

УДК 621.91.02; 621.914

Особенности применения фрез концевых полушаровых при обработке высокотвердых слоев материала заготовок деталей

Б.Я. Мокрицкий, А.В. Космынин, С.Б. Марьин

ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Features of the use of hemispherical end mills when processing high-hardness layers of material of workpieces

B.Y. Mokritskiy, A.V. Kosmynin, S.B. Maryin

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Komsomolsk-na-Amure State University

Сложность фрезерования высокотвердых слоев деталей сопряжена с низким периодом стойкости фрез, в том числе концевых полушаровых. Такие фрезы предназначены для выполнения на заготовке изготавливаемой детали сложных поверхностей в виде полукруглых и кольцевых выемок, где обычно размещены уплотнители между сопрягаемыми деталями. ООО «Скиф-М» выпустила два каталога: «Сборные фрезы и сменные твердосплавные пластины для фрезерования» (2019 г.) и «Монолитные твердосплавные фрезы СКИФ-М» (2023 г.). Однако в них отсутствуют сведения о параметрах режима фрезерования: подаче, скорости и глубине резания. В связи с этим необходимо выявить значения этих параметров, особенно для случая обработки заготовок, выполненных из высокотвердых материалов или содержащих высокотвердые слои (твердостью HRC 65 и более). Изложены результаты применения таких фрез на примере моделей производства ООО «СКИФ-М» (г. Белгород). Показано, что при глубине резания до 2 мм полушаровые концевые фрезы способны конкурировать со сборными фрезами. Отмечено, что полушаровые концевые фрезы не следует эксплуатировать при глубине резания более 2 мм.

EDN: JTJHVL, <https://elibrary/jtjhvl>**Ключевые слова:** фрезерование высокотвердых материалов, период стойкости фрезы, полушаровые концевые фрезы

The complexity of milling high-hard layers of blanks of parts is associated with a low durability period of milling cutters, including the end hemispheres. Such cutters are designed to perform complex surfaces in the form of semicircular recesses and annular recesses on the workpiece of the manufactured part. Such surfaces are usually used to place seals in them between the mating parts. Skif-M LLC has released two catalogues on milling cutters: in 2019, "Prefabricated milling cutters and replaceable carbide plates for milling" and in 2023, "SKIF-M monolithic carbide milling cutters". They do not contain information about the parameters of the cutting mode (cutting speed, cutting depth, feed). Therefore, it is necessary to identify the values of these parameters. Especially for the case of processing blanks of parts made of high-hardness materials or containing high-hardness layers. Here, high-hardness materials are understood to have a hardness of HRC 65 or higher. The paper presents the results of using such milling cutters using the example of milling cutters manufactured by SKIF-M LLC (Belgorod). It is shown that hemispherical milling cutters are com-

petitive with prefabricated milling cutters when used with a cutting depth of up to 2 mm. Hemisphere cutters should not be operated with a cutting depth of more than 2 mm.

EDN: JTJHVL, <https://elibrary/jtjhvl>

Keywords: milling of high-hardness materials, the period of durability of milling cutters, hemispherical end mills

Для оборонной, космической и авиационной отраслей все чаще требуются изделия с существенным ростом твердости от сердцевины — основы (HRC 40 и более) материала детали к ее поверхностному слою (HRC 65 и более). В работах [1, 2] показана востребованность таких материалов, и приведены результаты их получения методом прототипирования.

Обработка столь высокотвердого слоя материала заготовки детали сопряжена с определенными трудностями. Так, строгание является малопроизводительным, обработка цилиндрическими фрезами невозможна на некоторых участках заготовки, а шлифование запрещено [3, 4].

В таких условиях востребована обработка сборными концевыми фрезами со сменными твердосплавными режущими пластинами (далее ТСП) [5–7].

Особенности конструкции различных деталей требуют применения сложнопрофильных сборных фрез, в частности концевых полушаровых [8–11], с покрытиями и без них [12, 13], изготавливаемых ООО «СКИФ-М» (г. Белгород).

Цель работы — повышение производительности фрезерования полушаровыми фрезами заготовок деталей, имеющих на поверхности высокотвердый (HRC 65...68) слой материала, и разработка рекомендаций по их применению.

Для испытаний использована методика, аналогичная описанной в работах [14–16].

Полученные результаты и обсуждение. Примеры концевых фрез приведены на рис. 1, а–г. В качестве объекта исследования выступала полушаровая концевая фреза MT100LS-MK012R02RB12-130S диаметром 12 мм (см. рис. 1, а), предназначенная для обработки плоскостей, уступов, пазов, профилей, фасок, для отрезки припуска и фрезерования с быстрой подачей.

Полушаровые концевые фрезы, выпускаемые ООО «СКИФ-М», имеют несколько модификаций в зависимости от условий эксплуатации и конструкции обрабатываемой заготовки. Их конструктивное исполнение предопределяет форму и размеры сменных ТСП. Сведения об отдельных конструкциях фрез и сменных ТСП

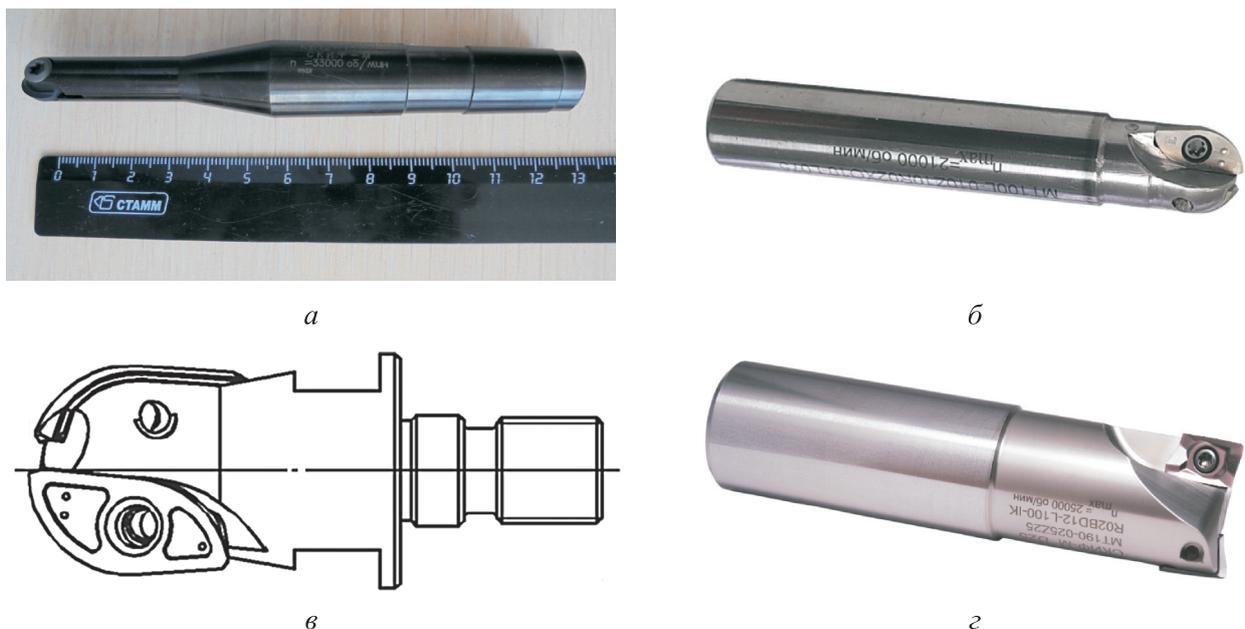


Рис. 1. Примеры концевых фрез:
а и б — внешний вид фрезы MT100LS-MK012R02RB12-130S и ее модифицированный вариант; в — схема сменной головки для вариантов исполнения полушаровой фрезы; г — внешний вид неполушаровой фрезы



Рис. 2. Внешний вид заготовок с наплавленными высокотвердыми разрезенными (а) и сплошными (б) слоями

приведены в каталоге «Монолитные твердосплавные фрезы СКИФ-М» (2023 г.). Там же для всех сменных ТСП указаны форма и размеры. Однако данные о применяемых покрытиях (состав, структура, количество слоев в покрытии, толщина слоев покрытия и т. д.) отсутствуют, это является ноу-хау производителя.

Примеры заготовок с наплавленными высокотвердыми слоями двух типов: разрезенными (с зазором между слоями) и сплошными (без зазора) приведены на рис. 2.

При нанесении высокотвердых слоев (наплавки) использовали наплавочную порошковую проволоку ПП-АН167, изготовленную по техническим условиям ТУ У28.7-2149243-021:2008. Наплавку осуществляли на установке дуговой сварки TST 350, дополненной сварочным полуавтоматом ПДГО-527-4А (производства ООО ПКФ «Кристалл», диаметр проволоки 1,8 мм).

Во всех случаях слой твердостью HRC 65...68 имел одинаковый химический состав, predeterminedный наплавочной порошковой проволокой ПП-АН167 и режимом наплавления. Высокотвердый слой наносили на заготовку, выполненную из стали 40Х.

При исследовании полушаровой концевой фрезы контролировали износ ТСП по задней грани. Износ измеряли через 10 мин работы

фрезы, используя высокоточный мультисенсорный видеокамерный прибор Micro Vu Sol 161, имеющий сопряжение с персональным компьютером, что обеспечивало точность измерения.

Результаты исследования — значения периода стойкости полушаровой концевой фрезы (см. рис. 1, а) до достижения износа ТСП 0,5 мм при различных значениях глубины резания — приведены в таблице. Высота наплавленного высокотвердого слоя составляла 10 мм. Увеличение глубины резания выполняли на ранее обработанном участке высокотвердого слоя. Следовательно, при каждом увеличении глубины резания доля наплавочной корки (см. рис. 2) становилась меньше, что изменяло условия обработки, что сочли допустимым.

Испытания проводили на вертикально-фрезерном станке 6Р12, предварительно проверив его жесткость. Скорость резания составляла 50 м/ч. При более высокой скорости резания наблюдались искрение стружки и вибрации станочной системы, что считали недопустимым. Подачу настраивали из расчета 0,05 мм/зуб. При большей подаче отмечено искрение стружки. Глубину резания изменяли в диапазоне 1,0...2,5 мм. Ширина фрезерования определялась глубиной резания и конструкцией режущей части фрезы. Для фрезы МТ100LS-МК012R02RB12-130S ширина фрезе-

Значения периода стойкости полушаровой концевой фрезы до достижения износа ТСП 0,5 мм при различных значениях глубины резания

Глубина резания, мм	Период стойкости, мин	Примечание
1,0	7	–
1,5	5	–
2,0	4	Искрение стружки и вибрации станочной системы
2,5	2	Сильное искрение стружки и вибрации станочной системы

рования зависела от глубины резания. Так, при глубине резания 1,0 мм ширина фрезерования составляла 6 мм, при глубине резания 2,5 мм — 9 мм.

Цикл обработки заготовок представлял собой следующее. Выставляли положение заготовки относительно фрезы так, чтобы она удаляла наплавку на глубину 1,0 мм. При этом на первом проходе фреза перекрывала наплавку с одной из сторон частично, например, от края наплавки заготовки, как показано на рис. 2. Включали вращение фрезы и перемещение стола фрезерного станка с заготовкой в таком направлении, чтобы реализовывалось встречное фрезерование (когда вращение фрезы и направление подачи стола с заготовкой направлены друг против друга, при этом на входе в резание зубья фрезы срезают слой наплавки с нулевой толщиной, а на выходе — слой с максимальной толщиной). Некоторое время (до тех пор, пока фреза не войдет в материал заготовки половиной своего диаметра) шел процесс ее врезания в заготовку, затем — устойчивое фрезерование, далее — выход фрезы из заготовки.

После выхода фрезы из заготовки стол перемещали в поперечном направлении на расстояние, равное 0,9 ее диаметра, и включали обратное направление перемещения стола, т. е. реализовывалось попутное фрезерование (зубья фрезы на входе срезали слой с максимальной толщиной, на выходе — с нулевой толщиной). При выходе фрезы из заготовки опять смещали стол в поперечном направлении на расстояние, равное 0,9 ее диаметра, включали направление подачи заготовки со столом так, чтобы опять реализовывалось встречное фрезерование. И так до тех пор, пока хватало ширины наплавки на заготовке.

Фрезу опять заглаблили так, чтобы глубина резания составляла 1,0 мм, и цикл обработки повторяли. Высота наплавки составляла 9,5...10,0 мм, поэтому выполняли девять таких заглаблений, не допуская срезание материала основы, на которую были нанесены наплавки. Заготовку снимали со стола, на ее место устанавливали следующую, которую закрепляли. Проводили контроль состояния ТСП фрезы, для чего ее снимали с оправки, помещали на стол видеоизмерительной машины (сенсорного центра) Micro Vu Sol 161 без снятия ТСП и измеряли износ по задней грани с точностью до 0,01 мм.

Строили график износа в зависимости от времени работы фрезы. Если износ был менее 0,5 мм, то фрезу опять устанавливали на оправку, а оправку — на станок и продолжали обработку по указанному циклу до достижения износа ТСП 0,5 мм и более. Если у некоторых ТСП уже был такой износ, а у остальных еще нет, то эксплуатацию фрезы продолжали до указанного износа. Это машинное время работы ТСП считали учетным временем фрезы и округляли до целого (до минут).

После окончания испытаний при глубине резания 1,0 мм на фрезу устанавливали новые ТСП, ее помещали на станок, настраивали глубину резания 1,5 мм и цикл обработки повторяли. Затем аналогично действовали для испытания фрезы при глубинах резания 2,0 и 2,5 мм. Фрезерование при глубине резания более 2,5 мм оказалось неприемлемым из-за вибраций станочной системы и горения стружки.

Качество обработанной поверхности оценивали по параметру шероховатости Ra .

Применение скорости резания более 50 м/мин оказалось невозможным, так как ТСП начинала скалываться.

Снижение подачи менее 0,05 мм/зуб было нерентабельным, а ее повышение до 0,08 мм/зуб — возможным, но иногда (ввиду неравномерности твердости высокотвердого наплавленного слоя) наблюдалось нежелательное искрение срезаемой стружки. Увеличение подачи более 0,08 мм/зуб оказалось недопустимым вследствие постоянного искрения стружки и перегрева ТСП, что влекло за собой резкое уменьшение периода стойкости фрезы.

Анализ результатов исследования (см. таблицу) позволяет заключить следующее:

- глубина резания 2,0 мм и более не рациональна из-за ухудшения условий обработки (искрение стружки и вибрация станочной системы);
- изменение периода стойкости фрезы не пропорционально изменению глубины резания; при ее увеличении с 1,0 до 1,5 мм период стойкости фрезы изменился на 2 мин, а при переходе с 1,5 на 2,0 мм — на 1 мин;
- предпочтительнее фрезеровать заготовку с глубиной резания до 2,0 мм.

Дополнительно выполнено сравнение значений периода стойкости исследуемой полушаровой фрезы и сборной двузубой фрезы МТ100-025W20R02BO12-ИК диаметром 20 мм (рис. 3) производства ООО «СКИФ-М». У нее квадрат-



а б
Рис. 3. Внешний вид сборной фрезы
MT100-025W20R02BO12-1K (а)
и ее режущей части (б)

ные сменные ТСП модели SDMT08T308ER. Состав и конструкцию покрытия производитель не указал.

С помощью электронного микроскопа и его дополнительных насадок выявлено, что основой (субстратом) ТСП является отечественный твердый сплав ВК8, на который нанесено двухслойное покрытие. Пластины этого субстрата выполнены на Кировградском заводе твердых сплавов (Россия). Нижний слой покрытия, прилегающий к сплаву ВК8, является нитридом циркония ZrN, верхний слой, нанесенный на ZrN, — нитридом смеси циркония, алюминия и хрома (Zr, Al, Cr)N. Толщина верхнего слоя — 2 мкм, нижнего — 3...4 мкм. Судя по текстуре

покрытий можно заключить, что их осаждали на отечественной установке ВИТ-2, имеющей три катодные системы.

Для исследования нано- и микроструктуры покрытий использовали сканирующий и просвечивающие электронные микроскопы. В качестве сканирующего выступал микроскоп EVO 50 компании Carl Zeiss (Великобритания), выполняющий съемку в режиме обратно рассеянных электронов. Наноструктурное исследование выполняли, используя просвечивающий микроскоп JEM 2100 (JEOL, Япония). Для изучения элементного состава покрытий применяли просвечивающий микроскоп компании OXFORD Instruments (Великобритания) на образцах покрытий сфокусированным ионным пучком на оборудовании Strata 205 FEL (США).

По результатам исследования установлено, что до глубины резания 1,5 мм периоды стойкости полушаровой и сборной фрез сопоставимы. Иначе говоря, они способны конкурировать по периоду стойкости, качеству обработанной поверхности и производительности. При превышении этой глубины резания более рациональной становится сборная фреза.

Вывод

Полушаровая концевая фреза MT100LS-MK012R02RB12-130S, обрабатывающая высокотвердые слои заготовок, остается работоспособной, если глубина резания не превышает 2 мм, скорость резания — 50 м/мин, а подача — 0,05 мм/зуб.

Литература

- [1] Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. *Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 2004. 287 с.
- [2] Лазуткин А.Г., Киричек А.В., Степанов Ю.С. и др. *Механика нагружения поверхности волной деформации*. Москва, Машиностроение, 2005. 148 с.
- [3] Мокрицкий Б.Я., Шелковников В.Ю. Лезвийная обработка заготовок деталей, имеющих упрочнение наплавками высокой твердости. *Металлообработка*, 2021, № 2, с. 3–7, doi: <https://doi.org/10.25960/mo.2021.2.3>
- [4] Мокрицкий Б.Я. Инструмент для фрезерования заготовок, имеющих наплавки высокой твердости. *Металлообработка*, 2021, № 5–6, с. 3–9, doi: <https://doi.org/10.25960/mo.2021.5-6.3>
- [5] Григорьев С.Н. *Методы повышения стойкости режущего инструмента*. Москва, Машиностроение, 2011. 368 с.
- [6] Chen H., Zhou A. Orbital-free density functional theory for molecular structure calculations. *NMTMA*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 1–28.
- [7] Барбышев Б.В., Путилова У.С., Некрасов Р.Ю. *Механика деформирования и разрушения при резании*. Т. 1. Нестационарный процесс резания. Тюмень, ТюмГНГУ, 2012. 212 с.

- [8] Сотова Е.С., Верещака А.А., Верещака А.С. *Керамические режущие инструменты*. Москва, Изд-во МГТУ СТАНКИН, 2013. 148 с.
- [9] Grigoriev S., Vereschaka A., Milovich F. et al. Investigation of multicomponent nanolayer coatings based on nitrides of Cr, Mo, Zr, Nb, and Al. *Surf. Coat. Technol.*, 2020, vol. 401, art. 126258, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126258>
- [10] Vereschaka A.A., Grigoriev S.N., Naumov A.G. et al. Nanoscale multilayered composite coating—applications for ecomachining. In: *Handbook of modern coating technologies*. Elsevier, 2021, pp. 377–423, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63237-1.00011-5>
- [11] Vereschaka A.A., Grigoriev S.N., Sitnikov N.N. et al. Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nano-structured coatings and their influence on cutting tool life. *Wear*, 2017, vol. 390–391, pp. 209–219, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.07.021>
- [12] Верещака А.С., Дачаева А.В., Аникеев А.И. Повышение работоспособности режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов путем комплексного применения наноструктурированного износостойкого покрытия и твердого сплава оптимального состава. *Известия МГТУ МАМИ*, 2010, № 1, с. 99–106.
- [13] Табаков В.П., Чихранов А.В. Повышение работоспособности твердосплавного инструмента путем направленного выбора рациональных параметров состава износостойкого покрытия. *СТИН*, 2016, № 3, с. 14–18.
- [14] Артамонов Е.В., Васильев Д.И., Воронин В.В. Диагностика токарной обработки металлов резанием посредством анализа вибрационных параметров. *Известия Юго-Западного государственного университета*, 2020, № 4, с. 18–28, doi: <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-18-28>
- [15] Зайдес С.А., Хо М.К. Оценка влияния тепловых полей на НДС деталей при маятниковом поверхностном пластическом деформировании. *Сталь*, 2022, № 9, с. 32–36.
- [16] Куц В.В., Толмачева Т.А. Экспериментальное исследование шероховатости обработанной поверхности при вихревом растачивании. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2023, № 4, с. 495–501.

References

- [1] Kirichek A.V., Solovyev D.L., Lazutkin A.G. *Tekhnologiya i oborudovanie statiko-impulsnoy obrabotki poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Technology and equipment of static-pulse processing by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 287 p. (In Russ.).
- [2] Lazutkin A.G., Kirichek A.V., Stepanov Yu.S. et al. *Mekhanika nagruzheniya poverkhnosti volnoy deformatsii* [Mechanics of loading of a surface by a deformation wave]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 148 p. (In Russ.).
- [3] Mokritskiy B.Ya., Shelkovnikov V.Yu. Blade machining of workpieces of the details, that have strengthening by high-hardness surfacing. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2021, no. 2, pp. 3–7, doi: <https://doi.org/10.25960/mo.2021.2.3> (in Russ.).
- [4] Mokritskiy B.Ya. A tool for milling workpieces with high hardness surfacing. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2021, no. 5–6, pp. 3–9, doi: <https://doi.org/10.25960/mo.2021.5-6.3> (in Russ.).
- [5] Grigoryev S.N. *Metody povysheniya stoykosti rezhushchego instrumenta* [Methods of increasing the durability of cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011. 368 p. (In Russ.).
- [6] Chen H., Zhou A. Orbital-free density functional theory for molecular structure calculations. *NMTMA*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 1–28. (In Russ.).
- [7] Barbyshev B.V., Putilova U.S., Nekrasov R.Yu. *Mekhanika deformirovaniya i razrusheniya pri rezanii*. T. 1. Nestatsionarnyy protsess rezaniya [Mechanics of deformation and fracture in cutting. T. 1. Non-stationary cutting process]. Tyumen, TyumGNGU Publ., 2012. 212 p. (In Russ.).
- [8] Sotova E.S., Vereshchaka A.A., Vereshchaka A.S. *Keramicheskie rezhushchie instrumenty* [Ceramic cutting tools]. Moscow, Izd-vo MGTU STANKIN Publ., 2013. 148 p. (In Russ.).
- [9] Grigoriev S., Vereschaka A., Milovich F. et al. Investigation of multicomponent nanolayer coatings based on nitrides of Cr, Mo, Zr, Nb, and Al. *Surf. Coat. Technol.*, 2020, vol. 401, art. 126258, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126258>

- [10] Vereschaka A.A., Grigoriev S.N., Naumov A.G. et al. Nanoscale multilayered composite coating—applications for ecomachining. In: *Handbook of modern coating technologies*. Elsevier, 2021, pp. 377–423, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63237-1.00011-5>
- [11] Vereschaka A.A., Grigoriev S.N., Sitnikov N.N. et al. Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nano-structured coatings and their influence on cutting tool life. *Wear*, 2017, vol. 390–391, pp. 209–219, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.07.021>
- [12] Vereshchaka A.S., Dachava A.V., Anikeev A.I. Working capacity enhancement of cutting tools in terms of machining of difficult-to-cut materials by complex application of wear-resistant coating and hard alloy. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2010, no. 1, pp. 99–106. (In Russ.).
- [13] Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Increase of serviceability of hard-alloy tools by directed selection of rational parameters of wear-resistant coating composition. *STIN*, 2016, no. 3, pp. 14–18. (In Russ.).
- [14] Artamonov E.V., Vasilyev D.I., Voronin V.V. Rapid diagnostic test of metal turning using vibration parameters analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Southwest State University], 2020, no. 4, pp. 18–28, doi: <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-18-28> (in Russ.).
- [15] Zaydes S.A., Kho M.K. Evaluation of thermal fields influence upon the components' stressed deformed state in pendulum surface plastic deformation. *Stal*, 2022, no. 9, pp. 32–36. (In Russ.).
- [16] Kuts V.V., Tolmacheva T.A. Experimental study of the roughness of the treated surface during vortex boring. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2023, no. 4, pp. 495–501. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 29.05.2025

Информация об авторах

МОКРИЦКИЙ Борис Яковлевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение». ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, пр-т Ленина, д. 27, e-mail: boris@knastu.ru).

КОСМЫНИН Александр Витальевич — доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе. ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, пр-т Ленина, д. 27, e-mail: avkosm@knastu.ru).

МАРЬИН Сергей Борисович — доктор технических наук, профессор, заведующей кафедрой «Авиастроение». ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, пр-т Ленина, д. 27, e-mail: maryinsb@mail.ru).

Information about the authors

MOKRITSKIY Boris Yakovlevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amure, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 27, e-mail: boris@knastu.ru).

KOSMYNIN Aleksander Vitalevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Vice-Rector for Scientific Work. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amure, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 27, e-mail: avkosm@knastu.ru).

MARYIN Sergey Borisovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Aircraft Engineering. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amure, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 27, e-mail: maryinsb@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Мокрицкий Б.Я., Космынин А.В., Марьин С.Б. Особенности применения фрез концевых полушаровых при обработке высокотвердых слоев материала заготовок деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 2, с. 25–31.

Please cite this article in English as:

Mokritskiy B.Y., Kosmynin A.V., Maryin S.B. Features of the use of hemispherical end mills when processing high-hardness layers of material of workpieces. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 2, pp. 25–31.