

**СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУКИ,
НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УКЛАДЫ**

ОРИГИНАЛЬНАЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.9:62-09:338.24

JEL: O33, L60

<https://doi.org/10.22394/2410-132X.481>

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ И МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ В ПАРАДИГМЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УКЛАДОВ

А.П. КУЗНЕЦОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская
Федерация; e-mail: apk_53@mail.ru

Аннотация. В статье в исторически обозримой перспективе по доступным литературным источникам с 1893 г. по н.в. рассматриваются технологические методы обработки резанием и металлорежущие станки, реализующие их. Обобщены и систематизированы направления и достижения научных исследований в теории резания и создании станков, их уровень совершенства и эффективности. Целью работы является обоснование уровня значимости факторов и закономерностей изменений эволюции развития во взаимосвязи с парадигмой технологических укладов и их долгосрочного поведения на примере металлорежущих станков как движущего фактора. Методология системного анализа даёт возможность проводить оценку и измерение уровня параметров развития на основании нормативного значения ресурсоэффективности как степени совершенства достижимых показателей технологии, которая реализуется в конструкции станка или технологического оборудования, которые её реализуют. Даются подходы к оценке факторов, формирование которых зависит от технического и технологического состояния по обеспечению достижимости максимальных значений, обусловленных технологическими возможностями их реализации в промышленности и экономике.

Ключевые слова: технологии резания металлов, технологический уклад, эволюция, металлорежущие станки, эффективность

Информация о финансировании: Данное исследование выполнено без внешнего финансирования.

Для цитирования: Кузнецов А.П. Эволюция технологии обработки резанием и металлорежущих станков в парадигме устойчивости технологических укладов. *Экономика науки*. 2024. № 10(4). С. 75–99.
<https://doi.org/10.22394/2410-132X.481>

**CURRENT STATE AND DEVELOPMENT OF THE BASIC AND APPLIED
SCIENCES, NEW TECHNOLOGIES, TECHNOLOGICAL STRUCTURES**

ORIGINAL RESEARCH ARTICLE

UDC: 621.9:62-09:338.24

JEL: O33, L60

<https://doi.org/10.22394/2410-132X.481>

THE EVOLUTION OF CUTTING TECHNOLOGY AND METAL-CUTTING MACHINES IN THE PARADIGM OF TECHNOLOGICAL MODES

A.P. KUZNETSOV

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation; e-mail: apk_53@mail.ru

Abstract. The article examines, from a historically foreseeable perspective, the technological methods of cutting and metal-cutting machines based on available literature. It summarizes and systematizes the directions and achievements of scientific research on cutting theory, as well as the creation of machine tools and their level of perfection. The goal of the study is to demonstrate, through the evidence from metal cutting machines, the significance and effectiveness of changes in economic development in relation to the technological mode. Using systems analysis, the level of development can be assessed based on the normative value of resource efficiency, which measures how well technology indicators are achieved through the design of machines and technological equipment. Factors that influence the formation of these indicators depend on technical and technological conditions and aim to achieve maximum values based on the technological capabilities for their implementation in industry and economy.

Keywords: metal cutting technologies, technological mode, evolution, development, metal-cutting machines, efficiency

Funding: This research received no external funding

For citation: Kuznetsov, A.P. (2024). The evolution of cutting technology and metal-cutting machines in the paradigm of technological modes. Economics of Science, 10(4), 75–99. <https://doi.org/10.22394/2410-132X.481>

*Вся история развития машин
может быть прослежена
на истории мукомольных мельниц*
К. Маркс

ВВЕДЕНИЕ

В работах (Глазьев, Львов и Фетисов, 1992; Глазьев, Айвазов и Беликов, 2019) рассмотрены существенные технологические признаки концепций эволюции технологических укладов, индустриальных и промышленных революций (рисунок 1). Примем также во внимание (Сухарев, 2024b. С. 27), что «под технологическим развитием будем понимать совершенствование технологий, как способов воздействия трансформации, изменений в соответствии с имеющимися или возникающими потребностями», и что в настоящее время формируется новый взгляд на экономику технологий как «направление исследований технологической сферы с позиций экономического содержания» (Сухарев, 2024a. С. 47). Это отражает базовые составляющие принципы технологических основ материального производства. В работе (Кузнецов, 2015; Kuznetsov, Koriath, 2017) приведены и обоснованы схемы методов и закономерностей, позволяющие создать более 140 тыс. технологий промышленного производства – как процесс взаимосвязанного преобразования материала, энергии и информации. Это отражает принципы и базовые составляющие технологических основ материального производства. На примере металлорежущих станков (базовой основы

промышленного и экономического состояния общества) в их исторической эволюции проанализированы и приведены обоснования как необходимое условие существования и их достаточность для возникновения условий такого технологического изменения уклада и как внутри и как условия их смены.

Необходимые виды и формы энергии, способы их формирования, преобразования и передачи являются основными движущими факторами реализации методов обработки – отделения материала как физического процесса разрушения, плавления, испарения. Считается, что достаточно полная динамическая теория простых машин была описана итальянским учёным Галилео Галилеем в 1600 г. в книге «Механика» («О механике»). Он был первым, кто понял, что простые машины не создают энергию, а лишь преобразуют ее.

Примерно 12000 лет назад люди уже умели приспособлять каменные орудия с искусственно обработанными краями к конкретным задачам обработки, с 700 г. до н.э. орудия труда уже изготавливались из железа. В начале XVII в. в связи с постоянными усовершенствованиями технологии и методов выплавки чугуна предпочтительными материалами для использования стали железо и сталь вместо других известных тогда металлов и преобладающего в тот период дерева (рисунок 2), что потребовало создания технологии и методов их обработки.

Целью настоящего исследования является обоснование уровня значимости факторов

Инфратраектории

TV
Авиация
Атомная энергетика
Кондратьевские циклы
Авиатранспорт
Компьютеры (ЭВМ, ПК)
Персональные компьютеры
Интернет
Мультимедиа
Биотехнологии
Нанотехнологии

4-й цикл Кондратьева 5-й цикл Кондратьева

1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020

6)



B)

Figure 1. Scheme of types and period of development of technological modes – a), diffusion of innovations along the rises of cycles of economic activity N.D. Kondratieva – b), industrial revolutions – c)

Материалы, появившиеся в различные периоды времени:

- Металлы:** Золото, Медь, Бронза, Чугун, Сталь, Легкие сплавы, Жаропрочные сплавы, Титан.
- Полимеры:** Древесина, Кожа, Волокно, Кожа клеёная, Резина.
- Композиты:** Камень, Керамика, Кремль, Цемент, Огнеупоры, Кварц плавленый, Эпоксид, Высокомодульный полимер, Проводящий полимер.
- Керамика:** Керамика, Стекло, Бакелит, Нитрон, Полиэтер, Полипропилен, Пластичная инженерная керамика, Функциональная керамика.
- Другие материалы:** Пирокерамика, Армированный пластик, Композит с керамической матрицей, Композит с металлической матрицей.

Легенда:

- Бакелит
- Нитрон
- Полиэтер
- Полипропилен
- Металлокерамика
- Пирокерамика
- Плексиглас
- Полистерол
- Эпоксид
- Высокомодульный полимер
- Проводящий полимер
- Армированный пластик
- Композит с керамической матрицей
- Композит с металлической матрицей
- Пластичная инженерная керамика
- Функциональная керамика

Figure 2. The evolution of the use of materials

77

и закономерностей изменений эволюции развития во взаимосвязи с парадигмой технологических укладов и их долгосрочного поведения на примере металлорежущих станков как движущего фактора. Для достижения поставленной цели требуется: провести анализ эволюции технологии и резания металлов и практики создания станков; разработать методику оценки уровня эффективности и закономерностей процесса изменение эволюции и развития металлорежущих станков как энергоинформационной системы в парадигме «экономики технологий» и технологических укладов.

Общая методология резания металлов

История исследований процесса резания металлов во всех его аспектах и проявлениях концептуально базировалась на принципиальной физической постановке задачи, в которой принимались следующие положения (Кузнецов, 2015):

- физическая модель – удаление (отделение) материала;
- физический процесс – деформирование упругое, пластическое;
- физическое явление – разрушение за счет образования дислокаций, трещин;
- реализация модели процесса (механизмы, машины, оборудование, системы).

Это позволило создать виды представлений, базируясь на физических моделях отделения материала (Партон, 1990) (рисунк 3). Модель разрушения определяет физическую структуру процесса – физическую модель резания – как физический процесс пластического деформирования и разрушения.

Развитие теории и представлений о физических основах разрушения как ранее, так и сейчас, является базой для инженерного описания физических схем резания и решения на их основе практических задач теории резания металлов. В последовательности по годам публикаций автором обобщены схемы и графическое отображение резания металлов и приведены в таблице 1 на основании работ (Челюсткин, 1933; Зорев и др., 1967; Kalpakjian, Schmid, 2009; Малышев, 2011; Grzewski, 2017; Attia et al., 2024).

Необходимо отметить, что схемы резания из таблицы 1 представляют собой всесторонний обзор концепций обрабатываемости резанием материалов с учетом механических, кинематических, динамических, упругих, пластических, геометрических, трибологических и термомеханических видов взаимодействий твердых тел, возникающих на стыках инструмент – стружка – обрабатываемая поверхность. На основании этих схем определяются основные характеристики и параметры, например силы и мощность

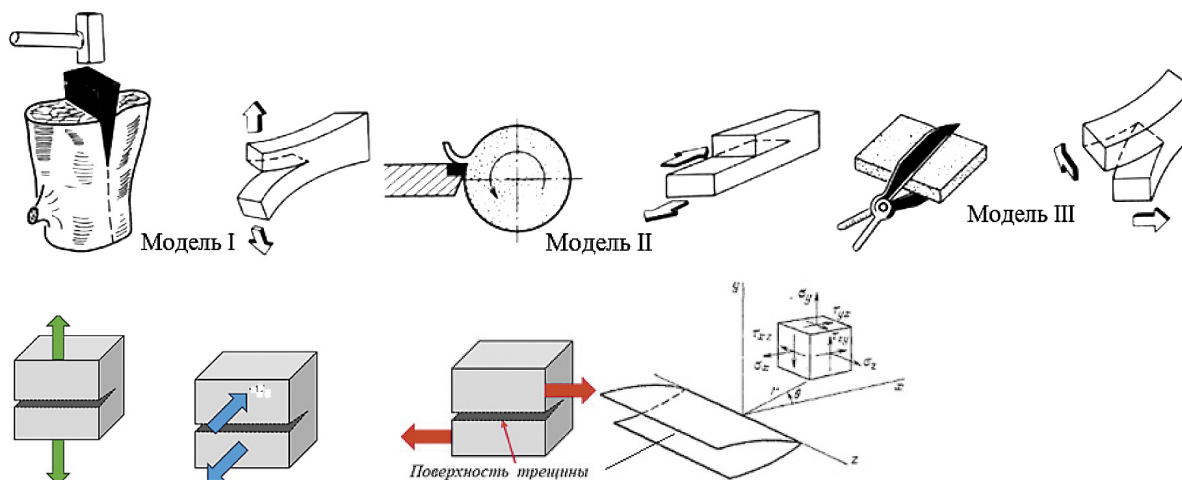


Рисунок 3. Физические модели видов смещений поверхностей трещин
Figure 3. Physical models of types of displacements of crack surfaces

Источник: (Партон, 1990)

Эволюция технологии обработки резанием и металлорежущих станков
в парадигме устойчивости технологических укладов

Таблица 1. Эволюция схем резания металлов
Table 1. Evolution of metal cutting schemes

И.А. Тиме, 1870 	К.А. Зворыкин, 1893 	А.А. Брикс, 1896 	Я.Г. Усачев, 1915
В. Пииспанен, 1936 	Ю.М. Мерчант, 1944 	А.М. Розенберг, 1949 	Е.Х. Ли, Б.В. Шаффер, 1951
Н.Н. Зорев, 1952 	М.К. Шоу, Н.Г. Кук, И. Финни, 1953 	Р. Хилл, 1954 	Д. Кристоферсон, В. Палмер, П.Л.Б. Оксли, 1959
П.Л.Б. Оксли, 1961 	К. Окушима, К. Хитоми, 1961 	У. Джонсон, 1962 	Х. Кудо, 1965
П. Дьюхерст, 1979 	В.П. Астахов, С. Швец, 2004 	А.Л. Воронцов, Н.М. Султан-Заде, А.Ю. Албагачиев, 2008 	

Источник: структура и представление разработано автором

резания, температура, износ, размеры и вид стружки и др.

Наиболее ранние упоминания технологий резания металлов датируются примерно 1100 г. и относятся к работам Теофилус Пресбатера (Германия), который дал описание способов работы резцами, напильниками, шаберами и т.п. К. Кармаш (Германия, 1825 г.) разработал

основы механической технологии и далее происходит постепенный переход от описательного к систематическому изложению механических технологий.

Наука о резании и потребность в её создании и развитии прошла, согласно данным таблицы 1, следующие наиболее существенные этапы в науке резания:

1. Основоположителем научного резания металлов является русский ученый И.А. Тиме, который в 1868–1869 гг. провел обширные опыты по строганию различных материалов и описал их в книге «Сопrotивление металлов и дерева резанию» (1870 г.), где отразил характер деформации и влияние различных факторов на неё, виды стружки, привел формулу для расчета силы резания.

Ради исторической справедливости необходимо отметить, что к первым системными экспериментальными работами по исследованиям процессов резания на станках можно отнести работы француза К-Э. Кокила по определению полезной работы при обработке разных материалов, в частности «Опыты над полезным сопротивлением, возникающим при сверлении кованного железа» (1848 г.); Ж-Э. Жёсселем «Сообщение об опытах над формой резцов, их применением, произведённых на казенном заводе в Индрэ» (1864 г.), в которой он определил, что КПД станка колеблется от 60% до 90% с точки зрения эффективных углов резцов и энергозатрат на снятие стружки при резании чугуна, железа и бронзы; Гартиг – в 1869–1871 гг. на заводах в Хемнице вычислял полезную мощность станка (работу в 1 сек) в лошадиных силах, необходимую для образования 1 кг стружек в 1 час («Опыты над мощностью и расходом работы станков»).

2. В 1893 г. вышла книга профессора Харьковского технологического института К.А. Зворыкина «Работа и усилие, необходимые для отделения металлических стружек», в которой он рассчитал силы резания и экспериментально установил влияние параметров резания (ширины и толщины среза) на расход мощности. Предложена схема сил, действующих на резец, в которой были учтены силы трения на передней и задней поверхностях. Кроме экспериментальных исследований К.А. Зворыкин создал свою теорию резания, в которой он рассматривает, подобно И.А. Тиме, образование стружки как последовательное скалывание элементов. К.А. Зворыкин приходит в своей теории к формуле, выведенной аналитическим путем и выражающей зависимость между удельным давлением и влияющими на него факторами, но далее

отдает предпочтение эмпирические зависимости, что обусловлено большими погрешностями, в полученной им аналитической формулы.

3. В 1896 г. опубликована работа А.А. Брисса «Резание металлов», в которой автор дал глубокий и всесторонний анализ работ как отечественных, так и зарубежных исследователей, систематизировал понятия, терминологию, применяемую в резании. Такие термины, как «режущее лезвие», «передняя грань», «задняя грань», «угол заострения», «задний угол», «передний угол» утвердились в науке о резании металлов и сохранились до наших дней.

4. Выдающейся работой после работ И.А. Тиме и К.А. Зворыкина была работа мастера механических мастерских Петроградского политехнического института Я.Г. Усачева «Явления, происходящие при резании металлов» (1873–1941 гг.), в которой он вышел за рамки представлений резания, как только механики деформирующих сил, и предложил рассматривать как физику процесса резания металлов, учитывающей физико-механических свойствах обрабатываемого металла и процессы происходящие при его пластической деформации. Впервые применил микроструктурный анализ стружек, позволивший увидеть плоскости скалывания и плоскости сдвигов внутри элементов стружки.

5. С исторической точки зрения необходимо отметить публикацию классической работы Ф. Тейлора Ф. «Искусство резать металлы» (1906 г.), в которой было получено простое математическое выражение, связывающее стойкость инструмента со скоростью резания. Кроме этого, цель этих опытов также заключалась в определении наибольших удельных давлений на резец, встречающихся при обработке чугуна и стали, значение величин которых необходимо для рационального конструирования металлообрабатывающих станков. Вторая цель его исследований состояла в определении зависимости между давлением на резец и размерами стружки. Эти сведения были нужны для определения посредством специальных «тэйлоровских счетных линеек» точных размеров стружки, которую может снять каждый станок при всевозможных комбинациях силы, скорости резания и величины подачи.

6. В 1925 г. вышла в свет работа А.Н. Челюсткина «Влияние размеров стружки на усилия резания металлов», в которой рассматриваются только явления, связанные с давлением стружки на резец. Им была «сконструирована счётная линейка» для расчета скорости резания по тому же образцу, что и для давления резания.

7. В годы первых пятилеток (1930–1940 гг.) была создана Комиссия по резанию металлов под председательством Е.П. Надеинской. Под началом Комиссии в качестве руководителей отдельных разработок участвовали будущие ведущие специалисты в области обработки металлов резанием, такие как Г.И. Грановский, П.П. Грудов, М.И. Ларин, А.М. Розенберг, Е.К. Зверев, С.С. Рудник, А.М. Даниелян, Н.И. Резников и др. В результате были созданы общемашиностроительные нормативы режимов резания, а накопленный материал послужил основой для дальнейшего развития теории резания.

Кроме работ, базирующихся на предложенных схемах резания (таблица 1), проводились исследования оптического изучения деформации и напряжений в зоне резания В.Л. Кирпичевым (1913 г.) и А.К. Зайцевым (1927 г.), стружкообразования А.М. Розенбергом (1929 г.), термодинамическая теория резания металлов Н.А. Сафронова (1930 г.), исследование станков и инструментов, проведенные А.М. Игнатьевым (1934 г.), А.В. Панкиным, В.А. Кривоуховым, С.С. Четвериковым, И.М. Беспрозванным, Г.И. Гранковским, С.С. Рудниковым, академиком П.А. Ребиндером (1928 г.) изучение влияния смазочно-охлаждающих жидкостей на процесс резания, В.П. Линником (1931 г.) исследование качества обработки, академиком В.Д. Кузнецовым (1932 г.) физики процесса резания, а также начало исследования лабораторией Оргметалла твердых сплавов типа «победит» (1930 г.).

8. Дальнейшие исследования различных аспектов и процессов при резании посвящены работы по механике стружкообразования (Н.Н. Зорев); динамике резания (А.М. Розенберг); теплофизике резания (А.Н. Резников); изнашиванию инструмента (Т.Н. Лолодзе); охлаждению и смазке (М.И. Клушин); обрабатываемости материалов (Н.И. Резников) и качеству обработки (П.И. Ящерицын).

9. Работы по формированию науки резания металлов проводились и рядом зарубежных исследователей (таблица 1). Так, отходя от эмпирического подхода Ф. Тейлора, в 1941 г. М.Ю. Мерчант и Х. Эрнст разработали теорию механики резания металла, которая привела к концепции специфического параметра энергии резания и определяющего показателя обрабатываемости, который учитывает синергию между углом среза, трением о стружку и геометрией инструмента. В соответствии со схемой Мерчанта-Эрнста процесс резания заключается в последовательном смещении плоских «блоков» толщиной $\Delta x \rightarrow 0$ на расстояние ΔS . Эксперименты по определению угла сдвига, коэффициента трения и касательных напряжений и сил при резании, выполненные М.Ю. Мерчантом, показали удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений. Особо отметим, что в схеме Мерчанта-Эрнста использованы элементы схемы стружкообразования Я.Г. Усачёва и схема В. Пииспанена (см. таблицу 1), а также работы К.А. Зворыкина по определению и расчету сил резания, структуру формулы которого повторяет М.Ю. Мерчант, что может быть объяснено только различными трудностями в доступности и языке указанных и заимствованных М.Ю. Мерчантом и Х. Эрнстом работ.

10. Позже в 1951 г., используя теорию поля линий скольжения, Э. Ли и Б. Шаффер разработали аналитические выражения, которые учитывают образование нароста на кромке. Эти выражения позволяют находить силу резания, толщину стружки и деформацию стружки с учетом геометрии инструмента, соответствующего коэффициента трения и предела текучести обрабатываемого материала. В 1953 г. модель была доработана М.К. Шоу, Н.Г. Кук, И. Финни при обработке инструментом с ограниченным контактом.

Моделирование образования стружки и комплексной теории прогнозирования механической обработки, учитывающей влияние температуры и скорости деформации, была выполнена П. Л.Б. Оксли в 1961 г. Дальнейшие исследования проводились в направлениях выявления закономерностей и изучении физических, химических

и иных явлений в зоне резания и взаимодействия детали и инструмента в местах контакта и соприкосновение их поверхностей, влияние геометрии «клина» инструмента на происходящие физические процессы, рассмотрение структурных характеристик, свойств материалов инструмента и детали, изучения температурного, динамического, электрохимического поведения системы инструмент-деталь.

Обобщая, можно выделить периоды и суть направлений развития и изучения технологических процессов резания материалов:

- до н.э. – 1800 г.н.э. – этап разрозненных экспериментальных исследований процесса резания, накопление практики знаний;
- 1800–1930 гг. – этап поиска научных обоснований процессов резания, накопление экспериментальных данных и научных методов, становление науки о резании металлов;
- 1930–1980 гг. – этап интенсивных научно-экспериментальных исследований, накопление разносторонних знаний и теорий резания, формирование науки резания металлов;
- 1980 – н.в. – этап глубоких научных исследований процессов различной физической природы процесса резания и их физико-математического описания.

Исходя из указанных схем резания, предлагается обобщенная схема базовых методов

обработки (таблица 2) материалов резанием, которые определяются соотношением кривизны детали и инструмента, а в (Кузнецов, 2015) приведены варианты и виды пространственных схем и методов резания.

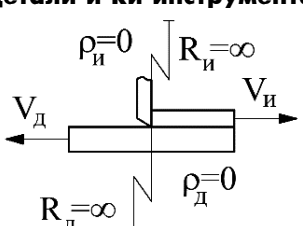
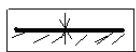
В настоящее время уже рассматриваются модели процесса разрушения, которые можно разделить на уровни относительно размера:

- субмикроскопический уровень (атомные размеры порядка $< 10^{-9} \div 10^{-7}$ м), когда происходит нарушение атомных связей, приводящих к созданию новой поверхности раздела;
- микроскопический уровень (размеры порядка $10^{-7} \div 10^{-5}$ м), когда образуются микротрещины по телу зерен или по их границам в материале;
- макроскопический уровень (размеры порядка $10^{-5} \div >10^{-3}$ м), когда образуются трещины из области концентрации напряжений и происходит их движение внутрь объема материала.

Энергетическая методология развития резания и станков

Сдвиг и отделение материала происходит при равенстве касательных напряжений и действующих сил со стороны детали и инструмента. Касательные напряжения τ_s , определяющие сдвиг дислокации (отделения материала) равны:

Таблица 2. Базовые методы обработки резанием
Table 2. Basic cutting methods

Соотношение кривизны и радиуса R_d детали и R_i инструмента		Кривизна детали ρ_d		
		$\rho_i = \rho_d$	$\rho_d > \rho_i$	$\rho_d < \rho_i$
		0 	>0 	<0 
Кривизна инструмента ρ_i	0 	Стругание	Точение	Протягивание
	>0 	Фрезерование	Шлифование	Растачивание
	<0 	Специальные виды	Специальные виды	Специальные виды

Источник: разработано автором

Эволюция технологии обработки резанием и металлорежущих станков
в парадигме устойчивости технологических укладов

$\tau_s = \tau_{xy} = F_s / A_s$. В рассматриваемом случае, для общего принципиального и существенно значимого понимания энергетической сути процесса, важным является то, что структура силы резания, без излишней детализации, может быть записана обобщенно как (Кузнецов, 2015; Kuznetsov, Koriath, 2019): $F_s = \tau_s \cdot K_s$, где коэффициент K_s определяется рассматриваемой моделью резания и зависит от вида и количества, принимаемых во внимание параметров (геометрических линейных и угловых, физических свойств, например, вида трения и т.п.). Следовательно, можно записать следующую последовательность соотношений:

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} = \frac{F_s \cdot L}{A_s \cdot L} = \frac{F_s \cdot L / t}{A_s \cdot L / t} = \frac{F_s \cdot v}{V / t} = \frac{N}{Q_v} = \frac{J}{V} \quad (1),$$

где F_s – обобщенная сила, Н; A_s – площадь, м²; L – длина (перемещение при резании), м; t – время, с(мин); V – объем, м³; v – скорость, м/с, м/мин; N – мощность, Вт;

$Q_v = V / t$ – удельная производительность, м³/с; J – энергия (работа) резания, Дж; $Q_J = \tau_s = J / V$ – удельная энергоёмкость, Дж/м³.

Физический процесс резания определяет и определяется скоростью удаления материала:

$$Q_v = \frac{F_s \cdot v}{\tau_s} = \frac{\tau_s \cdot K_s \cdot v}{\tau_s} = K_s \cdot v \quad (2).$$

Из выражений (1) и (2) определяются различные, необходимые для поставленных задач параметры и характеристики процесса резания, и энергетические данные для создания станков. В частности, удельная энергоёмкость Q_J (таблица 3) – удельная работа (энергия) физического процесса определена интервалом значений, который зависит от физико-механических характеристик обрабатываемых материалов.

Из концептуальной зависимости (1) и (2) следуют значения диапазонов энергий, необходимых для обработки резанием различных материалов при возможном диапазоне условий резания (таблица 4).

Из этого вытекает, что для осуществления физического процесса резания (разрушения материала) требуется получение, передача, преобразование любого вида и формы энергии в механическую форму в необходимом объёме

Таблица 3. Удельная энергоёмкость видов обработки

Table 3. Specific energy consumption of machining types

Вид обработки	Физический процесс	Удельная энергоёмкость кВт/(см3/с)=кДж/см3
Точение	Пластическая деформация	1 ÷ 10
Фрезерование	Пластическая деформация	1 ÷ 10
Абразивная резка	Плавление	10 ÷ 30
Черновое шлифование	Плавление	20 ÷ 60
Чистовое шлифование	Плавление	60 ÷ 200
Электроэрозионная	Испарение	100 ÷ 1000
Электрохимическая	Ионизация	500 ÷ 2000
Лучевая	Ионизация	100 ÷ 3000

Таблица 4. Удельная энергоёмкость материалов при обработке резанием и шлифованием

Table 4. Specific energy consumption of materials during cutting and grinding

Материал	Алюми- ний и сплавы	Чугун	Сталь	Леги- рованная сталь	Никель, сплавы	Титан, сплавы
Удельная энергоёмкость при резании, 1 кВт·с/см ³	0,4–1	1,1–5,4	2–9	2–5	4,8–6,7	2–5
Удельная энергоёмкость при шлифовании, 1 кВт·с/см ³	7–27	12–60	14–68	18–82	-	16–55

Примечание: 1 кДж = 0,278 Вт·ч = 10³Вт·с; 1 кДж/см³ = 1 кДж/(10³) мм³ = 1 Вт·с/мм³

Источник: (Кузнецов, 2021)

и в течении заданного процессом резания времени. Это является необходимым условием для реализации функции резания, но не достаточным для обеспечения параметров и характеристик самого процесса, их качества и уровня управления и ряда других параметров, например, производительности процесса резания.

В контексте исторического развития необходимо также сказать, что человек для этого процесса, естественно, использовал доступные виды энергии как собственные, так и окружающего мира. Человек может развивать только мощность равную 150–300 Вт, а условное животное (например, лошадь), как отмечал Дж. Уатт – 735,5 Вт. В таблице 5, исходя из

данных (Зворыкин и др., 1962), приводятся сопоставимые данные о производительности (мощности) человека, животных и водяного колеса.

В соответствии с анализом эволюции развития и их характерных особенностей, главной отличительной чертой второго технологического уклада стали паровые двигатели (см. рисунок 1), а динамика изменения мощности двигателей (кроме электрических) приведена на рисунке 4.

Из анализа выражений (1) и (2) определяются также возможно достижимые скорости обработки резанием и их значения в сравнении с достигнутым сегодня уровнем развития (таблица 6).

Таблица 5. Параметры применения силы человека, животного и водяного колеса

Table 5. Parameters of the Use of human, animal, and waterwheel force

Объект	Скорость, м/с	Производительность, кг·м/с
Человек на рычаге	1,10	5,5
Человек на рукояти	0,80	8,0
Человек на вертикальном колесе	0,15	9,6
Осел на приводе	0,80	11,2
Бык на приводе	0,60	39,0
Лошадь на приводе	0,90	40,0
Нижнебойное колесо	3,00	131,0
Верхнебойное колесо	2,50	175,0

Примечание: 1Вт = 0,101972 кг·м/с

Источник: (Зворыкин и др., 1962)

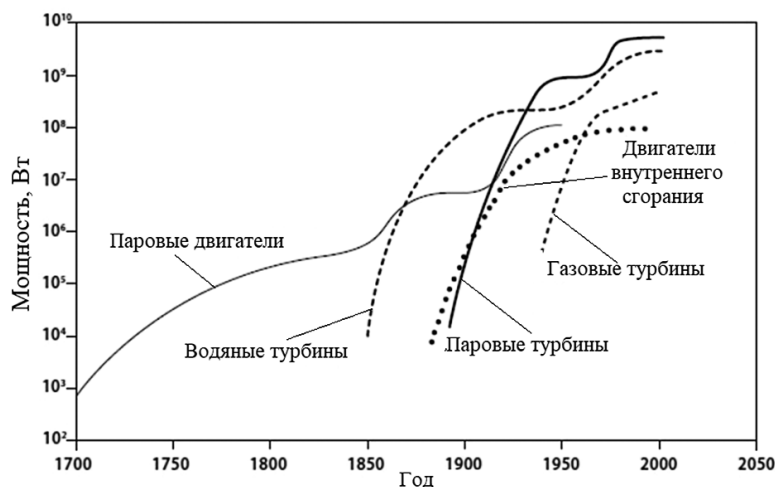


Рисунок 4. Динамика изменения мощности двигателей

Figure 4. Dynamics of engine power changes

Источник: (Смил, 2023)

Таблица 6. Соотношения скоростей звука и распространения трещины
Table 6. Ratios of sound velocities and crack propagation

Материал	Скорость звука, м/с	Скорость распространения трещины, м/с (x10 ³ м/мин)	Достигнутая скорость резания, x10 ³ м/мин	Достигнутая/ скорость трещины, %
Алмаз	12 000	7200 (432)	н/д	
Алюминий, сплавы	6200	2350 (141)	8,2	5,8
Чугун	3850	1460 (88)	4,7	5,35
Сталь	5030	1900 (114)	4,0	3,5
Легированные стали	5850	2200 (132)	4,5	3,4
Титан, сплавы	4700	1780 (107)	2,3	2,15
Никель, сплавы	5600	2100 (126)	0,35	0,3

Источник: разработано автором

Очевидно, что потенциал роста скоростей резания достаточно велик, а достигнутая скорость резания составляет не более 5–6% от теоретически и физически достижимого (идеального) уровня значений.

Методология и анализ развития конструкций металлорежущих станков

Широкое распространение машин-орудий, а затем и паровых машин требовало повышения точности обработки деталей. Эта задача могла быть решена только с изобретением машин для производства машин и в первую очередь – металлорежущих станков. Перед инженерами того времени стояла задача получения изделий определенных размеров и форм, при этом требовалось увеличить масштабы выпуска металлообрабатывающего оборудования. Создание текстильных и прядильных станков, паровых машин и т.п., их быстрое распространение выдвинуло ряд новых требований к металлообрабатывающему оборудованию, в частности, к его производительности, точности и эффективности. Так, например, после того как текстильные машины стали производить тонкую и непрочную нить, в них не допускались отклонения в размерах деталей и режиме работы механизмов, как это имело место в технических средствах, применявшихся ранее. Производство таких текстильных машин стало возможно лишь в результате качественных сдвигов в технологии их изготовления. А требования и потребность

обеспечения относительно быстрого выпуска технологических машин различного назначения, в частности текстильных для удовлетворения потребностей в тканях и одежде, обуславливали необходимость роста не только количества металлорежущих станков, но повышение их производительности при заданном качестве.

Ниже рассмотрим в исторической перспективе развитие и конструктивное совершенство станков, представленные в таблице 7, на базе обобщения доступных публикаций (Загорский, 1960; Зворыкин и др.1962; Carlson, 1983; McNei, 1990; Dornfeld, Lee, 2008).

Развитие науки и знаний на ранних периодах эволюции техники позволяли применять как геометрическое, так и механическое понимание этого процесса. Лучковый привод – приспособление для вращения детали или рабочего инструмента был, таким образом одним из первых узлов будущего станка. Он был известен и с успехом применялся в Древнем Египте около 4000 лет назад. К VI в. до н.э. относится изобретение токарного станка, которое приписывают Феодору Самосскому. На токарном станке обрабатывали не только деревянные изделия, но и литые из бронзы сосуды, зеркала.

Со временем появились токарные станки с ножным приводом. Они работали, как и лучковые, но могли быть использованы одним человеком. Токарный станок с пружинным шестом был разработан в 13 в. для изготовления цилиндрических деревянных деталей. Один конец веревки был связан с разрезаемой частью, другой

конец – с пружинным столбом, а энергия передавалась с помощью ножной педали. Режущие инструменты затем прижимали к вращающейся части для создания цилиндрических поверхностей.

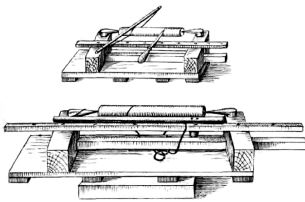
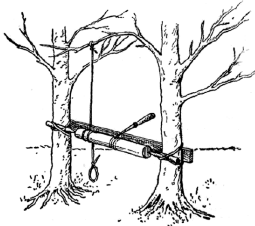
В 1518 г. был изготовлен станок императора Максимилиана. Он имел металлические центры и подвижный люнет, перемещающиеся по направляющим. Примерно в 1570 г. Жак Бессон создаёт токарный станок для нарезания резьбы. В середине XVIII в. Джон Смитон разработал токарный станок Great Wheel, который приводился в действие приводным шнуром или ремнем, прикрепленным к большому колесу. Революционизирующую роль при этом должны были сыграть изобретения, которые позволяли переместить инструмент из рук рабочего в сам станок, сделать его неотъемлемой частью этого станка, превратить сложное орудие в собственно машину. Только это могло должным образом повысить производительность и обеспечить массовый выпуск необходимых машиностроению деталей.

В ранних конструкциях станков прослеживаются очевидные элементы токарного станка: неподвижная часть – станина, бабки для детали,

подставки для орудий – резцов и т.п. Вращение детали и подача резца требовали приложения огромных усилий человека. До начала XVIII в. изготовление деталей на станке выполнялось рабочим, который был вынужден удерживать обрабатывающий инструмент в руке, а также до этого токарные работы выполнялись при помощи примитивных держателей резца, что не позволяло обеспечить необходимую точность обработки. В 1717 г. А.К. Нартов оснастил суппортом резцедержателем, построенный им же, токарный копировальный станок и только ближе к концу столетия конструкция А.К. Нартова была изучена и стала отправной точкой для создания управляемого механического суппорта английским механиком и изобретателем Генри Модсли. Дальнейшее развитие устройства таких «токарных станков» привело к их постепенному усовершенствованию и до появления первых энергетических машин (начиная от водяных и далее паровых) дополнялось элементами и устройствами, облегчающими труд человека и увеличивающих производительность – как основную потребность общества. Очевидно, что на таких станках обрабатывались не только изделия из дерева.

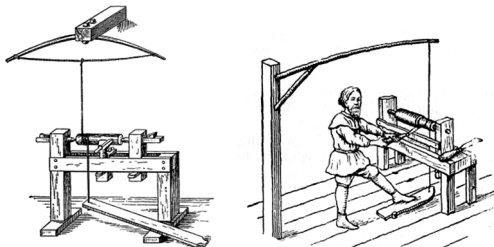
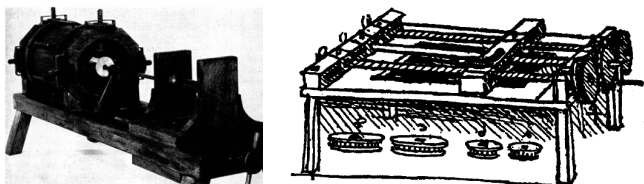
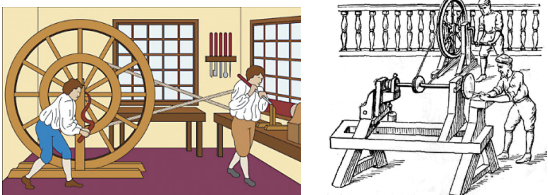
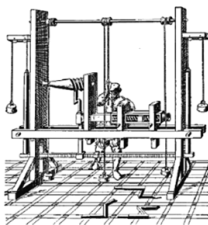
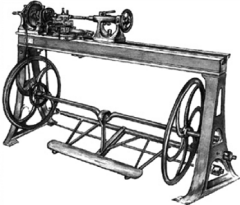
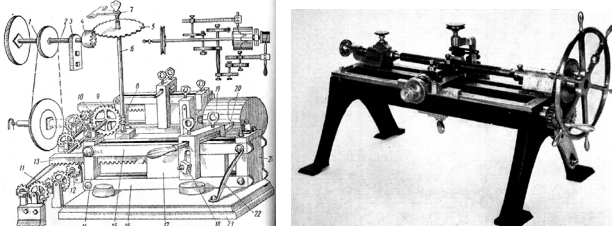
Таблица 7. Эволюция создания и развития токарных и расточных станков

Table 7. Evolution of the creation and development of lathes and boring machines

Год	Автор	Тип станка	Вид
н/д	Не известен	Принцип разрушения и удаления/энергия человека	
V в. до н.э.	Не известен	Токарный	
1395	Не известен	Токарный	

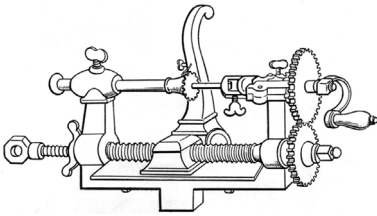
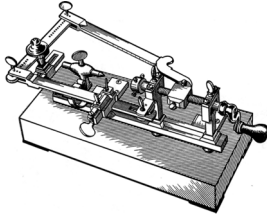
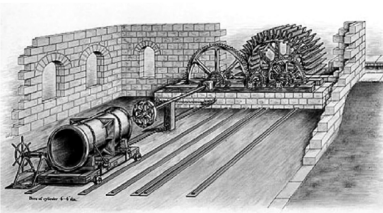
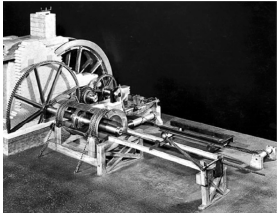
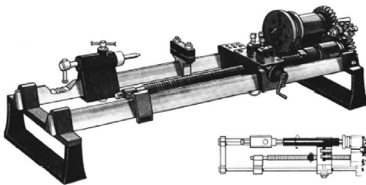
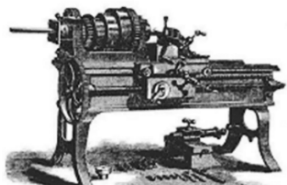
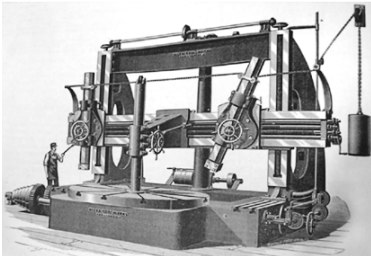
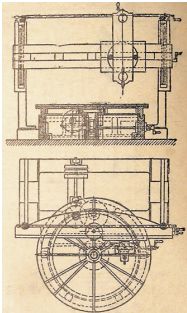
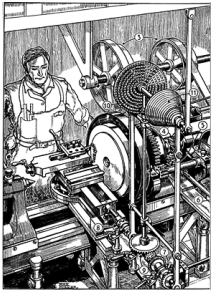
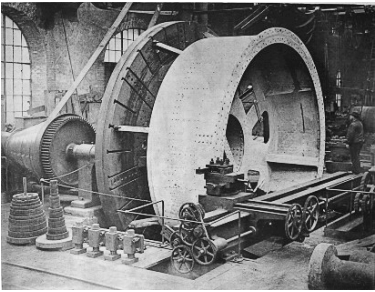
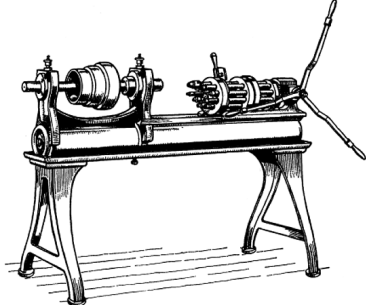
Эволюция технологии обработки резанием и металлорежущих станков
в парадигме устойчивости технологических укладов

Продолжение таблицы 7

1400	Не известен	Токарный	
1480-1500	Leonardo Da Vinci	Расточной, винторезный	
1500	Не известен	Токарный	
1500	Не известен	Шлифовальный	
1569	J. Besson	Токарный винторезный/копировальный	
1800	неизвестен	Токарный	
1712 – 1721	А. К. Нартов	Токарно-копировальный	

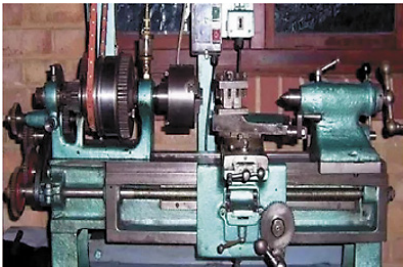
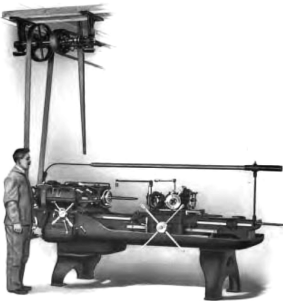
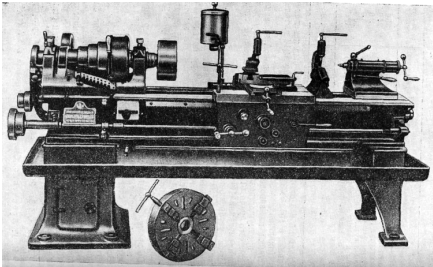
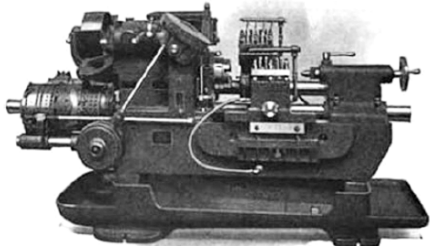
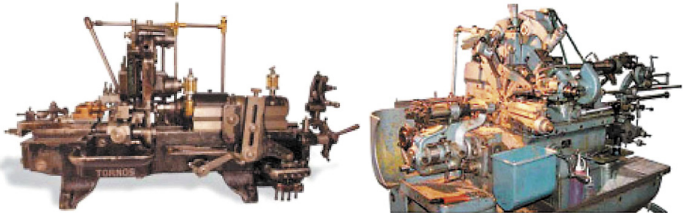
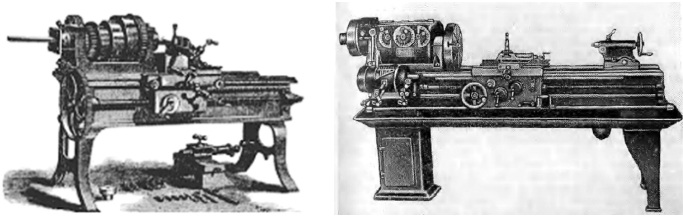
Эволюция технологии обработки резанием и металлорежущих станков
 в парадигме устойчивости технологических укладов

Продолжение таблицы 7

1741	Швейцария, Франция	Токарный (фузейный)		
1769, 1776	J. Wilkinson	Расточной		
1797, 1800	H. Maudsley	Токарный с суппортом		
1800–1839	И. Г. Бод- мер (патент 1939 г.)	Токарно- карусельный		
1827	Clement	Лоботокарный		
1848	S. Fitch	Токарно- револьверный		

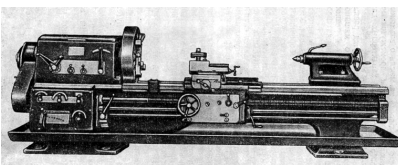
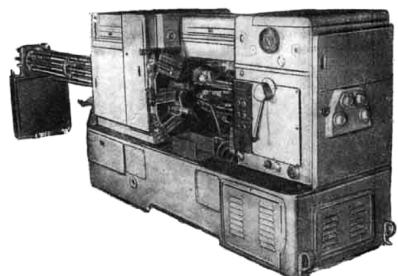
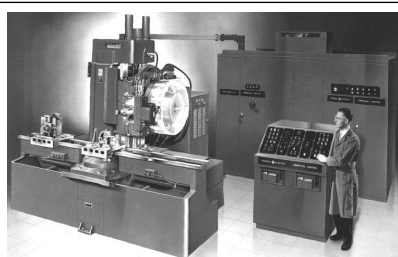
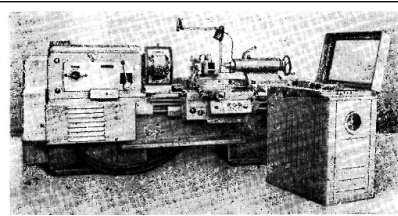
Эволюция технологии обработки резанием и металлорежущих станков
в парадигме устойчивости технологических укладов

Продолжение таблицы 7

1873	Spencer	Токарный одношпиндельный автомат	
1910	J. Hartness	Токарно- револьверный	
1915	3-д Бромлей (далее «Крас- ный пролета- рий»)	Токарный	
1921	F. K. Fay	Токарный автомат с кулачковым управлением	
1925, 1950	TORNOS, BECHLER	Станок Швейцарского типа (продольного точения)	
1926 1931	Ижевский 3-д	Токарно- винторезный «Удмурт»	

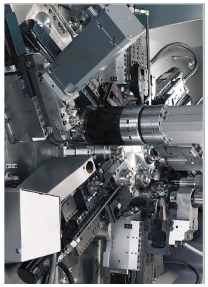
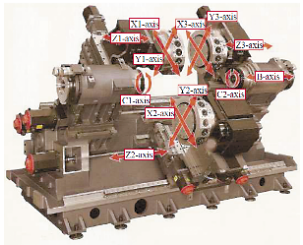
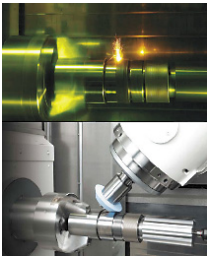
Эволюция технологии обработки резанием и металлорежущих станков
 в парадигме устойчивости технологических укладов

Продолжение таблицы 7

1932	З-д «Красный пролетарий»	Токарно-винторезный «ДИП»	 
1947	З-д им. С. Орджоникидзе	Многошпиндельный автомат	
1952 (1958)	J. Parsons, F. Stulen, MIT, Bendix Corp.	Обработывающий центр	
1962– 1964; 1967	З-д «Красный пролетарий»; Рязанский з-д	Токарный с ЧПУ 1К62ПУ; 1М63ПУ	
1970	Коломенский з-д, Модель КУ299	Карусельный	
1980	Бердичевский з-д Модель 1В340Ф30	Токарно-револьверный с ЧПУ	

Эволюция технологии обработки резанием и металлорежущих станков
в парадигме устойчивости технологических укладов

Продолжение таблицы 7

2000	Index	Многошпиндельные с ЧПУ	 
1982–2016	OKUMA	Токарно- револьверный с ЧПУ	 
2012	Index	Многофункцио- нальный: точение, фрезерование, шлифование	 
2015	OKUMA, MULTUS U5000 LASER EX	Многозадачные: лазерная закалка, точение, фрезерование и шлифование	 

Источник: обобщено и систематизировано автором

Требования к необходимости достижения изделиями высоких показателей степени идеальности (рисунок 5) и её постоянный рост особенно ярко проявляются в таких отраслях как астрономическая, авиационная, космическая, атомная, электронная, медицинская, биологическая и некоторых других.

Так как целью воздействия энергии является изменения и/или состояния, и/или структуры, и/или свойств, то все эти процессы сопровождаются реальными физическими явлениями: упругим деформированием, пластическим

деформированием, диффузией, испарением и т.п. Пластическая деформация зависит от того, как и в каком порядке прикладываются силы, что позволило создать такие технологические процессы, как обработка резанием, штамповка, ковка, волочение. Таким образом, многообразие форм взаимодействия материи, энергии и информации, обуславливает множество видов технологических процессов и реализующего эти технологии оборудования. Энергоинформационная модель производства деталей представлена на рисунке 6, где для случая обработки

Эволюция технологии обработки резанием и металлорежущих станков
в парадигме устойчивости технологических укладов

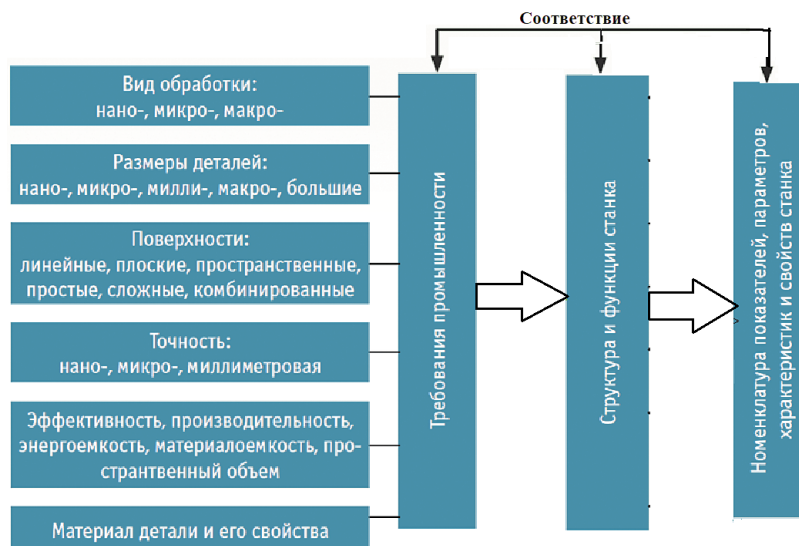


Рисунок 5. Взаимосвязь требований производителей и потребителей станков

Figure 5. The relationship between the requirements of manufacturers and consumers of machine tools

Источник: разработано автором

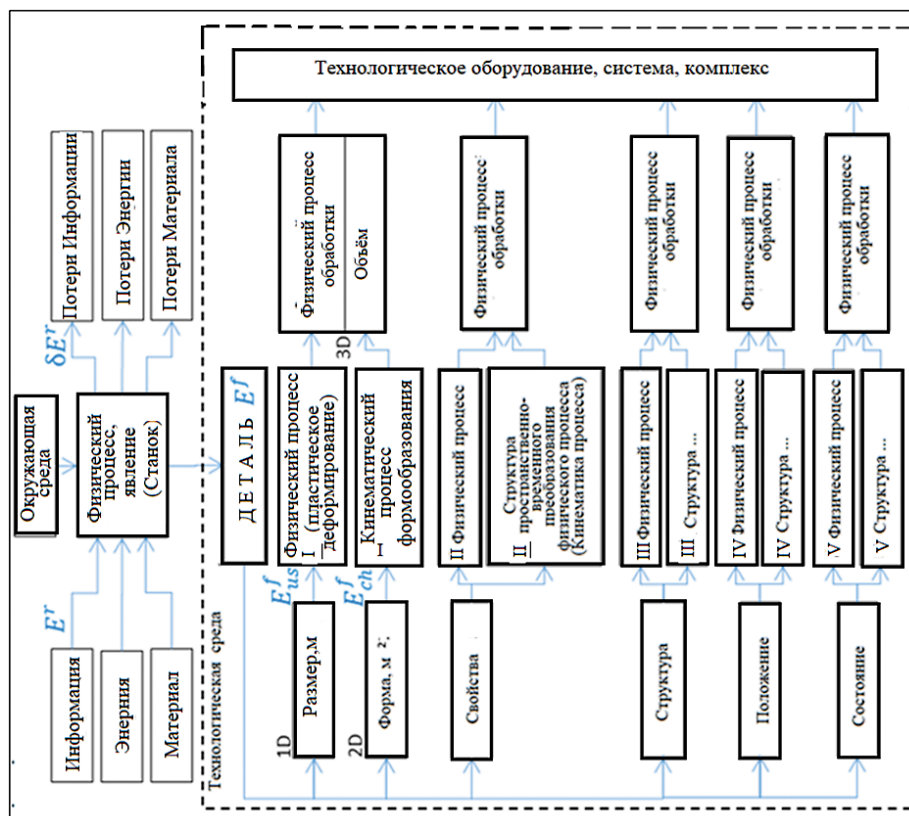


Рисунок 6. Энергоинформационная модель технологического оборудования
Figure 6. Energy information model of technological equipment

Источник: разработано автором

Эволюция технологии обработки резанием и металлорежущих станков
в парадигме устойчивости технологических укладов

резанием выделены составляющие, обеспечивающие формирования размера детали – физический процесс пластического деформирования выполняется инструментом, а форма и поверхности детали – физический процесс формообразования поверхностей – рабочими органами станка. Другие характеристики и параметры детали (обозначены как свойства, например, шероховатость, структура, состояние, например, твердость, и т.п.) формируются иными методами обработки. Из указанной схемы следует, что каждому физическому процессу и технологическому методу соответствует свой доминирующий или главный показатель качества детали.

Методология оценки эволюции и развития металлорежущих станков в парадигме технологических укладов

В результате качественного изменения технических систем в ходе эволюционного развития технологических укладов возник ряд важных вопросов, связанных с созданием, организацией и управлением производственными технологиями и производственными системами. В настоящее время во всех технологически развитых странах происходит рост количества и разнообразия выпускаемых изделий. Ускорение необходимости выпуска новых изделий выражается не только в быстром обновлении их номенклатуры, но и в увеличении количества их однотипных видов (разнообразия), при этом сами изделия становятся сложнее. Появление новых форм и видов изделия, выполняющего конкретные технические задачи, обусловлено и продиктовано использованием и практическим применением, технически и технологически осуществимых новых физических законов и явлений. Быстрая замена изделий новыми и новейшими рассматривается как показатель научно-технического прогресса.

Эволюция достижимых показателей, параметров, характеристик, свойств технологического оборудования обусловлена, в первую очередь, требованиями, потребностями (рисунк 5) и направлениями развития общества и, в частности, промышленности. Это определяет и необходимый для этого уровень

развития технологий, техники, требования к её деталям, узлам, механизмам, устройствам и системам, потенциал технологий и процессов, используемые ими физические принципы и явления, уровень их совершенства и др.

Учитывая изложенное, представляется возможным представлять процесс изменения (эволюцию) достижимых показателей, параметров, характеристик в соответствии с *рисунком 7а*. Развитие технологий и технологического оборудования (*рисунк 7б*) идет в направлении роста (приближения к физико-технической идеальности) и увеличения полезных характеристик и свойств (мощности, производительности, точности, жесткости, прочности и т.п.) с одновременным снижением причин потерь при функционировании (трение, износ, вибрации, прочность, потеря времени и т.д.) и затрат (вес, трудоемкость, габариты и т.п.) на их производство. Идеальной считается технологическое оборудование с максимально полным использованием потенциала физических законов, явлений, процессов, возможностей конструкции и технологии, реализующих этот физико-технический потенциал. В то же время относительные показатели технологического оборудования (КПД, ресурсоэффективность, надежность...) и удельные показатели определяют обобщенные или интегральные свойства. Технические и физические характеристики и свойства технологий и оборудования являются главной и наиболее важной частью, определяющей их полезность и, соответственно, эффективность, конкурентоспособность и прогрессивность.

Каждый раз, когда прогресс производственной технологии уже не может обеспечить значительный рост производительности и эффективности, на смену существующему технологическому оборудованию приходит новое оборудование более совершенной конструкции. Это дает новый толчок развитию, что будет продолжаться до тех пор, пока и новое технологическое оборудование не исчерпает свой ресурс (*рисунк 7б*). Таким образом, эволюция изменений технологий и технологических машин есть сочетание непрерывного прогресса самой технологии с периодическими

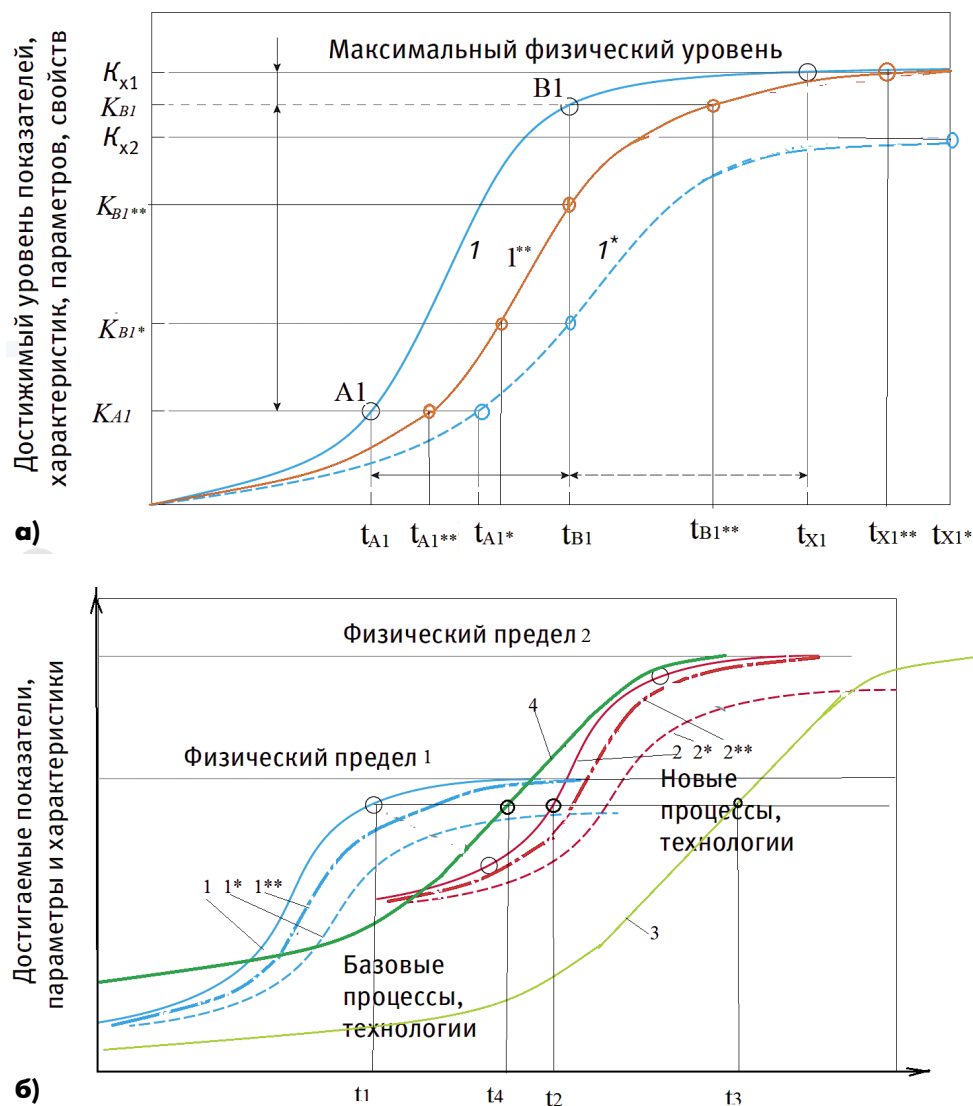
Эволюция технологии обработки резанием и металлорежущих станков
в парадигме устойчивости технологических укладов

Рисунок 7. Характерный вид сценариев видов S – образных функций развития – а), сценарии изменений новых видов технологий, техники, систем – б)
Figure 7. A typical type of scenarios for the types of S – shaped development functions – а), scenarios for changes in new types of technologies, equipment, systems – б)

Источник: [Кузнецов, 2024]

революционными преобразованиями как технологий, так и конструкции машин.

Анализ функции изменения показателей эволюции или развития показывает (Кузнецов, 2024), что при росте т.е. увеличении значений величины показателя и характеристик технологии, процесса, оборудования, стоимости затрат и т.п. (например, производительность) от начального значения (худший показатель или

начало развития) до больших величин, как предел развития или лучший показатель $t[0 \rightarrow \infty]$. В этом случае характерной закономерностью и функцией будет являться S – образная кривая на рисунке 8а, вид которой эквивалентен закономерности, которая описывается зависимостью $y(t)$. И наоборот, когда считается наилучшим достигаемый положительный результат, если изменения показателей (например,

Эволюция технологии обработки резанием и металлорежущих станков
в парадигме устойчивости технологических укладов

точность) происходят от худшего (абсолютная его величина имеет наибольшее значения) к лучшему (т.е. числовое значение показателя минимальное), то тогда поведение функции происходит с изменением величин диапазона значений (от большего к меньшему). Следовательно, характерной закономерностью и функцией является $z(t)$ – образная кривая, как это представлено на рисунке 8а:

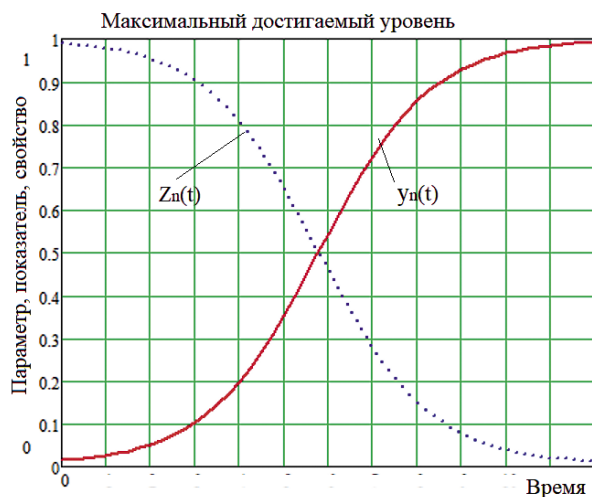
$$y(t) = k_2 \cdot \left[\xi_k + \frac{1 - \xi_k}{1 + b \cdot \exp[-\alpha \cdot k_2 \cdot (1 - \xi_k) \cdot (t + t_{-t_0})]} \right] = k_2 \cdot y_n(t) \quad (3),$$

$$z(t) = k_2 \cdot \left[1 - \frac{1 - \xi_k}{1 + b \cdot \exp[-\alpha \cdot k_2 \cdot (1 - \xi_k) \cdot (t + t_{-t_0})]} \right] = k_2 \cdot z_n(t) \quad (4),$$

где $U_{\text{н}}(t) = y(t)$ – значения показателя, характеристики, свойства рассматриваемой технологии, оборудования, системы; $\xi_k = (k_0/k_2)$; k_2 – технологический предел; k_0 – начальное значение; $b = b_{\text{н}} + b_{\text{н}}$; $b_{\text{н}}$ – характеристика изменения значения «идеальной» технологии; $b_{\text{н}}$ – характеристика изменения состояния фактического технического уровня совершенства значения идеальной технологии; α – скорость

изменения значений показателей технологии; t_0 – время начала рассмотрения процесса изменения технологии; t – время (затраты) действия технологии.

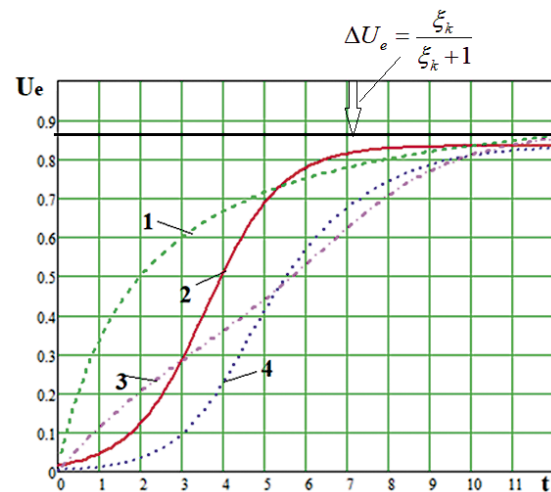
Единство феноменологических законов (Кузнецов, 2015; Putz, Koriath, Kuznetsov, 2019; Кузнецов, 2021; Кузнецов, 2024), описывающих процессы трансформации, преобразования, передачи различных форм и видов энергии, материалов, вещества и информации, определяет и обуславливается их независимостью от структуры, конструкции, компоновки, технического и технологического исполнения любого технологического оборудования и металлорежущих станков, в частности. Эта модель, как система содержит *начальные условия*, задаваемые величиной энергоинформационных потоков физических процессов, и *граничные условия*, которые определяются и зависят от достигаемых фактических и реализуемых значений параметров на пути преобразования энергоинформационных потоков. Тогда эволюция изменения и развития показателей и характеристик, содержательно отражающих этот процесс в течении заданного или требуемого периода рассмотрения,



а)

Рисунок 8. Нормированные значения S – образной и Z – образной функций – а), виды функции эффективности при различных соотношениях составляющих – б)

Figure 8. Normalized values of the S – shaped and Z-shaped functions – а), types of efficiency functions at different ratios of components – б)



б)

Источник: разработано автором

может быть описана (Кузнецов, 2015; Кузнецов, 2021; Putz, Koriath and Kuznetsov, 2019) нормированной зависимостью изменения эффективности вида:

$$U_e = \frac{E_{us}^f + E_{ch}^f}{(E_{us}^f)^r + (E_{ch}^f)^r} = \frac{E_{us}^f + E_{ch}^f}{E_{us}^f + (\Delta E_{k,n})_{us}^f + E_{ch}^f + (\Delta E_{k,n})_{ch}^f} =$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{(\Delta E_{k,n})_{us}^f + (\Delta E_{k,n})_{ch}^f}{E_{us}^f + E_{ch}^f}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta E}{E_{us}}} \quad (5)$$

Анализ и обоснование для всех видов эффективностей показал аналогичность их типовых закономерностей изменения уровня эффективности применения ресурса (технологии). Следует особо отметить и подчеркнуть, что эта закономерность носит экспоненциальный характер (рисунки 8б) в отличие от S – образной кривой, принятой нами как характеристика развития любых технических, технологических и экономических систем. Экспоненциальная закономерность процесса поведения систем соответствует такому изменению, когда достижение предела или достижимого уровня значений происходит по пропорциональному и равномерному закону изменения и является теоретическим или идеальным пределом формы и вида скорости изменения поведения системы, когда не учитываются также изменения ни величины, ни вида изменения параметров, препятствующих этому – т.е. являются постоянной и линейной величиной.

Наиболее характерными являются следующие варианты рассмотрения изменения функции U_e , когда $k_2 = \Delta k_2$ и $F_n(t) = \Delta F_n(t)$, т.е. достижимый уровень совпадает с максимальным уровнем потерь, а их скорости изменения равны, и тогда $U_e = 0$.

$$U_e = \frac{1}{1 + \frac{\Delta E}{E_{us}}} = \frac{1}{1 + \frac{k_2 [1 - F_n(t)]}{k_2 [\xi_k + F_n(t)]}} = \frac{1}{1 + \frac{[1 - F_n(t)]}{[\xi_k + F_n(t)]}} \quad (6),$$

$$\text{где } F_n(t) = \frac{1 - \xi_k}{1 + b \cdot \exp[-\alpha \cdot k_2 \cdot (1 - \xi_k) \cdot (t + t_{-t_0})]}$$

Рассмотрим следующие случаи (рисунки 8б), когда:

- $\Delta E = \text{const}, E_{us} = m \cdot t$;
- $\Delta E = \text{const}, E_{us} = k_2 \cdot [\xi_k + F_n(t)]$;
- $\Delta E = k_2 \cdot [1 - F_n(t)], E_{us} = m \cdot t$;
- $\Delta E = k_2 \cdot [1 - F_n(t)], E_{us} = k_2 \cdot [\xi_k + F_n(t)]$,

где m – масштабный фактор времени.

Значение функции U_e (величина безразмерная) не достигает своего максимально возможного значения равного единицы, что обусловлено достижимой возможностью технологического воплощения научно-технических знаний (экспериментальных, научных и иных) и конструкторско-технологических решений в объекты техники (технологическое оборудование, станки, механизмы, устройства, аппараты), которые реализуют физические принципы процессов и технологий. Этот показатель характеризует также степень совершенства развития науки, техники и технологий в рассматриваемой области производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подход к оценке развития и закономерностей эволюции, на примере станков показал, что полученные выражения достаточно хорошо описывают причины и факторы, которые определяют особенности и принципы изменения такого поведения в направлениях совершенствования технологий, оборудования и систем. Выражение эффективности в виде приведенных зависимостей является универсальным методом оценки, поэтому применимо к анализу любых станков и систем, в том числе осуществляющих и одновременное преобразующих нескольких видов ресурсов. Этот метод дает возможность сопоставлять степень совершенства протекающих процессов, что обусловлено возможностью учета всех видов потерь как при переносе (передаче) энергии, материи и информации от источника к преобразующим механизмам и устройствам, системам, так и при преобразовании в них самих. Предложенные показатели эффективности имеют одну и ту же закономерность изменения, а их непропорциональность изменения друг относительно друга (в т.ч., учитывая принятый постулат их независимости) позволяют

Эволюция технологии обработки резанием и металлорежущих станков
в парадигме устойчивости технологических укладов

находить обоснования закономерностям изменения технологических укладов, а также границ их продолжительности, условий перехода, замены или исчезновения исходя из показателей свойств их эффективности энергетической, производительности или скорости

изменения свойств, параметров и точности производственных систем. Кроме того, на этой методологической основе дополнительно можно будет рассмотреть их информационную эффективность и информационные методы их оценок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Акаев А.А. Математические основы инновационно-циклической теории экономического развития Шумпетера – Кондратьева. В кн. Кондратьевские волны: аспекты и перспективы: ежегодник / Отв. ред. А.А. Акаев, Р.С. Гринберг, Л.Е. Гринин, А.В. Коротаев, С.Ю. Малков. Волгоград: Учитель, 2012. С. 314–341.
2. Глазьев С.Ю., Айвазов А.Э., Беликов В.А. Циклически – волновые теории экономического развития и перспективы мировой экономики. Предсказуемо ли среднесрочное и долгосрочное развитие мировой экономики // Труды ВЭО России. 2019. Т. 219. С. 177–211.
3. Глазьев С.Ю., Львов Д.С., Фетисов Г.Г. Эволюция технико-экономических систем: возможности и границы централизованного регулирования. Москва: Наука, 1992. 208 с.
4. Загорский Ф.Н. Очерки по истории металлорежущих станков. Москва: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 282 с.
5. Зворыкин А.А., Осьмова Н.И., Чернышев В.И., Шухардин С.В. История техники. Москва: Соцэкгиз, 1962. 772 с.
6. Кузнецов А.П. Структуры процессов и оборудования для обработки резанием. Ч. 1. Структуры оборудования обработки резанием // Вестник машиностроения. 2015. № 2. С. 73–83.
7. Кузнецов А.П. Структуры процессов и оборудования обработки резанием. Часть 3. Модели и структуры обработки резанием // Вестник Машиностроения. 2015. № 4. С. 76–87.
8. Кузнецов А.П. Тенденции в развитии и эффективном производстве станков. Часть 2. Энергоинформационная модель // Станкоинструмент. 2021. № 3 (24). С. 30–43. <https://doi.org/10.22184/2499-9407.2021.24.3.30.43>
9. Кузнецов А.П. Технологический суверенитет в станкостроении. Состояние и развитие // Станкоинструмент. 2024. № 2. С. 34–55. <https://doi.org/10.22184/2499-9407.2024.35.2.34.55>
10. Малышев В.И. Очерки истории науки о резании материалов. Тольятти: ТГУ, 2011. 216 с.
11. Партон В.З. Механика разрушения: От теории к практике. Москва: Наука, 1990. 240 с.
12. Развитие науки о резании металлов / пред. ред. Н.Н. Зорев. Москва: Машиностроение, 1967. 416 с.
13. Смил В. От микроорганизмов до мегаполисов. Поиск компромисса между прогрессом и будущим планеты. Москва: ЭКСМО, 2023. 704 с.
14. Сухарев О.С. «Экономика технологий» как направление науки: ретроспектива и перспектива // Экономика науки. 2024а. № 10(1). С. 41–53. <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2024-10-1-41-53>
15. Сухарев О.С. Измерение технологического развития: проблемы и способы их преодоления // Станкоинструмент. 2024б. № 3. С. 26–55. <https://doi.org/10.22184/2499-9407.2024.36.3.26.32>
16. Челюсткин А.Н. Теория резания. Москва: Госмашметиздат, 1933. 270 с.
17. Ashby M.F. Materials selection in mechanical design. Oxford: Pergamon Press, 2005. 604 p.
18. Attia H., Sadek A., Altintas Y., et al. Physics based models for characterization of machining performance – A critical review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2024. № 51. P. 161–189. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.04.008>
19. Carlson Bo. The Development and Use of Machine Tools in Historical Perspective // IUI Working Paper. 1983. № 97, The Research Institute of Industrial Economics (IUI), Stockholm
20. Dornfeld D., Lee D-E. Precision Manufacturing. New York: Springer, 2008. 775 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68208-2>
21. Grzesik W. Advanced Machining Processes of Metallic Materials. Theory, Modelling, and Applications, Elsevier B.V., 2017. 578 p.
22. Kalpakjian S., Schmid S.R. Manufacturing engineering and technology. Prentice Hall, 2009. 1180 p.
23. Kuznetsov A.P., Koriath H.J. A new systematic approach to the description of processes and their classification. 14th Global Conference on Sustainable Manufacturing, GCSM 3–5 October 2016,

Stellenbosch, South Africa // *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 8. P. 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.025>

24. Kuznetsov A.P., Koriath H.-J. Energy – information regularities of increasing productivity in metalworking machine tools. IV International Conference “Modeling of Nonlinear Processes and Systems”, MNPS-2019 // *EPJ Web of Conferences*. 2019. Vol. 224. P. 1–8. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201922405008>
25. McNei Ian. An Encyclopedia of the History of Technology. London: Taylor & Francis, 1990. 1088 p.
26. Putz M., Koriath H.-J., Kuznetsov A.P. Resource consumption classes of machine tools. Special Issue. HSM 2019 15th International Conference on High Speed Machining October 8–9, 2019, Prague, Czech Republic // *MM Science Journal*. P. 3301–3309. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019_11_2019085
27. Zhang C., Yang J. A History of Mechanical Engineering. Singapore: Springer, 2020. 555 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0833-2>

Информация об авторе

Кузнецов Александр Павлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металлорежущие станки», факультет Машиностроительные технологии, МГТУ им. Н. Баумана (национальный исследовательский университет); SPIN-код РИНЦ: 8565–5652, Scopus Author ID: 57205242165, ORCID: 0000-0001-8398-337X (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; e-mail: apk_53@mail.ru).

REFERENCES

1. Akayev, A.A. (2012). Mathematically based empiric-cyclic theories, and climatological developments Schumpeter-Kondratyeva. In Kondratiev Waves: Aspects and Prospects: Yearbook / Rev. red. A.A. Akayev, R.S. Greenberg, L. Well. Grinin, A.V. Korotayev, S.Yu. Malkov. Volgograd: Uchitel, 314–341. (in Russ)
2. Ashby, M. F. (2005). *Materials selection in mechanical design*. Oxford: Pergamon Press.
3. Attia, H., Sadek, A., Altintas, Y., et al. (2024). Physics based models for characterization of machining performance – A critical review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 51, 161–189. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.04.008>
4. Carlson, Bo (1983). The Development and Use of Machine Tools in Historical Perspective, *IUI Working Paper*, 97. Research Institute of Industrial Economics, Stockholm
5. Chelyustkin, A.N. (1933). Theory of cutting. Moscow: Gosmashmetizdat. (in Russ)
6. Development of the science of metal cutting / Ed. N.N. Zorev. Moscow: Mechanical Engineering (1967). (in Russ)
7. Dornfeld, D., Lee, D-E. (2008). *Precision Manufacturing*. New York: Springer <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68208-2>
8. Glazev, S.Yu. Aivazov, A.E., Belikov, V.A. (2019). Cyclical - wave theories of economic development and prospects of the world economy. Is the medium-term and long-term development of the world economy predictable? *Scientific Works of The Free economic Society of Russia*, 219, 177–211. (in Russ)
9. Glazev, S.Yu., L'vov, D.S., Fetisov, G.G. (1992). *Evolution of technical and economic systems: possibilities and limits of centralized regulation*. Moscow: Nauka. (in Russ)
10. Grzesik, W. (2017). Advanced Machining Processes of Metallic Materials. Theory, Modelling, and Applications, Elsevier B.V.
11. Kalpakjian, S., Schmid, S.R. (2009). *Manufacturing engineering and technology*. Prentice Hall.
12. Kuznetsov, A.P. (2015). Structure of cutting processes and equipment. Part 1. Energy-information model of the structure of machining processes. *Journal of Mechanical Engineering*, 2, 73–83. (in Russ)
13. Kuznetsov, A.P., Koriath, H.J. (2017). A new systematic approach to the description of processes and their classification. 14th Global Conference on Sustainable Manufacturing, GCSM 3-5 October 2016, Stellenbosch, South Africa. *Procedia Manufacturing*, 8, 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.025>
14. Kuznetsov, A.P., Koriath, H.J. (2019). Energy – information regularities of increasing productivity in metalworking machine tools. IV International Conference “Modeling of Nonlinear Processes and Systems”, MNPS-2019. *EPJ Web of Conferences*, 224, 1–8. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201922405008>
15. Kuznetsov, A.P. (2015). Structures of processes and equipment for cutting processing. Part 3. Energy informational model of structure of manufacturing processes. *Journal of Mechanical Engineering*, 4, 76–87. (in Russ)

16. Kuznetsov, A.P. (2021). Tendencies in the development and efficient production of machine tools. Part 2. Energy information model. *Stankoinstrument*, 3, 30–43. <https://doi.org/10.22184/2499-9407.2021.24.3.30.43> (in Russ)
17. Kuznetsov, A.P. (2024). Technological sovereignty in factories. Space and development. *Stankoinstrument*, 2, 4–55. <https://doi.org/10.22184/2499-9407.2024.35.2.34.55> (in Russ)
18. Malyshev, V.I. (2011). Essays on the history of the science of cutting materials. Tolyatti: TGI (in Russ)
19. McNei, Ian. (1990). *An Encyclopedia of the History of Technology*. London: Taylor & Francis.
20. Parton, V.Z. (1990). *Mechanics of destruction: from theories to practices*. Moscow: Nauka. (in Russ)
21. Putz, M., Koriath, H.-J., Kuznetsov, A.P. (2019). Resource consumption classes of machine tools. Special Issue. HSM 2019 15th International Conference on High Speed Machining October 8-9, 2019, Prague, Czech Republic. *MM Science Journal*, 3301–3309. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019_11_2019085
22. Smil, V. (2023). *From microorganism to megalopolis. You asked for a compromise between progress and Budweiser planetary*. Moscow: Eksmo. (in Russ)
23. Sukharev, O.S. (2024a). “Economics of technology” as a direction of science: retrospective and perspective. *Economics of Science*, 10(1), 41–53. <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2024-10-1-41-53> (in Russ)
24. Sukharev, O.S. (2024b). Measuring Technological Development: Problems and Ways to Overcome Them. *Stankoinstrument*, 3, 26–55. <https://doi.org/10.22184/2499-9407.2024.36.3.26.32> (in Russ)
25. Zagorsky, F.N. (1960). *Essays on the history of metal-cutting machines*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. (in Russ)
26. Zhang, C., Yang, J. (2020). *A History of Mechanical Engineering*. Singapore: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0833-2>
27. Zvorykin, A.A., Osmova, N.I., Chernyshev, V.I., Shukhardin, S.V. *History of technology*. Moscow: Sotsekgiz. (in Russ)

Author

Alexander P. Kuznetsov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Machine tools, Faculty of Mechanical Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University (National Research University); SPIN-code of the RSCI: 8565–5652, Scopus Author ID: 57205242165, ORCID: 0000-0001-8398-337X (5, building 1, 2nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russian Federation; e-mail: apk_53@mail.ru).

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received) 08.10.2024

Поступила после рецензирования (Revised) 20.11.2024

Принята к публикации (Accepted) 06.12.2024