

## STLAČITEĽNOSŤ DREVNÝCH PILÍN

Miloš Matuš, Peter Križan

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Strojnícka fakulta, Ústav výrobných systémov, environmentálnej techniky a manažmentu kvality, Námestie slobody 17, 812 31 Bratislava, Slovenská republika, milos.matus@stuba.sk

*Partikulárna látka z biomasy akou sú drevné piliny je veľmi rôznorodá. Základným parametrom vypovedajúcim o lisovanej partikulárnej látke je jej stlačiteľnosť kvantifikovaná súčiniteľom stlačiteľnosti. Poznanie tohto súčiniteľa pre konkrétny materiál je základným predpokladom aplikácie rovníc stlačiteľnosti pri popise procesu lisovania a výpočtoch potrebného pracovného zaťaženia. Príspevok sa zaoberá metodikou stanovenia súčiniteľa stlačiteľnosti drevných pilín a realizovanými experimentmi na jeho kvantifikovanie pre borovicové piliny.*

Kľúčové slová: stlačiteľnosť, súčiniteľ stlačiteľnosti, drevné piliny, lisovanie

### PARTIKULÁRNA LÁTKA Z BIOMASY

Na priemyselné zhutňovanie biomasy do formy paliva je nevyhnutné materiál dezintegrovať na jemnú a pomerne homogénnu frakciu. Takto upravený materiál, či už ide o dendromasu, alebo fytomasu, má charakter a vlastnosti partikulárnej látky. Pre účely realizovaného výskumu bude ďalej uvažované predovšetkým s drevnými pilinami.

Partikulárna látka z biomasy je zložená zo vzájomne sa dotýkajúcich pevných častíc (pevnej fázy), z fázy kvapalnej a plynnej. Pevnú fázu tvorí drevná hmota (uvažované drevné piliny), kvapalnú voda a plynňú vzduch. Kvapalná a plynňá fáza zaplňuje póry skeletu tvoreného pevnými časticami. Množstvo kvapaliny môže byť veľmi malé a môže pozostávať iba z absorbovanej vodnej pary na povrchu tuhých častíc. Nakoľko sú pevné častice biomasy značne porézne, existujú popri týchto tzv. vonkajších póroch aj póry jednotlivých častíc povrchové (otvorené) a vnútorné (uzavreté). Povrchové póry zväčšujú povrch pevnej fázy, vnútorné ovplyvňujú niektoré základné fyzikálne vlastnosti, ako je hustota, pevnosť atď.

Pevné častice sa vzájomne dotýkajú. Existencia kontaktov obmedzuje voľnosť pohybu jednotlivých pevných častíc, t.j. ich pohybovú autonómiu, a tým podmieňuje pevnosť a tuhosť partikulárnej látky. Tá závisí na počte a pevnosti kontaktných väzieb, ktoré sú dôsledkom veľkosti, tvaru, drsnosti a pevnosti pevných častíc, povahy interakcie jednotlivých fáz, stavu partikulárnej látky atď. Tieto všetky činitele zahrňuje pojem štruktúra, jej heterogenita (striedanie vrstvičiek jemnejších a hrubších častíc, častíc rôzneho zloženia, tvaru, orientácie) sa označuje ako textúra, niekedy označovaná ako makroštruktúra. Najvýznamnejším rysom partikulárnych látok vo všeobecnosti je ich pretváranie vzájomným posúvaním pevných častíc (intergranulárne pretváranie). Stupeň pohybovej autonómie drevných pilín sa v deformačnom procese mení v závislosti od veľkosti napätia. S jeho zväčšovaním klesá stupeň pohybovej autonómie, až kým veľkosť napätia nepresiahne medzu pevnosti pevných častíc (pilín), kedy dochádza k ich dezintegrácii a následne rastu pohybovej autonómie.

Drevné piliny, ako partikulárnu látku z biomasy, možno tiež zaradiť do skupiny tzv. konsolidovaných látok, t.j. pevných látok, ktoré vzniknú spojením (väzbou, konsolidáciou) štruktúrnych prvkov – pevných častíc. Pri drevných pilinách sa procesom konsolidácie rozumie prepletanie, zhutňovanie a lisovanie častíc, nakoľko sa jedná prevažne o ploché častice.

Ako vidno z obrázka 1, bežná partikulárna látka z drevnej biomasy vhodná priamo na lisovanie má vo voľne sypanom stave vysokú pórovitosť. Tá sa zväčšuje úmerne s veľkosťou zŕn a so zvyšovaním podielu väčšej frakcie. Od tejto vlastnosti látky sa odvíja objemová hmotnosť partikulárnej látky a následne aj budúceho výlisku.

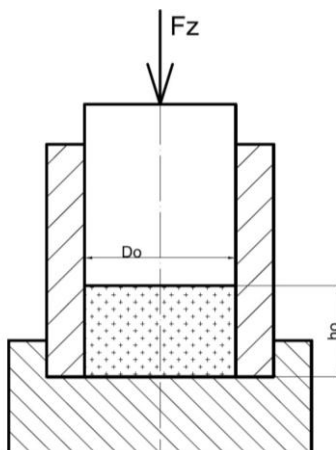


Obr. 1 Partikulárna látka z drevnej biomasy určená na lisovanie

### STLAČITEĽNOSŤ PARTIKULÁRNEJ LÁTKY Z BIOMASY A METODIKA STANOVENIA SÚČINITEL'A STLAČITEĽNOSTI

Stlačiteľnosť partikulárnej látky z biomasy je významná vlastnosť, ktorá sa prejavuje pri skladovaní sypkých materiálov, ich transporte, zhutňovaní a rade ďalších technologických operácií. Pri stlačovaní partikulárnej látky dochádza k zhutňovaniu materiálu. Výrazne sa znižuje objem partikulárnej látky, čo vyvolá značné zvýšenie objemovej hmotnosti a zníženie pórovitosti. Stlačovanie sypkých a málo súdržných látok prebieha v dvoch stupňoch. V prvom stupni stlačovania dochádza k najvýraznejšej zmene objemovej hmotnosti. Zaplňajú sa póry medzi časticami. Menšie častice sa dostávajú medzi väčšie, čím dochádza k zníženiu pórovitosti partikulárnych látok. Veľkosť zaplňovaných pórov je približne rovnaká ako veľkosť základných častíc. Poklesom pórovitosti sa znižuje pohybová autonómia častíc až úplne zanikne a vtedy stlačovanie partikulárnych látok prechádza do druhého stupňa. V druhom stupni stlačovania dochádza tiež k zmene objemu, ktorá je však podstatne menšia ako v prvom stupni. Táto zmena je spôsobená zaplňovaním pórov dutín, ktoré sú menšie ako veľkosť základných častíc tým, že v prípade tvrdých častíc dochádza k ich deformácii. Pri vysokých tlakoch sa pórovitosť môže znížiť až na nulovú hodnotu. V takomto prípade sa v sústave vytvoria pevné kontakty medzi časticami a z partikulárnej látky sa stane spojitá.

Stlačiteľnosť partikulárnych látok sa meria pomocou oedometra. Valcová vzorka partikulárnej látky  $h_0$ , priemeru  $D_0$  je v prstenci cez piest zaťažený osovou zhutňovacou silou  $F_z$  (obr. 2). Pri dostatočne tuhom prstenci sa predpokladá že priečne rozšírenie vzorky je nulové a dochádza len k objemovému pretvoreniu partikulárnej látky v smere osi prstencu t.j. ide o jednoosové stlačovanie. Oedometrickou skúškou sa určí krivka stlačiteľnosti partikulárnej látky, ktorá vyjadruje závislosť zhutňovacej sily  $F_z$ , od posuvu piesta oedometra  $y$ , t.j. stlačenia vzorky.



Obr. 2: Schéma oedometra

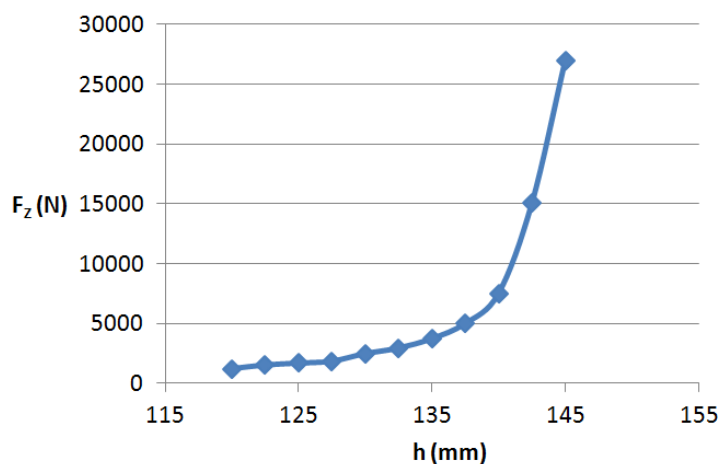
Sila na piest oedometra je vyvinutá pohybom priečnika trhačky. Stlačovanie sa uskutočňuje pri konštantnej rýchlosti posuvu piesta oedometra. Zvyšovanie zhutňovacej sily v závislosti od pohybu piesta sa zaznamenáva graficky. Údaje pre vyhodnotenie stlačiteľnosti partikulárnej látky sa získajú zo závislosti zhutňovacej sily od posuvu piesta oedometra. Hodnoty z krivky stlačiteľnosti sa pretransformujú do výsledného grafu ako  $\log \sigma/\sigma_0$  v závislosti na  $\log \rho/\rho_0$ , ktorý sa aproximuje na priamku. Súčiniteľ stlačiteľnosti  $K$  sa určí ako smernica tejto priamky.

### EXPERIMENTÁLNE STANOVENIE SÚČINITELĽA STLAČITEĽNOSTI DREVNÝCH PILÍN

Experimenty boli realizované za účelom zistenia súčiniteľa stlačiteľnosti pre materiál používaný na výrobu tuhých biopalív vyhovujúcich európskej norme EN 14 961. Týmto materiálom boli borovicové piliny o veľkosti frakcie  $\leq 0,5$  mm (obr. 3). Pri experimentoch boli merané hodnoty zhutňovacej sily  $F_z$  a posuvu piesta oedometra  $h$ . Z nich bola vytvorená krivka stlačiteľnosti zobrazená na obrázku 4.



Obr. 3 borovicové piliny o veľkosti frakcie  $\leq 0,5$  mm, výlisky



Obr. 4: Krivka stlačiteľnosti borovicových pilín s veľkosťou frakcie  $\leq 0,5$  mm

Pre matematický popis jednoosej stlačiteľnosti drevných pilín v oedometri bol použitý zjednodušený typ Balshinovej rovnice stlačiteľnosti, ktorá má nasledovný tvar (1.1).

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = A \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^K \quad (1.1)$$

Kde:

$\sigma$  – tlakové napätie v počítanom bode

$\sigma_0$  – počiatočné tlakové napätie (vo vzťažnom – začiatočnom bode merania)

$\rho$  – hustota partikulárnej látky v počítanom bode

$\rho_0$  – počiatočná hustota partikulárnej látky (vo vzťažnom–začiatočnom bode merania)

$K$  – koeficient stlačiteľnosti partikulárnej látky

$A$  – konštanta upravujúca tvar funkcie

Po úpravách dostáva rovnica (1.1) tvar, ktorý má podobu smernicovej rovnice priamky, kde číslo  $K$  predstavuje smernicu priamky a jeho hodnota je rovná tangensu uhla priamky s kladným smerom osi  $x$ . Hľadaná hodnota koeficientu stlačiteľnosti je práve smernica k odvodennej priamke (1.2).

$$\log \frac{\sigma}{\sigma_0} = K \cdot \log A + K \cdot \log \frac{\rho}{\rho_0} \quad (1.2)$$

Aby bolo možné vypočítať koeficient stlačiteľnosti  $K$  z diagramu závislosti  $\log \frac{\sigma}{\sigma_0}$  a  $\log \frac{\rho}{\rho_0}$  najprv bolo nutné zostrojiť diagram závislosti zaťaženia  $\sigma$  (tlakov) a hustoty  $\rho$ . Jednotlivé hodnoty zaťaženia  $\sigma$  v daných bodoch diagramu boli prepočítané ako podiely pôsobiacich síl v každom bode na konštantnú kruhovú plochu  $S_0$  komory oedometra s priemerom  $d_0 = 20 \text{ mm}$ .

Zaťaženia v jednotlivých bodoch diagramu boli vypočítané zo vzťahu (1.3).

$$\sigma = \frac{F_z}{S_0} \quad (1.3)$$

Obdobným spôsobom bola vypočítaná hustota partikulárnej látky v jednotlivých bodoch diagramu zo vzťahu (1.4),

$$\rho = \frac{m_0}{V_0} \quad (1.4)$$

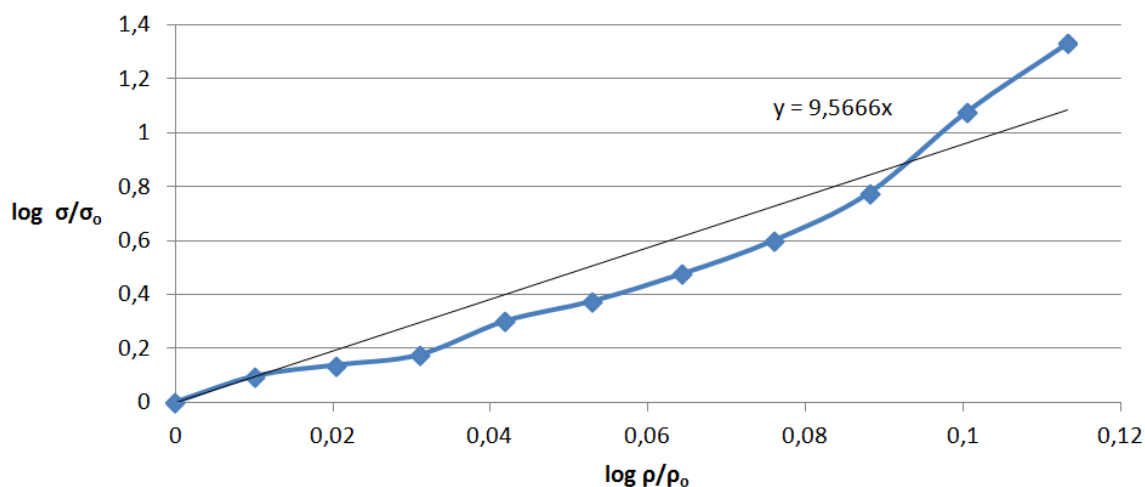
kde  $m_0 = 0,05221 \text{ kg}$  je hmotnosť borovicových pilín v počiatočnom stláčanom objeme  $V_0 = 7,18885 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ . Všetky namerané a následne vypočítané hodnoty sú uvedené v tabuľke 1. Následne bol vytvorený graf závislosti pomerov zaťaženia  $\frac{\sigma}{\sigma_0}$  a hustôt  $\frac{\rho}{\rho_0}$ , kde  $\sigma_0$  a  $\rho_0$  sú tzv. vzťažné hodnoty t.j. najnižšie hodnoty zaťaženia a hustoty získané meraniami na oedometri (obr. 5).

Tab. 1 Namerané a vypočítané hodnoty

Zhutňovacia sila $F_z$ (N)	Posuv piesta oedometra $h$ (mm)	Objem ( $\text{m}^3$ )	Hustota ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\sigma/\sigma_0$	$\rho/\rho_0$	Log $\sigma/\sigma_0$	Log $\rho/\rho_0$
1256	120	$3,42085 \cdot 10^{-5}$	365,7275264	1	1	0	0
1570	122,5	$3,34235 \cdot 10^{-5}$	374,3171677	1,25	1,023488	0,09691	0,010082719
1727	125	$3,26385 \cdot 10^{-5}$	383,3199936	1,375	1,048097	0,138303	0,020401438
1884	127,5	$3,18535 \cdot 10^{-5}$	392,7665517	1,5	1,073936	0,176091	0,03097854
2512	130	$3,10685 \cdot 10^{-5}$	402,6904771	2	1,101088	0,30103	0,041822134
2983	132,5	$3,02835 \cdot 10^{-5}$	413,1288921	2,375	1,129629	0,375664	0,052935919
3768	135	$2,94985 \cdot 10^{-5}$	424,1228708	3	1,15969	0,477121	0,06434209
5024	137,5	$2,87135 \cdot 10^{-5}$	435,717979	4	1,191376	0,60206	0,076048816
7536	140	$2,79285 \cdot 10^{-5}$	447,9649054	6	1,224871	0,778151	0,088090525
15072	142,5	$2,71435 \cdot 10^{-5}$	460,9202022	12	1,260308	1,079181	0,100476842
27004	145	$2,63585 \cdot 10^{-5}$	474,6471588	21,5	1,297823	1,332438	0,113215624

Na záver bola výsledná krivka závislosti hodnôt  $\log \frac{\sigma}{\sigma_0}$  a  $\log \frac{\rho}{\rho_0}$  nahradená štandardnou lineárnou aproximáciou (obr. 5), ktorej smernica je hľadaný súčiniteľ stlačiteľnosti  $K$ . Lineárna aproximácia bola zvolená na

základe priebehu závislostí veľmi podobnému lineárnemu. Ako už bolo vyššie uvedené, súčiniteľ stlačiteľnosti je práve smernica tejto priamky.



Obr. 5 Závislosť  $\log \sigma/\sigma_0$  a  $\log \rho/\rho_0$  po lineárnej aproximácii

Na základe vykonaných experimentov možno konštatovať, že súčiniteľ stlačiteľnosti borovicových pilín s veľkosťou frakcie  $\leq 0,5$  mm nadobúda hodnotu  $K = 9,569$ .

### VYUŽITIE SÚČINITEĽA STLAČITEĽNOSTI DREVNÝCH PILÍN V PRAXI

Súčiniteľ stlačiteľnosti drevných pilín je veľmi významný parameter popisujúci správanie sa tejto partikulárnej látky v procese lisovania do formy tuhých ušľachtilých biopalív. Technológií zhutňovania biomasy za účelom výroby tuhých biopalív je niekoľko. Vychádzajúc z matematického modelu popisujúceho tieto technológie a z poznania hodnoty súčiniteľa stlačiteľnosti konkrétneho druhu biomasy je možné vypočítať presné lisovacie sily, krútiace momenty a komplexné tlakové pomery procesu lisovania. Tieto údaje sú nevyhnutné pri návrhu a optimalizácii konštrukcie zhutňovacích strojov a ich funkčných častí. Vďaka týmto údajom bude možné optimalizovať konštrukciu strojov z hľadiska pevnostného, energetického, ako aj z hľadiska minimalizácie nákladov na ich výrobu.

### POĎAKOVANIE

Tento príspevok bol vytvorený realizáciou projektu "Výskum parametrov ovplyvňujúcich proces lisovania odpadovej biomasy do formy tuhých ušľachtilých biopalív" (číslo zákazky 7024), Program na podporu mladých výskumníkov finančne podporený Slovenskou technickou univerzitou v Bratislave.

### POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] FEDA, J. Základy mechaniky partikulárných látok. Praha : Academia, 1977.
- [2] BALŠIN, M.J. Naučnyje osnovy poroškovoj metallurgii i metallurgii volokna. Moskva : Metallurgija, 1972.
- [3] EN 14961: Solid biofuels - Fuel specifications and classes (Multipart standard)
- [4] KRIŽAN, P., MATÚŠ, M. Vplyv druhu lisovaného materiálu pri zhutňovaní. In: Energetika a životní prostředí 2009 : Sborník přednášek z mezinárodní vědecké konferenci. - Ostrava, 7.-8.9. 2009. - Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita v Ostravě, 2009. - ISBN 978-80-248-2061-3.