

УДК 621.9.02

doi: 10.18698/0536-1044-2019-4-11-17

Разработка цифрового двойника режущего инструмента для механообрабатывающего производства

Ю.Г. Кабалдин, Д.А. Шатагин, А.М. Кузьмишина

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

The Development of a Digital Twin of a Cutting Tool for Mechanical Production

Y.G. Kabaldin, D.A. Shatagin, A.M. Kuzmishina

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev

Предложена цифровая модель (двойник) режущего инструмента на основе нейросетевого моделирования. Показано, что разработанная виртуальная модель еще до реализации реального процесса изготовления режущего инструмента путем варьирования входными данными искусственной нейронной сети дает возможность оптимизировать состав и структуру износостойкого покрытия и определять режимы обработки, обеспечивающие максимальную износостойкость режущего инструмента. Цифровой паспорт режущего инструмента позволит потребителю избежать покупки контрафактного изделия. Рассмотрены вопросы информационной безопасности.

Ключевые слова: режущий инструмент, нейросетевые модели, цифровой двойник, выбор состава покрытия, износ инструмента

A digital model (twin) of a cutting tool based on neural network modeling is proposed in this work. It is shown that the developed virtual model makes it possible to optimize the composition and structure of wear-resistant coating and to determine the processing modes that ensure the maximum wear resistance of the cutting tool. The optimization can be performed before the actual manufacturing of the cutting tool by varying the input data of the neural network has taken place. A digital passport of the cutting tool allows the consumer to avoid buying a counterfeit product. Information security issues are considered.

Keywords: cutting tool, neural network models, digital twin, choice of coating composition, tool wear

Механообрабатывающее производство для того, чтобы выполнять заказы потребителей вынуждено постоянно изменяться и трансформироваться. Каждый год научные исследования выявляют новые возможные пути развития производства, особенно с использованием ИТ-технологий. Имеются долгосрочные глобальные тренды с указанием конечного результата, к которому придет производство.

В области российского механообрабатывающего производства таким трендом является

программа «Индустрия 4.0», призванная изменить его, сделав более современным и цифровым. Производство станет более интеллектуальным, гибким, эффективным и прогнозируемым.

Цель работы — создание цифровой модели режущего инструмента (РИ) на основе моделирования его основных функциональных свойств.

На отечественных предприятиях под цифровизацией, как правило, понимают разработку

3D-моделей. Однако, на наш взгляд, цифровизация — это разработка близких к реальным цифровых моделей, различных производственных процессов, оборудования и других устройств.

Цифровой двойник (ЦД, Digital Twin) — новый термин в моделировании оборудования, технологических процессов и планировании производства [1, 2]. Это совокупность цифровых (математических) моделей, достоверно описывающих процессы и взаимосвязи как на отдельном объекте, так и на всем производственном предприятии с использованием анализа больших данных (Big data).

Применение ЦД, являющегося точной копией реального актива, помогает быстро найти самые эффективные режимы работы, выявить потенциальные риски, встроить новые технологии в существующие производственные линии, сократить сроки и стоимость реализации проектов. Кроме того, ЦД помогает определить шаги по обеспечению информационной безопасности.

В этой связи ЦД следует рассматривать как электронный паспорт оборудования, а также РИ и механообрабатывающего предприятия в целом, где фиксируются все данные об обрабатываемых материалах, проведенных технологических операциях, испытаниях и тестовых исследованиях.

В Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева разработана единая базовая платформа расширения функциональных возможностей различных систем ЧПУ технологического оборудования на базе встраивания в них нейромодулей, применения высокопроизводительных параллельных вычислений, промышленного интернета и глубокого обучения искусственных нейронных сетей (ИНС) с использованием технологий nVidia CUDA [3–9].

Искусственный интеллект — это системы, которые могут понимать и прогнозировать, а также потенциально способны функционировать без участия человека, т. е. создавать не «безлюдные», а «умные» производства. Системы (алгоритмы) искусственного интеллекта могут реагировать на голосовые команды, а также самообучаться и выдавать готовые решения, обеспечивая информационную безопасность и используя их обучение на основе криптографии.

ИНС представляют собой новую перспективную вычислительную технологию [10], да-

ющую новые подходы к исследованию задач цифрового производства. Первоначально ИНС открыли новые возможности в области распознавания образов, затем к этому прибавились статистические и основанные на методах искусственного интеллекта средства поддержки принятия решений для задач в различных областях техники.

Способность к моделированию различных процессов, устройств и приборов, к работе с зашумленными данными и адаптивность позволяют применять ИНС для решения широкого класса задач. Приложения ИНС охватывают самые разнообразные области, такие как распознавание образов и их дополнение, обработка зашумленных данных, ассоциативный поиск, классификация, оптимизация, прогноз, диагностика, обработка сигналов, абстрагирование, управление процессами, сегментация данных, сжатие информации, сложные отображения и их моделирование, машинное зрение, распознавание речи и т. д.

Использование подходов ИНС к решению задач в области машиностроения начато в конце 90-х годов прошлого века [3]. Однако отсутствие ЭВМ с большими вычислительными возможностями и данными (Big Data) существенно тормозило их применение для решения перечисленных проблем.

В настоящее время задача широкого внедрения цифровых технологий, основанных на современных подходах машинного обучения (ML), системах промышленного интернета вещей (IIoT) и интеллектуальной обработки больших данных (Big Data и Data Mining), обуславливает развитие принципиально новых электронных моделей оборудования, инструментов, технологических процессов и их ЦД.

Как показали исследования [4], нейросетевую модель оборудования, РИ и пр. можно рассматривать и как электронную модель, и как ЦД, поскольку входными данными ИНС могут быть характеристики обрабатываемого материала (ОМ), параметры технологических процессов и т. д.

На рис. 1 приведена схема получения ЦД режущего инструмента, включающая в себя сбор данных для построения нейронной сети на основе облачных технологий [4].

Как уже указывалось, в общем случае ЦД — это многофакторная электронная модель оборудования, инструмента и других их элементов, включающая в себя ансамбль электронных мо-



Рис. 1. Схема построения ЦД

делей, т. е. нейросетевых моделей. Некоторые из них являются определяющими. Для РИ с износостойким покрытием (ИП) — это ИНС его прочности, ИНС его износостойкости и ИНС выбора оптимального состава и структуры наноструктурного ИП. Применять данные математические нейросетевые модели в составе ЦД можно не только в реальных производственных условиях, но и на этапе выбора и обоснования закупки РИ потребителем.

Таким образом, появляется возможность заменить сложную многомерную функциональную зависимость, например, износостойкости режущей части инструмента нейросетевой структурой. Иначе говоря, использование нейросетевого имитационного моделирования контактных процессов при резании позволяет сформировать виртуальный датчик для оценки интенсивности изнашивания РИ.

Исследования показывают, что интенсивность изнашивания J твердых сплавов с покрытием определяется силой трения на контактной площадке по задней поверхности инструмента F_3 , скоростью перемещения трущихся тел (прирезцовых слоев стружки и передней части РИ) и прочностью межзаточных связей в зернах тугоплавких соединений покрытия, которая характеризуется их удельной предельной энергией разрушения $\Delta E_{пр}$ [4]:

$$J = \frac{LF_3}{\Delta E_{пр}},$$

где L — длина пути резания.

При вычислении интенсивности изнашивания в реальных условиях механической обработки наибольшее затруднение вызывает определение силы трения F_3 . Нахождение силы трения расчетным путем основано на измерении ряда характеристик в процессе резания [5]. На практике такой метод означает периодическую остановку процесса резания для определения длины контакта S посредством трудоемких оптических измерений остаточного следа стружки (которые сложно выполнить непосредственно на станке). Поэтому он совершен-

но непригоден в автоматизированном производстве.

Для некоторых инструментальных материалов значение F_3 можно рассчитать, используя известные зависимости сил трения и температур [5]. Но в этом случае возникает необходимость применения на металлорежущем станке датчиков для качественного измерения температуры и вычисления множества температурных поправок, связанных с тем, что термодатчики практически невозможно разместить в зоне резания.

Выходом из этой ситуации является использование в качестве температурного датчика естественной термопары, образующейся на участке непосредственного соприкосновения РИ и детали. Естественно, что параметры такого датчика не статичны, они динамическим образом зависят от площади контакта твердосплавного РИ и стружки, а значит, и от силы трения F_3 , определяемой выражением

$$F_3 = \tau_F S_F,$$

где τ_F — касательные напряжения; S_F — площадь контакта инструмента с заготовкой.

Экспериментальные исследования показывают, что выходной параметр естественной термопары — термо-ЭДС U_t — является функцией скорости резания v [5]. Таким образом, интенсивность изнашивания РИ можно представить в виде зависимости трех аргументов:

$$J = f(U_t(F_3, v), v, \Delta E_{пр}),$$

где f — неизвестный функционал, определяемый по экспериментальным данным.

По исходным данным построили ИНС оценки износостойкости РИ (рис. 2), где f — логистическая функция активации. Для нахождения f использовали двухслойную (имеющую два слоя активных нелинейных элементов) нейронную сеть обратного распространения [4].

Поиск оптимальной структуры ИНС осуществляли путем имитационного моделирования с помощью пакета программ MATLAB 6.

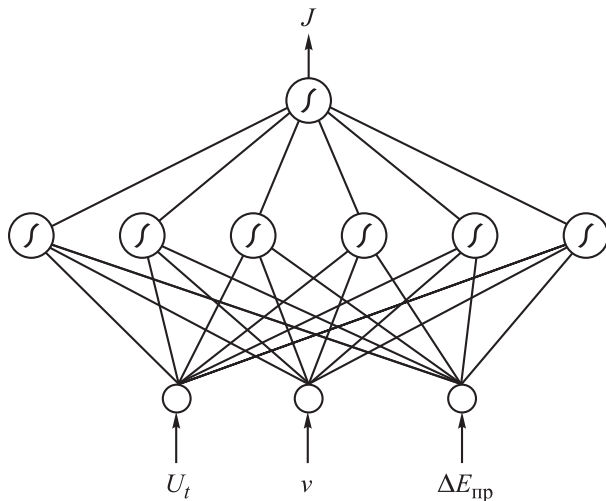


Рис. 2. Структура ИНС оценки износостойкости РИ

Рассматривали несколько структур ИНС с разными преобразующими функциями нейронов. Их обучение выполняли на выборке, полученной в результате серии однофакторных экспериментов по точению стали 45 твердосплавными пластинками с покрытием при различных режимах резания. За оптимальную приняли структуру сети, дающую наименьшую максимальную ошибку за определенный период времени обучения.

Результаты расчетов позволили выявить скорость резания v , при которой интенсивность изнашивания J является минимальной.

Структура оптимальной ИНС приведена на рис. 3. Первый слой сети содержит шесть нейронов, второй (выходной) слой состоит из одного нейрона. В качестве функции активации нейронов обоих слоев использовали экспоненциальный сигмоид f [10].

ИНС, построенная для выбора структуры и состава ИП (см. рис. 3), является нейронной сетью прямого распространения (Feed Forward), где знак «/» соответствует линейной функции активации.

Входными параметрами ИНС являлись скорость резания v (м/мин), подача на оборот S_o (мм/об), глубина резания t (мм) резания и твердость ОМ (по Виккерсу) HV_{OM} , выходным — микротвердость ИП HV_{μ} .

На рис. 4 приведена зависимость твердости ОМ от микротвердости ИП.

Анализ рис. 4 показывает, что между микротвердостью ИП и твердостью ОМ имеется линейная зависимость, т. е. чем больше твер-

дость ОМ, тем выше должна быть микротвердость ИП, что достигается использованием жаропрочных элементов (таких как Zr) и многоэлементных покрытий (AlTiN). Можно полагать, что с увеличением базы данных по РИ появится более широкий выбор и структуры покрытий [11, 12].

На рис. 5 приведены зависимости износостойкости твердосплавного РИ с осажденными покрытиями TiN, ZrN и AlTiN от длины пути резания при точении нержавеющей стали марки X18H9T (HV_{180} МПа) со следующими параметрами: $v = 60$ м/мин, $t = 1$ мм, $S_o = 0,2$ мм/об. Из рис. 5 следует, что наибольшую износостойкость имеют РИ с покрытием AlTiN, а наименьшую — РИ с покрытием TiN.

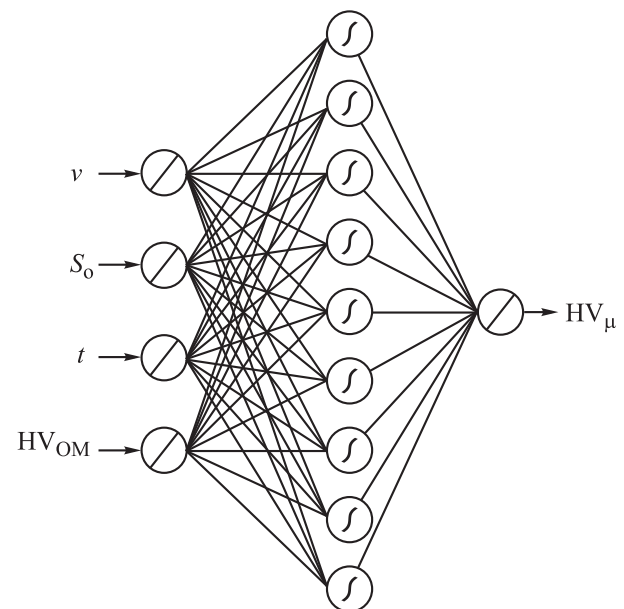


Рис. 3. ИНС прямого распространения

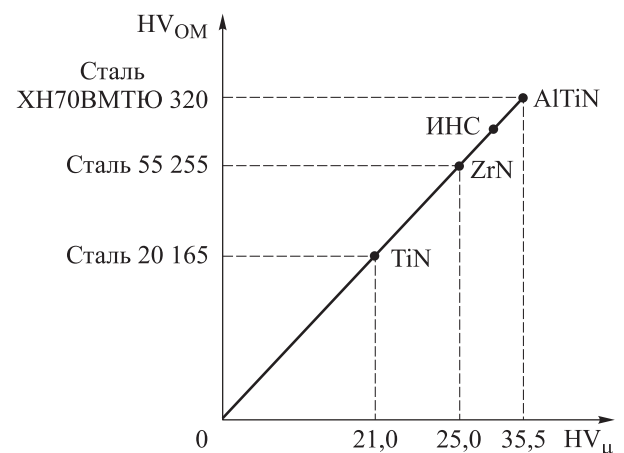


Рис. 4. Зависимость твердости ОМ от микротвердости ИП

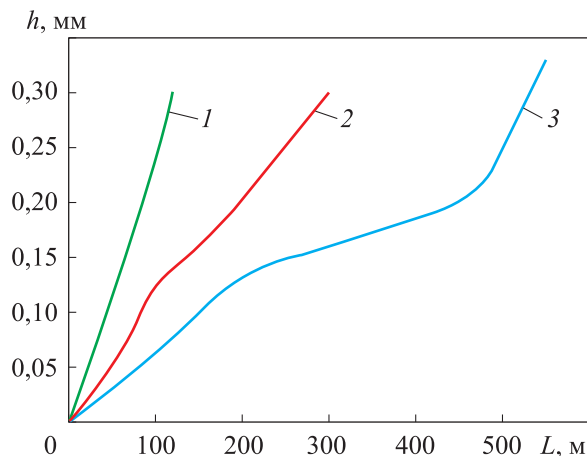


Рис. 5. Зависимость износа h РИ с осажденными покрытиями TiN (1), ZrN (2) и AlTiN (3) от длины L пути резания при $v = 60$ м/мин, $t = 1$ мм, $S_0 = 0,2$ мм/об

Следовательно, на основе нейросетевых моделей (см. рис. 3 и 4) появляется возможность симулировать различные параметры РИ перед построением реального технологического процесса, а также определять его производительность и себестоимость инструмента.

Применение технологии блокчейн при обучении ИНС и наличие электронного паспорта инструмента позволят исключить контрафактную продукцию на рынке. С этой целью в РИ встраивают микрочип [13] или лазерный штрих-код, с помощью которых отслеживают все транзакции при его покупке и использовании в производстве. Обучение ИНС на основе подходов криптографии (т. е. шифрования данных) может обеспечить и информацион-

ную безопасность всей продукции предприятия.

Таким образом, на базе электронных моделей (двойников), основанных на разработке ИНС реального процесса механообработки, можно выбрать состав и структуру ИП для РИ [14, 15], определить оптимальные режимы резания для ОМ в создаваемом технологическом процессе обработки детали.

Рассмотрение ЦД не конкретного изделия, а всего производства, позволяет симулировать в виртуальной среде все процессы и определять необходимое количество и оптимальное расположение оборудования в зависимости от объема и номенклатуры выпускаемых изделий. При этом если ЦД разрабатывают для вновь создаваемого производства, то путем симуляции его работы можно выявить риски и недочеты, скорректировать проект. ЦД существующего производства дает возможность прорабатывать внедрение или изменение технологических процессов без вмешательства в работу реального процесса.

Выводы

1. Разработаны нейросетевые модели (ЦД) режущего инструмента, включая двойник его износа и выбора состава покрытия по его микротвердости.

2. ИНС позволяют симулировать износостойкость выбранного РИ и состав покрытия на стадии разработки нового технологического процесса без проведения трудоемких стойких испытаний.

Литература

- [1] Frankel A., Larsson J. Есть способ лучше: цифровой двойник повышает эффективность процессов конструкторско-технологического проектирования и производства. *CAD/CAM/CAE Observer*, 2016, № 3, с. 36–40.
- [2] Бурико А.В. Цифровая эволюция, или почему Русал «уходит» в цифру. *Цифровое производство*, 2017, № 2, с. 18–23.
- [3] Кабалдин Ю.Г., Биленко С.В., Серый С.В. *Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта*. Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2003. 201 с.
- [4] Кабалдин Ю.Г., ред. *Искусственный интеллект и кибер-физические механообработывающие системы в цифровом производстве*. Нижний Новгород, Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2018. 271 с.
- [5] Бобров В.Ф. *Основы теории резания металлов*. Москва, Машиностроение, 1975. 344 с.
- [6] Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Серый С.В. Диагностика выходных параметров процесса резания в режиме реального времени на основе фрактального анализа и вейвлет-анализа с использованием программно-аппаратных средств National Instruments и Nvidia CUDA. *Вестник машиностроения*, 2014, № 8, с. 80–82.

- [7] Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Зотов В.О., Серый С.В. Интеллектуальные системы диагностики состояния оборудования и износа инструмента. *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*, 2014, № 2, с. 47–50. URL: <http://www.indust-engineering.ru/issues/2014/2014-2.pdf> (дата обращения 15 декабря 2018).
- [8] Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Вытнов Ю.В., Голубев С.В. Оценка состояния режущего инструмента в режиме реального времени на основе подходов нелинейной динамики с использованием NVIDIA CUDA в программной среде LABVIEW. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*, 2013, № 5(102), с. 114–121.
- [9] Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Зотов В.О. Структурно-энергетический подход к процессу изнашивания и диагностике твердосплавного режущего инструмента. *Вестник машиностроения*, 2016, № 5, с. 79–85.
- [10] Короткий С. *Нейронные сети: основные положения*. URL: <http://gigabaza.ru/doc/103732.html> (дата обращения 15 декабря 2018).
- [11] Верещака А.С. *Работоспособность режущего инструмента с покрытием*. Москва, Машиностроение, 1993. 336 с.
- [12] Кабалдин Ю.Г., Кретинин О.В., Шатагин Д.А., Власов Е.Е. *Выбор состава и структуры износостойких наноструктурных покрытий для твердосплавного режущего инструмента на основе квантово-механического моделирования*. Москва, Инновационное машиностроение, 2017. 216 с.
- [13] Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Лаптев И.Л., Зотов В.О. *Резец токарный*. Пат. № 159948 РФ, 2016, бюл. № 5, 3 с.
- [14] Кабалдин Ю.Г., Власов Е.Е., Кузьмишина А.М. Квантово-механическое моделирование энергии адгезии наноструктурных покрытий с режущим инструментом и с обрабатываемым материалом. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2018, т. 14, № 8, с. 339–343.
- [15] Заводинский В.Г., Кабалдин Ю.Г. Модуль сдвига и энергия адгезии нанопокрывтий, используемых при производстве режущих инструментов. *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2018, т. 24, № 2, с. 207–220.

References

- [1] Frankel A., Larsson J. There is a better way: digital double increases the efficiency of design and manufacturing processes. *SAD/CAM/CAE Observer*, 2016, no. 3, pp. 36–40 (in Russ.).
- [2] Buriko A.V. Digital evolution, or why RUSAL «goes» to the number. *Digital manufacturing*, 2017, no. 2, pp. 18–23 (in Russ.).
- [3] Kabaldin Yu.G., Bilenko S.V., Seryy S.V. *Upravleniye dinamicheskimi protsessami v tekhnologicheskikh sistemakh mekhanooobrotki na osnove iskusstvennogo intellekta* [Control of dynamic processes in technological systems of machining on the basis of artificial intelligence]. Komsomolsk-on-Amur, KnASU publ., 2003. 201 p.
- [4] *Iskusstvennyy intellekt i kiber-fizicheskiye mekhanooobratyvyayushchiye sistemy v tsifrovom proizvodstve* [Artificial intelligence and cyber-physical machining systems in digital manufacturing]. Ed. Kabaldin Yu.G. Nizhny Novgorod, NNSTU publ., 2018. 271 p.
- [5] Bobrov V.F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of metal cutting theory]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1975. 344 p.
- [6] Kabaldin Yu.G., Laptev I.L., Shatagin D.A., Seryy S.V. Diagnostics of output parameters of cutting process in real time mode based on fractal and wavelet analyses using National Instruments and Nvidia CUDA software and hardware. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2014, no. 8, pp. 80–82 (in Russ.).
- [7] Kabaldin Iu.G., Laptev I.L., Shatagin D.A., Zotov V.O., Seryi S.V. Intelligent Diagnostic System the Plant and Tool Wear. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2014, no. 2, pp. 47–50 (in Russ.). Available at: <http://www.indust-engineering.ru/issues/2014/2014-2.pdf> (accessed 15 December 2018).
- [8] Kabaldin Iu.G., Laptev I.L., Shatagin D.A., Vytnov Iu.V., Golubev S.V. Evaluation of cutting tool in real time based approaches nonlinear dynamics using Nvidia CUDA software environment LABVIEW. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, 2013, no. 5(102), pp. 114–121 (in Russ.).

- [9] Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Zotov V.O. Structure-energy approach to wear process and diagnostics of hard-alloy cutting tool. *Vestnik mashinostroeniya*, 2016, no. 5, pp. 79–85 (in Russ.).
- [10] Korotkiy S. *Neyronnyye seti: osnovnyye polozheniya*. Available at: <http://gigabaza.ru/doc/103732.html> (accessed 15 December 2018).
- [11] Vereshchaka A.S. *Rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta s pokrytiyem* [Performance of coated cutting tools]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1993. 336 p.
- [12] Kabaldin Yu.G., Kretinin O.V., Shatagin D.A., Vlasov E.E. *Vybor sostava i struktury iznosostoykikh nanostrukturnykh pokrytyy dlya tverdosplavnogo rezhushchego instrumenta na osnove kvantovo-mekhanicheskogo modelirovaniya* [Selection of the composition and structure of wear-resistant nanostructured coatings for carbide cutting tools based on quantum mechanical modeling]. Moscow, Innovatsionnoye mashinostroyeniye publ., 2017. 216 p.
- [13] Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Laptev I.L., Zotov V.O. *Rezets tokarnyy* [Lathe cutter]. Patent RF no. 159948, 2016.
- [14] Kabaldin Yu.G., Vlasov E.E., Kuz'mishina A.M. Quantum-mechanical modeling of adhesion energy of nanostructured coatings with cutting tool and with material to be processed. *Strengthening Technologies and Coatings*, 2018, vol. 14, no. 8, pp. 339–343 (in Russ.).
- [15] Zavodinskiy V.G., Kabaldin Yu.G. Shear module and adhesion energy of nanocoatings used for cutting tools. *Mechanics of composite materials and structures*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 207–220 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 29.01.2019

Информация об авторах

КАБАЛДИН Юрий Георгиевич — заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения». Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (603950, Н. Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: uru.40@mail.ru).

ШАТАГИН Дмитрий Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроения». Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (603950, Н. Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: dmitsanych@gmail.com).

КУЗЬМИШИНА Анастасия Михайловна — старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование машиностроения». Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (603950, Н. Новгород, Российская Федерация, ул. Минина, д. 24, e-mail: Foxi-16@mail.ru).

Information about the authors

KABALDIN Yuriy Georgievich — Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Machine Building Technology and Equipment. Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24, e-mail: uru.40@mail.ru).

SHATAGIN Dmitriy Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Machine Building Technology and Equipment. Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24, e-mail: dmitsanych@gmail.com).

KUZMISHINA Anastasia Mikhaylovna — Senior Lecturer, Department of Machine Building Technology and Equipment. Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Minin St., Bldg. 24, e-mail: Foxi-16@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М. Разработка цифрового двойника режущего инструмента для механообрабатывающего производства. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 4, с. 11–17, doi: 10.18698/0536-1044-2019-4-11-17

Please cite this article in English as:

Kabaldin Y.G., Shatagin D.A., Kuzmishina A.M. The Development of a Digital Twin of a Cutting Tool for Mechanical Production. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 4, pp. 11–17, doi: 10.18698/0536-1044-2019-4-11-17