

УДК 523.942.3:539.215.2:542.61:62-665.4 © Т.Г. Черкасова✉,  
Д.А. Баранцев, В.А. Плотников, А.И. Иванов, 2024

ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия  
✉ e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

UDC 523.942.3:539.215.2:542.61:62-665.4 © T.G. Cherkasova✉,  
D.A. Barantsev, V.A. Plotnikov, A.I. Ivanov, 2024

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU),  
Kemerovo, 650000, Russian Federation  
✉ e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

# Исследование предела прочности гранульного материала, полученного из отходов углеобогащения\*

## Research into the ultimate strength of the pellet material produced from coal processing wastes

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-11S-33-37>

Основная часть скопившихся отходов на территории России представлена хвостами добычи, обогащения и переработки полезных ископаемых, которые можно классифицировать как техногенное сырье, содержащее в себе редкие и редкоземельные элементы. Для извлечения ценных элементов, содержание которых значительно ниже, чем в традиционном сырье, традиционно используется кучное выщелачивание в ходе которого могут возникнуть технические проблемы, связанные с плохой проницаемостью штабеля. Для решения данной проблемы предлагается проводить гранулирование исходного материала.

В данной работе представлены оптимальные условия гранулирования с целью получения наибольшей прочности гранул с наименьшим расходом связующего, что является важным критерием при транспортировке и подготовке материала к кучному выщелачиванию. Исследован гранулометрический состав полученных гранул. Установлено, что при расходе связующего в объеме 21 мл на 100 г сырья удастся получить гранулы с наибольшей прочностью.

**Ключевые слова:** угледобывающая отрасль, отходы углеобогащения, грануляция, спекание, кучное выщелачивание, редкие металлы, техногенное сырье, гранулометрический состав, предел прочности.

**Для цитирования:** Исследование предела прочности гранульного материала, полученного из отходов углеобогащения / Т.Г. Черкасова, Д.А. Баранцев, В.А. Плотников и др. // Уголь. 2024;(11S):33-37. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-33-37.

### ЧЕРКАСОВА Т.Г.

Доктор хим. наук, профессор  
кафедры химии, технологии  
неорганических веществ  
и наноматериалов  
Института химических  
и нефтегазовых технологий  
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный  
технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева»,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

### БАРАНЦЕВ Д.А.

Ассистент Института химических  
и нефтегазовых технологий  
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный  
технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева»,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: kemche@yandex.ru



НОЦ  
КУЗБАСС –  
ДОНБАСС

Научно-образовательный  
центр «Кузбасс-Донбасс»

\* Исследование выполнено за счет гранта Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2022-1194).

**ПЛОТНИКОВ В.А.**

Канд. техн. наук, доцент кафедры  
энергоресурсосберегающих процессов  
в химической и нефтегазовой технологиях  
Института химических  
и нефтегазовых технологий  
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный  
технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева»,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: plotnikovva@kuzstu.ru

**ИВАНОВ А.И.**

Бакалавр Института химических  
и нефтегазовых технологий  
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный  
технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева»,  
650000, г. Кемерово, Россия

**Abstract**

The main part of accumulated waste on the territory of Russia is represented by tailings of mining, enrichment and processing of minerals, which can be classified as man-made raw materials containing rare and rare earth elements. Heap leaching is traditionally used to extract valuable elements, the content of which is significantly lower than in traditional raw materials, during which technical problems may arise due to poor permeability of the stack. To solve this problem, it is proposed to carry out granulation of the source material. The optimal granulation conditions were identified in order to obtain the highest granule strength and the lowest binder consumption, which is an important criterion for transporting and preparing materials for heap leaching. The granulometric composition was studied for the obtained granules. It was found that with a binder consumption of 21 ml per 100 g of raw materials, it is possible to obtain granules with the highest strength.

**Keywords**

Coal mining industry, coal processing waste, pelletisation, sintering, heap leaching, rare earth metals, man-made raw materials, particle size distribution, ultimate strength.

**Acknowledgements**

The research was financially supported by a grant from the Russian Ministry of Education and Science (Agreement No. 075-15-2022-1194).

**For citation**

Cherkasova T.G., Barantsev D.A., Plotnikov V.A., Ivanov A.I. Research into the ultimate strength of the pellet material produced from coal processing wastes. *Ugol'*. 2024;(11S):33-37. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-33-37.

**ВВЕДЕНИЕ**

На данный момент около 70% всех отходов, образовавшихся на территории Российской Федерации, приходится на долю Сибирского федерального округа. Большая часть их находится в Кемеровской области [1]. Основная часть данных отходов представлена хвостами добычи, обогащения и переработки полезных ископаемых. В целом по России горнопромышленными отходами занято свыше 500 тыс. га земель, а территория их негативного воздействия превышает эту площадь в 10-15 раз [2].

В зависимости от генезиса месторождения производимые горно-перерабатывающей и энергетической промышленностью отходы имеют разнообразный минеральный и элементный составы [3, 4], что расширяет ресурсную базу полезных ископаемых страны по некоторым ценным компонентам. В частности, Кузбасские отходы углеобогащения и золошлаки имеют в своем составе ценные редкие и редкоземельные элементы [5] имеющие высокую востребованность на рынке высоких технологий. Мировой рынок редких металлов по данным 2021 г. оценивался в 5,3 млрд дол. США и имеет среднегодовой темп роста 12,3%, что свидетельствует о высоком уровне спроса на данные элементы в ближайшие десятилетия [6]. Это создает потенциал для освоения техногенных месторождений, но в силу низкого их содержания по сравнению с традиционными источниками (моноциты, лопариты, бастнезиты, апатиты и т.д.) [7] селективное их извлечение является нерентабельным. Обеспечить рентабельность такого производства возможно лишь за счет комплексной переработки, когда перерабатываемое сырье превращается в несколько технологических типов кондиционной руды или видов конечной продукции [8, 9].

Для переработки сырья с малыми концентрациями ценных элементов на практике используют процесс кучного выщелачивания [10, 11, 12], что объясняется низкой стоимостью извлечения целевого металла

и возможностью проработывания больших объемов сырья [13]. Однако это порой контрастирует с техническими проблемами, такими как плохая проницаемость штабеля и заиливание, что значительно увеличивает время данной операции. Для решения данной проблемы был опробован метод грануляции отходов углеобогащения на дисковом грануляторе, исследованы прочность полученных гранул и их гранулометрический состав с использованием различного соотношения связующего и исходного материала.

**ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ**

В качестве исходного сырья использовалась порода углеобогащения ЦОФ «Березовская», образующаяся на различных стадиях обогащения и представленная двумя видами, отличающимися по размеру: порода 0,5-13 мм и порода +13 мм.

Предварительно высушенные образцы породы смешивались в массовом соотношении 1:1 и измельчались на щеко-

вой дробилке с последующим истиранием в пальчиковом истирателе до 80 мк. В качестве связующего агента использовалась 92% масс. серная кислота (плотность – 1,82 г/мл), которая дополнительно вскрывает минеральное сырье.

Для грануляции использовался дисковый гранулятор с диаметром чаши 40 см и высокими бортами для предотвращения высыпания готовых гранул из чаши. Чаша имеет угол наклона 50° относительно горизонта и частоту вращения 50 об./мин.

Для нахождения оптимального количества расхода связующего была поставлена серия опытов. Исходный материал массой 100 г обрабатывался различным количеством серной кислоты, которая по каплям добавлялась к материалу в момент работы гранулятора. После добавления связующего гранулы окатывались еще в течение 5 мин. Полученные образцы гранул спустя сутки прокаливались при 350°C в течение 1,5 ч. Для каждого образца определен гранулометрический состав, представленный в табл. 1.

Исследовался предел прочности полученных гранул под

Таблица 1

**Гранулометрический состав полученных гранул**

Particle size distribution of the obtained pellets

Образец	Масса образца, г	Объем связующего, мл	Содержание фракции в образце, %			
			0-1 мм	1-2 мм	2-4 мм	более 4 мм
Г-1	107,25	15	25,5	1,2	11,3	62,0
Г-2	101,75	17	4,8	1,0	22,4	71,9
Г-3	108,80	18	5,6	3,5	18,1	72,8
Г-4	109,60	19	3,0	0,6	15,2	81,3
Г-5	112,20	20	1,8	2,2	19,1	77,0
Г-6	112,90	21	1,1	3,1	20,9	75,0
Г-7	111,60	22,5	0,5	1,2	13,3	85,2

Таблица 2

**Результаты испытания на прочность (образцы Г-1, Г-2, Г-3, Г-4)**

Results of the strength test

Образец Г-1			Образец Г-2			Образец Г-3			Образец Г-4		
d, мм	F, Н	σ, Н/мм <sup>2</sup>	d, мм	F, Н	σ, Н/мм <sup>2</sup>	d, мм	F, Н	σ, Н/мм <sup>2</sup>	d, мм	F, Н	σ, Н/мм <sup>2</sup>
0,48	24	132,70	0,48	10	55,29	0,5	22	112,10	0,42	20	144,43
0,49	16	84,89	0,48	26	143,75	0,5	18	91,72	0,49	20	106,11
0,53	20	90,70	0,53	40	181,40	0,52	28	131,91	0,52	20	94,22
0,57	18	70,58	0,53	36	163,26	0,53	26	117,91	0,53	50	226,75
0,6	14	49,54	0,54	40	174,74	0,54	30	131,06	0,53	56	253,96
0,61	20	68,47	0,54	30	131,06	0,55	26	109,49	0,56	40	162,49
0,62	20	66,28	0,55	30	126,34	0,57	10	39,21	0,59	40	146,38
0,62	22	72,91	0,57	34	133,31	0,6	36	127,39	0,6	40	141,54
0,65	36	108,54	0,58	36	136,33	0,67	42	119,19	0,6	50	176,93
0,65	28	84,42	0,58	44	166,62	0,68	70	192,85	0,61	46	157,48
0,67	10	28,38	0,59	36	131,74	0,7	42	109,19	0,65	60	180,91
0,7	30	77,99	0,65	50	150,76	0,73	36	86,06	0,68	45	123,97
0,7	20	52,00	0,65	60	180,91	0,74	35	81,42	0,68	60	165,30
0,7	10	26,00	0,67	56	158,92	0,74	50	116,32	0,71	60	151,62
0,74	40	93,05	0,67	24	68,11	0,75	30	67,94	0,71	60	151,62
0,75	40	90,59	0,67	80	227,02	0,78	44	92,13	0,8	78	155,25
0,75	30	67,94	0,69	32	85,62	0,79	80	163,29	0,8	90	179,14
0,81	76	147,56	0,71	50	126,35	0,8	44	87,58	0,81	90	174,74
0,82	40	75,78	0,71	36	90,97	0,9	84	132,11	0,84	70	126,38
1,21	110	95,71	0,91	90	138,45	0,95	90	127,04	0,89	60	96,49

Результаты испытания на прочность (образцы Г-5, Г-6, Г-7)

Results of the strength test

Образец Г-5			Образец Г-6			Образец Г-7		
<i>d</i> , мм	<i>F</i> , Н	$\sigma$ , Н/мм <sup>2</sup>	<i>d</i> , мм	<i>F</i> , Н	$\sigma$ , Н/мм <sup>2</sup>	<i>d</i> , мм	<i>F</i> , Н	$\sigma$ , Н/мм <sup>2</sup>
0,49	22	116,72	0,53	56	253,96	0,49	30	159,17
0,5	50	254,78	0,55	60	252,67	0,5	18	91,72
0,53	40	181,40	0,55	60	252,67	0,58	30	113,60
0,53	35	158,73	0,55	50	210,56	0,6	30	106,16
0,55	32	134,76	0,56	42	170,61	0,64	26	80,86
0,55	40	168,45	0,57	48	188,20	0,65	50	150,76
0,58	40	151,47	0,57	50	196,04	0,67	50	141,89
0,58	50	189,34	0,58	60	227,21	0,67	50	141,89
0,58	50	189,34	0,62	75	248,55	0,67	36	102,16
0,58	26	98,46	0,64	62	192,82	0,68	40	110,20
0,58	38	143,90	0,67	72	204,32	0,69	70	187,30
0,6	58	205,24	0,67	64	181,62	0,72	74	181,84
0,6	20	70,77	0,68	94	258,96	0,72	44	108,12
0,61	30	102,71	0,7	86	223,58	0,73	80	191,24
0,61	32	109,55	0,74	75	174,47	0,74	70	162,84
0,73	90	215,14	0,75	70	158,53	0,77	56	120,32
0,83	80	147,93	0,79	72	146,96	0,8	85	169,19
0,88	116	190,82	0,8	74	147,29	0,81	100	194,16
0,92	110	165,56	0,84	80	144,43	0,82	80	151,56
0,94	90	129,75	1	120	152,87	0,9	120	188,72

действием сжимающего напряжения, для этого отбирались гранулы сферической формы диаметром от 0,4 мм до 1,21 мм. Измерение предела прочности проводилось на специальной установке, которая имеет гибкую площадку, связанную с силомером, предварительно отторированным гирей с точной массой, на площадку устанавливается исследуемая гранула и подвергается механическому воздействию давящим винтом. В момент разрушения фиксируется предельное значение силы. Результаты исследования сведены в табл. 2, 3.

Предел прочности  $\sigma$  рассчитывался по формуле:

$$\sigma = \frac{F}{S},$$

где *F* – сила, Н; *S* – поперечное сечение гранулы, мм<sup>2</sup>.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Экспериментально установлено, что добавление кислоты более 22,5 мл на 100 г отходов приводит к слипанию гранул, в результате чего нарушается режим гранулирования, и окатывание гранул не происходит. При увеличении объема связующего происходит уменьшение содержания фракции 0-1 мм, что свидетельствует о более полном переходе исходного материала в форму гранул, при этом доля фракции более 4 мм увеличивается. В образце Г-1 наблюдается нехватка связующего, о чем свидетельствует значительное содержание пыли. При недостаточном содержании связующего гранулы получают шероховатыми и неровной формы. Наименьшей прочностью обладают гранулы образца Г-1, средний предел прочности которых находится в диапазоне от 50 до 100 Н/мм<sup>2</sup>.

Для образца Г-7 наблюдается зависимость увеличения предела прочности от диаметра гранул. Гранулы образца Г-6 имеют наибольшую прочность (расход связующего 21 мл на 100 г сырья), что является важным критерием при транспортировке и подготовке материалов к кучному выщелачиванию.

**Список литературы • References**

1. Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий. СПб.: Реноме, 2019. 824 с.
2. Тагаева Т.О., Гильмундинов В.М., Казанцева Л.К. Проблема накопления отходов в отраслях добывающей промышленности РФ // ЭКО. 2019. № 9. С. 117-131. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-9-117-131.  
Tagaeva T.O., Gilmundinov V.M., Kazantseva L.K. The problem of waste accumulation in the extractive industries of the Russian Federation. ECO. 2019;(9):117-131. (In Russ.). DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-9-117-131.
3. Редкие элементы в отходах углепереработки Кузбасса / Т.Г. Черкасова, Е.В. Черкасова, А.В. Тихомирова и др. // Уголь. 2023. № 3. С. 65-68. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-3-65-68.  
Cherkasova T.G., Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V., Golovachev A.A. Rare earth elements in Kuzbass coal processing wastes. Ugol. 2023;(3):65-68. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-3-65-68.
4. Целюк Д.И., Целюк И.Н. Комплексная оценка техногенного воздействия намывных хвостохранилищ железорудных объектов Восточной Сибири на окружающую среду // Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В.П. Астафьева. 2012. № 3(21). С. 328-332.

- Tselyuk D.I., Tselyuk I.N. Comprehensive assessment of the anthropogenic impact of alluvial tailings dumps of iron ore facilities in Eastern Siberia on the environment. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im V.P. Astaf'eva*. 2012;3(21): 328-332. (In Russ.).
5. Анализ отходов угледобычи, углепереработки и углеобогащения месторождений Кузнецкого угольного бассейна / Т.Г. Черкасова, Е.В. Черкасова, А.В. Тихомирова и др. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 6 (154). С. 59-66. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-6-59-66. Cherkasova T.G., Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V., Pilin M.O., Barantsev D.A. Analysis of waste from coal mining, coal refining and coal enrichment of deposits of the Kuznetsk coal basin. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2022;6(154): 59-66. (In Russ.). DOI: 10.26730/1999-4125-2022-6-59-66.
  6. Mpila Makiesse Nkiawete, Randy Lee Vander Wal. Rare earth elements: Sector allocations and supply chain considerations. *Journal of Rare Earths*. 2024;42(2):237-430. DOI: 10.1016/j.jre.2024.01.020.
  7. Обзор рынка РЗМ и технологий переработки редкоземельного сырья / Т.И. Юшина, И.М. Петров, С.И. Гришаев и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №. S1. С. 577-608. Yushina T.I., Petrov I.M., Grishaev S.I., Cherny S.A. Review of the market of REM and technologies for processing rare earth raw materials. *Gornyy informatsionno-analyticheskij byulleten'*. 2015;(S1):577-608. (In Russ.).
  8. Dodbiba G., Fujita T. Trends in Extraction of Rare Earth Elements from Coal Ashes: A Review. *Recycling*. 2023;8(17):1-18. DOI: 10.3390/recycling8010017.
  9. Чантурия В.А. Инновационные процессы в технологиях переработки минерального сырья сложного вещественного состава // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. №. S15. С. 9-25. Chanturiya V.A. Innovative processes in technologies for processing mineral raw materials of complex material composition. *Gornyy informatsionno-analyticheskij byulleten'*. 2009;(S15):9-25. (In Russ.).
  10. Голик В.И., Комашченко В.И. Практика выщелачивания металлов из отходов переработки руд // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2016. №. 3. С. 13-23. Golik V.I., Komashchenko V.I. The practice of leaching metals from ore processing waste. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*. 2016;(3):13-23. (In Russ.).
  11. Разработка комплексной технологии выщелачивания редкоземельных металлов из угольной золы / Б. Ксенофонов, А. Козодаев, И. Буторова и др. // Экология и промышленность России. 2015. №. 19 (4). С.10-14. DOI: 10.18412/1816-0395-2015-4-10-14. Ksenofontov B., Kozodaev A., Butorova I., Taranov R., Vinogradov M., Voropaeva A., Senik E., Afonin A., Molchan V. Development of an integrated technology for leaching rare earth metals from coal ash. *Ecologiya i promyshlennost' Rossii*. 2015;19(4):10-14. (In Russ.). DOI: 10.18412/1816-0395-2015-4-10-14.
  12. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Бурдзиева О.Г. Целесообразность выщелачивания бедных руд в куче // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 3. С. 53-61. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Burdzieva O.G. Expediency of leaching poor ores in a heap. *Izvestiya Tomskogo polytekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring Georesurov*. 2018;329(3):53-61. (In Russ.).
  13. Petersen J. Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores – A brief overview. *Hydrometallurgy*. 2015;(165):1-18. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.09.001.

#### Authors Information

**Cherkasova T.G.** – Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of Chemistry, Technology of Inorganic Substances and Nanomaterials, Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: ctg.htnv@kuzstu.ru

**Barantsev D.A.** – Assistant at the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: kemche@yandex.ru

**Plotnikov V.A.** – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Energy-Saving Processes in Chemical and Oil and Gas Technologies of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: plotnikovva@kuzstu.ru

**Ivanov A.I.** – Bachelor of the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation,

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.09.2024

Поступила после рецензирования: 21.10.2024

Принята к публикации: 31.10.2024

#### Paper info

Received September 15, 2024

Reviewed October 21, 2024

Accepted October 31, 2024