

---

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.  
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

---

УДК 004.94

**ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ,  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ  
ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИЗДЕЛИЙ**

© 2025 г. М. Н. Ерофеев<sup>1</sup>, И. Н. Кравченко<sup>1, \*</sup>, М. В. Крюков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.10.2024 г.

После доработки 21.10.2024 г.

Принята к публикации 20.12.2024 г.

В статье рассматривается актуальность и значимость концепции цифровых двойников в области машиностроения, а также их влияние на производственные процессы. Определены цели и задачи исследования, включающие анализ понятийного аппарата, использование цифровых двойников на различных этапах жизненного цикла изделий и оценку их преимуществ и недостатков. Рассмотрены феноменологические модели управления повреждениями материалов, их классификация и примеры успешного применения в реальных ситуациях. Изложены требования к созданию формата цифрового двойника, включая его структуру и основные компоненты. Особое внимание уделено вопросам управления повреждениями и возможным подходам к их решению, а также оценке эффективности предлагаемых решений. В заключении подчеркивается важность интеграции цифровых технологий и даются рекомендации по внедрению цифровых двойников, направленные на повышение эффективности производства, снижение затрат и улучшение качества продукции. Перспективы дальнейших исследований в этой области связаны с разработкой алгоритмов анализа, внедрением искусственного интеллекта и созданием стандартов цифровых моделей.

*Ключевые слова:* цифровой двойник, искусственный интеллект, информационная поддержка, феноменологические модели, управление технологическими процессами, жизненный цикл изделия

**DOI:** 10.31857/S0235711925020129, **EDN:** DFOZBM

В последние годы наблюдается значительный рост интереса к концепции цифровых двойников, особенно в области машиностроения. Цифровые двойники представляют собой виртуальные модели физических объектов, которые можно использовать для оптимизации проектирования, производственных процессов и эксплуатации изделий [1–3], тем самым повышая конкурентоспособность предприятий. В условиях быстро меняющегося рынка и растущих требований к качеству продукции внедрение цифровых двойников становится необходимым для повышения конкурентоспособности предприятий. В то же время исследования показывают [4, 5], что использование цифровых двойников позволяет сократить время на разработки новых продуктов, снизить издержки производства и повысить качество конечной продукции. Кроме того, цифровые двойники открывают новые возможности для анализа и прогнозирования поведения изделий в реальных условиях эксплуатации,

что имеет решающее значение для обеспечения надежности и безопасности машин и оборудования.

**Целью статьи** является анализ роли цифровых двойников в современном машиностроении и оценка их влияния на производственные процессы. Для достижения цели предусматривается решение следующих задач исследования: 1) определение понятийного аппарата, связанного с цифровыми двойниками и их функциональными возможностями; 2) исследование по применению цифровых двойников на различных этапах жизненного цикла изделия, включая проектирование, производство и эксплуатацию; 3) оценка преимуществ и недостатков внедрения цифровых двойников в практику машиностроительных предприятий.

Цифровые двойники можно определить как динамические цифровые представления физических объектов или процессов, которые собирают, накапливают и анализируют данные в режиме реального времени [6, 7]. Они позволяют создавать виртуальные модели, имитирующие поведение и характеристики физических объектов, что позволяет проводить различные сценарии тестирования и оптимизации без необходимости создания физических прототипов.

Роль цифровых двойников в производственных процессах многогранна. Во-первых, они повышают эффективность проектирования, позволяя инженерам визуализировать и тестировать различные конфигурации изделий. Во-вторых, цифровые двойники могут использоваться для мониторинга состояния оборудования в режиме реального времени, что позволяет прогнозировать возможные неисправности и проводить профилактическое обслуживание. В-третьих, они могут интегрироваться с системами управления производством, что позволяет оптимизировать процессы и снизить затраты на производство.

Таким образом, цифровые двойники представляют собой ключевой инструмент, способствующий трансформации традиционных подходов в машиностроении и обеспечивающий более высокую степень автоматизации и интеллектуализации производственных процессов.

**Феноменологические модели для управления повреждениями материалов.** Феноменологические модели являются мощным инструментом для анализа и прогнозирования поведения материалов при различных нагрузках и условиях эксплуатации [8, 9]. Эти модели основаны на обобщении экспериментальных данных и позволяют выявить взаимосвязь между физико-механическими свойствами материалов и их поведением при различных условиях нагружения и различных технологических процессах обработки изделий. В машиностроении применение феноменологических моделей особенно актуально, поскольку они позволяют прогнозировать срок службы конструкций, оценивать их надежность и безопасность, а также оптимизировать процессы проектирования.

Феноменологические модели имеют много преимуществ, таких как высокая обобщаемость, возможность интеграции с другими моделями и простота использования. Однако важно учитывать, что их применение требует тщательного выбора параметров модели, чтобы обеспечить адекватное описание поведения материалов в различных условиях. Как отмечается в исследовании [5], правильная интерпретация экспериментальных данных является залогом успешного применения феноменологических моделей.

Существует несколько типов феноменологических моделей повреждений, которые можно классифицировать в зависимости от подхода к описанию поведения материалов: 1) *модели, основанные на микромеханике*. Эти модели учитывают микроструктурные особенности материалов и их влияние на физико-механические свойства, а также описывают такие процессы, как образование трещин и их рост на микроскопическом уровне; 2) *феноменологические модели*. В отличие от микромеханических моделей, эти модели фокусируются на макроскопических свойствах

материалов и их зависимости от внешних условий. Они используют статистические функции для описания накопления повреждений и усталостного разрушения.

В зависимости от области применения модели повреждений можно использовать для оценки прочности и долговечности конструкций, прогнозирования срока службы материалов, а также оптимизации процессов проектирования и производства с целью снижения затрат на испытания и повышения качества конечного продукта.

На практике для достижения наилучших результатов часто комбинируют различные подходы, что позволяет более точно описывать сложные механизмы повреждений и разрушений.

Феноменологические модели широко применяются в различных областях машиностроения. Например, было исследовано поведение образцов сплава 1570 при интенсивных циклических нагрузках. Сравнение экспериментальных деформаций с расчетными данными, полученными с использованием совмещенной модели полилинейного изотропного и нелинейного кинематического упрочнения [10], показало высокую степень согласия, что подтверждает эффективность использования этих моделей для прогнозирования поведения материалов.

Другим примером успешного применения феноменологических моделей является работа [11], в которой исследовались предельные деформации в полом тонкостенном цилиндре. При этом основными факторами, влияющими на эти деформации, являются растягивающие усилия, крутящий момент и внутреннее давление, что позволило создать наиболее достоверную модель оценки прочности таких конструкций.

Следует также отметить, что феноменологические модели активно используются в процессах проектирования, где необходимо учитывать различные условия нагружения и эквивалентные физические параметры. Это позволяет инженерам более точно прогнозировать поведение конструкций в реальных условиях эксплуатации, что способствует повышению их надежности и безопасности.

Феноменологические модели являются важным инструментом в управлении повреждениями материалов, позволяя более точно описывать и прогнозировать их поведение под воздействием различных факторов. Использование этих моделей как в научных исследованиях, так и в промышленности подтверждает их высокую эффективность и универсальность.

**Создание формата цифровых двойников.** Модель цифрового двойника представляет собой виртуальное представление физического объекта или системы, которое используется для анализа, моделирования и оптимизации процессов, связанных с этими объектами.

Формат модели цифрового двойника включает структурированные данные и алгоритмы, позволяющие эффективно описывать физические процессы и их взаимодействие. Ценность формата модели цифрового двойника заключается в том, что он обеспечивает интеграцию данных из различных источников, что, в свою очередь, позволяет принимать более обоснованные решения при проектировании, эксплуатации и обслуживании систем.

Формат модели должен быть гибким и масштабируемым, чтобы учитывать изменения характеристик объекта и адаптироваться к новым условиям эксплуатации. Это особенно важно в контексте современных тенденций, таких как Индустрия 4.0, где требования к скорости обработки и анализу данных возрастает.

Структура цифрового двойника состоит из нескольких ключевых компонентов, каждый из которых играет важную роль в его функционировании: 1) данные о физическом объекте — это информация о материале, геометрии, условиях эксплуатации и т.д. Эти данные можно получать из различных источников, включая датчики, системы управления и исторические базы данных; 2) модели физических процессов — математические и физические модели, описывающие поведение объекта

под воздействием различных факторов. Они могут включать модели механики, термодинамики и других дисциплин; 3) алгоритмы обработки данных обеспечивают анализ собранных данных и их интеграцию с моделями процессов. К ним могут относиться методы машинного обучения, статистический анализ и другие подходы, используемые для извлечения полезной информации из больших объемов данных; 4) интерфейс визуализации и взаимодействия — это интерфейс, который позволяет пользователям взаимодействовать с цифровым двойником, визуализировать данные и результаты моделирования. Интерфейсы могут включать графические панели, системы отчетности и инструменты для анализа; 5) интеграция с другими системами. Цифровые двойники должны иметь возможность интегрироваться с другими системами управления и анализа данных, чтобы обеспечить единую платформу для принятия решений.

Структуру цифрового двойника можно представить в виде диаграммы последовательности (рис. 1), описанной в формате PlantUML.

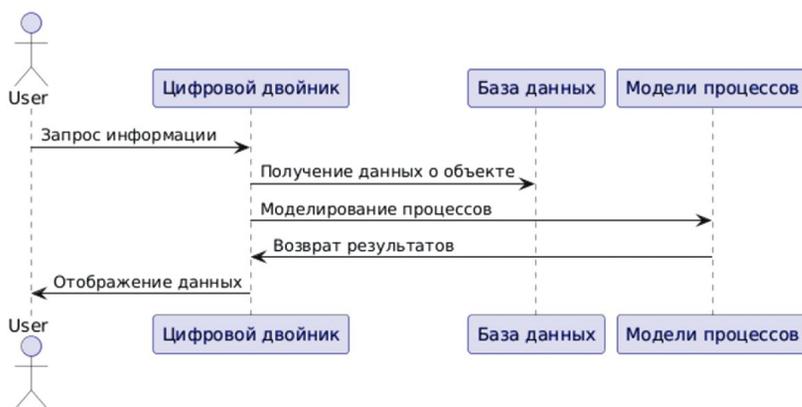


Рис. 1. Структура цифрового двойника.

**Технические требования к наполнению данными цифровых двойников.** Для эффективного функционирования цифровых двойников необходимо соблюдение определенных технических требований к наполнению данными. Эти требования включают в себя: 1) *точность данных*: данные, используемые для создания цифрового двойника, должны быть высококачественными и актуальными. Ошибки в данных могут привести к неверным выводам и решениям; 2) *регулярные обновления данных*: цифровые двойники должны иметь возможность динамически обновлять данные в режиме реального времени, чтобы отражать изменения состояния физического объекта; 3) *совместимость форматов данных*: для интеграции данных из разных источников необходимо обеспечить совместимость форматов и стандартов данных; 4) *возможности анализа данных*: цифровые двойники должны поддерживать различные методы анализа данных, включая статистический анализ, прогнозирование и оптимизацию; 5) *безопасность данных*: необходимо обеспечить защиту данных от несанкционированного доступа и утечек информации, что особенно актуально в условиях современных киберугроз.

Соблюдение технических требований позволяет создавать надежные и эффективные цифровые двойники, которые способны существенно повысить эффективность управления и эксплуатации физических объектов.

**Варианты решений задач.** Управление повреждениями материалов является одной из наиболее актуальных проблем в машиностроении и промышленности. Повреж-

дения могут приводить к значительным экономическим потерям, отказам оборудования и промышленным авариям, поэтому важно найти эффективные решения для их предотвращения и контроля. Например, результаты исследований [4] выявили существенные аспекты, касающиеся устойчивости конструкций и их способности выдерживать нагрузки.

Ключевые проблемы управления повреждениями включают: 1) отсутствие надежных методов прогнозирования состояния материалов в процессе эксплуатации; 2) сложности в оценке степени повреждений и их влияния на физико-механические свойства материала; 3) необходимость разработки адаптивных систем мониторинга, способных своевременно выявлять критические состояния.

Эти проблемы оказывают существенное влияние на производственный процесс, увеличивая риски неэффективности и снижения качества конечной продукции. Например, повреждение конструкционных сталей может привести к снижению их прочности, что в свою очередь вызывает поломку или разрушение конструкций [12].

**Возможные подходы к решению проблем.** Решения по управлению повреждениями могут быть многообразными и включать как профилактические меры, так и диагностические и прогностические методы [13]. Среди возможных подходов можно выделить: 1) *моделирование и имитация процессов повреждения*. Использование феноменологических моделей позволяет более точно описывать циклическую пластичность и поведение материалов при различных условиях нагружения. Развитие этого подхода продемонстрировано в работах [14, 15]; 2) *интеграция экспериментальных данных*. Использование данных из различных источников, включая результаты испытаний на растяжение и данные о предварительных деформациях, может повысить точность прогнозирования поведения материалов. Это особенно важно для конструкционных сталей, где предлагаемые нижние пределы модуля упругости могут не учитывать специфические свойства материала; 3) *разработка адаптивных систем мониторинга*. Использование датчиков и современных технологий для мониторинга состояния материалов в режиме реального времени позволяет своевременно выявлять повреждения в различных элементах и предотвращать их развитие; 4) *статистические методы анализа*. Использование статистических функций для анализа процессов разрушения и усталости позволяет более точно прогнозировать развитие накопленных повреждений и оптимизировать управление ими на основе объективной информации о техническом состоянии.

Оценка эффективности предлагаемых решений требует системного подхода, включающего как теоретические, так и практические аспекты. В этом случае важно учитывать следующие критерии: 1) *надежность и устойчивость моделей*. Использование феноменологических моделей, таких как обобщенная модель Шабоса [16, 17], показало высокую степень корреляции с экспериментальными данными при анализе образцов, что подтверждает возможность их применения на практике; 2) *экономическую эффективность*. Внедрение систем мониторинга и прогнозирования позволяет существенно сократить затраты на эксплуатацию и обслуживание оборудования. Например, использование адаптивных систем позволяет избежать вынужденных остановок и снизить риск аварий; 3) *устойчивость к внешним факторам*. Модели, учитывающие влияние внешних факторов (например, температуры и давления), обеспечивают более надежные прогнозы поведения материалов в различных условиях.

Таким образом, подходы к управлению повреждениями, основанные на интеграции экспериментальных данных и использовании современных технологий моделирования, позволяют существенно повысить безопасность и эффективность производственных процессов. Однако важно продолжать исследования в этой области с целью адаптации и совершенствования существующих методов, что будет способствовать развитию промышленности и снижению рисков, связанных с повреждениями материалов.

Для успешного внедрения цифровых двойников в машиностроение рекомендуется следующий алгоритм: 1) *анализ существующих процессов*. Перед внедрением цифровых двойников необходимо провести детальный анализ конструктивного исполнения и текущих производственных процессов, чтобы определить, где именно технологии могут принести наибольшую пользу; 2) *обучение персонала*. Обучение сотрудников основам работы с цифровыми технологиями обеспечит эффективное использование цифровых двойников и минимизацию ошибок, а также противодействие им на этапе их внедрения; 3) *пилотные проекты*. Рекомендуется проводить пилотные проекты по тестированию цифровых двойников в реальных производственных условиях. Это поможет выявить возможные проблемы и скорректировать подход перед широкомасштабным внедрением; 4) *интеграция с существующими системами*. Важно учитывать необходимость интеграции цифровых двойников с существующими системами управления и контроля для обеспечения синергии между различными технологическими процессами, а также исключения дублирование процессов.

Следуя этим рекомендациям, предприятия смогут эффективнее внедрять цифровые двойники и извлекать из них максимальную выгоду, что, в свою очередь, будет способствовать повышению их конкурентоспособности на мировом рынке.

**Заключение. 1.** Определены ключевые аспекты, связанные с использованием цифровых двойников в машиностроении. Полученные результаты подчеркивают важность интеграции цифровых технологий в проектирование, производство и эксплуатацию оборудования. В частности, установлено, что использование цифровых двойников позволяет существенно сократить сроки разработки новых продуктов и повысить их качество. Это, в свою очередь, способствует снижению издержек и повышению конкурентоспособности предприятий на рынке. **2.** Перспективы дальнейших исследований в области цифровых двойников связаны с совершенствованием алгоритмов анализа и моделирования, а также интеграцией технологий искусственного интеллекта для оптимизации процессов. При этом важно изучать влияние новых материалов и технологий на эффективность цифровых двойников, а также разрабатывать стандарты и методики создания и внедрения цифровых моделей, что позволит повысить их универсальность и адаптивность к различным производственным условиям. Применение методов диффузии для управления процессами также требует дальнейших исследований, включая анализ данных через регулярные промежутки времени и оценку параметров диффузии.

**Финансирование работы.** Исследование выполнено в рамках работы по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта на реализацию крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-527 от 23.04.2024.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пирогов В. В., Рагуткин А. В., Сидоров М. И., Ставровский М. Е.* Некоторые аспекты создания и согласования цифровых двойников изделий и производства // *Технология машиностроения*. 2020. № 4. С. 54.
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.  
<https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827>
3. *Никищечкин П. А., Долгов В. А., Григорьев С. Н.* Разработка типовых архитектур цифровых двойников производственно-логистических систем машиностроительных предприятий на разных стадиях их жизненного цикла // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2023. № 5 (758). С. 37.  
<https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-5-37-48>

4. *Fernandez-Canteli A., Castillo E., Blason S.* A methodology for phenomenological analysis of cumulative damage processes: Application to fatigue and fracture phenomena // *Int. J. of Fatigue.* 2009. V. 31. P. 1031.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106311>
5. *Гумеров М. Ф.* Феноменологическая модель проблемной области принятия решения в организационном управлении // *Инновации и инвестиции.* 2017. № 1. С. 119.
6. *Прохоров А., Лысачев М., Боровков А.* Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: Альянс Принт, 2020. 401 с.
7. *Хитрых Д. П.* Цифровой двойник: концепция, уровни, связь с Интернетом вещей и роль численного и системного моделирования // *САПР и графика.* 2020. № 7 (285). С. 8.
8. *Павлов С. В.* Классификация феноменологических моделей фазовых переходов методами эквивариантной теории катастроф: модели с  $L = C_{nv}$  ( $n = 3, 4, 6$ ) // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика и астрономия.* 2016. № 5. С. 37.
9. *Павлов С. В.* Феноменологические модели фазовых переходов с многокомпонентными взаимодействующими параметрами порядка: построение и классификация методами теории особенностей // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика и астрономия.* 2019. № 6. С. 243.  
<https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2430501>
10. *Крыжевич Г. Б., Филатов А. Р.* Модель упругопластического деформирования алюминиевых сплавов и критерии малоциклового усталости конструкций // *Труды Крыловского государственного научного центра.* 2018. № S2. С. 85.  
<https://doi.org/10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-85-95>
11. *Ghat M., Mehtedi M., Ciccarelli D., Paoletti C., Spigarelli S.* High temperature deformation of IN718 super alloy: use of basic creep modelling in the study of Nickel and single-phase Ni-based super alloys // *Materials at High Temperatures.* 2018. V. 36. P. 58.  
<https://doi.org/10.1080/09603409.2018.1456508>
12. *Jia L., Koyama T., Kuwamura H.* Prediction of cyclic large plasticity for prestrained structural steel using only tensile coupon tests // *Frontiers of Structural and Civil Engineering.* 2013. V. 7 (4). P. 466.  
<https://doi.org/10.1007/s11709-013-0219-5>
13. *Федоренков Д. И., Косов Д. А.* Реализация модели поврежденности Lemaitre с кинематическим упрочнением в конечно-элементном комплексе ANSYS // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.* 2022. № 2. С. 147.  
<https://doi.org/10.15593/perm.mech/2022.2.12>
14. *Крюков М. В., Ерофеев М. Н., Кравченко И. Н.* Моделирование технологических параметров и режимов FDM-технологии и свойств изделий с помощью искусственного интеллекта // *Моделирование синтеза и разрушения материалов.* Минск: Беларуская навука, 2024. С. 212.
15. *Сидоров М. И., Ставровский М. Е., Кравченко И. Н., Сидоров И. М., Постникова Е. С.* К вопросу о кинетическом подходе в моделировании процессов разрушения материалов // *Все материалы. Энциклопедический справочник.* 2024. № 2. С. 2.  
<https://doi.org/10.31044/1994-6260-2024-0-2-2-9>
16. *Chaboche J. L.* Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity // *Int. J. of Plasticity.* 1989. V. 5 (3). P. 247.  
[https://doi.org/10.1016/0749-6419\(89\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0749-6419(89)90015-6)
17. *Chaboche J. L., Kanouté P., Azzouz F.* Cyclic inelastic constitutive equations and their impact on the fatigue life predictions // *Int. J. of Plasticity.* 2012. V. 35. P. 44.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.01.010>