

**Ключевые слова:**

научно-технический прогресс, эффективность, проектирование, технологическое оборудование, мехатронные и адаптронные системы

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ: СИСТЕМНЫЕ ПРИНЦИПЫ

ЧАСТЬ 2*

Александр КУЗНЕЦОВ

Рассмотрены механизмы повышения эффективности создания нового, более прогрессивного и инновационного, технологического оборудования на базе анализа циклов эволюционного процесса развития технологических способов производства в соотношении с непрерывным совершенствованием конструкций станков, их компонентов и подсистем.

Рассмотрим **области решений** для приводов главного движения – шпиндельных узлов металлорежущих станков.

Основным препятствием к повышению скоростей обработки на металлорежущих станках является невозможность адекватного повышения скоростей вращения и перемещения рабочих органов станков. В первую очередь это относится к шпиндельным узлам. Создание быстроходных шпиндельных узлов обуславливает необходимость решения ряда острых проблем – снижения уровня тепловыделений и уровня нагрева шпиндельных узлов, которые, с одной стороны, снижают работоспособность (а часто и не позволяют с помощью традиционных методов создавать быстроходные шпиндельные узлы с требуемыми параметрами), а с другой стороны – высокая температура шпинделя вызывает термоупругие деформации металлорежущего станка в целом, что существенно влияет на его параметры точности.

Повышение скоростей перемещения рабочих органов, мощности и частот вращения шпинделя, увеличение скоростей резания и др. обуславливают необходимость увеличения подводимой к станку мощности. Известно, что до 50% тепловыделений приходится на потери в шпиндельных узлах станков, что, в свою очередь, увеличивает долю температурных деформаций узлов и деталей станка.

* Продолжение. Начало см. в журнале «СТАНКОИНСТРУМЕНТ», 2020, № 3.

На рис.11 приведены требования к шпиндельным узлам и их качественные относительные характеристики в различных отраслях промышленности.

Область решений (см. рис. 3 в первой части статьи) и типовые значения показателей быстроходности подшипников, применяемых в металлорежущих станках, для стандартных условий приведены в табл. 8. Для подшипников качения принципиальная качественная характеристика зависимости количества выделяемого тепла Q и, соответственно, значения избыточной температуры T^0 для разных типов подшипников может быть записана как функция:

$$Q = k_1 \dots k_i \cdot (n)^{5/3},$$

где коэффициенты $k_1 \dots k_i$ характеризуют тип подшипника, условия смазки, вид нагрузки и другие параметры.

На рис. 12 показана зависимость тепловыделений Q и избыточной температуры T^0 подшипников при увеличении частоты вращения n . Величина $n_{кр}$ зависит от многих факторов, после ее достижения происходит резкий рост тепловыделений и, соответственно, избыточной температуры. Следовательно, достижение максимально допустимой температуры T_{max} , при которой подшипник еще является работоспособным, будет обусловлен и определяться параметрами и значением коэффициентов $k_1 \dots k_i$. Однако во всех случаях изменение параметра быстроходности шпиндельных узлов будет качественно соответствовать приведенной зависимости,

| Требования \ Область | Материал | Скорость | Мощность | Момент крутящий | Точность |
|----------------------------|--------------|----------|----------|-----------------|----------|
| Область | | | | | |
| Универсальные производства | Различные | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Общее машиностроение | Сталь | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | Al сплавы | ● | ○ | ○ | ○ |
| Аэрокосмическая | Al сплавы | ○ | ● | ○ | ○ |
| | Ti сплавы | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | Углепластики | ● | ○ | ○ | ○ |
| Автомобильная | Ал. литье | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | Чуг. литье | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Электроника | Углепластики | ● | ○ | ○ | ● |

Рис. 11. Область применения шпинделей и требования к ним

- Очень низкая
- Низкая
- Средняя
- Высокая
- Очень высокая

Таблица 8. Характеристики подшипниковых опор шпиндельных узлов

| Наименование характеристики | Подшипники качения | Гидростатические подшипники | Аэростатические подшипники | Магнитные подшипники |
|--|--------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Быстроходность, d_{nr} , мм · об/мин | $2-3 \cdot 10^6$ | $1,8 \cdot 10^6$ | $5 \cdot 10^6$ | $1 \cdot 10^7$ |
| Нагрузки и жесткости: статическая/динамическая | Высокая/высокая | Высокая/средняя | Низкая/средняя | Средняя/низкая |
| Точность вращения: радиальное и осевое биение, мкм | 0,2-1,0 | ~0,05 | 0,05 | 0,5 |
| Тепловыделение (среднее повышение температуры, °C) | Высокое (10÷20) | Высокое (10÷20) | Низкое (2÷5) | Среднее/низкое (5÷20) |

а применение иных дополнительных мер будет определять $k_1...k_i$ и, следовательно, значение $n_{кр}$.

Схемы наиболее распространенных компоновочных решений современных приводов главного дви-

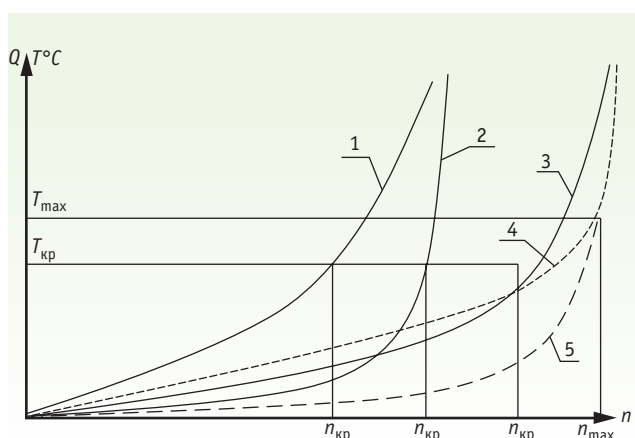


Рис. 12. Характер изменения тепловыделений и избыточной температуры подшипников (1-5 зависимости для разных видов охлаждения)

жения металлорежущих станков приведены в табл. 9, а сопоставимая оценка их параметров и характеристик – в табл. 10. В обоснованных случаях используются приводы с двух-/трехступенчатыми коробками скоростей, а также полученные посредством соединения двигателя со шпинделем муфтой или промежуточной передачей (зубчатой или ременной). Использование в качестве приводов главного движения мотор-шпинделей (без коробок скоростей) накладывает отпечаток как на проектирование станков, так и возможность их эффективного использования.

В основе выбора основных технических характеристик любого главного привода лежит анализ технологических операций, которые реализуются на проектируемом станке. При назначении режимов резания учитываются характер обработки, тип и размеры инструмента, материал его режущей части, материал и состояние заготовки, эксплуатационные показатели станка. Параметры режимов резания взаимосвязаны и поэтому, как правило, нельзя произвольно изменить значение хотя бы одного из них без изменения других.

Таблица 9. Схемы структуры шпиндельных узлов станков




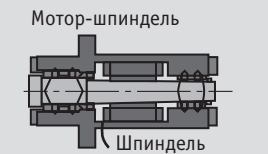
| | Крутящий момент | Скорость | Точность | Ремонтопригодность | Стоимость | Динамическая жесткость | Шум | Время замены | Температурный эффект |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
|  <p>Зубчатая передача Шестерни</p> | Очень хорошее | Плохое | Хорошее | Хорошее | Удовлетворительное | Хорошее | Плохое | Удовлетворительное | Хорошее |
|  <p>Ременная передача Ремень, шкив</p> | Хорошее | Удовлетворительное | Удовлетворительное | Хорошее | Хорошее | Хорошее | Удовлетворительное | Удовлетворительное | Хорошее |
|  <p>Прямая через муфту Муфта</p> | Удовлетворительное | Хорошее | Хорошее | Хорошее | Хорошее | Хорошее | Хорошее | Удовлетворительное | Хорошее |
|  <p>Мотор-шпиндель Шпиндель</p> | Удовлетворительное | Очень хорошее | Очень хорошее | Удовлетворительное | Хорошее | Удовлетворительное | Очень хорошее | Очень хорошее | Удовлетворительное |

Таблица 10. Сопоставимая оценка параметров и характеристик решений шпиндельных узлов

| Схема компоновки привода | Оценка решений по параметрам и характеристикам | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|-----|-----|----|-----|-----------|-----|-----|-------|
| | $M_{кр}$ | v | I | РП | C | $G_{дин}$ | J | t | T^0 |
| Зубчатая передача – шестерни | 5 | 2 | 4 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 3 |
| Ременная передача – ремень, шкив | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| Прямая через муфту – муфта | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| Мотор-шпиндель – шпиндель | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 2 |

Примечания:

Параметры: $M_{кр}$ – крутящий момент; v – скорость; I – точность; РП – ремонтпригодность; C – стоимость; $G_{дин}$ – динамическая жесткость; J – шум; T – время замены; U – тепловыделение.

Оценка решения: 2 – плохо, 3 – удовлетворительно, 4 – хорошо, 5 – очень хорошо.

Величины погрешностей и динамика их изменения во многом определяются условиями работы станка, скоростями движения, ускорениями и др. В настоящее время максимальная скорость вращения ($мин^{-1}$) шпинделей обрабатывающих центров колеблется от 35 тыс. (OKUMA), 45 тыс. (MAKINO), 42 тыс. (DMG MORI), 45 тыс. (DOOSAN) до 60 тыс. (MATSURA). Для токарных центров максимальная скорость вращения ($мин^{-1}$) основного шпинделя и контршпинделя составляет 6–20 тыс. (в зависимости от диаметра заготовки), для фрезерных шпин-

делей – 30 тыс., а для сверлильных шпинделей – 50 тыс. (TSUGAMI).

Следовательно, принимая во внимание объединение множеств областей требований, знаний и решений, можно, как один из возможных вариантов, сформировать область разрабатываемых новых решений в виде структуры инновационного станка (рис. 13).

Тенденции повышения производительности, точности, надежности, гибкости, экономичности технологического оборудования, а также повышение

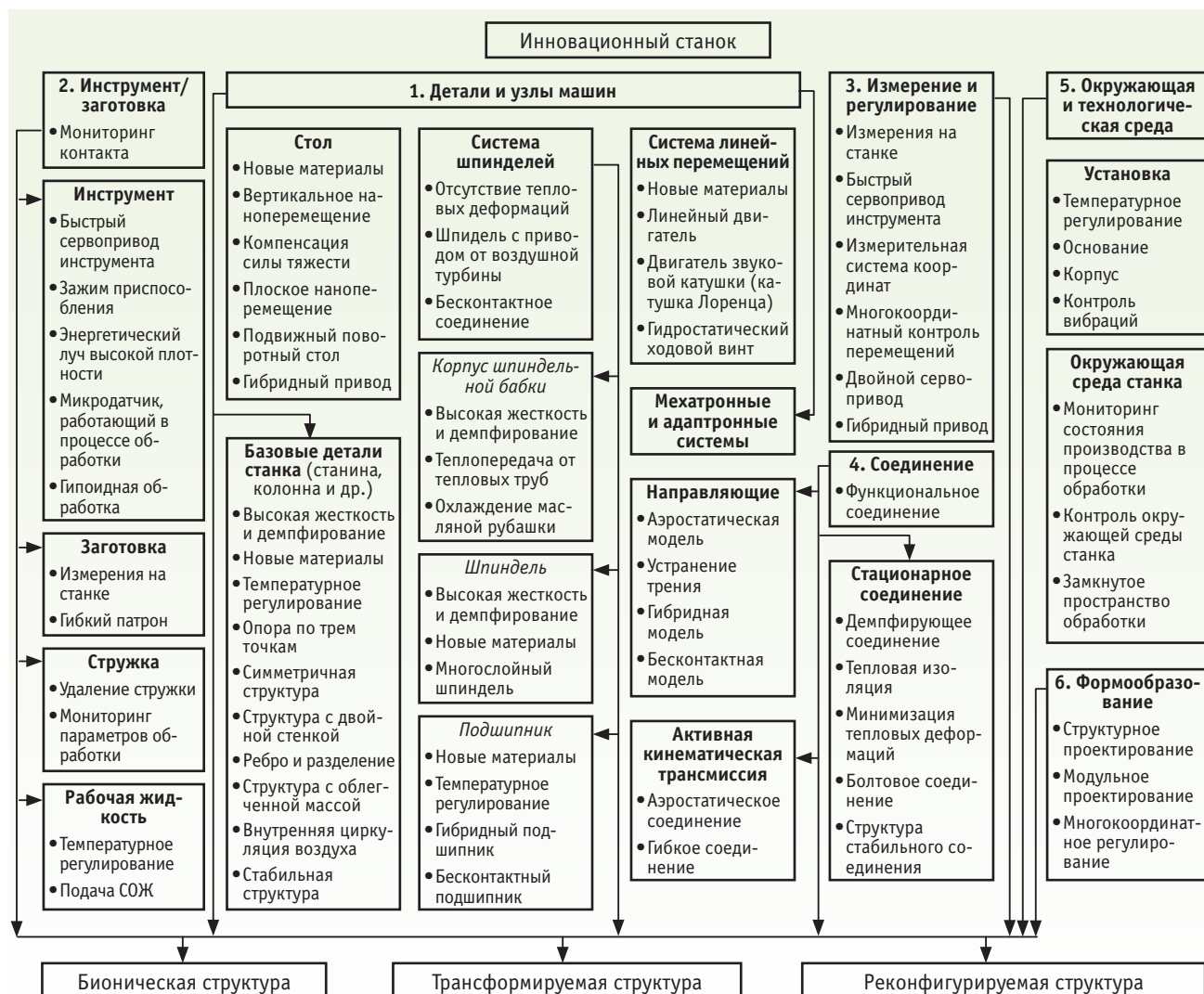


Рис. 13. Структура и составляющие инновационного станка

эффективности всей системы производства обуславливают необходимость разработки новых системных методов анализа для реализации указанных задач и создания новых конструкций, в полном объеме реализующих различные физические процессы.

Развитие технических объектов происходит в направлении от макроуровня, когда объект, как система, состоит из сложных структур и элементов, осуществляющих передачу и преобразование физических явлений, к микроуровню, при котором элементы структуры объекта, как системы, сами реализуют физические явления, связанные со строением и свойствами материала, из которого они состоят. Таким образом, на микроуровне повышается степень взаимодействия физических полей и вещества.

Во второй половине 20 и начале 21 века на изменение конструкции и рост технологических возможностей металлообрабатывающих станков оказывали влияние факторы, сформировавшиеся в результате

стремительного развития фундаментальных областей знания: квантовая физика, физическая химия, электроника, вычислительная техника и др. Их влияние проявилось в первую очередь в массовом использовании систем ЧПУ, регулируемых приводов, новых инструментальных материалов, оптических и лазерных измерительных систем, новых физических принципов обработки материалов.

Учитывая взаимосвязи между приведенными областями знаний можно выделить ряд основных направлений поиска новых решений, которые сформировались за эти годы:

1. При создании и совершенствовании конструкций станков для принятия решения часто используют системный анализ, а поиск решений осуществляется на альтернативной основе.
2. Разрабатываются станки, реализующие новые виды технологических операций, основанных на использовании физических и физико-химических методов обработки или их сочетаний с тради-

- ционными методами, а в одной конструкции объединяют различные технологические процессы.
3. Широко применяется агрегатно-модульный принцип, который требует унификации и типизации конструкторских решений, повторяемости и взаимозаменяемости узлов и деталей.
 4. Технологические возможности оборудования расширяются за счет установки на станке дополнительных узлов и приспособлений, а на стадии разработки концепции предусматриваются все возможные модификации станка.
 5. Создаются многофункциональные модули, которые расширяют технологические возможности станка (шпиндельные узлы с поворотом оси в пространстве, поворотные и «глобусные» столы и т.п.).
 6. Широко применяются новые материалы – керамика, полимербетон, композиты и др. – и технологические процессы, особенно для точных, прецизионных и ультрапрецизионных станков.
 7. Существенно сокращаются механические цепи при одновременном повышении сложности механизмов.
 8. Функция согласования исполнительных движений передается от цепей механических передач к системе управления и регулируемым приводам различных видов.
 9. Используются механизмы, созданные на основе новых физических принципов: например магнитострикционные приводы, магнитная подвеска шпинделей и др.
 10. Широко применяются мехатронные и адаптронные устройства, что создает хорошие предпосылки для получения принципиально новых конструкторских решений.
 11. В системе управления вводятся все более сложные элементы искусственного интеллекта, включая распознавание образов деталей, контроль качества изделий, адаптацию к процессу обработки и другим изменениям состояния станка.
- Все это приводит к уменьшению количества оригинальных деталей в 3–5 и даже более раз, что обуславливает, в свою очередь, изменения технологических пропорций в процессе производства станков.
- Когда развитие технологического оборудования для достижения наилучших показателей, параметров и характеристик достигает предела, характерного для реализованного физического процесса (рис. 1а в первой части статьи), или становится неоправданным, то развитие следует по второму пути. В этом случае встает вопрос определения направлений исследований и выбора физического процесса, реализуемого станком, который обеспечивает достижение более высоких показателей, параметров и характеристик и имеет обоснованную перспективу дальнейшего совершенствования.
- Новые решения в области совершенствования производственных технологий часто представляют

собой интеграцию знаний из различных инженерных и технологических областей (табл. 1 в первой части статьи), а знание технологии представляется в виде различных видов технологических моделей. В настоящее время, хотя механизмы и отдельные технологии были тщательно исследованы и детально классифицированы (табл. 11), междисциплинарных решений практически не найдено.

Причинами этого являются ограниченные индивидуальные знания, касающиеся других дисциплин или технологий, а также психологические барьеры (вектор психологической инерции). Исследования и разработки новых технологических решений в основном характеризуются случайно обнаруженными эффектами и не сопровождаются генерацией моделей, систематическими и более эффективными исследованиями развития технологий.

С целью повышения вероятности междисциплинарных решений в области производственных технологий жизненно важно развитие исследований и разработок, объясняющих методологию и направления поиска новых инженерных решений, технологических методов и процессов. Хотя экспериментирование и остается наиболее важным инструментом для развития производственных технологий, а системное применение известных моделей до проведения экспериментов позволяет повысить эффективность процесса разработки. Полагаем, что технологические знания, необходимые для поиска и моделирования новых технологических решений уже существуют, и эти знания должны быть систематизированы и доступны для решения конкретных технологических проблем или производственных задач. В связи с этим знания технологии производства, необходимые для совершенствования технологий, должны содержаться в моделях, а сами модели классифицируются по различным видам и типам, например, как показано в табл. 11.

Аналитико-физические модели основаны на физических законах, эффектах или функциях. Исходный вид физической модели – это фундаментально-аналитическая модель, которая в основном базируется на базовых физических уравнениях и лишь в незначительной степени – на эмпирических взаимосвязях. С тех пор как эра компьютеров нашла свой путь в моделировании производств и процессов, все больше используются методы численного моделирования на основе конечных элементов, кинематико-геометрических, молекулярно-динамических и иных подходов, что существенно изменяет время и результативность исследований в поисках новых направлений и их анализе.

Эмпирические модели основаны на экспериментальных данных, которые статистически анализируются. Наиболее распространенная эмпирическая модель – регрессионная, описывающая отношения

Таблица 11. Характеристики и классификация технологических процессов и способов обработки

| Классификация | Принцип классификации | Критерий классификации |
|---|---|---|
| Национальный исследовательский совет (США) | 5 групп физических процессов: → изменение массы; → фазовые изменения; → структурные изменения; → деформирование; → объединение | Физическое изменение |
| Тодд (Todd R.H.) и др. (США) | 6 групп процессов формообразования: → уменьшение массы; → тепловое уменьшение массы; → химическое уменьшение массы; → сохранение массы; → объединение, соединение | Форма: изменяется |
| | 4 группы процессов обработки: → упрочнение; → размягчение; → подготовка поверхности; → нанесение покрытий | не изменяется |
| Стандарт DIN 8580-2003-09 (Германия) | 6 групп процессов обработки: → первичное формообразование; → пластическое формообразование; → отделение материала; → соединение; → нанесение покрытий и финишная обработка; → изменение свойств материала | Формообразование. Изменение свойства материалов |
| Пол ДеГармо (E.Paul DeGarmo) (США) | 7 групп процессов обработки: → литье или прессование; → формоизменение или резка; → обработка (съем материала); → термообработка; → финишная обработка; → сборка; → контроль | Литье. Формоизменение свойства материала |
| Эшби (M.F.Ashby) (Великобритания) | 4 группы процессов обработки: → процессы первичного формообразования; → процессы вторичного формообразования; → соединение; → финишная обработка | Первичные и вторичные процессы |
| А.П. Кузнецов, Г.-Й. Кориат (H.-J. Koriath) | Структура и физические процессы взаимодействия видов форм материи, энергии и информации: → 8 классов технологических процессов; → 142 980 видов возможных технологий | Изменение размеров, формы, свойств и состояний материалов |

между зависимой переменной и одной или несколькими независимыми переменными.

В последнее время получила распространение эмпирическая модель на базе нейронной сети. Она используется для прогнозирования выходных параметров и характеристик в зависимости от входных переменных и системной модели процесса. Пока отношения между входом и выходом в этой модели скрыты, модель создается «автоматически».

Еще один тип моделей – третий – представлен эвристическими моделями, основанными на опыте, который часто не может быть описан в виде точных величин, но позволяет получить удовлетворительные результаты на правилах связи между характеристиками процесса. С помощью нечеткой логики информация может быть преобразована в математические выражения и таким образом использована для статистического анализа и прогнозирования результатов технологического процесса. Эвристические модели также описывают отношения между входными и выходными данными и специфичны тем, что используют знания экспертов и исследователей относительно причин и следствий поведения элементов системы.

Общим во всех моделях является то, что они содержат информацию, которая потенциально может быть использована для целей совершенствования различных производственных технологий в соответствии с общими системными принципами. Очевидно, что для оценки целесообразности и эффективности проведения работ по разработке выбранного из множества возможных видов технологического процесса необходимы методы оценки его сравнительной эффективности по отношению к уже существующему технологическому процессу.

На рис. 14 приведена принципиальная структурная схема системы построения и формирования способов, методов и видов обработки при производстве проточек, изделий и деталей применительно к технологическому оборудованию и процессам производства. В этом случае элементами системы являются деталь и инструмент (в широком смысле, т.е. не обязательно из твердого материала) и свойства, параметры и характеристики, между которыми образованы связи и отношения, а физические процессы обуславливаются и определяются видами их взаимодействия.

Существующая классификация металлорежущих станков (например, ЭНИМС – классы металлорежущих станков) основана на реализации какой-либо одной схемы процесса резания, и станки получили наименование метода, который реализует эту схему: токарные, сверлильные, фрезерные, расточные, строгальные, долбежные. Другие классы станков названы по виду процесса: шлифование, хонингование, протягивание, или по виду обрабатываемого изделия: зубообрабатывающие (всех типов).

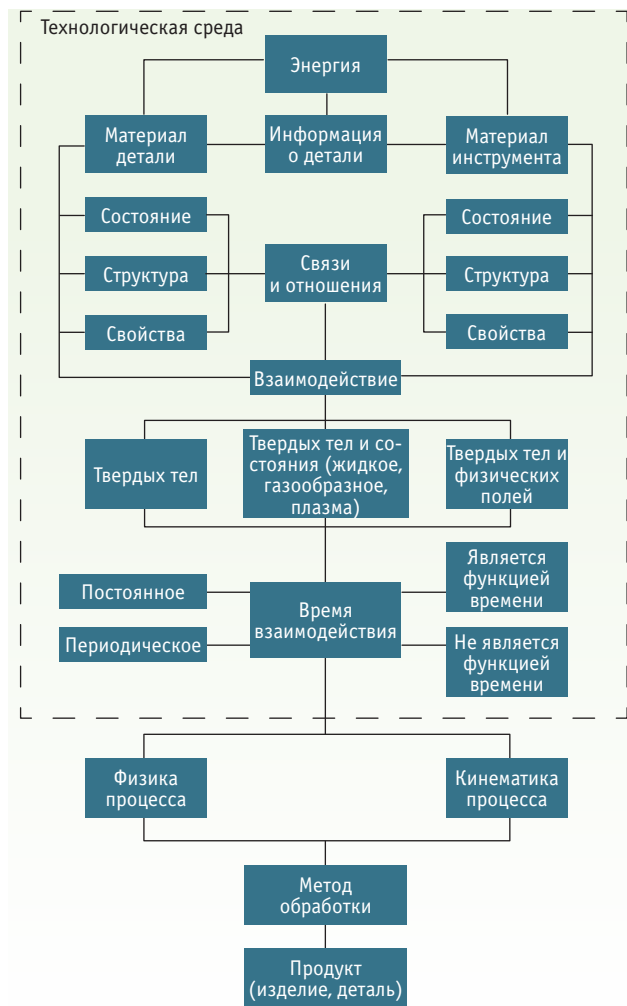


Рис. 14. Структура формирования видов физических процессов и методов получения детали

Привычная классификация станков очевидно основана на рассмотрении элементов разного уровня общей системы процесса резания. Можно заметить, что в каждой группе класса станков осуществляется только один физический процесс – пластическое деформирование материала – и одно движение для его выполнения – линейное или вращательное, а кинематические схемы резания различны (табл. 12).

С появлением станков, в которых одновременно или последовательно выполняются различные методы обработки разными инструментами, каждый из которых осуществляет независимо от другого линейное и/или вращательное движения – например токарно-фрезерные центры, обозначенные достаточно удачным термином, предложенным Т. Moriwaki – Multi-functional Machine Tool. Кроме этого появилась группа станков под общим названием Multitask Machine Tool (многозадачные станки), в которых применяются и другие физические принципы изменения свойств детали, например лазерная обработка и т.п.

Считаем целесообразным ввести наименования групп и классов оборудования, которые отражают не только метод обработки, количество которых достаточно велико, а в первую очередь физические принципы и процессы, реализуемые этим оборудованием. Взаимодействие твердых, а также взаимодействие твердых тел и полей без изменения параметров, свойств и характеристик детали образуют класс контрольно-измерительных машин, приборов и устройств, а если изменение пространственно-временного положения осуществляется не системой, а человеком, тогда мы получаем класс ручных приборов и устройств.

Согласно схемам, приведенным на рис. 14, возможны следующие группы:

1. Оборудование, которое реализует взаимодействия:
 - 1.1. «Твердое тело» – «Твердое тело»
 - 1.2. «Твердое тело» – «Состояние среды»
 - 1.3. «Твердое тело» – «Физическое поле».
2. Оборудование, которое реализует комбинацию взаимодействия:
 - 2.1. «Твердое тело» – «Твердое тело» – «Состояние среды»
 - 2.2. «Твердое тело» – «Твердое тело» – «Физическое поле»
 - 2.3. «Твердое тело» – «Состояние среды» – «Физическое поле».
3. Оборудование, которое реализует взаимодействие твердых тел и полей без изменения параметров, свойств и характеристик детали:
 - 3.1. Контрольно-измерительные машины.
 - 3.2. Контрольно-измерительные приборы и устройства.
 - 3.3. Ручные средства контроля и измерения.

В свою очередь, физический процесс взаимодействия, реализуемого в оборудовании, как системе, также может быть как однородным, например пластическое деформирование, так и множественным, например пластическое деформирование (резание) и плавление (шлифование) и т.п.

Металлорежущие станки, реализующие обработку резанием, будем рассматривать как способ обработки, физический процесс которого обусловлен взаимодействием твердых тел из материалов детали и инструмента. Очевидно, что аналогично можно рассмотреть другие физические процессы уменьшения массы детали, но при этом взаимодействовать будут или твердое тело и инструмент в другом состоянии (гидрорезка, газовая резка, плазменная резка и т.п.), или твердое тело и физические поля (лазерная резка, электрофизические методы и т.п.).

Рассмотрение процесса обработки резанием как системы обуславливает и охват структурных элементов (содержание, число и связи параметров которых характеризуют свойства системы процесса резания) и их взаимосвязь:

→ физическая модель;

Таблица 12. Построение возможных структур кинематических схем резания

| Схема | | Инструмент | | | | | | Движение резания | Формообразующее движение или положение | $V_D^n = \frac{V_i}{V_D}$ | |
|-------------------|---|--|-------------------|-------------------|------------------|--------------|-----------------|------------------|--|---|--|
| | | $\rho_d = \rho_i$ | $\rho_d > \rho_i$ | $\rho_d < \rho_i$ | Движение резания | | | | | | |
| | | $\rho > 0$ | $\rho < 0$ | $\rho = 0$ | Неподвижный | | | | | | |
| | | Подвижный | | Неподвижный | | | | | | | |
| | | → | ← | //// | | | | | | | |
| Деталь | Подвижная | $\rho < 0$ | ↓ | V_i → | V_i ← | V_D ← | Линейное | | $V_D^n = 0$ | | |
| | | | → | V_i ← | V_D ← | Вращательное | $0 < V_D^n < 1$ | | | | |
| | | | ← | V_D ← | //// | | $V_D^n > 1$ | | | | |
| | | $\rho > 0$ | ↑ | V_i → | V_i → | V_i → | Линейное | | $V_D^n \rightarrow \infty$ | | |
| | | | → | V_D → | V_D ← | //// | Вращательное | | Положение | | |
| | | | ← | V_D ← | //// | | | | | | |
| | Неподвижная | $\rho = 0$ | ↓ | V_D ← | V_i → | //// | Линейное | | | | |
| | | | → | //// | //// | Вращательное | | | | | |
| | | | ← | //// | //// | | | | | | |
| | | Вид движения | Линейное | Вращательное | Линейное | Вращательное | Линейное | | Вращательное | Область полей состояний: силового, теплового, временного и т.п. | |
| | | Формообразующее движение или положение | Движение | | Положение | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| $V_D^n = V_i/V_D$ | $V_D^n = 0; 0 < V_D^n < 1; V_D^n > 1; V_D^n \rightarrow \infty$ | | | | | | | | | | |

Примечание: ρ_d, V_D, ρ_i, V_i – радиус кривизны и скорость соответственно детали и инструмента.

- физический процесс: механика (статика, кинематика, динамика), механика сплошной среды (упругая и пластическая деформации), физика твердого тела (дислокаций);
- физические явления: механические (разрушение), тепловые, электромагнитные, химические;
- схемы процесса: элементы, параметры, свойства;
- структуры процесса: элементы, связи, отношения;
- описание (структурно-логическое, математическое, аналоговое) процесса изменения и поведения структуры;
- реализация модели процесса (механизмы, машины, оборудование, системы).

Исследования процесса резания металлов во всех его аспектах и проявлениях концептуально базировались на принципиальной физической постановке задачи, основанной на следующих положениях:

- физическая модель – удаление (отделение) материала;

- физический процесс – деформирование упругое, пластическое;
- физическое явление – разрушение вследствие образования дислокаций и трещин.

Поэтому, исходя из вышесказанного, принципиально возможное количество вариантов наименований технологических процессов по способам преобразования материи, энергии и информации оценивается количеством порядка 561330 реализаций. К этому следует добавить, что в предложенном и рассмотренном методе классификации и построения структур технологических процессов уровень описания системы ограничен только обобщенными характеристиками элементов. В действительности при большем (в зависимости от степени обобщения понятий) делении системы на элементы, их связи и отношения в соответствии с рассмотренным выше описанием системы, количество возможных вариантов реализации технологических процессов возрастет многократно.

Количество процессов, которые могут быть сформированы элементами системы, определяется числом сочетаний C_n^k из n элементов по k . В зависимости от набора элементов и возможных (заданных, рассматриваемых) сочетаний, могут быть сформированы и классифицированы множества процессов и систем (группы, виды, классы и т.п.), обуславливающие их поведение и изменение состояния всей системы, обеспечивающее достижение поставленной цели – создание процесса, продукта, изделия, детали. Так, в рассматриваемой нами системе количество элементов, в зависимости от степени детализации, может быть: $n = 6; 12; 18; 24; 30; 36; 42; 48$ и больше. Следовательно, количество возможных сочетаний формирования множества систем, исходя из условия взаимосвязанного преобразования энергии, материи и информации – $k=3$, будет равно:

$$C_6^3=20; C_{12}^3=220; C_{18}^3=816; C_{24}^3=2024; C_{30}^3=4060;$$

$$C_{36}^3=7140; C_{42}^3=11480; C_{48}^3=17296; C_{60}^3=34220;$$

$$C_{96}^3=142980.$$

Большое количество созданных и создаваемых физических и технологических процессов и оборудования требует разработки метода их сопоставимой оценки для обоснования выбора и/или границ их эффективного применения.

Применительно к процессам обработки металлов резанием, результатом которой является деталь, структура взаимосвязей физических процессов и формируемых ими свойств приведена на рис. 15. Выделены составляющие элементы системы, которые обеспечивают формирование размера детали (физический процесс, осуществляемый инструментом) и поверхности детали (физический процесс формообразования органами станка). Другие характеристики и параметры, которые описывают свойства, состояние или структуру детали, формируются иными методами обработки.

Подводимая энергия (чаще всего электрическая) преобразуется в другие формы (механическую, тепловую, электрическую, лучевую и т.д.), тем самым обеспечивает протекание того или иного физического процесса: деформирования (пластического или упругого), плавления, испарения и др., которые могут протекать независимо, последовательно, параллельно или в различных комбинациях. Это обуславливает создание технологического оборудования, такого как металлорежущие, многофункциональные, гибридные, комбинированные и другие станки, а также технологических комплексов, которые реализуют два и более физических процесса. Таким образом, все многообразие схем

и методов структурного описания и анализа направлений развития металлообрабатывающих станков может быть представлено согласно изложенному методологическому подходу в энергоинформационном виде, как показано на рис. 15.

Ничто в разработке технологических систем и оборудования не является точной наукой в абсолютном понимании. Как и многие другие инженерные инструменты, которые используются в повседневной работе, концепция направлений, тенденций эволюции инженерных систем (технологических систем и оборудования) может дать лучшее понимание и указать направления, которые могут оказаться полезными и значимыми. Они не всегда покажут, что конкретно делать, и определенно не будут предсказывать, что и когда произойдет. Но если вы знаете тенденции и общее эволюционное направление, в котором происходит развитие вашего объекта, и, скорее всего, этому последуете, вы с большей вероятностью выберете эффективные и выигрышные идеи и направления, чем те, чье время

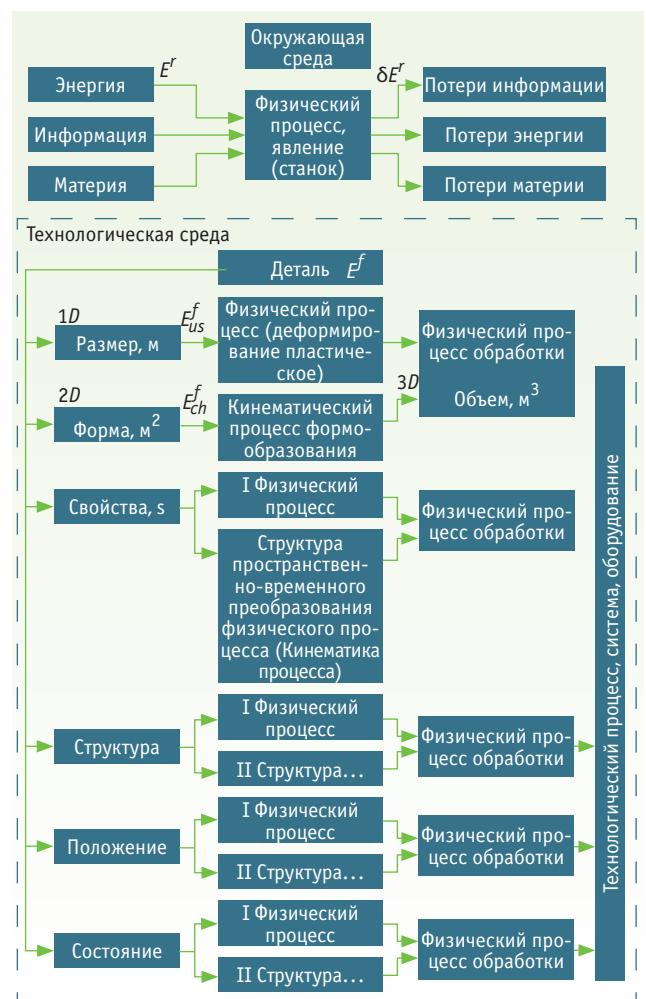


Рис. 15. Энергоинформационная модель металлообрабатывающих станков и систем технологического оборудования

уже прошло или возможно так и не наступит без дополнительных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mani M., Madan J., Lee J.- H., Lyons K. W., Gupta S.K.** Review on Sustainability Characterization for Manufacturing Processes. — National Institute of Standards and Technology/NISTIR 7913/, 2013. 22 p.
2. DIN 8580: 2003-09 — Fertigungsverfahren — Begriffe, Einteilung. Beuth Verlag. 09 2003.
3. **De Garmo E. Paul:** Materials and Process in Manufacturing, The Macmillan Co (1962), USA
4. **Ashby M.F.** Materials selection in mechanical design, Butterworth-Hienemann, 2005, Oxford, UK.
5. **Seidel R., Spur G. and Tönshoff H.G., Kienzle O.** Systematiker der Fertigungstechnik — Ein Ingenieur im Zug durch die Zeit. München: Hanser-Verlag, 2014.
6. **Haapala K.I.R., Zhao Fu, Camelio J. A., Sutherland J.W., Skerlos S.J., Dornfeld D., Jawahir I.S., Claren A.F., Rickli J.L.** A Review of Engineering Research in Sustainable Manufacturing. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2013. V. 135. P. 16. <https://doi.org/10.1115/1.4024040>.
7. **Kuznetsov A.P., Koriath H.-J.** Energy — information regularities of increasing productivity in metalworking machine tools. EPJ Web Conf. IV International Conference “Modeling of Nonlinear Processes and Systems” Volume 224, 2019. MNPS-2019. PP. 1—8. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201922405008>.
8. **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. PP. 3301—3309. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019_11_2019085.
9. **Kuznetsov A.P., Koriath H.-J.** Development of a Classification and Generation Approach For Innovative Technologies. Procedia CIRP 15th Global Conference on Sustainable Manufacturing. Published by Elsevier B.V. 2018. V. 21. PP. 798—805.
10. **Kuznetsov A.P., Koriath H.J.** A new systematic approach to the description of processes and their classification. Procedia CIRP 14th Global Conference on Sustainable Manufacturing. Published by Elsevier B.V. 2017. V. 8. PP. 199—206. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.025>.
11. **Кузнецов А.П.** Эволюция методов оценки точности металлорежущих станков и тенденции ее изменения. Часть 1. Эволюция понятия точность и ее физическая модель // Вестник машиностроения. 2016. № 12. С. 8—16.
12. **Кузнецов А.П.** Эволюция методов оценки точности металлорежущих станков и тенденции ее изменения. Часть 2. Эволюция понятий и моделей оценок точности металлорежущих станков и тенденции ее изменения // Вестник машиностроения. 2017. № 8. С. 22—35.
13. **Кузнецов А.П.** Структуры процессов и оборудования обработки резанием. Часть 2. Структуры технологических процессов и их классификация // М.: Вестник машиностроения. 2015. № 3. С. 65—76.
14. **Кузнецов А.П.** Структуры процессов и оборудования обработки резанием. Часть 3. Модели и структуры обработки резанием // Вестник машиностроения. 2015. № 4. С. 76—87.
15. **Кузнецов А.П.** Структуры процессов и оборудования обработки резанием. Часть 4. Структуры оборудования обработки резанием // Вестник машиностроения. 2015. № 5. С. 63—77.
16. **Бушуев В.В., Кузнецов А.П., Сабиров Ф.С., Хомяков В.С., Молодцов В.В.** Состояние и направления развитие научных исследований в станкостроении // СТИН. 2015. № 11. С. 12—20.
17. **Бушуев В.В., Кузнецов А.П., Молодцов В.В.** Инновации в проектировании технологического оборудования // Инновации. 2015. № 8. С. 100—105.
18. **Кузнецов А.П.** О материалах в станкостроении // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2019. № 1. С. 44—55.
19. **Крахин О.И., Кузнецов А.П.** Сплавы с памятью и их применение в технике. — М.: Янус-К, 2010. 212 с.
20. **Lee C., Lee D., Cho H., Kang K.I.** A New System Form Design Process Using QFD and TRIZ. 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019). PP. 913—920.
21. **Drossel W.-G. et all.** High performance of machining processes by applying adaptronic systems. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014. Procedia CIRP 14, 2014. PP. 500—505.
22. **Jedrzejewski J., Kwasny W.** Development of machine tool operational properties // Journal of Machine Engineering. 2015. V. 15. No. 1. PP. 5—24.
23. **Jedrzejewski J., Kwasny W.** Development of high performance of machine tool // Journal of Machine Engineering. 2009. V. 9. No. 2. PP. 5—30.
24. **Roderburg A., Klocke F., Koshy Ph.** Principles of technology evolutions for manufacturing process design. Procedia Engineering, 2001, 9. PP. 294—310.
25. **Dong Keun Park, Jun Young Choi, Chi Hyuk Choi, Choon Man Lee.** The Technical Trend and Future Development Direction of Machine Tools Spindle System by Patent Analysis // Journal of the Korean Society for Precision Engineering. Vol. 29. No. 5. PP. 500—505.

КУЗНЕЦОВ Александр Павлович —
доктор технических наук, профессор кафедры станков МГТУ «СТАНКИН»