

Vplyv zrnitosti a štruktúry na pevnosť popolčeka

ILDIKO HAMAROVÁ*, RÓBERT KUBICA**, MIRKO MATYS***

* Dopravoprojekt, Kominárska ul. 2—4, 831 04 Bratislava

** Výskumný ústav inžinierskych stavieb, Lamačská cesta 8, 815 37 Bratislava

*** Prírodovedecká fakulta, Katedra inžinierskej geológie, Zadunajská 15,
850 01 Bratislava

(6 obr. a 2 tab. v texte)

Doporučené 26. 1. 1983

Влияние зернитости и структуры пепла на прочность скольжения

В лабораторных условиях было установлено, что зёрна менее 0,25 мм имеют в большинстве гладкую поверхность и шаровидную или эллипсоидную форму. Прочность скольжения 30—32°. Зёрна у которых размер равен или больше 0,25 мм, имеют шероховатую поверхность и неправильную удлинённую форму. Прочность скольжения возрастает пропорционально с увеличением диаметра зёрн. В зависимости на процентном составе отдельных фракций зависит и действительная прочность скольжения пепла.

Influence of grain size and structure on the shear strength of fly ash

The influence of mechanical texture and structure on shear strength of fly ash has been investigated using laboratory tests. Smaller grains of up to 0.25 mm size have mostly smooth surfaces and spheroidal to ellipsoidal shapes. Their shear strengths attain as high as 30—32°. Larger grains have rough chippy surfaces and irregular elongated shapes. The shear strength of fly ash increases in direct proportions to increasing diameters of ash particles. The effective shear strength of the fly ash mass depends therefore on its mechanical texture.

V súčasnom období vedeckotechnického rozvoja zostáva energetická základňa rozhodujúcim článkom rozvoja národného hospodárstva. V ČSSR sa prevažná časť elektrickej energie získava spaľovaním tu-

hého paliva v tepelných elektrárnach. Tým, že sa spaľuje domáce kamenné a hnedé uhlie, ako aj lignit s nižšou výhrevnosťou a s vysokým obsahom popolovín, je ČSSR v mernej produkcii popolčeka na

jedného obyvateľa za rok (1040 kg) na prvom mieste na svete (Douša — Polický, 1979).

Jedným z novších problémov, ktorým sa pri tvorbe a ochrane životného prostredia zaoberá inžinierska geológia, je skladovanie tuhého odpadu — antropogénnych sedimentov, teda aj popolčeka. Popolček sa prevažne skladuje na obrovských skládkach — odkaliskách. Úlohou inžinierskej geológie je v spolupráci s hydrogeológiou výber vhodných lokalít na ich budovanie a v spolupráci s geotechnikou zase určovať vlastnosti popolčeka, aby projektant mohol navrhnuť okalisko zaberajúce čo najmenšie územie, ale aby sa na ňom dalo skladovať čo najväčšie množstvo odpadu.

Pri návrhu popolčekaových hrádz je jednou z najdôležitejších hodnôt šmyková pevnosť popolčeka. V prevažnej miere sa určuje v laboratórnych podmienkach (pomocou terénnych skúšok — presiometrických — určoval šmykovú pevnosť Matys — Letko, 1980).

Na veľkosť šmykovej pevnosti zisťovanej v laboratórnych podmienkach vplyva rad faktorov, napr. tvar a veľkosť šmykového prístroja, rýchlosť šmykovej skúšky, spôsob zabudovania vzorky a i. V príspevku sa zaoberáme vplyvom zrnitosti a štruktúry popolčeka na veľkosť šmykovej pevnosti.

Zisťovanie šmykovej pevnosti v laboratórnych podmienkach

V súčasnosti je rad prístrojov a metodík na zisťovanie pevnostných charakteristík zemín a inertných materiálov v laboratórnych aj poľných podmienkach, ale vzťahy medzi metodami, otázky vplyvu tvaru a veľkosti vzorky, určovanie optimálnych hraníc ich použitia, stanovovanie návrhových hodnôt a pod. nie sú doteraz náležité

vyriešené. V rámci experimentálnych prác sme venovali pozornosť aj niektorým z týchto otázok a získané poznatky uvádzame v príspevku.

Použité šmykové prístroje a metodika skúšky

V rámci experimentálnych prác na zisťovanie šmykovej pevnosti popolčeka v laboratórnych podmienkach sme použili tri typy čelustových šmykových prístrojov s rozličným tvarom a veľkosťou vzorky. Základné parametre prístrojov sú uvedené ďalej.

Vzorka sa vkladá do zopnutých čelustí prístroja tak, že jej strednica je v úrovni styku čelustí. Tým je vopred určená šmyková plocha vzorky.

Vzorky bývajú valcového alebo hranolového tvaru. Vzájomný pomer výšky vzorky k jej priemeru (hrane) sa volí 1:3 až 1:5 na minimalizovanie trenia po obvode vzorky. Maximálne zrno skúšaného materiálu nemá byť väčšie ako 1/10 výšky vzorky.

Zvisle sa vzorka zafazuje závažím na zafazovacom pieste alebo pomocou pákového prevodu. Na príslušný rozsah zafazenia sa používa veľkosť závažia zodpovedajúca kontaktnému napätiu na povrchu vzorky.

Vodorovné šmykové napätie sa vyváža mechanicky na spodnú čelusť, ktorá je pohyblivá. Rýchlosť pretvárania vzorky sa volí podľa druhu materiálu (typu zeminy). Odporúčané hodnoty rýchlosti pre jednotlivé typy zeminy uvádza ČSN 72 1024.

V priebehu skúšky sa zisťujú hodnoty normálovej sily (je statická), tangenciálnej sily vznikajúcej na predurčenej šmykovej ploche, vodorovné a zvislé pretvorenie vzorky a čas trvania skúšky. Získané hodnoty sú podkladom na výpočet pevnostných charakteristík skúšanej vzorky a zostrojenie diagramu pretrvávania.

Opis prístrojov

Na katedre inžinierskej geológie sme šmykové skúšky vykonali na klasickom šmykovom prístroji poľskej výroby (rozmery čelustí 6×6 cm, max. rýchlosť ušmyknutia 2 mm.min⁻¹).

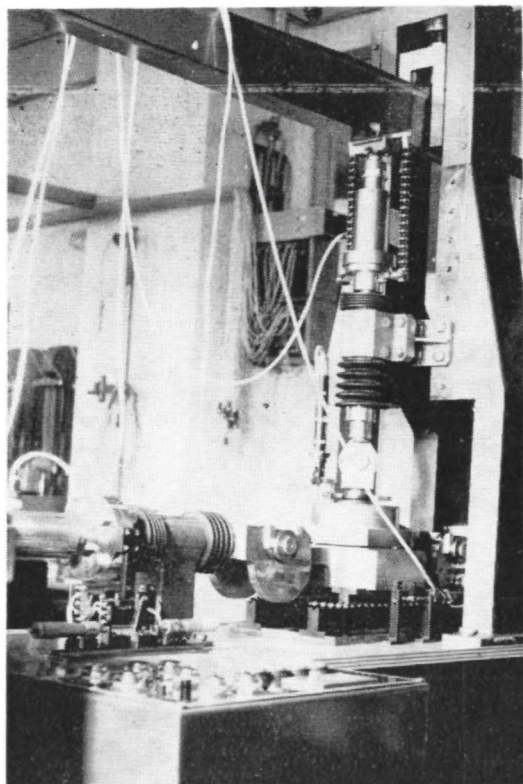
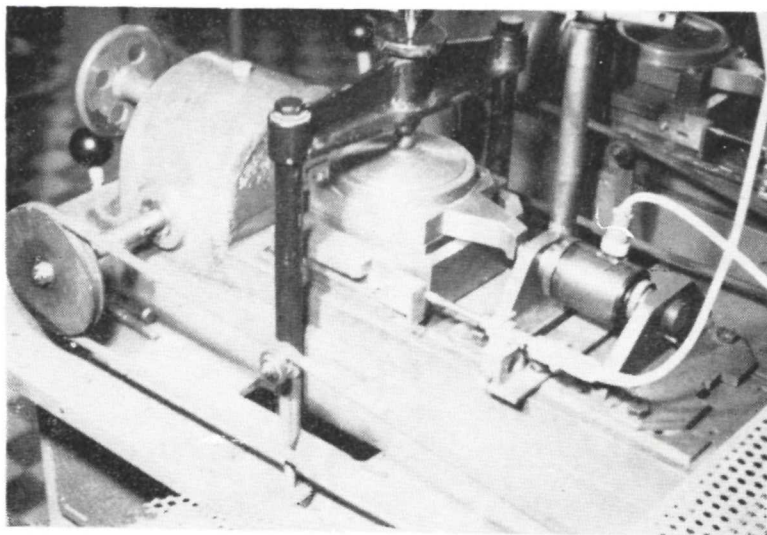
Vo Výskumnom ústave inžinierskych stavieb (ďalej VUIS) sa používajú dva typy čelustových šmykových prístrojov. Sú novšej konštrukcie, a preto ich opisujeme podrobnejšie:

1. šmykový prístroj SP-3P-4 (štvorstolicový, obr. 1)
2. univerzálny — označenie SP-2-U (cyklický, obr. 2)

Základné technické údaje sú v tab. 1.

Obr. 1. Šmykový prístroj SP-3P-4 (štvorstolicový)

Fig. 1. Shear strength tester SP-3P-4 (four-stand)



Obr. 2. Univerzálny šmykový prístroj SP-2-U (cyklický)

Fig. 2. Universal shear tester SP-2-U (cyclic)

1. Prvý typ prístroja je zo štyroch samostatných čeľustových prístrojov napojených na spoločný pohon. Motor je pevne spojený s prevodovkou, na ktorú je napojený prevodový hriadeľ. Z hriadeľa sa rotačný pohyb prenáša refazovými prevodmi do prevodoviek jednotlivých prístrojov, kde sa mení na posun.

Rýchlosť posunu možno plynulo nastavovať tyristorovým regulátorom podľa požiadaviek skúšky. Celkovo možno voľiť 18 stupňov rýchlosti.

Hodnoty meraných veličín sa v priebehu skúšky zaznamenávajú priamym odčítaním číselníkových odchýlkomerov, elektrickými snímačmi síl a posunov zapojených na meráciu ústredňu. Tá dáva výstupy v číslicovej forme na diernej páske. Na vlastný výpočet pevnostných charakteristík je vo VÚIS vypracovaný program pre počítač HP 9 100 A.

Snímač sily je konštrukcie VÚIS, snímače zvislého posunu sú typu LTD-PD 20 a vodorovného posunu typu ETHER.

2. Univerzálny šmykový prístroj je konštruovaný na rovnakom princípe ako prvý typ. Ide o čeľustový šmykový prístroj upravený na cyklické namáhanie vzorky a používa sa na určovanie tzv. zvyškových (reziduálnych) pevností pri skúške materiálov na únavu.

Základné údaje o prístroji sú v tab. 1. Vzorka má valcovitý tvar s priemerom 120 mm, výšku 20, resp. 30 mm.

Zvislé zafazovanie sa na vzorku prenáša cez zafazovací piest, ložiská, rameno a protizávažia pri prevodovom pomere 1:8.

Na meranie sily sa používa snímač vlastnej konštrukcie vhodne upravený na snímanie

fahu aj tlaku. Výstupný signál je pri menovitej záťaži 10 mV.

Snímače posunu sú indukčné (na priamočiary posun) — typ LINOTAST F 210, s maximálnym rozsahom 10 mm. Výstupný signál pre automatické snímanie posunu je 1 V/mm.

Priebeh síl a posunov sa registruje pomocou meracej ústredne Solatron so záznamom vo voliteľnom rozsahu (minimálny interval záznamu je 20 s).

Príprava vzoriek na šmykové skúšky

Pevnostné charakteristiky popolčeka sme určovali na umelo pripravených vzorkách odvođenou šmykovou skúškou v čelustových prístrojoch.

Vzorky sme pripravovali z vysušeného popolčeka z dočasného odkaliska ENO Nováky vybratého priamo z odberných valcov. Aby sa čiastočne napodobnilo prirodzené uloženie popolčeka v odkalisku, predovšetkým vrstvitosť, ktorá je pre naplavované popolčeky charakteristická, zabudúval sa popolček do uvedených šmykových prístrojov v troch vrstvičkách zhutňovaných iba statickou pritlačnou silou cca 150 N. Takáto vzorka bola uložená medzi ryhované dosičky zabezpečujúce správne rozloženie napätia na vzorke. Vzorka sa skúšala pri 4 zaťažovacích stupňoch: $\sigma = 0,05$ MPa, 0,1 MPa, 0,15 MPa a 0,2 MPa.

Výsledky meraní a diskusia

Vplyv zrnitosti na šmykovú pevnosť

Závislosť uhla vnútorného trenia φ a súdržnosti c od granulometrického zloženia

sme sledovali v laboratóriu katedry na vysušenom popolčeku pri šiestich zrnitostných frakciách (0—0,125 mm, 0,125—0,250 mm, 0,250—0,5 mm, 0,5—1 mm, 1—2 mm a 2—4 mm) pripravených preosievacou metódou. Na zjednodušenie každú frakciu ďalej charakterizujeme iba jej spodnou hranicou intervalu.

V laboratóriu mechaniky zemín VÚIS sa táto závislosť sledovala pri frakciách 0,5—1 mm, 1—2 mm a 2—4 mm. Pri ďalších frakciách sa volila vlhkosť blízka vlhkosti v odkalisku a výsledky sú v práci I. Hamarovej (1982).

V tab. 2 sú hodnoty uhla φ a súdržnosti c v závislosti od zrnitosti. F. J. Meyers — R. Pichumani — B. Kopples (1976) uskutočnili množstvo šmykových skúšok na popolčeku z 27 odkalísk a vo všetkých prípadoch dostali malé hodnoty súdržnosti. Popolček sa pokladá za nesúdržný materiál a malé hodnoty kohézie sa pripisujú vplyvu nepravnej súdržnosti.

Výsledky meraní šmykovej pevnosti rozličných frakcií popolčeka potvrdzujú pri nesúdržnej zemine (piesok, štrk) známy fakt, že so zväčšujúcim sa priemerom zŕn rastie uhol vnútorného trenia φ . Pri použití poľského šmykového prístroja sme dostali lineárnu závislosť medzi φ a $\varnothing$ zŕn

Základné technické údaje šmykových prístrojov
Basic technical parameters of shear testers

Tab. 1

Základný parameter		Typ šmykového prístroja	
		SP-3P-4	SP-2-U
Priemer vzorky	(mm)	120	120—150
Výška vzorky	(mm)	30	20—30
Max. zvislá sila	(kN)	6,5	19,613
Max. vodorovná sila	(kN)	4,0	11,680
Pracovný posun	(mm)	25	25
Maximálny posun	(mm)	35	56
Rýchlosť posunu min./max.	(mm . hod ⁻¹)	0,180/1,700	0,120/900
Použitá rýchlosť posunu	(mm . min ⁻¹)	2	2

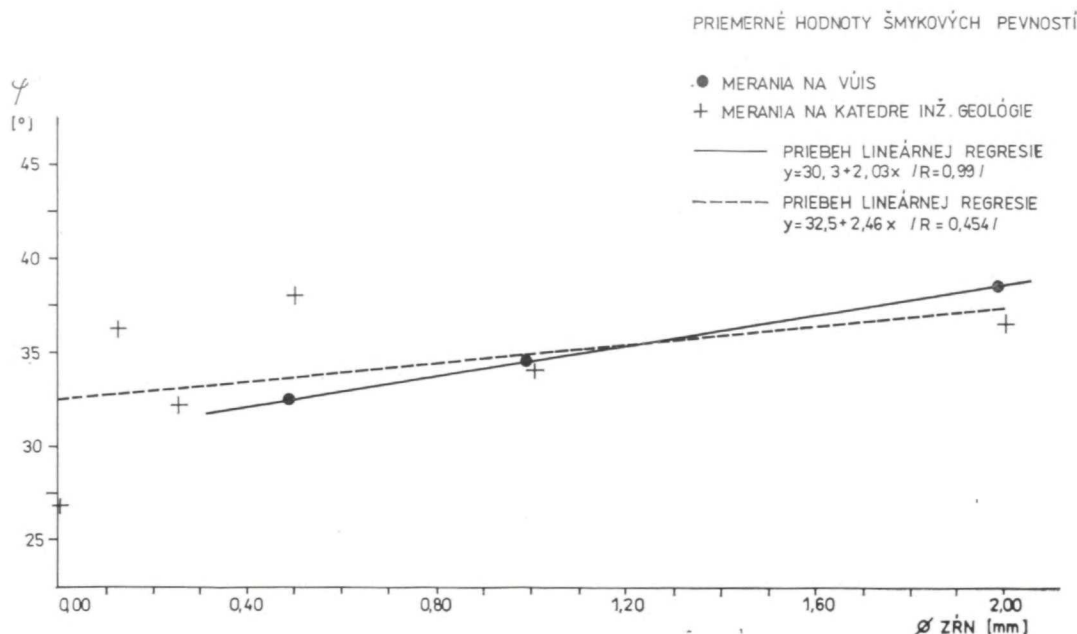
Hodnoty parametrov šmykovej pevnosti v závislosti od zrnitosti
 Values of shear strength in relation to the mechanical texture

Tab. 2

Vlastnosť Priemer zrn (mm)	Laboratórium katedry IG		Laboratórium VÚIS		
	φ (°)	c (MPa . . 10 ⁻²)	φ (°)	c (MPa . . 10 ⁻²)	ρ_d (g . . cm ⁻³)
0 — 0,125	26,94	3,65	—	—	—
0,125—0,250	36,43	3,65	—	—	—
0,250—0,5	32,22	4,79	—	—	—
0,5 — 1,0	38,18	3,95	32,30	5,98	0,68
1,0 — 2,0	34,18	5,47	34,40	6,35	0,51
2,0 — 4,0	36,58	6,39	38,40	6,18	0,52

$Y = 32,5 + 2,46X$ pri korelačnom koeficiente $R = 0,454$. Pri použití prístroja SP-3P-4 a SP-2-U sme vypočítali lineárnu závislosť $Y = 30,3 + 2,03X$ pri korelačnom koeficiente $R = 0,99$ (obr. 3). Rozdiely vo výsledkoch vychádzajú z nerovnakého tvaru a rozmerov šmykových prístrojov

a z obťažnosti rovnakým spôsobom umiestniť popolček do prístrojov. Na objasnenie vplyvu štruktúry popolčeka na šmykovú pevnosť φ sme uskutočnili aj rozbor tvaru a charakteru zrn popolčeka aj jednotlivých frakcií.

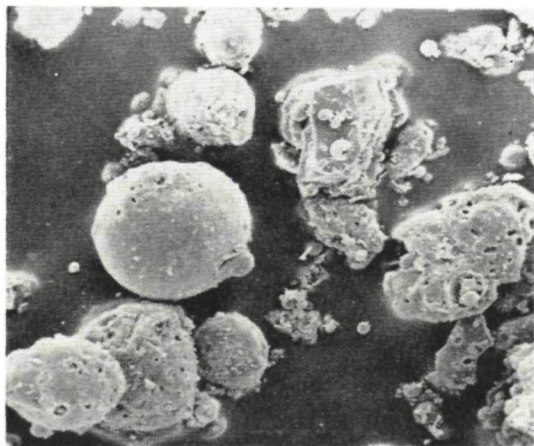


Obr. 3. Graf závislosti uhla vnútorného trenia φ od zrnitosti
 Fig. 3. Correlation plot of internal friction angle φ and grain size

Vplyv štruktúry na šmykovú pevnosť

Všeobecne nepravidelný tvar zŕn popolčeka rozličnej veľkosti (od mm po μm) v prevažnej miere závisí od pôvodného zloženia používaného druhu paliva a v menšej miere od meniaceho sa spaľovacieho procesu. Pri menších časticiach, okrem výnimiek, prevláda guľovitý (okrúhly) tvar relatívne hladký, ojedinele pórovitý povrch, pričom vonkajšie póry úzko súvisia s vnútornými (obr. 4). Takéto guľaté zrná sú pri makroskopickom pozorovaní pomerne lesklé. Nepravidelný tvar je charakteristický pre väčšie zrná. Zastúpené sú najmä pretiahnuté (pozdĺžne), vrstvovité zrná s ostrými hranami a ploché zrná so zaoblenými okrajmi. Povrch takýchto častíc je pórovitejší, značne korodovaný a pod mikroskopom sa javí ako drsný (obr. 4). Makroskopicky sú takéto štruktúrne jednotky matné.

Minerálne zloženie popolčeka materiálu závisí od chemického zloženia uhlia



Obr. 4. Stereoskanová mikrosnímka popolčeka (neporušená vzorka z odkaliska ENO, k. p. Zemianske Kostoľany). Zväčš. $230\times$
Fig. 4. Scanning electron micrograph of the fly ash (undisturbed sample from the Nováky Electric Plant mud settling pond, Zemianske Kostoľany, magn. $\times 230$)

a je premenlivé. Pozoruhodné je značné množstvo kremeňa (15–20 %; pri skrížených nikoloch undulózne zhášal), príp. jeho modifikácii (α -kremeň) alebo aj Si^{4+} — iónov v sklovitej forme.

Ako štruktúra, tvar, veľkosť a charakter povrchu zŕn popolčeka ovplyvňujú jeho mechanické správanie sa, možno vysvetliť z mikrosnímkov zrnitostných frakcií.

V popolčeku so zrnitosťou pod 0,125 mm sú zastúpené prevažne častice guľovitého (elipsovitého), ojedinele aj nepravidelného tvaru. Ich povrch je hladký a málo pórovitý. Popolček tejto zrnitostnej frakcie má pomerne malú šmykovú pevnosť, a to napriek tomu, že s postupným zmenšováním sa častice (spravidla pod 0,1 mm; Swedes, 1968, udáva hranicu 100 až 250 μm), rastie jej merný povrch, a teda aj povrchová aktivita, pričom sa uplatňujú povrchové sily pri vytváraní slabej adhézie (Fedá, 1977).

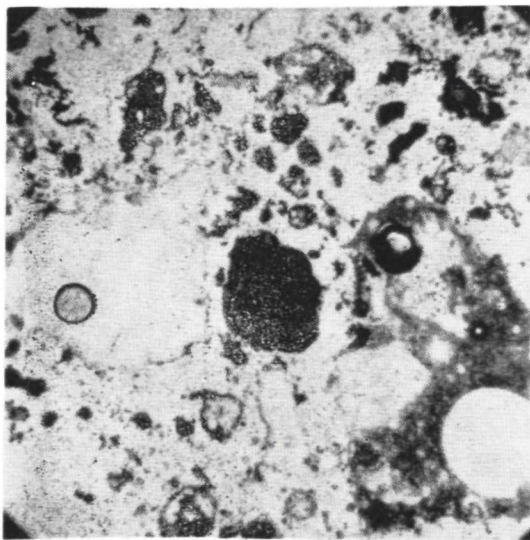
V zrnitostnej frakcii 0,125–0,250 mm rastie pórovitosť a drsnosť povrchu, ako aj nepravidelnosť tvaru častíc. Jednotlivé zrná si zachovávajú mierne pretiahnutý guľovitý tvar, ale ich povrch je menej hladký. Prejavuje sa to na raste hodnôt parametrov šmykovej pevnosti v porovnaní s predchádzajúcou frakciou.

Ďalším narastaním veľkosti zŕn od 0,250 mm po 2 mm až 4 mm sa postupne mení charakter ich povrchu a tvar, a to tak, že sa zrná nepravidelnejšieho tvaru (napr. guľaté) objavujú izolovane iba veľmi zriedkavo alebo sa neobjavujú vôbec. Možno ich však pozorovať na povrchu nepravidelnejších pozdĺžnych zŕn ako častice veľmi malých rozmerov, zvyčajne iba niekoľko μm . Ich povrch je drsnejší, korodovanejší. Popolček prevažne zo zŕn s opísanými štruktúrnymi osobitosťami dosahuje vyššie hodnoty uhla vnútorného trenia φ .

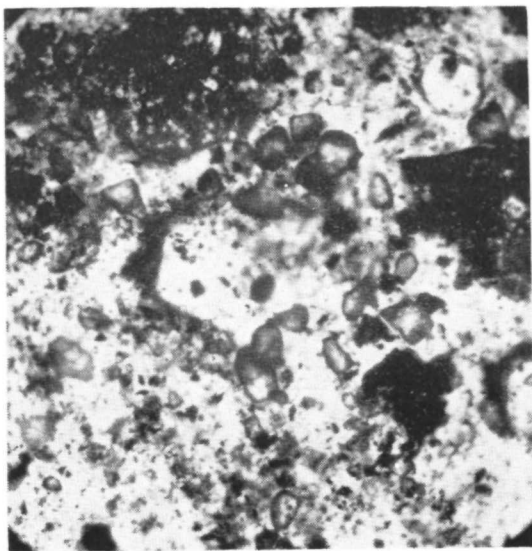
Percentuálne zastúpenie hladkých a drsných zŕn v rámci frakcie a zastúpenie jednotlivých frakcií vo vzorke popolčeka je náhodné, závisí od kvality spaľovaného

uhlia, od spaľovacieho procesu, od miesta uloženia v odkalisku (vzdialenosti od plaviacich zariadení) a pod. Čím viac jemnozrnných zŕn (guľatých a hladkých) popolček obsahuje, tým je jeho šmyková pevnosť menšia (do $30-32^\circ$) a opačne.

Pevnosť popolčeka závisí od intergranulového trenia. Pri vzájomnom posune (klzanie častíc), najmä v zóne porušovania v šmykovom prístroji, sa jednotlivé zrná drvčia (intragranulové trenie), a teda sa štruktúrne jednotky popolčeka zmenšujú. Rozdiely medzi uvedenými mikrovýbrusmi sú zreteľné (obr. 5, 6), ale pri súčasnej metóde prípravy vzoriek na mikrovýbrusy bolo ťažko dokázať, či zhľuk častíc v pravej strane obr. 6 je výsledkom dezintegrácie (rozdrvenia) väčšieho uhoľného zrna, alebo ho spôsobilo náhodné nahromadenie uhoľných častíc.



Obr. 5. Mikrovýbrus popolčeka pred šmykovou skúškou. Zväčš. $51\times$
Fig. 5. Thin section of fly ash before shear test, magn. $\times 51$



Obr. 6. Mikrovýbrus popolčeka po šmykovej skúške. Zväčš. $97\times$
Fig. 6. Thin section of fly ash after shear test, magn. $\times 97$

Záver

V príspevku sme poukázali na vplyv zrnitosti a štruktúry na šmykovú pevnosť popolčeka. Zrná menšie ako $0,250\text{ mm}$ majú prevažne guľovitý, resp. elipsoidný tvar a hladký povrch. Frakcie od $0,250\text{ mm}$ do 4 mm majú nepravidelný tvar, najmä pretiahnutý, doštičkovitej štruktúry a drsný povrch. Hladšie — menšie zrná ($< 0,250\text{ mm}$) majú menšiu priemernú šmykovú pevnosť (φ do $30-32^\circ$), väčšie zrná, drsnejšie, majú vyššiu priemernú šmykovú pevnosť ($\varphi > 32^\circ$). Svedčia o tom skanovacie snímky obr. 4 a výsledky šmykových skúšok obr. 3.

Recenzoval V. Letko

LITERATÚRA

- ČSN 72 1024: Laboratórne stanovenie šmykovej pevnosti zemín odvodenou krabicovou skúškou.
- ČSN 83 0910: Odkalište.
- Douška, K. — Polický, K. 1977: Likvidace popelů z energetických výroben. *Praha, SNTL*.
- Feda, J. 1977: Základy mechaniky partikulárných látek. *Praha, Academia, NČSAV*.
- Hamarová, I. 1982: Šmyková pevnost popelčekov. *Manuskript — PFUK*.
- Klabena, P. — Menzelová, O. 1975: Zaistovanie šmykovej pevnosti zemín pri cyklickom namáhaní. *Bratislava VUIS, 84*.
- Matys, M. — Letko, V. 1980: Sledovanie fyzikálno-mechanických vlastností popolčekov na odkališti Elektrárne Nováky. *Manuskript — PFUK*.
- Meyers, F. J. — Pichumani, R. — Kapples, B. 1976: Fly ash a highway Construction material. *Washington, U. I. Department of Transportation*.
- Schwedes, J. 1968: Fließverhalten von Schüttgütern in Bunnern. *Weiheim. Verl. Chemie*.

Influence of grain size and structure on the shear strength of fly ash

ILDIKÓ HAMAROVÁ, RÓBERT KUBICA, MIRKO MATYS

Prepondary portion of electrical energy in Czechoslovakia is produced by combustion of solid fuels. The generated solid waste is fly ash and it is stored in huge stockyard areas of mud settling ponds imposing considerable environmental problems. For the construction of a safe mud settling pond, the knowledge of shear strength of the fly ash is a first range requirement.

The influence of mechanical texture and structure of the fly ash on shear strength has been investigated using laboratory tests and different types of shear testing devices.

The common shear tester of Polish production (jaw size of 6×6 cm) has been used and tests were made also on SP-3P-4 and SP-2-U devices designed by the Engineering Construction Research Institute. Results of tests

on different grain size fractions of fly ash samples testify that the increasing grain size of fly ash influences also the increase of the angle of internal friction (fig. 3). Testing of structural influences on the size of shear strength revealed that grains lesser than 0.25 mm in size have smooth surfaces and spheroidal to ellipsoidal shapes. The 0.25 to 4 mm fraction contains particles with irregular elongated shapes and rough chippy surfaces. Smooth grains have shear strengths up to 30—32° whereas in grains of the 0.25 to 4 mm fraction the value is 32°.

The percentual share of the coarser fraction of the fly ash influences hence the angle value of the internal friction.

Preložil I. Varga