

# Влияние мультиграфена на стойкость пластин из твердых сплавов

С. А. Ерёмин, В. Н. Аникин, Д. В. Руденко, А. М. Колесникова,  
Ю. В. Соболев, В. В. Кузин, М. Ю. Федоров, Н. А. Ревякина

Проведены эксперименты по получению и испытанию твердых сплавов из порошков марки ВК10ХОМ и ВРК15 покрытых мультиграфеном, полученным электрохимическим методом. Образцы с мультиграфеном спекали при стандартных режимах для марок ВК10ХОМ и ВРК15. Количество добавки мультиграфена для сплава марки ВК10ХОМ составляло 0,1 масс. % и для марки ВРК15 — 0,1 и 0,5 масс. %. Испытания на трение образцов ВК10ХОМ показали, что ширина участков износа образцов с мультиграфеном на 8 % меньше, чем исходных. При 0,1 масс. % мультиграфена плотность образцов марки ВК10ХОМ 14,5 г/см<sup>3</sup> и ВРК15 — 14,0 г/см<sup>3</sup>, а пористость 0,02 % и 2 % соответственно. Были проведены сравнительные испытания по резанию титана марки ВТ-3. В результате резания установлено, что покрытие порошков мультиграфеном повышает стойкость твердосплавных пластин обеих марок. Показано, что для ВРК15 стойкость пластины возросла в 4 раза, а для марки ВК10ХОМ не удалось установить время отказа пластины. Повышение износостойкости, предположительно вызвано снижением коэффициента трения, за счет мультиграфена, который, растворяясь в твердом сплаве, выделяется в виде графита.

**Ключевые слова:** твердый сплав, мультиграфен, углерод, износостойкость, трение.

DOI: 10.30791/1028-978X-2023-7-65-72

## Введение

Твердый сплав — это композиционный материал [1], представленный на сегодняшний день марками ВК [2], ТК [3], ТТК [4], ВРК [5] и др. Все они в той или иной мере применяются для обработки труднообрабатываемых материалов, используемых в современном машиностроении и горнодобывающих отраслях. Поэтому повышение их эксплуатационных свойств является задачей не только актуальной и промышленно важной, но и стратегической.

Существует два основных подхода, способных повысить механические свойства твердосплавных пластин: нанесение износостойких покрытий [6], в том числе высокоэнергетическая обработка [7], либо модифицирование состава твердого сплава, путем изменения концентраций его составляющих [8], а также легированием — введением различных добавок [9, 10]. Например, механические свойства твердых сплавов можно варьировать за счет изменения концентрации кобальта или путем изменения среднего размера зерна карбидной фазы, однако

эти два подхода не позволяют одновременно увеличить износостойкость и трещиностойкость твердого сплава [11].

Одним из перспективных направлений является использования в качестве добавки графена. Он обладает набором уникальных физико-механических свойств, в частности наивысшей теплопроводностью — 5500 Вт/(м·К) [12], прочностью на разрыв — 99 ГПа [13], высокой удельной поверхностью [14]. Кроме того, он имеет наименьший коэффициент трения [15]. Имеется ряд работ, в которых применяли графен с целью улучшения показателей механических характеристик композиционных материалов [16, 17].

Цель работы — исследование влияния мультиграфена, представляющего собой до 20 слоёв графена, на механические свойства твердых сплавов ВРК15 и ВК10ХОМ.

## Методы и материал

Были подготовлены твердосплавные смеси порошков марки ВК10-ХОМ и ВРК15 с покрыти-

Таблица 1

Составы смесей

Table 1

Compositions of mixtures

Марка	Состав, масс. %
ВК10ХОМ	WC — 89,2; Co — 10; CrC — 0,8
ВК10ХОМ + 0,1 % МГр	WC — 82,1; Co — 10; CrC — 0,8; МГр — 0,1
ВРК15	WC — 85; Co — 6; Re — 9
ВРК15 + 0,1 % МГр	WC — 84,9; Co — 6; Re — 9; МГр — 0,1
ВРК15 + 0,5 % МГр	WC — 84,5; Co — 6; Re — 9; МГр — 0,5

МГр — мультиграфен.

ем из мультиграфена, составы смесей приведены в табл. 1. Количество мультиграфена определяли по изменению массы смеси до и после электрохимического нанесения мультиграфена. Способ электрохимического нанесения мультиграфена, а также его структура, ранее рассмотрен в работе [18].

Подготовку смесей осуществляли по эталонной методике, режим спекания образцов соответствовал стандартному для исследуемых марок [19]. Исследование структуры исходных порошковых смесей, а также структуры спеченных образцов осуществляли методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием сканирующего электронного микроскопа марки Carl Zeiss EVO 10MA с приставкой элементного анализа Aztec(Oxford Instruments).

Испытания на стойкость проводили при продольном тчении заготовок диаметром  $D = 100$  мм и длиной  $L = 350$  мм из титанового сплава ВТ3 на токарном станке мод. CU500MRD, оснащенным системой бесступенчатого регулирования оборотов шпинделя. Использовали державку CoroTurn RC, в которой закрепляли режущую пластину квадратной формы SNGN 120408 через “стружколом”. Конструкция державки обеспечивала следующую геометрию: передний угол  $\gamma = -7^\circ$ , задний угол  $\alpha = 7^\circ$ , углы в плане  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ . Режимы резания: скорость  $v = 80$  м/мин; подача  $s = 0,054$  мм/об;

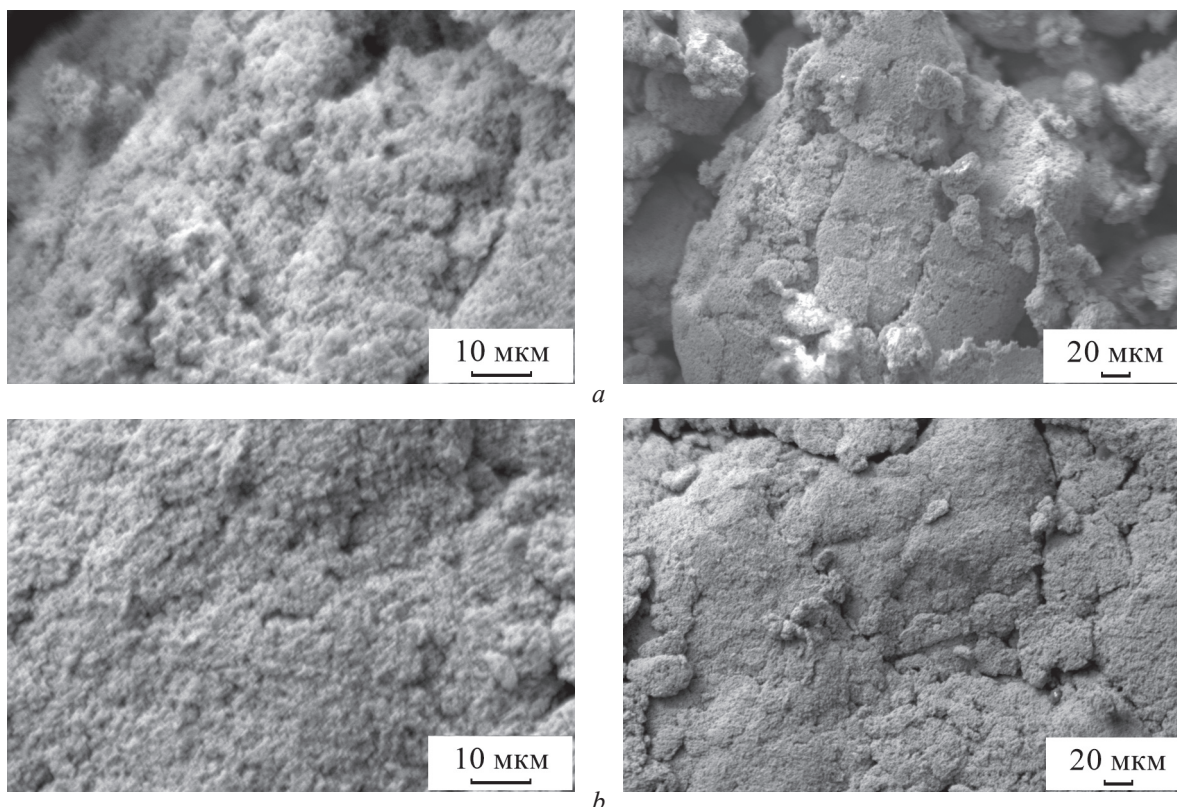


Рис. 1. СЭМ изображения подготовленных смесей ВК10ХОМ: *a* — исходная структура, *b* — с покрытием мультиграфена 0,1 масс. %.

Fig. 1. Appearance of the prepared mixtures VK10KHOM: *a* — initial structure, *b* — coated multigraphene 0.1 wt. %.

глубина резания  $t = 0,2$  мм. В процессе испытаний каждые 5 мин фиксировали износ режущих пластин по передней и задней поверхностям. На передней поверхности измеряли ширину лунки износа  $h_{\text{ип}}$ , а на задней поверхности — ширину фаски износа  $h_{\text{зп}}$ . В качестве критерия затупления (отказа) режущих пластин ВК10ХОМ использовали ширину лунки износа  $h_{\text{ип}} = 0,5$  мм, а для ВРК15 ширину лунки износа  $h_{\text{зп}} = 0,45$  мм, в этом случае считали, что произошел отказ инструмента.

## Результаты и обсуждение

Перед процессами прессования и спекания были исследованы смеси порошков методом СЭМ (рис. 1).

Ввиду малого размеров частиц мультиграфена методом СЭМ его не всегда удается визуально обнаружить.

На рис. 2 представлена структура ВРК с покрытием мультиграфена.

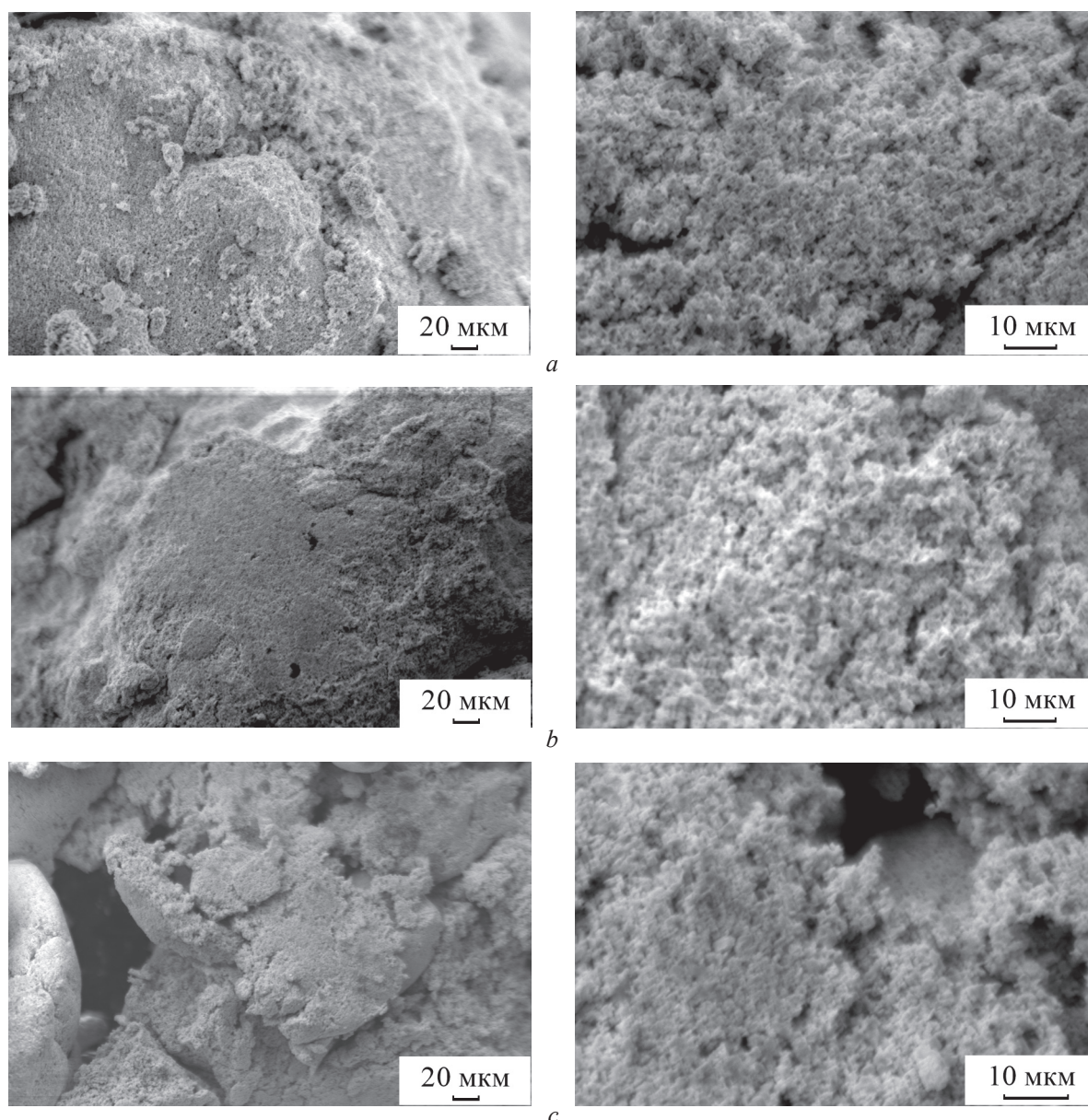


Рис. 2. СЭМ изображения структуры ВРК с покрытием мультиграфена: *a* — порошок ВРК 1; *b* — порошок ВРК 15 с добавкой мультиграфена 0,1 масс. %; *c* — порошок ВРК 15 с покрытием мультиграфена 0,5 масс. %

Fig. 2. The structure of the WRC coated with multigraphene: *a* — powder VRK 1; *b* — mixture of VRK 15 powder with the addition of multigraphene 0.1 wt. %; *c* — mixture of VRK 15 powder with multigraphene coating 0.5 wt. %.

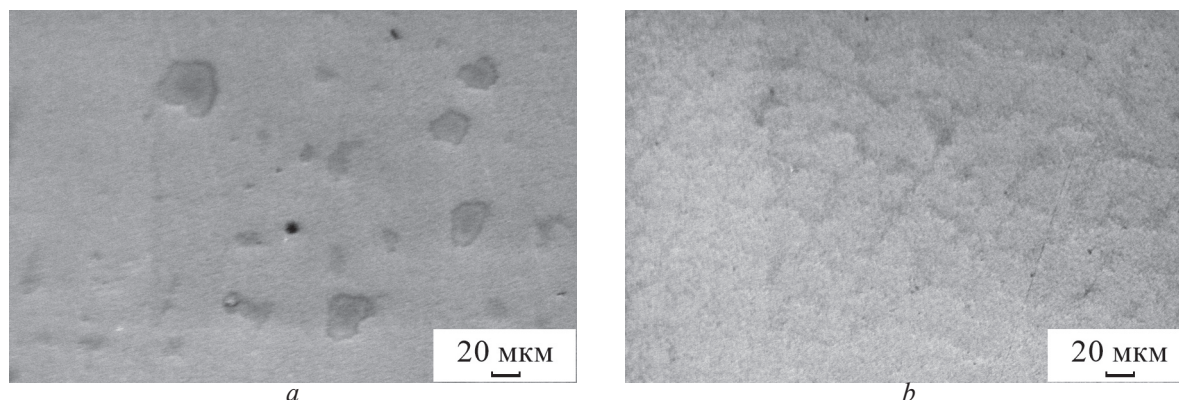


Рис. 3. СЭМ изображения поверхности образцов ВК10ХОМ после спекания: *a* — без добавок; *b* — с покрытием мультиграфена.

Fig. 3. SEM images of the surface of VK10KHOM samples after sintering: *a* — without additives; *b* — coated with multigraphene.

На рис. 2 видны темные чешуйки мультиграфена размером около 1 мкм. Смесь порошка ВРК представляет собой однородный порошок размером менее 1 мкм.

Энергодисперсионный анализ показал, что в смесях, где есть мультиграфен, присутствует углерод (табл. 2). Так как анализ локальный, то он

позволяет качественно оценить наличие или отсутствие углерода. В данном случае это означает, что в качестве него выступает мультиграфен.

После спекания образцов проводили подготовку шлифов для исследования свойств и структуры. На рис. 3 представлена поверхность твердого сплава ВК10ХОМ после спекания.

Из рис. 3 видно, что на образце с покрытием мультиграфена отсутствуют крупные поры размером от 10 мкм. Это может говорить о превалирующей роли мультиграфена в процессе заживления пор.

Исследованы твердость, плотность и пористость полученных экспериментальных образцов из ВК10ХОМ (табл. 3).

Пористость в случае с покрытием мультиграфена ниже. Твердость и плотность экспериментальных образцов в случае наличия мультиграфена выше.

Проведены сравнительные испытания износостойкости при трении образцов из твердого сплава ВК10ХОМ исходных и с добавками мультиграфена (табл. 4).

В результате проведенных испытаний на износостойкость при трении установлено, что значение

Таблица 2

Элементный анализ подготовленных смесей порошков

Table 2

Elemental analysis of prepared powder mixtures

Марка твердого сплава	Состав, масс. %
ВК10ХОМ исходный	W — 87,3; Co — 12,7; Cr — меньше чувствительности прибора
ВК10ХОМ – 0,1 масс. % МГр	W — 81; Co — 10,4; C — 8,6; Cr — меньше чувствительности прибора
ВРК15 исходный	W — 85,9; Re — 6,6; Co — 7,5
ВРК15 – 0,1 масс. % МГр	W — 81; Re — 6,8; Co — 6,4; C — 5,7
ВРК15 – 0,5 масс. % МГр	W — 79; Re — 7,5; Co — 6,5; C — 7

Таблица 3

Значения твердости, пористости и плотности спеченных образцов из ВК10ХОМ и ВК10ХОМ с 0,1 масс. % МГр

Table 3

The values of hardness, porosity and density of sintered specimens from VK10KHOM and VK10KHOM with 0.1 wt. % multigraphene

Марка твердого сплава	Твердость, HRA	Пористость, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
ВК10ХОМ	89	0,04	14,2
ВК10ХОМ + 0,1 % масс. МГр	90	0,02	14,5

Таблица 4

Результаты испытаний износостойкости сплава  
VK10XOM и VK10XOM с 0,1 масс. % МГр

Table 4

The results of testing the wear resistance of the alloy VK10KNOM  
and VK10KNOM with 0.1 wt. % multigraphene

Сплав	Ширина $h$ (мм) участка износа на поверхности образцов при трении за время трения $\tau_{тр}$		
	5 мин	10 мин	15 мин
VK10XOM исходный	2,35	2,49	2,62
VK10XOM + 0,1 масс. % МГр	2,12	2,25	2,46

ширины  $h$  участка износа при трении диском на поверхности пластины без добавок больше, чем на поверхности пластины с добавкой мультиграфена в среднем на 8 % при всех значениях времени трения.

Результаты сравнительных испытаний режущих пластин VK10XOM и VK10XOM + 0,1 масс. % мультиграфена при продольном точении титанового сплава VT3 приведены в табл. 5.

В результате сравнительных испытаний при продольном точении титанового сплава VT3 за-

Таблица 5

Результаты сравнительных испытаний режущих  
пластин VK10XOM и VK10XOM +0,1 масс. %  
мультиграфена при продольном точении  
титанового сплава VT3

Table 5

The results of comparative tests of cutting inserts VK10KNOM  
and VK10KNOM + 0.1 wt. % of multigraphene in longitudinal  
turning of titanium alloy VT3

Режущая пластина	Ширина лунки износа (мм) за время точения, $\tau$ , мин			
	5	10	15	20
Передняя поверхность ( $h_{пн}$ )				
VK10XOM (исх)	0,25	0,34	0,56	— (отказ)
VK10XOM + 0,1 масс. % МГр	0,1	0,1	0,13	0,13
Задняя поверхность ( $h_{зн}$ )				
VK10XOM (исх)	0,24	0,24	0,24	— (отказ)
VK10XOM + 0,1 масс. % МГр	0,1	0,11	0,12	0,13

фиксировано многократное превышение стойкости режущих пластин VK10XOM (0,1 масс. % МГр) над режущими пластинами VK10XOM (исх.). Отказ режущей пластины VK10XOM (исх.) произошел на 13 – 14 мин после начала резания из-за интенсивного износа передней поверхности режущей пластины. Ширина лунки износа по передней поверхности режущей пластины VK10XOM с мультиграфеном при этом времени работы составляла  $h_{пн} = 0,13$  мм, что соответствует этапу приработки инструмента. Через 20 мин точения ширина участка износ не изменилась, что явилось основанием для прекращения дальнейших испытаний режущей пластины VK10XOM с мультиграфеном.

В табл. 6 представлены характеристики твердого сплава ВРК15.

Таблица 6

Характеристики твердого сплава ВРК15

Table 6

Characteristics of hard alloy VRK15

Марка	Среднее значение твердости, HRA	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %
ВРК15	86	13,5	6
ВРК15 + 0,1 масс. % МГр	89	14,0	2
ВРК15 + 0,5 масс. % МГр	83	13,3	7

Аналогично были проведены испытания пластин ВРК 15. Результаты сравнительных испытаний режущих пластин ВРК15 (исх.), ВРК15 (0,1 масс. % МГр) и ВРК (0,5 масс. % МГр) при продольном точении титанового сплава VT3 приведены на рис. 4.

В результате сравнительных испытаний при продольном точении титанового сплава VT3 зафиксировано превышение стойкости режущих пластин ВРК15 (0,1 масс. % МГр) и ВРК15 (0,5 масс. % МГр) над режущими пластинами ВРК15 (исх.) в 3,3 и 4,3 раза соответственно. Отказ режущей пластины ВРК15 (исх.) произошел на 13 – 14 мин после начала резания из-за интенсивного износа задней поверхности режущей пластины ( $h_{зн} = 0,46$  мм). Ширина фаски износа по задней поверхности режущих пластин ВРК15 (0,1 масс. % МГр) и ВРК15 (0,5 масс. % МГр) при этом времени работы составляла  $h_{зн} = 0,2$  и  $0,25$  мм соответственно, что соответствует этапу приработки инструмента.

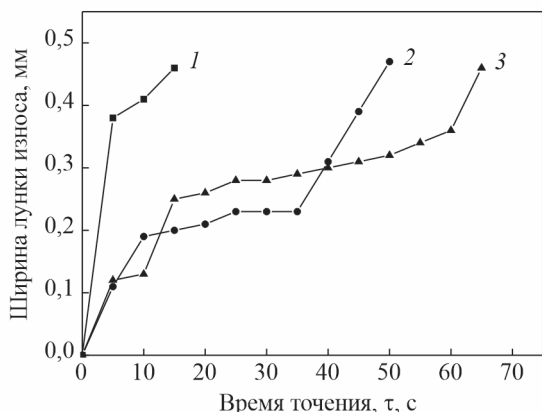


Рис. 4. Зависимость “износ – время” при продольном точении титанового сплава VT3 с  $v = 80$  м/мин;  $s = 0,054$  мм/об и  $t = 0,2$  мм режущими пластинами: 1 — ВРК15 (исх.), 2 — ВРК15 (0,1 масс. % МГр), 3 — ВРК15 (0,5 масс. % МГр).

Fig. 4. Dependence “wear – time” for longitudinal turning of titanium alloy VT3 with  $v = 80$  m/min;  $s = 0.054$  mm/rev and  $t = 0.2$  mm with cutting inserts: 1 — VRK15 (ref), 2 — VRK15 (0.1 wt. % of multigraphene) and 3 — VRK15 (0.5 wt. % of multigraphene).

Этап стабильного (нормального) износа режущей пластины ВРК15 (0,1 масс. % МГр) длился с 10 по 35 мин работы, затем с 35 по 50 мин пластина достигла критического износа. Этап стабильного (нормального) износа режущей пластины ВРК15 (0,5 масс. % МГр) длился с 15 по 60 мин работы, критический износ был, достигнут на 65 минуте работы.

## Выводы

Получены образцы ВРК15 и ВК10ХОМ из порошков покрытых мультиграфеном, размером около 1 мкм.

Показано, что покрытый мультиграфеном твердый сплав ВК10ХОМ позволяет снизить трение на 8 %, а глубина лунки не изменяется и остается на уровне 0,13 мм, что вызвано образованием графитовых включений, которые и снижают трение.

Покрытие мультиграфеном ВРК15 повышает износостойкость, отказ пластины происходит после 65 минут при покрытии мультиграфеном 0,5 масс. %.

Увеличение концентрации мультиграфена в сплаве ВРК 15 повышает его износостойкость, однако при этом пористость увеличивается.

Мультиграфен, добавленный в твердый сплав во время процессов спекания, растворяется в кобальте, после чего выпадает в виде графитовых включений, которые, равномерно распределяясь по поверхности твердого сплава, снижают коэффициент трения, тем самым повышая износостойкость пластин.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: Исследование фазо- и структурообразования в системе Ti – Al – V – C (мультиграфен) в различных термодинамических условиях (FRNF-2023-0004).*

## Литература/ References

1. Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А. и др. Конструкционные материалы: справочник. М.: Машиностроение, 1990, 688 с.
2. Kim C.S., Massa T.P., Rohrer G.S., Modeling the relationship between Microstructural features and the Strength of WC-Co Composites. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2006, v. 24 (1), pp. 89 – 100.
3. Luo R., Chen N., Xiong H., Li Z. Microhomogeneous WC-TiC-Co composite powders with enhanced sinterability via a two-step carburization method. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, v. 95, art. 105413.
4. Huang S., Xiong J., Guo Z. et al. Oxidation of WC-TiC-TaC-Co hard materials at relatively low temperature Author links open overlay panel. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2015, v. 48, pp. 134 – 140.
5. Konyashin I., Farag S., Ries B., Roebuck B. WC-Co-Re cemented carbides: Structure, properties and potential applications. *Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, v. 78, pp. 247 – 253.
6. Kazlauskas D., Jankauskas V., Kreivaitis R., Tučkutė S. Wear behaviour of PVD coating strengthened WC-Co cutters during milling of oak-wood. *Wear*, 2022, v. 498 – 499, art. 204336.
7. Peng W., Hao S., Zhao L. et al., Thermal stability of modified surface microstructure on WC-Co cemented carbide after high current pulsed electron beam irradiation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, v. 829, art. 154545.
8. Трофимов Н.Н. Ефимочкин И.Ю., Дворецков Р.М. Батиенков Р.В. Получение мелкозернистых твердых сплавов системы WC-Co (обзор). *Труды ВИАМ*, 2020, № 1 (85), с. 92 – 100.
- Trofimov N.N. Efimochkin I.Yu., Dvoretzky R.M. Batienvkov R.V. Polucheniye melkozernistykh tverdykh splavov sistemy WC-Co (obzor) [Obtaining fine-grained hard alloys of the WC-Co system (review)].

- Trudy VIAM [Proceedings of VIAM], 2020, no. 1 (85), pp. 92 – 100.
9. Gordeev Y., Bucaemsky A., Seher G. et al. Microstructure and properties of various cermets strengthening by ultrafine chock-wave particles. Powder metallurgy world congress and exhibition. Spain, 1998, v. 4, pp. 140 – 146.
  10. Николенко С.В., Дворник М.И., Пугачевский М.А. Использование порошка  $Al_2O_3$  в качестве ингибитора роста зерна в сплаве ВК8. Вопросы материаловедения, 2008, № 2, с. 100 – 105.
    - Nikolenko S.V., Dvornik M.I., Pugachevsky M.A. Ispol'zovaniye poroshka  $Al_2O_3$  v kachestve ingibitora rosta zerna v splave VK8 [Use of  $Al_2O_3$  Powder as a Grain Growth inhibitor in VK8 alloy]. Voprosy materialovedeniya [Problems of materials science], 2008, no. 2, pp. 100 – 105.
  11. Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.А. Технология и свойства спеченных твердых сплавов. М.: Изд-во МИСиС, 2004, 461 с.
    - Panov V.S., Chuvilin A. M., Fal'kovskij V. A. Tekhnologiya i svoystva spechennykh tverdykh splavov [Technology and properties of sintered hard alloys]. Moscow, MISiS Publ., 2004, 461 p.
  12. Sun Y., Zhou L., Han Y., Cui L., Effect of graphene bending in dynamic compounding process on the thermal conductivity of graphene and its composites. Materials & Design, 2022, v. 215, art. 110498.
  13. Mazilova T.I., Sadanov E.V., Mikhailovskij M., Tensile strength of graphene nanoribbons: An experimental approach. Materials Letters, 2019, v. 242, pp. 17 – 19.
  14. Lauermannová A.M., Lojka M., Jankovský O. et al., The influence of graphene specific surface on material properties of MOC-based composites for construction use. Journal of Building Engineering, 2021, v. 43, art. 103193.
  15. Li H., Brancio P.S. Ultralow friction of graphene-coated silica nanoparticle film. Computational Materials Science, 2022, v. 204, art. 111184.
  16. Li M., Song Z., Gong M., Mo D. et al., WC+Co+graphene platelet composites with improved mechanical, tribological and thermal properties. Ceramics International, 2021, v. 47, pp. 30852 – 30859.
  17. Sun J., Huang Z., Zhao J., High-hard and high-tough WC-TiC-Co cemented carbide reinforced with graphene. Materials Today Communications, 2021, v. 29, art. 102841.
  18. Ozhelkov D.Y., Eremin S.A., Anikin V.N. et al., On the mechanism of electrochemical deposition of graphene on Al foils and AlSi10MgCu particles. Materials Chemistry and Physics, 2021, v. 267, art. 124673.
  19. ГОСТ 388-74. Сплавы твердые спеченные. Марки, введ. 1976-01-01, М.: Стандартиформ, 2008, 9 с.
    - GOST 388-74. Splavy tverdyye spechennyye. Marki [Hard sintered alloys. Grades]. Input. 1976-01-01, Moscow, Standartinform, 2008, 9 p.

*Статья поступила в редакцию — 27.10.2022 г.  
после доработки — 08.11.2022 г.  
принята к публикации — 09.11.2022 г.*

**Ерёмин Сергей Александрович** — ФГБУ ВНИИТС (117638, Москва, Варшавское шоссе, 56), кандидат технических наук, заведующий лабораторией твердых сплавов и сверхтвердых материалов, специалист в области твердых сплавов и сверхтвердых материалов. E-mail: yeryominsa@mail.ru.

**Аникин Вячеслав Николаевич** — ФГБУ ВНИИТС (117638, Москва, Варшавское шоссе, 56), кандидат технических наук, заведующий научно технологическим комплексом, специалист в области твердых сплавов и сверхтвердых материалов.

**Руденко Денис Валерьевич** — ФГБУ ВНИИТС (117638, Москва, Варшавское шоссе, 56), старший инженер, специалист в области твердых сплавов и сверхтвердых материалов.

**Колесникова Анастасия Михайловна** — ФГБУ ВНИИТС (117638, Москва, Варшавское шоссе, 56), старший инженер, специалист в области сканирующей электронной микроскопии и микроструктурных исследований.

**Соболев Юрий Васильевич** — ООО Сопромат (111024, Москва, шоссе Энтузиастов, 5), Генеральный директор, специалист в области твердых сплавов и износостойких покрытий.

**Кузин Валерий Викторович** — МГТУ СТАНКИН (127055, Вадковский переулок, 3А, стр. 1), доктор технических наук, заведующий кафедрой, специалист в области металлообрабатывающего оборудования и инструмента.

**Федоров Михаил Юрьевич** — МГТУ СТАНКИН (127055, Вадковский переулок, 3А, стр. 1), кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

**Ревякина Надежда Андреевна** — ФГБУ ВНИИТС (117638, Москва, Варшавское шоссе, 56), инженер, специалист в области твердых сплавов и сверхтвердых материалов.

---

## Effect of multigraphene on the resistance of plates from hard alloys

**S. A. Eremin, V. N. Anikin, D. V. Rudenko, A. M. Kolesnikova, Y. V. Sobolev,  
V. V. Kuzin, M. Y. Fedorov, N. A. Revyakina**

In the work, experiments were carried out on the production and testing of hard alloys from powders of the VK10KHOM and VRK15 grades coated with multigraphene obtained by the electrochemical method. Samples with multigraphene were sintered under standard conditions for grades VK10KHOM and VRK15. In the weight ratio, the amount of multigraphene was 0.1 wt. % for the VK10KHOM grade alloy and 0.1 wt. % and 0.5 wt. % for the VRK15 grade. Friction tests of VK10KHOM samples showed that the width of the wear areas of samples with multigraphene is 8 % less than in the original ones. At 0.1 wt. % graphene, the density of the VK10KHOM grade is 14.5 and VRK15 is 14.0, and the porosity is 0.02 % and 2 %, respectively. Comparative tests were carried out on cutting titanium grade VT-3. As a result of cutting, it was found that the coating of powders with multigraphene increases the resistance of carbide inserts of both grades. It is shown that for VRK15 the plate durability increased by 4 times, and for the VK10KHOM grade it was not possible to establish the plate failure time. The increase in wear resistance is presumably caused by a decrease in the coefficient of friction due to multigraphene, which, dissolving in the hard alloy, precipitates in the form of nanographite clusters.

**Keywords:** hard alloy, multigraphene, carbon, wear resistance, friction

---

**Eremin Sergey** — FSBI All-Russian Scientific Research Institute of Hard Alloys (117638, Moscow, Varshavskoe shosse, 56), PhD (Eng), Head of the laboratory of hard alloys and superhard materials, specialist in the field of hard alloys and superhard materials. E-mail: yeryominsa@mail.ru.

**Anikin Vyacheslav** — FSBI All-Russian Scientific Research Institute of Hard Alloys (117638, Moscow, Varshavskoe shosse, 56), PhD (Eng), head of scientific and technological complex, specialist in the field of hard alloys and superhard materials.

**Rudenko Denis** — FSBI All-Russian Scientific Research Institute of Hard Alloys (117638, Moscow, Varshavskoe shosse, 56), senior engineer, specialist in the field of hard alloys and superhard materials.

**Kolesnikova Anastasia** — FSBI All-Russian Scientific Research Institute of Hard Alloys (117638, Moscow, Varshavskoe shosse, 56), senior engineer, specialist in the field of scanning electron microscopy and microstructure research.

**Sobolev Yury** — Sopromat LLC (111024 Moscow, Entuziastov highway, 5) General Director, specialist in the field of hard alloys and wear-resistant coatings.

**Kuzin Valery** — MSTU STANKIN (127055, Vadkovsky lane, 3A, bldg 1), Dr Sci (Eng), head of department, specialist in the field of metalworking equipment and tools.

**Fyodorov Mikhail** — MSTU STANKIN (127055 Vadkovsky pereulok, 3A, bldg. 1), PhD (Eng), senior research associate.

**Revyakina Nadezhda** — FSBI All-Russian Scientific Research Institute of Hard Alloys (117638 Moscow, Varshavskoe highway, 56), engineer, specialist in the field of hard alloys and superhard materials.