УДК 621.762 **DOI** dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-2-73-80

Экспериментальное и расчетное определения коэффициента износостойкости покрытий с добавками нанодисперсных частиц карбидов при лазерной наплавке

© 2020 г. В.П. Бирюков, Т.А. Базлова

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), г. Москва

Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва

Статья поступила в редакцию 10.01.19 г., доработана 02.11.19 г., подписана в печать 09.11.19 г.

Представлены результаты отечественных и зарубежных исследований по лазерной наплавке покрытий, содержащих упрочняющие карбидные фазы, а также металлографических и трибологических исследований покрытий порошками сплава системы Ni–Cr–B–Si, в том числе с добавлением нанодисперсных частиц карбидов титана и вольфрама. Определены значения коэффициента износостойкости (*K*_и) покрытий при испытании на абразивное изнашивание по схеме Бринелля–Хаворта. Использование *K*_и позволило определить коэффициент *C* при склерометрировании покрытий, зависящий от твердости покрытия, режимов обработки и добавки твердых частиц. Установлено, что на величину *C* влияет ряд факторов: скорость обработки, плотность подводимой мощности излучения лазера, глубина проплавления основы, наличие и содержание карбидной фазы. Чем выше глубина проплавления, тем ниже износостойкость покрытия, что связано с перемешивание материала основы и наплавляемого покрытия. Введение наночастиц карбида вольфрама в количестве от 3 до 7 % позволило повысить износостойкость покрытия в 1,5–2,0 раза по сравнению с наплавленным порошковым покрытием из сплава ПР-НХ15СР2 и в 4,6–7,1 раза по отношению к материалу основы – стали 40Х. Микротвердость исходного порошкового покрытия составила 6400–6600 МПа, а с введением в него карбидов она возрастает. Так, при содержании WC 7 % в покрытии микротвердость достигает 7620–9160 МПа. Положительные результаты наплавки получены при плотности энергии излучения до 50 Вт-с/мм², однако при дальнейшем ее увеличении происходят выгорание легирующих элементов и диссоциация карбидов.

Ключевые слова: лазерная наплавка, микротвердость, нанодисперсные частицы карбидов, коэффициент износостойкости.

Бирюков В.П. – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник лаборатории физических методов упрочнения поверхностей трения ИМАШ РАН (101990, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., 4). E-mail: laser-52@yandex.ru.

Базлова Т.А. – канд. техн. наук., доцент кафедры литейных технологий и художественной обработки материалов НИТУ «МИСиС». (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: tbazlova@mail.ru.

Для цитирования: Бирюков В.П., Базлова Т.А. Экспериментальное и расчетное определения коэффициента износостойкости покрытий с добавками нанодисперсных частиц карбидов при лазерной наплавке. Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2020. No. 2. C. 73–80. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-2-73-80.

Biryukov V.P., Bazlova T.A.

Experimental determination and calculation of wear resistance coefficient for coatings with added nanodispersed carbide particles during laser deposition

The paper presents the results of domestic and foreign studies on laser deposition of coatings using hardening carbide phases, as well as metallographic and tribological studies of coatings with Ni–Cr–B–Si alloy powders and with the addition of nanodispersed particles of titanium and tungsten carbides. Wear resistance coefficients of coatings (K_w) were determined in Brinell-Haworth abrasive wear tests. The K_w value was used in coating scratch tests to determine the coefficient *C* that depends on the coating hardness, treatment modes and addition of solid particles. It was found that the *C* value is influenced by a number of factors: processing speed, input laser power density, base penetration depth, carbide phase presence and content. The higher the penetration depth, the lower the coating wear resistance due to the mixing of the base material and the deposited coating. The introduction of tungsten carbide nanoparticles in the amount from 3 to 7 % increased the coating wear resistance by 1.5–2.0 times compared to the deposited PR-NiCr15BSi2 coating powder and by 4.6–7.1 times in relation to the base material – 40Cr steel. The microhardness of the initial powder coating was 6400–6600 MPa, and it increases with the introduction of carbides. For example, microhardness reaches 7620–9160 MPa at a WC content of 7 % in the coating. Positive deposition results were

obtained at radiation energy density up to 50 W·s/mm², but its further increase leads to the burnout of alloying elements and dissociation of carbides.

Keywords: laser deposition, microhardness, nanodispersed particles of carbides, wear resistance coefficient.

Biryukov V. P. – Cand. Sci. (Tech.), Leading researcher, Laboratory of physical methods of friction surface hardening, IMASH RAN (101990, Russia, Moscow, Maly Kharitonievsky per., 4). E-mail: laser-52@yandex.ru.

Bazlova T. A. – Cand. Sci. (Tech.), Assistant prof., Department of casting technologies and artistic processing of materials, NUST «MISIS». E-mail: tbazlova@mail.ru.

Citation: *Biryukov V.P., Bazlova T.A.* Experimental determination and calculation of wear resistance coefficient for coatings with added nanodispersed carbide particles during laser deposition. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings).* 2020. No. 2. P. 73–80 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-2-73-80.

Введение

Одной из основных задач современного машиностроения является повышение ресурса работы машин, станков и агрегатов различного назначения. Даже незначительный износ пар трения приводит к потере функциональных возможностей технических средств. Особую актуальность приобретают технологии восстановления рабочих поверхностей деталей машин и агрегатов. Для восстановления поверхностей трения деталей машин с использованием лазерного излучения применяют порошки на никелевой, кобальтовой и железной основах, а также композиционные покрытия, включающие оксиды и карбиды металлов. Упрочняющими фазами таких покрытий могут быть карбиды и бориды хрома $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_2 , CrB, Cr_2B , Сr₇C₃ [1, 2] или высокопрочные карбиды вольфрама WC [3-7], хрома Cr₃C₂ [8], титана TiC [9-13], тантала ТаС и др. Они позволяют получать крупные первичные или более мелкие вторичные карбиды этих элементов [14].

Упрочняющие фазы системы Ni-Cr-B-Si покрытий имеют повышенные значения твердости по сравнению с матрицей и вносят существенный вклад в общую твердость покрытий. Однако их наличие в структуре покрытия может неоднозначно влиять на его износостойкость. Известно, что под действием абразивного зерна крупные карбиды склонны к локальной фрагментации [15], также их наличие может приводить к ускоренному износу [16]. Введение в состав хромоникелевого покрытия значительных количеств карбида титана может сопровождаться охрупчиванием покрытия [17]. При наплавке композиционного покрытия состава 75%ПГ-СР2 + 25%ТіС происходит резкое снижение (в 2,2-2,5 раза) интенсивности изнашивания по сравнению с покрытием ПГ-СР2 при испытании по корунду [18].

Лазерная наплавка порошка Инконель с добавками до 49 % ТіС увеличивает его твердость до 35—40 HRC по сравнению с основой (<15 HRC), а износостойкость при этом повышается до 42 % [19].

Введение в состав порошковой шихты 20 мас.% монокристаллического карбида вольфрама повышает износостойкость покрытия в 6,8 раза по сравнению с материалом основы [20].

Целью настоящей работы являлось определение коэффициента износостойкости покрытий в зависимости от химического состава шихты и режимов лазерной наплавки с помощью склерометрирования и испытаний на абразивное изнашивание.

Оборудование для наплавки образцов и методы исследований

Эксперименты проводили на автоматизированном комплексе ИМАШ РАН [21]. Мощность излучения варьировали в пределах 800—1200 Вт при скорости перемещения луча 5—10 мм/с. Удельная плотность энергии составляла 38—126 Вт·с/мм². Для наплавки выбраны порошки сплава системы Ni—Cr—B—Si с размером частиц $d = 40 \pm 100$ мкм марок ПР-HX15CP2 и ПР-HX17CP4. В качестве добавок использовали нанопорошки карбидов вольфрама и титана с $d = 20 \pm 100$ нм. Перемешивание основного порошкового материала с нанодисперсными частицами карбидов проводили в специальном устройстве «пьяная бочка» в течение 8 ч.

Образцы размерами 15×20×60 мм изготавливали из стали 40Х и чугуна ВЧ60-2. Толщина наплавленного слоя составляла 0,7—0,8 мм. Металлографические исследования выполняли с использованием микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н. Структуру и химический состав наплавленных слоев исследовали на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH с системой энергодисперсионного анализа с применением режимов отраженных и вторичных электронов.

Испытания на абразивное изнашивание проводили по схеме Бринелля—Хаворта [22]. К вращающемуся резиновому диску прижимали с нагрузкой 15 Н плоский образец с наплавленным покрытием или образец из основного материала. В зону трения подавали кварцевый песок с размером частиц 0,2—0,6 мм. Продолжительность испытаний составляла 10 мин. Оценку коэффициента износостойкости покрытия и основного материала выполняли склерометрированием [23]. Нагрузка на индентор при царапании на приборе ПМТ-3 составляла 0,98 H, скорость перемещения алмазного индентора — 10 мм/с.

Результаты и их обсуждение

В первой серии экспериментов лазерную наплавку выполняли порошком ПР-НХ15СР2 на образцы из чугуна ВЧ60-2. В табл. 1 представлены результаты определения микротвердости и износостойкости по ширине царапины в сравнении с испытаниями на абразивное изнашивание при наплавке чугуна. Коэффициент износостойкости определялся из соотношения [23]

$$K = Cb/d, \tag{1}$$

где *b* и *d* — ширина царапин основного материала и наплавленного слоя соответственно, мкм; $C = 0.7 \div 5.5$ — коэффициент, зависящий от ряда факторов (твердость покрытия, режимы обработки и добавки).

Для определения коэффициента *С* проводили испытания образцов на абразивное изнашива-

ние по схеме Бринелля—Хаворта. По полученным результатам вычисляли среднюю потерю массы 3 образцов с покрытиями и 3 эталонов из материала основы. Коэффициент износостойкости при абразивном изнашивании (K_{μ}) рассчитывали делением средних значений потери массы эталона и наплавленного образца. В формуле (1) заменяли расчетное значение *K* на экспериментальное K_{μ} и вычисляли коэффициент *C*.

При лазерной наплавке обр. 2 глубина зоны оплавления основного материала (чугуна) не превышала 100 мкм. Зона наплавки обр. 3 и 4 имеет пониженное значение микротвердости, связанное с глубоким проплавлением основы на 0,4-0,5 и 0,7-0,8 мм соответственно, что вызвано превышением удельной плотности энергии при обработке образцов. При этом коэффициент износостойкости снизился в 1,3 и 1,7 раза соответственно. Его величина зависит от микротвердости наплавленного слоя, наличия карбидов и глубины проплавления основного материала. При наплавке порошком без карбидов основное влияние на K_{μ} оказывает глубина проплавления: чем она больше, тем меньше микротвердость и коэффициент износостойкости.

На рис. 1 представлена макроструктура покрытия ПР-НХ15СР2, нанесенного на чугун ВЧ60-2.

Во второй серии экспериментов лазерную наплавку на образцы из стали 40Х выполняли порошком ПР-НХ17СР4, в том числе с добавками нанокарбида титана. При оптимальных режимах обработки получены значения микротвердости наплавленного покрытия в диапазоне 7840— 10600 МПа. При этом значение K_{μ} при склерометрировании равено 10, а при испытании на абразивное изнашивание — 10,3 (табл. 2).

При повышенной мощности излучения или низкой скорости перемещения детали (луча) про-

Таблица 1. Результаты определения микротвердости и коэффициента износостойкости при наплавке порошка на основу из чугуна

№ обр.	Марки материалов	Микротвердость, МПа	Ширина царапины, мкм	Коэффициент С	Коэффициенты износостойкости	
					K	Ки
1	Чугун ВЧ60-2	3910-4380	35	1	1	1
2	ПР-НХ15СР2	4950-5520	28	1,2	1,5	1,53
3	ПР-НХ15СР2	4680-5220	28,5	1	1,18	1,22
4	ПР-НХ15СР2	4390-4960	28,9	0,7	0,85	0,88

Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya • 2 • 2020

Наноструктурированные материалы и функциональные покрытия

№ обр.	Марки материалов	Микротвердость, МПа	Ширина царапины, мкм	Коэффициент С	Коэффициенты износостойкости	
					K	Ки
1	Сталь 40Х	1970-2260	40	1	1	1
2	ПР-НХ17СР4	7840-10600	18	4,5	10	10,3
3	ПР-НХ17СР4	7180-9640	19,2	3	6,25	6,2
4	ПР-НХ17СР4	6120-9180	20,3	1,8	3,54	3,52
5	1360 + 10%TiC	8670-11200	18	5	11,1	11,2
6	1360 + 10%TiC	7650-9870	18,7	3	6,41	6,5
7	1360 + 10%TiC	6580-8960	20,1	1,9	3,78	3,9

Таблица 2. Результаты определения микротвердости	и и коэффициента износостойкости при наплавке
на сталь 40Х порошков марок ПР-НХ17СР4 и 1360 ((«Höganäs», Швеция) с добавками нанокарбида титана

Таблица 3. Результаты определения коэффициента износостойкости при наплавке на сталь 40X порошка ПР-НХ15СР2, в том числе с добавками нанокарбида вольфрама

№ обр.	Марки материалов	Микротвердость, МПа	Ширина царапины, мкм	Коэффициент С	Коэффициенты износостойкости	
					K	Ки
1	Сталь 40Х	2320-2440	32	1	1	1
2	ПР-НХ15СР2	6400-6600	23	2,5	3,5	3,54
3	ПР-HX15CP2 + 3%WC	6920-7600	20,5	2,9	4,6	4,58
4	ПР-НХ15СР2 + 5%WC	7180-8060	18,9	3,16	5,8	5,83
5	ПР-НХ15СР2 + 7%WC	7620-9160	17,4	3,85	7,1	7,12



Рис. 1. Макроструктура покрытия ПР-НХ15СР2, нанесенного на чугун ВЧ60-2 (×50)

исходит проплавление материала основы на глубину 0,4—0,8 мм (см. обр. 6 и 7 в табл. 2). Это приводит к резкому уменьшению микротвердости наплавленного слоя и появлению дефектов в виде пор и трещин. При отклонении от оптимальных режимов наплавки и проплавлении основы на глубину более 0,1 мм наблюдается уменьшение коэффициента износостойкости покрытия в 2—4 раза даже при введении в состав шихты до 10 % нанопорошка карбида титана. Это объясняется тем, что при превышении порогового значения удельной плотности энергии выше 50 Вт·с/мм² происходят диссоциация карбидов и выгорание части легирующих элементов.

В третьей серии экспериментов на образцы из стали 40Х наплавляли порошок ПР-НХ15СР2, в том числе с добавками 3—7 % наночастиц карбида вольфрама размером 20—100 нм (табл. 3).



Рис. 2. Микроструктуры наплавленных валиков порошком ПР-НХ15СР2 + WC расфокусированным (*a*, *e*) и сканирующим (*б*, *e*) лучами *a*, *б* – увеличение 200^{\times} ; *e*, *e* – 1000^{\times}

Введение наночастиц карбида вольфрама позволяет повысить износостойкость покрытия в 1,5—2,0 раза по сравнению с наплавленным покрытием ПР-HX15CP2 без добавок и в 4,6—7,1 раза по отношению к материалу основы — стали 40Х. Микротвердость исходного порошкового покрытия составила 6400—6600 МПа, а с введением карбидов она возрастает и при содержании 7 % WC в покрытии ее величина соответствует 7620—9160 МПа.

На рис. 2, *а*, *б* представлены макроструктуры образца единичной наплавленной дорожки порошком ПР-НХ15СР2 + WC с нанесенной царапиной. Под зоной наплавки расположена зона лазерной закалки из твердого состояния. Равномерная ширина царапины в зоне наплавки свидетельствует об однородности механических свойств в покрытии.

На рис. 3 показаны графики распределения химических элементов наплавленного слоя на границе с материалом основы расфокусированным лазерным лучом и сканирующим с частотой 220 Гц лазерным лучом. Применение поперечных высокочастотных колебаний лазерного луча приводит к оплавлению стали 40Х на глубину до 50 мкм. На рис. 3, δ наблюдается железо, количество которого практически равно содержанию никеля на границе со сталью 40Х. Металлургическое соединение материала наплавки и осно-



Рис. 3. Распределение химических элементов в наплавленном слое на границе со сталью 40Х *а* – наплавка расфокусированным лучом, *б* – наплавка сканирующим с частотой 220 Гц лучом

вы свидетельствует о более высокой прочности межатомных связей между соединяемыми частями при использовании высокочастотного сканирования луча при одинаковых мощности излучения и скорости перемещения образца. Положительные результаты наплавки получены при плотности энергии излучения до 50 Вт·с/мм². При дальнейшем увеличении этого значения происходят выгорание легирующих элементов и диссоциация карбидов. Износостойкость при этом резко снижается.

Разработанная методика определения коэффициента износостойкости с помощью склерометрирования позволяет на образцах-свидетелях металлографическими исследованиями сократить цикл испытаний и в ряде случаев быть единственным способом оценки износостойкости крупногабаритных изделий: коленчатых валов, валков прокатных станов, шеек валов газовых и паровых турбин и других узлов трения.

Дальнейшие исследования в этой области позволят более точно определять коэффициент износостойкости с учетом поступления новых данных по различным порошковым материалам.

Заключение

Разработаны технологические процессы лазерной наплавки покрытий порошками сплава системы Ni—Cr—B—Si, показывающие повышение износостойкости в 1,5—10,0 и 4,6—11,2 раза (при введении нанодисперных частиц карбидов титана и вольфрама) по сравнению с материалом основы. Наибольшее влияние на износостойкость оказывают добавки нанодисперсных частиц WC в порошки средней твердости (ПР-HX15CP2), что связано с увеличением микротвердости с 6400—6600 до 7620—9160 МПа в матрице покрытия и высокой способностью к сопротивлению абразивному изнашиванию карбидов.

Разработана методика определения износостойкости покрытий при лазерной наплавке с помощью склерометрирования и абразивного изнашивания. Отклонение коэффициентов износостойкости покрытий в обоих методах составило не более 5 %. Показано, что превышение плотности энергии лазерного излучения более 50 Вт·с/мм² приводит к диссоциации карбидов и резкому снижению коэффициента износостойкости при лазерной наплавке покрытий.

Литература/References

- Li Q., Zhang D., Lei T., Chen Ch., Chen W. Comparison of laser-clad and furnace-melted Ni-based alloy microstructures. Surf. Coat. Technol. 2001. Vol. 137. P. 122– 135.
- Gomez-del R.T., Garrido M.A., Fernandez J.E., Cadenas M., Rodriguez Y. Influence of the deposition techniques on the mechanical properties and microstructure of NiCrBSi coatings. Mater. Process. Technol. 2008. Vol. 204. No. 1-3. P. 304—312.
- St-Georges L. Development and characterization of composite Ni-Cr + WC laser cladding. *Wear*. 2007. Vol. 263. No. 1-6. P. 562–566. DOI: 10.1016/j.wear.2007.02.023.
- Janicki D. Direct diode laser cladding of inconel 625/WC composite coatings. J. Mech. Eng. 2016. Vol. 62. No. 6. P. 343–372. DOI: 10.5545/sv-jme.2015.3194.
- 5. Zhou S., Huang Y., Zeng X., Hu Q. Microstructure charac-

teristics of Ni-based WC composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding. *Mater. Sci. Eng.* 2008. Vol. 480. No. 1-2. P. 564—572. DOI: 10.1016/j.msea. 2007.07.058.

- Rong T., Gu D., Shi Q., Cao S., Xia M. Effects of tailored gradient interface on wear properties of WC/Inconel 718 composites using selective laser melting. Surf. Coat. Technol. 2016. Vol. 307. P. 418–427.
- Shi Y., Li Y., Liu J., Yuan Z. Investigation on the parameter optimization and performance of laser cladding a gradient composite coating by a mixed powder of Co50 and Ni/WC on 20CrMnTi low carbon alloy steel. *Opt. Laser Technol.* 2018. Vol. 99. P. 256–270. DOI: 10.1016/j. optlastec.2017.09.010.
- Han B., Li M., Wang Y. Microstructure and wear resistance of laser clad Fe—Cr₃C₂ composite coating on 35CrMo steel. *JMEPEG*. 2013. Vol. 22. P. 3749—3754. DOI: 10.1007/s11665-013-0708-7.
- Hong C., Gu D., Dai D., Gasser A., Weisheit A., Kelbassa I., Zhong M., Poprawe R. Laser metal deposition of TiC/Inconel 718 composites with tailored interfacial microstructures. Opt. Laser Technol. 2013. Vol. 54. P. 98–109. DOI: 10.1016/j.optlastec.2013.05.011.
- Wilson J.M., Shin Y.C. Microstructure and wear properties of laser-deposited functionally graded Inconel 690 reinforced with TiC. Surf. Coat. Technol. 2012. Vol. 207. P. 517–522. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.07.058.
- Shibang M., Zhihao D., Zhenwei X., YangX, Chao L., Houjie S. Parameter optimization and microstructure evolution of in-situ TiC particle reinforced Ni-based composite coating by laser cladding. J. Eng. Sci. Technol. Rev. 2018. Vol. 11. No. 2. P. 88–95. DOI: 10.25103/ jestr.112.13.
- Lei Y, Sun R., Lei J., Tang Y., Niu W. A new theoretical model for high power laser clad TiC/NiCrBSiC composite coatings on Ti₆Al₄V alloys. Opt. Laser. Eng. 2010. Vol.48. P.899–905. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2010.03.016.
- Li J., Chen C., Squartini T., He Q. A study on wear resistance and microcrack of the Ti₃Al/TiAl + TiC ceramic layer deposited by laser cladding on Ti-6Al-4V alloy. *Appl.* Surf. Sci. 2010. Vol. 257. P. 1550–1555. DOI:10.1016/j. apsusc.2010.08.094.
- Nurminen J., Nakki J., Vuoristo P. Microstructure and properties of hard and wear resistant MMC coatings deposited by laser cladding. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2009. Vol.27. P. 472–478. DOI: 10.1016/j.ijrmhm. 2008.10.008.
- Leech P. W., Li X. S., Alam N. Comparison of abrasive wear of a complex high alloy hardfacing deposit and WC—Ni based metalmatrix composite. Wear. 2012. Vol. 294-295. P. 380—386.

Наноструктурированные материалы и функциональные покрытия

- Van Acker K., Vanhoyweghen D., Persoons R., Vangrunderbeek J. Influence of tungsten carbide particle size and distribution on the wear resistance of laser clad WC/Ni coatings. Wear. 2005. Vol. 258. P. 194–202. DOI: 10.1016/j. wear.2004.09.041.
- Cai B., Tan Y.F., He L., Tan H., Li G. Tribological Properties of TiC particles reinforced Ni-based alloy composite coatings. Trans. Nonferr. Met. Soc. China. 2013. Vol. 13. P. 1681–1688. DOI: 10.1016/S1003-6326(13)62648-5.
- Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю. Роль упрочняющих фаз в сопротивлении абразивному изнашиванию NiCrBSi покрытий, сформированных лазерной наплавкой. *Трение и износ.* 2017. No. 4. (38). С. 311—318.

Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Y. Role of the strengthening phases in abrasive wear resistance of laser-clad NiCrBSi coatings. *J. Friction and Wear.* 2017. Vol. 38. No. 4. P. 272–278.

 Wilson J.M., Shin Y.C. Microstructure and wear properties of laser-deposited functionally graded Inconel 690 reinforced with TiC. Surf. Coat. Technol. 2012. Vol. 207. No. 25. P. 517–522. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.07.058. Ma Q., Li Y., Wang J., Liu K. Microstructure evolution and growth control of ceramic particles in wide-band laser clad Ni60/WC composite coatings. *Mater. Design*. 2016. Vol. 92. P. 897–905. DOI: 10.1016/j.matdes. 2015.12.121.

 Бирюков В.П., Дозоров А.В. Лазерные системы для упрочнения, наплавки деталей и точного раскроя листового материала. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. Т. 35. No. 1. С. 60—66. Biryukov V.P., Dozorov A.V. Laser systems for hardening and surfacing of parts and for precise sheet layout. J. Mach. Manufact. Reliabil. 2006. Vol. 35. No. 1. P. 46—51.

- Хрущов М.М., Бабичев М.М. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. *Hrushchov М.М., Babichev М.М.* Abrasive wear. Moscow: Nauka, 1970 (In Russ.).
- Бирюков В.П., Гудушаури Э.Г., Фишков А.А., Татаркин Д.Ю. Способ определения износостойкости покрытия: Пат. 2644440 (РФ). 2018.
 Biryukov V.P., Gudushauri E.G., Fishkov A.A., Tatarkin D.Yu. Method for determining the wear resistance of the coating: Pat. 2644440 (RF). 2018 (In Russ.).

Вышел в свет учебник «**Твердые сплавы**» (авторы: Панов В.С., Коняшин И.Ю, Левашов Е.А., Зайцев А.А.) – издательский дом НИТУ «МИСиС», 2019 г., 398 с.

Даны современные представления о теории и практике твердых сплавов, рассмотрены общие и специальные вопросы технологии производства современных спеченных твердых сплавов, их структурные особенности и свойства. Изложены физико-химические основы получения материалов нового поколения, в том числе наноструктурированных, иерархических, функционально-градиентных твердых сплавов. Освещены технологические процессы получения исходных порошков карбидов, твердосплавных смесей и изделий из них, а также методы контроля полуфабрикатов и готовых изделий. Проанализированы фундаментальные основы металловедения, особенности формирования структуры твердых сплавов, технологии нанесения износостойких покрытий. Даны области применения твердых сплавов в различных отраслях промышленности.

Заказать учебник можно по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, издательский дом НИТУ «МИСиС», а также по телефонам: (495) 638-44-16, (495) 638-44-43.