

STANISŁAW BEDNARZ\*, MIROŚLAW RZYCZNIK\*, ANDRZEJ GONET\*,  
KAROL SEWERYN\*\*

### RESEARCH OF FORMED LUNAR REGHOLIT ANALOG AGK-2010

### BADANIA WYTWORZONEGO ANALOGU GRUNTU KSIĘŻYCOWEGO AGK-2010

The results investigations of a soil having similar properties as lunar regolith performed at the Department of Drilling and Geoen지니어ing, Faculty of Drilling, Oil and Gas, AGH University of Science and Technology in Kraków are presented in this paper.

The research was carried out jointly with the Space Research Centre, Polish Academy of Sciences in Warsaw. The objective of the cooperation was to minimize the cost of tests of penetrator KRET, which will be used on the surface of the Moon.

The American lunar regolith (e.g. CHENOBI) was used as reference soil.

The most important properties were presented graphically in the form of figures and tables: grain size distribution, selected physical properties (bulk density, colour), selected mechanical parameters (shear strength, inner friction strength, cohesion).

As a result the first Polish lunar soil analog AGK-2010 was produced.

**Keywords:** Lunar regolith, lunar regolith analog, lunar soil analog

Pierwszy polski analog gruntu księżycowego, któremu nadano symbol AGK-2010, opracowano w Katedrze Wiertnictwa i Geoinżynierii na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Grunt ten został wytworzony w ramach współpracy z Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Celem badań było zminimalizowanie kosztów prowadzonych przez CBK PAN testów penetratora KRET (Seweryn i in., 2011), przygotowywanego do badań powierzchni Księżyca, poprzez zastąpienie, produkowanego w Stanach Zjednoczonych, analogu regolitu księżycowego, gruntem produkcji krajowej.

Próbę wzorcową stanowiły grunty o nazwie CHENOBI i JSC, produkowane w USA jako analogi regolitu księżycowego pobranego z powierzchni Księżyca przez misję Apollo 17 (Rybus, 2009), (Sibille i in., 2006).

Podstawowymi właściwościami, których wartości porównywano opracowując polski odpowiednik analogu regolitu księżycowego CHENOBI były: skład granulometryczny, właściwości fizyczne (gęstość

\* AGH UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, FACULTY OF DRILLING, OIL AND GAS, AL. A. MICKIEWICZA 30, 30-059 KRAKOW, POLAND.

\*\* SPACE RESEARCH CENTRE POLISH ACADEMY OF SCIENCES, UL. BARTYCKA 18A, 00-716 WARSZAWA, POLAND.

nasykowa, barwa), właściwości mechaniczne (wytrzymałość na ścinanie, kąt tarcia wewnętrzznego, kohezja), (PN-EN ISO 14688-1, 2006).

Istotną dla procesu badawczego wskazówkę stanowiła informacja, o ostrokrawędzistości ziarn minerałów regolitu księżycowego (Rybus T., 2009), (Sibille i in., 2006).

W artykule, w formie graficznej oraz zestawień tabelarycznych, zestawiono wartości najistotniejszych, dla porównań dwóch gruntów, wielkości takich jak: skład granulometryczny (rys. 1), charakterystyki krzywych uziarnienia (tab. 1), wybrane właściwości fizyczne, np. gęstość nasykowa, barwa (pkt. 2), parametry mechaniczne, takie jak wytrzymałość na ścinanie, kąt tarcia wewnętrznego i kohezja (rys. 2 i 3, tab. 2).

Istotnym osiągnięciem prowadzonych badań było uzyskanie polskiego zamiennika gruntu księżycowego, którego jednostkowy koszt wytworzenia jest wielokrotnie mniejszy od jednostkowego kosztu zakupu gruntu wzorcowego.

Opracowany, polski analog gruntu księżycowego AGK-2010 (zgłoszony do Urzędu Patentowego w 2011 r.) został z powodzeniem wdrożony w testach penetratora KRET w Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk w Warszawie.

**Słowa kluczowe:** regolit księżycowy, analog regolitu księżycowego, analog gruntu księżycowego

## Denotations

$c_s$	– cohesion, kPa,
$d$	– mesh, $\mu\text{m}$ ,
$R^2$	– determination coefficient,
$s$	– standard deviation, kg/l,
$\rho_o$	– soil bulk density, kg/l,
$\sigma$	– normal stress, kPa,
$\tau_f$	– shear strength, kPa,
$\Phi_s$	– inner friction angle, $^\circ$ .

## Introduction

The first Polish lunar soil analog, labeled AGK-2010, was designed at the Department of Drilling and Geoen지니어ing, Faculty of Drilling, Oil and Gas, AGH University of Science and Technology in Kraków (AGH-UST) in co-operation with the Space Research Centre, Polish Academy of Sciences in Warsaw (SRC PAS). The objective of the investigations was to minimize the cost of tests of a penetrator KRET performed by SRC PAS (Seweryn et al., 2011), which was prepared for tests on the Moon surface. During the tests, the American lunar analog was to be substituted by a Polish lunar regolith analog.

The soil CHENOBI and JSC produced as in the U.S.A. as analogs of lunar soil collected by Apollo 17 was used as references (Rybus, 2009; Sibille et al., 2006).

Among the basic properties, the values of which were compared when working on the Polish counterpart of lunar regolith analog CHENOBI were: grain-size distribution, physical properties (bulk density, colour), mechanical properties (shear strength, inner friction angle, cohesion), (PN-EN ISO 14688-1, 2006).

It was important for the study to know that the grains of the lunar regolith mineral were sharp-edged (Rybus, 2009; Sibille et al., 2006).

The results of analyses of reference lunar regolith analog CHENOBI sample and the Polish lunar soil analog AGK-2010 were compared.

## 1. Grain-size distribution

The grain-size distribution for the lunar regolith analog CHENOBI and Polish lunar soil analog AGK-2010 was determined with the use of the sieve method in line with PN-EN 933-1 (2000). The reference grain-size curves were presented in Fig. 1.

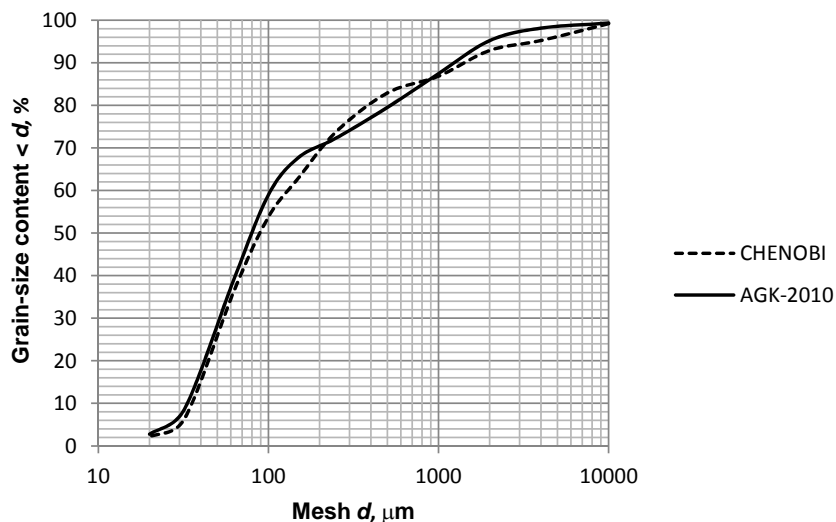


Fig. 1. Grain-size distribution plot: lunar regolith analog CHENOBI – dashed line; lunar soil analog AGK-2010 – solid line (Bednarz, 2009, 2011)

The values of specific granulation plots, determined in accordance with PN-EN ISO 14688-2 (2006), are listed in table 1.

TABLE 1

Characteristic of grain-size distribution of lunar regolith analog CHENOBI and lunar soil analog AGK-2010 (Bednarz et al., 2009, 2011)

Soil	Uniformity coefficient, $C_u$	Curvature, $C_c$
CHENOBI	3.68	0.66
AGK-2010	3.54	0.72

The analysis of grain size distribution and granulation curves revealed that soils compared in line with PN-EN ISO 14688-2 (2006) are single-fraction clayey sands (siSa).

## 2. Physical properties

The bulk density of analyzed soils was determined according to with the standard PN-EN 1097-3 (2000).

As a result the following bulk density values were obtained:

$\rho_o = 1.314 \text{ kg/l}$  – for lunar regolith analog CHENOBI, (standard deviation  $s = 0.0067 \text{ kg/l}$ ),

$\rho_o = 1.295 \text{ kg/l}$  – for lunar soil analog AGK-2010, (standard deviation  $s = 0.0097 \text{ kg/l}$ ).

The value of bulk density for soil AGK-2010 is lower than for lunar regolith analog CHENOBI only by about 1.45%.

The authors used a selection of raw minerals for making lunar soil analog AGK-2010. As a result they obtained a multicomponent soil of grey-light grey color, resembling that of reference soil (Bednarz et al., 2009; Kömle et al., 2008).

## 3. Mechanical properties

The mechanical properties of reference soil and the worked out lunar soil analog AGK-2010 were compared in compliance with standard PN-B04481:1988 (1988), using the ground shear tests.

The plots of shear tests values  $\tau_f$  vs. changes of normal stresses  $\sigma$  are presented in figs. 2 and 3.

As a result of the tests, the values of internal friction angle  $\Phi_s$  and cohesion  $c_s$  were determined (figs. 2 and 3, tab. 2).

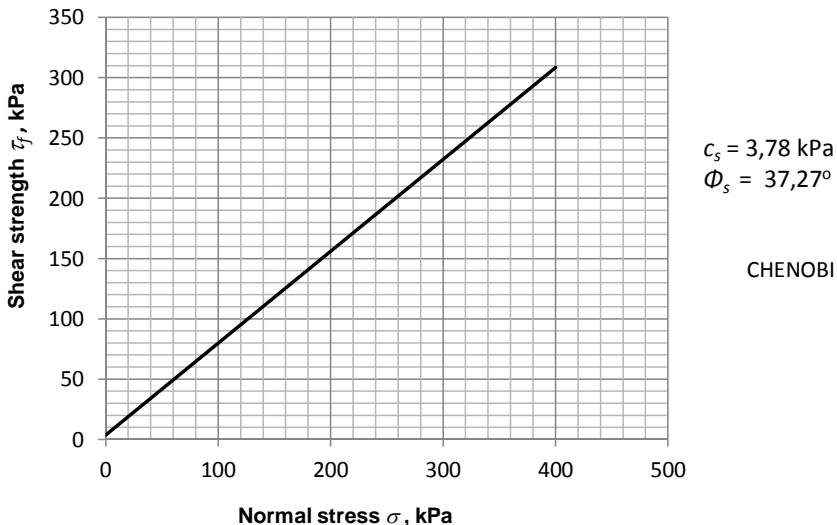


Fig. 2. Shear strength of lunar regolith analog CHENOBI (Bednarz, 2009, 2011): cohesion  $c_s = 3.78 \text{ kPa}$ ; inner friction angle  $\Phi_s = 37.27^\circ$

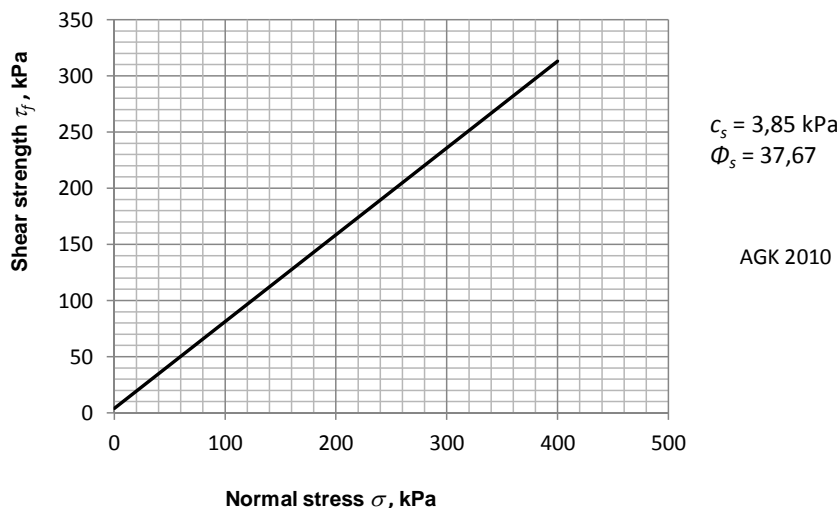


Fig. 3. Shear strength of lunar soil analog AGK-2010: (Bednarz, 2009, 2011): cohesion  $c_s = 3.85$  kPa; inner friction angle  $\Phi_s = 37.67^\circ$

TABLE 2

Mechanical properties of lunar regolith analogs CHENOBI and lunar soil analog AGK-2010 (Bednarz, 2009, 2011)

Soil	Trend line equation	Determination coefficient $R^2$	Cohesion $c_s$ , kPa	Inner friction angle $\Phi_s$ , °
CHENOBI	$\tau_f = 0.76\sigma + 3.78$	0.999	3.78	37.27
AGK-2010	$\tau_f = 0.77\sigma + 3.85$	0.999	3.85	37.67

The obtained courses for  $\tau_f = f(\sigma)$  and values of cohesion  $c_s$  and inner friction angle  $\Phi_s$  show to a resemblance of analyzed mechanical properties of compared soils.

#### 4. Economical aspect

Considerable reduction of cost of making the lunar soil analog AGK-2010 was obtained by using components appearing in Polish geological conditions and/or components produced by home raw mineral producers. As a result, the cost of 1 kg of lunar soil analog AGK-2010 made in Polish conditions was many times lower than the price of 1 kg of lunar regolith analog CHENOBI. This aspect was of special importance in a situation when several tons of analog have to be used.

## 5. Conclusions

1. Investigations carried out at the Faculty of Drilling, Oil and Gas AGH University of Science and Technology in Kraków resulted in working out lunar soil analog AGK-2010, having similar properties as lunar regolith analog CHENOBI, frequently used in researches all over the World.
2. The lunar regolith analog AGK-2010 is a variant of lunar soil substitute, which can be modified if new properties of lunar soil are found.
3. It was important to produce a Polish counterpart of lunar soil, the unit cost of which was many times lower than the price of reference lunar soil.
4. The Polish lunar soil analog AGK-2010 (patent application of 2011) was successfully implemented during tests on penetrator KRET in the Space Research Center, Polish Academy of Sciences in Warsaw.

Publication realized within contract no. 11.11.190.555

Publication realized within contract no. 4.4.190.2007

## References

- Bednarz S., Gonet A., Rzyczniak M., Wójcikowski M., Artymiuk J., 2009. *Raport. Wyznaczanie analogów materiału księżycowego na podstawie dostarczonych próbek*. Katedra Wiertnictwa i Geoinżynierii, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie. Kraków. Praca niepublikowana.
- Bednarz S., Gonet A., Rzyczniak M., Seweryn K., Grygorczuk J., Wawrzaszek R., Rybus T., Wiśniewski Ł. 2011. *Analog gruntu księżycowego*. Zgłoszenie projektu wynalazczego Nr P397651 z mocą od 30.12.2011 r.
- Kömle N.I., Weiss P., Yung K.L., 2008. *Considerations on a suction drill for lunar surface drilling and sampling: I. Feasibility study*. Acta Geotechnica (2008) 3: 201-214.
- PN-B04481:1988. *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości. Warszawa.
- PN-EN 933-1, styczeń 2000. *Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie składu ziarnowego. Metoda Przesiewania*. Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa.
- PN-EN 1097-3, styczeń 2000. *Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie gęstości nasypowej i jamistości*. Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa.
- PN-EN ISO 14688-1, czerwiec 2006. *Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczenie i opis*. Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa.
- PN-EN ISO 14688-2, czerwiec 2006. *Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania*. Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa.
- Rybus T., 2009. *Wybrane własności regolitu księżycowego*. Centrum Badań Kosmicznych, Polska Akademia Nauk. Warszawa. Praca niepublikowana.
- Seweryn K., Banaszkiewicz M., Bednarz S., Grygorczuk J., Rybus T., Rzyczniak M., Wawrzaszek R., Wisniewski L., Wójcikowski M., 2011. *MOLE PENETRATOR 'KRET' FOR LUNAR EXPLORATION*. <sup>1</sup>Space Research Centre PAS, 00-716 Warsaw, Poland (kseweryn@cbk.waw.pl), <sup>2</sup>AGH University of Science and Technology, 30-059 Krakow, Poland. Konferencja LPSC, Warszawa
- Sibille L., Carpenter P., Schlagheck R., French R.A., 2006. *Lunar Regolith Simulant Materials. Recommendations for Standardization, Production and Usage*. Alabama, Marshall Space Flight Center.

Received: 10 July 2012