



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ
ЗАЩИТЫ**

**MATERIALS AND EQUIPMENT
FOR CORROSION PROTECTION**

doi:10.31615/j.corros.prot.2023.109.3-3

**Технологический цикл механической обработки подложек
чипов кремний на сапфире**

А.С. Калиниченко^{1✉}, И.Д. Тычинская², В.Л. Басинюк²

¹УО «Белорусский государственный технологический университет»,
Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, д. 13а

²ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»,
Беларусь, 220072, г. Минск, ул. Академическая, д. 12

e-mail: akalinich@belstu.by

Аннотация. В статье приведены результаты исследований лезвийной обработки с использованием современных модификаций кубического нитрида бора (КНБ) подложек тонких пластин из сапфира, используемых для изготовления микросхем типа «кремний на сапфире» (КНС). Эти микросхемы ориентированы на применение, вследствие повышенных быстродействия и устойчивости к радиоактивному воздействию, в космической и специальной технике. При правильном выборе геометрии режущего инструмента, параметров оснастки и режимов резания такая обработка может быть осуществлена и позволяет получить шероховатость на уровне 20...30 нм.

Ключевые слова: КНБ, КНС, лезвийная обработка, микроэлектроника, сапфир, остаточные напряжения.
Для цитирования: Калиниченко А. С., Тычинская И. Д., Басинюк В. Л. Технологический цикл механической обработки подложек чипов кремний на сапфире // Практика противокоррозионной защиты. – 2023. – Т. 28, № 3. – С. 27-33. doi:10.31615/j.corros.prot.2023.109.3-3

Статья получена 20.04.2023, опубликована 01.09.2023.

**Technological cycle of mechanical processing
of silicon-on-sapphire chip substrates**

A.S. Kalinichenko^{1✉}, I.D. Tychinskaya², V.L. Basinyuk²

¹Belarusian State Technological University,
13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus,
12, Academic str., 220072, Minsk, Republic of Belarus

e-mail: akalinich@belstu.by

Abstract. The article presents the results of studies of blade processing using modern modifications of cubic boron nitride (CBN) substrates of thin plates made of sapphire used for the manufacture of "Silicon-on-Sapphire" microcircuits (SOS). These microcircuits are focused on application in space and special equipment due to increased speed and resistance to radioactive exposure. With the right choice of cutting tool geometry, tooling parameters and cutting modes, such processing can be carried out and allows you to obtain a roughness at the level of 20...30 nm.

Keywords: KBN, SOS, blade processing, microelectronics, sapphire, residual stresses.

For citation: Kalinichenko, A. S., Tychinskaya, I. D., & Basinyuk, V. L. (2023). Technological cycle of mechanical processing of silicon-on-sapphire chip substrates. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 28 (3), 27-33. doi:10.31615/j.corros.prot.2023.109.3-3

Received April 20, 2023. Published September 01, 2023.

Введение

Для микроэлектроники, работающей в открытом космосе, весьма высока вероятность разрушающего воздействия потока частиц электронов и более тяжелых ядер,

а также жесткого излучения гамма- и рентгеновских лучей. При этом, для сравнения, энергия протонов на Большом адронном коллайдере составляет всего 7 ТэВ, тогда как энергия протонов в космических лучах

может достигать 300 000 000 ТэВ [1]. К одному из наиболее эффективных путей создания микросхем для таких условий можно отнести использование при их изготовлении кристаллов на базе так называемых композитов «кремний на сапфире» (КНС). Вследствие относительно небольших объемов производства микроэлектроники для космической техники, стоимость одного сложного логического микрочипа для космоса может достигать 100 тыс. долларов США [1]. К этому можно добавить, что в США существуют жесткие регламенты, устанавливающие требования к чипам класса Space или Military. Определен круг оборудования, где должны применяться такие чипы, а не обычные промышленные микросхемы. Как в Европе, так и в США существуют нормативные документы, определяющие спецификацию микроэлектроники (ЕКА руководствуется нормативом ESCC, а NASA – DSCC) [1].

При изготовлении КНС пластину из сапфира, имеющего достаточно высокую твердость, предварительно утоняют, как правило, поэтапным шлифованием и полированием, после чего на ее поверхность наносится ~1,2 мкм кремния. Затем на ней формируются кристаллы и осуществляется их отделение от пластины.

Необходимо отметить, что в наше время электроника является самой динамичной отраслью экономики в мире. Среднегодовые темпы ее роста составляют более 7% в год. Отрасли промышленности, связанные с электроникой, производят продукции на 15 триллионов долларов [2].

В связи с достаточно высокой твердостью сапфира возникают определенные технологические проблемы с его обработкой, и для её осуществления необходим более твердый режущий инструмент, чем твердосплавные резцы [3]. Кроме этого, материал имеет относительно высокую хрупкость и при его абразивной механической обработке, как правило, возникают остаточные внутренние напряжения, отрицательно сказывающиеся на служебных свойствах микросхем [2, 4-6].

Одним из перспективных путей комплексного решения этих проблем может быть лезвийная обработка тонкой пла-

стины из сапфира резцами из современных модификаций кубического нитрида бора. При этом, подбором определенной геометрии режущей кромки инструмента и режимов обработки можно обеспечить «скалывание» микрочастиц с поверхности сапфира, обеспечив не только на порядок и более повышение производительности процесса утонения пластины, но и обеспечить приемлемые для последующей суперфинишной обработки шероховатости поверхности и минимизированные остаточные напряжения.

Поэтому была поставлена задача по оценке возможностей лезвийной планаризации пластин из сапфира.

Методика исследований

В качестве базового режущего материала обработки пластины из сапфира использовался кубический нитрид бора, имеющий твердость ~750 ГПа. Скорость «резания» превышала 1000 м/мин. Для обработки была разработана и изготовлена специальная оснастка. Обработка осуществлялась на серийноизготавливаемой на ОАО «Планар» установке ЭМ 2090, ориентированной на утонение полупроводниковых пластин.

Для исследований шероховатости обработанных поверхностей использовался сканирующий зондовый микроскоп NT-206 в варианте атомно-силового микроскопа (АСМ) и профилограф-профилометр TESA RUGOSURF 20, сканирующий электронный микроскоп "Mira" фирмы "Tescan".

Результаты исследований и их обсуждение

2D и 3D АСМ-изображения обработанной поверхности показан на *рис. 1*, а профиль обработанной поверхности – на *рис. 2*. Результаты контроля шероховатости приведены в *табл. 1*.

На *рис. 3* мы можем увидеть в разном приближении топографию поверхности лезвийно-обработанной подложки сапфира.

Шероховатости лезвийно-обработанной пластины и полированной стороны пластины сапфира показаны на *рис. 4*.

Исследование торцевого среза сапфи-

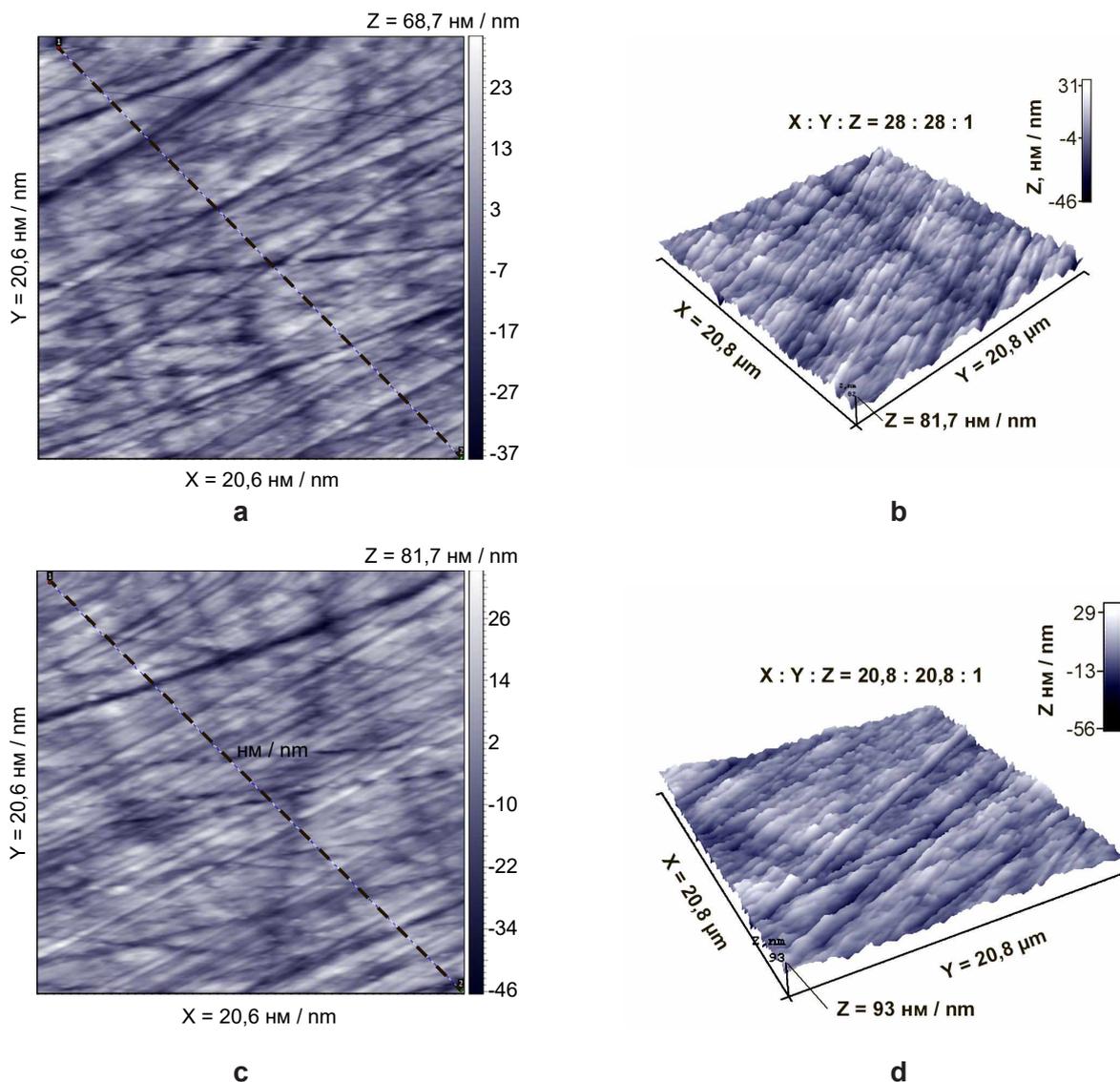


Рис. 1. 2D (а, с) и 3D (b, d) АСМ-изображения после механической лезвийной обработки
Fig. 1. 2D (a, c) and 3D (b, d) AFM images after mechanical cutting

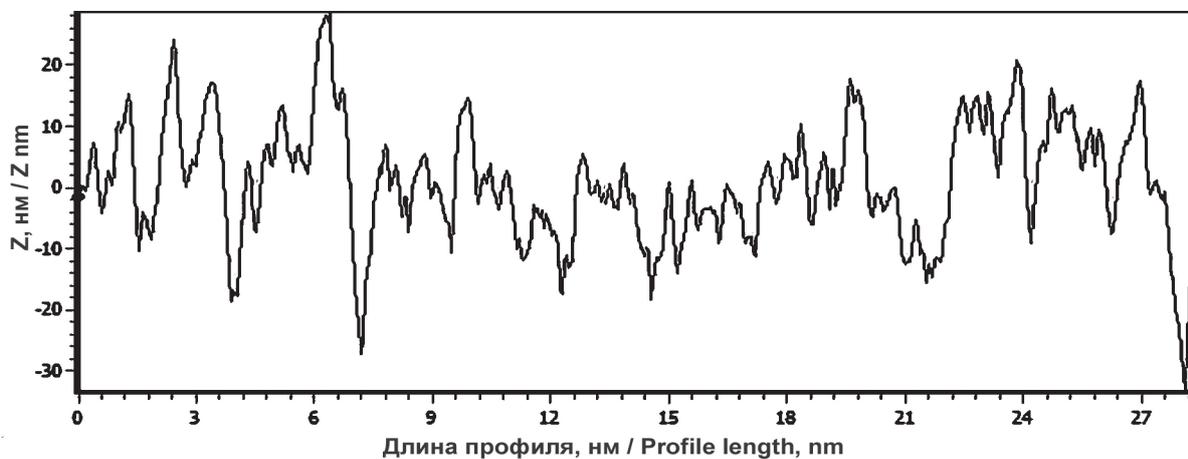


Рис. 2. Профиль обработанной поверхности после механической обработки
Fig. 2. Surface profile after machining

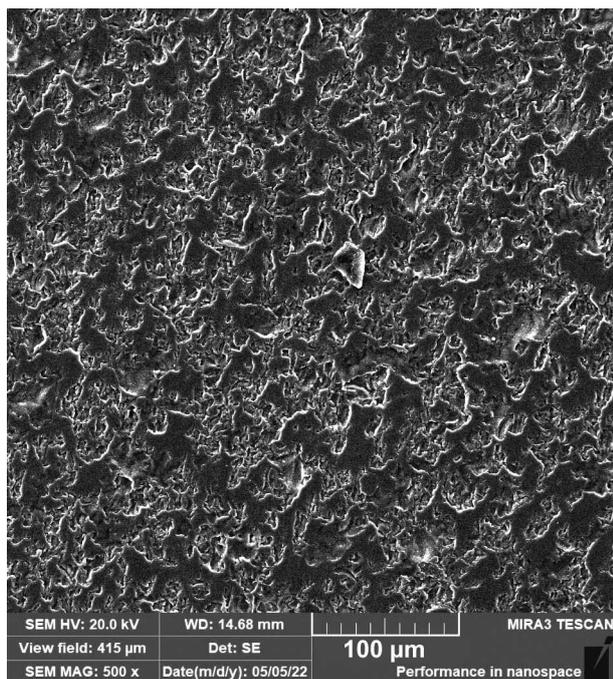
Таблица 1. Результаты обработки данных по шероховатости
Table 1. Results of data processing on roughness

Предварительная механическая обработка / Pre-machining		Чистовая механическая обработка / Fine machining	
Профиль / Profile	Шероховатость R_a , мкм / Roughness R_a , μm	Профиль / Profile	Шероховатость R_a , мкм / Roughness R_a , μm
1	0,132	6	0,017
2	0,127	7	0,020
3	0,129	8	0,020
4	0,134	9	0,018
5	0,133	10	0,020
Среднее, мкм / Average, μm	0,131	Среднее, мкм / Average, μm	0,019
Среднее квадратическое отклонение, мкм / Standard deviation, μm	0,0029	Среднее квадратическое отклонение, мкм / Standard deviation, μm	0,0014
Коэффициент вариации, % / The coefficient of variation, %	2,2	Коэффициент вариации, % / The coefficient of variation, %	7,4

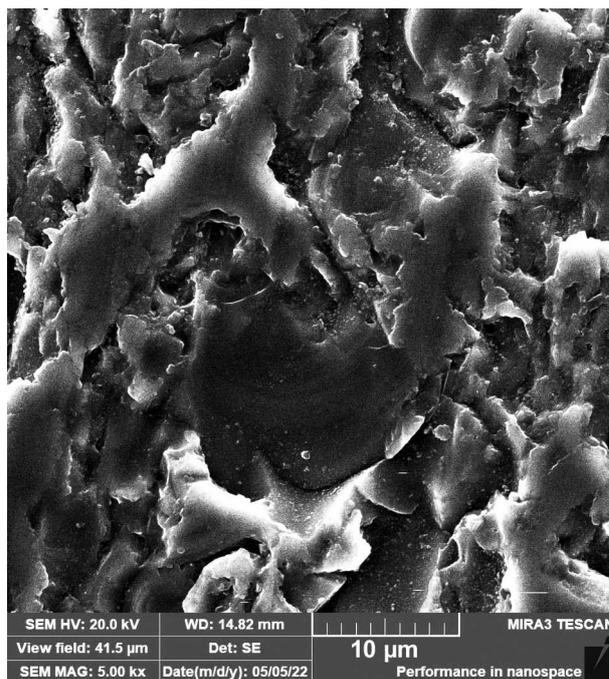
ровой пластины показало отсутствие внутренних сколов и разломов (рис. 5).

В результате проведенных исследований было также установлено, что использование современного оборудования, оснастки, режущих материалов и программно-аппаратных средств контроля и управления позволяют обеспечить утонение и планаризацию посредством КНБ поверхностей тонких пластин из сапфира. При этом, для достижения приемлемых для предварительной обработки параметров,

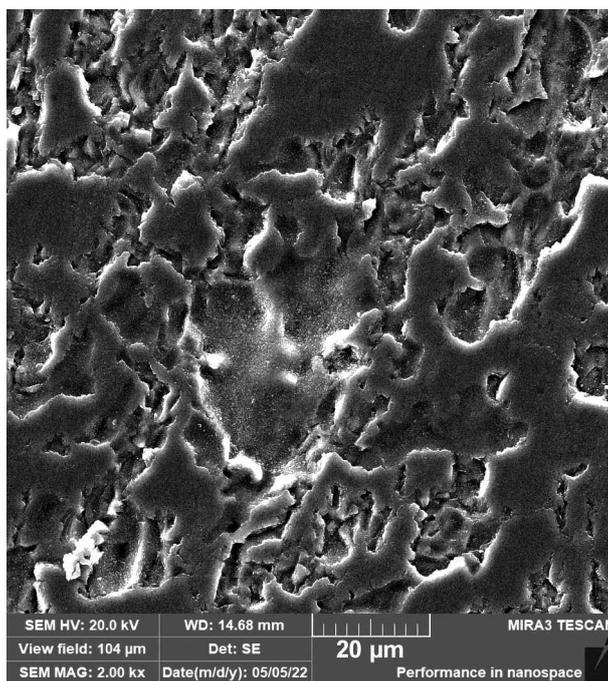
целесообразно использование высокоскоростных прецизионных электрошпинделей с аэростатическими опорами, снабженных встроенной системой оперативного контроля параметров колебаний и позволяющих обеспечить высокую плавность работы при скоростях резания лезвийным инструментом 1000 м/мин и более, а также модульных программно-аппаратных средств, позволяющих с использованием этих данных осуществить адаптивное управление параметрами функционирования электрошпинделя, специаль-



a



b



c

Рис. 3. Топография поверхности сапфира после предварительной скоростной лезвийной обработки с использованием КНБ: а – 300, б – 3000, с – 1500

Fig. 3. Surface topography of sapphire after preliminary high-speed blade processing using CBN: a – 300, b – 3000, c – 1500



Рис. 4. Шероховатости: а – лезвийно-обработанной пластины, б – полированной стороны пластины сапфира

Fig. 4. Roughness: a – blade-cut plate, b – polished side of the sapphire plate

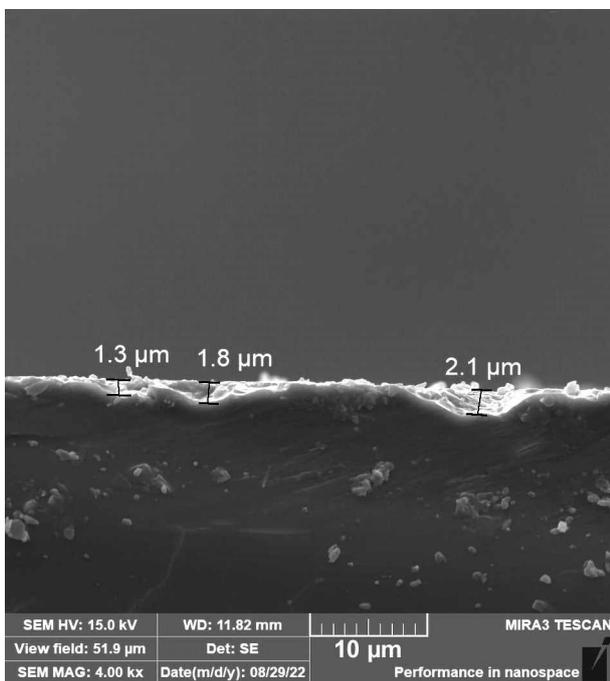


Рис. 5. Сапфировая пластина, торцевой срез

Fig. 5. Sapphire plate, end cut

ных резцовых головок и устанавливаемых на них современного режущего инструмента на основе таких материалов, как, например, кубический нитрид бора.

В рамках проводимых исследований для достижения высокой плавности и управляемой, с учетом возможных резонансов, жесткости системы «обрабатываемая заготовка–инструмент–резцовая головка–шпиндель» был разработан специальный скоростной (до 60 000 об/мин) электрошпиндель на аэростатических опорах с управляемым положением вала относительно корпуса, контролем его колебаний и регулируемой жесткостью подшипниковых опор путем изменения давления сжатого воздуха в аэростатических опорах с использованием модульных программно-управляемых средств.

Была разработана оснастка, позволяющая управлять углами резания в сочетании с обеспечением высокой жесткости системы «резцовая головка–державка–пластина КНБ». При этом был осуществлен подбор режущих углов пластины КНБ, выполненной в виде усеченного конуса.



Заключение

В статье рассмотрены современные материалы микроэлектроники типа КНБ с подложкой из пластины сапфира (КНС), используемые в аэрокосмической и военной технике, их особенности и проблемы технологий обработки, связанные с высокой твердостью. Показано, что в качестве одной из возможных технологий их обработки может быть использована лезвийная обработка режущими пластинами типа кубический карбонитрид бора (BC_2N), имеющий твердость 750 ГПа, превышающую твердость сапфира.

Было установлено, что для реализации этого подхода необходимы специализированная оснастка и оборудование, обладающее комплексом определенных свойств.

Литература

1. Микросхемы для космоса. [Электронный ресурс]: сайт. – URL: <https://academcity.org/content/mikroshemy-dlya-kosmosa> (дата обращения 03.03.2023).

2. Перспективы и тенденции развития микроэлектроники [Электронный ресурс]: сайт. – URL: <https://studopedia.org/12-3700.html> (дата обращения 03.03.2023).

3. Российская микроэлектроника для космоса [Электронный ресурс]: сайт. – URL: <http://odnako.su/hi-tech/pc-hardware/-75030-rossiyskaya-mikroelektronika-dlya-kosmosa-kto-i-chto-proizvodit> (дата обращения 03.03.2023).

4. Особенности получения инструментальных материалов на основе алмаза и кубического нитрида бора [Электронный ресурс]: сайт. – URL: https://studopedia.su/9_5609_osobennosti-polucheniya-instrumentalnih-materialov-na-osnove-almaz-i-kubicheskogo-nitrida-bora.html (дата обращения 03.03.2023).

5. Сверхтвердые материалы на основе алмаза и кубического нитрида бора для лезвийного инструмента [Электронный ресурс]:

сайт. – URL : https://studme.org/73733/tehnika/sverhtverdye_materialy_osnove_almaz-kubicheskogo_nitrida_bora_lezviynogo_instrumenta (дата обращения 02.03.2023).

6. Синани А. Б., Дынкин Н. К., Литвинов Л. А., Коневский П. В., Андреев Е. П. Твердость сапфира в различных кристаллографических направлениях // Известия РАН. Серия Физическая. – 2009. – Т. 73, № 10. – С. 1463-1465.

References

1. Microcircuits for space. [Electronic resource]: site. – URL: <https://academcity.org/content/mikroshemy-dlya-kosmosa> (Accessed 03.03.2023).

2. Prospects and trends in the development of microelectronics [Electronic resource]: site. – URL: <https://studopedia.org/12-3700.html> (accessed 03.03.2023).

3. Russian microelectronics for space [Electronic resource]: site. – URL: <http://odnako.su/hi-tech/pc-hardware/-75030-rossiyskaya-mikroelektronika-dlya-kosmosa-kto-i-chto-proizvodit> (accessed 03.03.2023).

4. Features of obtaining tool materials based on diamond and cubic boron nitride [Electronic resource]: site. – URL: https://studopedia.su/9_5609_osobennosti-polucheniya-instrumentalnih-materialov-na-osnove-almaz-i-kubicheskogo-nitrida-bora.html (accessed 03.03.2023).

5. Superhard materials based on diamond and cubic boron nitride for blade tools [Electronic resource]: site. – URL: https://studme.org/73733/tehnika/sverhtverdye_materialy_osnove_almaz-kubicheskogo_nitrida_bora_lezviynogo_instrumenta (accessed 03/02/2023).

6. Sinani, A. B., Dynkin, N. K., Litvinov, L. A., Konevsky, P. V., & Andreev, E. P. (2009). Sapphire hardness in different crystallographic directions. *Izvestiya RAN. Series Physical*, 73(10), 1463-1465.

Информация об авторах

Калиниченко Александр Сергеевич, д.т.н., директор Центра, УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь

Тычинская Ирина Дмитриевна, н.с., ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь

Басинюк Владимир Леонидович, д.т.н., профессор, директор Центра, ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь

Information about authors

Alexander S. Kalinichenko, Doctor of Technical Sciences, Director of the Center, Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

Irina D. Tychinskaya, Researcher, Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Vladimir L. Basinyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Center, Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus