

**ВЛИЯНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ  
БЕЗВОЛЬФРАМОВОГО ТВЕРДОГО СПЛАВА МАРКИ КНТ16**

**Бадамшин Артем Маратович**

*ассистент кафедры «Машиностроение и материаловедение»,  
ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет»  
Омск, Россия  
E-mail: Artembadamschin@mail.ru*

**Поворознюк Сергей Николаевич**

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение»  
ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет»  
Омск, Россия  
E-mail: Povorozn@mail.ru*

**Крутько Андрей Александрович**

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение»  
ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет»  
Омск, Россия  
E-mail: Andrey\_904@mail.ru*

**Бургонова Оксана Юрьевна**

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение»  
ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет»  
Омск, Россия  
E-mail: Oksbourg@mail.ru*

*Предмет исследования: в статье проводится исследование влияния непрерывных ионных пучков составов  $Ar^+ + Zr^+$  и  $N^+ + Ti^+$ , с энергией ионов  $E = 20$  кэВ и дозой облучения  $D = 5 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> на изменение морфологии, микротвёрдости и износостойкости при чистой токарной обработке металлорежущих пластин из безвольфрамового твердого сплава марки КНТ16 (TiCN-Ni-Mo).*

*Цель исследования: разработка технологических режимов ионно-лучевой обработки, направленных на совершенствование эксплуатационных характеристик металлорежущих инструментов из безвольфрамовых твердых сплавов системы TiCN-Ni-Mo.*

*Методы и объекты исследования: объектом исследования являлись металлорежущие пластины из безвольфрамового твердого сплава марки КНТ16 в исходном состоянии и после модификации их поверхностных слоёв непрерывными ионными пучками  $Ar^+ + Zr^+$  и  $N^+ + Ti^+$ . Изменение износостойкости режущих пластин после ионной модификации оценивалось методом построения кинетических кривых изнашивания задних поверхностей пластин при чистой токарной обработке прутков из стали марки 40ХН. Определение микротвёрдости образцов проводилось с использованием микротвердомера Shimadzu HNV-2 методом Викерса. Оценка изменения морфологии поверхности проводилось с использованием атомно-силовой микроскопии на сканирующем зондовом микроскопе Ntegra prima.*

*Результаты исследования: с использованием метода атомно-силовой микроскопии, на примере воздействия пучка  $N^+ + Ti^+$  показано, что ионно-лучевая обработка приводит к селективному распылению связующей фазы в тонком поверхностном слое облучаемого твердого сплава. Экспериментально определено, что ионное модифицирование способствует увеличению среднего ресурса работы режущих пластин на 40-60% в сравнении с исходными при чистой токарной обработке стали 40ХН в нормализованном состоянии. Установлено, что ионное облучение пучком  $Ar^+ + Zr^+$  приводит к увеличению среднего значения микротвердости сплава КНТ16 ~ на 20%, пучком  $N^+ + Ti^+$  ~ на 10%. Предложены физико-химические процессы, отвечающие за изменения свойств металлорежущих пластин из безвольфрамового твердого сплава КНТ16 в результате модифицирования его поверхностных слоёв ионными пучками.*

*Ключевые слова: безвольфрамовые твердые сплавы, непрерывные ионные пучки, ионно-лучевое модифицирование, поверхность, обработка металлов резанием.*

### **INFLUENCE OF CONTINUOUS ION BEAMS ON THE CHANGES IN THE MORPHOLOGY OF SURFACE LAYERS AND PERFORMANCE PROPERTIES OF A TUNGSTEN-FREE HARD ALLOY OF KNT16 GRADE**

**Artem M. Badamshin**

*Assistant of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science,  
Omsk State Technical University  
Omsk, Russia  
E-mail: Artembadamschin@mail.ru*

**Sergey N. Povoroznyuk**

*Candidate of Technical Sciences  
Docent of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science,  
Omsk State Technical University  
Omsk, Russia  
E-mail: Povorozn@mail.ru*

**Andrey A. Krutko**

*Candidate of Technical Sciences  
Docent of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science,  
Omsk State Technical University  
Omsk, Russia  
E-mail: Andrey\_904@mail.ru*

**Oksana Yu. Burgonova**

*Candidate of Technical Sciences  
Docent of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science,  
Omsk State Technical University  
Omsk, Russia  
E-mail: Oksbourg@mail.ru*

*Subject of research: the article studies the effect of continuous ion beams of  $Ar^+ + Zr^+$  and  $N^+ + Ti^+$  compositions, with ion energy  $E = 20$  keV and radiation dose  $D = 5 \cdot 10^{17}$  ion/cm<sup>2</sup>, on the change in morphology, microhardness and wear resistance during finishing turning processing of metal-cutting plates made of tungsten-free hard alloy grade KNT16 (TiCN-Ni-Mo).*

*The purpose of the study: the development of technological modes of ion-beam processing aimed at improving the operational characteristics of metal-cutting tools from tungsten-free hard alloys of the TiCN-Ni-Mo system.*

*Methods and objects of research: the object of research was metal-cutting plates made of tungsten-free hard alloy grade KNT16 in the initial state and after modification of their surface layers by continuous ion beams of  $Ar^+ + Zr^+$  and  $N^+ + Ti^+$ . The change in the wear resistance of cutting inserts after ion modification was estimated by constructing kinetic curves of wear of the rear surfaces of the inserts during finishing turning of bars made of 40KhN steel. The microhardness of the samples was determined using a Shimadzu HVM-2 microhardness tester using the Vickers method. The change in surface morphology was assessed using atomic force microscopy on an Ntegra prima scanning probe microscope.*

*Research results: using the method of atomic force microscopy, using the  $N^+ + Ti^+$  beam as an example, it was shown that ion-beam treatment leads to selective sputtering of the binder phase in a thin surface layer of the irradiated hard alloy. It has been experimentally determined that ion modification contributes to an increase in the average service life of cutting inserts by 40–60% compared to the initial ones during finishing turning of 40KhN steel in the normalized state. It has been established that ion irradiation with an  $Ar^+ + Zr^+$  beam leads to an increase in the average value of the microhardness of the KNT16 alloy by ~ 20%, and with an  $N^+ + Ti^+$  beam by ~ 10%. Physicochemical processes are proposed that are responsible for changes in the properties of metal-cutting inserts made of tungsten-free hard alloy KNT16 as a result of modifying its surface layers with ion beams.*

*Keywords. tungsten-free hard alloys, continuous ion beams, ion-beam modification, surface, metal cutting.*

---

## **Введение**

Безвольфрамовые твердые сплавы (БВТС) на основе карбида (карбонитрида) титана и различных металлических связующих фаз нашли свое применение для изготовления металлорежущих инструментов [1-2]. Их основное преимущество перед более распространенными вольфрамокобальтовыми (WC-Co) твердыми сплавами заключается в существенно меньшей стоимости и распространенности применяемых для их изготовления компонентов [3]. Несмотря на это, широкому внедрению данных материалов в производство металлорежущих пластин препятствует ряд факторов: более низкое чем у сплавов WC-Co значение прочностных характеристик, ударной вязкости и твердости. Ввиду данных недостатков БВТС на основе TiC[TiCN] применяются лишь при токарной и фрезерной обработке углеродистых и низколегированных сталей и ряда других легкообрабатываемых сплавов. Для решения данной проблемы существует несколько исследовательских направлений. Во-первых – это разработка принципиально новых составов безвольфрамовых твердых сплавов [4-5] и совершенствование технологии изготовления уже существующих. Последнее заключается в разработке оптимальных режимов прессования и спекания БВТС [6-7], выборе составов пластификаторов [8], фракции [9] и стехиометрии исходных порошкообразных частиц [10].

Наряду с этим, существует и ряд альтернативных методов, подразумевающих совершенствование свойств поверхностных слоёв уже изготовленных твердосплавных инструментов. К данной группе методов относятся, например: нанесение износостойких покрытий, алмазная заточка, обработка высокоэнергетическим лазерным излучением, модификация поверхности ионными пучками и др. К преимуществам последнего из перечисленных методов (ионно-лучевая модификация) можно отнести большую площадь генерируемых потоков ионов, что позволяет проводить обработку сразу нескольких образцов и сравнительно с большинством других технологий – низкую стоимость процесса.

Стоит отметить, что технология ионно-лучевой модификации (ИЛМ) показала хорошие результаты для повышения износостойкости традиционных вольфрамокобальтовых твердых сплавов групп: BK и TTK. В ряде работ [11-13] отмечается повышение ресурса работы модифицированных металлорежущих пластин в 2-4 раза в сравнении с исходными. Столь значительных эффект авторы данных работ связывают с процессами деформационного упрочнения компонентов твердых сплавов и образованием твердых химических соединений в тон-

ких поверхностных слоях модифицированных материалов. При этом, в настоящее время, прослеживается явный дефицит полученных результатов в области модификации безвольфрамовых твердых сплавов, наличие которых может иметь большой научно-практический потенциал.

Целью данной работы является исследование изменения морфологии, микротвердости и износостойкости при токарной обработке углеродистых сталей БВТС марки КНТ16 («TiCN–Ni–Mo») в результате модифицирования непрерывными ионными пучками (НПИ) составов  $Ar^+ + Zr^+$  и  $N^+ + Ti^+$  с энергией ионов  $E = 20$  кэВ и дозой облучения  $D = 5 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>.

### Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены результаты исследования кинетики изнашивания модифицированных НПИ и исходных трёхгранных пластин БВТС марки КНТ16 при чистовом точении стали 40ХН. Токарная обработка прутков проводилась при следующих режимах: скорость резания  $v = 106$  м/мин, подача  $S = 0,15$  мм/об., глубина резания  $t = 0,15$  мм. Критерием изменения износостойкости служила зависимость величины фаски по задней поверхности пластин от пройденного пути точения.

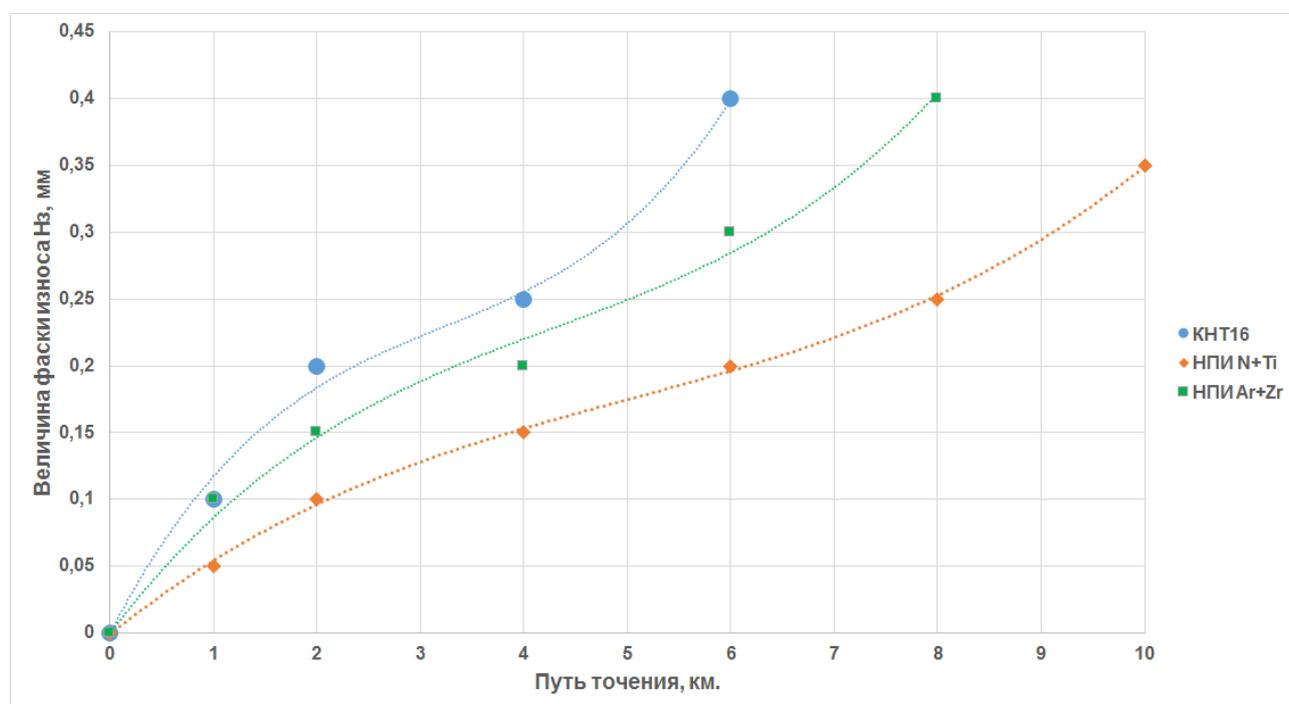


Рисунок 1 – Кинетические кривые изнашивания исходных и модифицированных ионными пучками пластин из БВТС марки КНТ16 при чистовом точении стали 40ХН

Полученные результаты свидетельствуют о том, что кинетическая кривая изнашивания для не облученной пластины имеет традиционную форму [14] с ярко выраженным участком приработки (~ первые 2 км пути точения) после чего наблюдается некоторое снижение скорости изнашивания (2-4 км точения). При этом, при достижении пути точения = 6 км наблюдается существенное увеличение значения фаски износа, величина которой к этому времени достигает 0,4 мм. Кинетические зависимости пластин облученных ионными пучками имеют схожий характер, однако их скорость изнашивания несколько ниже. Так, при анализе полученных результатов, было установлено, что наиболее оптимальным составом пучка для достижения максимального ресурса является  $N^+ + Ti^+$ . При данном режиме облучения значение фаски износа задней поверхности после 10 км. чистового точения составляет ~ 0,35 мм, что свидетельствует о повышении износостойкости облученных пластин ~ на 40-50% в сравнении с исходными.

Ниже на рисунке 2 представлены микрофотографии задних поверхностей исходной и модифицированных пластин, снятых на одной из серий испытания после прохождения 4 км течения.

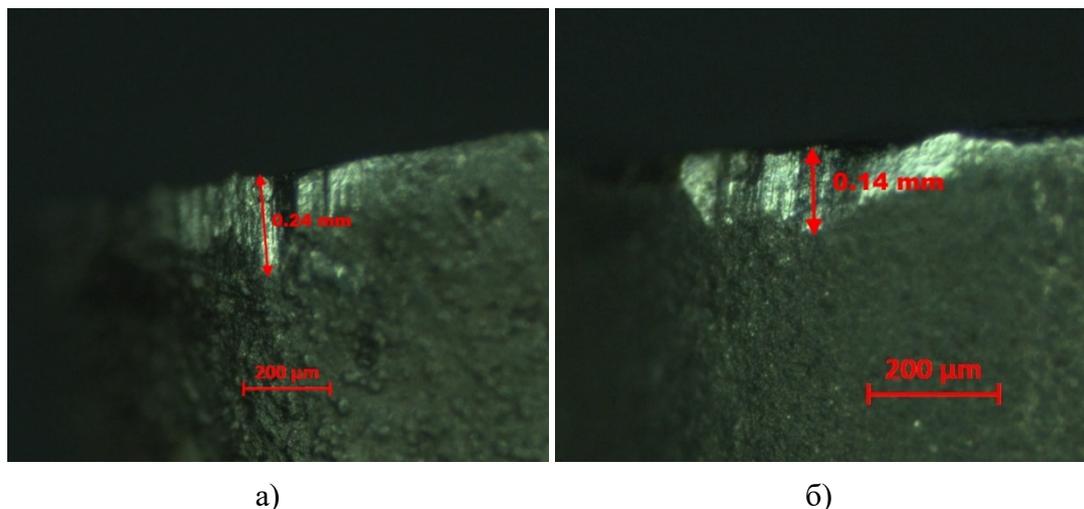


Рисунок 2 – Фаска износа задних поверхностей после 4 км. течения: (а) исходная пластина КНТ16, (б) после обработки НПИ  $N^{+}+Ti^{+}$  (б).

Таким образом, можно сделать заключение, что наиболее оптимальным режимом облучения для повышения ресурса работы пластин из БВТС КНТ16 при тчении среднеуглеродистых низколегированных сталей является облучения непрерывным ионным пучком состава:  $N^{+}+Ti^{+}$ , энергией  $E = 20$  кэВ, и дозой облучения  $D = 5 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>.

В таблице 1 приведены данные измерения микротвердости исходного и облученных образцов твердого сплава. Определение микротвердости проводилось методом Виккерса на микротвердомере Shimadzu HNV-2 при нагрузке на индентор 1.961 Н.

Таблица 1

Изменение микротвердости БВТС КНТ16 после ионного модифицирования

<b>Микротвердость исходного образца образцов HV, ед.</b>									
$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_4$	$\mu_5$	$\mu_6$	$\mu_7$	$\mu_8$	$\mu_9$	$\mu_{ср.}$
1172	1336	1254	1351	1197	1294	1366	1215	1397	1286
<b>Микротвердость после облучения НПИ <math>Ar^{+}+Zr^{+}</math> HV, ед.</b>									
$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_4$	$\mu_5$	$\mu_6$	$\mu_7$	$\mu_8$	$\mu_9$	$\mu_{ср.}$
1785	1593	1618	1539	1388	1724	1307	1513	1776	1582
<b>Микротвердость после облучения НПИ <math>N^{+}+Ti^{+}</math> HV, ед.</b>									
$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_4$	$\mu_5$	$\mu_6$	$\mu_7$	$\mu_8$	$\mu_9$	$\mu_{ср.}$
1415	1368	1589	1219	1337	1422	1305	1661	1208	1391

Из данных таблицы видно, что воздействие непрерывного ионного пучка  $Ar^{+}+Zr^{+}$  приводит увеличению среднего значения микротвердости пластин ( ~ на 20-25%) Воздействие НПИ  $N^{+}+Ti^{+}$  способствуют незначительному увеличению микротвердости (~ на 10%), что можно считать погрешностью измерения. Более существенное повышение микротвердости поверхности при облучении пучком сравнительно «тяжелых» ионов  $Ar^{+}+Zr^{+}$  может свидетельствовать о том, что основным процессом, отвечающим за упрочнение является – деформационный (повышение деффектности кристаллической структуры компонентов твердых сплавов, при их взаимодействии с пучком ионов) [15].

Исследование изменения морфологии поверхности проводилось с использованием метода атомно-силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе Ntegra prima. На рисунке 3 представлены АСМ- изображения поверхности исходного твердого сплава. Среднее значение шероховатости поверхности  $Sa$ , измеренное по полю 10 мкм<sup>2</sup>. составило

234,9 нм. Номинальная площадь поверхности 129,8 мкм<sup>2</sup>. На всей поверхности наблюдается наличие большого количества равномерно распределенных макрозёрен (TiCN) диаметр которых составляет ~ 0,5-1 мкм, а их усредненная высота выступа относительно поверхности составляла ~ 0,3-0,4 мкм.

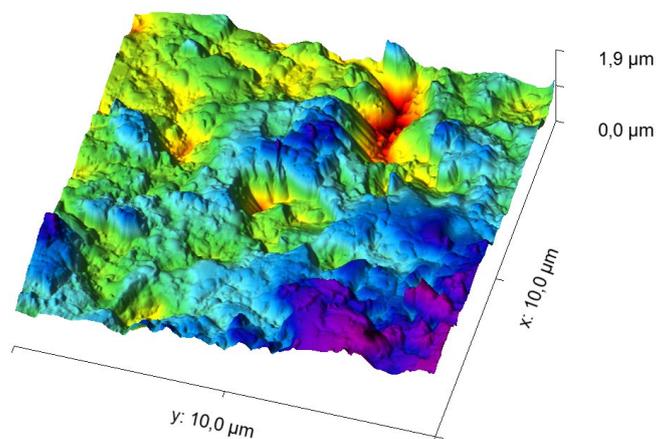


Рисунок 3 – АСМ- изображение поверхности безвольфрамового твердого сплава КНТ16 в исходном состоянии.

После модификации непрерывным ионным пучком  $N^+ + Ti^+$  (рисунок 4) наблюдалось существенное повышение количества зёрен TiCN на поверхности твердого сплава. При этом, средние значения их диаметра и выступа относительно поверхности было ниже, чем у зёрен исходного образца и составляют ~ 0,3 и 0,2 мкм соответственно.

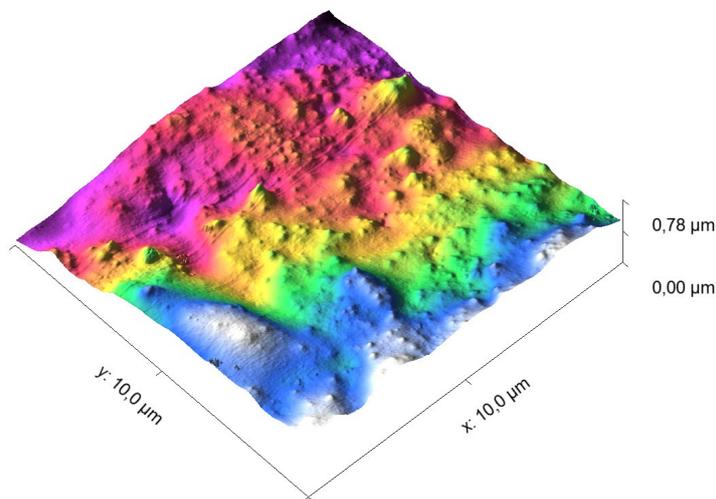


Рисунок 4 – АСМ- изображение поверхности безвольфрамового твердого сплава КНТ16 после после обработки НПИ  $N^{++}Ti^+$

«Оголение» зёрненной фазы связано с процессом селективного ионного распыления никель-молибденовой при воздействии непрерывного ионного пучка.

### Заключение и выводы

Таким образом, в данной работе проведено исследование изменения морфологии, износостойкости при токарной обработке и микротвердости металлорежущих пластин из безвольфрамового твердого сплава марки КНТ16, подвергнутого воздействию непрерывных га-

зометаллических ионных пучков. Установлено, что воздействие НПИ состава  $N^{+}Ti^{+}$ , энергией ионов  $E = 20$  кэВ и дозой облучения  $D = 5 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> приводит к увеличению ресурса работы режущих пластин при чистовом точении среднеуглеродистой низколегированной стали 40ХН на 40-60%. Воздействие НПИ состава  $Ag^{+}Zr^{+}$  с идентичными параметрами облучения способствует увеличению значения микротвердости БВТС ~ на 20%, что, предположительно, может быть связано с деформационным упрочнением компонентов твердого сплава при облучении. Полученные результаты свидетельствуют о перспективе проведения дальнейших исследований в области ионно-лучевого модифицирования безвольфрамовых твердых сплавов с целью изучения физико-химических процессов, происходящих при воздействии ионных пучков на поверхности материалов данной группы и разработке рациональных режимов упрочнения режущих инструментов.

### Литература

1. Наумова, О. Г. Пути развития и проблемы создания безвольфрамовых твердых сплавов / О. Г. Наумова, К. В. Сопин, А. С. Янюшкин. – Текст : непосредственный // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки – развитию регионов. – 2005. – Т. 2. – С. 209-212.
2. Верещака, А. А. Повышение эксплуатационных характеристик инструмента из безвольфрамовых твердых сплавов с помощью наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий / А. А. Верещака, О. Хожаев. – Текст : непосредственный // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – № 3(43). – С. 20-25.
3. Бадамшин, А.М. Влияние ионного облучения на морфологию, элементный и химический состав поверхностных слоев безвольфрамовых твердых сплавов / А. М. Бадамшин, С. Н. Несов, В. С. Ковивчак [и др.]. – Текст: непосредственный // Письма в Журнал технической физики. – 2021. – № 15(47). – С. 19-22.
4. Акимов, В. В. Исследование микротвердости безвольфрамовых твердых сплавов на основе карбида титана / В. В. Акимов. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2005. – № 3-1(23). – С. 121-124.
5. Панов, В. С. Основные направления усовершенствования состава и свойств твердых сплавов (аналитический обзор) / В. С. Панов. – Текст : непосредственный // Материаловедение. – 2020. – № 4. – С. 37-41.
6. Бурков, П. В. Оптимизация режимов горячего прессования сплавов TiC-NiTi / П. В. Бурков, С. Н. Кульков. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2004. – № 6(43). – С. 71-75.
7. Акимов, В. В. Механизм жидкофазного спекания твердосплавных композитов TiC-TiNi / В. В. Акимов. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2006. – № 6. – С. 33-35.
8. Влияние пластификатора на микроструктуру сплава на основе карбонитрида и никелида титана / И. Г. Григоров, В. А. Жилаев, А. Н. Ермаков, Ю. Г. Зайнулин. – Текст : непосредственный // Конструкции из композиционных материалов. – 2006. – № 4. – С. 46-49.
9. Гуревич, Л. М. Оценка размеров карбидных частиц и степени их деформации при взрывном плакировании заготовок порошковыми твердыми сплавами / Л. М. Гуревич, Ю. П. Трыков, Р. Е. Новиков. – Текст : непосредственный // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – № 10(170). – С. 38-43.
10. Бурков, П. В. Исследование твердых сплавов на основе карбида титана с никелидом титана / П. В. Бурков. – Текст : непосредственный // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2008. – № 6(70). – С. 40-44.
11. Калистратова, Н. П. Модификация твердых сплавов мощными ионными пучками и послерадиационной термической обработкой / Н. П. Калистратова, К. Н. Полещенко, Г. И. Геринг [и др.]. – Текст : непосредственный // Физика и химия обработки материалов. – 1999. – № 1. – С. 10-14.

12. Патент № 2119551 С1 Российская Федерация, МПК С23С 14/48. Способ обработки твердосплавного режущего инструмента : № 97117329/02 : заявл. 21.10.1997 : опубл. 27.09.1998 / Г. И. Геринг, К. Н. Полещенко, С. Н. Поворознюк, П. В. Орлов ; заявитель Омский государственный университет.

13. Полещенко, К. Н. Влияние миграции имплантированной примеси на износостойкость модифицированных твердых сплавов / К. Н. Полещенко, С. Н. Поворознюк, Г. А. Вершинин [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Омского университета. – 1997. – № 2. – С. 23-25.

14. Белашова, И. С. Режущие свойства инструментальных сталей после лазерного поверхностного легирования / И. С. Белашова, Т. В. Тарасова, Д. В. Бологов. – Текст : непосредственный // Промышленный сервис. – 2018. – № 4(69). – С. 9-13.

15. Бадамшин, А. М. Модификация металлорежущих пластин из безвольфрамового твердого сплава марки КНТ16 непрерывными ионными пучками / А. М. Бадамшин, С. Н. Поворознюк, В. В. Акимов [и др.]. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2023. – № 1(185). – С. 31-36.