

МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 531; 004.8

С.С. ЩЕРБАКОВ, д-р физ.-мат. наук, проф.

заместитель Председателя Президиума¹

главный научный сотрудник²

E-mail: sherbakovssr@yandex.by

¹Национальная академия наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 30.09.2025.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ МЕХАНИКИ ИЗНОСОУСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ

На примере ряда технических систем ответственного назначения, изучаемых в трибофатике, рассмотрены технологии искусственного интеллекта в сравнении с математическим моделированием. Предлагается прикладное определение искусственного интеллекта как технической автоматизированной системы, а не набора конкретных технологий. Представлена трибофатическая методология последовательной постановки и решения задач взаимодействия системы многих тел с неизвестными заранее поверхностями контакта, определения и прогнозирования их трехмерного напряженно-деформированного состояния, состояния объемной повреждаемости и многокритериальных предельных состояний с учетом ее одновременного сложного термосилового нагружения контактными и неконтактными усилиями. Это позволило создать многоэлементные цифровые двойники ряда технических систем ответственного назначения, применяемые для оптимизации данных систем по повреждаемости и поддержки принятия управленческих решений. Предложен единый подход к применению искусственных нейронных сетей и математического моделирования в интеллектуальных моделях трибофатических и механотермодинамических систем. Показан положительный прямой эффект искусственных нейронных сетей на аппроксимацию результатов математического моделирования и обратный эффект от качественных данных, полученных в результате математического моделирования, на искусственные нейронные сети.

Ключевые слова: трибофатика, искусственный интеллект, математическое моделирование, искусственные нейронные сети, механотермодинамика

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-66-75>

Введение. Почти 40 лет назад появились первые публикации [1–3], в которых были изложены методологические основы нового научного направления в механике — трибофатики. Автором этих публикаций был ученый-механик Леонид Сосновский, в то время доцент Белорусского института инженеров железнодорожного транспорта в г. Гомеле (рисунок 1). В этом году профессору Сосновскому исполнилось бы 90 лет.

Конечно, этому событию предшествовали многие годы исследований, постановка и реали-

зация собственных экспериментов, обсуждение новых результатов и идей с известными учеными. Выступая на первом международном симпозиуме по трибофатике, который состоялся в 1993 году в Гомеле, Л.А. Сосновский вспоминал [4], что для обмена мнениями у него был небольшой список академиков и членов-корреспондентов, среди которых был вице-президент Академии наук СССР, директор Института машиноведения Константин Фролов, до которого с большим трудом удалось дозвониться и кратко изложить свои идеи, после



Рисунок 1 — Основатель трибофатики Леонид Адамович Сосновский, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники
Figure 1 — Leonid A. Sosnovskiy, founder of tribo-fatigue, D. Sc. in Eng., Prof., Honored Scientist of the Republic of Belarus, Laureate of the State Prize of Ukraine in the field of science and technology

чего автор был приглашен на встречу в Москву. Результатом той судьбоносной беседы с выдающимся ученым и стало появление трибофатики — академик Фролов систематизировал и обобщил результаты исследований и новые идеи, а чуть позже одобрил название нового научного направления.

Быстрое развитие нового направления в механике можно объяснить, вероятно, двумя причинами. Первая — это запросы практики машиностроения. Вторая, как следствие первой, — понимание важности задачи и поддержка известных ученых и инженеров.

На первом симпозиуме по трибофатике академик Константин Фролов признал научный приоритет Беларуси в новой и перспективной области исследований. Академик Академии наук БССР, главный конструктор ПО «БелавтоМАЗ» Михаил Высоцкий говорил: «...большая наука делается в Гомеле... С инженерной точки зрения новый подход базируется на изучении взаимодействия элементов механических систем. Именно это взаимодействие и определяет в конечном счете надежность как узлов, так и машины в целом. Это значит, что мы уходим от традиционного расчета отдельных деталей и переходим к расчету и конструированию механических систем». Его поддержал академик НАН Украины, директор Института проблем прочности им. Г.С. Писаренка НАН Украины Валерий Троценко: «...новая наука,

трибофатика... позволит правильно конструировать ответственные узлы машин и сооружений». Член-корреспондент РАН, заведующий отделом прочности, ресурса и безопасности Института машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН Николай Махутов высказал такое мнение: «...трибофатика, как наука, по всей видимости, займет свое место в одном из новых направлений, которым занимается сегодня и Российская академия наук, и академии наук других государств... Это направление включает: теорию, физику, химию, механику катастроф, безопасность и методы защиты <...> от техногенных аварий и катастроф» [4].

Так что же такое трибофатика? Схематично на этот вопрос отвечает эмблема трибофатики, изображенная на рисунке 2. А в соответствии с межгосударственным терминологическим стандартом ГОСТ 30638-99 «Трибофатика. Термины и определения» трибофатика — это наука об износоусталостных повреждениях и разрушении силовых систем машин и оборудования. При этом стандарт определяет силовую (трибофатическую) систему как механическую, в которой реализуется процесс трения в любых его проявлениях и которая одновременно воспринимает и транзитно передает повторно-переменную нагрузку. Износоусталостным называют повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений усталости, трения в любых его проявлениях, изнашивания и (или) эрозии.

Трибофатическая бомба. В 80-х годах XX века в Советском Союзе было принято решение провести модернизацию Костромской тепловой электростанции, увеличив мощность до 1200 МВт. Это должен был стать большой шаг вперед, так как в то время действующие в Союзе электростанции обладали лишь половиной такой мощности. В США подобные мощные электростанции уже были, но их развитие шло постепенно: 300, 500, 600, 800 МВт. Было принято решение в Костроме



Рисунок 2 — Эмблема трибофатики
Figure 2 — Tribo-fatigue emblem

пропустить промежуточные этапы. Был построен специальный турбогенератор диаметром около 1 м и длиной 23 м (рисунок 3 а).

Строили его два года. Планировалось, что до капитального ремонта турбогенератор будет работать 25 лет, но уже через 4 месяца он был выведен из эксплуатации из-за интенсивного трещинообразования. Ремонту он не подлежал, и пришлось еще длительное время изготавливать новый турбогенератор. В это время сотрудники оставались без работы, экономические потери были огромны.

Что же произошло? Взорвалась так называемая трибофатическая бомба.

Почему она взорвалась? Специальная государственная комиссия, расследовавшая причины катастрофы, показала, что трещины начали появляться в неожиданном месте: на краях вентиляционного отверстия на поверхности вала турбогенератора. Эта область считалась практически ненагруженной, поскольку контактное давление

между вентиляционным клапаном и краями вентиляционного отверстия было очень малым.

Оказалось, что взаимодействие малых локальных контактных напряжений и малых усталостных напряжений вследствие объемного циклического деформирования привело к взрывному росту повреждений в условиях так называемой фреттинг-усталости.

Обратимся к другому примеру катастрофического повреждения.

В справочниках для железнодорожного транспорта известно более сотни специфических повреждений рельсов: трещины, сколы, износ различной формы. Однако в этих справочниках нет резкого изгиба рельса и его разрушения на мелкие части, как показано на рисунке 3 б. А ведь именно такие катастрофические повреждения могут привести не только к большим экономическим, но и к человеческим потерям.

Для прогнозирования такого явления недостаточно было обычных механико-математических моделей, основанных на сложении или суперпозиции напряжений — необходимо было разработать новые, которые позволяли бы прогнозировать наступление катастрофических повреждений при малых нагрузках и напряжениях.

Могли бы в этом деле помочь современные технологии искусственного интеллекта (ИИ) в том виде, как мы их понимаем: искусственные нейронные сети (ИНС), распознавание образов, глубокое обучение? Скорее всего, они оказались бы мало полезными, поскольку данные катастрофические явления редки и ИНС для их предсказания не на чем было бы обучать.

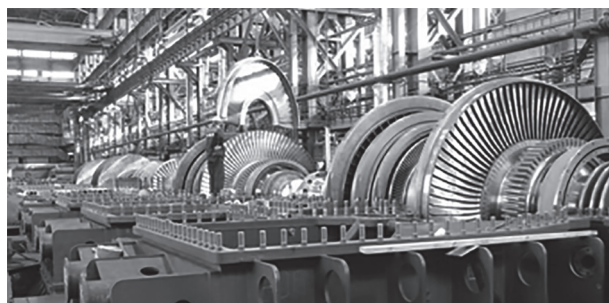
Для того, чтобы прогнозировать подобные явления, нужны также особые модели и технологии, позволяющие дать необходимые практические рекомендации.

Прикладное определение ИИ. Начнем обсуждение этих моделей и технологий с прикладного определения ИИ, с помощью которого сможем сформулировать требования к этим моделям.

Под ИИ предлагается понимать техническую автоматизированную систему, способную решать хотя бы одну из следующих задач:

- сбор данных;
- их анализ;
- синтез новой информации;
- принятие решения;
- выполнение решения, имитируя работу человеческого интеллекта и/или используя математическое моделирование, основанное на физических принципах.

Это определение отличается от традиционных отсутствием воспроизведения только лишь человеческих возможностей — они могут быть заменены на возможности математического моделирования. И как техническое зрение воспроизводит возможности человеческого зрения, так и ИНС



а



б

Рисунок 3 — Пример мощного турбогенератора (а) и катастрофического разрушения рельсов (б)
Figure 3 — Example of a powerful turbo generator (а) and catastrophic destruction of rails (b)

могут в качестве основы для прогнозирования использовать данные численных экспериментов, основанных на применении физически обоснованных математических моделей.

Необходимые условия безопасного применения ИИ. Данное определение ИИ как технической автоматизированной системы позволяет сформулировать следующие необходимые условия ее безопасного применения:

- ИИ может быть приведен в действие только человеком;
- человек может в любой момент прекратить действие ИИ;
- ИИ прекращает действие автоматически, если достигнут определенный срок данного действия или возникшая в нем неисправность требует его отключения;
- у ИИ должна отсутствовать возможность воздействия на системы приведения и прекращения его действия.

Принятие данного определения и условий даст возможность, например, решить задачу установления ответственного лица при совершении беспилотным транспортным средством наезда на пешехода и, следовательно, допустить данный транспорт к участию в дорожном движении. В соответствии с первым условием таким лицом будет тот, кто инициировал движение (привел в действие) беспилотного транспортного средства.

Следует отметить, что предлагаемые условия являются необходимыми, но недостаточными для безопасного применения ИИ. Достаточные условия безопасного применения ИИ должны быть обеспечены соответствующими техническими и/или организационными средствами в каждом конкретном случае его применения.

Методология трибофатики. Рассмотрим некоторые примеры соответствия данному выше определению ИИ. На рисунке 4 показан ряд систем ответственного назначения: «колесо — рельс», «шина — асфальтобетон», «поток нефти — участок нефтепровода», режущий инструмент сельскохозяйственного комбайна и даже биомеханическая система зубочелюстного аппарата человека.

На первый взгляд эти системы ничем не связаны. Однако все они объединены тем, что состоят минимум из двух взаимодействующих по некоторой площадке контакта тел, по крайней мере одно из которых испытывает неконтактное объемное деформирование: растяжение—сжатие, изгиб или кручение.

Для работы с такими сложными системами профессором Леонидом Сосновским в Беларуси было создано новое научное направление, получившее название трибофатика (рисунок 5). Трибофатика изучает износоусталостные повреждения и отказы силовых систем машин и компонентов. В свою очередь, под силовой системой подразумевается механическая система, в которой одновременно реализуется процесс трения в любом его проявлении и неконтактная переменная нагрузка [5–12].

Для обеспечения эффективной работы интегрального качества рассмотренных систем ответственного назначения была создана соответствующая методология последовательной постановки и решения задач путем разработки и применения соответствующих интеллектуальных моделей (рисунк 6) [13].

Проведем сравнение данной методологии с предложенным прикладным определением ИИ:

- сбор данных — модель взаимодействия многих деформируемых тел при комплексном нагружении;

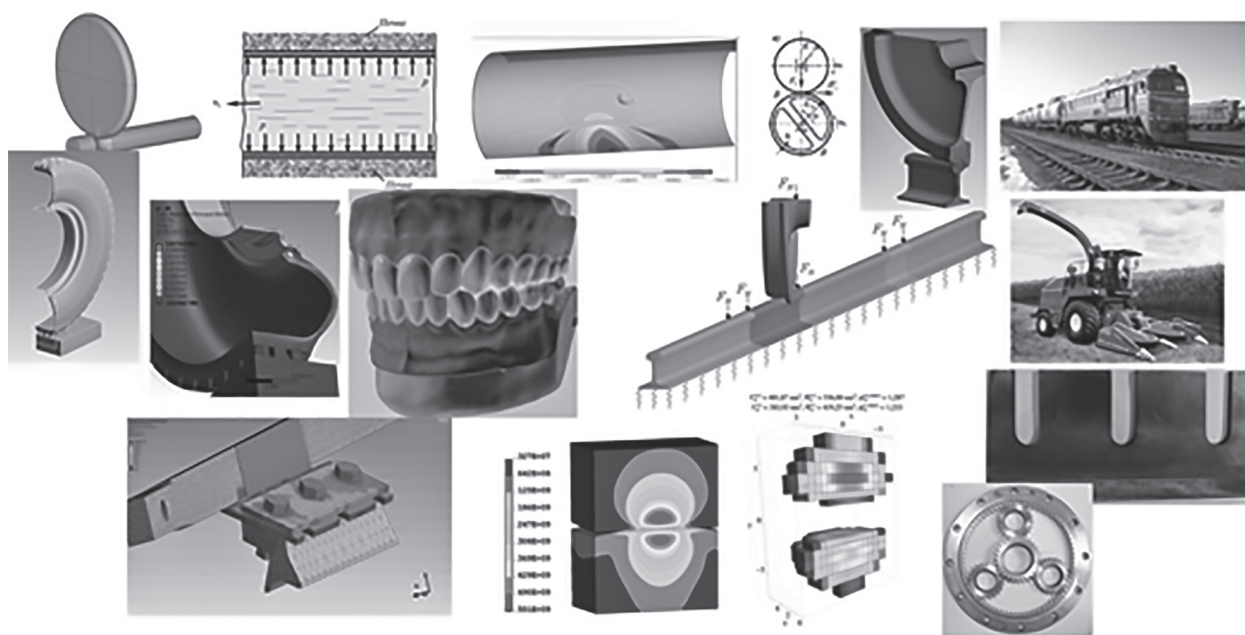


Рисунок 4 — Многоэлементные трибофатigue системы
Figure 4 — Multi-element tribo-fatigue systems

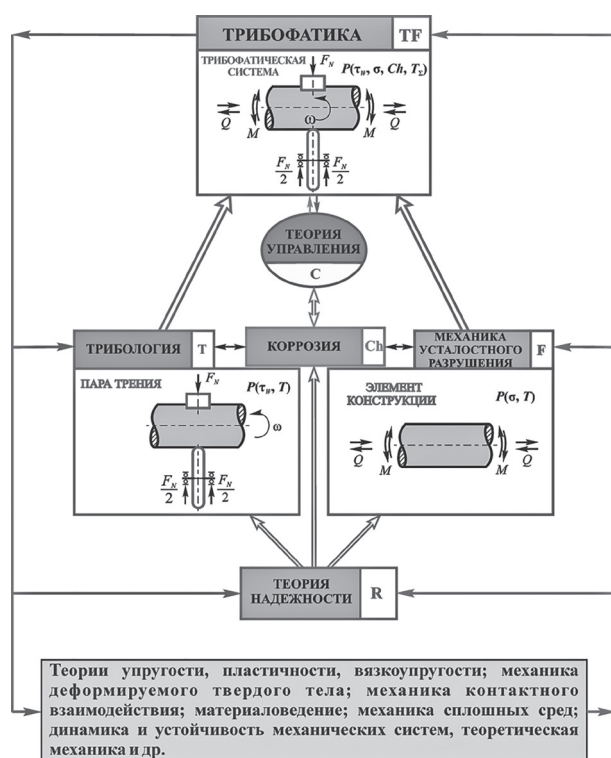


Рисунок 5 — Трибофатика как комплексная дисциплина
Figure 5 — Tribo-fatigue as a complex discipline

- анализ информации — модель совмещенного трехмерного напряженно-деформированного состояния;
- синтез новой информации — модель объемной повреждаемости, прогнозирования рисков;
- принятие решения — модель предельных состояний.

Рассмотрим подробнее три из наиболее значимых интеллектуальных моделей трибофатики.

Первая — это операторная модель для многих взаимодействующих деформируемых тел с изначально неизвестными контактными поверхностями. Вторая — это модель напряженно-деформированного состояния, учитывающая не только контактное взаимодействие между телами, но и неконтактное деформирование хотя бы одного из них, как это показано на расчетной схеме. Также была разработана особая модель деформируемого твердого тела с опасным объемом. Она дает возможность оценить повреждаемость тела не по одной его наиболее опасной точке, как это принято в сопротивлении материалов, а по множеству точек или элементарных объемов, в которых действующие напряжения превышают предельные. Это позволяет интегрально оценить повреждаемость как отдельного тела, так и их системы.

На основании данных моделей было разработано соответствующее программное обеспечение с применением метода граничных элементов. С помощью этого программного обеспечения были решены не только основные задачи, такие как, например, изгиб балки или вдавливание штампа, но и рассчитаны сложные системы, такие как труба нефтепровода с внутренними коррозионными повреждениями и многоэлементный режущий инструмент сельскохозяйственного комбайна.

Совместное применение ИНС и математического моделирования. Рассмотрим особую задачу применения ИНС — влияние на напряженно-деформированное состояние внутренних коррозионных повреждений в нефтепроводных трубах,



Рисунок 6 — Методология последовательной постановки и решения задач трибофатики
Figure 6 — Methodology of consistent formulation and solution of tribo-fatigue problems

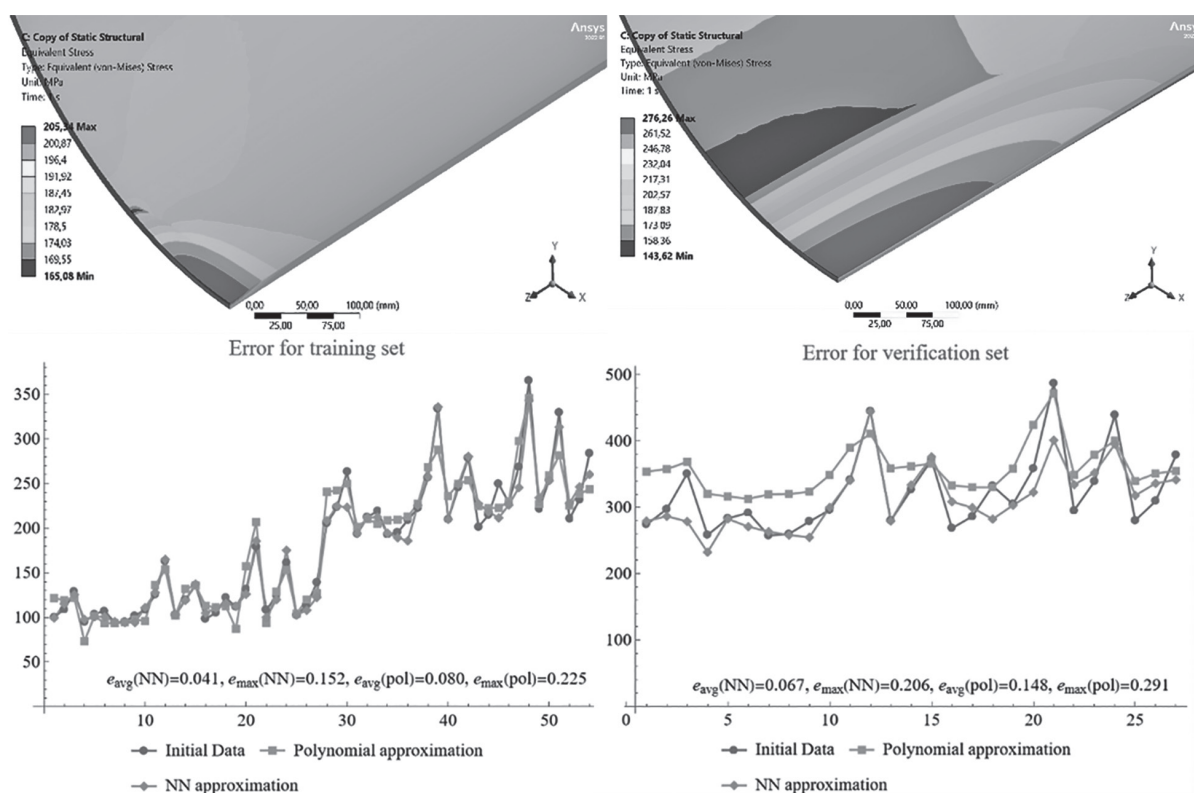


Рисунок 7 — К применению нейронных сетей для прогнозирования максимальных напряжений в окрестности коррозионных повреждений в магистральном трубопроводе
Figure 7 — Towards the application of neural networks for predicting maximum stresses in the vicinity of corrosion damage in the main pipeline

бывших в длительной эксплуатации более 30 лет (рисунок 7).

Была проведена серия из нескольких десятков численных экспериментов для различных значений внутритрубного давления, глубины повреждения, его длины и ширины [14].

В инженерной практике проведение таких расчетов на системной основе, конечно, затруднительно, поэтому для построения автоматизированной системы поддержки принятия решения по ремонту или замене труб была построена аппроксимация полученных расчетных данных с помощью как ИНС, так и полинома на основе метода наименьших квадратов.

Оказалось, что для решения задачи интерполяции между расчетными точками внутри границ численного эксперимента в целом подходят оба метода. Аппроксимация интенсивности напряжений с помощью нейронной сети и полинома имеют погрешности около 4,1 и 8 % соответственно. Однако для решения задачи экстраполяции за границей данных численного эксперимента лучше подходит ИНС: ее погрешность (около 6,7 %) примерно вдвое меньше, чем у полиномиальной аппроксимации (около 14,8 %). Это важное заключение о большом потенциале применения ИНС, позволяющей за счет своей многослойной архитектуры учитывать сложные нелинейные эффекты.

Данные результаты позволяют прогнозировать напряженно-деформированное состояние для

сложной конфигурации коррозионных повреждений, полученной методами внутритрубной диагностики. Такой прогноз становится основой для принятия технологических решений.

Рассмотрим другой пример построения аппроксимирующей модели, в которой проявляется положительный эффект иерархической структуры, на основе механических экспериментов.

Например, попытки построить явную температурную зависимость предельных напряжений в равномерных, полулогарифмических и логарифмических координатах для разных материалов и условий испытания оказались неэффективны, как показано на рисунке 8, для относительно небольшого количества результатов испытаний (136).

Для построения моделей подобных механотермодинамических (МТД) систем [15] с высокой прогнозной способностью необходимо было учесть, что потоки эффективной энергии (энтропии), приводящие к появлению первичных повреждений и обусловленные источниками разной природы, при необратимых изменениях в системе не суммируются — они сложным образом взаимодействуют.

Было введено понятие взаимодействий — развития (накопления) в элементах системы внутренних повреждений, определяемых единством и борьбой противоположных процессов физического упрочнения-разупрочнения. Поэтому функции взаимодействий должны принимать три класса значений: $\Lambda > 1$, $\Lambda = 1$, $\Lambda < 1$.

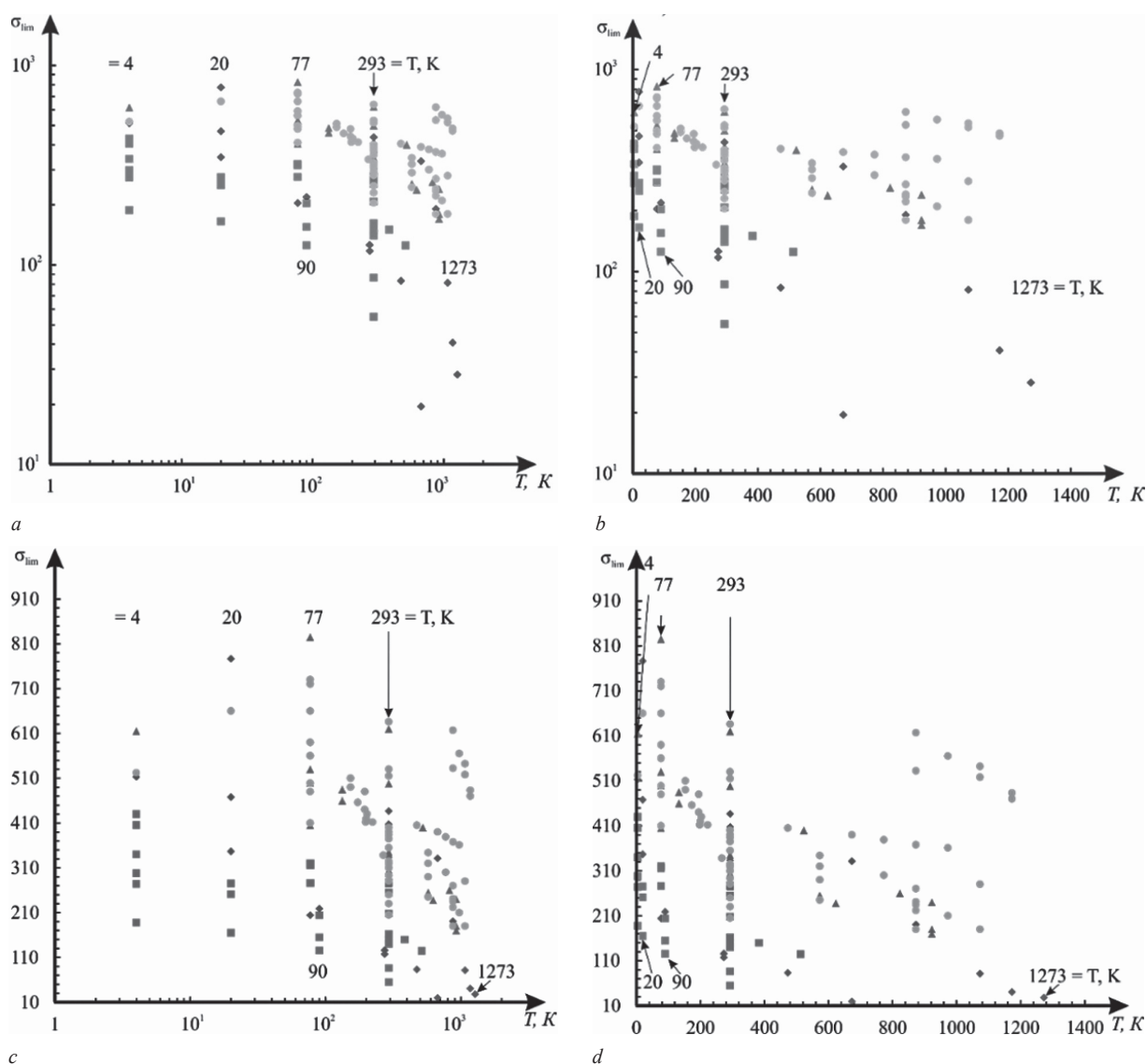


Рисунок 8 — Попытки построения явных зависимостей предела выносливости от температуры для металлических материалов в логарифмических (a), полулогарифмических (b) и (c), равномерных (d) координатах

Figure 8 — Attempts to construct explicit dependences of the endurance limit on temperature for metallic materials in logarithmic (a), semi-logarithmic (b) and (c), uniform (d) coordinates

Пусть факторы, генерирующие в МТД-системе повреждения, соответствуют термодинамическому T и механическому M (объемному σ и поверхностному (фрикционному) τ) нагружениям. Тогда простейшее выражение для определения эффективной энергии имеет вид:

$$U_{\Sigma}^{eff} = \left[(U_{\sigma}^{eff} + U_{\tau}^{eff}) \Lambda_{\sigma/\tau} + U_T^{eff} \right] \Lambda_{T \setminus M}. \quad (1)$$

Структура (1) существенно иерархическая: сначала определяется эффективная энергия при взаимодействии силовой σ и фрикционной τ ее составляющих, затем — при взаимодействии механической M и тепловой T . Данную структуру можно представить в виде графа (рисунок 9 a) или соответствующего ему гиперграфа (см. рисунок 9 b).

Важнейшей особенностью МТД-модели является учет предельного состояния, например, при

наступлении пластичности или усталостном разрушении:

$$U_{\Sigma}^{eff} = U_0, \quad (2)$$

где предельная плотность внутренней энергии U_0 трактуется как начальная энергия активации процесса разрушения.

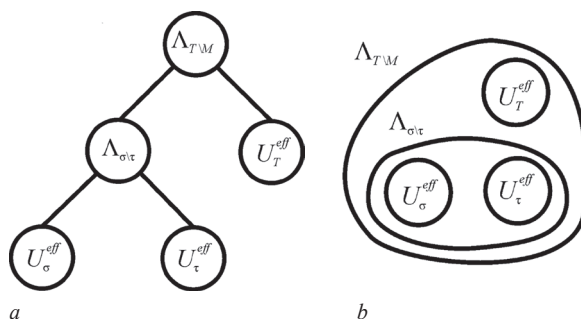


Рисунок 9 — Схема энергетического взаимодействия

Figure 9 — Scheme of energy interaction

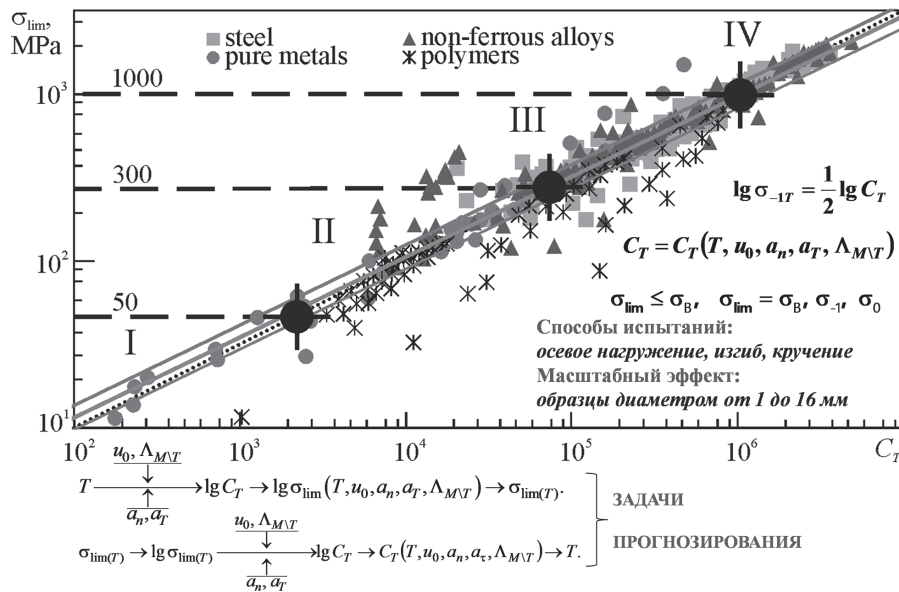


Рисунок 10 — Фундаментальная МТД-функция предельных состояний различных современных материалов
Figure 10 — Fundamental mechanothermodynamic function of the limit states of various modern materials

Модель МТД-системы (1)–(2) позволяет учесть силовые, температурные и фрикционные нагрузки и описать отказы элементов системы по разным признакам критического состояния: объемному разрушению — разделению на части; поверхностному разрушению — предельному износу. В частном случае термосилового нагружения (рисунок 10) данная модель показала хорошее соответствие 600 данным экспериментов с высоким (более 0,722) коэффициентом корреляции.

Таким образом, можно выделить два основных эффекта взаимодействия ИНС и физически обоснованных математических моделей, результатов физических экспериментов.

Прямой эффект (для моделирования): ИНС за счет своей многонейронной и многослойной структуры способны выбрать наилучшую аппроксимацию искомой модели и учесть существенно нелинейный характер последней, обеспечивая значительно лучшую, чем традиционные подходы (например, полиномиальная аппроксимация), интерполяцию и экстраполяцию экспериментальных данных.

Обратный эффект (для ИНС): результаты цифрового моделирования на основе физических принципов, экспериментов являются очищенными, хорошо структурированными данными для обучения ИНС, позволяющими сократить объем обучающей выборки и упростить архитектуру сети.

Заключение. Представлено и сопоставлено применение технологий ИИ с математическим моделированием на примере трибофатической бомбы и ряда критически важных технических систем, изучаемых в трибофатике, таких как «колесо — рельс», «шина — асфальтобетон», участок нефтепровода, режущий инструмент сельскохозяйственного комбайна и даже зубная система человека.

Даны прикладное определение ИИ как технической автоматизированной системы и необходимые условия его безопасного применения с целью расширения исследований и разработок в области ИИ и внедрения соответствующих технологий в экономику.

Представлены прямой и обратный эффекты взаимодействия ИНС с физически обоснованными математическими моделями и результатами физических экспериментов.

Работа выполнена при поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований (проекты № T23PHФ-125, T24СП6Г-003).

Список литературы

1. Сосновский, Л.А. О комплексной оценке надежности силовых систем / Л.А. Сосновский // Пути повышения технического уровня и надежности машин: тез. докл. Респ. науч.-техн. конф., Минск, 20–21 нояб. 1986 г. — Минск, 1986. — С. 29.
2. Сосновский, Л.А. Надежность и долговечность элементов силового металлополимерного трибосопряжения в процессе износоусталостных испытаний / Л.А. Сосновский // Надежность и долговечность машин и сооружений. — 1986. — № 9. — С. 93–102.
3. Сосновский, Л.А. Комплексная оценка надежности силовых систем по критериям сопротивления усталости и износоустойчивости (основы трибофатики): учеб.-метод. пособие / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелИИЖТ, 1988. — 56 с.
4. Слово о трибофатике: сборник / ред.-сост. А.В. Богданович. — Гомель; Минск; М.; Киев: Remika, 1996. — 132 с.
5. Щербаков, С.С. Математическое моделирование и вычислительная механика: потенциал для роста наукоемкой экономики / С.С. Щербаков // Наука и инновации. — 2019. — № 1(191). — С. 45–53.
6. Сосновский, Л.А. Основы трибофатики: учеб. пособие: в 2 т. / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2003. — Т. 1. — 246 с.; Т. 2. — 234 с.
7. Sosnovskiy, L.A. Tribo-fatigue: wear-fatigue damage and its prediction / L.A. Sosnovskiy. — Berlin: Springer, 2005. — 424 p. — DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-27027-0>.
8. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 434 с.

9. Щербаков, С.С. Механика трибофатических систем: моногр. / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский. — Минск: БГУ, 2011. — 407 с.
10. Sherbakov, S.S. On the development of tribo-fatigue as the new section of mechanics / S.S. Sherbakov, C. Basaran // International Journal of Materials and Structural Integrity. — 2021. — Vol. 14, no. 2–4. — P. 142–163. — DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMSI.2021.10050851>.
11. Sosnovskiy, L.A. New cast iron Monica loses its brittleness with increasing strength / L.A. Sosnovskiy, S.S. Sherbakov // International Journal Materials and Structural Integrity. — 2023. — Vol. 15, no. 1. — P. 24–41. — DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMSI.2023.135888>.
12. From fatigue and tribology to tribo-fatigue / L.A. Sosnovskiy, S.S. Sherbakov, M.M. Khonsari, A.V. Bogdanovich // International Journal of Materials and Structural Integrity. — 2021. — Vol. 14, no. 2–4. — P. 164–237. — DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMSI.2021.125815>.
13. Журавков, М. Технологии искусственного интеллекта: системы компьютерного моделирования в прикладных исследованиях / М. Журавков, С. Босяков, С. Щербаков // Наука и инновации. — 2023. — № 4(242). — С. 43–51.
14. Prediction of threshold von-mises stress distribution of the sections of oil pipeline steel with internal corrosion defects using finite element analysis / S. Sherbakov, D. Podgayskaya, P. Kumar [et al.] // Engineering Solid Mechanics. — 2025. — Vol. 13, no. 3. — P. 299–316. — DOI: <https://doi.org/10.5267/j.esm.2025.2.001>.
15. Сосновский, Л.А. Принципы механотермодинамики / Л.А. Сосновский, С.С. Щербаков. — Гомель: БелГУТ, 2013. — 150 с.

SHERBAKOV Sergei S., D. Sc. in Phys. and Math., Prof.

Deputy Chairman of the Presidium¹

Chief Researcher²

E-mail: sherbakovssr@yandex.by

¹National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received September 30, 2025.

INTELLIGENT MODELS OF WEAR-FATIGUE DAMAGE AND FRACTURE MECHANICS

Artificial intelligence technologies are considered in comparison with mathematical modeling using the examples of a number of critical purpose technical systems studied in tribo-fatigue. An applied definition of artificial intelligence as a technical automated system rather than a set of specific technologies is proposed. Tribo-fatigue methodology is presented for the consistent formulation and solution of interaction problems of a system with many bodies with previously unknown contact surfaces, determination and prediction of their three-dimensional stress-strain state, volumetric damage state and multi-criteria limiting states taking into account its simultaneous complex thermal-force loading by contact and non-contact forces. This made it possible to create multi-element digital twins of a number of technical systems of critical purpose, used to optimize these systems for damage and support management decisions. Unified approach is proposed to application of artificial neural networks and mathematical modeling in intelligent models of tribo-fatigue and mechanothermodynamic systems. Beneficial direct effect of artificial neural networks on approximation of mathematical modeling results and opposite effect of good quality data produced by mathematical modeling on artificial neural networks are shown.

Keywords: tribo-fatigue, artificial intelligence, mathematical modeling, artificial neural networks, mechanothermodynamics

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-66-75>

References

1. Sosnovskiy L.A. O kompleksnoy otsenke nadezhnosti silovyykh sistem [On the comprehensive assessment of the reliability of active systems]. *Tezisy dokladov Respublikanskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Puti povysheniya tekhnicheskogo urovnya i nadezhnosti mashin"* [Abstracts of papers of the Republican scientific and technical conference "Ways to improve the technical level and reliability of machines"]. Minsk, 1986, p. 29 (in Russ.).
2. Sosnovskiy L.A. Nadezhnost i dolgovechnost elementov silovogo metallopolimernogo tribosopryazheniya v protsesse iznosostalostnykh ispytaniy [Reliability and durability of elements of power metal-polymer tribocoupling in the process of wear-fatigue tests]. *Nadezhnost i dolgovechnost mashin i sooruzheniy*, 1986, no. 9, pp. 93–102 (in Russ.).
3. Sosnovskiy L.A. *Kompleksnaya otsenka nadezhnosti silovyykh sistem po kriteriyam soprotivleniya ustalosti i iznosostoykosti (osnovy tribofatiki)* [Comprehensive assessment of the reliability of active systems based on fatigue and wear resistance criteria (fundamentals of tribo-fatigue)]. Gomel, Belorusskiy institut

- inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta Publ., 1988. 56 p. (in Russ.).
4. Bogdanovich A.V. *Slovo o tribofatike* [A word about tribo-fatigue]. Gomel, Minsk, Moscow, Kiev, Remika, 1996. 132 p. (in Russ.).
 5. Sherbakov S.S. Matematicheskoe modelirovanie i vychislitel'naya mekhanika: potentsial dlya rosta naukoemkoy ekonomiki [Mathematical modeling and computational mechanics: potential for growth of knowledge-intensive economy]. *Science and innovations*, 2019, no. 1(191), pp. 45–53 (in Russ.).
 6. Sosnovskiy L.A. *Osnovy tribofatiki* [Fundamentals of tribo-fatigue]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2003. Vol. 1, 246 p.; vol. 2, 234 p. (in Russ.).
 7. Sosnovskiy L.A. *Tribo-fatigue. Wear-fatigue damage and its prediction*. Berlin, Springer, 2005. 424 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-27027-0>.
 8. Sosnovskiy L.A. *Mekhanika iznosoustalostnogo povrezhdeniya* [Mechanics of wear-fatigue damage]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2007. 434 p. (in Russ.).
 9. Sherbakov S.S., Sosnovskiy L.A., *Mekhanika tribofaticheskikh sistem* [Mechanics of tribo-fatigue systems]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2011. 407 p. (in Russ.).
 10. Sherbakov S.S., Basaran C. On the development of tribo-fatigue as the new section of mechanics. *International journal of materials and structural integrity*, 2021, vol. 14, no. 2–4, pp. 142–163. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMSI.2021.10050851>.
 11. Sosnovskiy L.A., Sherbakov S.S. New cast iron Monica loses its brittleness with increasing strength. *International journal of materials and structural integrity*, 2024, vol. 15, no. 1, pp. 24–41. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMSI.2023.135888>.
 12. Sosnovskiy L.A., Sherbakov S.S., Khonsari M.M., Bogdanovich A.V. From fatigue and tribology to tribo-fatigue. *International journal of materials and structural integrity*, 2021, vol. 14, no. 2–4, pp. 164–237. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMSI.2021.125815>.
 13. Zhuravkov M., Bosyakov S., Sherbakov S. Tekhnologii iskusstvennogo intellekta: sistemy kompyuternogo modelirovaniya v prikladnykh issledovaniyakh [Artificial intelligence technologies: computer modeling systems in applied research]. *Science and innovations*, 2023, no. 4(242), pp. 43–51 (in Russ.).
 14. Sherbakov S., et al. Prediction of threshold von-mises stress distribution of the sections of oil pipeline steel with internal corrosion defects using finite element analysis. *Engineering solid mechanics*, 2025, vol. 13, no. 3, pp. 299–316. DOI: <https://doi.org/10.5267/j.esm.2025.2.001>.
 15. Sosnovskiy L.A., Sherbakov S.S. *Printsipy mekhanotermodinamiki* [Principles of mechanothermodynamics]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2013. 150 p. (in Russ.).