Вестник научно-технического развития
Bulletin of Science and Technical Development

Номер 177, 2025г.

DOI: 10.18411/vntr2025-177



Издается с 2007 года

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.

ISSN 2070-6847

Журнал выпускается под научным руководством Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН

DOI: 10.18411/vntr2025-177

ОГЛАВЛЕНИЕ № 177, 2025

Ольга Юрьевна Волкова, Николай Алексеевич Татусь. Современные методы определения характеристик волокон (обзор)..…….. **стр. 3 – 14**

Алла Григорьевна Дегтярева, Ольга Михайловна Жигалина. Изменение структуры свойств технического железа деформирующим резанием..……..**стр. 15 – 20**

Владимир Исаакович Ивлев. Математические модели переходных процессов в термомодуле Пельтье……...……..**стр. 21 – 28**

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.


СВИДЕТЕЛЬСТВО
О РЕГИСТРАЦИИ СРЕДСТВА МАССОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

ISSN 2070-6847

DOI: 10.18411/vntr2025-177-1

УДК 691.175.5/.8

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОН

© Ольга Юрьевна Волкова, Николай Алексеевич Татусь
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
sklemina97@yandex.ru

Аннотация. *Настоящая статья посвящена современным методам определения характеристик волокон, применяемым как зарубежными, так и российскими исследователями. Волокна являются ключевым элементом в составе композитных материалов, и их характеристики напрямую влияют на прочностные и эксплуатационные свойства конструкций. Целью статьи является систематизация информации о существующих подходах и методах определения характеристик волокон, используемых в различных областях науки и техники.*
Ключевые слова: *волокна, композиты, механические свойства, методы испытаний, микроструктура, армирующие элементы, цифровой анализ.*

MODERN METHODS OF FIBER CHARACTERIZATION

Olga Volkova, Nikolay Tatus'
Mechanical Engineering Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
sklemina97@yandex.ru

Abstract. *This article is devoted to modern methods of fiber characterization used by both foreign and Russian researchers. Fibers are a key element in the composition of composite materials, and their characteristics directly affect the strength and performance properties of structures. The purpose of this paper is to systematize information on existing approaches and methods of fiber characterization used in various fields of science and technology.*
Key words: *fibers, composites, mechanical properties, test methods, microstructure, reinforcing elements, numerical analysis.*

1. Введение. Волокна являются ключевыми структурными элементами в широком спектре современных высокотехнологичных композитов, поскольку именно они определяют основные механические и прочностные характеристики. Волокна могут быть как в виде непрерывных нитей (однонаправленных, тканых или трикотажных), так и в виде коротких или случайно ориентированных армирующих частиц. Правильная оценка их свойств — необходимое условие для надёжного проектирования и предсказуемого поведения композита.

Помимо технических применений, волокна играют ключевую роль и в области биоматериалов. Коллагеновые, шелковые и синтетические волокна применяются при создании имплантатов, шовных материалов, направленных матриксов для тканевой инженерии [1-3]. Здесь особенно важны как механические, прочностные, так и характеристики биосовместимости, которые зависят от морфологии, химического состава и структуры волокон.

Исследование свойств отдельных волокон и волоконных систем представляет собой сложную экспериментальную задачу. Это связано малым диаметром волокон, анизотропией, высокой чувствительностью к внешним воздействиям и часто — гетерогенной структурой волокон. За последние десятилетия был разработан широкий спектр методов, от традиционных механических испытаний до современных цифровых и спектроскопических подходов, позволяющих с высокой точностью анализировать структуру, состав и поведение волокон.

Цель данного обзора – проанализировать и классифицировать современные методы определения характеристик волокон, которые применяются для научных и прикладных исследований. Особое внимание уделяется:

- методам оценки механических и прочностных свойств (модуль упругости, прочность, деформация);
- микроскопическим и спектроскопическим методам анализа структуры и морфологии;
- методам неразрушающего контроля и цифровой обработки данных;
- сравнению отечественных и зарубежных подходов, включая примеры исследований последних лет.

Задачи статьи включают обзор методик для анализа волокон в составе композитов, а также сравнение различных подходов, применяемых российскими и зарубежными авторами.

2. Классификация характеристик волокон. Характеристики волокон можно условно разделить на несколько основных групп: механические, структурные, физико-химические и функциональные. Каждая из них имеет определяющее значение в зависимости от области применения — будь это конструкционные композиты, биоматериалы или технические текстили [1, 2].

2.1. Механические и прочностные характеристики для наиболее распространенных волокон приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип волокна	Модуль упругости (ГПа)	Прочность на растяжение (МПа)	Удлинение до разрыва (%)
Углеродное	230–600	3000–6000	1.0–2.0
Стеклянное	70–85	2000–3500	2.5–4.0
Арамидное (Kevlar)	60–130	2500–4000	2.5–4.0
Полимерное	2.5–4.0	500–1000	15–25
Коллагеновое	~0.5	50–100	>10

2.2. Структура волокна определяет его поведение на микро- и наноуровне, а также способность к взаимодействию с матрицей. К таким характеристикам относятся: диаметр, форма поперечного сечения, пористость, степень кристалличности, молекулярная ориентация, анизотропия и т.д. (табл. 2).

Таблица 2

Параметр	Типичная шкала измерения	Метод оценки
Диаметр волокна	1–50 мкм	SEM, оптическая микроскопия
Степень кристалличности	0–100 %	XRD, DSC, FTIR
Поверхностная шероховатость	нм–мкм	AFM, SEM
Молекулярная ориентация	Относительные величины	Raman-спектроскопия, XRD

2.3. Физико-химические характеристики определяют взаимодействие волокон с окружающей средой, устойчивость к старению, химическим веществам и температуре (табл.3):

Таблица 3

Характеристика	Описание	Метод оценки
Гидрофильность	Способность поглощать влагу	Измерение угла смачивания
Термическая стабильность	Пределы терморазложения	TGA, DSC
Биосовместимость	Реакция тканей на материал	Биотесты in vitro/in vivo

2.4. Функциональные характеристики волокон включают в себя электропроводность (углеродные, металлосодержащие волокна), пьезоэлектрические свойства, магнитная проницаемость, функционализация поверхности (антибактериальные покрытия).

3. Методы, применяемые зарубежными авторами для определения характеристик волокон. Разнообразие волокон – от синтетических до биополимерных – требует применения широкого спектра методов. Ключевыми направлениями в зарубежной практике являются механические испытания, микроскопические методы, спектроскопия, рентгеновские и термические исследования, а также комплексные подходы.

3.1. Механические испытания. Наиболее часто используемые методы включают растяжение одиночных волокон. Такие испытания регламентированы международными стандартами, в частности ASTM D3822 и ISO 11566. Применяются универсальные испытательные машины (например, Instron, Zwick/Roell) с возможностью работы на малых нагрузках, а также с применением микро-зажимов, эпоксидных креплений или клеевых площадок.

Исследование авторов [4] демонстрирует использование микромеханических стендов с цифровой видеорегистрацией деформации, что позволяет анализировать не только предел прочности и модуль упругости, но и процесс разрушения и микротрещинообразования.

3.2. Электронная и атомно-силовая микроскопия. Методы электронной микроскопии (SEM, TEM) используются для анализа морфологии волокон, включая поперечные сечения, распределение пор, структурные дефекты и особенности взаимодействия волокон с матрицей.

Атомно-силовая микроскопия (AFM) позволяет анализировать нанотопографию и локальные механические свойства поверхности волокна. В исследовании [5] AFM применялся для анализа биополимерных волокон, выявляя различия в структуре и адгезии на наноуровне.

3.3. Рентгеноструктурный анализ и спектроскопия. Рентгеноструктурный анализ (XRD) широко используется для определения степени кристалличности, ориентации макромолекул и фазовых переходов.

Раман-спектроскопия и FTIR [6] используются для оценки химического состава, выравнивания молекулярных цепей, наличия функциональных групп, степени сшивки и внутреннего напряжения.

3.4. Термический анализ. Дифференциальная сканирующая калориметрия (DSC) и термогравиметрический анализ (TGA) позволяют определить температуры стеклования, плавления и разложения волокон. Эти методы активно применяются в работах по термостабильности армирующих волокон, особенно натуральных и биоразлагаемых.

3.5. Комплексные подходы. В последнее десятилетие наблюдается тренд на интеграцию методов. Например, авторы [7, 8] совмещают SEM, Raman-спектроскопию и цифровую корреляцию изображений (DIC) при изучении механики волокон в составе композитов. Такой мультиинструментальный подход позволяет получить больше информации о механических, химических и структурных свойствах исследуемого материала.

Сравнение методов, применяемых зарубежными авторами представлено в табл. 4.

Таблица 4

Метод	Применение	Комментарии
Single-Fiber Tensile Test	Механические свойства волокон (прочность, модуль)	Стандартный метод, применяется по ASTM D3822
Digital Image Correlation (DIC)	Анализ распределения деформаций	Оптический метод, дополняет механические испытания
SEM	Морфология поверхности, фрактография	Высокое разрешение, анализ разрушения
TEM	Наноструктура, кристалличность	Требует подготовки образцов, применяется к углеродным и керамическим волокнам
FTIR/Raman	Химический состав, ориентация молекул	Идентификация функциональных групп и структуры
TGA	Термическая стабильность	Анализ остаточной массы, температура разложения
DSC	Стеклование, плавление, кристаллизация	Применимо к полимерным волокнам
DMA	Температурная зависимость модулей	Используется для анализа демпфирования и переходов
Nanoindentation	Локальные механические свойства	Твердость, модуль в микромасштабе
XRD	Кристалличность и ориентация	Рентгеноструктурный анализ, применяется к полимерам и керамике

3.6. Цифровые методы анализа и машинное обучение. В последние годы активно развиваются методы 3D-томографии (microCT) и автоматической обработки изображений волокон [7]. С применением нейросетей стало возможно автоматизировать анализ морфологии и дефектов волокон. Такие методы повышают воспроизводимость и точность оценки.

4. Методы, применяемые российскими авторами для определения характеристик волокон. В отечественной научной и прикладной практике методы оценки характеристик волокон формировались на основе ГОСТов, ведомственных инструкций, а также адаптации зарубежных методик к существующей технической базе. Характерной чертой является высокая роль механических и термических методов при ограниченном использовании современных микроскопических и спектроскопических подходов, что связано с доступностью оборудования и инфраструктурой лабораторий.

4.1. Механические испытания. В российских исследованиях прочностные характеристики волокон (в том числе армирующих — стеклянных, углеродных, базальтовых и органических) оцениваются с использованием стандартов ГОСТ 1798-70 (испытание на растяжение), ГОСТ 6611.2-73, ГОСТ 57407-2017, а также методических указаний по испытанию армирующих элементов в составе композитов [9-13].

Испытания проводят на универсальных испытательных стендах. В последнее время также применяются цифровые тензометры и видеоконтроль деформации [14].

4.2. Микроскопические методы. Наиболее широко используется оптическая микроскопия для оценки поперечного сечения волокон, плотности упаковки и характера разрушения. Сканирующая электронная микроскопия (SEM) также применяется, например, при анализе льняных волокон.

Атомно-силовая микроскопия (AFM) и просвечивающая микроскопия (TEM) в России применяются ограниченно, а именно в институтах РАН, специализирующихся на наноматериалах.

4.3. Рентгено-структурный анализ. Методы рентгеноструктурного анализа (XRD) используются для оценки кристалличности, фазы и текстуры армирующих волокон. В работах [15] применялись стандартные установки типа ДРОН-3, ДРОН-7 для анализа структуры базальтовых и стеклянных волокон.

Однако ориентационный анализ молекулярных цепей, широко распространённый в зарубежных работах, в России проводится ограниченно из-за отсутствия соответствующих программных средств.

4.4. Спектроскопия. ИК-спектроскопия (FTIR) используется для анализа химической природы связующих и модифицированных волокон. Чаще всего применяется в исследованиях волокон растительного происхождения (льняные, пеньковые) [16].

Методы Раман-спектроскопии применяются редко, в основном в исследовательских институтах. Причиной является ограниченное распространение оборудования, требующего высокой точности настройки.

4.5. Термический анализ. Дифференциальная сканирующая калориметрия (DSC) и термогравиметрический анализ (TGA) активно применяются в российских лабораториях для оценки термостабильности и состава волокон. В работах [17] описано использование этих методов для анализа композитов на основе стеклянных волокон и полиэфирной матрицы [18].

В табл. 5 представлено сравнение методов, применяемых в российских исследованиях.

Таблица 5

Метод	Применение	Комментарии
Оптическая микроскопия	Измерение диаметра волокон, контроль однородности	Простой метод, применяется в большинстве лабораторий
Разрыв на микроразрывной машине	Оценка прочности и модуля	С использованием универсальных установок
Инфракрасная спектроскопия	Определение состава волокон	Используется ИК-Фурье спектроскопия
Микротвердость	Локальная твердость, устойчивость к вдавливанию	Применяется для керамических и стеклянных волокон
Термогравиметрический анализ	Температурная стабильность	Аналогично зарубежным исследованиям
Металлография	Анализ структуры, фазового состава	Особенно для волокон металлической природы
Рентгенофазовый анализ	Кристалличность, фаза	XRD методами в ИФХЭ, МИСиС и др.

5. Анализ зарубежных и отечественных подходов. Зарубежные работы чаще ориентированы на комплексность и интеграцию различных аналитических методов. Широко используются международные стандарты (ASTM, ISO), методы in-situ визуализации, автоматизированная обработка данных и моделирование. В российских исследованиях преобладают классические инженерные подходы, основанные на ГОСТах и других нормативных документах, что обеспечивает применимость в условиях промышленной практики в машиностроении и строительстве [9-13].

В табл. 6 представлен сравнительный анализ методов определения характеристик волокон.

Таблица 6

Метод	Зарубежные подходы	Российские подходы
Механические испытания	Растяжение одиночных волокон по ASTM D3822, ISO 11566; использование микро-зажимов, DIC, автоматических систем измерения	ГОСТ 11262, испытания на разрыв и изгиб, ручная фиксация волокон, стандартные испытательные машины
Электронная микроскопия (SEM)	Высокое разрешение, анализ разрушения и интерфейсов, соединение с EDS, автоматическая сегментация	SEM-анализ морфологии, без спектрального анализа или с ограниченным применением локального химического анализа
AFM и STM	Использование для анализа наноадгезии и поверхностных дефектов	Практически не применяется, ограничен доступ к оборудованию
Рентгеноструктурный анализ	Определение степени кристалличности, ориентации цепей, фазовых переходов; синхротронные исследования	XRD в стандартной конфигурации, ориентированы на крупные структуры; анализ ограничен разрешением

Спектроскопия (FTIR, Raman)	FTIR, Raman-спектроскопия для оценки молекулярной ориентации, функциональных групп, остаточного напряжения, иногда in-situ при нагрузке	FTIR в ИК-диапазоне для оценки состава, без in-situ подхода; Raman используется редко
Термический анализ (DSC, TGA)	Высокоточная DSC/TGA-анализ термостабильности волокон; часто используется в биокомпозитах и новых материалах	Применяются в основном при сертификации; точность ниже; ориентированы на определение диапазонов термической стабильности
Комплексные методы анализа	SEM + DIC + Raman + механика + моделирование; in-situ тесты на микромеханических стендах	Отдельное применение методов; отсутствие скоординированного анализа, комплексные исследования встречаются редко

В исследованиях зарубежных авторов совмещаются SEM, Raman-спектроскопия и DIC для комплексного анализа механических и структурных свойств волокон. Также распространено использование модифицированных испытательных установок и визуализации в реальном времени.

В России акцент делается на надежность и воспроизводимость результатов в рамках отечественных стандартов. Однако ограничения в техническом оснащении, доступе к высокоточному оборудованию сдерживают развитие более глубоких аналитических методик. Особое внимание следует уделить перспективам использования современных цифровых методов (например, цифровой корреляции изображений, анализа поверхностей и машинного обучения) в российских лабораториях, что позволит выйти на уровень международных исследований в области характеристик армирующих волокон.

6. Применение методов в анализе волокон композитов. В композитных материалах свойства волокон критически важны. Для оценки их качества до и после встраивания в матрицу применяются комплексные подходы: механические испытания, микроскопия, дифракционные и спектроскопические методы. Сложность анализа повышается из-за необходимости локализации волокон внутри материала, что требует неразрушающих технологий или прецизионной подготовки шлифов.

6.1. Применение результатов при расчетах прочности композитов. Характеристики армирующих волокон играют ключевую роль в определении механических свойств композитов, особенно в направлении волокон. Результаты испытаний волокон активно применяются в расчетах прочности и жёсткости композитов. Параметры, такие как модуль Юнга, предел прочности и коэффициент Пуассона, используются в микромеханических моделях, например, модели Халпина-Цая, правила смесей и конечно-элементное моделирование (FEM).

6.1.1. Микромеханические модели. Механические и прочностные характеристики волокон (модуль упругости, предел прочности, коэффициент Пуассона) используются в микромеханических моделях, таких как:

- Правило смесей (Rule of Mixtures, ROM) — определяет эффективный модуль упругости композита:

$$E_c = V_f E_f + V_m E_m,$$

где E_c – модуль композита, V_f, V_m – объемные доли волокон и матрицы, E_f, E_m – модули упругости компонентов.

- Модель Хирша, модель Halpin–Tsai — учитывают особенности распределения и ориентации волокон, взаимодействие между фазами.

Для таких моделей требуется точное знание характеристик волокон, включая параметры межфазного взаимодействия и степень выравнивания (ориентации) волокон, которые можно получить из SEM, XRD и Raman-спектроскопии.

6.1.2. Макромоделирование и конечно-элементный анализ (FEM). В инженерной практике используются методы конечных элементов (FEM), где волокна моделируются как ортотропные включения или анизотропные фазы с заданными свойствами:

- Вводятся упругие и прочностные характеристики армирующей фазы (например, из данных ASTM D3822).
- Строятся мезо- и макроуровневые модели для анализа напряжений, деформаций, повреждений.
- При использовании параметров из AFM и SEM можно учитывать начальные дефекты и микроструктуру.
- Платформы: ANSYS, ABAQUS, COMSOL Multiphysics.

6.1.3. Прогнозирование разрушения. Полученные параметры используются в:

- Критериях разрушения (критерий максимального напряжения, Hashin, Tsai-Wu).
- Моделях с учетом накопления повреждений волокна и отслоения от матрицы.
- Стохастических моделях с учетом распределения прочности по Вейбуллу.

7. Влияние морфологии и структуры волокон на свойства. Морфология и внутренняя структура армирующих волокон являются критическими факторами, определяющими их механические, физико-химические и адгезионные свойства, а, следовательно, и характеристики композитов в целом. На микро- и наноуровне волокна отличаются формой поперечного сечения, наличием пор и дефектов, степенью кристалличности, ориентацией макромолекул и поверхностной активностью.

7.1. Морфология волокон.

- Форма поперечного сечения волокон (круглая, овальная, треугольная, зубчатая) влияет на:
  - Площадь контакта с матрицей (более развитая форма повышает сцепление).
  - Распределение напряжений и склонность к разрушению.
- Поверхностная шероховатость увеличивает механическое сцепление с полимерной матрицей. Анализ методом AFM и SEM позволяет количественно оценить шероховатость.
- Пористость и внутренняя пустотелость уменьшают прочность, но могут улучшить звукопоглощение или теплоизоляцию (актуально для натуральных волокон).

7.2. Микроструктура: кристалличность и ориентация.

- Степень кристалличности прямо пропорциональна модулю упругости. Высококристаллические волокна демонстрируют большую жесткость, но меньшую пластичность.

- Ориентация макромолекул вдоль оси волокна обеспечивает его прочность на растяжение. Используются XRD и поляризационная микроскопия для анализа степени ориентации.

7.3. Структурные дефекты и неоднородности.

- Микротрещины, включения, неоднородности плотности становятся центрами зарождения трещин при нагрузке.
- Получение информации о дефектах возможно с помощью TEM, SEM и спектроскопических методов (Raman, FTIR).

7.4. Влияние морфологии на прочность композитов.

- Волокна с высокой кристалличностью и ориентацией хорошо сопротивляются деформации.
- Развитая морфология и шероховатость обеспечивают лучшее перераспределение напряжений на границе волокно–матрица.
- Дефекты и поры снижают прочность композита, особенно при ударных или циклических нагрузках.

На рис. 1 представлена диаграмма влияния степени кристалличности волокна на модуль упругости композита.

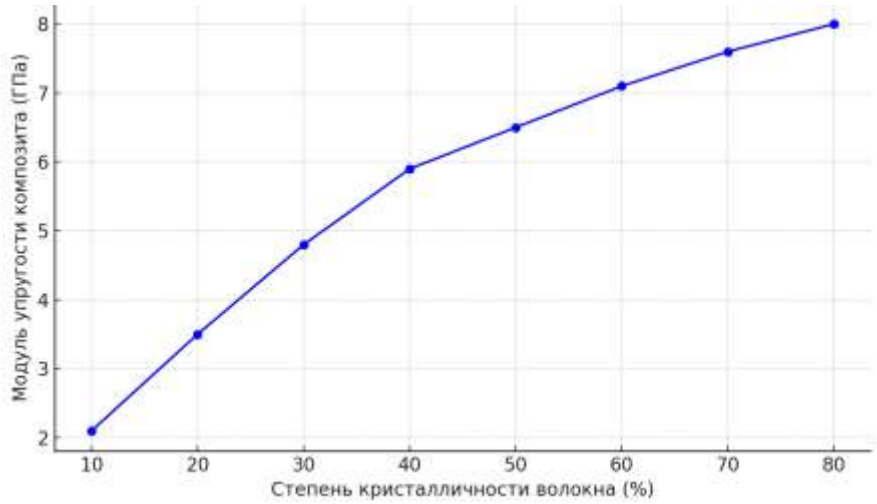


Рис. 1. Влияние кристалличности на модуль упругости композита.

Из графика на рис. 1 видно, что с ростом кристалличности за счет более упорядоченной структуры волокна увеличивается модуль упругости.

8. Перспективные и инновационные методы исследования. Современные подходы к исследованию волокон выходят за рамки классических методов и всё чаще включают мультидисциплинарные технологии — от наномеханики до машинного обучения. Одним из таких направлений является наноиндентация, применяемая для оценки локальных механических свойств поверхностей волокон, особенно биологических или модифицированных природных материалов.

Интеграция рентгеновской томографии высокого разрешения, в том числе in situ-синхротронных методов, позволяет отслеживать развитие микроповреждений в реальном времени, особенно при усталостных испытаниях композитов на основе базальтовых и углеродных волокон.

Не менее перспективной является комбинация ИК-спектроскопии (FTIR) и методов машинного обучения, что даёт возможность предсказывать механические характеристики волокон по их спектральному профилю с высокой точностью. Это направление особенно актуально при исследовании биоразлагаемых или модифицированных волокон, где химический состав влияет на поведение материала в условиях эксплуатации.
Цифровые двойники (digital twins), основанные на микроструктурных моделях, активно применяются при моделировании усталостного поведения и прогноза ресурса волокнистых армирующих элементов.
В рамках метода неразрушающего контроля значительную роль играет in situ Раман-спектроскопия, позволяющая отслеживать распределение напряжений вдоль волокна и внутри композита.
Инновационные подходы также включают сканирующую тепловую микроскопию (SThM), с помощью которой удаётся оценивать теплопроводность и термическую стабильность волокон на наноуровне, а также термографический мониторинг в реальном времени для оценки микроповреждений при циклической нагрузке.

9. Заключение. Волокна играют ключевую роль в структуре композитов. Чем точнее методы определение характеристик волокон, тем точнее определяются свойства изделий. Зарубежные подходы демонстрируют высокий уровень технической оснащенности и автоматизации, в то время как в России сохраняется акцент на механические испытания и микроскопию. Развитие цифровых методов и доступ к современному оборудованию позволят значительно расширить спектр доступных исследований в данной области.

Список литературы

1. Джатдоева Д.Т., Хубиева А.К., Болатова Р.Х. Разработка гибридных материалов на основе полипептидов и углеродных нанотрубок для биомедицинских применений // Вода: химия и экология. – 2024. – № 12. – С. 60-66.
2. Запороцкова И.В., Тимникова В.А., Попкова А.В. Исследование возможности создания композитов на основе биополимера, армированного углеродными нанотрубками, для использования их в протезировании // НБИ технологии. – 2023. – Т. 17, № 2. – С. 27-34. DOI 10.15688/NBIT.jvolsu.2023.2.4.
3. Матриксы для тканевой инженерии на основе модифицированных нановолокон поли-(3-гидроксибутирата), полученных методом электроформования / А. А. Ольхов, О. В. Староверова, В. В. Гурьев [и др.] // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). - 2016. - № 1. - С. 57-68.
4. Kumar R., Mikkelsen L.P., Lilholt H., Madsen B. Understanding the mechanical response of glass and carbon fibres: stress–strain analysis and modulus determination // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 942. Art. 012033. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/942/1/012033.
5. Duān P., Xià Y., Bull S.J., Chén J. Finite element modeling of nanoindentation response of elastic fiber–matrix composites // J. Mater. Res. 2018. Vol. 33, No. 17. P. 2494–2503. DOI: 10.1557/jmr.2018.243.
6. Naito K., Nagai C. Raman scattering for tensile testing of PAN-based and pitch-based single carbon fibers // Fibers. 2024. Vol. 12, No. 10. – Art. 88. DOI: 10.3390/fib12100088.

7. Hülsbusch D., Mrzljak S., Walther F. In situ computed tomography for the characterization of fatigue damage development in glass fiber-reinforced polyurethane // J. Compos. Technol. Res. 2019. Vol. 61, No. 9.P. 821-828. DOI:10.3139/120.111389.
8. Divakarraju P.V., Pandurangan V., Nithyadharan M. Atomic force microscopy-based nanoindentation technique for characterizing the transverse and shear moduli of flax fibers // Composites Science and Technology. 2024. Vol. 258. Art. 110890. DOI: 10.1016/j.compscitech.2024.110890.
9. ГОСТ Р. 56561-2015. Материалы текстильные. Определение состава. Идентификация волокон. – М.: Стандартинформ, 2016. – 58 с.
10. ГОСТ 6611.2-73. Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1997. – 35 с.
11. ГОСТ 32794-2014. Композиты полимерные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2015. – 98 с.
12. ГОСТ 10727-2015. Нити стеклянные однонаправленные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2016. – 6 с.
13. ГОСТ Р 57407- 2017. Волокна углеродные. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2017. – 12 с.
14. Соболев Ю.С. Критический обзор методов механических испытаний при растяжении // Светопрозрачные конструкции. – 2022. – № 1(139). – С. 56-61.
15. Завадский А.Е. Особенности рентгенографического анализа степени кристалличности полипропиленовых волокон // Изв. вузов. Химия и хим. технологии. - 2016. - Т. 59, Вып.7. - С. 80–85. DOI:10.6060/tcct.20165907.5337.
16. Елонова В.А. Установка для подготовки и проведения ик-спектроскопических исследований углеродных сорбентов // Развитие – 2018 : Научное электронное издание, Кемерово, 10–12 апреля 2018 года. – Кемерово: Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН, 2018. – С. 79-90.
17. Гусева М.А., Петрова А.П. Методы испытаний и исследований термореактивных связующих для ПКМ // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2021. – Т. 27, № 1. – С. 47-64. DOI: 10.33113/mkmk.ras.2021.27.01.047_064.04.
18. Зарубин В.С., Сергеева Е.С., Магнитский И.В. Сравнительный анализ методов осреднения упругих характеристик композиционных материалов // Ключевые тренды в композитах: наука и технологии : сборник материалов Международной научно-практической конференции, Москва, 05–08 декабря 2018 года. – М.: ООО «Диона», 2019. – С. 266-271.

References

1. Dzhatdoeva D.T., Khubieva A.K., Bolatova R.Kh. Development of hybrid materials based on polypeptides and carbon nanotubes for biomedical applications // Water: Chemistry and Ecology. 2024. No.12. P. 60-66. (in Russian).
2. Zaporotskova I.V., Timnikova V.A., Popkova A.V. Investigation of the possibility of creating composites based on biopolymer reinforced with carbon nanotubes for their use in prosthetics // NBI technologies. 2023. Vol. 17, No. 2. P. 27-34. DOI: 10.15688/NBIT.jvolsu.2023.2.4.
3. Matrixes for tissue engineering based on modified poly-(3-hydroxybutyrate) nanofibers obtained by electroforming / A. A. Olkhov, O. V. Staroverova, V. V. Guryev [et al.] // Physics of Fibrous Materials: Structure, Properties, Science-intensive Technologies and Materials (SMARTEX). 2016. No. 1. P 57-68. (in Russian).

4. Kumar R., Mikkelsen L.P., Lilholt H., Madsen B. Understanding the mechanical response of glass and carbon fibres: stress–strain analysis and modulus determination // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 942. Art. 012033. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/942/1/012033.
5. Duān P., Xià Y., Bull S.J., Chén J. Finite element modeling of nanoindentation response of elastic fiber–matrix composites // J. Mater. Res. 2018. Vol. 33, No. 17. P. 2494–2503. DOI: 10.1557/jmr.2018.243.
6. Naito K., Nagai C. Raman scattering for tensile testing of PAN-based and pitch-based single carbon fibers // Fibers. 2024. Vol. 12, No. 10. – Art. 88. DOI: 10.3390/fib12100088.
7. Hülsbusch D., Mrzljak S., Walther F. In situ computed tomography for the characterization of fatigue damage development in glass fiber reinforced polyurethane // J. Compos. Technol. Res. 2019. Vol. 61, No. 9.P. 821-828. DOI:10.3139/120.111389.
8. Divakarraju P.V., Pandurangan V., Nithyadharan M. Atomic force microscopy-based nanoindentation technique for characterizing the transverse and shear moduli of flax fibers // Composites Science and Technology. 2024. Vol. 258. Art. 110890. DOI: 10.1016/j.compscitech.2024.110890.
9. GOST R 56561-2015. Textile materials. Determination of composition. Identification of fibers. Moscow: Standartinform, 2016. 58 p. (in Russian)
10. GOST 6611.2-73. Textile threads. Methods of determination of breaking load and elongation at break. Moscow: Standards Publishing, 1997. 35 p. (in Russian)
11. GOST 32794-2014. Polymer composites. General technical conditions. Moscow: Standartinform, 2015. 98 p. (in Russian)
12. GOST 10727-2015. Unidirectional glass filaments. Technical conditions. Moscow: Standartinform, 2016. 6 p. (in Russian)
13. GOST R 57407-2017. Carbon fibers. General technical requirements and test methods. Moscow: Standartinform, 2017. 12 p. (in Russian).
14. Sobolev Yu.S. Critical review of methods of mechanical tensile tests // Translucent constructions. 2022. No. 1(139). P. 56–61. (in Russian).
15. Zavadskii A.E. Features of x-ray analysis of crystallinity degree of polypropylene fibres. Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2016. Vol. 59, No. 7. P. 80-85. DOI:10.6060/tcct.20165907.5337. (in Russian).
16. Elonova V.A. Installation for preparing and conducting IR spectroscopic studies of carbon sorbents // Development - 2018 : Scientific electronic edition, Kemerovo, April 10-12, 2018. - Kemerovo: Kemerovo: FIC UUH SB RAS, 2018. - P. 79-90. (in Russian).
17. Guseva M.A., Petrova A.P. Methods of testing and research of thermosetting binders for PCM // Mechanics of composite materials and structures. 2021. Vol. 27, No. 1. P. 47-64. DOI: 10.33113/mkmk.ras.2021.27.01.047_064.04. (in Russian).
18. Zarubin V.S., Sergeeva E.S., Magnitsky I.V. Comparative analysis of methods of averaging elastic characteristics of composite materials // Key trends in composites: science and technology : proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, December 05-08, 2018. - M.: LLC “Diona”, 2019. - C. 266-271. (in Russian).

Дата поступления: 30 июня 2025 г.

DOI: 10.18411/vntr2025-177-2

УДК 620.186.5

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА ДЕФОРМИРУЮЩИМ РЕЗАНИЕМ

© Алла Григорьевна Дегтярева [1], Ольга Михайловна Жигалина[2,1]
[1]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
dega_70@mail.ru
[2]НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия
zhigal@crys.ras.ru

Аннотация. *В работе рассмотрено влияние деформирующего резания (ДР) на структуру и упрочнение поверхностного слоя технического железа. Показано, что при обработке ДР зеренная структура феррита изменяется. За счет прохождения процессов динамической рекристаллизации средний размер зерна снижается в 20 раз по сравнению с необработанной сердцевиной. При этом микротвердость поверхностного слоя увеличивается в 1,7 раза и практически не изменяется по всей толщине слоя.*
Ключевые слова: *феррит, техническое железо, деформирующее резание, поверхностное упрочнение, зеренная структура.*

Работа выполнена по Государственному заданию НИЦ КИ в части анализа данных.

CHANGES IN THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF TECHNICAL IRON AFTER PROCESSING BY DEFORMING CUTTING

© Alla Degtyareva[1], Olga Zhigalina[2,1]
[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
dega_70@mail.ru
[2]SRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia
zhigal@crys.ras.ru

Abstract. *The paper examines the effect of deforming cutting (DC) on the strengthening and structure of the surface layer of technical iron. It is shown that during DC processing the grain structure of ferrite changes. Due to the dynamic recrystallization processes, the average grain size decreases by 20 times compared to the untreated core. At the same time, the microhardness of the surface layer increases by 1.7 times and remains virtually unchanged throughout the entire thickness of the layer.*
Keywords: *ferrite, technical iron, deforming cutting, surface strengthening, grain structure.*

Acknowledgements. *The work was carried out according to the State assignment of the Kurchatov Institute Research Center in terms of data analysis.*

Введение. В настоящее время получение новых конструкционных материалов, обеспечивающих заданный комплекс эксплуатационных свойств, реализуется в процессе применения разнообразных способов обработки: закалка из жидкого состояния, обработка токами высокой частоты, лазерное термоупрочнение, электромеханическая обработка, специальное точение, множество видов поверхностной пластической деформации (алмазное выглаживание, накатка регулярных микрорельефов, дробеструйная обработка) и многие другие [1]. Под влиянием экстремально высоких температур, скоростей нагрева и охлаждения, а также значительных степеней деформации, формируются структурно-фазовые состояния, принципиально отличающиеся от таковых после традиционной термической обработки. При этом пластическая деформация реализуется за счет локального силового воздействия на обрабатываемую поверхность.

Поверхностную пластическую деформацию используют для повышения твердости, прочности и износостойкости поверхностного слоя. Упрочнение происходит за счет увеличения плотности дислокаций, формирования мелкозернистой структуры, возникновения границ блоков и двойников [2]. Однако, методы поверхностного упрочнения деформацией имеют существенные недостатки: малую глубину упрочнения, неравномерное распределение твердости по толщине упрочненного слоя, необходимость использования дорогостоящих приспособлений.

Особое место в разнообразных видах поверхностной обработки конструкционных материалов занимает высокоскоростная обработка деформирующим резанием (ДР) [3], реализуемая на стандартном металлорежущем станке с использованием простого инструмента.

Деформационное упрочнение поверхности методом деформирующего резания (ДР) — это поверхностная обработка, в основе которой лежит процесс частичного срезания припуска и целенаправленного пластического деформирования подрезанного поверхностного слоя [3]. Образующаяся при ДР стружка не отделяется полностью от заготовки, сохраняя с ней связь по своей узкой стороне (**Рис.1**).

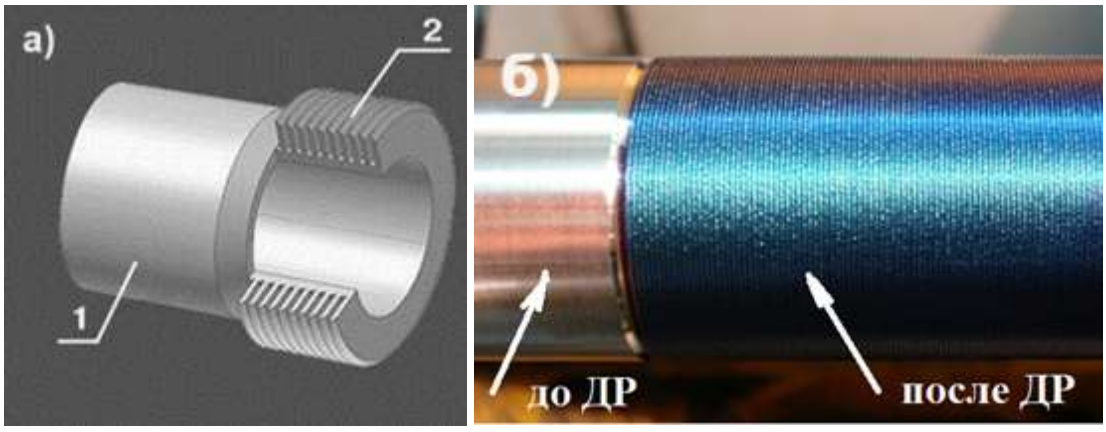


Рис. 1. Схема получения (а) и макрорельеф поверхности обработанной ДР (б)
1 - основной материал, 2 – оребрение (стружка, не отделившаяся полностью от заготовки).

Совокупность подрезанных поверхностных слоев, которые сохранили сплошность своего соединения с заготовкой, образует на обработанной поверхности детали развитый макрорельеф. Форма получаемого макрорельефа определяется геометрическими

параметрами инструмента и режимами обработки [4]. По сравнению с другими методами поверхностного пластического деформирования ДР имеет следующие преимущества: может выполняться той же технологической операцией, что и получение обрабатываемой поверхности, упрочненный макрорельеф формируется за один проход инструмента, толщину упрочненного слоя легко прогнозировать, исходя из геометрических параметров инструментов и режимов резания.

В данной работе исследовали особенности структурного состояния поверхностного слоя металла в виде наклонных ребер, плотно прилегающих друг к другу, не образуя зазор, после обработки методом деформирующего резания.

Материалы и методы исследования. Для анализа поведения феррита при ДР использовали техническое железо с содержанием углерода менее 0,05 %. В качестве заготовки использовали вал диаметром 70мм в состоянии поставки (нормализация).
Для металлографических исследований сначала подготовили поперечные срезы (с применением электроэрозионного вырезного станка) и затем шлифы поперечных срезов оребренных структур поверхности (после ДР).
Заливку микрошлифов осуществляли в прессе для горячей запрессовки Struers CitoPress-20. Образцы запрессовывали в цилиндр диаметром 25 мм. Металлографический анализ проводили на полированной поверхности шлифов, предварительно протравленной 4% раствором HNO_3 в C_2H_5OH в течение 4-6 секунд. Микроструктуру изучали с помощью светового металлографического микроскопа Olympus GX51. Измерения объектов проводили в программе SIAMS 700, предназначенной для проведения полуавтоматического измерения геометрических характеристик объектов на изображении.
Заготовка **(**вал) была обработана ДР по режиму: скорость ДР V= 3,6 м/с; значение подачи S_0= 0,05 мм/об; глубина резания t= 1 мм.

Результаты и их обсуждение. Микроструктура образца представлена на **рис.2.**

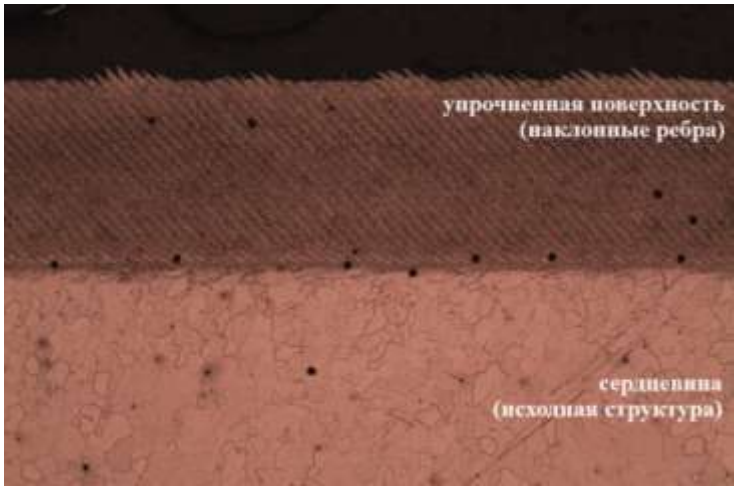
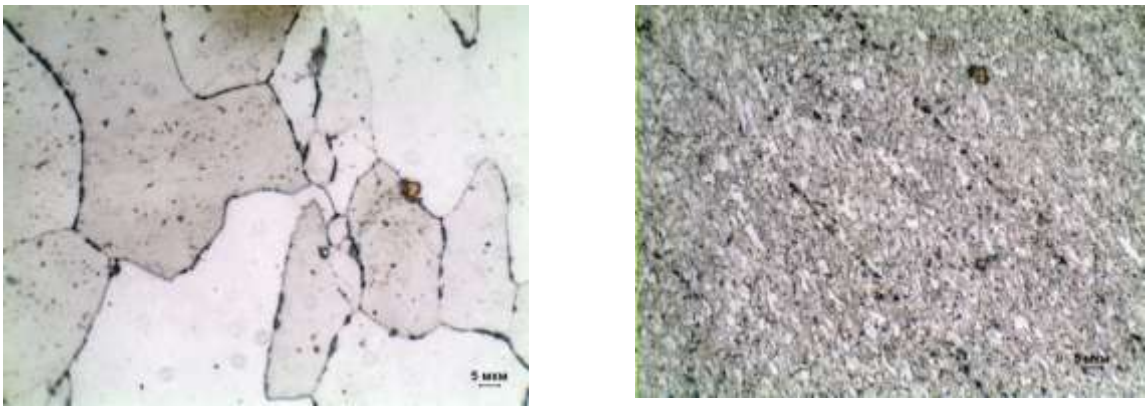


Рис. 2. Микроструктура образца технического железа после обработки ДР (х50)
(режим ДР: V= 3,6 м/с; S_0= 0,05 мм/об; t= 1 мм)

Металлографический анализ образцов технического железа показал наличие двух зон на шлифах исследуемого материала, четко видимых на образце: упрочненная поверхность (наклонные ребра) и сердцевина (исходная структура) (**рис.2**.). Микротвердость в указанных

зонах составила: сердцевина ~150 $HV_{0,1}$, упрочненная поверхность ~250-260 $HV_{0,1}$. Микротвердость поверхностного слоя увеличилась в 1,7 раза по сравнению с необработанной сердцевиной. Расчет размеров ферритных зерен показал, что ДР приводит к измельчению зерна феррита в техническом железе более, чем в 20 раз. Так, до обработки размер зерен составлял ~20,3 мкм, а после - (в упрочненной поверхности) ~1,1 мкм (**рис.3**.). Вероятно, при ДР наклеп снимается за счет динамической рекристаллизации, которая приводит к получению такой дисперсной равноосной структуры феррита.
Особенностью поверхностного упрочненного ДР является то, что микротвердость по всей толщине слоя практически не изменяется.



а) б)

Рис 3. Зерно феррита технического железа
а) до обработки ДР (среднее значение 20,3 мкм); б) после обработки ДР (среднее значение 1,1 мкм).

Микроструктурный анализ при большем увеличении показал, что у основания ребер, со стороны, которая не контактирует с резцом при обработке ДР, могут наблюдаться светлые участки (показаны стрелками на **рис.4.**) с повышенной микротвердостью до 310 $HV_{0,05}$ Микроструктура этих участков волокнистая, без признаков рекристаллизации, возможно, за счет меньшего трения и пластической деформации при ДР они нагреваются ниже температуры рекристаллизации, при этом наклеп сохраняется.

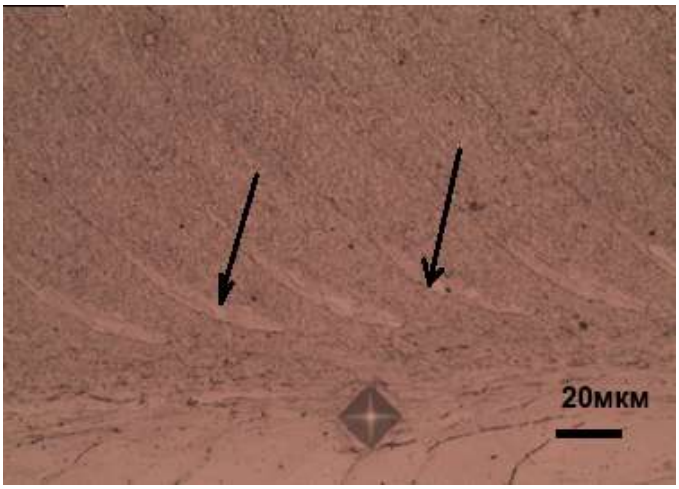


Рис. 4. Структура образца технического железа у основания оребренной поверхности. Светлые деформированные участки обозначены стрелками.

Между упрочненной поверхностью (под светлыми деформированными участками) и сердцевиной обнаружена третья (переходная зона) с микротвердостью 280-290 $HV_{0,1}$, что почти на 50% выше, по сравнению с сердцевиной.

Ранее проведенные исследования [5] показали, что подача при обработке ДР имеет важное значение для получения однородной структуры в ребрах (чем меньше значение подачи, тем однороднее структура).

Поэтому, для сравнения, заготовку дополнительно обработали ДР с большей подачей (S_0= 0,1 мм/об, скорость и глубину ДР не изменяли). Анализ микроструктуры технического железа после ДР с разной подачей S_0= 0,1мм/об (**рис 5, а**) и S_0= 0,05мм/об (**рис 5, б**) показал, что в образце, обработанном с большей подачей (S_0=0,1мм/об), наблюдается волокнистая структура феррита с включениями мелких равноосных зерен, что соответствует началу первичной рекристаллизации. Значения микротвердости, измеренные в середине ребра, составляют 280 $HV_{0,05}$. Снижение значения подачи до S_0=0,05мм/об приводит к получению равноосной, рекристаллизованной структуры без признаков деформации. К тому же, в структуре наблюдаются отдельные достаточно крупные зерна. Этот факт указывает на прохождение процессов собирательной рекристаллизации. Микротвердость уменьшается до 240 $HV_{0,05}$.

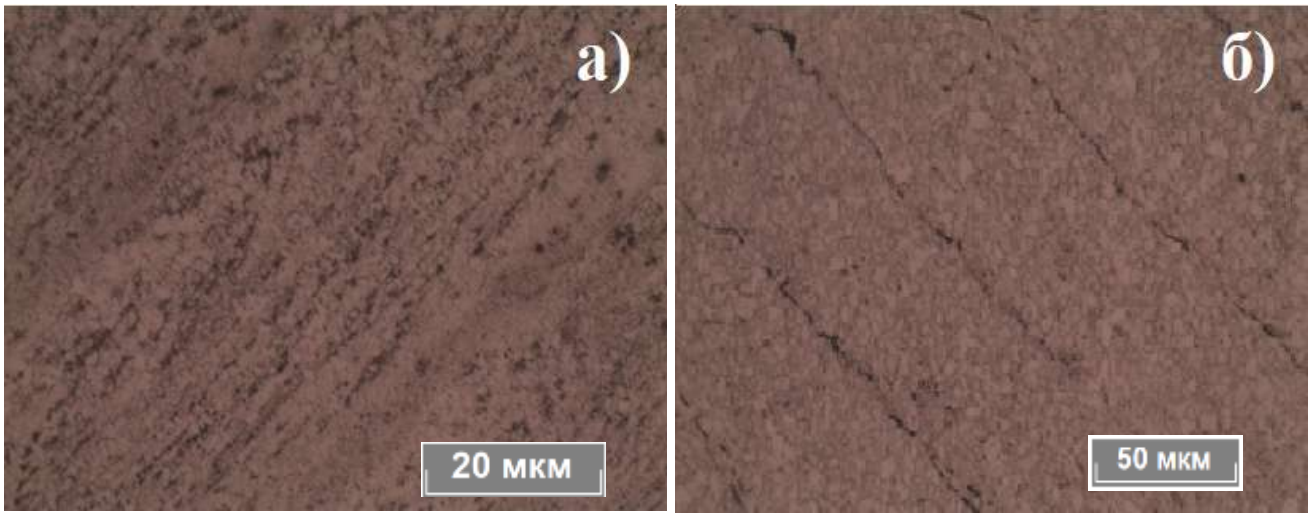


Рис. 5. Упрочненная поверхность технического железа
после обработки ДР, (х1000)
Режим ДР: V= 3,6 м/с; t= 1 мм, а) S_0= 0,1 мм/об; б) S_0= 0,05 мм/об

Заключение. Проведенные металлографические исследования показали, что в процессе высокоскоростной обработки методом деформирующего резания образуется упрочненный поверхностный слой толщиной ~ 1мм. Поверхностный слой представляет собой периодически повторяющиеся области (наклонные ребра) с неоднородной структурой по ширине. В пределах каждого ребра обнаружены две зоны, принципиально различающиеся по структуре: прирезцовая (зона контакта с резцом) и свободная (без контакта с резцом). В результате обработки технического железа происходит измельчение феррита в 20 раз, создание равноосной рекристаллизованной структуры разной степени дисперсности, деформированной волокнистой структуры или их сочетание.

Список литературы

1. Ежелев А. В. Бобровский И. Н., Лукьянов А. А. Анализ способов обработки поверхностно-пластическим деформированием // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6-3. – С. 642-646.
2. Пашинская Е.Г. Физико-механические основы измельчения структуры при комбинированной пластической деформации. - Донецк: Вебер, 2009. - 352 с.
3. Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Васильев С.Г., Симонов В.Н., Хасянов М.А. Патент на изобретение №2015202. РФ. Способ упрочнения поверхности детали // Изобретения. - 1994. - №12.
4. Шуляк Я.И. Разработка и исследование способа деформационного упрочнения поверхностей деталей методом деформирующего резания: дис. … канд. техн. наук. Москва. 2017.
5. Дегтярева А.Г., Симонов В.Н., Иванова А.Ю. Влияние толщины ребра стали 35 на упрочнение при деформирующем резании // Электрометаллургия. - 2017. - №12. - С. 31-36.

Дата поступления: 10 апреля 2025 г.

DOI: 10.18411/vntr2025-177-3

УДК 621.57 + 536.24

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕРМОМОДУЛЕ ПЕЛЬТЬЕ

Владимир Исаакович Ивлев
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
6805158@mail.ru

Аннотация. *Большинство работ по моделированию работы термомодулей Пельтье посвящено их функционированию в установившемся режиме, что соответствует многочисленным техническим приложениям с использованием термомодулей. Однако, в ряде случаев термомодуль может работать в циклическом режиме, например, в тепловых приводах, где необходимо периодически нагревать и охлаждать рабочее тело. Для расчета динамических характеристик таких приводов необходимо учитывать переходные процессы в термомодуле, при изменении тока через его спаи. В работе рассматриваются относительно простые математические модели переходных процессов в термомодуле (без решения системы неоднородных дифференциальных уравнений в частных производных) и сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.*
Ключевые слова: *термомодуль Пельтье, математическая модель, переходный процесс.*

MATHEMATICAL MODELS OF TRANSIENT PROCESSES IN PELTIER THERMOMODULES

V.I. Ivlev
Mechanical Engineering Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
6805158@mail.ru

Abstract. *Most of the works on modeling the operation of Peltier thermomodules are devoted to their functioning in a steady state, which corresponds to numerous technical applications using thermomodules. However, in some cases, its can operate in a cyclic mode, for example, in thermal actuators, where it is necessary to periodically heat and cool the working fluid. To calculate the dynamic characteristics of such actuators, it is necessary to take into account transient processes in the thermomodule, when the current through its junctions changes. The paper considers relatively simple mathematical models of transient processes in thermomodule (without solving a system of non-homogeneous partial differential equations) and a comparison of the calculation results with experimental data.*
Key words: *Peltier thermomodule, mathematical model, transient process.*

Введение. Термомодули Пельтье в настоящее время находят достаточно широкое применение во многих областях техники для регулирования температуры или охлаждения различных устройств. К их достоинствам можно отнести компактность, отсутствие подвижных частей, нет необходимости в использовании хладоагентов, возможность работы

при различных ориентациях в пространстве. Они используются в радиоэлектронике как миниатюрные охладители входных каскадов высокочувствительных приемников и усилителей, лазерных излучателей и т.д., в медицинских контейнерах для хранения биологических тканей и жидкостей, в автомобильных переносных холодильниках, в устройствах утилизации низкопотенциального тепла. К недостаткам можно отнести низкую энергоэффективность и невысокое быстродействие при термоциклировании. Хотя сам эффект Пельтье был открыт ещё в XIX веке, но и в настоящее время продолжаются исследовательские работы, направленные на повышение их технических и эксплуатационных характеристик. Этой проблеме посвящен целый ряд фундаментальных монографий, например [1], обзоров [2 - 4] так и большое количество научных статей, содержащих результаты исследований по совершенствованию конструкций термомодулей, поиску новых, более эффективных материалов, разработке новых типов устройств для регулирования температуры, а также методам расчета характеристик и оптимизации параметров термомодулей Пельтье. В [5] рассматривается архитектура термоэлектрического охладителя, использующая тонкопленочные элементы на пластиковой подложке в гофрированной структуре, зажатой между плоскими пластинами теплопроводности, что позволяет снизить стоимость устройства при сопоставимых тепловых потоков традиционных охладителей. Использование модулей Пельтье для управления тепловыми потоками в охлаждающих устройствах на основе магнитокалорического эффекта описано в [6]. Отмечается, что это позволяет существенно упростить конструкцию, за счет исключения насосных и клапанных устройств. В [7] рассматривается трехмерная сеть взаимосвязанных ферромагнитных нанопроводов, встроенных в полимерную пленку, являющуюся эффективным гибким материалом в качестве активных охладителей Пельтье. Термопары на основе нанопроволок Co-Fe показывают гораздо более высокие коэффициенты мощности и теплопроводности вблизи комнатных температур, чем другие существующие гибкие термоэлектрические системы. В [8, 9] представлены результаты работ по поиску более эффективных материалов для термоэлектрических устройств, применяемых для систем регулирования температуры и преобразователей тепла в электроэнергию.

Для выбора параметров термоэлектрических модулей Пельтье, оптимизации этих параметров в соответствии с принятой системой критериев, а также синтеза системы управления величиной тока через модуль, при решении конкретной технической задачи, необходимо иметь его математическую модель. Этой задаче посвящено большое количество работ, в частности, [10 - 14]. Некоторые фирмы, производители термомодулей предлагают онлайн калькуляторы для расчета необходимых параметров модулей, например [15]. В указанных работах в основном рассматривается режим установившейся работы термомодуля, т.к. в большинстве технических приложений (охладители, генераторы) используется именно этот режим работы. Однако, в ряде случаев , например при моделировании приводных устройств с фазовым превращением рабочего тела [16] необходимо рассматривать переходные процессы изменения температуры при изменении тока через термомодуль. В общем случае это требует формирование достаточно сложной системы неоднородных дифференциальных уравнений в частных производных, с соответствующими начальными и граничными условиями. Решение здесь может быть получено только численными методами, с использованием специальных программ, что в определенной степени затрудняет анализ результатов моделирования работы термомодуля в конкретном устройстве. Поэтому здесь часто пользуются экспериментальными данными, как например в [17].

Целью данной работы является анализ возможности использования относительно простых математических моделей, описывающих функционирование термомодулей Пельтье и сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Описание экспериментального стенда. На рис.1 представлено фото термомодуля Пельтье, используемого в настоящей работе. Модуль состоит из полупроводниковых ветвей “n” и “p” типов, последовательно соединенных медными перемычками. Данная конструкция закреплена между двумя керамическими пластинами с высокой теплопроводностью. В таблице 1 даны параметры термомодуля, необходимые для рассчета, их условные обозначения и численные величины. На рис.2 представлена схема экспериментального стенда. Питание термомодуля осуществлялось от источника постоянного тока с амплитудой пульсации тока не превышающей 3% от номинального значения. Температура воды в контейнере контролировалась ртутным термометром с ценой деления 0,2°С.

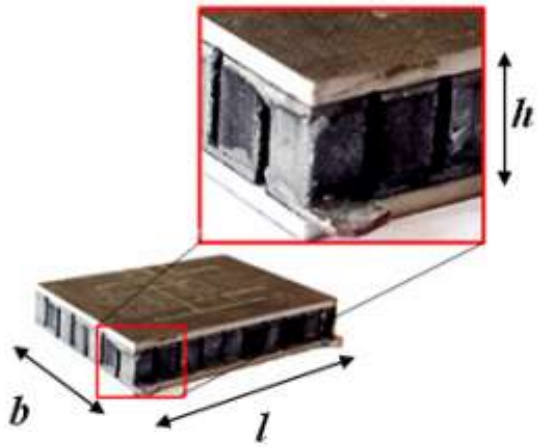


Рис.1. Термомодуль Пельтье.

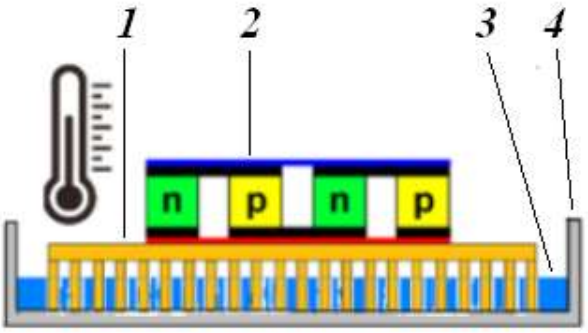


Рис.2. Схема стенда. 1- алюминиевый радиатор, 2- термомодуль, 3- вода, 4- контейнер.

Таблица 1

Параметр термомодуля	**Обозначение**	**Величина**
Габариты	l x b x h	49 x 34 x 9,7 mm
Площадь сечения ветви	f	$16\ 10^{-6}$ m^2
Высота ветви	H	6,7 mm
Число пар ветвей	n	35
Коэффициент термо э.д.с.	α	$4{,}2\ 10^{-4}$ В/К
Сопротивление модуля	r	0,6 Ом
Коэффициент теплопроводности материала ветви	δ	1,4 Вт/м К
Удельная теплоемкость материала ветви	c	150 Дж/кг К
Плотность материала ветви	γ	$8\ 10^3$ кг/$м^3$
Масса термомодуля	m	0,0732 кг
Плотность керамики BeO	σ	$3\ 10^3$ кг/$м^3$
Удельная теплоемкость BeO	C_1	807 Дж/кг К

Измерение температуры верхней поверхности термомодуля производилось высокоточным электронным термометром “Fluke 572-2” (Германия). Температура окружающей среды, воды в контейнере, радиатора и термомодуля при начале измерений составляла 293К. На рис.3 (кривая 4) представлен переходный процесс изменения температуры верхней поверхности термомодуля при токе i = -1А (режим охлаждения). Высота маркера определяет погрешность измерения температуры, ширина соответственно погрешность измерения времени. Численные значения на кривой 4 являются усредненными величинами из пяти серий измерений.

Математические модели термомодуля. Получить верхнюю оценку по быстродействию для термомодуля можно из рассмотрения одномерной модели с полубесконечными ветвями. Уравнение теплопроводности для ветви в этом случае можно записать:

$$c\gamma\frac{\partial T}{\partial t} = \delta\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + j^2(t)\rho \qquad (1)$$

где j – плотность тока, x – координата, отсчитываемая от торца ветви. Граничные и начальные условия имеют вид:

$$\left[\delta\frac{\partial T}{\partial x} - \alpha j(t)T\right]_{x=0} = 0; \quad T(x,0) = T_0; \quad \left[\frac{\partial T}{\partial x}\right]_{x\to\infty} = 0$$

Уравнение (1) решалось численно; соответствующий переходный процесс при i = -1А представлен на рис.3 (кривая 1).

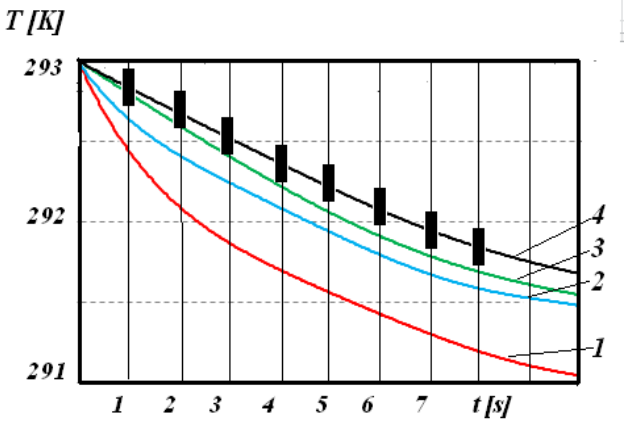


Рис.3. Переходный процесс в термомодуле.

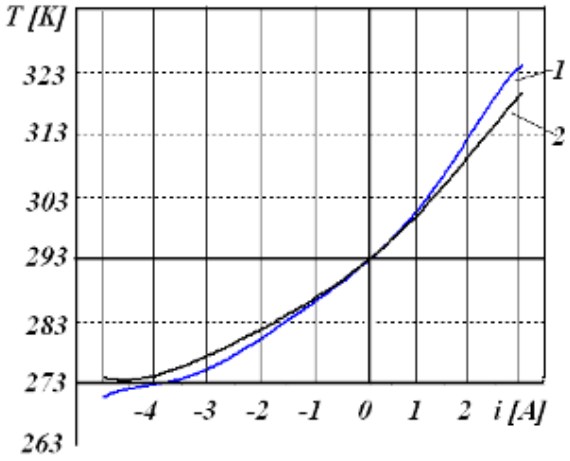


Рис.4. Зависимость установившейся температуры от тока.

Для случая, когда одна сторона термомодуля, соединенная с радиатором, имеющим развитую поверхность и массу много больше чем у термомодуля, позволяет сделать допущение о постоянстве температуры нижних спаев, соединенных с радиатором. Тогда уравнение баланса энергий для верхних спаев, включающее тепло Джоуля, тепло Пельтье и

тепло от теплопроводности между верхними и нижними спаями, в отсутствии тепловой нагрузки и теплообмена с окружающим воздухом можно записать в виде:

$$0{,}5mc\frac{dT_1}{dt} = 0{,}5i^2r + n\alpha T_1 - \frac{2nf\delta}{h}(T_1 - T_0) \qquad (2)$$

Здесь T_1 – температура верхних спаев, T_o – температура равная 293К.
Уравнение (2) является линейным дифференциальным уравнением первого порядка. На рис.3 представлено решение (2) для указанных выше параметров при i= -1А (кривая 3).
Получить уточненное уравнение, описывающее измененение температуры спаев можно исходя из следующих соображений. Так как тепло Пельтье выделяется или поглощается только в месте “p-n” перехода, то в начале переходного процесса интенсивно охлаждаются или нагреваются области материала только вблизи “p-n” перехода и, очевидно, изменение температуры T_1 будет проходить быстрее, чем это следует из решения уравнения (2). В случае, когда тепло Пельтье существенно превосходит тепло Джоуля, уравнение, описывающее изменение температуры рабочих спаев, можно записать в виде:

$$0{,}5\varphi(t)mc\frac{dT_1}{dt} + \left(\frac{2nf\delta}{h} + n\alpha i\right)T_1 = 0{,}5i^2r \qquad (3)$$

Здесь T_1 отклонение температуры спаев от температуры окружающей среды., $\varphi(t)$ – некоторая функция времени, характеризующая изменение количества материала спаев термомодуля, охлаждаемого или нагреваемого теплом Пельтье. Данную функцию можно представить в виде:

$$\varphi(t) = [(1+\varepsilon) - e^{-at}]$$

где: ε – малая величина, характеризующая массу спаев в начале переходного процесса:

$$a = \frac{0{,}48h}{\tau_0}; \quad \tau_0 = \frac{0{,}5mc}{2nf\delta/h + n\alpha i}$$

- термическая постоянная времени термомодуля.

Уравнение (3) является нестационарным линейным дифференциальным уравнением первого порядка, которое может быть представлено в виде:

$$\frac{dT_1}{dt} + P(t)T_1 = Q(t)$$

где:

$$P(t) = \frac{n\alpha i + 2nf\delta/h}{0{,}5mc[(1+\varepsilon) - e^{-at}]}; \quad Q(t) = \frac{i^2r}{mc[(1+\varepsilon) - e^{-at}]}$$

Решение уравнения (3) будем искать в виде [18]:

$$T_1(t) = e^{-S(t)}\left[\int Q(t)\,e^{S(t)}dt + C\right]; \quad S(t) = \int P(t)dt$$

C – постоянная интегрирования. После некоторых преобразований решение уравнения (3) запишется в виде:

$$T_1(t) = \frac{0{,}5i^2r}{n\alpha i + (2nf\delta/H)}\left[1 - \frac{\varepsilon^{\mu}}{[(1+\varepsilon)e^{at} - 1]^{\mu}}\right]$$

$$\mu = 2{,}083/(1+\varepsilon)H$$

Из условия, что при t=0, T_1=0, имеем:

$$C = -\varepsilon^{\mu}\frac{0{,}5i^2r}{n\alpha_0 i + 2nf\delta/h}$$

и соответственно:

$$T_1(t) = \frac{0{,}5i^2r}{n\alpha_0 i + 2nf\delta/h}\left[1 - \frac{\varepsilon^{\mu}}{[(1+\varepsilon)e^{at} - 1]^{\mu}}\right]$$

Из последнего выражения видно, что при t=0 и $\varepsilon\to 0$, величина T_1=0, а при $t\to\infty$, значение T_1 принимает установившееся значение как и по уравнению (2). На рис.3 (кривая 2) представлен переходный процесс, построенный на основании решения уравнения (3) при ε = 0,1. На рис.4 (кривая 1) представлена зависимость установившейся температуры верхних спаев в функции тока через термомодуль (статическая характеристика), рассчитанная по уравнению баланса энергий. Кривая 2 – соответственно экспериментальные значения.

Заключение. Как следует из рис.3, решение уравнения (2) дает переходный процесс более близкий к экспериментальной кривой, чем решение уточненного уравнения (3). Это связано с тем, что здесь рассматривается термомодуль с керамическими пластинами, закрывающими спаи, температура которых и рассчитывается по уравнению (3). В нашем случае уравнение (2) дает усредненное решение, которое ближе к экспериментальным значениям температуры, которые измерялись на верхней стороне керамической пластины. Для термомодуля без верхней керамической пластины, который использовался нами в экспериментальной модели привода, описанного в [16], уравнение (3) будет более точно описывать переходный процесс. Различие расчетных и экспериментальных значений температуры верхней части термомодуля также связано с тем, что представленные математические модели не учитывают теплообмен с окружающей средой. В дальнейшем это можно учесть добавлением в уравнение баланса энергий для верхней части термомодуля члена вида: $\beta S(T_1-T_0)$, где β – коэффициент теплопередачи от поверхности термомодуля к окружающей среде или к тепловой нагрузке, S – поверхность теплообмена. В общем случае коэффициент теплопередачи зависит от многих факторов, в частности от ориетации поверхности в пространстве. Его численное значение может быть определено для конкретной конструкции устройства экспериментально, или с помощью определенных процедур идентификации, например как в [19]. Ограничение интервала времени наблюдения переходного процесса на рис.3 связано с тем, что температура поверхности радиатора в области, прилегающей к зоне контакта после 10 – 15 секунд начинает увеличиваться, что нарушает принятые допущения при формировании математической модели. Из полученных результатов можно сделать вывод, что переходный процесс в собственно термопарах модуля может описываться простыми уравнениями вида (2) или (3), но при этом необходимо добавлять уравнения баланса энергий для элементов конструкции, контактирующих со спаями термопар.

Список литературы

1. CRC handbook of Thermoelectrics / edited by D.M. Rowe. 1995 by CRC Press LLC. Library of Congress Card Number 94-11425. www.crcpress.com
2. Shilpa M.K. et al. A systematic Review of Thermoelectric Peltier Devices: Applications and Limitations.// Fluid Dynamics & Materials Processing. 2023, vol. 19, №1, p. 187 – 206. DOI: 10.32604/fdmp.2022.020351
3. Sulaiman A. et al. Cooling Performance of Thermoelectric Cooling (TEC) and Applications: A review.// MATEC Web of Conferences 225, 03021 (2018) https://doi.org/10.1051/matecconf/20182250.302
4. Zoui M.A. A Review on Termoelectric Generators: Progress and Applications.// Energies. 2020, 13, 3606. https://doi:10.3390/en13143606
5. Owoyele O., Ferguson S., O'Connor B. Performance analysis of a thermoelectric cooler with a corrugated architecture.// Applied Energy. 2015, 147, p. 184 – 191. http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.132
6. Lin C. Magnetic Cooling with Thin Peltier Modules as Thermal Switches.// Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2023, Vol. 570, pp. 170482. doi:10.1016/j.jmmm.2023.170482 (Mitsubishi Electric Research Laboratories. https://www.merl.com
7. Gomes T. Flexible Active Peltier Coolers Based on Interconnected Magnetic Nanowire Networks.// Nanomaterials (Basel), 2023, May 25; 13(11):1735. doi: 10.3390/nano13111735
8. Song J., et al. Bismush-free Mg_3Sb_2 with enhanced room – temperature thermoelectric and mechanical properties.// Journal of Materiomics. 2024, Vol.10, Issue 5, pp. 1103 – 1108. https://doi.org/ 10.1016/j.jmat.2023.11.012
9. Manibalan K., et al. Enhanced Room – Temperature Thermoelectric Performance of 2D-SnSe Alloys via Electric – Current – Assisted Sintering.// Materials. 2023, 16, 509, pp. 2 – 10. https://doi.org/10.3390/ma16020509
10. Golebiowska J., Widomski M. Numerical Assessment of the Experimental Thermoelectric Cooling System Effectiveness.// Journal of Ecological Engineering. 2022, 23(12), pp. 99-110. https://doi.org/10.12911/22998993/154845
11. Kabeel E., et al. Theoretical study of thermoelectric cooling system performance.// Journal of Engineering Research. 2019, Vol. 3, Issue 1, Article 2. https://digitalcommons.aaru.edu.jo/erjeng/vol3/iss1/2
12. Lis S., et al. Optimizing Energy Efficiency in a Peltier – Module – Based Cooling Microunit through Selected Control Algorithms.// Energies. 2024, 17,5031. https://doi.org/10.3390/en17205031
13. Vasilyev G., Kuzichkin O., Surzhik D. Method for Modeling Dynamic Modes of Nonlinear Control Systems for Thermoelectric Modules.// Advances in Dynamical Systems and Applications. 2020. Vol. 15, №2, pp. 187 – 197. https://dx.doi.org/10.37622/ADSA/15.2.2020.187-197
14. Belovski I., et al. Mathematical Model of Thermoelectric Peltier Module.// Journal of Communication and Computer. 2017, 14, pp. 60 – 64. doi:10.17265/1548-7709/2017.02.002
15. Peltier – Thermoelectric Cooler Module Calculator. (TE technology, INC.) https://tetech.com/peltier-thermoelectric-cooler-module-calculator/
16. Ivlev V., Misyurin S., Nelyubin A. Pneumatic Actuator with Gas – Liquid Phase Change Working Fluid. Mathematical Modeling and Experimental Research.// Biologically Inspired Cognitive Architectures./ Studies in Computational Intelligence. 2024, vol. 477, pp. 146 – 154.

https://doi.org/10.1007/978-3-031-76516-2_13
17. Wang Y., et al. Thermoelectric cyclic-thermal regulation: A new operational mode of thermoelectric materials with high energy efficiency.// Joule. 2024, 8, pp. 3201 – 3216. Published by Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.08.002
18. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М. Наука, 1978, -831 с. (Korn G., Korn T. Mathematical Handbook. McGraw – Hill Book Company, 1968).
19. Ivlev V., Misyurin S. To Refining the Thermo – Mechanical Model of Vane Type Air Motor.// Procedia Computer Science 2021, 190, pp. 377 – 387. doi:10.1016/j.procs.2021.06047

Дата поступления: 9 июня 2025 г.