УДК 621.9 : 658.5

КОНЦЕПЦИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ МИКРОРЕЛЬЕФА

© 2026 Д.В. Назаров[1,2]

[1] Самарский федеральный исследовательский центр РАН (СамНЦ РАН), г. Самара, Россия
[2] Самарский государственный технический университет (СамГТУ), г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 28.04.2026

Статья посвящена разработке методологических основ создания мультифизических цифровых двойников поверхностей деталей машин, ориентированных на установление прямой и количественной связи между топографией микрорельефа, условиями его технологического формирования и итоговыми эксплуатационными свойствами изделий. В рамках концепции управления качеством продукции автором предлагается трехуровневая архитектура подобной модели, которая объединяет детерминированное или стохастическое описание геометрии, пространственно-неоднородные физико-механические характеристики приповерхностного слоя, а также совокупность вычислительных модулей для прогнозирования отклика системы на мультифизические воздействия в условиях реальной эксплуатации. Сформулирована и раскрыта система из шести фундаментальных принципов построения таких моделей, гарантирующих их технологическую адекватность, иерархичность, адаптивность и способность к калибровке. Предложенный подход апробирован на концептуальных примерах из областей трибологии и механики контактной усталости, демонстрируя потенциал для перехода от традиционного статистического контроля геометрических параметров к предиктивному управлению качеством на основе целевых функциональных показателей текстуры. Полученные результаты формируют научно-методическую базу для построения интеллектуальных систем менеджмента качества в условиях цифрового производства.
Ключевые слова: управление качеством поверхности, цифровой двойник, эксплуатационные свойства, предиктивная аналитика качества, функциональные параметры текстуры.
DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-4-147-154
EDN: GZYSTQ

Работа выполнена сотрудниками лаборатории «Инженерии поверхности» в рамках государственного задания Минобрнауки России для СамНЦ РАН по теме № FMRW-2025-0052.

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении назрела необходимость пересмотра устоявшихся подходов к нормированию и обеспечению качества поверхностного слоя деталей. Традиционная парадигма, опирающаяся на контроль среднестатистических параметров шероховатости, таких как Ra или Rz, демонстрирует свою ограниченность. Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о слабой и неоднозначной корреляции этих величин с реальными эксплуатационными характеристиками, определяющими долговечность и надежность узлов трения, соединений и нагруженных элементов конструкций. Например, две поверхности с идентичными значениями Ra, но с различной пространственной организацией микронеровностей (степенью анизотропии, формой вершин, кривизной выступов) будут кардинально отличаться по способности удерживать смазочный материал, сопротивляться изнашиванию или инициировать усталостные трещины [1, 2]. Фундаментальная причина этого кроется в том, что линейные параметры не несут информации о функциональных аспектах текстуры: несущей способности, маслоемкости, характере концентрации контактных напряжений [3, 4]. Следовательно, управление качеством поверхности требует перехода к более информативным, функционально-ориентированным характеристикам.

Существующие подходы к математическому моделированию поверхностей можно разделить на два направления, между которыми сохраняется значительный методологический разрыв [5]. Первое направление – статистические методы (автокорреляционный и спектральный анализ), которые хорошо описывают общую топографию, но не позволяют напрямую прогнозировать физику контактного взаимодействия. Второе направление – детерминированные конечно-элементные модели, базирующиеся на анализе напряженно-деформированного состояния единичного микровыступа или впадины. Однако отсутствует универсальная методология, способная интегрировать эти подходы в единую цифровую цепочку, охватывающую полный жизненный цикл поверхности: от

Назаров Денис Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник СамНЦ РАН, доцент кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты» СамГТУ. E-mail: dennynaz@yandex.ru

параметров технологического воздействия (режимов резания, упрочнения) через трехмерную геометрию и неоднородные свойства материала до мультифизического отклика на эксплуатационные нагрузки и итогового прогноза ресурса. Методы системного упрощения, позволяющие снизить вычислительную сложность, зачастую приводят к потере физической адекватности модели на микро- и мезоуровнях, что снижает достоверность оценки качества.

Таким образом, целью данной работы является преодоление указанного разрыва путем разработки системных принципов построения моделей нового поколения – мультифизических цифровых двойников функциональных поверхностей (ЦДФП), которые становятся ключевым инструментом управления качеством на этапах проектирования, производства и эксплуатации [6, 7]. В статье предлагается архитектурное решение и формулируются базовые принципы, позволяющие интегрировать цифровые двойники в контур управления качеством продукции.

АРХИТЕКТУРА И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПОВЕРХНОСТИ

Под цифровым двойником функциональной поверхности мы понимаем динамическую виртуальную модель, которая в цифровом пространстве воспроизводит не только геометрию микрорельефа, но и сопряженные с ней физико-механические поля приповерхностного слоя. Эта модель способна эволюционировать синхронно с реальным объектом под воздействием моделируемых технологических и эксплуатационных факторов, накапливая данные и повышая точность прогнозов. В контексте управления качеством ЦДФП выступает как средство обеспечения «встроенного» качества, закладываемого на этапе технологической подготовки и подтверждаемого на всех стадиях жизненного цикла изделия.

Как показано на рис. 1, предлагаемая архитектура ЦДФП базируется на трех взаимосвязанных информационных уровнях:

1. Геометрический слой представляет собой трехмерную топографическую модель поверхности в формате облака точек, триангуляционной сетки или параметрического описания. Источником данных могут служить как результаты измерений на современных 3D-профилометрах, так и алгоритмически синтезированные поверхности, сгенерированные с учетом физики конкретного технологического процесса (например, шлифования или электроэрозионной обработки).

2. Слой свойств материала отражает пространственное распределение (градиенты) ключевых характеристик материала: микротвердости, остаточных напряжений (как первого, так и второго рода), модуля упругости, параметров микроструктуры. Это распределение является прямым следствием термосилового воздействия на материал в процессе обработки (резание, пластическое деформирование, наплавка) и должно учитывать фазово-структурные превращения и явления наклепа.

3. Слой функциональных связей представляет собой набор валидированных математических моделей и алгоритмов, которые рассчитывают отклик системы «геометрия + свойства материала» на внешние мультифизические воздействия – контактные давления, фрикционный разогрев, химическую активность среды и циклические нагрузки. Результатом работы этого слоя являются прогнозируемые показатели качества (износостойкость, усталостная прочность, герметичность).

Для обеспечения работоспособности и адекватности такой сложной системы сформулированы шесть взаимосвязанных принципов (рис. 2).

1. Принцип технологической наследственности. Модель должна явным образом учитывать происхождение (генезис) текстуры. Алгоритмы генерации геометрии и полей свойств должны быть параметрически привязаны к конкретной технологии обработки. Такой подход согласуется с методологией проектирования функционально ориентированных технологических процессов [8], в которой обосновывается необходимость объединения задач конструктора (назначение эксплуатационных свойств) и технолога (выбор способов обработки) для достижения оптимального сочетания параметров качества поверхностного слоя при минимальной себестоимости.

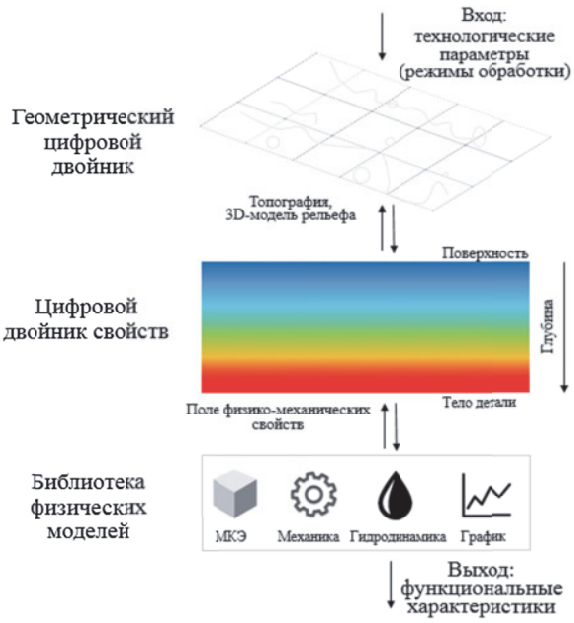

Рис. 1. Концептуальная архитектура цифрового двойника функциональной поверхности

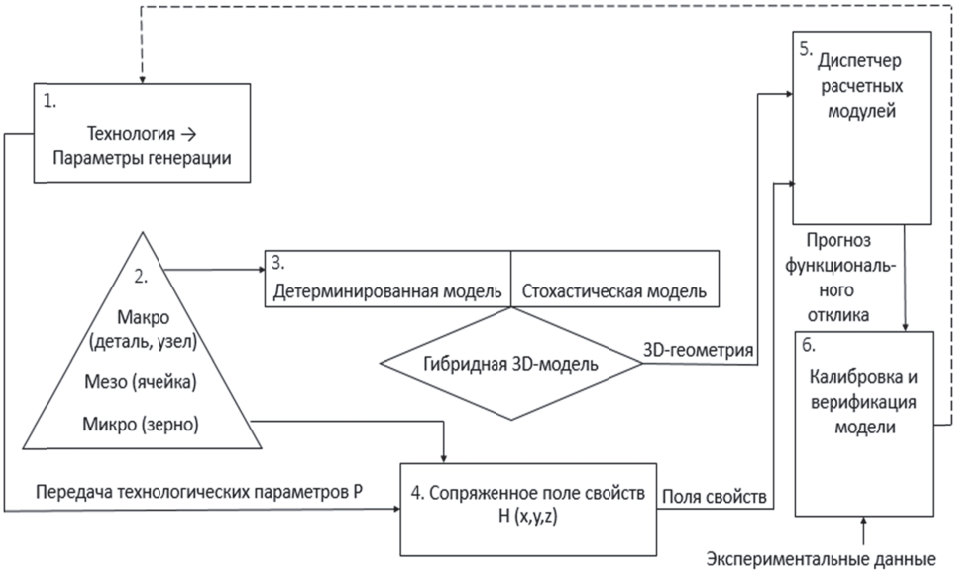

Рис. 2. Система принципов построения мультифизической модели и цикла ее калибровки

Например, для процесса плоского шлифования характерно создание направленной (анизотропной) текстуры с четко выраженным градиентом микротвердости и растягивающими остаточными напряжениями в тонком поверхностном слое. В то же время для дробеструйной обработки типична изотропная текстура со сжимающими остаточными напряжениями в упрочненном слое значительной толщины.

2. Принцип иерархичности и масштабирования. Физические процессы, определяющие работоспособность поверхности, протекают на разных масштабных уровнях. На макроуровне рассматривается деталь в сборе для определения условий нагружения и распределения номинальных контактных давлений. На мезоуровне выделяется репрезентативный объемный элемент (РОЭ), содержащий статистически значимое множество микронеровностей, что позволяет усреднить их влияние. На микроуровне исследуются локальные процессы: пластическое течение материала в единичном контакте, дислокационная активность, зарождение микротрещин.

3. Принцип полноты описания топографии. Для адекватного моделирования рельеф функциональной поверхности предлагается описывать как суперпозицию двух компонент. Первая – регулярная (детерминированная) составляющая, включающая элементы, целенаправленно созданные для выполнения конкретной функции (макровпадины для подачи смазки, микроканавки на подшипниках скольжения). Вторая – случайная (стохастическая) составляющая, представляющая собой фоновый шероховатый рельеф, который описывается методами случайных полей с заданными корреляционными функциями и законами распределения высот [9].

4. Принцип сопряжения геометрии и свойств. Поля механических свойств в приповерхностном слое не являются однородными; их вариации часто коррелируют с локальной геометрией. Например, на вершинах выступов, подвергшихся наибольшей пластической деформации при обработке, степень наклепа выше. Данный принцип требует сопряженного задания: каждому узлу дискретной геометрической модели ставится в соответствие вектор физико-механических свойств P, зависящий от координат и истории термосилового воздействия:

$$P(x,y,z) = f\left(T(x,y,z), \sigma_{\text{ост}}(x,y,z), HB(x,y,z)\right), \quad (1)$$

где T – температура, $\sigma_{ост}$ – тензор остаточных напряжений, HB – твердость.

5. Принцип модульности вычислительного ядра. Архитектура программной реализации должна представлять собой «конструктор», позволяющий подключать различные физические модули в зависимости от решаемой инженерной задачи. Базовый набор включает: модуль упругопластического контакта (решающий задачи Герца для сложных поверхностей), модуль трибологии (расчет коэффициента трения и интенсивности изнашивания), модуль механики разрушения (оценка параметров типа коэффициента интенсивности напряжений в основании микровыступов) и модуль герметичности (моделирование протечек в стыках).

6. Принцип адаптации и калибровки по данным. Цифровой двойник не является статичной моделью, а представляет собой адаптивную систему. Он должен непрерывно уточняться и калиброваться на основе потока экспериментальных данных, получаемых в ходе производства и эксплуатации. Это могут быть данные 3D-профилометрии, наноиндентирования, рентгеноструктурного анализа остаточных напряжений, а также результаты стендовых испытаний на трение и усталость. Для настройки внутренних параметров модели и повышения точности прогнозов перспективным является приме-

нение методов машинного обучения. Данный подход коррелирует с методологией, предложенной в работе [10], где в условиях неопределенности, вызванной отсутствием математических моделей для заданных условий обработки, обосновывается выбор структуры моделей и описывается алгоритм их параметрической идентификации. Цифровой двойник, благодаря встроенным механизмам калибровки, позволяет реализовать такую идентификацию в едином цифровом контуре.

РЕАЛИЗАЦИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Техническая реализация сформулированных принципов предполагает создание специализированной вычислительной платформы, построенной по модульному принципу и обеспечивающей сквозной цифровой поток от технологических параметров до прогнозируемых функциональных показателей качества. На рис. 3 представлена блок-схема такой платформы, отражающая основные этапы обработки данных и вычислительные модули.

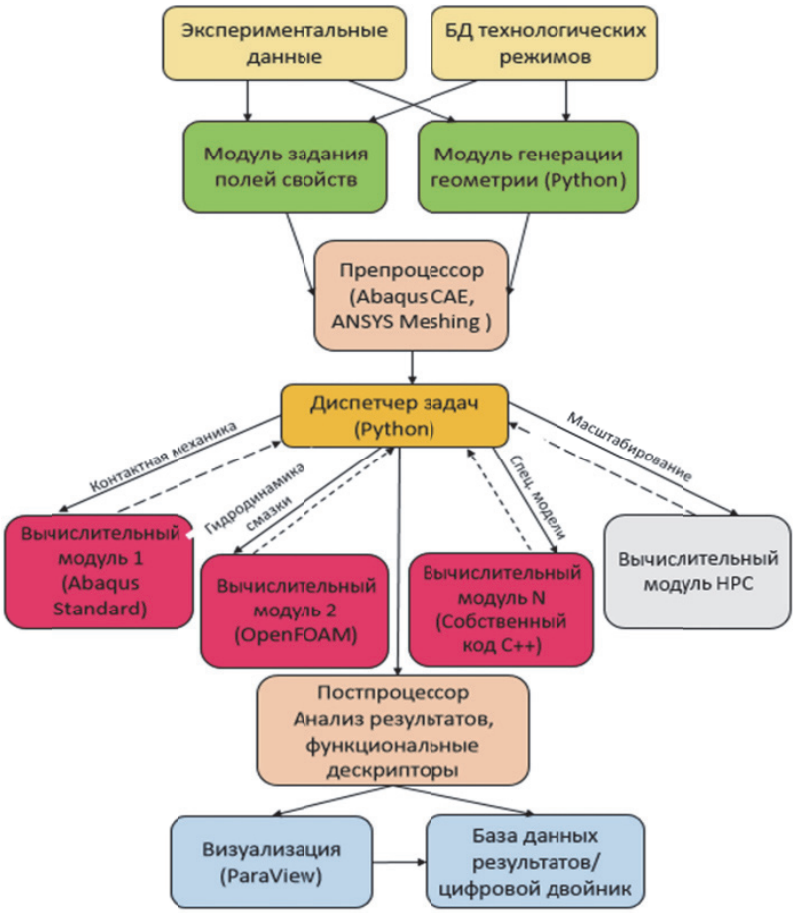

Рис. 3. Архитектура вычислительной платформы для реализации цифрового двойника функциональной поверхности

Блок-схема организована по принципу последовательного потока данных сверху вниз и включает следующие ключевые компоненты.

1. Блок ввода данных объединяет два источника: базу данных технологических параметров обработки (скорость, подача, глубина резания, характеристики инструмента) и массив экспериментальных данных (результаты 3D-профилометрии, измерения микротвердости, данные рентгеноструктурного анализа остаточных напряжений). Такое разделение позволяет как генерировать синтетические модели на основе технологической наследственности, так и калибровать их по реальным измерениям.

2. Модуль генерации состоит из двух подсистем:

- модуль генерации геометрии (реализован на Python) создаёт трёхмерную топографию поверхности либо путём параметрического синтеза (суперпозиция регулярных и стохастических составляющих), либо путём импорта данных измерений;
- модуль задания полей свойств формирует пространственное распределение физико-механических характеристик (микротвердость, остаточные напряжения, пластические деформации) на основе моделей, связывающих параметры обработки с глубиной слоя наклёпа и градиентами свойств.

3. Препроцессор осуществляет автоматическое построение расчётной сетки на основе сгенерированной геометрии и полей свойств. Используются специализированные инструменты (Abaqus CAE, ANSYS Meshing), что обеспечивает возможность работы с различными трехмерными элементами в зависимости от требуемой точности и вычислительных ресурсов.

4. Вычислительное ядро организовано по принципу «конструктора» и управляется диспетчером задач (Python), который распределяет расчёты между специализированными программными вычислительными модулями в зависимости от физической природы моделируемого процесса:

- Abaqus Standard для задач контактной механики, упругопластического деформирования и усталостного анализа;
- OpenFOAM для задач гидродинамики смазки и тепломассопереноса;
- собственные коды на C++ для реализации специфических физических моделей, не входящих в функционал коммерческих пакетов (например, модели изнашивания).

Диспетчер также обеспечивает взаимодействие с высокопроизводительным вычислительным кластером (HPC) при проведении полномасштабных мультифизических расчётов.

5. Постпроцессор выполняет анализ полученных полей напряжений, деформаций, температур и давления. На этом этапе вычисляются ключевые функциональные дескрипторы (интегральные объёмы смазочных карманов, коэффициенты концентрации напряжений, интенсивность изнашивания и др.), которые служат основой для оценки прогнозируемого качества поверхности.

6. Блок вывода и хранения включает:

- модуль визуализации (пакет ParaView) для интерактивного анализа трёхмерных полей;
- базу данных результатов, в которой сохраняются сгенерированные модели, параметры калибровки, результаты расчётов и итоговые функциональные показатели. Эта база служит основой для накопления знаний и последующего обучения моделей машинного обучения.

Предложенная архитектура реализует все шесть принципов построения цифровых двойников: она позволяет учитывать технологическую наследственность (блоки ввода и генерации), обеспечивает иерархичность (возможность перехода от макро- к микроуровню через выбор представительного объёма), поддерживает сопряжение геометрии и свойств (препроцессор с наследованием полей) и предоставляет гибкость для калибровки по экспериментальным данным (обратная связь через базу данных).

ДЕМОНСТРАЦИЯ ПРИНЦИПОВ НА КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ПРИМЕРАХ

Для иллюстрации работоспособности методологии рассмотрим два примера.

Пример 1 (трибологическая пара). Моделируются две поверхности с идентичным значением Ra, но разной пространственной частотой неровностей. Мультифизический расчет с подключением модуля трибологии демонстрирует, что при заданной толщине масляного слоя текстура с более высокой частотой быстрее формирует несущий клин, обеспечивая более ранний переход в режим гидродинамического трения и, как следствие, снижение интенсивности износа по сравнению с низкочастотной текстурой (рис. 4).

Пример 2 (контактная усталость). Моделируется зона контакта шарика с поверхностью после шлифования. Учет градиента остаточных сжимающих напряжений (принцип 4) в сочетании с локальной геометрией острого выступа позволяет модулю механики разрушения спрогнозировать зарождение усталостной микротрещины не на поверхности, а в подповерхностном слое у подошвы выступа, где растягивающие напряжения под нагрузкой превышают защитное действие остаточных сжимающих напряжений [11].

ПУТИ ИНТЕГРАЦИИ В СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Предложенный подход открывает путь к кардинальной трансформации системы управления качеством. Ключевым шагом является переход в технической документации от простых параметров Ra/Rz к функционально-ориентированным расчетным показателям, непосредственно связанным с ресурсом детали, что соответствует современной концепции функционально ориентированного технологического проектирования, согласно которой оптимизация эксплуатационных свойств должна осуществляться совместно конструктором и технологом на ранних этапах подготовки производства. Примерами таких показателей могут служить: «интегральный объем смазочных карманов», «максимальный коэффициент концентрации напряжений в поверхностном слое», «критическая глубина залегания дефектов, инициирующих усталостное разрушение».

В рамках такой предиктивной системы ЦДФП становится инструментом для решения следующих прикладных задач в области управления качеством (см. рис. 5):

1. Виртуальное назначение допусков: определение того, какие именно отклонения в текстуре (высота, шаг, форма, кривизна) являются критическими для выполнения деталью своей функции, а какие – допустимы. Это позволяет реализовать концепцию **APQP (Advanced Product Quality Planning)** [12].

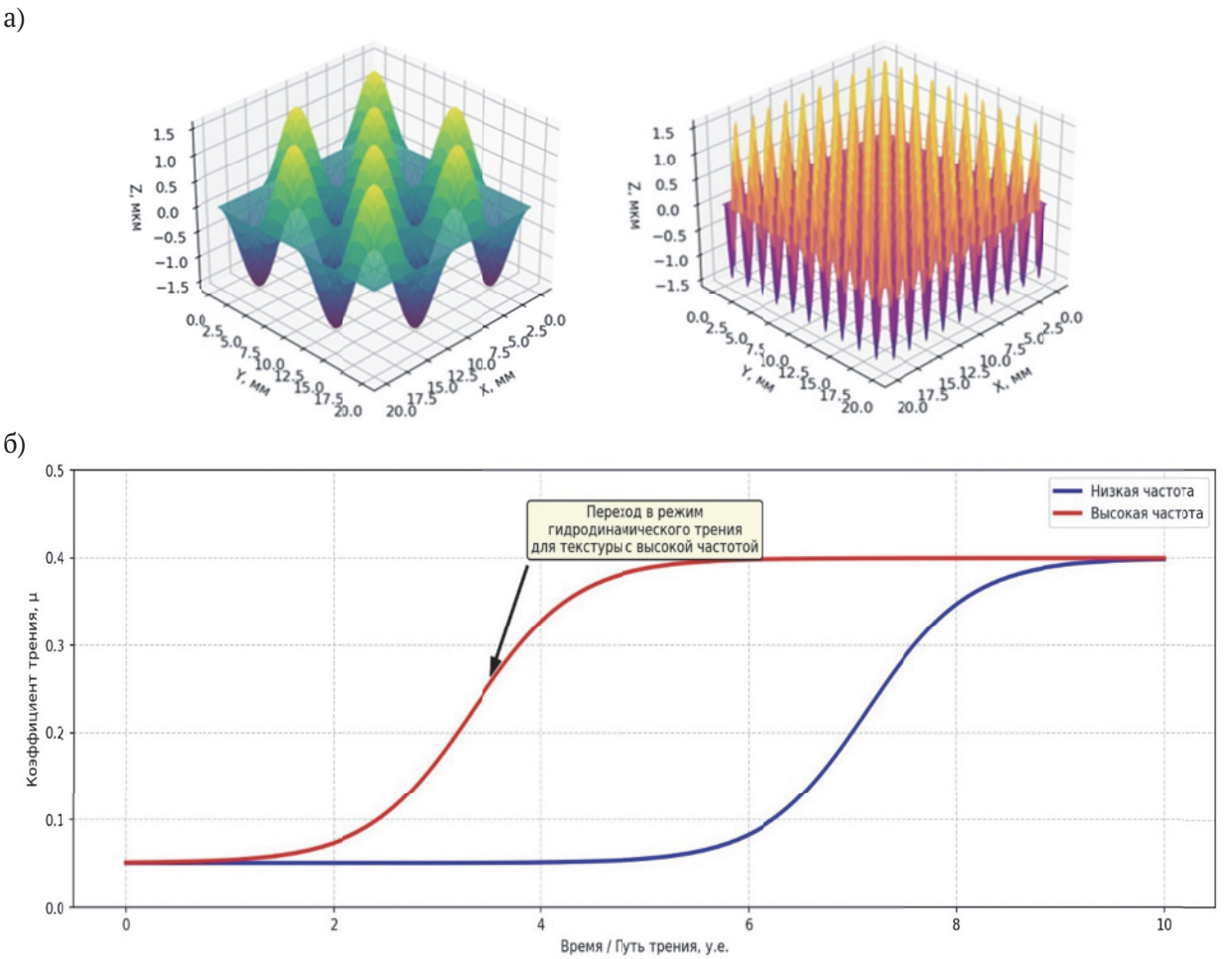

Рис. 4. Сравнительный анализ функционального отклика текстур с идентичным Ra, но разной пространственной частотой:
а) 3D-модели рельефа; б) Динамика коэффициента трения

2. Цифровая оптимизация технологических режимов: подбор параметров обработки (скорости, подачи, усилия), гарантирующих получение поверхности с заданными (целевыми) функциональными свойствами еще на этапе проектирования техпроцесса, что минимизирует количество дорогостоящих натурных экспериментов и обеспечивает стабильность качества.

3. Предиктивная диагностика состояния: оценка остаточного ресурса детали непосредственно в эксплуатации на основе данных неразрушающего контроля текущего состояния ее поверхности, например, по изменению параметров 3D-топографии в процессе приработки или изнашивания. Это позволяет перейти от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию, что является высшей формой управления качеством в эксплуатации.

К числу очевидных ограничений предлагаемого подхода можно отнести высокую вычислительную сложность полномасштабных мультифизических расчетов, а также необходимость создания обширных и достоверных баз данных для калибровки моделей под различные материалы и технологии. Дальнейшее развитие метода видится в интеграции технологий искусственного интеллекта, которые позволят автоматически адаптировать цифровые двойники в реальном масштабе времени, обеспечивая полностью автоматизированное управление качеством на производстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые сформулирована комплексная система из шести взаимосвязанных принципов построения мультифизических моделей функциональных поверхностей, обеспечивающих их технологическую обусловленность, многомасштабность и адаптивность.

2. Предложена трехуровневая архитектура цифрового двойника поверхности, интегрирующая стохастико-детерминированную геометрию, сопряженное поле свойств подповерхностного слоя и библиотеку вычислительных модулей для решения прикладных физических задач (контактная механика, трибология, усталостная долговечность).

Рис. 5. Место цифрового двойника функциональной поверхности в контуре предиктивного управления качеством и ресурсом

3. Разработанный подход обеспечивает принципиальную возможность перехода от эмпирического контроля параметров шероховатости к предиктивному, основанному на физике процессов, управлению качеством и ресурсом поверхностного слоя деталей машин.

4. Сформулированные принципы и архитектура закладывают научно-методическую основу для последующей детальной разработки алгоритмов, программных решений и нормативно-технического обеспечения в области цифрового моделирования контактных, трибологических и усталостных задач при управлении качеством деталей машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Суслов, А.Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. – Москва: Научно-техническое издательство «Машиностроение», 2000. – 320 с. – ISBN 5-217-02976-5.
2. Инженерия поверхности деталей: Учебное пособие / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов [и др.]. – Москва: Научно-техническое издательство «Машиностроение», 2008. – 320 с. – ISBN 978-5-217-03427-7.
3. *Назаров, Д. В.* Специфика формирования требований к параметрам текстуры поверхностей по функциональному назначению / Д. В. Назаров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 12. – С. 267-274. – DOI 10.24412/2071-6168-2025-12-267-268. – EDN VQEBEZ.
4. *Мельников, П. А.* Микрорельеф поверхности как фактор работоспособности манжетных уплотнений и способы его формирования в процессах финишной обработки / П. А. Мельников, С. В. Чернякин, Д. В. Назаров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 5(127). – С. 172-180. – DOI 10.37313/1990-5378-2025-27-5-172-180. – EDN PNXLZG.
5. *Ли, К.* Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб.: Питер, 2004. – 560 с.: ил.
6. *Исаев, А.В.* Цифровые двойники: концепции и практика / А. В. Исаев, С. Н. Мамаев. – М.: Инфра-М, 2020. – 272 с.
7. *Ковригин Е.А., Васильев В.А.* Пути развития СМК в условиях цифровизации. М.: Компетентность, 2020. 6 с.
8. *Суслов, А. Г.* Проектирование функционально ориентированных технологических процессов / А. Г. Суслов, О. Н. Федонин, Д. М. Медведев // Вестник машиностроения. – 2019. – № 9. – С. 66-71. – EDN TDBHLR.
9. *Абрамов, А. Д.* Построение цифрового изображения структуры поверхности по профиллограмме для определения её характеристик в соответствии с ГОСТ р ИСО 25178-2- 2014 / А. Д. Абрамов, Н. В. Носов, Т. Н. Андрюхина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2023. – Т. 25, № 4-2(114). – С. 270-277. – DOI 10.37313/1990-5378-2023-25-4(2)-270-277. – EDN ORIYMN.
10. *Суслов, А. Г.* Автоматизированная система обеспечения параметров качества поверхностного слоя деталей машин в условиях неопределенности / А. Г. Суслов, Д. И. Петрешин // Менеджмент качества производственных, социально-экономических и технических систем: развитие и совершенствование: сборник научных трудов. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2022. – С. 88-93. – EDN XBOCWU.
11. *Королев, И.К.* Конечно–элементное моделирование накопления повреждений и развития усталостной трещины в материале со стохастическим распределением сопротивления элементов микроструктуры / И.К.

Королев, С.В. Петинов, А.Б. Фрейдин // Труды ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова. – 2010. – №53. – С. 59– 66.
12. *Подгорний, А. С.* Роль методологического инструментария FMEA в рамках реализации APQP / А. С. Подгорний, В. Н. Козловский, Д. И. Панюков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27. – № 2(124). – С. 34-42. – DOI 10.37313/1990-5378-2025-27-2-34-42. – EDN EUTEVM.

CONCEPT FOR QUALITY ASSURANCE OF FUNCTIONAL SURFACES BASED ON MULTIPHYSICS DIGITAL TWINS OF MICRORELIEF

© 2026 D.V. Nazarov[1,2]

[1] Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia
[2] Samara State Technical University, Samara, Russia

The article is devoted to the development of methodological foundations for creating multiphysics digital twins of machine part surfaces, aimed at establishing a direct and quantitative relationship between microrelief topography, the conditions of its technological formation, and the resulting operational properties of products. Within the framework of the product quality management concept, the author proposes a three-level architecture for such a model, which combines a deterministic or stochastic description of geometry, spatially inhomogeneous physical and mechanical characteristics of the subsurface layer, as well as a set of computational modules for predicting the system's response to multiphysics influences under actual operating conditions. A system of six fundamental principles for constructing such models is formulated and elucidated, guaranteeing their technological adequacy, hierarchy, adaptability, and calibration capability. The proposed approach has been tested on conceptual examples from the fields of tribology and contact fatigue mechanics, demonstrating the potential for transitioning from traditional statistical control of geometric parameters to predictive quality management based on target functional texture characteristics. The obtained results form a scientific and methodological basis for building intelligent quality management systems in the context of digital manufacturing.
Keywords: surface quality management, digital twin, operational properties, predictive quality analytics, functional texture parameters.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-4-147-154
EDN: GZYSTQ

REFERENCES

1. *Suslov, A.G.* Kachestvo poverkhnostnogo sloya detalei mashin / A.G. Suslov. – Moskva: Nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo "Mashinostroenie", 2000. – 320 s. – ISBN 5-217-02976-5.
2. Inzheneriya poverkhnosti detalei: Uchebnoe posobie / A.G. Suslov, V.F. Bez"yazychnyi, Yu.V. Panfilov [i dr.]. – Moskva: Nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo "Mashinostroenie", 2008. – 320 s. – ISBN 978-5-217-03427-7.
3. *Nazarov, D. V*. Spetsifika formirovaniya trebovanii k parametram tekstury poverkhnostei po funktsional'nomu naznacheniyu / D. V. Nazarov // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 12. – S. 267-274. – DOI 10.24412/2071-6168-2025-12-267-268. – EDN VQEBEZ.
4. *Mel'nikov, P. A*. Mikrorel'ef poverkhnosti kak faktor rabotosposobnosti manzhetnykh uplotnenii i sposoby ego formirovaniya v protsessakh finishnoi obrabotki / P. A. Mel'nikov, S. V. Chernyakin, D. V. Nazarov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. – 2025. – T. 27, № 5(127). – S. 172-180. – DOI 10.37313/1990-5378-2025-27-5-172-180. – EDN PNXLZG.
5. *Li, K*. Osnovy SAPR (CAD/CAM/CAE). SPb.: Piter, 2004. – 560 s.: il.
6. *Isaev, A.V*. Tsifrovye dvoiniki: kontseptsii i praktika [Tekst] / A. V. Isaev, S. N. Mamaev. – M.: Infra-M, 2020. – 272 s.
7. *Kovrigin E.A., Vasil'ev V.A*. Puti razvitiya SMK v usloviyakh tsifrovizatsii. M.: Kompetentnost', 2020. 6 s.
8. *Suslov, A. G*. Proektirovanie funktsional'no orientirovannykh tekhnologicheskikh protsessov / A. G. Suslov, O. N. Fedonin, D. M. Medvedev // Vestnik mashinostroeniya. – 2019. – № 9. – S. 66-71. – EDN TDBHLR.
9. *Abramov, A. D*. Postroenie tsifrovogo izobrazheniya struktury poverkhnosti po profilogramme dlya opredeleniya ee kharakteristik v sootvetstvii s GOST r ISO 25178-2-2014 / A. D. Abramov, N. V. Nosov, T. N. Andryukhina // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. – 2023. – T. 25, № 4-2(114). – S. 270-277. – DOI 10.37313/1990-5378-2023-25-4(2)-270-277. – EDN ORIYMN.
10. *Suslov, A. G.* Avtomatizirovannaya sistema obespecheniya parametrov kachestva poverkhnostnogo sloya detalei mashin v usloviyakh neopredelennosti / A. G. Suslov, D. I. Petreshin // Menedzhment kachestva proizvodstvennykh, sotsial'no-ekonomicheskikh i tekhnicheskikh sistem: razvitie i sovershenstvovanie: sbornik nauchnykh trudov. – Bryansk: Bryanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2022. – S. 88-93. – EDN XBOCWU.
11. *Korolev, I.K*. Konechno–elementnoe modelirovanie nakopleniya povrezhdenii i razvitiya ustalostnoi treshchiny v materiale so stokhasticheskim raspredeleniem soprotivleniya elementov mikrostruktury / I.K. Korolev, S.V. Petinov, A.B. Freidin // Trudy TsNII im. akademika A.N. Krylova. – 2010. – №53. – C. 59–66.
12. *Podgornii, A. S.* Rol' metodologicheskogo instrumentariya FMEA v ramkakh realizatsii APQP / A. S. Podgornii, V. N. Kozlovskii, D. I. Panyukov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. – 2025. – T. 27. – № 2(124). – S. 34-42. – DOI 10.37313/1990-5378-2025-27-2-34-42. – EDN EUTEVM.

Denis Nazarov, PhD (Engineering), Senior Researcher of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Associated Professor of the Samara State Technical University. E-mail: dennynaz@yandex.ru