuželové drtiče (nejčastěji typ Symons)** a pro sekundární a terciální drcení **kuželové drtiče** (tupoúhlé) **a válcové drtiče.** Pro mletí a velmi jemné mletí se používají **kulové a perlové typy mlýnů** s tělísky a s médiem pro zaručenou separaci mletých částic.

Čelisťové drtiče

Tyto typy drtičů jsou primárně určeny pro primární a sekundární hrubé drcení materiálu v celém jeho rozsahu s maximálním kompresním tlakem 320 MPa. Základní typy drtičů využívají Rawoltova řešení doplněného licencí Kobe a Kue Ken.

Kladivové a úderové drtiče

Kladivové a úderové drtiče jsou určeny pro drcení materiálu materiálu v celém jeho rozsahu s maximálním kompresním tlakem 360 MPa a max. kusovitostí 500 mm. Vyznačují se výslednou kubickou strukturou podrceného materiálu.

Válcové drtiče

Jsou vhodné pro drcení materiálu středně hrubého až jemného a to pro všechny typy materiálu Válcové drtiče patří mezi konstrukčně jednouché drtiče s max. kompresním tlakem až 8,3 MPa pro mechanické tlaky a s tlakem až 200 MPa pro hydraulickou konstrukci tlaku válců. Max. kusovitost až 500 mm, nižší hmotnost oproti výkonnostně stejným typům drtičů.

Kuželové drtiče

Drtiče jsou vhodné pro rozpojování středních až velkých částic pro první stupeň zmenšování částic při zpracování rudnin, kameniva a štěrku. Výkon drtiče je do 1000 t/hod a je používán především pro vysoký stupeň rozpojování v rámci sekundárního drcení.

Kuželový drtič je vhodný pro sekundární a terciální drcení pro instalovaný výkon cca 300 kW. Je vhodný pro hrubé drcení materiálu s konfigurací pro jemné mletí. Nejčastěji používané drtiče typu Symons vyznačující se dokonalou těsností systému a originálním způsobem konstrukce a mazání.

Kulový mlýn

Kulový mlýn je určen pro mletí až do velikostí prášků s velikostí vstupního zrna pod 25 mm. Výstupní granulometrie od 0,074 –1 mm (průmyslové mletí) při drtícím výkonu od 0,8 až 260 t/h pro suché mletí a pro mletí v médiu je možná velikost výstupní frakce pod 1μm (laboratorní použití). Výkon elektromotoru až 1800 kW.

Perlový mlýn

Perlový mlýn je určen pro horizontální nebo vertikální mletí zrn mokrou cestou do submikronové oblasti (existuje i varianta suchého mletí) v uzavřeném oběhu. Objem média se pohybuje v rozmezí od 1,2 do 75 l, výkon motoru je od 5,5 do 250 kW.

4.2 Kuželový drtič

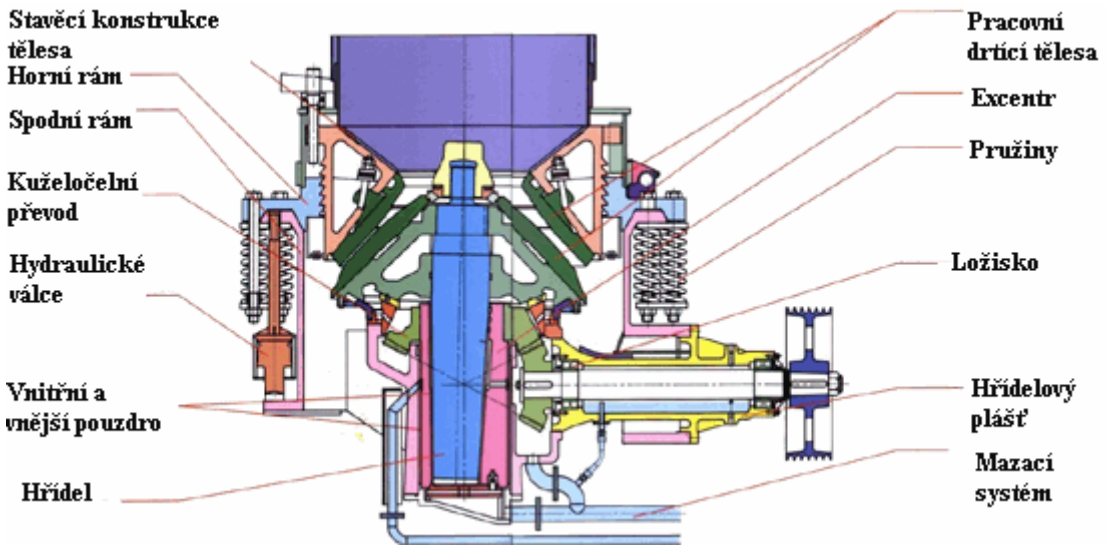
Je vhodný pro sekundární drcení při drcení v oběhovém drtícím systému pro těžené materiály, ve stavebnictví, v průmyslu apod. (ruda, měď, vápenec, křemen, atd.). Vstupní zrno je obvykle velké max. 500 mm. Systém drcení je založen na drcení vstupního materiálu mezi vnitřním tělesem drtiče a vertikálně se otáčejícím drtícím kuželem (viz. obr. č. 4.2 pracovní drtící tělesa, obr. č. 4.4). Kužel je uložen na hřídeli ve vedení excentricky, tudíž není vždy stejně velký drtící meziprostor mezi kuželem a tělesem drtiče. Kromě toho lze regulací vyosení kužele nastavovat velikost granulometrické frakce výstupního zrna. Konstrukčně je krouticí moment na drtící kužel přenášen od elektromotoru přes řemenový a kuželočelní převod.

Tyto typy drtičů jsou charakteristické kapacitou od 60 do 1000 t/h (příp. až 1300 t/h), přičemž vstupní zrno je v rozmezí 18-280 mm a výstupní od 0 po 119 mm, výkon

elektromotoru až 300 kW. Průměr kužele obvykle až max. 2200 mm. Stupeň drcení i=6 až 10 závisí na tvaru mlecího kužele (obr. č. 4.3).

Mezi nejdůležitější přednosti drtiče patří možnost hydraulického nastavení polohy drtícího kužele a tím vynikající regulace velikosti výstupního zrna, vysoká produktivita, dlouhá životnost, jednoduchá údržba a vynikající poměr mezi cenou a kapacitou drcení.

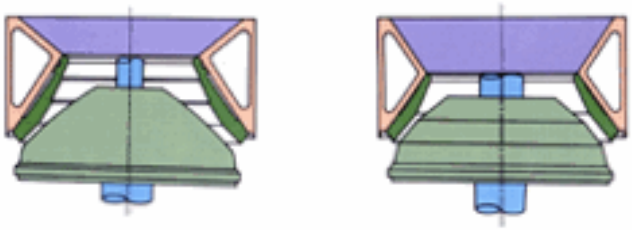
í



Obr. č. 4.2 Základní konstrukce kuželového drtiče

Zdroj: Westpro Machinery Inc.

Dostupný z: http://www.westpromachinery.com/p_cone.htm (4.7.2011)



a) *b)*

Obr. č. 4.3 Základní typy tvaru kužele a tělesa

a) hrubé drcení materiálu-ostroúhlý drtič b) pro jemné drcení-tupoúhlý drtič

Zdroj: Westpro Machinery Inc.

Dostupný z: http://www.westpromachinery.com/p_cone.htm (4.7.2011)

Obr. č. 4.4 Kuželový drtič Symons

Zdroj: SBM Cone Crusher

Dostupný z :http://www.iconecrusher.org/conecrusher/symons-cone-crusher.html (4.7.2011)

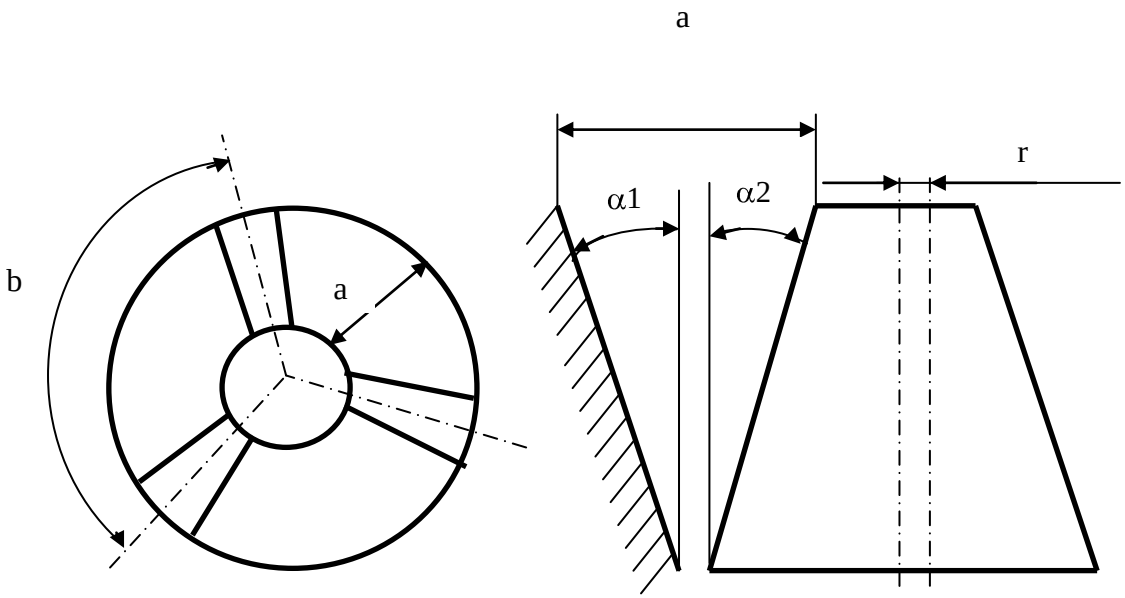
4.2.1 Základní parametry ostroúhlých kuželových drtičů

Aplikujeme úvahy pro čelisťové drtiče.

Hlavní parametry a rozměry:

Rozměry tlamy:

-šířka „a“ a délka oblouku mezi rameny „b“



Obr. č. 4.5 Základní parametry čelisťového drtiče

Stupeň drcení:

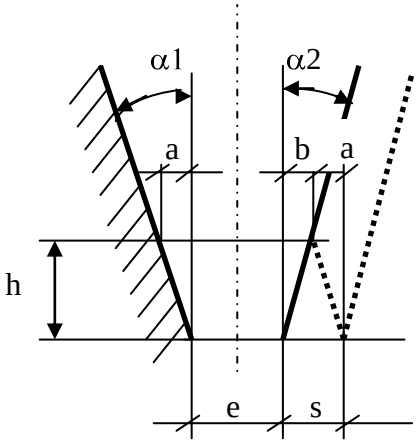
$$i = \frac{U}{u} = 5 \div 6 \tag{4.1}$$

Vtahovací úhel (viz. obr. č. 4.5) (odvození viz. vztah 4.45):

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 < 2.\delta \tag{4.2}$$

Optimální počet otáček drtícího kužele

Výpočet optimálního počtu otáček je určován za stejných předpokladů jako u čelisťových drtičů-předpoklad podrcené zrno má rozměr e+s a musí propadnout za stejnou dobu ½ otáčky drtiče.



č. 4.5 Odvození otáček drtícího kužele

Dle obrázku č. 4.5

$$h = \frac{a}{\tan\alpha_1} = \frac{b}{\tan\alpha_2}$$

$$h = \frac{s-a}{\tan\alpha_2} = \frac{s - h.\tan\alpha_1}{\tan\alpha_2}$$

$$h = \frac{s}{\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2} \tag{4.3}$$

Za předpokladu, že rozměr s=2.r, kde r-excentricita uložení vnitřního kužele a dráha volného pádu zrna $h = \frac{1}{2}.g.t^2$ a $t = \frac{1}{2}.\frac{60}{n} = \frac{30}{n}$, pak dostaneme upravený vztah (4.4)

$$\frac{s}{\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2} = \frac{1}{2}.g.\frac{30^2}{n^2}, \text{ odtud}$$

$$n = \sqrt{\frac{900.g.(\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2)}{2.s}} = 66{,}45.\sqrt{\frac{\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2}{s}} \qquad (4.4)$$

Hodinová kapacita drcení

Za jednu otáčku vypadne objem daný průřezem:

$$s = \frac{1}{2}.[.h + (e + s).h] = \frac{1}{2}.(e + s).h = \frac{1}{2}(e + s).\frac{s}{\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2} \qquad (4.5)$$

Těžiště průřezu opisuje kruh o průřezu D' a objem za jednu otáčku drtiče

$$V_1 = \frac{1}{2}(e + s).\frac{s}{\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2}.\pi.D'.\psi \qquad (4.6),$$

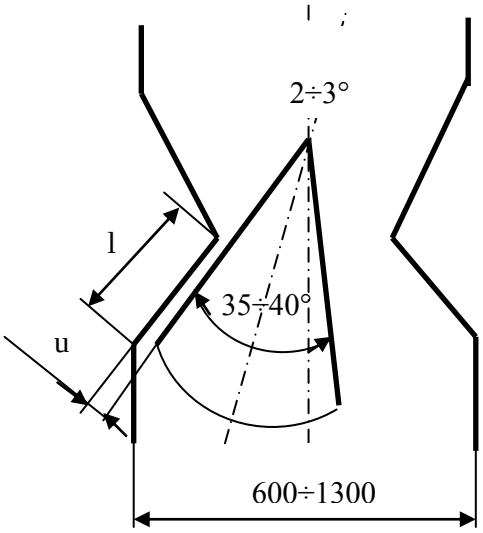
kde ψ-koeficient respektující zpoždění materiálu ψ=0,5 až 0,6

Hodinová kapacita drcení

$$V = V_1.n.60 \qquad (4.7)$$

4.2.2 Výpočet drtiče Symons

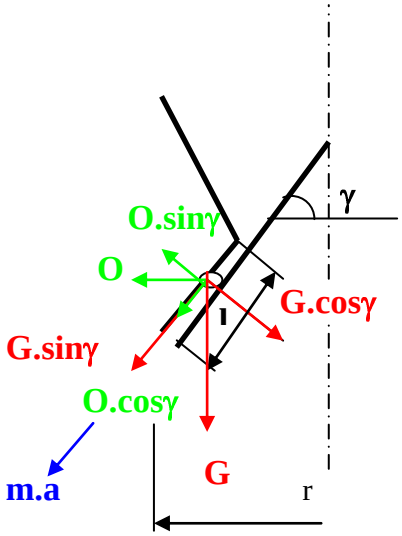
1) Průměr vnějšího drtícího kužele D (cca 1200 mm)
2) Úhel naklonění osy vnitřního kužele k ose vnějšího kužele β=2 až 3°
3) Úhel povrchové přímky vnějšího spodního kužele Φ=38 až 41°



Obr. č. 4.6 Základní parametry drtiče Symons

Určení počtu otáček

Optimální počet obrátek se určuje z podmínky, že čas jedné otáčky musí být menší než čas průchodu zrna rovnoběžným drtícím prostorem (kalibrační prostor).



Obr. č. 4.7 Určení počtu otáček ze silové rovnováhy drceného zrna

Aby nebylo zrno odstředivou silou odhazováno z povrchu kužele, musí platit:

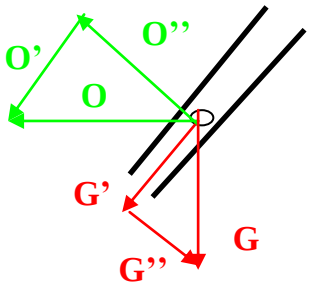
$$m.g.\cos\phi \geq m.\omega^2.r.\sin\phi \qquad (4.8)$$

$g.\cot g\phi \geq \omega^2.r$, odtud poloha těžiště od osy otáčení

$$r \leq \frac{g.\cot g\phi.900}{\pi^2.n^2}$$ a po úpravě

$$r \div \frac{900}{n^2}.\cot g\phi \qquad (4.9)$$

Pohyb zrna v drtiči (obr. č. 4.8)



Obr. č. 4.8 Detailní analýza odstředivé a gravitační síly zrna

Pohyb zrna po povrchu kužele je rovnoměrně zrychlený

$$l = \frac{1}{2}.a.t^2 \qquad (4.10)$$

Zrychlení plyne z rovnováhy sil

$$a.m = G' + O' - (G'' - O'').f$$

Maximální zrychlující síla nastane při $G'' = O''$

$a.m = G.\sin\phi + m.r.\omega^2.\cos\phi$, odtud

$$a = g.\sin\phi + r.\omega^2.\cos\phi \qquad (4.11)$$

Má-li mít rozdrcené zrno stejnoměrnou velikost musí platit:

$$t \geq \frac{60}{n} \qquad (4.12)$$

Dosazením vztahů (4.11) a (4.12) do (4.10)

$$l = \frac{1}{2}.a.t^2 = \frac{1}{2}.(g.\sin\phi + r.\omega^2.\cos\phi).\frac{60^2}{n^2} \qquad (4.13)$$

Dosazení vztahu (4.9) do (4.13)

$$l = \frac{1}{2}.\left(g.\sin\phi + \frac{900}{n^2}.\omega^2.\frac{\cos^2\phi}{\sin\phi}\right).\frac{60^2}{n^2}$$

a za předpokladu, že $\omega = \frac{\pi.n}{30}$, kde n [min^{-1}], pak

$$l = \frac{1}{2}.\left(g.\sin\phi + \frac{900}{n^2}.\frac{\pi^2.n^2}{30^2}.\frac{\cos^2\phi}{\sin\phi}\right).\frac{60^2}{n^2} \qquad (4.14)$$

Při zjednodušení $g \div \pi^2$ a úpravě vztahu (4.14)

$$l = \frac{9{,}81}{2}.\left(\frac{\sin^2\phi + \cos^2\phi}{\sin\phi}\right).\frac{60^2}{n^2} = \frac{10}{2}.\frac{1}{\sin\phi}.\frac{60^2}{n^2}$$

a po úpravě

$$n = 133.\sqrt{\frac{1}{l.\sin\phi}} \qquad [\text{min}^{-1}] \quad (4.15)$$

a za předpokladu Φ=40°, pak sinΦ=0,642

$$n = 2{,}76 \cdot \sqrt{\frac{1}{l}}$$ [min^{-1}] (4.16)

Hodinový výkon

Za jednu otáčku opustí drtič objem materiálu

$$V_1 = \pi . D_t . l . n . \psi$$ [cm^{-3}] (4.17)

kde

D_t-průměr kružnice, po níž se pohybuje těžiště průřezu l.n a ψ je koeficient zpoždění materiálu a zaplnění průřezu (ψ=0,4 až 0,6)

$$V = \frac{V_1 . n . 60}{10^6}$$ [m^3.hod^{-1}] (4.18)

Výkon elektromotoru

Podle Lipmannovy teorie se předpokládá, že jsou v drtiči současně drceny dvě řady kulových zrn.

Rozdrcený objem je dán rozdílem vstupního a výstupního objemu zrna:

$$V = V_1 - V_2$$

$$V_1 = \frac{\pi . D'}{U} . \frac{\pi . U^3}{6} + \frac{\pi . D''}{U_1} . \frac{\pi . U_1^3}{6}$$

$$V_2 = \frac{\pi . D_t}{u} . \frac{\pi . u^3}{6}$$

Potřebná práce k drcení materiálu

$$A = \frac{\sigma^2 . (V_1 - V_2)}{2 . E}$$ [kg.cm] (4.19)

Potřebná složka výkonu pro drcení

$$N_1 = \frac{A . n}{60.100.102}$$ [kW] (4.20)

a na odpory

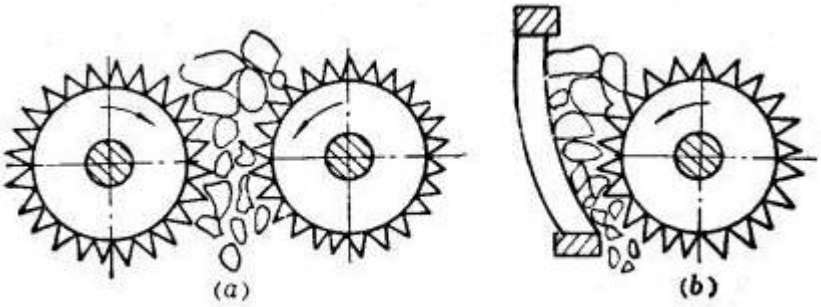
$$N_2 = (0{,}2 \div 0{,}3) . N_1$$

Celkový výkon

$$N = (1{,}2 \div 1{,}25) . \frac{N_1 + N_2}{\eta}$$ [kW] (4.21)

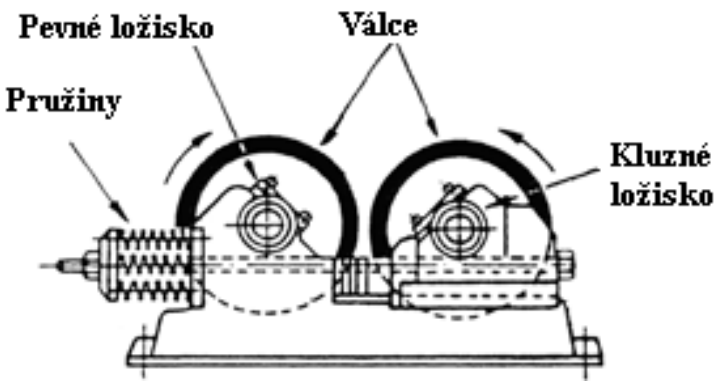
4.3 Válcový drtič

Válcový drtič (obr.č. 4.11) je vhodný pro drcení materiálu středně hrubého až jemného a to pro všechny typy materiálu od rudy po vytěžený horninový materiál až po různě středně tvrdé typy materiálu. Je vhodný zejména pro využití v chemickém průmyslu, cementářském průmyslu, ve stavebnictví atd. Válcový drtič patří mezi konstrukčně jednouché drtiče s max. kompresním tlakem až 8,3 MPa pro mechanické tlaky a s tlakem až 200 MPa pro hydraulickou konstrukci tlaku válců. Svou konstrukcí se skládá z jednoho nebo ze dvou paralelně umístěných válců, kteří se otáčejí proti sobě a tím vtahují do svého středu a drtí vstupní materiál. V případě použití jednoho válce je materiál vtahován mezi válec a základní těleso vnitřního prostoru konstrukce drtiče (viz. obr. č. 4.9). Válce jsou uloženy na pružinách nebo kombinace jeden pevný a druhý uložen pružně (obr.č.4.10), a velikost výstupního zrna je dána velikostí mezivtahovacího prostoru regulovanou těmito pružinami. Drtící proces je zcela nepřetržitý. Drtící výkon se pohybuje v rozmezí cca 5-1000 t/h, průměr válce od 400-2000 mm s max. vstupním zrnem pod 500 mm a výstupním zrnem od 2 do 30 mm (až 150 mm). Max. výkon elektromotoru je 200 kW. Stupeň drcení až 4-6. V porovnání s ostatními typy drtičů je při stejném výkonu o ½ až 1/3 lehčí. Tudíž vyniká nízkou spotřebou energie při samotném procesu drcení, nízkou hlučností a je šetrnější vůči životnímu prostředí.



Obr. č. 4.9 Základní mechanismy drcení b) jednováleového a a) dvouválcového drtiče

Dostupný z : http://www.dafumachine.com/roll_crusher.htm (4.7.2011)



Obr. č. 4.10 Uložení dvouválcového drtiče

Dostupný z: http://www.quarrying.org/r.html (4.7.2011)

Obr. č. 4.11 Válcový drtič

Zdroj: M and K Construction Supply, LLO.

Dostupný z http://www.mnksupply.com/equip.htm (4.7.2011)

Hlavní výhody válcových drtičů lze spatřit ve výstupní homogenizované struktuře bez jemných frakcí, nízkém opotřebení válců a možnosti regulovatelné nastavitelnosti velikosti výstupních frakcí materiálu.

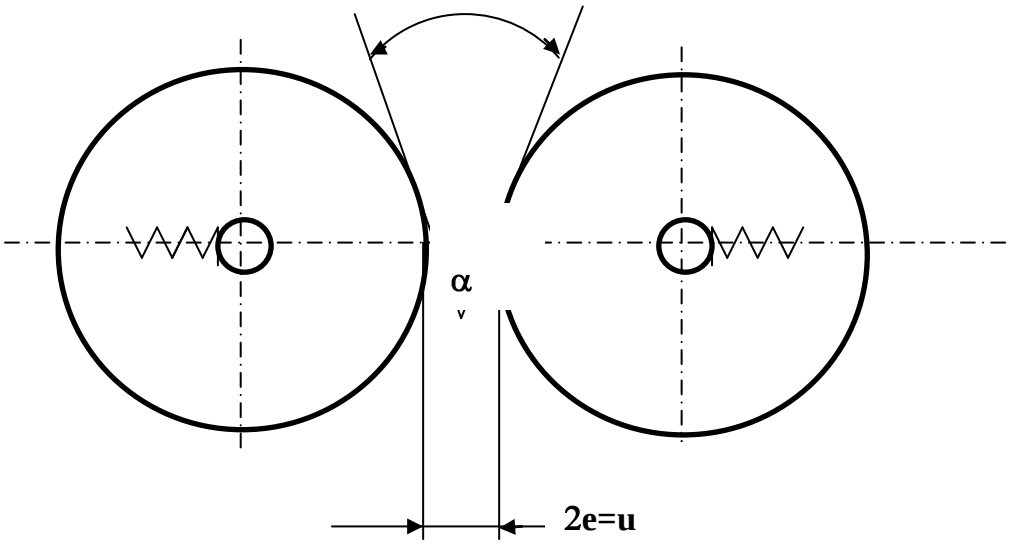
4.3.1 Parametry válcového drtiče

Empirické základní vztahy:

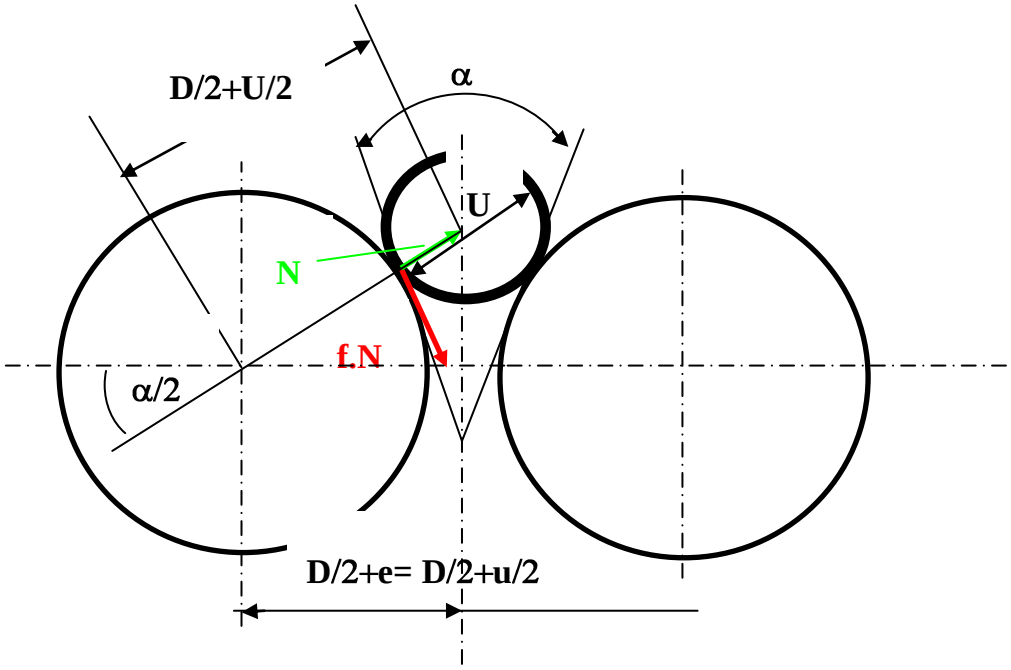
Průměr válce: D=1200 mm÷1500 mm (2000 mm) v závislosti na velikosti zrn

Délka válců: L/D=1/3÷2/3 dle tvrdosti drceného materiálu

Vtahovací úhel: α= max. 27°÷30° (uhlí)



Obr. č. 4.12 Válcový drtič



Obr. č. 4.13 Kalkulace vtahovacího úhlu

Za předpokladu, že e=u/2, tj. excentricita válce je rovna poloviční velikosti výstupního zrna u, pak platí z obr. č. 4.13,

$$\frac{D}{2}+\frac{u}{2}=\left(\frac{D}{2}+\frac{U}{2}\right).\cos\frac{\alpha}{2} \tag{4.22}$$

a po úpravě vztahu (4.22) dostáváme

$$\cos\frac{\alpha}{2}=\frac{D+u}{D+U} \tag{4.23}$$

Za předpokladu platnosti vztahu (4.1) a (4.2) po úpravě

$$\cos\frac{\alpha}{2}=\frac{D+U/i}{D+U} \tag{4.24}$$

$$D.\cos\delta+U.\cos\delta=D+\frac{U}{i} \tag{4.25}$$

Bereme-li v potaz, že koeficient tření mezi materiálem a válcemi f=(0,3 až 0,4) a stupeň drcení i=5 až 6, pak

$$D=(5\div 18)U \tag{4.26}$$

Při menším koeficientu tření musí být průměry válců větší a opačně.

Pro **otáčky** se udává empiricky Levensonův vzorec

$$n_{\max} \leq 308 \cdot \sqrt{\frac{f}{\gamma \cdot \frac{U}{2} \cdot \frac{D}{2}}} \qquad (4.27)$$

Obvodová rychlost se zpravidla pohybuje v mezích:

-pro hladké válce v=2,2 m.s^{-1}

-pro rýhované válce v=3 m.s^{-1} (až 5÷6) m.s^{-1}

Hodinový výkon se stanoví ze vztahu

$$V = 3600.2.e.L.v.\psi \qquad [\mathrm{m^3/h}] \quad (4.28),$$

kde ψ-koeficient zpoždění materiálu a zaplnění průřezu

ψ=0,2÷0,3 pro středně tvrdé materiály

ψ=0,5÷0,6 pro křehké a měkké materiály

Výkon motoru je dán prací potřebnou pro drcení materiálu a dále pak prací resp. odpory tření materiálu po válcích a tření v ložiskách domků válců.

Požadovaný objem při zpracování jedné řady zrn

$$V' = \frac{L}{U} \cdot \frac{\pi . U^3}{6} - \frac{L}{u} \cdot \frac{\pi . u^3}{6} \qquad (4.29)$$

Potřebná práce pro podrcení jedné řady zrn

$$A_1 = \frac{\sigma_2 . V'}{2.E} \qquad (4.30)$$

Za jednu otáčku bude celkem zpracováno řad materiálu

$$\frac{\pi . D'}{U} \qquad (4.31)$$

Spotřebovaná práce pro podrcení materiálu

$$A = \frac{\pi . D'}{U} . A_1 \qquad (4.32)$$

Potřebný drtící výkon

$$N_1 = \frac{A.n}{60.100.102} \qquad [\mathrm{kW}] \quad (4.33)$$

Výkon z tření mezi materiálem a válci

$$N_2 = (0,3 \div 0,35) . N_1 \qquad [\mathrm{kW}] \quad (4.34)$$

Tření v uložení je způsobeno výslednicí drtících sil vzrůstajících od 0 do max hodnoty a to na dráze:

$$s = U - u$$ (4.35), pak

$$A_1 = \frac{P.s}{2}$$ (4.36)

$$P = \frac{2.A_1}{s}$$ (4.37)

Potřebný výkon z čepového tření

$$N_3 = \frac{2.P.f_č.2.\pi.r_č.n}{60.100.102}$$ [kW] (4.38)

Celkový výkon motoru

$$N = \frac{N_1 + N_2 + N_3}{\eta}$$ [kW] (4.39)

Výkon na hřídelích válců:

$$N_{[\,]} = \frac{1}{18}.O.L.\varepsilon$$ [kW] (4.40), kde

O-obvod válce, O=π.D

L-délka válce

ε-spotřeba energie na 1 dm^3, je stanovena pokusem

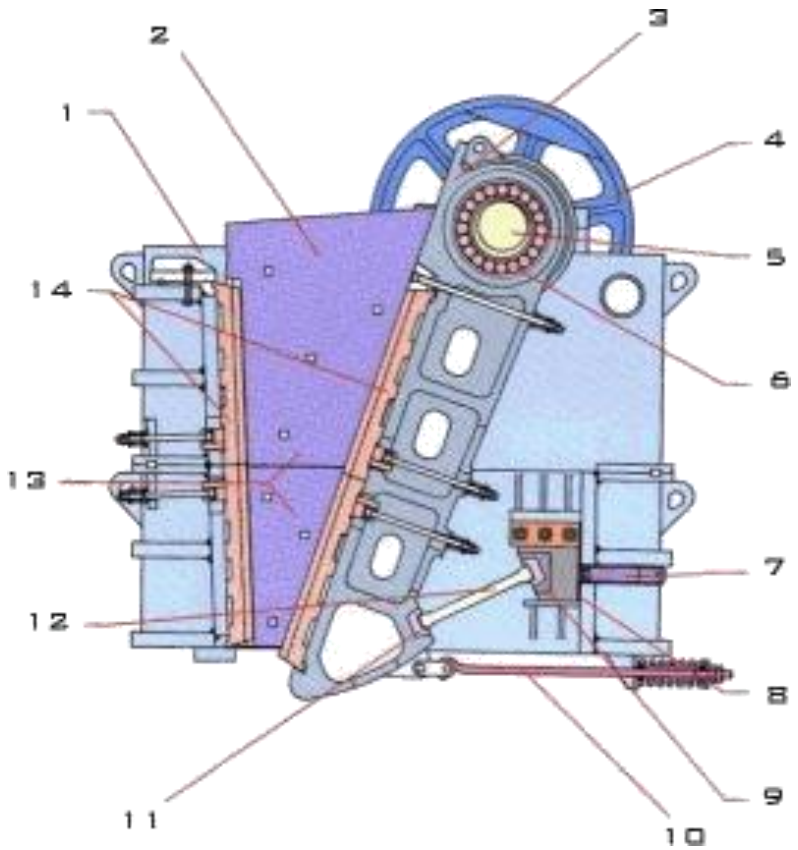
1/18-při α=20°, tzn. 2.α=40°

ε-pro černé uhlí a hnědé uhlí ε=1,5

ε-pro nejtvrdší kámen ε=2 až 2,2

4.4 Čelisťový drtič

Čelisťový drtič (obr. č. 4.14 a 4.16) je určen pro primární a sekundární drcení převážně suchého nebo mírně vlhkého materiálu pod kompresním tlakem do 320 MPa a používá se zejména v hornictví pro drcení a úpravě vytěženého materiálu, ve stavebnictví, při stavbě dálnic a železnic a také v chemickém průmyslu.



Obr. č. 4.14 Konstrukce čelisťového drtiče

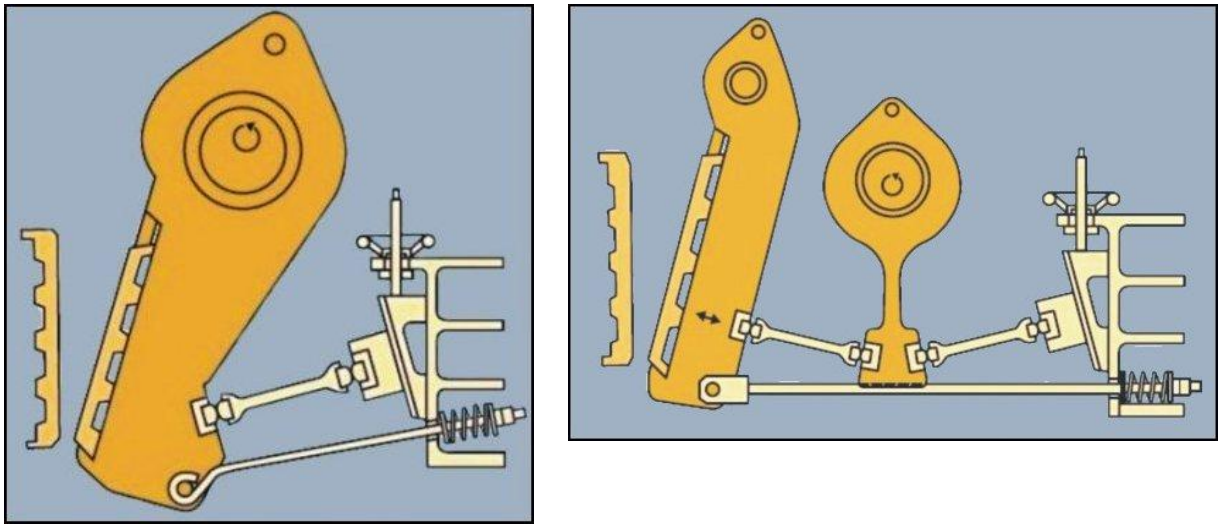
1. Pevný rám drtiče, 2. Drtící prostor, 3. Pohyblivá čelist včetně ložiska, 4. Setrvačník drtiče, 5. Excentrická hřídel drtiče, 6. Dvouřadé kuličkové samostředící ložisko, 7. Hydraulický válec, 8. Nastavovací podložky, 9. Uchycení pojistného prvku , 10.Vzpěrná tyč s pružinou, 11. Kotvení pojistného prvku, 12. Pojistný prvek, 13. Drtící plocha čelisti

Zdroj: WestPro Machinery Inc.

Dostupný z http://www.westpromachinery.com/p_jaw.htm (4.7.2011)

Princip drtiče je založen na přenosu kroutícího momentu od motoru přes buben na pohyblivou čelist pomocí excentrické hřídele (obr.č. 4.14). Přísun materiálu do drtiče je přes vibrační podávač a následně materiál padá do tělesa drtiče mezi pohyblivou čelist proti pevné čelisti (konstrukce půl V nebo V konstukce), při kterém dochází vlivem síly k drcení materiálu. Složka drtící síly nadzvedává materiál a materiál pak propadává snižující se štěrbinou mezi pevnou a pohyblivou čelistí. Pohyb materiálu je periodický v závislosti na otáčkách excentrické hřídele.

Systém drcení materiálu se realizuje především v horní části čelistí drtiče při pohybu excentrického hřídele v kloubu pohyblivé čelisti nebo v dolní části čelistí (pohyb se přenáší excentrem mimo čelist a dále se pak přenáší na spodní čelist, obr.č. 4.15).



a) b)

Obr. č. 4.15 Mechanismy drcení materiálu pomocí čelisťového drtiče
a) excentr umístěn v kloubovém uložení v horní části pohyblivé čelisti drtiče
b) excentr mimo čelist drtiče

Zdroj: Shailaum Machina Manufacturers Pvt Ltd.

Dostupný z http://www.crushermanufacturers.com/products/jaw-crushers.shtml (4.7.2011)

Hlavní výhody lze spatřovat ve velkém stupni drcení materiálu, velké možnosti nastavení velikosti a frakce výstupního zrna, relativně jednoduché, pevné a odolné konstrukci a jednoduchém způsobu mazání materiálových části drtiče včetně údržby a nízkých provozních nákladech. Nezanedbatelná je také nízká hladina hluku při procesu drcení a malá prašnost.

Kapacita výkonu kolísá od cca 5 do 800 t/h až 1300 t/h, s výkonem motoru od 15-220 kW. Rozměry vstupního otvoru čelisťového drtiče se pohybují od 400x250 mm až po cca 1200x 1500 mm. Vstupní a výstupní zrno má velikost od 200 mm - 20 mm pro malé výkony resp. 1020 mm –150 mm pro největší výkony. Rozměry drtičů jsou pro malé výkony cca 1500x 1500x 1500 mm až po max. výkony cca 4000x3000x3000 mm.

V dnešní době se klade velký důraz na bezpečnost drtícího procesu, zejména při ucpání prostoru mezi čelistmi a z toho důvodu se navrhují sofistikovanější řešení uvolnění mezičelistního prostoru při poruše resp. ucpání materiálem založeném na hydraulickém komorovém principu posunutí pohyblivé čelisti.

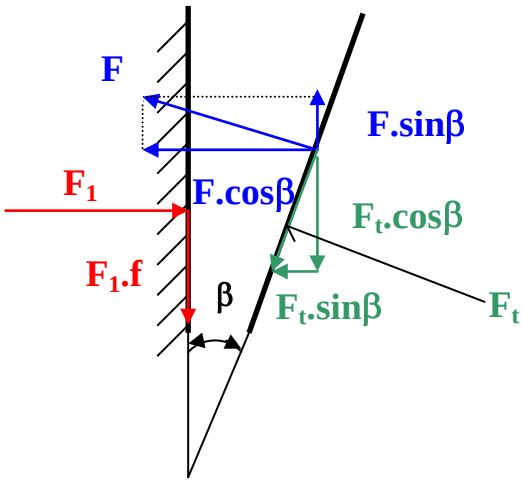
Obr. č. 4.16 Čelisťový drtič

Zdroj: HENAN LIMING ROAD AND BRIDGE HEAVY INDUSTRY CO., LTD.

Dostupný z http://www.limingjawcrusher.com/introduction.htm (4.7.2011)

4.4.1 Výpočet čelisťového drtiče

Výpočet čelisťového drtiče vychází z rovnováhy sil při samotném procesu drcení (obr.č. 4.17).



Obr. č. 4.17 Síly působící v jednočelisťovém drtiči

F – síla v místě dotyku se zrnem
F.cosβ– síla způsobující drcení
F.sinβ– síla nadzvedávající zrno
F_t- třecí síla mezi zrnem a pohyblivou čelistí, F_t=F.f
F_t.cosβ–svislá složka třecí síly
F_t.sinβ–vodorovná složka třecí síly
F_1–reakce pevné čelisti
F_1.f–třecí síla na pevné čelisti

Z podmínek rovnováhy sil v ose x a y

$$\sum F_{ix} = 0$$
$$\sum F_{iy} = 0$$

Rovnováha sil v ose x:

$$F_1 - F.\cos\beta - F_t.\sin\beta = 0 \qquad (4.41)$$

Rovnováha sil v ose y:

$$F.\sin\beta - F_t.\cos\beta - F_1.f = 0 \qquad (4.42)$$

Úpravou rovnice (4.41)

$$F_1 = F.\cos\beta + F.f.\sin\beta = F.(\cos\beta + f.\sin\beta) \qquad (4.43)$$

Dosazením (4.43) do (4.42)

$$F.\sin\beta - F.f.\cos\beta - (F.\cos\beta + F.f.\sin\beta) = 0 \qquad (4.44)$$

Úpravou dostáváme konečnou rovnici (4.45) podmínky velikosti vtahovacího úhlu a třecího úhlu mezi povrchem čelistí a materiálem:

$$\sin\beta.(1 - f^2) = 2.f.\cos\beta$$

$$\tan\beta = \frac{2.f}{1 - f^2}$$

$$\tan\beta = \frac{2.\tan\delta}{1 - \tan^2\delta} = \tan 2.\delta$$

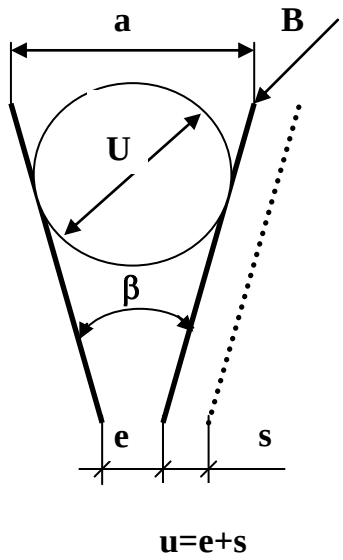
$$\tan\beta = \tan 2.\delta \rightarrow \beta \leq 2.\delta \qquad (4.45)$$

Řešený příklad

Navrhněte hlavní rozměry čelisťového drtiče (obr. č. 4.18) včetně počtu otáček pro drcení surového uhlí Q=80 t/h.

<u>Parametry materiálu:</u>

Vstupní zrnitost:	Umax= 450 mm
Mez pevnosti materiálu:	σ=20 MPa
Modul pružnosti v tlaku:	E=35 GPa
Výstupné zrno:	u=80-130 mm
Součinitel tření:	f=0,48
Sypná hmotnost:	ρ=1000 kg/m^3



Obr. č. 4.18 Parametry čelisťového drtiče

1. Rozměr vstupního otvoru axB

$$a = \frac{U_{max}}{0{,}8 \div 0{,}85} = \frac{450}{0{,}85} = 529 \text{ mm; zvoleno a=550 mm}$$

$$B = (5 \div 3{,}5).a = 1{,}5.550 = 825 \text{ mm; zvoleno B=850 mm}$$

Rozměry 550mm x 850 mm

2. Stupeň drcení

$$i = \frac{450}{0{,}8 \div 0{,}13} \approx 4{,}5 \text{ mm } (5{,}6 \div 3{,}5)$$

3. Vtahovací úhel

Úhel vnějšího tření materiálu po čelisti f=0,48→δ=25,6°

Vtahovací úhel $\beta < 2.\delta$, voleno $\beta = 25°$

4. Otáčky drtícího stroje

Zdvih pohyblivé čelisti je volen: s=50 mm

Dráha zrna při rozevření čelisti:

$$h = \frac{s}{\tan\beta} = \frac{0{,}05}{0{,}466} = 0{,}107 \text{ m}$$

$$h = \frac{1}{2}.g.t^2 = \frac{1}{2}.g.\frac{1}{n^2}$$

$$n = 66{,}442\sqrt{\frac{1}{h}} = 66{,}442.\ \frac{1}{\sqrt{\frac{0{,}05}{0{,}466}}} = 203{,}12\ \text{min}^{-1}$$

$$n_s = (0{,}8 \div 0{,}9).n = 180\ \text{min}^{-1} = 3\ \text{s}^{-1}$$

5. Teoretické podrcené množství

$$V_1 = \frac{s.(e+s).b.\psi}{2.\tan\beta} = \frac{0{,}05.(0{,}16+0{,}05).0{,}85.0{,}6}{2.0{,}466} = 0{,}005746\ \text{m}^3, \text{ kde}$$

$$\psi = 0{,}6$$

$$V = 3600.n_s.V_1 = 3600.3.0{,}005746 = 62\ \text{m}^3.\text{h}^{-1}$$

Drcené množství:

$$Q_{uhlí} = V.\rho = 62.1 = 62\ \text{t.h}^{-1}$$

$$Q_{vápence} = V.\rho = 62.1{,}4 = 86{,}8\ \text{t.h}^{-1}$$

Drtící výkon za 1 otáčku drtícího stroje:

$$V = \frac{\pi.U^3}{6}.\frac{B}{U} - \frac{\pi.u^3}{6}.\frac{B}{u} = \frac{\pi.B}{6}.(1{,}45^2 - 0{,}1^2) = 0{,}0857\ \text{m}^3$$

6. Drtící práce na 1 otáčku drtícího stroje

$$A_1 = \frac{\sigma^2.V}{2.E} = \frac{(20.10^6).0{,}0857}{2.35.10^9} = 5172{,}6\ \text{N.m}$$

7. Výkon pro drcení

$$P_1 = \frac{A_1.n_s}{1000} = \frac{5172{,}6.3}{1000} = 15{,}5\ \text{kW}$$

8. Výkon pro vnitřní ztráty drtiče

$$P_2 = (0{,}2 \div 0.3).P_1 = 0{,}3.15{,}5 = 4{,}65\ \text{kW}$$

9. Příkon elektromotoru

$$P = (1{,}15 \div 1{,}2).\frac{P_1 + P_2}{\eta} = 32{,}2\ \text{kW, přičemž } \eta = 0{,}75$$

Volen elektromotor P_{elm}=34 kW; n=920 min^{-1}; i=920/180=5,1; řemenice motoru d_r=250 mm, řemen. Na drtiči: D=d_r.i=250.5,1=1277 mm

10. Volba setrvačníku (obr. č. 4.19)

$$\frac{P}{2.n} = \frac{1}{2}.J.\omega^2.\delta\text{, přičemž } \delta = 0{,}02$$

$$J = \frac{P}{n.\omega^2.\delta} = \frac{P}{4.\pi^2.n^3.\delta}$$, za předpokladu, že $\omega = 2.\pi.n$

$$J = \frac{34000}{4.\pi^2.3^3.0{,}02} = 1595 \text{ kg.m}^2$$

Celkový moment setrvačnosti:

$$J = J_1 + J_2$$

$$J_1 = J_2 = \frac{J}{2}$$

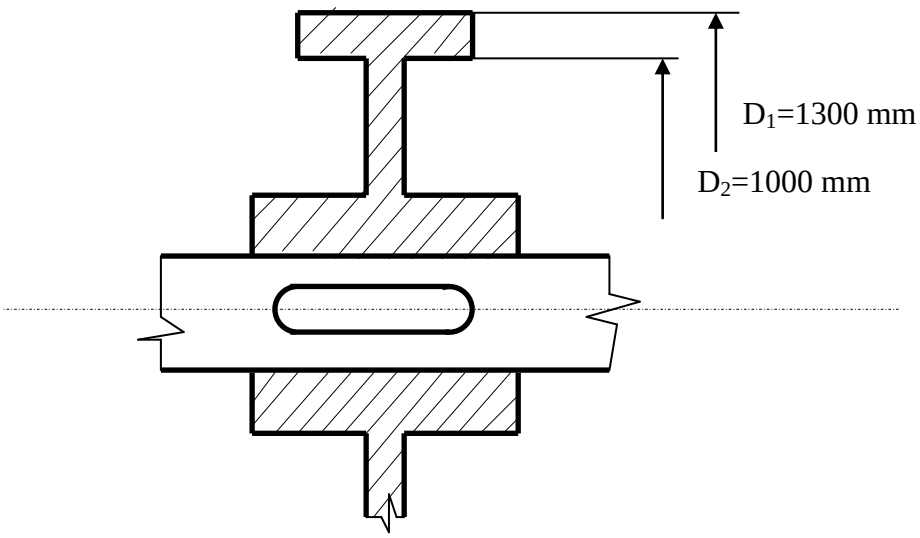
$$J_1 = m.r^2 \rightarrow m = \frac{J}{2.r^2}$$

Poloměr setrvačnosti (dle obr. č. 4.10):

$$r = \sqrt{\frac{\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_2}{2}\right)^2}{2}} = \sqrt{\frac{0{,}65^2 + 0{,}5^2}{2}} = 0{,}58 \text{ m}$$

Hmotnost rotujících hmot:

$$m = \frac{J}{2.r^2} = \frac{1595}{2.0{,}58^2} = 2370 \text{ kg}$$



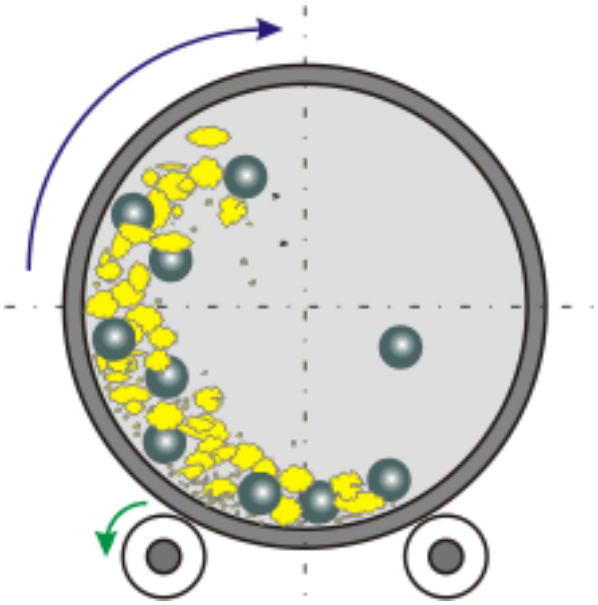
Obr. č. 4.19 Náčrt rotujících hmot při návrhu setrvačníku

Výklad

4.5 Kulový mlýn

Kulový mlýn (obr. č. 4.21) je určen pro mletí do velikosti jemných s superjemných frakcí (jemné prášky prášky) s velikostí vstupního zrna pod 25 mm. Zejména je určen pro mletí cementu, silikátů, nových stavebních materiálů, chemických produktů, železných a neželezných materiálů apod. Existuje celá řada konstrukcí mlýnů přímo pro průmyslové zpracování daného produktu (cementový kulový mlýn apod.). Základní konstrukce je složena z horizontálně umístěného pomalu se otáčejícího bubnu s vnějším planetovým ozubením. Do vnitřní část bubnu jsou vloženy keramické nebo kovové mlecí koule společně s materiálem (viz obr.). Pomocí odstředivých a gravitačních sil koulí při otáčení bubnu dochází k mletí materiálu. Výstupní granulometrie se pohybuje v rozmezí 0,074 –1 mm (průmyslové mletí) při drtícím výkonu od 0,8 až 260 t/h pro suché mletí a pro mletí v médiu je možná velikost výstupní frakce pod 1μm (mletí např. achátovými kuličkami-laboratorní mletí apod.). Většinou mletí kulovým mlýnem předchází primární mletí (kuželovým drtičem apod.). Výkon elektromotoru může činit až 1800 kW. Průměr bubnu až ϕ 4000x8500 mm-váha zařízení až 260 t.

Mezi hlavní výhody použití kulového mlýna patří velký kapacitní výkon vzhledem s širokému granulometrickému rozmezí výstupní frakce, možnost mletí za sucha a za mokra, jednoduchá obsluha a provoz.



Obr. č. 4.20 Systém mletí kulovým mlýnem

Dostupný z: http://glossary.periodni.com/glossary.php?en=ball+mill (4.7.2011)

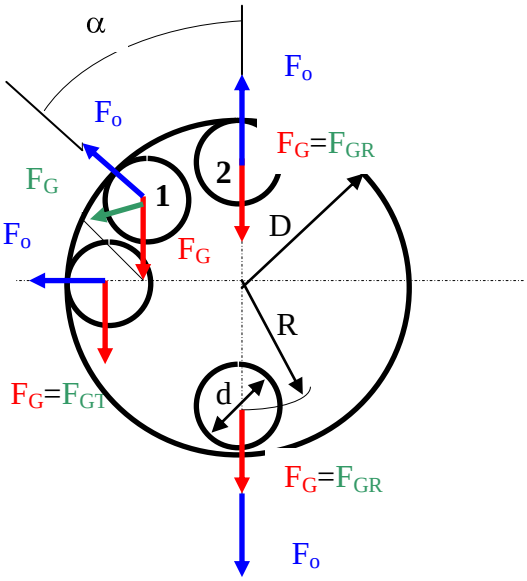
Obr. č. 4.21 Průmyslové mletí kulovým mlýnem

Zdroj: Henan Bailing Machinery Co.,Ltd

Dostupný z http://www.prlog.org/11006537-ball-mill-applicationball-mill-for-salewhich-you-want.html (4.7.2011)

4.5.1 Výpočet a návrh kulového mlýna

Mlecí těleso je unášeno odstředivou silou do jisté výše. Při překonání odstředivé síly příslušnou složkou gravitační síly dojde k odpadu zrna od pláště bubnu a pádu koule po parabolické dráze (obr. č. 4.22). Mletí je realizováno rázem a třením.



Obr. č. 4.22 Síly působící na kulový mlýn

Velikost jednotlivých sil dle obrázku č. 4.11 lze vyjádřit:

$$F_G = m.g$$

$$F_o = m.R.\omega^2$$

$$F_{GR} = m.g.\cos\alpha$$

$$F_{GT} = m.g.\sin\alpha$$

Poměr koulí a průměru bubnu (empirický vztah)

$$d = \frac{D}{18} \div \frac{D}{24}$$

$$R = \frac{D-R}{2}$$

4.5.2 Výpočet úhlu odpadu koule

Pro bod **1** (viz. obr. č. 4.22) v závislosti na otáčkách platí:

$$m.R.\omega^2 = m.g.\cos\alpha$$

$$m.R.(2.\pi.n)^2 = m.g.\cos\alpha$$

$$\cos\alpha = \frac{4.R.\pi^2.n^2}{g} = 4{,}024.R.n^2 \text{ pro n [s}^{-1}\text{]} \qquad [-] \qquad (4.46)$$

$$\cos\alpha = \frac{R.n^2}{894{,}5} = \frac{R.n^2}{900} \text{ pro n [min}^{-1}\text{]} \qquad [-] \qquad (4.47)$$

Počet otáček mlecího stroje v závislosti na úhlu odpadu:

$$n = \sqrt{\frac{\cos\alpha}{4{,}024.R}} = 0{,}498.\sqrt{\frac{\cos\alpha}{R}} \approx 0{,}5.\sqrt{\frac{\cos\alpha}{R}} \qquad [\text{s}^{-1}] \qquad (4.48)$$

$$n \approx 30.\sqrt{\frac{\cos\alpha}{R}} \qquad [\text{s}^{-1}] \qquad (4.49)$$

4.5.3 Kritické otáčky kulového mlýna

Kritické otáčky nastávají pro bod **2** (viz. obr. č. 4.22) v bodě, kdy nedochází k odpadu mlecích koulí, proto platí rovnost odstředivé a gravitační síly:

$$F_o = F_{GR}$$

$$m.R.\omega^2 = m.g$$

$$R.4.\pi^2.n_{kr}^2 = g$$

$$n_{kr} = \frac{0,5}{\sqrt{R}} \qquad [s^{-1}] \qquad (4.50)$$

$$n_{kr} = \frac{30}{\sqrt{R}} \qquad [min^{-1}] \qquad (4.51)$$

Uvedené vztahy zcela neodpovídají realitě, protože zanedbávají tření mezi pláštěm bubnu a mlecím materiálem. Přesto je tento výpočet vhodný pro hrubý odhad a kalkulaci otáček kulového mlýna.

Za předpokladu největší pádové výšky a tedy největší kinetické energie koulí lze odvodit optimální úhel odpoutání koule, tj.

$$\alpha_{opt} = 54°40' \qquad (4.52)$$

4.5.4 Optimální otáčky kulového mlýna

Vycházejí z předpokladu platnosti vztahů (4.48) a (4.52)

$$n_{opt} = 0,498 \cdot \sqrt{\frac{\cos 54°40'}{R}} = \frac{0,3791}{\sqrt{R}} \approx \frac{0,4}{\sqrt{R}} \qquad [s^{-1}] \qquad (4.53)$$

$$n_{opt} = \frac{22,8}{\sqrt{R}} \qquad [min^{-1}] \qquad (4.54)$$

$$n_{opt} = 0,7582 . n_{kr} \qquad [min^{-1}] \qquad (4.55)$$

4.5.5 Pracovní otáčky kulového mlýna

Pracovní otáčky pro mokré mletí jsou vyjádřeny vztahem (4.56):

$$n_M = \frac{22-38}{\sqrt{D}} \qquad [min^{-1}] \qquad (4.56)$$

Pracovní otáčky pro suché mletí jsou vyjádřeny vztahem (4.57):

$$n_M = \frac{25-34}{\sqrt{D}} \qquad [min^{-1}] \qquad (4.57)$$

4.5.6 Režimy pohybu koulí podle otáček

Podle frekvence otáčení lze režimy pohybu koulí rozdělit na **3** oblasti:

I. $n_s < n_{opt}$ - kaskádový pohyb koulí

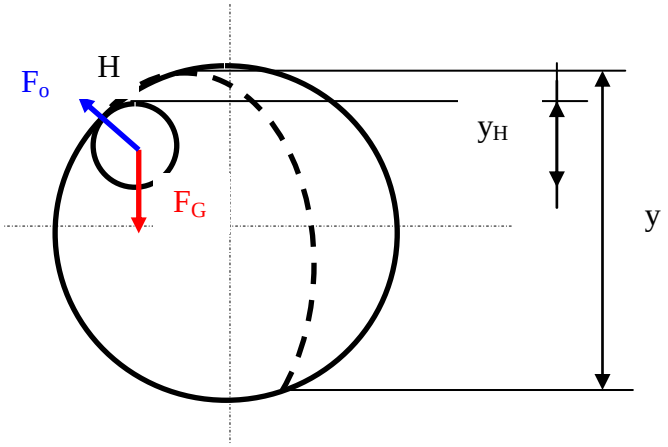
II. $n_s = n_{opt}$ - vodopádový pohyb koulí

III. $n_s > n_{opt}$ - rotační pohyb koulí (mletí se realizuje pouze třením)

Po odpoutání koule z pozice 2 v mlecím prostředí kulového mlýna (viz. obr. č. 4.23) se koule pohybuje volným pádem až dojde k dopadu koule na povrch kulového mlýna.

Vrchol parabolického vrhu koule lze vyjádřit vztahem (obr. č. 4.12):

$$y_H = \frac{v^2 . \sin^2 \alpha}{g} \qquad [m] \qquad (4.58)$$



Obr. č. 4.23 Režimy pohybu koulí podle otáček

Řešený příklad

Navrhněte kulový mlýn pro mletí vápence o výkonu 30 t.h^{-1}. Maximální vstupní zrno materiálu je 25 mm. Výstupní zrno je charakteristické granulometrickým složením 80% pod 0,06 mm. Mletí je realizováno za sucha. Délka mlecího bubnu je L=3500 mm, průměr bubna D=2700 mm, objem mlecího prostoru V=16 m^3, měrná hmotnost meliva ρ_{pm}=1,6 t.m^{-3}, měrná hmotnost mlecích těles ρ_{pt}=7,85 t.m^{-3}, součinitel plnění k_φ=0,8.

Předpokládáme kaskádovitý režim mletí , tzn. $n_s < n_{opt}$.

1. Průměr mlecích koulí

$$d = \frac{D}{18} \div \frac{D}{24} = 150 \text{ mm až } 113 \text{ mm, voleno d=120 mm}$$

2. Poloměr rotace koulí

$$R = \frac{D-d}{2} = \frac{2700-120}{2} = 1290 \text{ mm}$$

3. Kritické otáčky

$$n_{kr} = \frac{0,5}{\sqrt{R}} = \frac{0,5}{\sqrt{2,7/2}} = 0,456 \text{ s}^{-1} = 27,4 \text{ min}^{-1}$$

4. Optimální otáčky

$$n_{opt} = \frac{0,378}{\sqrt{R}} = 0,345 \text{ s}^{-1} = 20,7 \text{ min}^{-1}$$

Pro kaskádovitý režim (plynulý pohyb koulí) lze skutečné otáčky vyjádřit

$$n_s < n_{opt} = 0,261 \text{ s}^{-1} = 15,68 \text{ min}^{-1}$$

Pro vodopádový režim (pád koulí)

$n_s = n_{opt} = 0{,}345\,\mathrm{s}^{-1}$=20,7 min^{-1}÷21min^{-1}

Pro rotační režim koulí (mletí pouze třením)

$n_s > n_{opt} = 0{,}417\,\mathrm{s}^{-1}$=25 min^{-1}

5. Potřebná hmotnost kulové náplně

Doporučen poměr:

$$\mu = \frac{G}{G_o} = 0{,}25 \div 0{,}33 \text{ , kde}$$

G- hmotnost mletého materiálu [kg]

G_o- hmotnost kulové náplně [kg]

6. Vteřinové hmotnostní množství meliva

$$Q_s = \frac{Q}{3600} = \frac{30}{3600} = 0{,}0083\,\mathrm{t.s^{-1}} = 8\ \mathrm{kg.s^{-1}}$$

7. Hmotnost suroviny (meliva)

Měrná hmotnost meliva je volena 400 až 450 kg.m^{-3} užitečného objemu

$$G = (400 \div 450).V = (400 \div 450).16 = 6400 \div 7200 \text{ kg, voleno G=7 t}$$

8. Hmotnost mlecích těles

$$G = 1{,}3.G = 1{,}3.(6400 \div 7200) = 8320 \div 9360 \text{ kg, voleno } G_o\text{=9 t}$$

9. Objem meliva

$$V = \frac{G}{\rho_{pm}.k_\varphi} = \frac{7}{1{,}6.0{,}8} = 5{,}5\,\mathrm{m}^3$$

10. Objem mlecích těles

$$V = \frac{G}{\rho_{pt}.k_\varphi} = \frac{7}{7{,}85.0{,}8} = 1{,}5\,\mathrm{m}^3$$

Celková náplň cca 7 m^3, tj. 43% užitečného objemu

10. Orientační teoretický příkon pro mletí

$$P_t = 0{,}0087.\sqrt{R}.V = 0{,}0087.\sqrt{1{,}2}.16000 \div 152 \text{ kW}$$

11. Skutečný příkon elektromotoru

$$P_s = \frac{P_t}{\eta_1.\eta_2} \text{, kde}$$

η_1=0,8-účinnost uložení a převodů, η_2=0,8-účinnost záběrového momentu

Výklad

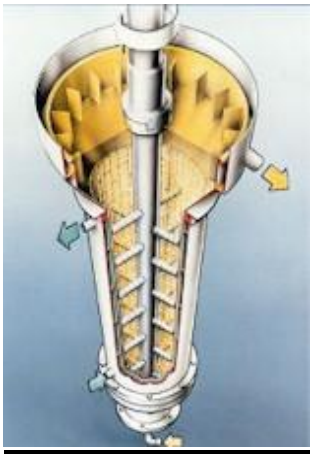
4.6 Perlový mlýn

Perlový mlýn (obr. č. 4.24 a 4.25) je mlecí zařízení pro horizontální nebo vertikální mokré mletí zrn do submikronové oblasti (pod 1 µm). Je využitelný v chemickém a keramickém průmyslu, zpracování kovů a pigmentů, farmacii a agrochemickém průmyslu a zejména při zpracování minerálů. Mlýn tvoří dávkový cirkulační oběh, kde unášecí médium (i viskózního charakteru) společně s drceným materiálem a jemnými kuličkami o průměru 0,2 až 0,8 mm turbulentně proudí přes soustavu otáčejících se rotorů (horizontální mletí, obr. č. 4.24) nebo míchačky (vertikální mletí, obr. č. 4.25). Na konci cyklu se pomocí centrifugy oddělí mlecí kuličky. Objem média se pohybuje v rozmezí od 1,2 do 75 l, výkon motoru je od 5,5 do 250 kW.

Obr. č. 4.24 Horizontální perlový mlýn

Zdroj: Ningbo Hybers Industrial Co., Ltd.

Dostupný z **http://hybers.en.made-in-china.com/product/voHJeTGVClcw/China-50L-60L-Paint-Horizontal-Enclosed-Pearl-Mill.html** (4.7.2011)



Obr. č. 4.25 Vertikální perlový mlýn

Zdroj: Hosokawa, Alpine® ANR Pearl Mill

Dostupný z **http://hosokawamicron.com/web/powderequip/ANR.HTM** (4.7.2011)

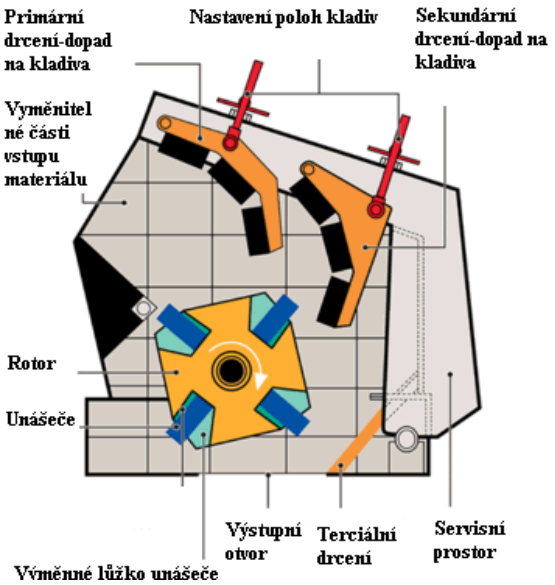
Výklad

4.7 Kladivový a nárazový drtič

Nárazový drtič patří mezi typy drtičů používaných převážně v hornictví, dopravě, energetice, stavebnictví a také v chemickém průmyslu. Je vhodný pro široký rozsah drcení materiálu a vyznačuje se zejména vysokým drtícím výkonem, jednoduchou údržbou a obsluhou a bezpečným provozem. Výsledná podrcená struktura má kubickou strukturu bez trhlin. Obvykle tento drtič se používá při drcení hrubého, středního materiálu až jemného materiálu (uhlí, vápenec, cement) s velikostí vstupního zrna max. 500 mm a max. kompresním tlakem 360 MPa

Základním principem mechanismu drcení nárazového drtiče je drcení pomocí rázové síly. Materiál je drcen již při svém vstupu dopadem na unášeče rotoru bubnu, kde se odráží a dopadá na kladiva drtiče-primární drcení. Následně materiál dopadá zpátky na rotor a pomocí unášečů opětovně je materiál vymrštěn na kladiva drtiče-sekundární drcení. Terciální drcení nastává následně po dopadu materiálu na rotor a pomocí unášečů je následně materiál vymrštěn na dopadovou plochu (obr. č. 4.26). Celý proces je opakován až do požadované zrnitosti materiál. Propadový materiál je dále zpracováván a tříděn. Velikost výstupního zrna lze korigovat velikostí meziprostoru mezi rotorem s unášeči a kladivy. Kladivový drtič (obr. č. 4.27) se od nárazového drtiče (obr. č. 4.26) liší soustavou kladiv volně umístěných v rotoru drtiče.

Výkon drcení v tomto typu drtiče je obvykle 15-850 t/h s výkonem elektromotoru 55 až 900 kW a rozměry rotoru cca od ϕ1000x 1000 mm pro ϕ2000mmx 2000 mm. Velikost vstupního otvoru drtiče pro proces drcení je od cca 400x1000 mm po cca 1500x 2000 mm. Maximální rozměry drtiče od 2000x1500x2500 mm po cca 4000x4000x5000mm.



Obr. č. 4.26 Kladivový/nárazový drtič

Dostupný z: http://www.bestimpactcrusher.com/Impact-Crusher/ (4.7.2011)

4.7.1 Návrh kladivového/nárazového drtiče

Základní rozměry průměru rotoru tělesa kladivového drtiče a délky lze odvodit pomocí empirických vztahů:

$$D = 400 \div 1500 \div 2000\,\text{mm}$$

$$\frac{L}{D} = \frac{1}{2} \div 1{,}33$$

Stupeň drcení i=10 ÷ 15; podrcené zrno 100 ÷ 200 mm

Počet otáček je funkcí obvodové rychlosti v=50 m.s^{-1}.

Výkonnost drtiče:

$$Q = \frac{k.L.D^n.\left(\frac{n}{60}\right)^n}{i-1}$$ [t.h^{-1}] (4.59), kde

k-koeficient drcení k=4 ÷ 6,2 pro uhlí,

i-stupeň drcení,

n-otáčky [min^{-1}],

D-průměr rotoru bubnu [m],

L-délka rotoru [m]

Výkon motoru pro drcení uhlí

$$P = (0{,}1 \div 0{,}15).i.Q$$ [kW] (4.60), kde

Zajímavost k tématu

Pro drcení vápence předpokládáme i=12 ÷ 18, P= 1 ÷ 2 kW/t materiálu

Výklad

Hmota kladiv

Při nárazu rotoru kladiva s rychlostí v na materiál klesne rychlost kladiv na hodnotu v_1:

$$v_1 = (0{,}5 \div 0{,}4).v$$

Hmota G první řady kladiv lze vyjádřit z hmoty zrn rozdrceného materiálu q ze vztahu:

$$v_1.(G + q) = G.v$$

Odtud:

$$G = \frac{v_1.q}{v - v_1}$$ [kg] (4.61)

Hmota první řady zrn drceného materiálu:

$$q = \frac{L}{U} \cdot \frac{\pi . U^3}{6} . \rho = \frac{L . \pi . \rho . U^2}{6}$$ [kg] (4.62), kde

ρ-měrná hmotnost drceného materiálu [kg.m^{-3}]

Zajímavost k tématu

Měrná spotřeba energie při procesu drcení cca w=1,6 kW/t/h

5 TŘÍDĚNÍ MATERIÁLU

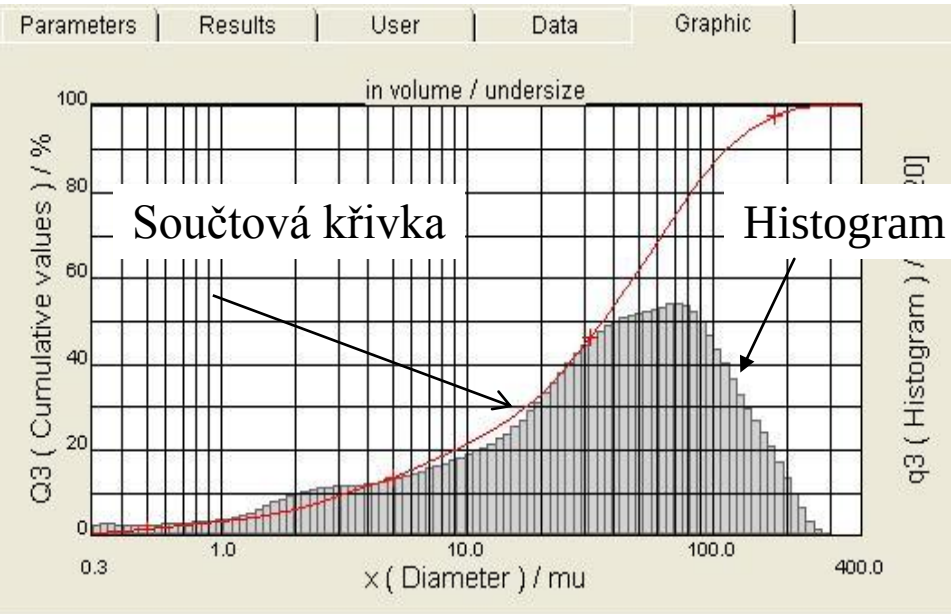
Čas ke studiu: 2 hodiny

Cíl: Po prostudování této kapitoly budete umět

- Rozlišit drtící zařízení a určit jejich kapacitu
- Definovat teorii pohybu materiálu po třídících zařízení

Výklad

Třídění sypkého materiálu je technologický proces, při kterém dochází k cílené separaci materiálu do požadovaných tříd –tzv. zrnitostních (granulometrických) frakcí pomocí třídících zařízení –agregátů (velkokapacitní průmyslové třídění). Při třídícím procesu dochází k tzv. třídění tzn., že na agregátu propadnou zrna rovné velikosti otvoru třídícího agregátu. Právě nejvíce jsou tedy zastoupeny zrna této velikosti otvoru agregátu, kromě menších frakcí a také větších frakcí (větší zrno propadne užším otvorem agregátu tak, že dojde k natočení užšího rozměru skrz otvor agregátu, obr. č. 5.1). Ostrost třídění závisí na podobnosti velikosti částice s otvorem třídícího agregátu.



Obr. č. 5.1 Analýza výskytu zrn vzorku v podobě součtové a křivky a histogramu

Zdroj: http://www.vustah.cz/maltoviny/images/granulometrie_zaznam.jpg

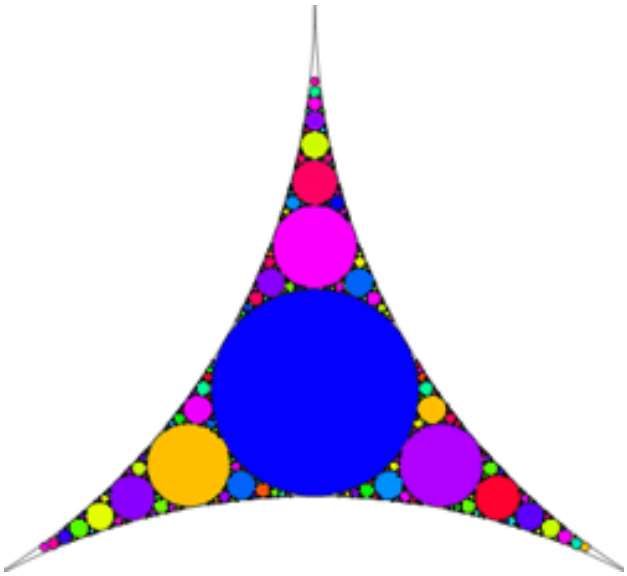
Zajímavost k tématu

Pro velikosti od desítek nanometru po jednotky milimetru slouží nejčastěji granulometry celém svém částicovém rozsahu založené na bázi měření částic pomocí laserové difrakce-rozptylu. Pro laboratorní účely a zjišťování velikosti frakcí používáme modernější typy přístrojů, které dokážou zjistit velikost částice od jednotek nanometru (AFM, SEM, ESEM, TEM, měření Zeta potenciálu) až po desítky centimetrů (sítová analýza, použití velkých třídících agregátů apod.).

Hledání ideální (optimální) zrnitosti

Touto problematikou se zabýval již slavný geometr řeckého původu Apolinius z Pergy. Nejznámější je řešení geometrického problému konstrukce kružnice tangenciálně se dotýkající třech základních kružnic (obr. č. 5.2). Jedná se vlastně o předpoklad vyplnění mezičásticového prostoru jinými částicemi základního kulovitého tvaru, tak aby zaujímaly co největší mezičásticový prostor – kritérium procesního mletí cementu. Každá částice resp. kružnice je tangenciální k třem dalším kružnicím resp. kružnicím.

Je zde patrný fraktální charakter tvorby částic nekonečného průběhu.



Obr. č. 5.2 Apoliniova úloha vyplnění mezičásticového prostoru

Zdroj:http://numb3rs.wolfram.com/403/

Pro měření granulometrie okolo jednotek nanometru se obvykle používá měření Zeta potenciálu. Pro měření granulometrie od stovek nanometru až jednotek mikrometru měření Mie metodou. Tato metoda je založena na faktu komplikovaného rozptylu laseru (obvyklá vlnová délka 628 nm), když jeho vlnová délka se přibližuje velikosti měřené částice. V tomto případě je nutné znát pro identifikaci absorpci paprsku na pevné částici a indexy lomu částice

a média, ve kterém je vzorek měřen. Pro měření od jednotek mikrometrů po jednotky milimetrů se používá nejčastěji měření granulometrie na bázi Fraunhofferova rozptylu částic (přímá laserová difrakce na částici) nebo měření sedimentačními metodami (založeno na bází měření rychlosti pádu částice-zdlouhavé měření u jemných frakcí) apod.

Výklad

Účinnost procesu třídění závisí na třídících agregátech, tj. roštech a sítech.

Z tohoto důvodu vyvstávají požadavky na samotný účinný proces třídění pomocí vysokovýkonnových třídících agregátů [4]:

1. Vysoká účinnost třídění při perfektním oddělení jemných frakcí
2. Co největší optimalizace resp. minimalizace rozměrů třídících agregátů
3. Optimální energetická náročnost daná konstrukcí a vyvážeností třídících agregátů
4. Co nejvyšší materiálová výkonnost
5. Konstrukce kontaktních částí-otěruvzdornost, odolnost proti zanášení
6. Malý počet součástek podléhajících tření
7. Snadná údržba
8. Korozeodolnost konstrukce při styku s vodou agregátů
9. Garance omezení množství obtížně upravitelných kalů
10. Typizace třídících agregátů

Základní parametry třídících agregátů:

a) Účinnost třídění

b) Hodinový výkon

Závislost na:

1. Mechanicko-fyzikálním stavu upravovaného resp. tříděného materiálu
2. Způsobu pohybu a konstrukčních parametrů sít
3. Zatížení agregátu

5.1 Klasifikace třídících agregátů

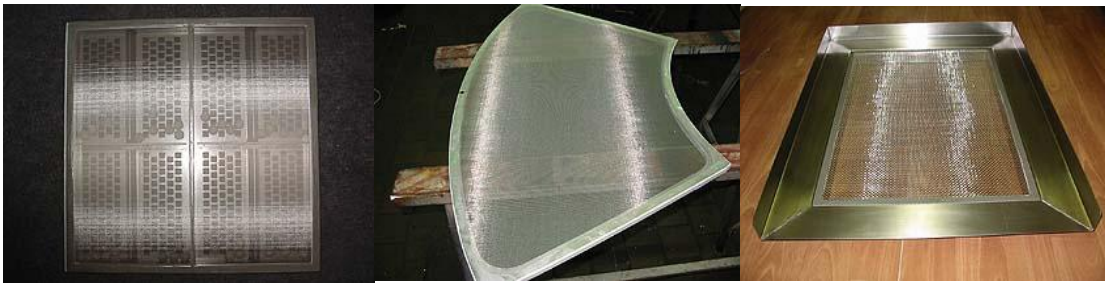
Třídící agregáty, tj. rošty a síta lze nejjednodušeji rozdělit na:

1. Rošty pevné a rošty pohyblivé (ocelové, pryžové a plastové, bubnové, kruhové, vibrační)
2. Síta s přímočarým, rotačním a eliptickým pohybem

Třídící plochy jsou nejčastěji vytvořeny:

a) Soustavou pevných nebo pohyblivých roštnic (různě tvarová síta-segmentové, kruhové, čtvercové, trojúhelníkové a obdélníkové síto apod.)

Jedná se o různě tvarovaná síta, která jsou vyráběná upnutím drátěných sít do různě tvarovaných rámečků (obr. 5.2)



Obr. č. 5.2 Tvarovaná síta

Zdroj: Euro Vamex, s.r.o.

Dostupný z: http://www.eurovamex.cz/galerie_sita_2.htm (4.7.2011)

b) Falcová síta (drátěná nebo vrtaná či stříhaná)

Jedná se o systém napínání jemně drátěného síta pomocí falců (tj, bočních záhybů) a následného dokonalého vypnutí, přičemž je síto podpíráno několika podpěrami umístěnými ve tvaru kruhu.

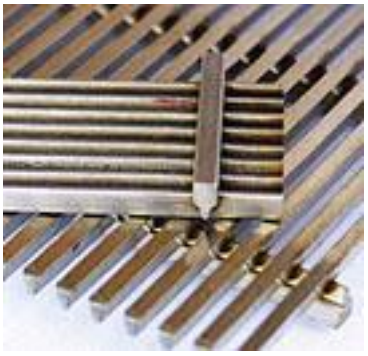
Obr. č. 5.3 Falcové síto stříhané a drátěné

Zdroj: Euro Vamex, s.r.o.

Dostupný z: http://www.eurovamex.cz/prod_sita.htm (4.7.2011)

c) Štěrbinovými síty apod.

Základem štěrbinového síta je drát klínového profilu pro snadné propadávání materiálu přes síto. Je používáno v těžkém průmyslu, ale také v chemickém a potravinářském průmyslu (odvodňování, sušení, protlačování apod.)



Obr. č. 5.4 Štěrbinové síto

Zdroj: Euro Vamex, s.r.o.

Dostupný z: http://www.eurovamex.cz/prod_sita.htm (4.7.2011)

5.2 Vibrační třídiče

Primárně, slouží vibrační třídiče pro třídění materiálu zrnitosti od 0 mm po cca 250 mm a okatosti sít od 2- 200 mm a to pro materiál: štěrkopísek, drcené kamenivo, nerostné suroviny apod. Zvláštní skupinu tvoří různé typy technologických třídičů např. **hrubotřídiče** pro úpravu vstupního materiálu (obr. č 5.5) nebo **odvodňovací třídiče (obr. č 5.6)**-pro separaci sypké hmoty od vody.

Třídiče mohou být opatřeny 1 až 4 třídícími plochami.

Obr. č. 5.5 Hrubotřídič

*Zdroj: **KÁMEN A PÍSEK, spol. s r.o.***

Dostupný z: http://www.kamen-ck.cz/cs/story.php?ide=56&title=Hrubot%C5%99%C3%ADdi%C4%8D+v+lomu+P%C3%ADsek (4.7.2011)

Obr. č. 5.6 Odvodňovací třídič

Zdroj: TECHKON, s.r.o.

Dostupný z: http://www.techkon.cz/nase_produkty_1.html (4.7.2011)

Třídič (obr, č, 5.6) je složen z robustní konstrukce na pružinách, na niž jsou uloženy třídící rošty v pružném uložení. Srdcem třídiče je budič-zdroj pohybu zrna, který je umístěný na vnější konstrukci třídiče.

Cílený přímočarý, kruhový nebo eliptický pohyb zrna tříděného materiálu se dosahuje umístěním rotujících dvou nevývažků budiče (přímočarý pohyb), elektromagnetickými budiči (přímočarý pohyb), rotací nevývažku či mechanickými budiči (kruhový pohyb) či jejich kombinací na plášť robustní konstrukce třídiče (obr. č. 5.6) podobně jako u vibračního podávače.

5.3 Podávaný výkon třídiče

Podávaný hodinový výkon třídiče je dán základním kapacitním vztahem

$Q = q.F$ [t.h^{-1}] (5.1), kde

q-výkon na 1m^2 povrchu v t.h^{-1},

F-plocha povrchu roštu v m^2, přičemž

$Q = 3{,}6.b.h.v.\rho_s.k_\varphi$ [t.h^{-1}] (5.2), kde

b-šířka roštu [m],

h-výška vrstvy podávaného materialu [m],

v-postupová rychlost [m.s^{-1}],

ρ_s-sypná hmotnost materialu [kg.m^{-3}],

k_φ-koeficient plnění/rozvolnění [-]

5.4 Pohyb materiálu po sítě s přímočarým pohybem [4]

Pohyb třídící plochy je dán harmonickým pohybem:

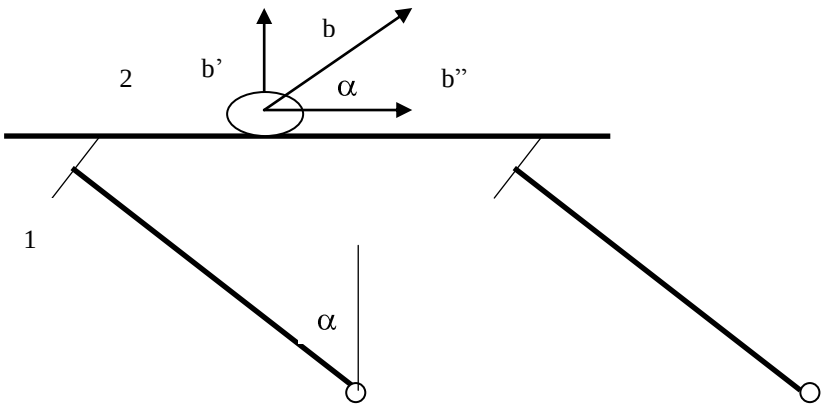
$$s = A.\sin\omega.t \qquad [m] \qquad (5.3), \text{ kde}$$

A-amplituda kmitu [m],

ω-úhlová rychlost rotujícího budiče (ω=2.π.n) [rad.s^{-1}] a pro rychlost v a zrychlení a platí:

$$v = \dot{s} = \frac{ds}{dt} = A.\omega.\cos\omega.t \qquad [m.s^{-1}] \quad (5.4)$$

$$a = \ddot{s} = \frac{d^2 s}{dt^2} = -A.\omega^2.\sin\omega.t \qquad [m.s^{-2}] \quad (5.5)$$



Obr. č. 5.7 Pohyb zrna na vodorovném třídiči [4]

5.4.1 Vodorovné síto (β=0°) [4]

Pro zrno na vodorovném třídiči, tj. s úklonem β=0° je udělováno zrychlení b (obr. č.5.7)

$$b = A.\omega^2.\sin\omega.t \qquad [m.s^{-2}] \quad (5.6)$$

Maximální hodnota zrychlení bude pro hodnotu ω.t=90°= π/2

$$b_0 = A.\omega^2 \qquad [m.s^{-2}] \quad (5.7)$$

Obvykle se hodnota největšího zrychlení srovnává s tíhovým zrychlením, dostáváme tedy koeficient vrhu K

$$K = \frac{A.\omega^2}{g} \qquad [-] \qquad (5.8)$$

Pohyb materiálu po sítě je řízen svislou složkou zrychlení, platí tedy:

$$b' = A.\omega^2.\sin\omega.t.\sin\alpha \qquad [m.s^{-2}] \quad (5.9),$$

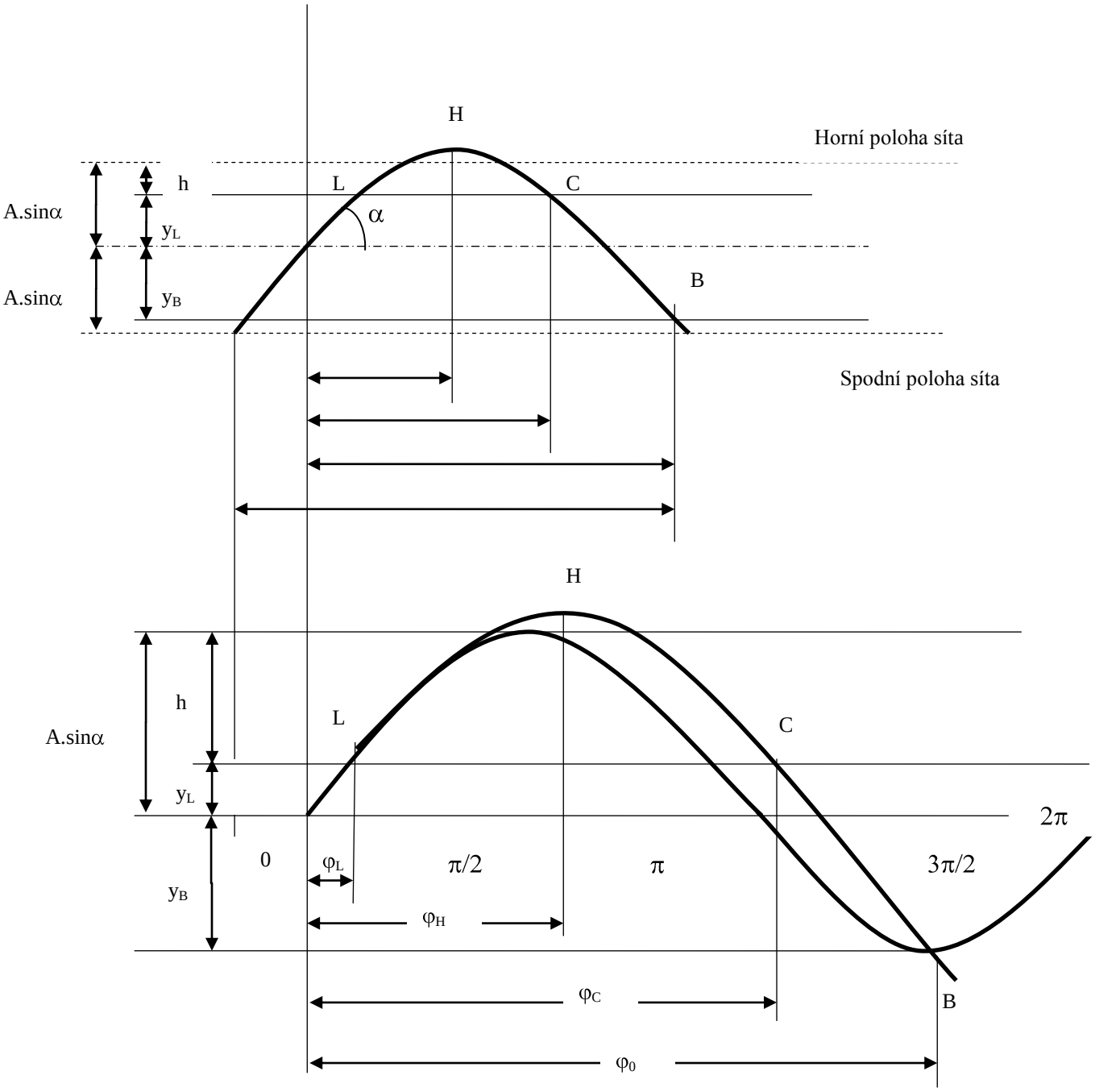
kde α je úhel vrhu zrna.

Maximální hodnota zrychlení nastane při ω.t=π/2

$$b'' = A.\omega^2.\sin\alpha \qquad [m.s^{-2}] \quad (5.10)$$

Maximální složka zrychlení v poměru s tíhovým zrychlením dána koeficientem vrhu

$$K_v = \frac{b''}{g} = \frac{A.\omega^2}{g}.\sin\alpha \qquad [-] \qquad (5.11)$$



Obr. č. 5.8 Pohyb zrna po vodorovné třídící ploše s přímočarým pohybem [4]

Poloha zrna v bodě L:

$$\varphi_L = \omega.t_L \qquad [\text{rad}] \qquad (5.12)$$

$$y_L = A.\sin\varphi_L.\sin\alpha \qquad [\text{m}] \qquad (5.13)$$

Poloha zrna v bodě H:

$$h = \frac{\sin^2\alpha.v_0}{2.g} = \frac{\sin^2\alpha.A^2.\omega^2.\cos\varphi_L}{2.g} \qquad [\text{m}] \qquad (5.14)$$

Pro kalkulaci úhlu φ_H se nejprve stanoví čas vrhu mezi body L a H:

$$t'' = \frac{2.v_0.\sin\alpha}{g} = \frac{2.A..\omega.\cos\varphi_L.\sin\alpha}{g}$$

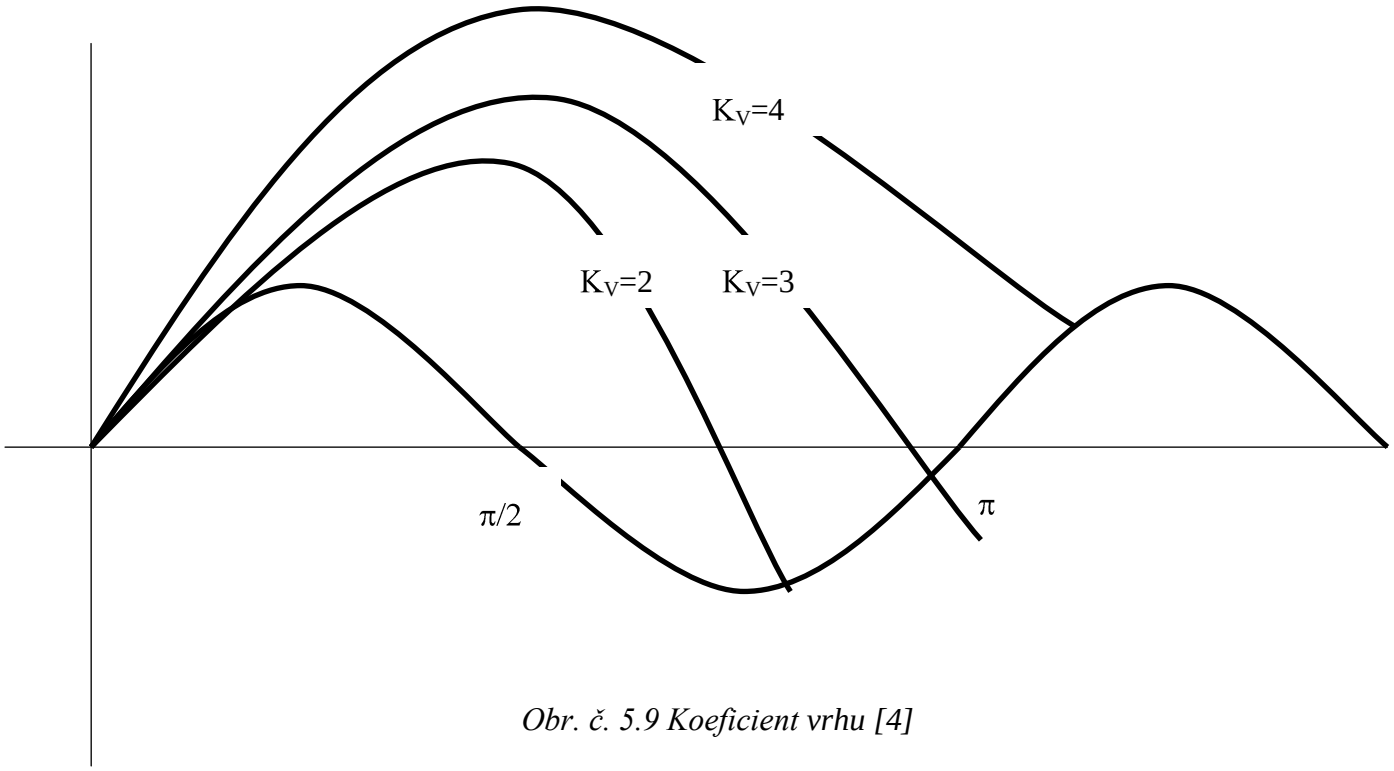
$$t'' = \frac{2.A.\omega^2.\cos\varphi_L.\sin\alpha}{g} = 2.\frac{\cos\varphi_L}{\sin\varphi_L} \qquad [\text{s}] \qquad (5.15)$$

$$\varphi_H = \varphi_L + \frac{\cos\varphi_L}{\sin\varphi_L} \qquad [\text{rad}] \qquad (5.16)$$

Poloha zrna v bodě C:

$$\varphi_C = \varphi_L + 2.\frac{\cos\varphi_L}{\sin\varphi_L} \qquad [\text{rad}] \qquad (5.17)$$

Průsečík paraboly a sinusoidy (tj. bod B) nám dává oba parametry (tj. φ_0 a y_B) pro určení bodu zpětného dopadu zrna na síto. Grafickou metodou se pak stanoví skutečná délka zrna poskoku na sítě.



Obr. č. 5.9 Koeficient vrhu [4]

5.4.2 Síto nakloněné pod úhlem β [4]

Na nakloněném sítu (obr. č. 5.10, obr. č. 5.11) je zrnu udělováno zrychlení:

$$b = A.\omega^2.\sin\omega.t \qquad [m.s^{-2}] \quad (5.18)$$

Maximální hodnota nastane pro ω.t=π/2, tj.

$$b_0 = A.\omega^2 \qquad [m.s^{-2}] \quad (5.19)$$

Koeficient vrhu K:

$$K = \frac{A.\omega^2}{g} \qquad [-] \quad (5.20)$$

Svislá složka maximálního zrychlení:

$$b'' = A.\omega^2.\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos\beta} \qquad [m.s^{-2}] \quad (5.21)$$

Koeficient vrhu:

$$b'' = A.\omega^2.\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos\beta} \qquad [m.s^{-2}] \quad (5.21)$$

Po odpoutání zrna od třídící plochy v bodě L bude platit:

$$b' = A.\omega^2.\sin\omega.t_L.\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos\beta} = g \qquad [m.s^{-2}] \quad (5.22)$$

$$\omega.t_L = \varphi_L \qquad [rad] \quad (5.23)$$

$$A.\omega^2.\sin\varphi_L\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos\beta} = g \qquad [m.s^{-2}] \quad (5.24)$$

Po dosazení z rovnice pro K_V

$$K_V = \frac{1}{\sin\varphi_L} \qquad [-] \quad (5.24)$$

V bodě L zrno bude vrženo šikmo vzhůru pod úhlem α a s počáteční rychlostí v_0

$$v_0 = A.\omega.\cos\varphi_L \qquad [m.s^{-1}] \quad (5.25)$$

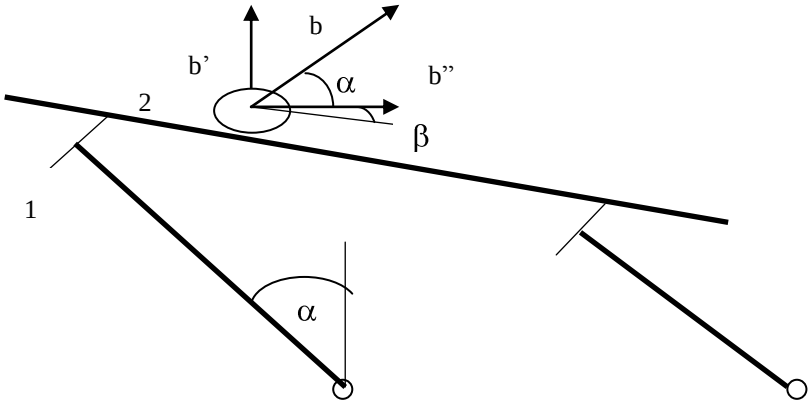
Parametry φ_0 a y_B určují bod B dopadu zrna na síto a stanoví se nejlépe grafickou cestou, kde se stanoví závislost mezi svislou složkou dráhy a úhlem ω.t.

Pro zrno, které se odpoutá v bodě L bude závislost dána parabolou určenou body L,H,C:

<u>Poloha zrna v bodě L:</u>

$$\varphi_L = \omega.t_L \qquad [rad] \quad (5.26)$$

$$y_L = A.\sin\varphi_L.\sin\alpha \qquad [m] \quad (5.27)$$



Obr. č. 5.10 Pohyb zrna na šikmém třídiči [4]

Poloha zrna v bodě H:

$$h = \frac{\sin^2 \alpha . v_0}{2.g} = \frac{\sin^2 \alpha . A^2 . \omega^2 . \cos \varphi_L}{2.g} \qquad [\mathrm{m}] \qquad (5.28)$$

Pro kalkulaci úhlu φ_H se nejprve stanoví čas vrhu mezi body L a H:

$$t'' = \frac{2.v_0 . \sin \alpha}{g} = \frac{2.A..\omega . \cos \varphi_L . \sin \alpha}{g}$$

$$t'' = \frac{2.A.\omega^2 . \cos \varphi_L . \sin \alpha}{g} = 2.\frac{\cos \varphi_L}{\sin \varphi_L} \qquad [\mathrm{s}] \qquad (5.29)$$

$$\varphi_H = \varphi_L + \frac{\cos \varphi_L}{\sin \varphi_L} \qquad [\mathrm{rad}] \qquad (5.30)$$

Poloha zrna v bodě C:

$$\varphi_C = \varphi_L + 2.\frac{\cos \varphi_L}{\sin \varphi_L} \qquad [\mathrm{rad}] \qquad (5.31)$$

Průsečík obou čar (bod B) stanoví parametry φ_0 a y_B potřebné pro určení dráhy poskoku zrna na sítě:

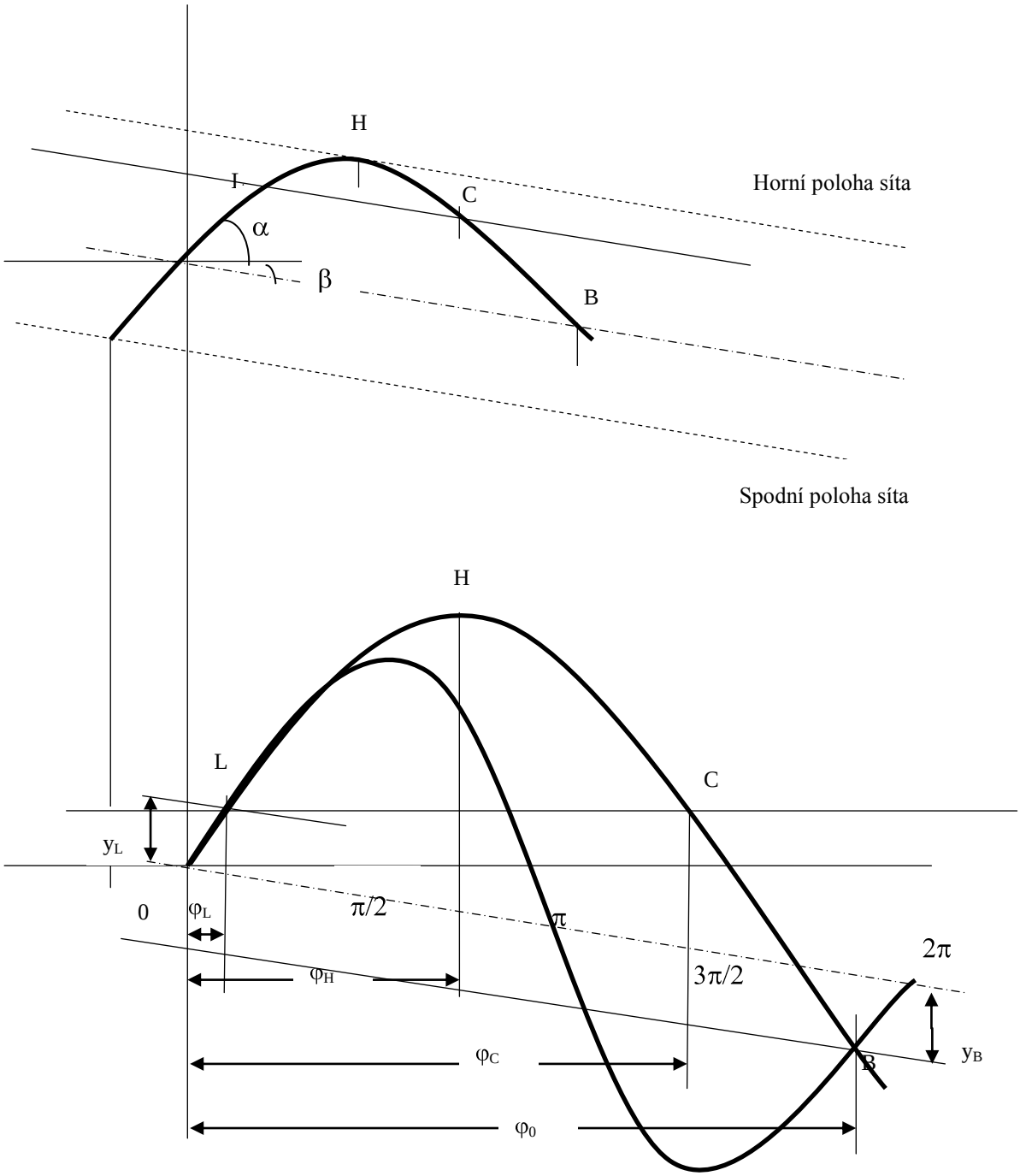
$$x = v_0 . \cos \alpha . t' \; ; \; t' = \frac{\varphi_0 - \varphi_L}{\omega} \; ; \; x = A . \cos \varphi_L . \cos \alpha . \left(\varphi_0 - \varphi_L \right)$$

Z grafického odvození se pak stanoví délka poskoku Z.

Pro rychlost postupu po sítě platí:

$$v = \frac{Z.n}{60.m} \qquad [\mathrm{cm.s^{-1}}] \qquad (5.32), \text{ kde}$$

m-počet započatých kmitů síta připadajících na jeden poskok zrna.



Obr. č. 5.11 Pohyb zrna po šikmé třídící ploše s přímočarým pohybem [4]

5.5 Pohyb materiálu po sítě s rotačním pohybem [4]

Každý bod třídící plochy pohybující se rotačním pohybem vykonává otáčivý pohyb na poloměru rovném výstřednosti poháněného excentrického hřídele. Základními parametry jsou zde obdobně jako u přímočarého pohybu:

r-amplituda (excentricita) [cm],

n-otáčky hřídele [s^{-1}],

α-úhel vrhu [°]

β-úhel naklonění síta od vodorovné roviny [°]

5.5.1 Vodorovné síto (β=0°) [4]

Zrno, které leží na sítě je udělováno odstředivé zrychlení

$$b = r.\omega^2 \qquad [m.s^{-2}] \quad (5.33)$$

Zrychlení rozložíme na svislou a vodorovnou složku rovnoběžnou s třídící plochou. Svislá složka pak ovlivňuje samotný pohyb zrna

$$b' = r.\omega^2.\cos\alpha \qquad [m.s^{-2}] \quad (5.34)$$

Maximální hodnota svislé složky:

$$b'' = r.\omega^2 \text{, odtud } K_V = \frac{b''}{g} = \frac{r.\omega^2}{g}$$

Odpoutání zrna od sítové plochy nastane v bodě L:

$$r.\omega^2.\cos\alpha = g$$

Pro úhel vrhu platí:

$$\alpha + \varphi_L = 90° \text{ , odtud}$$

$$\varphi_L = \omega.t_L$$

$$\cos\alpha = \sin\varphi_L = \frac{g}{r.\omega^2}$$

Dosazením do rovnice pak dostáváme:

$$K_V = \frac{1}{\sin\varphi_L} \qquad [-] \quad (5.35)$$

<u>V bodě L</u> je zrno šikmo vrženo vzhůru a vykonává parabolický vrh

$$\varphi_L = \omega.t_L \qquad [rad] \quad (5.36)$$

$$y_L = r.\sin\varphi_L \qquad [m] \quad (5.37)$$

<u>Bod H:</u>

$$h = \frac{\sin^2 \alpha . v_0}{2.g} = \frac{r^2 . \omega^2 . \cos \varphi_L}{2.g}$$ [m] (5.38)

$$t'' = \frac{2.v_0 . \sin \alpha}{g} = \frac{2.r..\omega . \sin \alpha}{g}$$ [s] (5.39)

$$\omega . t'' = \frac{2.r.\omega}{g} . \sin \alpha$$

$$\varphi_H = \varphi_L + \frac{\omega . t''_L}{2} = \varphi_L + \frac{r..\omega^2}{g} . \sin \alpha$$ [rad] (5.40)

<u>Bod C je určen polohou:</u>

$$\varphi_C = \varphi_L + \frac{2.r.\omega^2}{g} . \sin \alpha$$ [rad] (5.41)

Průsečík obou křivek (bod B) určuje parametry φ_0 a y_B a platí:

$$x = v_0 . \cos \alpha . t' = r.\omega . \cos \frac{\varphi_0 - \varphi_L}{\omega}$$

$$x = r . \cos \alpha . (\varphi_0 - \varphi_L) = r . \sin \varphi_L . (\varphi_0 - \varphi_L)$$

Pro rychlost postupu zrna po sítě bude platit:

$$v = \frac{Z.n}{60.m}$$ [cm.s^{-1}] (5.42), kde

m-počet otáček třídící plochy v průběhu jednoho parabolického poskoku zrna [min^{-1}].

5.5.2 Síto nakloněné pod úhlem β [4]

Zrnu je na sítové ploše udělováno odstředivé zrychlení velikosti:

$$b = r.\omega^2$$ [m.s^{-2}] (5.43)

Svislá složka bude mít hodnotu:

$$b' = r.\omega^2 . \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta}$$ [m.s^{-2}] (5.44)

Pak platí:

$$\alpha + \beta + \varphi_L = 90° ; \qquad \alpha + \beta = 90° - \varphi_L$$

$$b' = r.\omega^2 . \frac{\sin \varphi_L}{\cos \beta}$$ [m.s^{-2}] (5.45)

Složka zrychlení bude mít maximální hodnotu při α=0°

$$b'' = r.\omega^2 \Rightarrow K_V = \frac{b''}{g} = \frac{r.\omega^2}{g}$$

Zrno se odpoutá od třídící plochy v bodě L, tudíž platí podmínka:

$$r.\omega^2.\frac{\sin\varphi_L}{\cos\beta} = g$$

$$\sin\varphi_L = \frac{g}{r.\omega^2}.\cos\beta$$

Po dosazení z rovnice pro K_V

$$K_V = \frac{1}{\sin\varphi_L}.\cos\beta \qquad [-] \qquad (5.46)$$

<u>Bod L:</u>

$$\varphi_L = \omega.t_L \qquad [rad] \qquad (5.47)$$

$$y_L = r.\sin(\varphi_L + \beta) - r.\cos(\varphi_L + \beta).\tan\beta \qquad [m] \qquad (5.48)$$

<u>Bod H:</u>

$$h = \frac{\sin^2\alpha.v_0}{2.g} = \frac{r^2.\omega^2.\sin^2\alpha}{2.g} \qquad [m] \qquad (5.49)$$

$$t'' = \frac{2.v_0.\sin\alpha}{g} = \frac{2.r..\omega.\sin\alpha}{g} \qquad [s] \qquad (5.50)$$

$$\omega.t'' = \frac{2.r.\omega^2}{g}.\sin\alpha$$

$$\varphi_H = \varphi_L + \frac{\omega.t''_L}{2} = \varphi_L + \frac{r..\omega^2}{g}.\sin\alpha \qquad [rad] \qquad (5.51)$$

<u>Bod C je určen polohou:</u>

$$\varphi_C = \varphi_L + \omega.t''_L = \varphi_L + \frac{2.r.\omega^2.\sin\alpha}{g} \qquad [rad] \qquad (5.52)$$

Průsečík obou křivek (bod B) určuje parametry φ_0 a y_B a platí:

$$x = v_0.\cos\alpha.t' = r.\omega.\cos\frac{\varphi_0 - \varphi_L}{\omega}$$

$$x = r.\cos\alpha.(\varphi_0 - \varphi_L) = r.\sin\varphi_L.(\varphi_L + \beta)(\varphi_0 - \varphi_L)$$

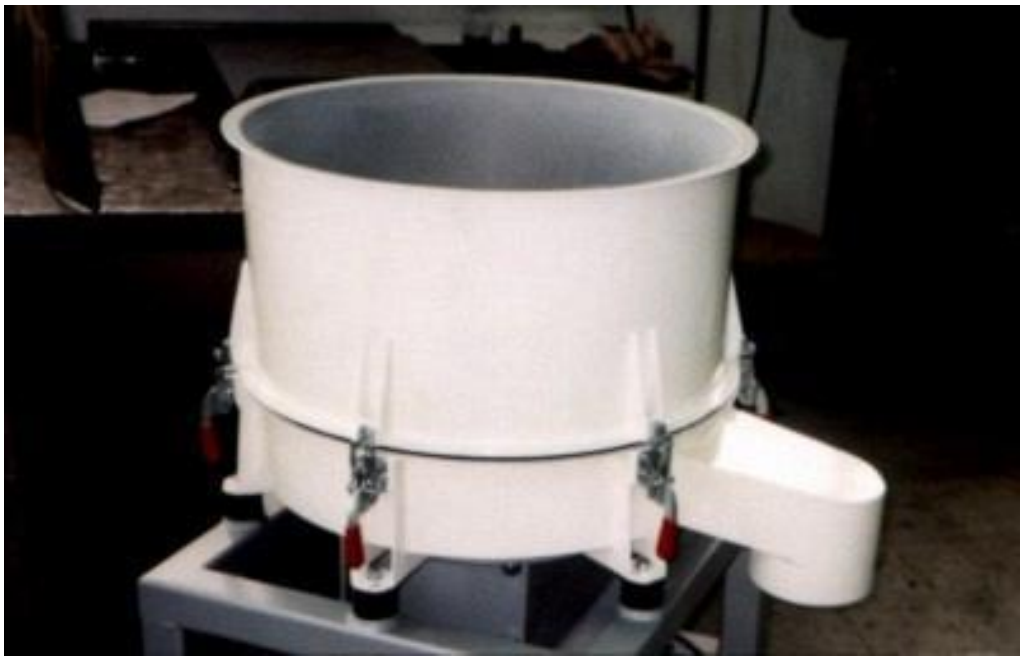
Pro rychlost postupu zrna po sítě bude platit:

$$v = \frac{Z.n}{60.m} \qquad [cm.s^{-1}] \ (5.53), \text{ kde}$$

m-počet otáček třídící plochy v průběhu jednoho parabolického poskoku zrna [min^{-1}].

5.6 Speciální třídiče

Mezi speciální typy třídičů lze zařadit vibrační, rotační, kruhové, vzduchové a jiné typy třídičů určené pro separaci frakcí materiálu. Jsou určeny pro speciální separaci specifického materiálu a jsou převážně flexibilně přemístitelné. Kontaktní části jsou vyrobeny z nerezového materiálu (speciální pro potravinářský průmysl), zdroj pohybu tvoří vibrační motory a vibrační variabilní frekvenční měnič. Vyznačují se malou kapacitou (5-10 t) a malými rozměry.



Obr. č. 5.12 Kruhový třídič TVK

Zdroj: Rox, spol. s.r.o

Dostupný z: http://www.rox.cz/vyrobky0140-vibracni_tridice.php (4.7.2011)

Obr. č. 5.13 Rezonanční třídič RT

Zdroj: Rox, spol. s.r.o

Dostupný z: http://www.rox.cz/vyrobky0143-vibracni_tridice_RT.php (4.7.2011)

Obr. č. 5.13 Rotační třídič PEZZOLATO

Zdroj: Pezzolato s.r.o.

Dostupný z: http://biom.cz/cz/produkty-a-sluzby/stroje-a-zarizeni/rotacni-tridice-pezzolato (4.7.2011)

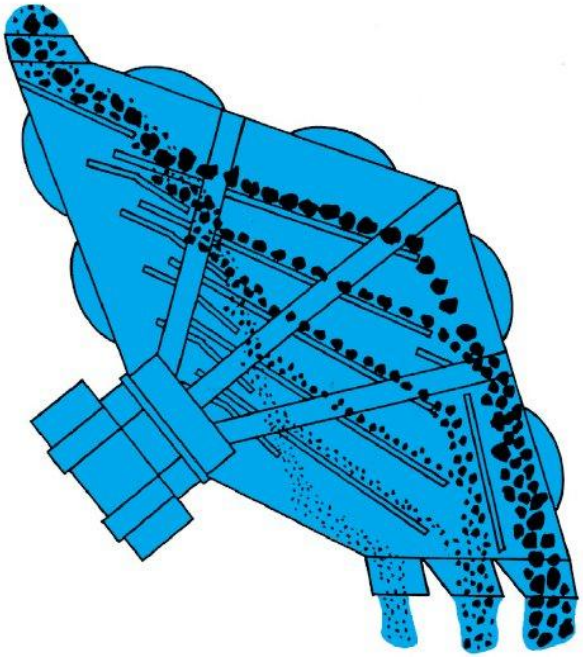
Obr. č. 5.14 Kotoučový třídič

Zdroj: SG strojírna s.r.o.

Dostupný z: http://www.sg-stroj.cz/kotoucove-tridice (4.7.2011)

Obr. č. 5.15 Vzduchový třídič PRESEP VTP

Dostupný z: http://www.poziadavka.sk/ponuky/ponuka-69836/ (4.7.2011)



Obr. č. 5.16 Třídič typu SIZER se schématem třídění (dole)

Zdroj: ALMO, s.r.o

Dostupný z: http://al-mo.cz/uvod-upravarenska-technika-al-mo/vibracni-tridice-mogensen-sizer.html (4.7.2011)

Další zdroje

[1] DRAŽAN, F.- JEŘÁBEK, K. MANIPULACE S MATERIÁLEM. SNTL-NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1979.

[2] POLÁK, J.-PAVLISKA, J.-SLÍVA, A. DOPRAVNÍ A MANIPULAČNÍ ZAŘÍZENÍ I. ES VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2001. ISBN 80-248-0043-8.

[3] PEŠAT, Z. MANIPULACE S MATERIÁLEM V HUTÍCH. ES VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 1992. ISBN 80-7078-107-6.

[4] Patrman, F. Zařízení úpraven. Ediční středisko vysoké školy báňské, Ostrava, 1958.

[5] Bailotti, K. Přednášky z předmětu Zařízení úpraven.

[6] Zegzulka, J. MECHANIKA SYPKÝCH HMOT. ES VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0699-0.

[7] Polický, Z.- Stratilík, M. ÚPRAVÁRENSKÉ STROJE II-TEPELNÉ AGREGÁTY. SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1973. VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0699-0.

[8] Muther, R. Systematické projektování. SNTL, Praha, 1970.