



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. №7 (181). С. 3-9.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №7 (181). P. 3-9.

Научная статья

УДК 621.9.042

doi: 10.30987/2223-4608-2026-7-3-9

Перспективные направления развития научных исследований в Тульской научной школе технологов-машиностроителей

Андрей Андреевич Маликов, д.т.н.

Тульский государственный университет, Тула, Россия

tppizi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6757-5584>

Аннотация. Настоящая статья посвящена анализу становления, современного состояния и обзору перспективных направлений развития Тульской научной школы технологов-машиностроителей, существующей на базе кафедры Технологии машиностроения Тульского государственного университета. Отмечается широчайший вклад, внесенный основоположником Научной школы доктором технических наук, профессором Иосифом Абрамовичем Когановым и его учеником, и продолжателем дела – доктором технических наук, профессором Александром Сергеевичем Ямниковым. В публикации рассматривается эволюция развития Научной школы от фундаментальных исследований процессов формообразования сложных поверхностей и сборки высокоточных изделий к разработке методологии построения, анализа и уточнения принципов работы цифровых двойников технологических процессов механической обработки деталей машин, характерных для традиционно рассматриваемых нашими учеными процессов, в частности, зубообработки. Обоснована актуальность внедрения цифровых двойников в контексте концепций «Индустрия 4.0» и «Индустрия 5.0», обусловленная сложностью геометрии рассматриваемых нами классов деталей, требованиями ресурсосбережения и дефицитом высококвалифицированных кадров. В статье представлена процессно-ориентированная двухконтурная архитектура цифровых двойников, интегрирующая физические модели резания и методы искусственного интеллекта. Рассмотрены перспективные подходы: метод многоуровневых вычислительных потоков для синхронизации виртуальной и физической моделей, графы знаний распространения погрешностей, ассистированное усиленное обучение с использованием больших языковых моделей. В публикации также отражены задачи подготовки кадров высшей квалификации на основе интеграции науки и образования, а также аспекты многолетнего взаимодействия школы с ведущими промышленными предприятиями Тульского и соседних с ним регионов. Определены ряд нерешённых проблем, характерных для современного отечественного машиностроения. Предложены концептуальные направления их решения.

Ключевые слова: научная школа, исследование, машиностроение, технология машиностроения, процессы, формообразование

Для цитирования: Маликов А.А. Перспективные направления развития научных исследований в Тульской научной школе технологов-машиностроителей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 7 (181). С. 3–9. doi: 10.30987/2223-4608-2026-7-3-9

Prospects for the development of scientific research at the Tula Scientific School of Engineering Technologists

Andrey A. Malikov, D. Eng.
Tula State University, Tula, Russia
tppizi@yandex.ru

Abstract. This article is devoted to the analysis of the formation, current state and review of promising areas of development of the Tula Scientific School of Engineering Technologists, which exists on the basis of the Department of Mechanical Engineering Technology of Tula State University. The greatest contribution made by the founder of the Scientific School, Doctor of Engineering Science, Professor Joseph Abramovich Koganov and his student and successor – Doctor of Engineering, Professor Alexander Sergeevich Yamnikov, is noted. The publication examines the evolution of the Scientific School from fundamental research of complex surfaces formation and assembling high-precision products to the development of a methodology for constructing, analyzing and clarifying the principles of operation of digital twins of machining manufacturing activity, typical for the processes, which are traditionally viewed by our scientists, in particular, gear machining. The relevance of the introduction of digital twins with reference to the concepts of «Industry 4.0» and «Industry 5.0» is substantiated, due to the complexity of the geometry of the classes of parts we are concerned with, resource-saving requirements and a shortage of highly qualified personnel. The article presents a process-oriented double-countoured architecture of digital twins that integrates physical cutting models and artificial intelligence methods. Promising approaches are viewed: the method of multi-level computational flows for synchronizing virtual and physical models, knowledge graphs of error propagation, assisted enhanced learning using large language models (LLM). The publication also reflects the tasks of training highly qualified personnel based on the integration of science and education, as well as aspects of the school's long-term cooperation with leading industrial enterprises in Tula and neighbourhood areas. A number of unsolved problems peculiar to modern domestic engineering have been identified. The conceptual directions of their solution are proposed.

Keywords: scientific school, research, mechanical engineering, mechanical engineering technology, processes, formation

For citation: Malikov A.A. Prospects for the development of scientific research at the Tula Scientific School of Engineering Technologists / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 7 (181). P. 3–9. doi: 10.30987/2223-4608-2026-7-3-9

Введение

Тулская научная школа технологов-машиностроителей (Тулская НТШ ТМС) осуществляет свою работу на базе Тульского государственного университета. Принято считать, что началом создания Тульской научной технологической школы (Тулский политехнический институт (ныне ТулГУ) стало назначение д.т.н., проф. Иосифа Абрамовича Коганова в сентябре 1961 г. заведующим кафедрой «Технология машиностроения».

Основной круг научно-технических проблем, решаемых школой очерчен областью разработки, исследования и внедрения прогрессивных технологических процессов формообразования сложных поверхностей и сборки высокоточных изделий;

Эстафету руководства Тульской научной технологической школы принял на рубеже веков д.т.н., проф. Александр

Сергеевич Ямников. За годы существования Тульской научной технологической школы ею подготовлены более 25 докторов и свыше 150 кандидатов наук. Издано более около 100 монографий, и свыше 200 учебников и учебных пособий

Современное состояние Тульской НТШ ТМС

С 2010 г. по настоящее время руководитель научной школы – Почётный работник сферы образования Российской Федерации, д.т.н., проф. Андрей Андреевич Маликов.

В рамках научного направления «Прогрессивные технологические процессы формообразования сложных поверхностей и сборки высокоточных изделий» осуществляется углубленное проведение прикладных научных исследований, основными из которых являются:

1) разработка и исследование перспективных технологий, оборудования, оснастки и инструментов для механической обработки зубчатых колес цилиндрических и конических передач (обкатных и полуобкатных с прямыми и круговыми зубьями, средне- и мелкомодульных);

2) управление качеством механической обработки на основе совершенствования существующих технологических процессов и разработки новых технологий изготовления деталей со сложными геометрическими формами (специальные резьбы, замковые соединения, многогранные, сферические, конические и биконические детали, глубокие отверстия переменного сечения и т.д.);

3) повышение качества сборки сложных изделий, состоящих из нескольких соединений с неопределенностью базирования сопрягаемых деталей, на основе прогнозирования точностных параметров изделия моделированием на ЭВМ и управления технологическим процессом сборки.

Научные проблемы, решаемые школой, имеют важное значение при создании новых и реконструкции существующих производств, ориентированных на выпуск современной конкурентоспособной продукции, в том числе и двойного назначения. Кроме того существенное внимание уделяется вопросам создания современных высокоэффективных и ресурсосберегающих технологий, направленных в том числе решение проблем импортозамещения.

За прошедшие годы специалистами, входящими в школу, решена проблема создания основ построения высокопроизводительных процессов формообразования сложных поверхностей деталей машин. Разрабатываются актуальные вопросы чистовой и отделочной обработки зубьев цилиндрических и конических колес; создания основ технологии изготовления оснастки и оборудования для обработки систем точных координатных отверстий малого диаметра в корпусных деталях; разработки системы управления качеством выпускаемых изделий на основе широкого использования информационных связей между объектами производства, осуществляемых при

помощи ЭВМ, разработке оптимальных схем комплектования объектов.

Перспективные направления развития Тульской НТШ ТМС

Трансформация машиностроительного производства в рамках современных концепций «Индустрия 4.0» и «Индустрия 5.0» неразрывно связана с внедрением технологий цифровых двойников [1]. Цифровой двойник технологического процесса механической обработки представляет собой виртуальную копию физического процесса, синхронизированную с ним в реальном времени и обеспечивающую прогнозирование, мониторинг и оптимизацию качества обработки [2, 3].

Методика построения моделей цифровых двойников базируется на результатах наших многолетних исследований процессов традиционными методами, построении, при необходимости физических моделей процессов с последующим переходом к математическим моделям использованием возможностей искусственного интеллекта. Такая схема построения системной работы Тульской НТШ ТМС позволяет, в условиях ограниченного финансирования, производить отработку широкой гаммы вариантов построения процессов с поиском оптимальных и эффективных решений.

Актуальность развития исследований, проводимых представителями Тульской НТШ ТМС, в рамках методологии построения цифровых двойников для традиционно исследуемых нами направлений в области процессов механической обработки обусловлена тремя основными факторами. Во-первых, сложной геометрией деталей, требующих обработки с большим количеством переходов, что порождает эффект «бабочки» – малые погрешности на первоначальных операциях приводят к существенным проблемам на финишных этапах обработки [2, 4]. Во-вторых, ужесточение требований к повышению эффективности производства, что стимулирует внедрение малоотходных и ресурсосберегающих технологий и оптимизацию режимов резания, в том числе, по критериям энергопотребления [5]. В-третьих, дефицит квалифицированных технологов и операторов станков с ЧПУ требует создания

систем поддержки принятия решений, автоматизирующих выбор режимов обработки и диагностику состояния оборудования и инструмента [6].

Таким образом, целью развития работ, проводимых Тульской НТШ ТМС является систематизация современных научно-технических подходов к построению цифровых двойников процессов механической обработки, выявление нерешенных проблем и определение перспективных направлений исследований в данной области.

Современные цифровые модели и двойники станков с ЧПУ развиваются в направлении многослойной интеграции физических и виртуальных компонентов. Традиционная трехмерная модель (физическое пространство – виртуальное пространство – связь данных) дополняется слоями интеллектуального принятия решений и реального времени. Перспективная пятимерная архитектура включает: уровень физических сущностей (станок, инструмент, заготовка, сенсорная сеть); уровень виртуальных сущностей (геометрическая, кинематическая, динамическая модели); уровень интеллектуального принятия решений; уровень передачи данных; уровень вычислений реального времени [7].

Ключевая особенность данной архитектуры – введение контура интеллектуального управления на основе методов усиленного обучения), ассистируемого большими языковыми моделями. Они, в свою очередь, выступают в роли косвенного агента принятия решений, преобразующего технолого-ориентированные запросы в формализованные параметры функции вознаграждения для агента, оптимизирующего траектории перемещения инструмента [8].

Специфика механической обработки деталей сложной формы обусловлена необходимостью учета нежесткости технологической системы и ряда других ограничений. Для решения данной проблемы нами рассматривается процессно-ориентированная архитектура цифровых двойников процессов, например, зубообработки, включающая внутренний и внешний контуры управления.

Внутренний контур формируется на основе физических моделей процесса резания и кинематических ограничений, обеспечивая

планирование траекторий и прогнозирование сил резания. Внешний контур, основанный на методах искусственного интеллекта и анализе потоков данных, выполняет функции предиктивного моделирования и адаптивной оптимизации параметров обработки [9]. Двухконтурная архитектура обеспечивает возможность «расширения сервиса» – переноса верифицированных цифровых моделей с экспериментальных образцов и физических моделей процессов на реальные объекты (такие, как цилиндрические зубчатые колеса) со сложной геометрией.

На уровне производственно-логистических систем машиностроительных предприятий актуальной задачей является создание цифровых двойников, интегрирующих системы производственного планирования и имитационные модели технологических процессов. Изучаемые нами семантические модели цифровых двойников производственно-логистических систем учитывают различные этапы жизненного цикла и обеспечивают алгоритмы взаимодействия систем планирования с имитационными моделями посредством унифицированных информационных моделей. Данный подход позволяет осуществлять выбор технологии механической обработки на основе анализа поведения производственной системы при выполнении заданной производственной программы.

Одной из фундаментальных проблем построения цифровых двойников многооперационной обработки является обеспечение синхронизации виртуальной модели с физическим состоянием обрабатываемой детали после каждой технологической операции. Традиционные подходы, основанные на управляющих программах (G-code), не учитывают реальную геометрию удаленного припуска, что приводит к накоплению ошибок позиционирования и силовых деформаций.

Перспективным решением является метод многоуровневых вычислительных потоков, основанный на преобразовании области контакта инструмента и заготовки в состояние удаленных частиц припуска. Метод обеспечивает одновременное обновление геометрической формы и технологических признаков (поверхностей деталей) с сохранением истории обработки.

Ключевое преимущество такого подхода – возможность компромисса между точностью и вычислительной эффективностью за счет адаптивного разрешения сетки: зоны высокой кривизны (например, зубья цилиндрических колес) и ответственные поверхности моделируются с повышенной дискретизацией, тогда как черновые зоны (неответственные поверхности деталей) – с пониженной.

Альтернативным подходом является интеграция в цифровые двойники данных информационно-измерительных систем: координатно-измерительных машин, систем технического зрения, мультисенсорных комплексов. Однако существующие измерительные методы преимущественно обеспечивают численную фиксацию отклонений без полноценной интеграции измеренных данных в цифровую модель для последующего использования на последующих операциях. Задача создания «бесшовного» обновления цифрового двойника технологического процесса на основе измерений остается актуальным направлением наших исследований.

Многооперационная обработка характеризуется наследованием погрешностей между смежными операциями: отклонения, возникшие при черновой обработке (погрешности базирования, упругие деформации, размерный износ инструмента), наследуются и трансформируются на последующих чистовых операциях. Для обеспечения сквозной трассировки ошибок изучаются методы «цифровых нитей» – структур данных, организующих и ассоциирующих дискретные, гетерогенные данные о технологических переходах и контроле качества.

Цифровые нити позволяют идентифицировать состояние обработки и отслеживать траекторию распространения погрешностей на основе анализа взаимосвязей между технологическими факторами, режимами резания и выходными показателями качества. Максимизация скорости взаимодействия данных в цепочке распространения ошибок достигается за счет предварительной индексации связей и параллельной обработки потоков данных.

Для анализа эволюции погрешностей и реализации управляющих воздействий рассматривается метод построения графов знаний распространения ошибок на основе модели

разложения в ряд Тейлора. Граф знаний представляет собой ориентированный граф, узлами которого являются технологические признаки и параметры обработки, а ребрами – причинно-следственные связи с весовыми коэффициентами, характеризующими чувствительность выходных параметров качества к входным возмущениям.

Преимущество графового представления заключается в возможности автоматизированного логического вывода: система способна не только идентифицировать источник брака, но и предлагать корректирующие воздействия на основе анализа путей распространения ошибки в графе.

Развитие концепции устойчивого производства стимулирует исследования в области оптимизации режимов обработки по критериям энергоэффективности.

Перспективным направлением развития цифровых двойников процессов механической обработки является интеграция феноменологических моделей накопления погрешностей и усталостной долговечности. Современные исследования в области механики разрушения предлагают классификации феноменологических моделей фазовых переходов и модели упругопластического деформирования, адаптируемые для прогнозирования ресурса ответственных деталей по результатам моделирования технологических остаточных напряжений.

Сдерживающим фактором широкого внедрения цифровых двойников технологических процессов механической обработки является отсутствие унифицированных стандартов представления данных и форматов обмена моделями. Разработка семантических моделей цифровых двойников производственных процессов и систем, учитывающих различные этапы жизненного цикла оборудования и технологической оснастки, представляет собой активную область исследований.

Применение больших языковых моделей в качестве интерфейса между технологом и системой цифровых двойников открывает возможности для интеллектуализации процессов планирования обработки. Концепция ассистированного усиленного обучения позволяет трансформировать вербальные технологические требования в формализованные целевые функции оптимизации. Дальнейшее развитие

данного направления нами связывается с созданием предметно-ориентированных моделей, обученных на массивах технологической документации и результатах моделирования.

Перспективы подготовки кадров в рамках развития Тульской НТШ ТМС

Одними из основных целей развития школы является высококачественная подготовка молодых специалистов и специалистов высшей квалификации в области технологии механической обработки и сборки в машиностроении на основе:

- интеграции научно-педагогического потенциала подразделений ТулГУ при проведении фундаментальных и прикладных научных исследований;

- разработки новых программ и методов, развивающих и объединяющих фундаментальные научные исследования и учебный процесс;

- методического обеспечения образовательного процесса;

- внедрения результатов деятельности в производственные процессы.

Достижение указанных целей основывается на решении следующих задач:

- развитие и проведение фундаментальных и прикладных НИР и НИОКР в области технологии механической обработки и сборки в машиностроении;

- обеспечение взаимодействия фундаментальной и прикладной науки с образовательным процессом на всех его стадиях, включая использование результатов совместных научно-исследовательских работ в лекционных курсах, экспериментальной базы для выполнения учебно-исследовательских, лабораторных и курсовых работ, различных видов практик;

- привлечение квалифицированных сотрудников научных организаций к чтению спецкурсов и руководству учебно-исследовательскими, курсовыми и дипломными работами, практикой студентов и стажировкой аспирантов и иных сотрудников университета;

- укрепление материально-технической базы образовательного процесса, научных исследований и разработок в области

технологии механической обработки и сборки в машиностроении;

- повышение уровня учебно-методической работы путём создания новых учебных программ, учебников, учебных и методических пособий, в том числе на электронных носителях;

- обеспечение подготовки и переподготовки кадров для машиностроительного комплекса при тесном взаимодействии с реальным сектором экономики;

- трудоустройство выпускников в наукоёмкие инновационные компании, предприятия, институты и другие научно-исследовательские центры;

- организация эффективного взаимодействия с другими кафедрами и вузами для реализации студенческого обмена и обучения бакалавров по программам специализированной магистерской подготовки;

- популяризация научных знаний, проведение научно-практических конференций студентов и аспирантов, мастер-классов и выставок, разработка и практическая реализация мер по мотивации талантливой молодёжи для профессиональной карьеры.

Основными видами деятельности в рамках рассматриваемого круга задач являются:

- разработка перспективных технологии изготовления цилиндрических зубчатых колес;

- проектирование и изготовление зубчатых передач с круговыми зубьями;

- разработка новых технологий сборки точных механизмов и ответственных изделий со сложными пространственными размерными связями.

- математическое и компьютерное моделирование основных и вспомогательных технологических процессов формообразования сложных поверхностей и сборки изделий;

- выполнение экспериментальных исследований технологических процессов формообразования сложных поверхностей и сборки изделий;

- разработка программно-технических комплексов САПР ТП.

Тулская научная технологическая школа на протяжении многих лет осуществляет тесное взаимодействие с профильными предприятиями Тульского и соседних регионов в то числе: АО «АК Туламашзавод», АО «НПО «Сплав», АО «КБП», АО «ЦКБА», АО «Тулаэлектропривод», АО «РАТЕП», ПАО «НПО Стрела», АО «Тяжпромарматура», АО «КАДВИ», ПАО «Калужский турбинный завод», АО «Тулаточмаш», АО «Тулажелдормаш», АО «Сосенский приборостроительный завод» и ряда других.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. A five-dimensional digital twin framework driven by large language models-enhanced RL for CNC systems // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2025. Vol. 95. Article 103009.
2. Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Применение концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 6. С. 815–827.
3. A method for constructing digital twins of CNC machine tools feed systems based on hybrid mechanism-data // Scientific Reports. 2025. Vol. 15.
4. Ерофеев М.Н., Кравченко И.Н., Крюков М.В. Информационное обеспечение, моделирование и управление жизненным циклом изделий // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2025. № 2. С. 100–106.
5. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Аносов М.С. Создание цифровых двойников технологических систем обработки резанием на основе нейросетевого моделирования // Вестник машиностроения. 2024. Т. 103. № 6. С. 513–519.
6. Никищечкин П.А., Долгов В.А., Григорьев С.Н. Разработка типовых архитектур цифровых двойников производственно-логистических систем машиностроительных предприятий // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 5 (758). С. 37–48.
7. RMDTs: Process-oriented function-triggered robotic milling digital twin system for service-expansion // Journal of Manufacturing Systems. 2025. Vol. 82. P. 578–598.
8. Пирогов В.В., Рагуткин А.В., Сидоров М.И., Ставровский М.Е. Некоторые аспекты создания и

согласования цифровых двойников изделий и производства // Технологии машиностроения. 2020. № 4. С. 54–60.

9. Ключай В.В., Селезнев В.Е., Шушурин С.Н.

Цифровые двойники в металлургии и машиностроении. Технологии создания и реализации на производстве. М.: МАКС Пресс. 2025 415 с. ISBN 978-5-317-06834-3.

REFERENCES

1. A five-dimensional digital twin framework driven by large language models-enhanced RL for CNC systems // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2025. Vol. 95. Article 103009.
2. Shvedenko V.N., Mozokhin A.E. Application of the concept of digital twins at the stages of the life cycle of production systems // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2020. Vol. 20. No. 6. pp. 815–827.
3. A method for constructing digital twins of CNC machine tools feed systems based on hybrid mechanism-data // Scientific Reports. 2025. Vol. 15.
4. Erofeev M.N., Kravchenko I.N., Kryukov M.V. Information support, modeling and management of the product life cycle // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2025. No. 2. pp. 100–106.
5. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Anosov M.S. Digital model (twin) of a cutting tool based on neural network modeling // Bulletin of Mechanical Engineering. 2024. Vol. 103. No. 6. pp. 513–519.
6. Nikishechkin P.A., Dolgov V.A., Grigoriev S.N. Development of standard architectures of digital twins of production and logistics systems of machine-building enterprises // News of higher educational institutions. Mechanical engineering. 2023. No. 5 (758). pp. 37–48.
7. RMDTs: Process-oriented function-triggered robotic milling digital twin system for service-expansion // Journal of Manufacturing Systems. 2025. Vol. 82. P. 578–598.
8. Pirogov V.V., Ragutkin A.V., Sidorov M.I., Stavrovsky M.E. Some aspects of the creation and coordination of digital twins of products and production // Technology of mechanical engineering. 2020. No. 4. pp. 54–60.
9. Klochai V.V., Seleznev V.E., Shushurin S.N. Digital twins in metallurgy and mechanical engineering. Technologies of creation and implementation in production. Moscow: MAKSS Press. 2025. 415 p. ISBN 978-5-317-06834-3.

Статья поступила в редакцию 10.04.2026; одобрена после рецензирования 30.04.2026; принята к публикации 13.05.2026.

The article was submitted 10.04.2026; approved after reviewing 30.04.2026; assepted for publication 13.05.2026.