

**В. Г. Полторацкий**, канд. техн. наук; **А. А. Бочечка**, **В. И. Лавриненко**<sup>1</sup>, доктора технических наук; **О. В. Лещенко**; **О. О. Пасичный**, канд. техн. наук; **Ю. П. Ущиповский**; **В. А. Скрябин**<sup>1</sup>; **В. Ю. Солод**<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> *Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины  
Украина, 04074, Киев, ул. Автозаводская, 2,  
E-mail: vg.poltoratsky@gmail.com; olesh@ism.kiev.ua*

<sup>2</sup> *Днепропетровский государственный технический университет МОН Украины  
Украина, 51918, Каменское, ул. Днепропетровская, 2а*

### **АБРАЗИВНАЯ СПОСОБНОСТЬ СТАВРОЛИТОВОГО МИНЕРАЛЬНОГО КОНЦЕНТРАТА\*. ПРИМЕНЕНИЕ СТАВРОЛИТА В АБРАЗИВНЫХ ПАСТАХ И В ШЛИФОВАЛЬНОМ ИНСТРУМЕНТЕ**

*Определена абразивная способность ставролитового минерального концентрата зернистости 160/125, 125/100 производства Вольногорского горно-металлургического комбината и приведены сравнительные данные абразивной способности порошка синтетического алмаза АСб 125/100. Определение абразивной способности образцов проводилось на оборудовании УАС-2М конструкции ИСМ НАНУ согласно «Методике определения абразивной способности шлифовальных порошков синтетических алмазов с использованием специального шлифовального состава».*

*Исследованы возможности эффективного использования природных минеральных зернистых концентратов зернистости 100/80 в рабочем слое алмазных кругов в качестве опорных элементов для повышения эксплуатационных характеристик шлифовальных кругов в процессе шлифования. Результаты исследований абразивной способности образцов ставролитового концентрата показали, что ставролит можно использовать в композициях для производства специальных типов инструмента и паст, предназначенных для получения поверхности высокого качества. Добавка ставролитового концентрата в связку алмазно-абразивных кругов позволяет получить значительную (до 25 %) экономию сверхтвёрдых материалов (алмаза и кубического нитрида бора) и тем самым снизить стоимость кругов, что существенно влияет на технико-экономические показатели механической обработки, а также повысить качество обрабатываемой поверхности.*

**Ключевые слова:** абразивная способность; ставролит; синтетический алмаз; кубический нитрид бора; абразивные пасты; шлифовальный инструмент; шероховатость поверхности; качество обработки поверхности

#### **Введение**

Концентраты минералов титана и циркония, представляющие собой продукты переработки титано-циркониевой руды, являются природным минеральным сырьём, обладающим абразивными свойствами. В настоящее время на Вольногорском горно-металлургическом комбинате — одном из ведущих предприятий металлургической отрасли Украины по производству концентратов редких металлов — значительно увеличена добыча и повышено качество основных продуктов обогащения руды: рутилового (свыше 95 % TiO<sub>2</sub>), ильменитового (свыше 63 % TiO<sub>2</sub>), цирконового, ставролитового, дистен-силиманитового концентратов. Из-за относительно низкой стоимости сырья эти концентраты пользуются большим спросом в Украине и за рубежом.

\* Украина

Абразивные свойства ставролитового минерала хорошо известны, особенно при пескоструйной обработке. Ставролит – минеральный абразив общего назначения, используемый для удаления тонких покрытий, ржавчины и окалина. Угловато-округлая форма зерен минерала идеально подходит для применения в тех случаях, где требуется минимальный профиль поверхности. Ставролит отлично подходит для чистовой отделки и обычно используется для обработки металлоконструкций, включая резервуары и башенные конструкции, для пескоструйной обработки конструкционной и листовой стали [1–3].

Чтобы расширить область применения как ставролитового концентрата, так и смесей минерала со сверхтвердыми материалами (алмаз, кубический нитрид бора) для изготовления абразивного шлифовального инструмента, была определена абразивная способность ставролитового концентрата производства Вольногорского комбината. Возможности использования некоторых зернистых минеральных концентратов в алмазно-абразивном инструменте были рассмотрены в [5]. В нашей работе представлены результаты использования ставролитового концентрата в абразивных пастах и в шлифовальном инструменте.

Цель исследования – определение абразивной способности ставролитового минерального концентрата для возможного применения в абразивных пастах и в шлифовальном инструменте, для снижения стоимости механической обработки, а также повышения качества обработанной поверхности.

#### **Материалы, оборудование, методы исследования**

Объект исследования – порошок ставролитового концентрата производства Вольногорского горно-металлургического комбината (ТУ У 14-10-022-99). Минералогический состав ставролитового концентрата: ставролит – 81-86 %; кианит, силлиманит – 0,5–1,5 %; ильменит – 5–7 %; циркон – 1–1,5 %; турмалин – 7–10 %; кварц – 0,1–0,5 %. Исследуемые образцы ставролитового концентрата производства Вольногорского комбината содержат:  $TiO_2 + Al_2O_3$  – 50,60 %,  $SiO_2$  – 27,8 %.

Ставролитовые концентраты относятся к группе зернистых концентратов средней прочности (разрушающая нагрузка – 2,8-3,0 Н). Ставролит – минерал класса силикатов, островной силикат\*\* алюминия и железа с дополнительными анионами. Химический состав минерала ставролита –  $Fe^{2+}_2Al_9O_6(SiO_4)_4(O,OH)_2$ ; твердость по шкале Мооса – 7–7,5; плотность – 3,7–3,8 г/см<sup>3</sup> [4].

Прочность ставролита Вольногорского рудного месторождения зернистости: 200/160 – 4,3 Н, 160/125 – 3,4 Н; твердость по шкале Мооса – 7,5; плотность – 3,7 г/см<sup>3</sup>; насыпная плотность (без встряхивания) – 2,02, насыпная плотность (со встряхиванием) – 2,25; коэффициент текучести – 0,73; удельная поверхность – 1,021 м<sup>2</sup>/г; коэффициент формы ( $K_f$ ) – 1,38; коэффициент изометрии – 0,72.

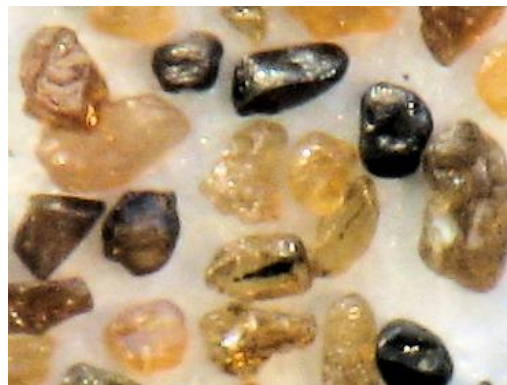
При исследовании образцов материала видно, что ставролитовый концентрат представляет собой смесь зерен разных размеров (250–100 мкм) разного цвета (коричневатые и желто-оранжевые оттенки цвета натурального янтаря, черный) (рисунок).

---

\*\* Островные силикаты, т.е. силикаты с изолированными тетраэдрами  $[SiO_4]^{4-}$  и изолированными группами тетраэдров.



а



б

Рисунок. Общий вид образца концентрата ставролита (а), зерна материала (б)

Определение абразивной способности образцов порошка ставролитового концентрата проводилось на оборудовании УАС-2М (установка абразивной способности конструкции ИСМ НАНУ) согласно методике ИСМ НАНУ М 28.5–267:2006 «Методика определения абразивной способности шлифовальных порошков синтетических алмазов с использованием специального шлифовального состава».

Суть метода заключается в определении разности масс образцов-тестеров из твердого сплава ВК6 (или шарикоподшипниковой стали ШХ15) до и после шлифования алмазным шлифовальным порошком (базовый компонент специального шлифовального состава) на установке абразивной способности в течение 20 мин.

Установка УАС-2М представляет собой настольный плоскошлифовальный станок с горизонтально расположенной планшайбой из керамики 22ХС, диаметр планшайбы – 110 мм.

Параметры рабочего режима установки при определении абразивной способности дисперсного материала следующие: частота вращения планшайбы – 100 об./мин; частота двойных ходов по планшайбе обоймы с образцами-тестерами, которые обрабатываются исследуемым дисперсным материалом, – 60 ход./мин; ход обоймы – 50 мм; масса груза, который прижимает образцы-тестеры к планшайбе. – 2 кг; длительность рабочего цикла установки при определении абразивной способности образцов дисперсного материала – 20 мин.

Образцы-тестеры, с помощью которых определяется абразивная способность дисперсного материала, изготовлены из шарикоподшипниковой стали ШХ15 и твердого сплава ВК6, имеют форму цилиндра: диаметр – 11 мм, высота – 10 мм.

Исследуемый дисперсный материал в составе специальной шлифовальной смеси равномерно распределяется по планшайбе до включения установки. Закрепленные в обойме установки образцы-тестеры прижимаются к планшайбе грузом с усилием 20 Н, далее при включении установки начинается процесс определения абразивной способности дисперсного материала. Образцы-тестеры взвешивают до и после процесса шлифования.

Согласно стандарту процедуры испытаний каждый образец дисперсного материала испытывается дважды. Среднее арифметическое значение 2-х испытаний является нормативным показателем абразивной способности дисперсного материала.

Шероховатость обрабатываемой поверхности контролировалась с помощью профилометра-профилографа модели SurfTest SJ-201 фирмы Mitutoyo (Япония).

## Результаты

Результаты определения абразивной способности образцов ставролитового концентрата зернистости 125/100 приведены в табл. 1. В качестве эталона для сравнения также указано значение абразивной способности синтетического алмазного порошка АС6 125/100 (ДСТУ 3292-95) – образец № 11, т.к. шлифовальные порошки такой зернистости чаще всего используются в абразивном шлифовальном инструменте и в пастах.

Таблица 1. **Абразивная способность ставролитового концентрата.**

Образец №	Абразивная способность, мг		Образец №	Абразивная способность, мг	
	по ШХ15	по ВК6		по ШХ15	по ВК6
1	3,5	1,5	6	6,0	2,3
2	4,0	1,8	7	5,7	2,0
3	4,2	1,7	8	6,3	2,1
4	3,8	1,4	9	6,5	2,2
5	4,1	1,5	10	7,2	2,6
1	3,5	1,5	6	6,0	2,3
			11	150,7	123,5

Таким образом, абразивная способность вольногорского ставролитового концентрата по стали ШХ15 составляет  $5,08 \pm 1,21$ , для сравнения: абразивная способность порошка синтетического алмаза АС6 125/100 составляет 150,7; абразивная способность ставролитового концентрата по твердому сплаву ВК6 –  $1,89 \pm 0,38$ , абразивная способность АС6 125/100 – 123,5.

Зерна концентрата ставролита имеют в основном округлую изометрическую форму с гладкой поверхностью, для зерен всех фракций  $K_f = 1,35-1,46$ . Дополнительная сортировка материала на вибростолах позволяет выделить фракции зерен с более округлой формой ( $K_f \approx 1$ ). Такой более однородный материал, а также смеси таких фракций ставролита и высокопрочных алмазных порошков марки АС200, могут быть использованы в шлифовально-режущем и в сверлильном инструменте.

Также была определена абразивная способность специально изготовленных мазеподобных абразивных паст, содержащих ставролит зернистости 160/125 и 125/100 (табл. 2). Пасты изготовлены на универсальной основе (вазелин, стеарин, олеиновая кислота, эмульсионный воск), поэтому пасты смываются водой и органическими растворителями (бензин, спирт, керосин).

Сравним шероховатость поверхности при обработке кругами с кубонитом (кубический нитрид бора, cBN) и со ставролитом в рабочем слое. Учитывая овализированную форму зерен ставролита (рисунок, б), логично предположить, что шероховатость обработанной ставролитом поверхности будет ниже по сравнению с обработанной кубонитом. Для этого были изготовлены и испытаны шлифовальные круги формы 12А2-45° 100×5×3×32 на связке В2-01 двух типов с относительной концентрацией 100 % в рабочем слое шлиф-порошков кубонита КВ (1 тип) и ставролита (2 тип) зернистости 100/80. Исследования, проведенные при шлифовании стали марки Р6М5, показали, что при доводочной производительности обработки 100 мм<sup>3</sup>/мин шероховатость (Ra) поверхности, обработанной кругом с рабочим слоем: из кубонита – 0,24–0,25 мкм, из ставролита – 0,11–0,13 мкм, т.е. обработка кругами с рабочим слоем со ставролитом ощутимо – примерно в 2 раза – снижает шероховатость поверхности по сравнению с обработкой кубонитом.

Таблица 2. Абразивная способность абразивных паст, содержащих ставролит

Образец №	Состав пасты	Абразивная способность, мг			
		по Бронза	по Медь	по Сталь 10	по ВК8
1	Ставролит 125/100 – 16 г, концентрация ставролита – 45 %	38.95	44.20	7.40	1.30
2	Ставролит 160/125 – 16 г, концентрация ставролита – 45 %	96.40	118.60	10.40	3.60
3	Ставролит 160/125 – 10 г, АС6 160/125 – 6 г, концентрация ставролита – 40 %	478.40	570.50	78.80	12.20

Стоимость 1 карата (0.2 г) ставролита в  $1,5-2,0 \cdot 10^3$  раз меньше стоимости 1 карата порошка синтетического алмаза или порошка кубонита соответствующей зернистости. Поэтому добавка ставролита в связку алмазно-абразивных кругов позволяет получить значительную (до 25 %) экономию сверхтвердых материалов (алмаза, кубонита) и тем самым снизить стоимость кругов, что существенно влияет на технико-экономические показатели механической обработки, а также повысить качество обработанной поверхности [5].

#### Выводы

1. Определена абразивная способность ставролитового минерального концентрата зернистости 125/100 производства Вольногорского комбината. зернистости 100/80. Приведены сравнительные данные абразивной способности синтетического алмаза АС6 125/100.

2. Определена абразивная способность абразивных паст зернистости 160/125, 125/100, содержащих как ставролит, так и смесь ставролита с порошком синтетического алмаза АС6 125/100.

3. Исследования, проведенные при шлифовании стали марки Р6М5, показали, что при доводочной производительности обработки  $100 \text{ мм}^3/\text{мин}$  шероховатость (Ra) поверхности, обработанной кругом с рабочим слоем из кубонита: 0,24–0,25 мкм, ставролита: 0,11–0,13 мкм, т.е обработка кругами с рабочим слоем со ставролитом ощутимо – примерно в 2 раза – снижает шероховатость поверхности по сравнению с обработкой кубонитом.

4. Стоимость 1 карата (0.2 г) ставролита в  $1,5-2,0 \cdot 10^3$  раз меньше стоимости 1 карата порошка синтетического алмаза или порошка кубонита соответствующей зернистости. Поэтому добавка ставролита в связку алмазно-абразивных кругов позволяет получить значительную (до 25 %) экономию сверхтвердых материалов (алмаза, кубонита) и тем самым снизить стоимость кругов, что существенно влияет на технико-экономические показатели механической обработки, а также повысить качество обработанной поверхности.

5. Результаты наших исследований образцов концентрата ставролита показали, что ставролитовый концентрат может быть использован в составах для производства специальных типов инструмента и паст, предназначенных для получения поверхности более высокого уровня качества. Дополнительная сортировка материала на вибростолах позволяет выделить фракции зерен с более округлой формой ( $K_{\phi} \approx 1$ ). Такой более однородный материал, а также смеси таких фракций ставролита и высокопрочных алмазных порошков марки АС200, могут быть использованы в шлифовально-режущем и сверлильном инструменте.

*Визначено абразивну здатність ставролітового мінерального концентрату зернистості 160/125, 125/100 виробництва Вільногірського гірничо-металургійного комбінату та наведено*

порівняльні дані абразивності порошку синтетичного алмазу AC6 125/100. Визначення абразивної здатності зразків проводилося на обладнанні УАС-2М конструкції ІСМ НАНУ згідно з «Методикою визначення абразивної здатності шліфувальних порошоків синтетичних алмазів з використанням спеціального шліфувального складу».

Досліджено можливість ефективного використання природних мінеральних зернистих концентратів в робочому шарі алмазних кругів як опорних елементів для підвищення експлуатаційних характеристик шліфувальних кругів в процесі шліфування. Результати досліджень абразивності зразків ставролітового концентрату показали, що ставроліт можна використовувати в композиціях для виробництва спеціальних типів інструменту та паст, призначених для отримання поверхні високої якості. Додаток ставролітового концентрату до зв'язки в алмазно-абразивних кругах дозволяє отримати значну (до 25 %) економію надтвердих матеріалів (алмазу та кубічного нітриду бору) і тим самим знизити вартість кругів, що істотно впливає на техніко-економічні показники механічної обробки, а також підвищити якість оброблюваної поверхні.

**Ключові слова:** абразивна здатність; ставроліт; синтетичний алмаз; кубічний нітрид бору; абразивні пасту; шліфувальний інструмент; шорсткість поверхні; якість обробки поверхні

**V. G. Poltoratskiy, O. O. Bochechka, V. I. Lavrinenko, O. V. Leshchenko, O. O. Pasichnyy, Yu. P. Ushchapovskiy; V. A. Skriabin<sup>1</sup>; V.Yu. Solod<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>V.Bakul Institute of Superhard Materials, NAS of Ukraine

<sup>2</sup>Dniprovskiy State Technical University

#### **ABRASIVE ABILITY OF STAUROLITE MINERAL CONCENTRATE\*. USE OF STAVROLIT IN ABRASIVE PASTES AND IN GRINDING TOOLS**

*The abrasive ability of a staurolite mineral concentrate of 160/125, 125/100 grain size produced by Vilnohirsk Mining and Metallurgical Combine is determined and comparative data of the abrasivity of AC6 125/100 synthetic diamond powder is indicated. Determination of abrasive ability of samples was carried out on the UAS-2M equipment (design of the ISM NASU) according to the "Method for determining the abrasive ability of grinding powders of synthetic diamonds using a special grinding composition".*

*The production potential of the effective use of natural mineral granular concentrates in the working layer of diamond wheels as the supporting elements to improve the operational characteristics of grinding wheels during the grinding process was analyzed. The results of the studies of the abrasiveness of staurolite concentrate samples have shown that the staurolite can be used in compositions for the production of special types of tools and pastes intended to achieve high-quality surface treatment. Adding staurolite concentrate to a binder of diamond-abrasive wheels results in the considerable (up to 25 %) saving of superhard materials (diamond and cubic boron nitride) and thereby reduces the cost of the wheels. That considerably affects the technical and economic performance of machining, as well as improves the quality of the processed surface.*

**Key words:** abrasive ability; staurolite; synthetic diamond; cubic boron nitride; abrasive pastes; grinding tools; surface roughness; surface finish quality

#### **Литература**

1. Klein C., Hurlbut (Jr.) C. S. Manual of Mineralogy. 20th ed. – New York: Wiley, 1985. – 596 p.
2. DuPont [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www2.dupont.com/Directories/en\\_CA/Products\\_Services\\_Index/Building\\_Construction\\_Materials\\_Maintenance\\_Supplies/Sandblasting\\_Materials.html](http://www2.dupont.com/Directories/en_CA/Products_Services_Index/Building_Construction_Materials_Maintenance_Supplies/Sandblasting_Materials.html).
3. Marco Abrasives: Staurolite [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.marco.us/abrasives/staurolite>.
4. Texan Stone: Staurolite [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.texanstone.com/products##staurolite>.

\* Ukraine

5. Исследование возможностей эффективного использования минеральных зернистых концентратов в качестве опорных элементов в рабочем слое алмазных кругов. / В. И. Лавриненко, В. Ю. Солод, Б. В. Сытник и др. // Сверхтвердые материалы. – 2012. – № 1. – С. 75–83.

Поступила 20.05.19

### References

1. Klein, C., Hurlbut (Jr.), C. S. (1985). *Manual of Mineralogy. 20th ed.* New York: Wiley.
2. DuPont. (2013). *www2.dupont.com*. Retrieved from [http://www2.dupont.com/Directories/en\\_CA/Products\\_Services\\_Index/Building\\_Construction\\_Materials\\_Maintenance\\_Supplies/Sandblasting\\_Materials.html](http://www2.dupont.com/Directories/en_CA/Products_Services_Index/Building_Construction_Materials_Maintenance_Supplies/Sandblasting_Materials.html).
3. Marco Abrasives: Staurolite. (2018). *www.marco.us*. Retrieved from <http://www.marco.us/abrasives/staurolite>.
4. Texan Stone: Staurolite. (2018). *www.texanstone.com*. Retrieved from <https://www.texanstone.com/products##staurolite>.
5. Lavrinenko, V. I., Solod, V. Yu., Sytnik, B. V., et al. (2012). Issledovanie vozmozhnosteieffektivnohoispolzovaniia mineralnykh zernistykh kontsentratov v kachestve opornykh elementov v rabochem sloealmaznykh kruhov [The study of possibility of efficient use of mineral grain concentrates as bearing elements in diamond wheel working layer]. *Sverkhтвердые материалы – Journal of Superhard Materials*, 34, 1, 56–62 [in Russian].

УДК 621.762; 546.261

DOI: 10.33839/2223-3938-2019-22-1-455-461

**О. М. Кайдаш**, д-р техн. наук

*Институт надтвердых материалов им. В. М. Бакуля НАН Украины, вул. Автозаводська, 2,  
04074, м. Київ, E-mail: ivv@ism.kiev.ua*

### ВПЛИВ КИСНЮ НА РІДКОФАЗНЕ СПІКАННЯ КЕРМЕТІВ З НАНОДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ TiN–Ni

*Вивчено вплив дисперсності тугоплавкої складової, температури та атмосфери спікання на структуру і фазовий склад керметів TiN–Ni. Встановлено, що підвищення вмісту кисню у нанокмпозиціях помітно погіршує процес ущільнення керметів та приводить до зниження твердості і тріщиностійкості виготовлених матеріалів.*

**Ключові слова:** кермет, нанокмпозиція TiN–Ni, рідкофазне спікання, твердість за Віккерсом HV, тріщиностійкість  $K_{Ic}$

Нітрид титану широко відомий як твердий, тугоплавкий, корозійностійкий і зносостійкий матеріал [1–3]. Нітрид титану відноситься до класу металоподобних з'єднань з кубічною ґраткою типу NaCl і областю гомогенності по азоту (37,5–50,0)% (атомних). Період ґратки пов'язаний зі стехіометрією сполуки і змінюється від 0,4212 до 0,4242 нм. Твердість по Віккерсу HV сполуки TiN в області гомогенності при підвищенні вмісту азоту зростає з 17 ГПа до 21 ГПа [2].

Для створення керметів придатні метали, що не утворюють стійких нітридів, наприклад нікель. Важливим є добре змочування тугоплавкої сполуки розплавом металу. Однак розплавлений нікель не змочує нітрид титану стехіометричного складу – кут змочування  $\Theta$  в цій системі дорівнює  $100^\circ$  [4]. При створенні кермета до металічної зв'язки, окрім хорошого змочування, висувають вимогу мінімальної взаємодії між металічною зв'язкою і