

# Využití vysokorychlostního mletí v odpadovém hospodářství

Ing. Zbyněk Prokšan<sup>1</sup>, Mgr. Michal Procházka<sup>1</sup>, Mgr. Miloš Faltus, Ph.D.<sup>2</sup>, Ing. Miroslav Procházka<sup>3</sup>, Ing. Jan Valentin, Ph.D.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>FF Servis spol. s r.o., Praha

<sup>2</sup>Přírodovědecká fakulta UK, Praha

<sup>3</sup>Tomahawk.cz spol. s r.o., Liberec

<sup>4</sup>silniční laboratoř FSv ČVUT Praha

mail.:zbynek.proksan@ffservis.cz

## Souhrn

*Možnosti využití vysokorychlostního (vysokoenergetického) mletí při úpravě, zpracování a zhodnocení širokého spektra organických a anorganických odpadních materiálů. Realizované průmyslové aplikace a možnosti využití vysokorychlostního (vysokoenergetického) mletí pro zpracování odpadů. Zkušenosti s tímto typem mletí pro získávání surovin z průmyslových a komunálních odpadů. Variabilita možností zpracování různých typů materiálů na jednom provozním zařízení a energetické nároky na tento typ zpracování materiálů.*

**Klíčová slova:** vysokorychlostní mletí, vysokoenergetické mletí, dezintegrátor, odpadní materiály.

## Úvod

Vysokorychlostní mletí (VRM) je jedním z typů vysokoenergetického mletí (high energy milling - HEM), které se vyznačuje velkým množstvím předané energie na jednotku upravovaného materiálu.

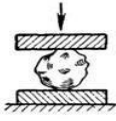
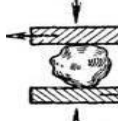
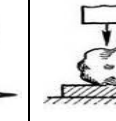
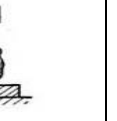
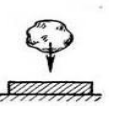

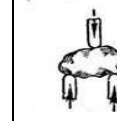
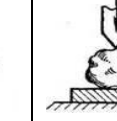
Různé typy mletí se využívaly již ve starověku. Mletí se nejdříve využívalo především pro výrobu potravin nebo léčiv. Dále se začalo využívat mletí při úpravě nerostných surovin, zejména při získávání kovů. Později se mletí stalo jednou ze základních technologických operací, používanou ve většině průmyslových výrobních procesů. Intenzivní vývoj v technologiích mletí započal spolu s rozvojem dalších průmyslových technologií již před více než 200 lety<sup>(1)</sup>. Bez mletí se neobejde prakticky žádné průmyslové odvětví, počínaje úpravou nerostných surovin, energetikou a metalurgií až po chemii, potravinářství, papírenství a průmysl stavebních hmot. Bez mletí by nemohla existovat většina běžných průmyslových výrobků, tak jak je známe<sup>(2; 3)</sup>.

Mletí je běžně chápáno jako proces zjemňování zrnitosti a zvětšování měrného povrchu materiálu, ale také jako proces otevírání zrn. Při mletí se získávají produkty takových parametrů, které jsou potřebné z hlediska jejich dalšího zpracování. Při mletí organických a biologických materiálů, se pohlíží na materiál poněkud odlišně, než při zpracování anorganických materiálů. Klasický a zároveň snad nejstarší historicky doložený příklad mletí je mletí obilovin pro výrobu mouky<sup>(4)</sup>. Významné je používání mletí pro rozmělnění a rozvláknění buněčných stěn dřevní hmoty při výrobě papíru a celulózy, k otevření buněk pro extrakce tříslovin, enzymů a dalších organických látek. Mletí se používá i pro úpravu fosilních a dalších tuhých paliv pro práškové a fluidní spalování v tepelných energetických jednotkách<sup>(5)</sup>.

Požadovaných efektů je dosahováno několika základními mechanismy, které působí na upravovaný materiál<sup>(6)</sup>. K procesu mletí dochází obecně tehdy, pokud je částicím upravovaného materiálu dodávána energie dostatečně vysoká k překonání jejich vnitřní soudržnosti<sup>(7)</sup>. Nejběžněji se používá mechanického předávání kinetické energie částicím upravovaného materiálu, potom hovoříme o mletí mechanickém. Existují ale i jiné způsoby předávání energie upravované látce, například ultrazvukové, šokové termické, elektrické či elektrohydraulické. I tyto mechanismy jsou využívány v omezené míře k

rozrušování látek a ke zjemňování zrnitosti pevných látek, tedy k mletí. V mechanických zařízeních – mlýnech, je ke zjemnění zrnitosti – mletí využíváno několika základních mechanismů.

**Tabulka č. 1 – základní mechanismy mletí**

1	2	3	4	5	6	7	8
Tlak	Střih	Tlakový impuls (stísněný úder)	Volný úder	Volný úder + střih	Tah/Ohyb (střih 2)	Štípání	Řezání
							

Dále se rozlišuje zda k těmto procesům dochází mezi pracovními tělesy a zjemňovaným materiálem či mezi vrstvou částic mezi pracovními tělesy, při srážce částice s pracovním tělesem, částice s částicí či mezi médiem (prostředím) a částicí <sup>(8; 9)</sup>.

Ve většině klasických mlýnů (kulových, prstencových, tyčových, kolových, válcových, kotoučových, vibračních atd...) dochází v různé míře ke kombinaci mechanismů 1, 2 a 3, kde je působeno na částice či na vrstvu částic mezi pracovními tělesy. Mechanizmy 1 až 3 jsou z energetického hlediska obvykle málo efektivní, protože před rozmělněním částic upravované látky, musí být překonána adheze mezi mlecím tělesem a částicemi látky nebo mezi částicemi látky ve vrstvě. Pak musí částice projít fází plastické deformace a protože ke kontaktu mlecích těles a částic upravovaného materiálu dochází při relativně malých rychlostech, dokáže vnitřní struktura část energie vykompenzovat (pružnost, dvojčatění atd. <sup>(6)</sup>). Při těchto procesech se převážná většina vložené energie přemění na teplo a není efektivně vynaložena na zjemnění zrnitosti (resp. zvětšení měrného povrchu) upravovaného materiálu. Další nevýhodou těchto mechanismů je relativně malý kontakt povrchu pracovních těles s částicemi upravovaného materiálu. Proto mají tyto mlýny, vzhledem ke své produktivitě velký objem a velmi vysokou hmotnost <sup>(7)</sup>.

I v modernějších mlýnech, jakými jsou kulové planetární mlýny nebo vibrační mlýny, převládají mechanismy č. 1 až 3. Pouze k těmto procesům dochází při vyšších rychlostech a tedy s vyšší energetickou účinností <sup>(8; 10)</sup>.

Na mechanismech, které dané mlecí zařízení používá, a na jeho dalších konstrukčních parametrech také ve značné míře závisí efektivita zjemnění materiálu - mletí. Tuto efektivitu se pokoušejí kvantifikovat některé základní teorie, používající jako kritérium účinnosti množství spotřebované práce na jednotku nově vytvořeného povrchu, rozměru či hmotnosti částic zjemňovaného materiálu nebo na kombinaci těchto dvou veličin.

Podle Rittingerovy teorie je práce spotřebovaná na zjemnění úměrná velikosti nově vytvořeného povrchu  $A = k_R D^2$  <sup>(11)</sup>, resp.  $E = CR(1/x_2 - 1/x_1)$ , kde  $x_1$  je průměrná zrnitost vstupního materiálu a  $x_2$  je průměrná zrnitost mletého materiálu. Rittinger ale naprosto zanedbává adsorbci energie jak při elastické tak při plastické deformaci, která převažuje nad spotřebou energie na zjemnění zrnitosti – tedy na vytvoření nového povrchu <sup>(9)</sup>. Rittingerova teorie přesto nejlépe vystihuje absorpci energie při jemném mletí, tedy procesy které probíhají při zjemňování materiálu v oblastech zrnitosti pod 0,05 mm.

Podle Kickovy teorie úměrné hmotnosti či rozměru zrn upravovaného materiálu  $A = k_K D^3$ , resp.  $E = CK \ln(x_1/x_2)$ , tento vztah však má omezenou platnost zejména při jemném a ultrajemném mletí, neboť jak ze zkušeností vyplývá, spotřeba energie na zjemnění kusů materiálu z 10 cm na 1 cm je podstatně nižší než na zjemnění z 10  $\mu$ m na 1  $\mu$ m. Tato teorie nejlépe charakterizuje absorpci energie při drcení, tedy v oblastech zrnitostí nad 5mm.

Bondova teorie je pak pokusem o syntézu obou předchozích teorií  $A = k_B D^{2,5}$ , resp.  $E = C_B (1/2 \sqrt{x_2} - 1/2 \sqrt{x_1})$ . Tato teorie nejlépe charakterizuje absorpci energie v oblastech zrnitostí mezi 0,05 mm a 5 mm<sup>(11; 9)</sup>. Holmes (1957) se pak pokusil o zobecnění těchto tří vztahů a závislost spotřebované energie na zjemnění zrnitosti pak vyjádřil jako diferenciální rovnici  $dE/dx = -(C1/xN)$ ,

kde  $N = 2$ ;  $C = CR$  (pro zobecnění Rittingerovy teorie)

$N = 1$ ;  $C = CK$  (pro zobecnění Kickovy teorie)

$N = 1,5$ ;  $C = CB$  (pro zobecnění Bondovy teorie)

Z dlouholetých zkušeností však vyplývá, že tyto zákonitosti jsou stále pouze pokusem o určité zobecnění základních vztahů pro velikost spotřebované energie na zjemnění materiálu, respektive na vytvoření nového povrchu<sup>(12)</sup>.

Velké rozdíly také existují v mletí materiálů v různých prostředích (za sucha, za mokra) nebo za přidání tzv. povrchově aktivních látek. U většiny mlecích zařízení je velmi problematické mletí elastických, plastických, pastovitých či vícesložkových materiálů. Poměr hmotnosti klasických mlecích zařízení vzhledem k jejich hodinové produktivitě je velmi vysoký a energetická efektivita, tedy přeměna vynaložené energie na zjemnění zrnitosti či vytvoření nového povrchu naopak nízká<sup>(13)</sup>.

V průmyslové praxi se obecně udává spotřeba energie na zjemnění jako poměr hodinového příkonu mlecího zařízení vztaženého k hodinovému výkonu zařízení  $E_m = e/Q$  (kWh/t)<sup>(2)</sup>. Pro upřesnění podmínek se uvádí obvykle zrnitost (či měrný povrch) upravovaného materiálu před a po mletí.

Otázka spotřeby energie při mletí a také investičních nákladů, a možných úspor spojených s tímto procesem je velmi důležitá, neboť se v celosvětovém měřítku spotřebuje na tyto procesy cca 5 % vyráběné energie<sup>(14; 15)</sup>.

Přesto, že neexistuje žádný koordinovaný výzkum v oblasti mletí, začínají se v posledních dvaceti až třiceti letech uplatňovat nové postupy ve využívání klasických mlecích zařízení, postupné zefektivňování těchto zařízení a nové typy mlecích zařízení, s vyšší energetickou efektivitou, mnohem výhodnějším poměrem vlastní hmotnosti vzhledem k produktivitě a také s velmi zajímavými vlastnostmi výsledného produktu – mletého materiálu, který tak může získat nové kvalitativní parametry<sup>(16)</sup>.

Jedním ze směrů, který se v posledním období intenzivně rozvíjí je vysokoenergetické mletí. Pojem vysokoenergetického ani vysokorychlostního mletí není nikde v literatuře přesně definován. S mletím v klasickém pojetí má společné všechny základní vlastnosti, tedy zjemnění zrnitosti, zvětšení měrného povrchu, otevření zrn atd. Na rozdíl od klasického mletí při vysokoenergetickém mletí (a také při mletí vysokorychlostním) dochází k určitým jevům (efektům), které nebyly pozorovány u běžného mletí. A právě na tyto efekty je přeměněna určitá část vynaložené energie, která se u běžného mletí bez užítku přemění na teplo.

#### **Tyto jevy jsou u anorganických materiálů například:**

- mechanochemická (mechanická) aktivace
- tvorba vyšších podílů mikronových částic a nanočástic
- v některých případech vyšší efektivita využití spotřebované energie na tvorbu nových povrchů

Právě efekt mechanochemické aktivace umožňuje mnohem efektivnější využití energie, vynaložené na úpravu – mletí látky, díky akumulaci její části v podobě zvýšené entalpie upravované látky. Efekt mechanochemické aktivace umožňuje ve vysokorychlostních mlecích zařízeních:

- uskutečňování chemických reakcí v pevném stavu při mletí (např. oxidace či výměnné reakce)
- iniciaci fázových změn (ne pouze amorfizace) v různých látkách
- vznik mechanických slitin kovových materiálů v procesu mletí
- průběh katalytických reakcí v organických i anorganických systémech v procesu mletí

Základními mechanizmy mechanochemické aktivace jsou zvýšení hodnoty vnitřní energie látky (tedy zvýšení entalpie látky). Dalším mechanismem je vytváření tzv. aktivních povrchů na novotvořených zrnech látky (pokud se jedná o látku pevnou).

Podrobnější informace o možnostech využití mechanochemické aktivace naleznete v literatuře.

### **U organických materiálů pak vysokorychlostní/vysokoenergetické mletí umožňuje:**

- částečnou či úplnou depolymerizaci
- oxidaci
- hydroxylaci nebo dehydroxylaci
- hydrogenaci či dehydrogenaci (nejčastěji za účasti katalyzátorů)
- vytváření organokovových komplexů

### **a vlastní mechanické působení nástrojů mlýna na zpracovávaný materiál lze využít například na:**

- vysušování zpracovávaného materiálu
- vytváření tvarů zrn výstupního materiálu pro jejich další zpracování (u obilovin a luštěnin na rozvlákněná nebo sférická zrna, která umožňují nejrůznější další zpracování; u pilin, štěpky, papírových kartonů a komunálního odpadu optimální peletizaci apod.)

## **Něco málo z historie**



Průkopníkem využití vysokorychlostního mletí v průmyslové praxi je Johannes Alexandrovič Hint (20. 9. 1914 - 5. 9. 1985), který spoluzaložil v roce 1974 v Tallinu společnost AS Desintegraator.

Je autorem nebo spoluautorem 2 monografií, více než 200 vědeckých publikací, 62 vynálezů a 28 zahraničních patentů.

Je uváděno, že vysokorychlostního mletí bylo před rozpadem SSSR využito zejména při produkci injektážních materiálů a vrtných kapalin, železných a neželezných kovů, v chemickém a petro-chemickém průmyslu, v mikrobiologii, při přípravě plniv, hnojiv, krmiv, při recyklacích atd.

Společnost FF Servis spol. s r.o. se výzkumem a aplikací vysokorychlostního/vysokoenergetického mletí různých materiálů zabývá již od roku 2004, kdy prvotním cílem bylo zpracování fluidního popílku na pojivo. Tak vznikl materiál s komerčním názvem Dastit. Dále se výzkum zaměřil na úpravy mlecích režimů pro optimalizaci mletí konkrétních materiálů a v konečném důsledku i na testování vysokorychlostního mletí s využitím extrémních energií (oběžných rychlostech různých typů rotorů) na vybrané typy materiálů.

Výzkum probíhá ve vlastním Výzkumném a vývojovém centru a pro uvedení do průmyslové praxe jsou dosažené výsledky dále testovány v navazujícím Inovačním centru.

Výzkumné a vývojové centrum je vybaveno laboratorním vysokorychlostním mlýnem s kapacitou cca 10 – 20kg testovaného materiálu za hodinu, Inovační centrum disponuje mlýnem na zpracování až jedné tuny materiálu za hodinu při oběžné rychlosti rotorů  $300 \text{ m.s}^{-1}$  a dále mlýnem s oběžnou rychlostí až  $750 \text{ m.s}^{-1}$ .

**FF D11**



**FF D15**



**FF 750**



### **Rozsah testovaných materiálů a obecná prezentace získaných výsledků.**

- a) Fluidní popílek– pojivo Dastit
- b) Granulační popely – úprava velikostí a tvarů zrn (dtto výtavné popely a strusky)
- c) Skelný recyklát– potenciálně pucolánově aktivní materiál, úpravou velikosti částic může být použit v maltách a betonu nejen jako filler, ale i jako aktivní část pojiva= úspora na straně spotřeby Portlandského slínku
- d) Cement– vysokorychlostní mletí může být využito při spolumletí složek při výrobě směsných cementů, zejména v případě, že mají jednotlivé složky podobnou melitelnost= dokonalá homogenizace
- e) Zeolity– úprava zrnitosti



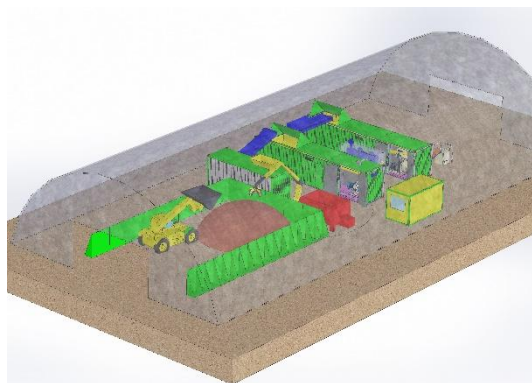
- f) Mletí různých typů odprašků (změna zrnitosti, vysušení, oxidace)
- g) Mletí odprašků z recyklace stavebních odpadů– využití podsítné frakce, tento materiál po zpracování vysokorychlostním mletím může být využit buď jako filler, nebo jako aktivní část pojiva
- h) Mletí gumového recyklátu (na prach pod 200 $\mu$ m)
- i) Mletí elektroodpadu na přibližně stejnou zrnitost, rozdělení materiálů s odlišnou specifickou hmotností, snadné následné zpracování
- j) Anorganická hnojiva– mletí na optimální zrnitost (dle zadání, výstupem např. různé frakce) za současného vysušení materiálu
- k) Anorganická hnojiva– mletí na optimální zrnitost za současné extrakce materiálu (listová hnojiva + pevná frakce)
- l) Biouhel– mletí na optimální zrnitost, maximalizace povrchů
- m) Využití vysokorychlostního mletí při dekontaminaci půdy (v rámci projektu TAČR)
- n) Mletí zrnin a luštěnin– variabilita vstupní vlhkosti, mletí celých zrn (celozrnné mouky), výstupní tvary zrn (využití u bezlepkových mouk atd.), současné mletí různých vstupních surovin– výroba potravinářských směsí
- o) Mletí zeleniny (mrkev, brokolice apod.) s přidavkem vody– pasty, džusy
- p) Mletí chilli papriček (suché mletí, mletí s olejem) – význam vysokorychlostní mletí při mletí koření
- q) Mletí mláta (a obdobných potravinářských odpadů), možnosti současného mletí tekutých/polotekutých surovin a suchých surovin– možnost výroby potravinových polotovarů metodou vysokorychlostního mletí
- r) Mletí pilin– sušení, otevření struktur; vystupující lignin zlepšuje při peletizování pevnost peletek
- s) Mletí biomasy (biomasa z různých zdrojů) – možnost současného sušení/dosušení
- t) Mletí komunálního odpadu– vysokorychlostní mletí může pomoci při řešení problémů s jeho ukládáním, umožní lepší využití jednotlivých frakcí (následná separace– recyklace vyššího procenta), u energetického zhodnocení umožní zpracování podstatné části KO na palivo (např. pelety) za současného vysušení s minimálními energetickými nároky

## Současnost

V současné době se naše úsilí ve výzkumu procesu vysokorychlostního/vysokoenergetického mletí soustřeďuje primárně do oblasti vlivu geometrie nástrojů, hustoty a proudění zpracovávaného materiálu v komoře, využití kavitace a testování extrémních rychlostí a energií na výsledek mletí a možnosti ovlivňování výsledku změnou režimu mletí. Získané výsledky se posuzují zejména s ohledem na požadavky průmyslové praxe. V první řadě se jedná o možné energetické úspory, snížení nákladů při zpracování jinak obtížně zpracovatelných materiálů, špatně využitelných vedlejších produktů, využití mlýna jako reaktoru pro některé procesy a v neposlední řadě i na využití a recyklaci „odpadů“.

## Příklady využití vysokorychlostního mletí

### Kontejnerové řešení zpracování komunálního odpadu



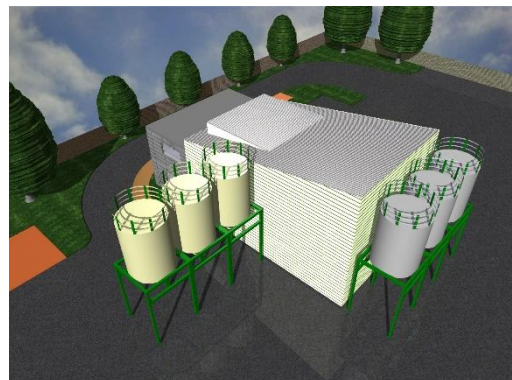
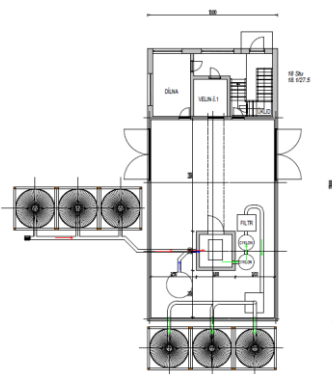
### **Výroba pojiva DASTIT - Plzeň**



### **Ověření technologie zpracování gumového recyklátu ve společnosti Bonux**



### **Vzorový návrh linky na zpracování sypkých materiálů**



### **Závěr:**

Vysokorychlostní a obecně vysokoenergetické mletí je velice perspektivním oborem, ve kterém v celosvětovém měřítku probíhá velmi intenzivní výzkum a v některých oborech přináší již dnes významný

progres a také významné ekonomické i environmentální úspory. Ve srovnání s klasickými zařízeními pro mletí, umožňuje tato technologie podstatně lepší využití energie a umožňuje mechanochemickou aktivaci upravovaných látek. Zároveň je tato technologie investičně méně náročná a zabírá podstatně méně místa než klasická mlecí zařízení. Proto jí lze snadno adaptovat do již stávajících průmyslových provozů.

Hlavním přínosem této technologie ale je, že umožňuje vznik kvalitativně nových produktů a nových technologií a umožňuje kvalitativně nové využití stávajících surovin nebo využití takových materiálů, které pomocí jiných technologií upravit nelze. Řada z těchto potenciálních surovin je dnes považována za odpady nebo špatně využitelné vedlejší produkty. Tím tato technologie může přispět k rozvoji hospodárného a bezodpadového využívání surovin a zlepšení celkové ekologické situace nejen díky nižší spotřebě energie ale i využitím surovin, jejichž zpracování neprodukuje žádné emise.

V ČR a ve většině zemí EU se tato technologie, až na malé výjimky (Polsko– výroba exotermických metalurgických zásypů, Rakousko– výroba aktivovaných minerálních hnojiv, ČR– výroba anorganického hydraulického pojiva DASTIT) zatím nevyužívá. Pro zemi s omezenými zdroji přírodních surovin může být tato technologie velmi důležitá, protože může umožnit podstatně efektivní využití těchto omezených zdrojů, umožnit výrobu principiálně nových produktů a zlevnění výroby produktů stávajících.

Technologie vysokorychlostního/vysokoenergetického mletí může sehrát významnou roli ve zvyšování efektivity řady průmyslových výrob. Výzkum technologie vysokorychlostního mletí intenzivně pokračuje a vývoj těchto zařízení může přinést řadu neočekávaných a velmi užitečných aplikací. Přes řadu pozitivních zkušeností včetně úspěšných průmyslových aplikací, existuje stále velmi rozsáhlý potenciál jak pro výzkum, protože při vysokorychlostním mletí záleží nejen na samotné energii, která se upravované látce předává, ale i na charakteru procesu, kterým se tak děje. Jedná se o vliv mlecího prostředí, tlaků a teplot, při kterých k úpravě dochází, vektoru rychlosti srážek zrn upravované látky s pracovními tělesy nebo zrn mezi sebou vzájemně, charakteru rázových a zvukových vln v prostředí atd.

### **Literatura:**

- 1- Alban J. Lynch, Chester A. Rowland.: The History of grinding, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), 2005, 8307 Shaffer Parkway, Littleton, Colorado, USA 80127, ISBN 0–87335–238-6
- 2 - Maurice C. Fuerstenau, Kenneth N. Han.: Principles of mineral processing, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), 2003, 8307 Shaffer Parkway, Littleton, Colorado, USA 80127, ISBN 0–87335-167-3
- 3 – Richter M.: Průmyslové technologie – úvod, Skripta, Fakulta životního prostředí Univerzity J.E.Purkyně, Ústí n.L., 2002
- 4 - Nový L. a kol.: Dějiny techniky v Československu, ACADEMIA, Praha, 1974
- 5 - Austin L.G., Trass O.: Size Reduction of Solids Crushing and Grinding Equipment, Chapter 12 in "Handbook of Powder Science and Technology" Second Edition, Chapman & Hall, 586-634, (1997)
- 6 - Серго Е. Е.: Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых, Справочник по обогащению руд, Подготовительные процессы, под ред. В. А. Олевского (и др.), 2 изд., Москва, 1982
- 7 - Snow R. H., Allen T., Ennis B. J., Litster J. D.: Size Reduction and Size Enlargement, [http://chc.edu.vn/forum/uploads/file//2009-08-16\\_092142\\_Chap20.pdf](http://chc.edu.vn/forum/uploads/file//2009-08-16_092142_Chap20.pdf)



8 - Найбороденко Ю. С., Касацкий Н. Г., Сергеева Е. Г., Лепаква О. К., Влияние механической активации на высокотемпературный и фазообразование низкокалорийных интерметаллических соединений, Химия в интересах устойчивого развития 10, 199 — 204, Томск, Россия, 2002,

<http://www.sbras.ru/PSB/phsb/papers/CSD2002-2-27.pdf>

9 – Baláž P.: Mechanochemistry in Nanoscience and Minerals Engineering, Chapter 2, High - Energy Milling, Springer, Hardcover, Netherland, 2008, ISBN: 978-3-540-74854-0

10 - Кипнис Б. М.: Анализ перспектив УДА — технологии в области полимерных материалов, УДА - технология, Тезисы докладов II семинара, стр. 44 — 46, СКТБ «Дезинтегратор», Таллинн, 1983

11 – Šebor G.: Těžba a úprava nerostných surovin, Skripta, ČVUT v Praze, Ediční středisko ČVUT, Praha 1, Husova 5, duben 1983

12 - Зырянов В. В.: Сравнение эффективности удара и раздавливания на начальном этапе закачки механической энергии в твердое тело, УДА — технология, Тезисы докладов III семинара, стр. 23 — 25, СКТБ «Дезинтегратор», ТПО «Пигмент», Тамбов, 1984

13 - Ходаков Г. С.: Технологические проблемы механической активации порошков в процессе измельчения, УДА — технология, Тезисы докладов III семинара, стр. 6 — 8, СКТБ «Дезинтегратор», ТПО «Пигмент», Тамбов, 1984

14 - Мухачев В. М.: Быстрые капли, Изд. «Московский рабочий», стр. 85 — 117, Москва, 1968

15 - Ходаков Г. С.: Тонкое измельчение строительных материалов, Изд. «Наука», Москва, 1972

16 - Дистлер Г. И., Каневский В. М.: О некотором общем механизме активации твердых и жидких систем, УДА — технология, Тезисы докладов III семинара, стр. 6 — 8, СКТБ «Дезинтегратор», ТПО «Пигмент», Тамбов, 1984