



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №8 (134). С. 20-26.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №8 (134). P. 20-26.

Научная статья

УДК 621.785.5

doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-20-26

Основные результаты и направления дальнейших исследований по низкотемпературному плазменному формированию композитных структур на рабочих поверхностях геометрически сложных металлических изделий

Борис Максович Бржозовский¹, д.т.н.,

Елена Петровна Зинина², д.т.н.,

Владимир Васильевич Мартынов³, д.т.н.

*^{1,2,3}Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН),
Москва, Россия*

¹ bmbsar85@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² e-zinina@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ v-martynov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4177-0963>

***Аннотация.** Представлены результаты и обоснованы направления дальнейших исследований по повышению эффективности низкотемпературного плазменного формирования композитных структур на рабочих поверхностях геометрически сложных металлических изделий (в частности, металлорежущего инструмента) с целью улучшения показателей их долговечности и расширения областей практического применения.*

***Ключевые слова:** геометрически сложное металлическое изделие, долговечность, поверхностный слой, физико-механические свойства, электрофизические свойства, низкотемпературное плазменное упрочнение, композитная структура, металлорежущий инструмент*

***Благодарности:** материал подготовлен в рамках выполнения научного исследования по гранту Российского научного фонда №19-19-00101.*

***Для цитирования:** Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В. Основные результаты и направления дальнейших исследований по низкотемпературному плазменному формированию композитных структур на рабочих поверхностях геометрически сложных металлических изделий // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №8 (134). – С. 20-26. doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-20-26*

Original article

The main results and directions of further research on low-temperature plasma formation of composite structures on functional surfaces of geometrically complicated metal products

Boris M. Brzhozovskii¹, Dr. Sc.Tech.,

Elena P. Zinina², Dr. Sc.Tech.,

Vladimir V. Martynov³, Dr. Sc.Tech.

*^{1,2,3} Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN),
Moscow, Russia*

¹bmbsar85@yandex.ru, ²e-zinina@bk.ru, ³v-martynov@mail.ru

Annotation. The attained results and valid directions of further research on improving the efficiency of low-temperature plasma formation of composite structures on the functional surfaces of geometrically complicated metal products (in particular, metal-cutting tools) are conducive to improving their durability and expanding areas of application.

Keywords: geometrically complicated metal product, durability, outer zone, physical mechanical properties, electrophysical properties, low-temperature plasma hardening, composite structure, metal-cutting tool

Acknowledgements: the material was prepared within the framework of scientific research under the grant of the Russian Science Foundation No. 19-19-00101.

For citation: Brzhozovsky, B.M., Zimina, E.P., Martynov, V.V. The main results and directions of further research on low-temperature plasma formation of composite structures on functional surfaces of geometrically complicated metal products. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.8 (134), pp. 20-26. doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-20-26

Реальный ресурс современных изделий различного целевого назначения (в том числе металлорежущего инструмента) часто отличается от ресурса, требуемого по условиям их эффективной (в том числе оправданной экономически) эксплуатации. В связи с этим для обеспечения заданных значений показателей ресурса необходимо использовать дополнительные методы технологического воздействия на изделие при изготовлении. Прежде всего, этому воздействию целесообразно подвергать поверхностный слой рабочей части изделия, от свойств которого ресурс зависит в наибольшей степени.

Одним из перспективных направлений целенаправленного изменения свойств поверхностного слоя изделий, прежде всего сложнопрофильных, является воздействие на него комбинированным газовым разрядом низкотемпературной плазмы [1], которое придает поверхностному слою уникальные свойства, во-первых, созданием нанокластерной структуры (кластеров в аморфной связке), во-вторых, «залечиванием» поверхностных дефектов, прежде всего микротрещин, в-третьих, снижением высоты микронеровностей, что обеспечивает повышение показателей, характеризующих долговечность изделий.

Однако результаты изучения воздействия комбинированного газового разряда низкотемпературной плазмы на поверхность металлических изделий показали, что оно в значительной степени зависит от исходных свойств поверхностного слоя изделия: физико-механических, химических и электрических, которые имеют значительный разброс по всем характеризующим их показателям. Назначение же режимных параметров низкотемпературной плазменной обработки производится на основании учета только физико-механических свойств поверхностного слоя, а также массовых и геометрических параметров

изделия. В результате возникает разброс значений параметров, характеризующих сформированные свойства поверхностного слоя, даже при обработке однотипных изделий, что приводит к разбросу значений показателей их эксплуатационной надежности.

Снижение величины разброса возможно на основе учета исходных химических и электрических свойств поверхностного слоя, поскольку их показатели либо непосредственно влияют на формирование показателей свойств поверхностного слоя по результатам воздействия на него низкотемпературной плазмы, либо отображают ход процесса формирования. Однако для учета названных свойств необходимо оценить его эффективность теоретически, поскольку это определит, что для учета свойств необходимо сделать практически. С этой целью был выполнен комплекс исследований по трем основным направлениям.

В ходе решения задач первого направления:

- уточнено теоретическое описание физических процессов, протекающих в комбинированном газовом разряде низкотемпературной плазмы. Найдены оценки основных характеризующих плазму физических параметров. На основе анализа вольтамперных характеристик разряда определены основные физические параметры плазмы в зоне ускорения электронов до высоких энергий при различных значениях подводимой СВЧ мощности;

- теоретически и экспериментально исследованы протекающие в разряде нелинейные явления. Показано, что с точки зрения взаимодействия с поверхностью изделия возникновение нелинейного поведения является сигналом ухудшения взаимодействия электромагнитного и электростатического полей и, как следствие, необходимости изменения значений режим-

ных параметров непосредственно в процессе обработки;

– разработана модель, позволяющая получать и изучать поведение сигналов, которые возникают в электрической цепи технологической установки при взаимодействии плазмы с поверхностью изделия. Обоснован показатель, который может использоваться для решения вопросов управления ходом процесса синтеза композитной структуры. Проведено исследование возможности управления процессом. Сформированы направления практической реализации управления за счет внесения изменений в значения режимных параметров, обеспечивающих оптимизацию взаимодействия электромагнитного и электростатического полей;

– выполнен комплекс исследований по оценке влияния химических свойств поверхности на результаты ее взаимодействия с плазмой и показатели эксплуатационной надежности изделий, в частности, коррозионной стойкости. Доказано, что характер взаимодействия плазмы с поверхностью определяется величиной и знаком ее заряда, который формируется в зависимости от сочетания режимных параметров и активно влияет на протекание либо процесса десорбции, либо процессов адсорбции и хемосорбции. На примере образцов из стали 40X13 установлено, что основу повышения коррозионной стойкости после воздействия плазмы составляет изменение лимитирующих стадий процесса образования оксидов и гидроксидов железа и хрома с диффузионной на разряда-ионизации и процесса коррозии с химической на диффузионную;

– разработана методика учета химических свойств поверхности при низкотемпературной плазменной обработке, основанная на измерении ее стационарного потенциала.

Основным результатом решения задач первого направления стало научное обоснование условий, которые являются наиболее благоприятными для целенаправленного изменения свойств поверхностного слоя.

В ходе решения задач второго направления:

– реализованы каналы для наблюдения за формированием и поведением облака плазмы по параметрам оптического сигнала, а также за процессом формирования композитной структуры по параметрам электрического сигнала;

– проведены экспериментальные исследования по оптимизации условий формирования комбинированного газового разряда низкотемпературной плазмы и его взаимодействия с поверхностью изделия за счет управления электромагнитным и электростатическим полями. Разработана технология управления взаимодействием полей, направленная на обеспечение эффективности низкотемпературных плазменных технологий при формировании композитных структур;

– разработан новый способ целенаправленного изменения исходных свойств поверхности изделий без переноса вещества в вакууме, основанный на методе катодного внедрения из водно-органического электролита нового состава, позволяющего вести процесс внедрения при комнатной температуре, с последующей обработкой в низкотемпературной плазме. Выполнены экспериментальные исследования способа, показавшие, что он позволяет формировать на поверхностях плотные наноструктурированные тонкопленочные слои, которые за счет повышения микротвердости и снижения коэффициента трения обладают повышенной износостойкостью, а за счет повышения гидрофобности и улучшения антифрикционных свойств повышенной коррозионной стойкостью;

– изучены возможности воздействия на процесс охлаждения изделия с целью создания условий для получения структур с оптимальным соотношением объемов аморфной связки и кластеров. По результатам изучения обоснована возможность использования в качестве способа воздействия изменение давления в рабочей камере установки перед завершением воздействия плазмы на поверхность и доказать, что структура с оптимальным соотношением объемов аморфной связки и кластеров формируется при увеличении давления;

– по результатам изучения и раскрытия механизма влияния плазмы на изменение химического состава и уплотнение поверхности обоснована необходимость и реализована возможность обработки в среде смеси технологических газов, в частности азота и аргона. Установлено, что присутствие аргона в смеси обеспечивает, с одной стороны, большее суммарное уплотнение поверхностного слоя, с другой – меньшее изменение стационарного потенциала поверхности, за счет чего она остается более

электронейтральной по сравнению с поверхностью, обработанной в среде одного газа (в частности, азота);

– разработана методика оценки результатов формирования композитных структур на поверхностях металлических изделий. Материалы оценки дают возможность обоснованно разрабатывать и реализовывать мероприятия, направленные на формирование структур с заданными свойствами, позволяющими повысить долговечность изделий за счет повышения износостойкости и/или коррозионной стойкости.

Результаты решения задач второго направления позволили создать цифровые технологии низкотемпературного плазменного наноструктурирования, под которыми понимается совокупность процедур, обеспечивающая практическую реализацию условий целенаправленного формирования свойств поверхностного слоя изделий за счет их стабилизации, легирования поверхностного слоя и/или создания в нем сложных химических структур без переноса вещества в вакууме.

В ходе решения задач третьего направления на примере металлорежущего инструмента различного назначения с наноструктурированной рабочей частью выполнены работы, направленные на оценку его эксплуатационных возможностей по данным, полученным при проведении экспериментальных исследований и испытаний в условиях реального производства. Основной целью стало решение актуальной для практики проблемы, связанной с улучшением обрабатываемости материалов резанием. По результатам выполнения работ:

– на примере инструмента из твердого сплава показано, что обрабатываемость может быть улучшена за счет повышения уровня стабильности режущих свойств, которые оцениваются по сигналу термоЭДС за счет либо снижения значений сигнала, либо сокращения их разброса. Практически это позволило увеличить ресурс и стабилизировать качество формируемой поверхности, т.е. повысить не только производительность, но и надежность технологических процессов механической обработки, а также обосновать рекомендации по максимально эффективной эксплуатации инструмента;

– сформулированы условия, обеспечивающие улучшение обрабатываемости за счет, во-первых, формирования максимального по глубине и плотности наноструктурированного слоя, во-вторых, снижения интенсивности возникновения и действия на слой растягивающих усилий как следствия протекающих на

контактных поверхностях адгезионных процессов;

– проведено сравнение характеристик отечественного инструмента (обычного и наноструктурированного) между собой, а также с характеристиками твердосплавного инструмента иностранного производства. Установлено, что твердость отечественного наноструктурированного инструмента из инструментальной стали, в среднем, не уступает твердости отечественного инструмента из твердого сплава, твердость отечественного наноструктурированного инструмента из твердых сплавов, в среднем, превышает твердость импортного твердосплавного инструмента.

Результаты работ, выполненных по третьему направлению, позволили показать, что повышение надежности изделий с наноструктурированным материалом поверхностного слоя по параметрам долговечности достигается, если процесс постепенного истирания слоя преобладает над процессами образования и развития дефектов, приводящих к возникновению внезапных отказов, поскольку постепенные отказы имеют большее время развития, чем внезапные отказы, которые являются следствием скачкообразного изменения состояния.

В целом материалы и результаты выполненных исследований позволили:

– сформировать интерактивную базу данных, использование которой позволяет не только находить информацию, необходимую для проведения процесса наноструктурирования, но и определять условия, способствующие повышению срока службы изделий с измененным поверхностным слоем;

– разработать методику, позволяющую проводить технико-экономическое обоснование конкурентоспособности установки и технологий низкотемпературного плазменного наноструктурирования. Методика базируется на расчете значений показателей надежности наноструктурированного изделия, и позволяют обоснованно подойти к оценке экономической эффективности низкотемпературной плазменной обработки (экономического эффекта и риска), а также уровня ее конкурентоспособности;

– выполнить низкотемпературную плазменную обработку комплектов изделий для механической обработки металлов, апробировать их в условиях реального производства (табл. 1) и подтвердить результатами апробации работоспособность и эффективность реализованных технических и технологических решений в аспекте повышения показателей долговечности изделий.

1. Практическая реализация результатов исследований

Уровень	Предприятия
Региональный (г. Саратов)	ОАО «Саратовское электроагрегатное производственное объединение», ОАО «НПП «Алмаз», АО «Саратовский агрегатный завод», филиал ФГУП «НПЦАП» – «ПО «Корпус», АО «КБПА», ООО «Алви», ООО «Сфера-Авиа», ООО «ТОСС», ООО «Металлист», ООО «Продмашкомплект».
Межрегиональный	ФГУП «НПЦАП» (г. Москва), АО «Газнегосервис» (г. Москва), ОАО «КАМАЗ» (г. Набережные Челны), вагоноремонтное депо ВЧД-5 станции «Сортировочная-Фарфоровская» Октябрьской железной дороги (г. Санкт-Петербург), ЗАО ТЗА (г. Самара), ООО «СамЗАС» (г. Самара).

Результаты выполненных исследований показали также, что изменение свойств поверхностного слоя изделий воздействием газового разряда низкотемпературной плазмы не только обеспечивает повышение срока их службы, но и эффективности реализуемых с их помощью технологических процессов. Особую актуальность это имеет применительно к инструменту, используемому в технологических процессах механической обработки металлов, в связи со сложившейся на сегодняшний день общемировой тенденцией повышения уровня ее конкурентоспособности.

Для этого создаются цифровые производства, в которых автоматизируются не только процессы проектирования, технологической подготовки и изготовления продукции (деталей и изделий), но и связи между соответствующими системами (CAD/CAPP/CAM/PDM и PCNC/SCADA/MES/MRP II) для передачи разнообразной информации, прежде всего информации, возникающей в ходе изготовления, т.е. эксплуатационной информации. Учет этой информации позволяет повысить эффективность управления процессами за счет принятия более обоснованных решений [2] и на этой основе сократить сроки производства, т.е. не только повысить конкурентоспособность механической обработки, но и вывести ее на новый качественный уровень.

Для режущего инструмента условия цифрового производства означают необходимость не только обеспечения требуемых эксплуатационных свойств, но и их поддержания с заданным уровнем надежности, поскольку именно от инструмента, в основном, зависят показатели производительности, простои оборудования и качество обработки, несмотря на то, что доля расходов на него в общей себестоимости произведенной продукции составляет всего несколько процентов.

Детальное исследование вопросов, связанных с надежностью режущего инструмента показало, что существуют многочисленные подходы к их решению, в рамках которых создаются различные методы, направленные на определение, обеспечение или улучшение её

основных свойств и показателей [3, 4]. Наиболее перспективными являются методы, в основе которых лежит либо использование прогрессивных инструментальных материалов, либо нанесение износостойких покрытий (одно- и многокомпонентных) на рабочую часть инструмента [5 – 7], либо ее упрочнение различными методами [8 – 10].

Тем не менее, производители в своих табличных методиках-рекомендациях по назначению режимных параметров обработки (прежде всего скоростных) продолжают ориентироваться на средние значения, оставляя определенный «запас стойкости» в пределах 20 %. Это связано с разбросом параметров, характеризующих стойкость и режущие свойства инструмента, в партиях поставки на уровне 15...35 % и 25...50 %, соответственно, а между партиями иногда и более [3].

В связи с этим представляются актуальными исследования, направленные на сокращение разброса и создание условий для того, чтобы инструмент мог, во-первых, выдерживать высокие нагрузки (силовые, тепловые, вибрационные), во-вторых, обеспечивать их уменьшение. В теоретическом аспекте основной целью исследования является поиск дополнительных свойств поверхностного слоя, которые будут обеспечивать улучшение показателей, характеризующих работоспособность инструмента через его режущие свойства.

В практическом аспекте определяются условия оптимального поведения дополнительно найденных и измененных свойств поверхностного слоя при контактном взаимодействии с обрабатываемой заготовкой при заданных параметрах технологического режима либо оценивается степень повышения производительности и /или надежности исследований по проблеме повышения технологических процессов обработки металлов инструментом с измененными дополнительно найденными свойствами поверхностного слоя при заданных параметрах точности. Изложенное позволило

определить направления дальнейших исследований по проблеме повышения эффективности технологии низкотемпературной плазменной обработки применительно к режущему инструменту, которые предусматривают решение задач по следующим направлениям.

1. Оценивание исходных электрофизических свойств поверхностного слоя рабочей части инструмента через измерение его электрического сопротивления и/или контактной разности потенциалов между слоем и поверхностью обрабатываемой заготовки. Значимость решения данной задачи состоит в том, что именно эти параметры напрямую влияют на работоспособность инструмента, определяя его режущие свойства через величину термоЭДС, которая напрямую зависит как от сопротивления, так и от контактной разности потенциалов, вычисляемой по разности работ выхода электронов из инструмента и заготовки. В свою очередь работа выхода электронов чувствительна к объемным изменениям [3, 11], которые возникают при изменении состава, структуры и образовании новых фаз, в том числе и при воздействии низкотемпературной плазмы на поверхностный слой рабочей части инструмента, являясь основным результатом воздействия.

2. Определение условий, обеспечивающих целенаправленное изменение электрофизических свойств поверхностного слоя рабочей части инструмента в результате низкотемпературной плазменной обработки. Значимость решения данной задачи состоит в том, что оно позволит научно обосновать режим горения плазменного разряда, необходимый для максимальных изменений в структуре поверхностного слоя на уровне сил межатомной связи, которые приводят к искажению кристаллической решетки. Следствием станет не только увеличение электрического сопротивления, но и снижение теплопроводности (в соответствии с законом Видемана-Франца [12]), что позволит не только увеличить время сохранения режущих свойств инструмента, но и обеспечить его более надежную работу в условиях, когда увеличение не представляется возможным.

3. Изучение физических свойств поверхностного слоя наноструктурированной рабочей части инструмента. Необходимость решения этой задачи связана с тем, что в ходе плазменной обработки происходит внедрение в поверхностный слой изделия ионов плазмы, образующих точечные дефекты кристаллической структуры, которые существенно влияют на статику и динамику поведе-

ния кристаллической решетки. Значимость решения данной задачи состоит в том, что на основе представления слоя как твердого раствора, в котором точечные дефекты являются «атомами» растворенного вещества, будут определены, во-первых, оптимальная равновесная концентрация дефектов, во-вторых, ее распределение по глубине поверхностного слоя. В совокупности это позволит оценить толщину структуры, сформированной в поверхностном слое в результате воздействия низкотемпературной плазмы.

4. Изучение свойств наноструктурированного режущего инструмента (физико-механических; теплофизических; электромагнитных) и исследование процессов (диффузионных и химических) при его контактном взаимодействии с обрабатываемым материалом. Значимость решения данной задачи заключается в том, что оно позволит, во-первых, определить информационный канал о режущей способности инструмента и состоянии обрабатываемой заготовки, достаточно мощный, чтобы обеспечить надежную оперативную диагностику процесса механической обработки и/или состояния элементов технологической системы, во-вторых, установить корреляционную связь между термоЭДС, величиной контактного потенциала и электрофизическими характеристиками инструментального материала, в частности, электрическим сопротивлением, в-третьих, получить многофакторные математические модели зависимости показателей эксплуатационной надежности наноструктурированного инструмента с измененными электрофизическими свойствами технологических факторов. В совокупности это позволит оценить степень влияния электрофизических свойств на улучшение обрабатываемости металлов, определить условия, при которых улучшение обеспечивается в максимальной степени.

Практическое использование результатов решения сформулированных задач позволит не только обеспечивать дальнейшее повышение долговечности инструмента, но и расширить области его практического применения, например, при высокоскоростной обработке (ВСО) [13]. Интерес предприятий к ВСО в последние годы стремительно возрастает, и ее внедрение становится ключевым моментом в повышении уровня конкурентоспособности механической обработки. Высокоскоростная обработка представляет собой не простой процесс, предъявляющий ряд жестких требований ко всем ее составляющим, поэтому для нее ис-

пользуют особый инструмент. Однако стоимость такого инструмента в несколько раз превышает стоимость стандартных аналогов, используемых для традиционной (силовой) обработки; при этом за исходный период стойкости инструмента принимается стойкость равная 15 минутам, поэтому окупается инструмент только при большой загрузке оборудования (порядка 120 ч в неделю) и его грамотной настройке, включающей расчет специальной траектории движения для обеспечения указанной стойкости, который можно выполнить только при наличии САМ-системы; объем управляющей программы при этом будет значительно превосходить объем традиционной программы силового резания. В связи с этим результаты выполнения исследований позволяют оценить возможности сокращения его потребного количества, либо замены традиционным инструментом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Бржозовский, Б.М., Зинина, Е.П., Мартынов, В.В.** Технологии улучшения поверхностных свойств геометрически сложных изделий воздействием низкотемпературной плазмы // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – №8 (74). – С. 24-29.
2. **Лютов, А.Г., Рябов, Ю.В.** Применение интеллектуального управления для обеспечения качества производственных процессов // СТИН. – 2015. – №7. – С. 2-4.
3. **Плотников, А.Л.** Управление параметрами процесса лезвийной обработки на станках с ЧПУ. – ВолГТУ –Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012. – 231 с.
4. **Повышение качества режущего инструмента / В.Г. Солоненко, Л.А. Солоненко, И.В. Дваденко и др.** // СТИН. – 2007. – №7. – С. 12-16.
5. **Верещака, А.С., Третьяков, И.П.** Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
6. **Мокрицкий, Б.Я.** Управление работоспособностью инструмента при нанесении покрытий // СТИН. – 2010. – №11. – С. 11-15.
7. **Безъязычный, В.Ф., Басков, М.В.** Расчетное определение степени влияния покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых изделий // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – №7 (73). – С. 20-24.
8. **Повышение стойкости быстрорежущего инструмента ионно-лазерным поверхностным упрочнением / В.Н. Латышев, А.Г. Наумов, В.В. Новиков и др.** // Станки и инструмент. – 2005. – №6. – С. 17-20.
9. **Шелег, В.К., Жигалов, А.Н., Богдан, Д.Д.** Исследование влияния аэродинамического звукового упрочнения на износ металлорежущих твердосплавных пластин с покрытиями // Наука и техника. – 2020. – Т.19. – №4. – С. 271-279.

10. **Комбинированные плазменные способы химико-термической обработки для создания модифицированных покрытий на инструменте / В.А. Александров, Л.Г. Петрова, А.С. Сергеева и др.** // СТИН. – 2019. – №33. – С. 13-19.

11. **Савицкий, Е.М., Буров, М.В.** Электрические и эмиссионные свойства сплавов. – М.: Наука, 1978. – 294 с.

12. **Епифанов, Г.И.** Физика твердого тела: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1977. – 288 с.

13. **Высокоскоростная обработка на ЧПУ станках.** Сайт компании МИРТЕЛС. <https://mirtels.ru/stati/vysokoskorostnaya-obrabotka-na-chpu-stankakh>.

REFERENCES

1. Brzhozovsky, B.M., Zinina, E.P., Martynov, V.V. // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2017, № 8(74), PP. 24-29.
2. Lyutov, A.G., Ryabov, Yu.V. Application of intelligent control to ensure the quality of production processes // STIN, 2015, № 7, PP. 2-4.
3. Plotnikov, A.L. Control of the parameters of the blade processing process on CNC machines. – VolGUTU – Togliatti: CJSC «ONIKS», 2012, 231 p.
4. Solonenko, V.G., Solonenko, L.A., Dvadenko, I.V. and others. Improving the quality of the cutting tool // STIN, 2007, №7, PP. 12-16.
5. Vereshchaka, A.S., Tretyakov, I.P. Cutting tools with wear-resistant coatings. – M.: Mashinostroenie, 1986. 192 p.
6. Mokritsky, B.Ya. Management of tool performance during coating // STIN, 2010, №11, PP. 11-15.
7. Bezzyazychny, V.F., Baskov, M.V. Calculation determination of the degree of influence of cutting tool coatings on the quality parameters of the surface layer of machined products // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2017, №7, PP. 20-24.
8. Latyshev, V.N., Naumov, A.G., Novikov, V.V. et al. Improving the durability of a high-speed cutting tool by ion-laser surface hardening // Machine tools and tools, 2005, №6, PP. 17-20.
9. Sheleg, V.K., Zhigalov, A.N., Bogdan, D.D. Investigation of the influence of aerodynamic sound hardening on the wear of metal-cutting hard-alloy plates with coatings // Nauka i Tekhnika, 2020, V19, № 4, PP. 271-279.
10. Aleksandrov, V.A., Petrova, L.G., Sergeeva, A.S. and others. Combined plasma methods of chemical-thermal treatment for the creation of modified coatings on the tool // STIN, 2019, №33, PP. 13-19.
11. Savitsky, E.M., Burov, M.V. Electrical and emission properties of alloys. – M.: Nauka, 1978, 294 p.
12. Epifanov G.I. Solid state physics: textbook. allowance for universities. – M.: Higher school, 1977, 288 p.
13. High speed CNC machining. MIRTELS website. <https://mirtels.ru/stati/vysokoskorostnaya-obrabotka-na-chpu-stankakh>.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.05.2022; одобрена после рецензирования 30.05.2022; принята к публикации 07.06.2022.

The article was submitted 25.05.2022; approved after reviewing 30.05.2022; asseped for publication 07.06.2022.