

**Ключевые слова:**

энергоинформационная модель, образ детали, модуль движения/положения, гибридный станок, ресурсоэффективность

# ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ И ЭФФЕКТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАНКОВ

## ЧАСТЬ 2. ЭНЕРГОИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ\*

**Александр КУЗНЕЦОВ**

Предложена энергоинформационная модель создания технологического оборудования, на этой базе рассмотрены различные компоновочные решения. Приведены различные аспекты совершенствования конструкции гибридных станков, а также методика расчета различных показателей эффективности.

Энергоинформационная модель производства детали представлена на рис. 4. Для случая обработки резанием выделены составляющие элементов системы, обеспечивающие формирование размера детали – физический процесс пластического деформирования выполняется инструментом, а форма и поверхность детали являются результатом физического процесса формообразования поверхности, осуществляемого рабочими органами станка. Другие характеристики и параметры, обозначенные как свойства (например шероховатость, структура) или состояние (например твердость и т.п.), которые описывают информационный образ детали, формируются иными методами обработки в соответствии с технологическим образом детали и энергоинформационной моделью.

Результатом физических процессов обработки, в соответствии с приведенной энергоинформационной моделью, является деталь, параметры и характеристики которой описаны на рис. 4. Таким образом, примененный подход дает ответ на вопрос «Что является результатом?» – это деталь, но не отвечает на вопрос «Как?». Поэтому деталь можно рассматривать как «заказчика» для создания оборудования (см. Часть I, рис. 1), которое реализует физические процессы преобразования материи, энергии и информации, то есть деталь является и результатом, и заказчиком одновременно.

\* Начало см.: СТАНКОИНСТРУМЕНТ, 2021, № 2.

Исходя из сказанного, приведем следующие определения понятий, характеризующих структурные составляющие, которые будут формировать и описывать оборудование (рис. 5) как последовательность взаимосвязанных объемов: объем детали – рабочий объем – объем оборудования.

**Деталь** – объем, в котором выполняются преобразования множеств единичных геометрических объектов: точек, линий, кривых линий и т.п., формирующих геометрический образ изделия (детали).

В более общей формулировке деталь – это геометрический образ координатных систем и их преобразований.

**Рабочий объем** – пространство, в котором происходит формирование свойств детали: геометрии, формы, поверхности, структуры, положения, состояния.

**Оборудование** – это такой объем пространства, в котором, вокруг рабочего объема, размещены обобщенные модули движения/положения.

**Модуль движения/положения** – последовательное размещение элементов, которые отражают однородные единичные движения/положения в пространстве. Модули I–XIV (рис. 5) состоят из семи составляющих элементов:

- базового, в котором отсутствует движение,
- трех модулей движения/положения – линейных,
- трех модулей движения/положения – поворота (вращения).



Рис. 4. Энергоинформационная модель технологического оборудования

**Движением** будем называть преобразование (изменение), при котором расстояние между любыми двумя точками модуля равно расстоянию между ними при движении (изменении образа). Тогда, очевидно, и поворот так же является движением.

**Положением** будем называть преобразование, которое изменяет ориентацию модуля (образа).

В соответствии с теоремой Шаля любое движение является либо параллельным переносом, либо поворотом, либо симметрией, либо композицией симметрии и параллельного переноса на вектор, параллельный оси симметрии. Если движение отсутствует, то матрица преобразования модуля движения/положения определяется единичной матрицей, элемент может быть объединен с базовым или отсутствовать.

Следовательно, по приведенному определению оборудования, структуру взаимного относительно размещения детали и инструмента можно представить как пространственное сочетание модулей

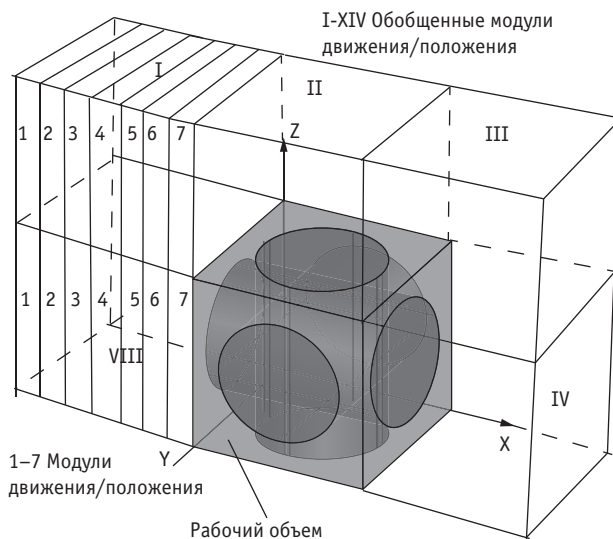


Рис. 5. Компоночный образ оборудования

движения/положения, которые могут быть как неподвижными, так и перемещаться друг относительно друга. Очевидно, что минимальное число модулей равно двум. Количество возможных видов сочетаний пространственного размещения модулей можно разделить на следующие типы: L-, Г-, С-, U-, П-, О-образный (табл. 5).

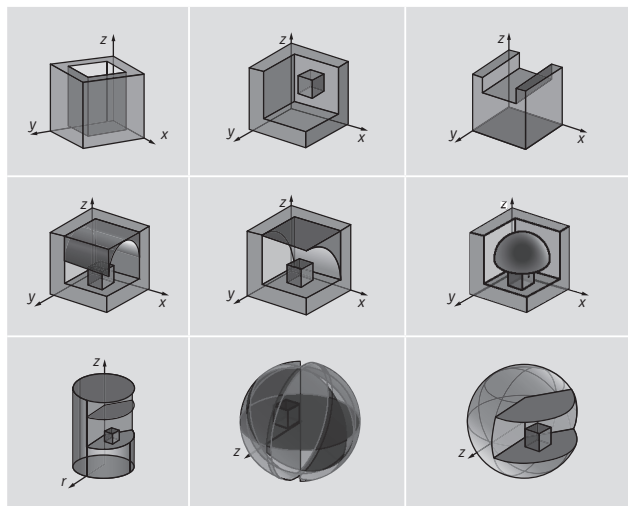
При их построении следует учитывать, что необходимо отсутствие минимум одного модуля для обеспечения доступа к рабочему объему, в котором размещена деталь, поскольку необходимо как осуществлять ее загрузку перед процессом обработки, так и извлекать после обработки.

Все сказанное относится к прямоугольной системе координат. Аналогичные построения могут быть также проведены для цилиндрической и сферической систем координат, а также для их комбинаций (табл. 6). Тогда общее возможное потенциально реализуемое количество формообразующих компоновок металлорежущих станков достигает 11736, некоторые их образы показаны в табл. 6, а воплощение в реальных конструкциях приведено на рис. 6.

Исходя из энергоинформационной модели принципиально возможное количество вариантов наименований технологических процессов по способам преобразования материала, энергии и информации оценивается количеством порядка 561330 единиц их возможной реализации.

Поэтому существует потребность в формализации описания и определения направления построения энергоинформационных структур новых групп и классов оборудования, которые отражают не только метод обработки (точение, сверление и т.п., количество которых достаточно велико), а в первую очередь физические принципы и процессы, реализуемые этим оборудованием. Взаимодействие твердых

Таблица 6. Примеры компоновок оборудования из обобщенных модулей движения/положения



тел, а также твердых тел и полей без изменения параметров, свойств и характеристик детали образуют класс контрольно-измерительных машин, приборов и устройств. Если же изменение пространственно-временного положения осуществляется не

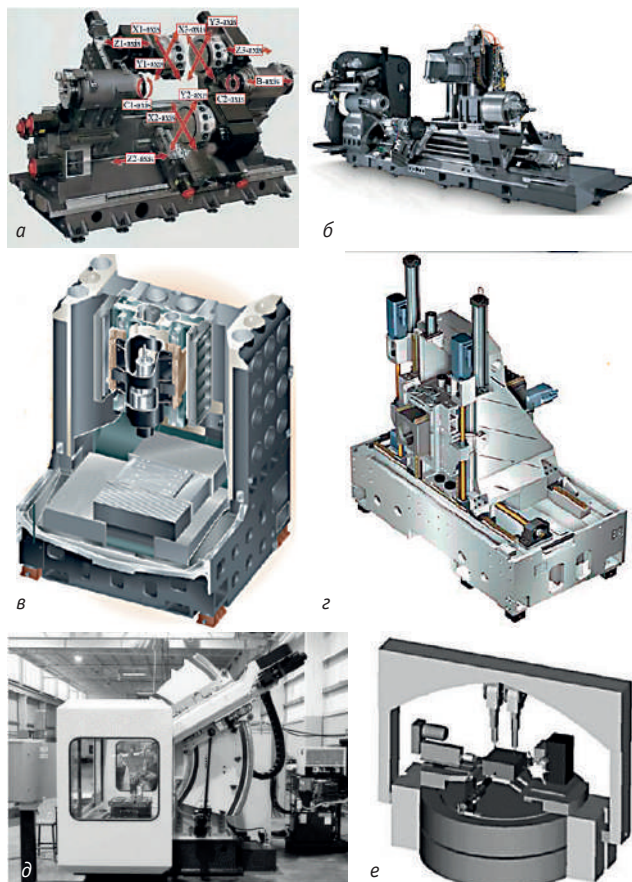


Рис. 6. Примеры современных компоновок металлорежущих станков

системой, а человеком, тогда мы получаем класс ручных приборов и устройств.

Тогда, согласно схемам, возможны следующие группы оборудования:

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 комбинацию взаимодействия:
  - 3.1 «Твердое тело» – «Состояние среды» – «Состояние среды» – «Физическое поле».
  - 3.2 «Твердое тело» – «Физическое поле» – «Состояние среды» – «Физическое поле».
  - 3.3 «Состояние среды» – «Твердое тело» – «Физическое поле» – «Состояние среды».

Очевидно, что объединение видов и форм процессов для создания «гибридных» комплексов целесообразно тогда, когда оно не ухудшает (хотя не всегда может улучшать) свойства, параметры и характеристики взаимосвязанных или последовательно организованных физических процессов.

Металлорежущие станки, реализующие обработку резанием, будем рассматривать как способ обработки, физический процесс которого обусловлен взаимодействием твердых тел – детали и инструмента.

На базе модели, представленной на рис. 4, в качестве примеров приведем энергоинформационные модели станков, относящихся к группе 1.1. (рис. 7).

Очевидно, что аналогично можно рассмотреть другие физические процессы изменения свойств, параметров и характеристик обрабатываемой детали как главного процесса, формирующего эти изменения. Например, уменьшение массы исходной детали достигается в том числе при взаимодействии твердого тела и инструмента не только в твердом состоянии (гидрорезка, газовая и плазменная резка и т.п.), либо инструмента, представляющего собой физическое поле (лазерная резка, электрофизические методы и т.п.). Подводимая энергия, чаще всего электрическая, преобразуется в другие формы (механическую, тепловую, лучевую и т.д.), тем самым обеспечивая реализацию того или иного физического процесса: деформирования (пластического или упругого), плавления, испарения и др. Процессы могут протекать независимо, последовательно, парал-

тельно или в различных комбинациях. Это обуславливает создание такого технологического оборудования, как многофункциональные станки, в которых используется как один и тот же физический процесс (например, токарно-фрезерные), так и несколько: гибридные станки – когда применяются разные физические процессы (например, аддитивно-фрезерные станки), комбинированные станки – когда применяют процессы пластического деформирования и плавления (например, токарно-шлифовальные, токарно-фрезерно-шлифовальные, сварка трением с перемешиванием и фрезерование), а также технологических комплексов, которые реализуют два и более физических процессов.

### ГИБРИДНЫЕ СТАНКИ

Продолжающаяся промышленная тенденция к устойчивому производству с высокой добавленной стоимостью привела к появлению гибридных производственных процессов и ресурсов. Это новое поколение процессов и ресурсов, объединяющих возможности ряда традиционных и новых технологий в единую технологическую структуру и на единой платформе. Увеличение технологических возможностей происходит за счет увеличения сложности такого оборудования. В данной работе формальный энергоинформационный подход используется для иллюстрации обоснований и описания методов построения нового типа гибридных, цифровых и иных видов производственных комплексов и систем. Хотя общепризнанного понимания и определения термина «гибридные процессы, оборудование и производства» пока нет, исследователи изучают подходы для объединения различных технологических и производственных процессов с целью повышения производительности и эффективности в достижении улучшенных показателей, характеристик и параметров детали, сокращения времени производства и расширения областей применения.

Таким образом, гибридные процессы открывают новые возможности и сферы производства различных изделий, которые с помощью существующих процессов нецелесообразно производить с экономической точки зрения.

На рис. 8 показан станок Lasertec 65 3D компании DMG MORI, в котором реализуется DED-технология (Directed Energy Deposition), когда материал и энергия для его сплавления подводятся одновременно к месту построения детали, а процесс LMD (Laser Metal Deposition) является одним из наиболее широко применяемых. Известны также гибридные стан-

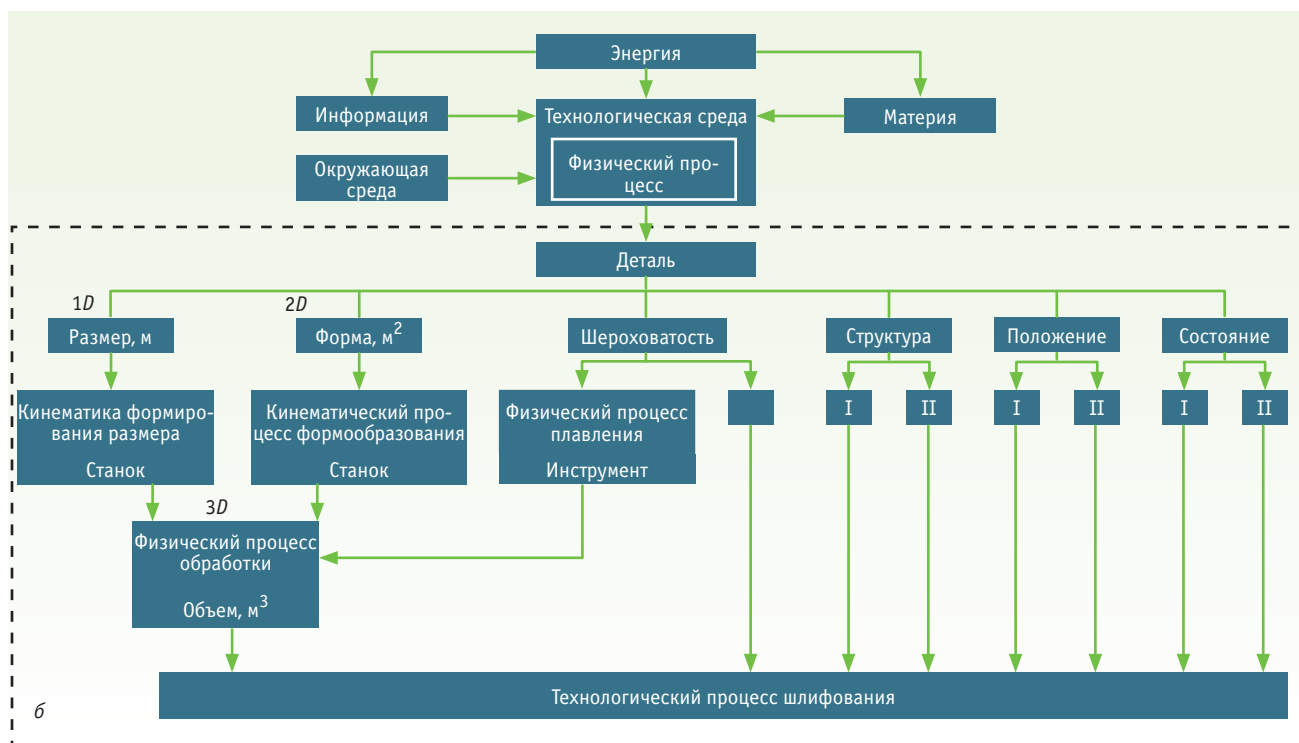
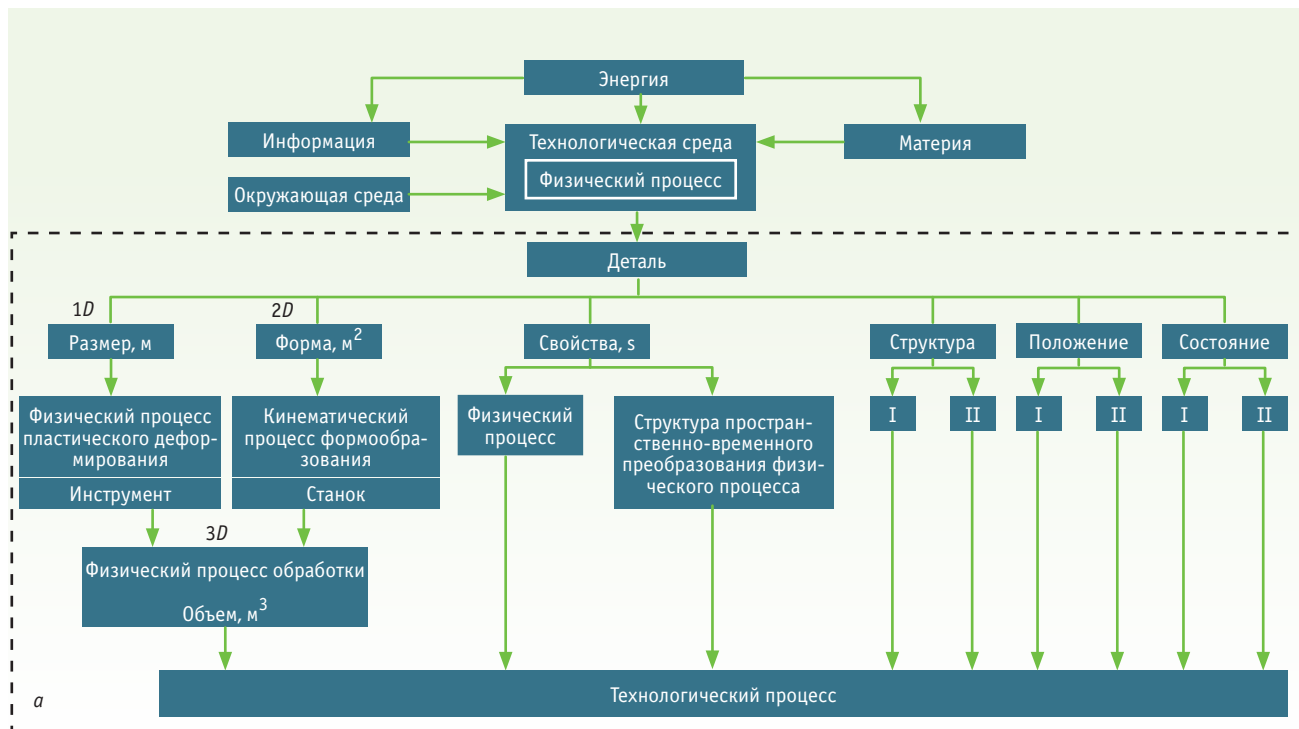
ки Integrex i-400AM, Integrex i-200S, Variaxis j-600/5X AM (Mazak), MU-V Laser EX, Multus U Laser EX (Okuma) M80 Millturn (WFL).

Развитие гибридных станков позволит объединить преимущества нескольких физических процессов в структуре одного станка. Несмотря на возможные многочисленные преимущества гибридных машин, многие вопросы все еще нуждаются в решении при объединении процессов различной физической природы. Нет никаких сомнений в том, что аддитивные технологии производства меняют парадигму производства. Их сочетание с процессами обработки резанием помогает преодолеть низкую точность (0,1–0,15 мм) и высокую шероховатость (15–40 мкм), присущие аддитивным процессам (рис. 9), и обеспечивает изготовление деталей с точностью, которая ранее была недостижима.

Тем не менее, интеграция аддитивных технологий и технологий резания в единую машину не лишена проблем. С одной стороны, основное преимущество гибридных машин можно обозначить как более эффективное использование имеющихся ресурсов, приводящее к сокращению технологических цепочек с последующими эффектами экономии времени и затрат. На техническом уровне гибридные станки открывают возможность изготовления деталей более высокой сложности, что позволяет создавать более совершенные новые конструкции с улучшенными параметрами и характеристиками. С другой стороны, подавляющее большинство задач решается гибридными машинами, еще не лишенными недостатков процесса совершенствования и развития. Поэтому с технической точки зрения предстоит проделать большую работу для глубокого понимания аддитивных процессов и их взаимодействия с процессами резания.

Так в настоящее время еще недостаточно изучены и требуют большего внимания проблемы геометрии покрытия, пористости, твердости, микроструктуры или остаточных напряжений, что очень важно для создания точных и качественных компонентов. Мониторинг технологического процесса имеет большое значение для обеспечения качества деталей, изготовленных по аддитивным технологиям.

Аналогично применению термической обработки, которая обычно используется для снижения остаточных напряжений, необходимо понимание этого аспекта и в случае аддитивных процессов в гибридных станках. Необходимо разработать методы удаления металлического порошка или смазочно-охлаждающей жидкости из рабочей зоны, чтобы их смесь не влияла на работу станка, что также требует исследований в части сухой механической обработки резанием. Очень важной задачей



в настоящее время также является разработка программных методов и средств, позволяющих разработать оптимизированный технологический план последовательности обработки, состоящей из аддитивных операций и операций резания, которые могут применяться попеременно. Это сложный вопрос, результат которого может варьироваться

в зависимости от необходимой точности и шероховатости.

Разработка новых гибридных станков, технологических комплексов и производств и принятие решения о ее целесообразности требуют соответствующего методического подхода и аппарата для его реализации. Согласно вышеизложенной моде-

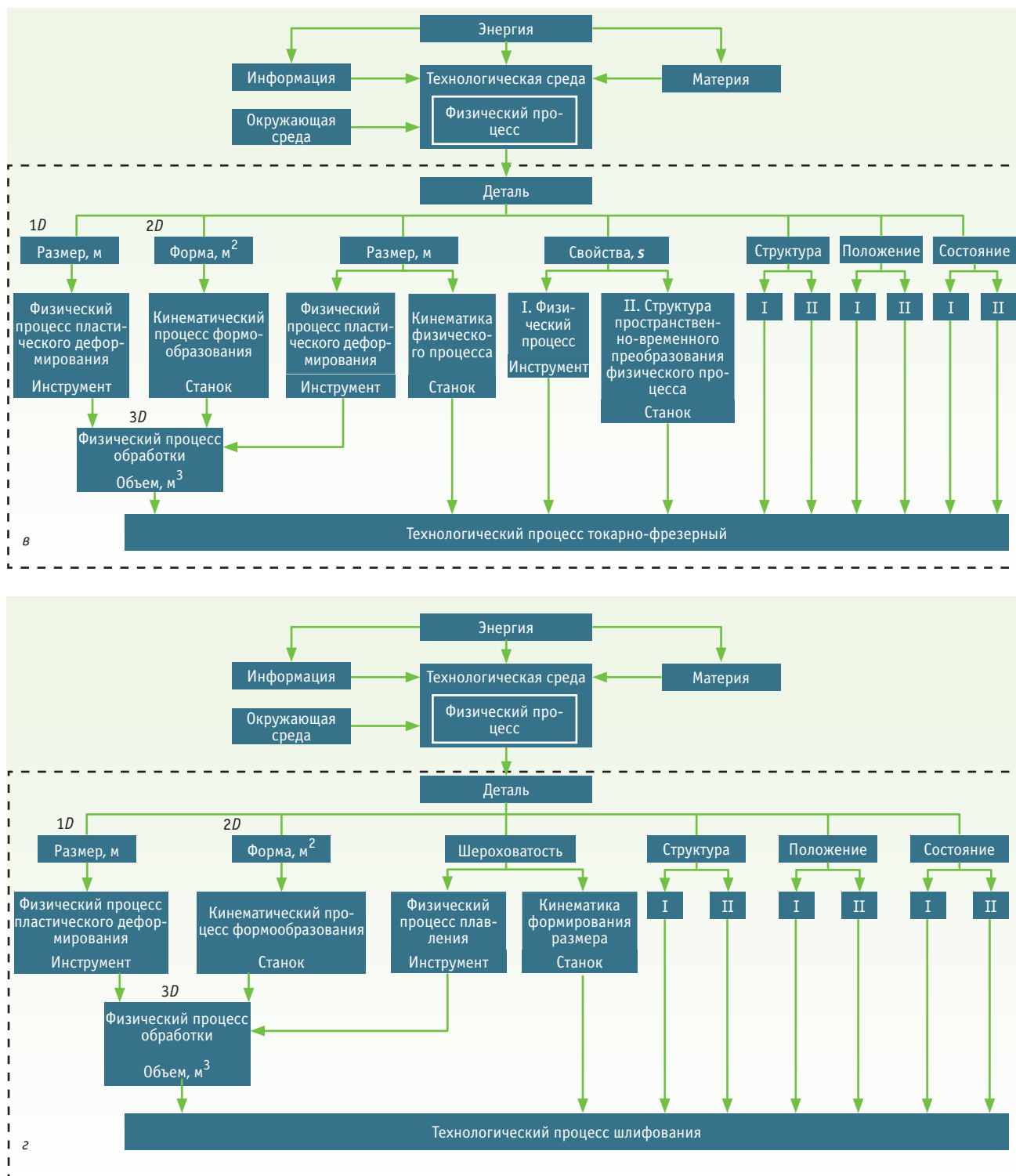


Рис. 7. Энергоинформационные модели станков различных групп взаимодействия физических процессов: а – станок традиционного процесса резания; б – станок шлифовальный; в – станок токарно-фрезерный; г – станок токарно-фрезерно-шлифовальный

ли, представленной на рис. 4, мы имеем метод описания процессов преобразования различных форм и видов энергии и материала. Подводимые к оборудованию ресурсы преобразуются в пред-

мет производства с неизбежными потерями. Степень этих потерь обуславливает ресурсоэффективность процесса, оборудования или системы и зависит от конструктивного, компоновочного,

Технологический процесс	Класс допуска по ISO 286 (ГОСТ 25316-2013)															
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Горячая объемная ковка																
Горячая штамповка, чистовая формовка																
Изотермическая штамповка																
Холодная штамповка																
Точение																
Фрезерование																
Шлифование																
Хоннингование																
Полирование																
Аддитивные методы																

Рис. 8. Соотношение достижимых классов допусков для аддитивных и иных методов. Источник Nielsen and Martins, 2021

технического и технологического исполнения станков. Тогда понятие эффективность (ресурсоэффективность) рассматривается как относительный КПД и характеризует степень использования какого-либо ресурса. Следовательно, отношение значений объемов (энергий, мощностей, материала, времени и т.п.) на выходе  $E_j$  и на входе  $E_i$  является оценкой эффективности  $E_e$ , где числитель во всех случаях использования любого ресурса определяет его идеальное значение (номинальное или теоретическое), обусловленное применяемым физическим процессом или явлением  $E^f$ , а знаменатель – его фактическое (реальное) значение или величину  $E^r$ :

$$E_e = E_j/E_i = E_{out}/E_{inp} = E^f/E^r \quad (1)$$

Поэтому, как и любой КПД, общее КПД системы равно произведению составляющих  $\prod_{q=1}^k E_e^k$  и не зависит от природы самого КПД. Следовательно, интегральный показатель ресурсоэффективности будет равен произведению эффективностей использования материала  $E_e^m$ , энергии  $E_e^e$  и информации. Каждую составляющую ресурса, в соответствии с моделью (см. рис. 4), можно представить комбинацией ресурса физических процессов применения  $E_{us}^f$  и ресурса обеспечения  $E_{ch}^f$  и/или пространственно-временного (кинематического) изменения положения/состояния физического процесса применения (т.е. ресурса, требуемого для изменения положения/состояния в пространстве вектора физического процесса). Тогда выражение (1) запишется в виде:

$$E_{re} = \left(\frac{E_{us}^f + E_{ch}^f}{(E_{us}^f)^r + (E_{ch}^f)^r}\right)^e \cdot \left(\frac{E_{us}^f + E_{ch}^f}{(E_{us}^f)^r + (E_{ch}^f)^r}\right)^m \cdot \left(\frac{E_{us}^f + E_{ch}^f}{(E_{us}^f)^r + (E_{ch}^f)^r}\right)^i \quad (2)$$

В свою очередь каждый из составляющих множителей в (2) может быть записан:

$$U_e = \frac{E_{us}^f + E_{ch}^f}{(E_{us}^f)^r + (E_{ch}^f)^r} = \frac{E_{us}^f}{E_{us}^f} \cdot \frac{E_{us}^f + E_{ch}^f}{(E_{us}^f)^r + (E_{ch}^f)^r} = U_{us}^{fr} \cdot U_{us}^{fch} \cdot U_{usch}^{fr} \quad (3)$$

где  $(E_{us}^f)^r$  – подводимый ресурс, требуемый для физического процесса и других связанных с ним процессов, в том числе и иной физической природы, обеспечивающих выполнение физического процесса;

$(E_{ch}^f)^r$  – подводимый ресурс, требуемый для изменения положения в пространстве вектора физического процесса и других, связанных с ним процессов, в том числе и иной физической природы, обеспечивающих процесс изменения положения в пространстве вектора физического процесса;

$U_{us}^{fr}$  – характеризует эффективность ресурса физического процесса применения;

$U_{us}^{fch}$  – характеризует эффективность использования физических ресурсов для физического процесса применения;

$U_{usch}^{fr}$  – характеризует реальную эффективность ресурса физического процесса применения.

Тогда (2) можно записать в виде:

$$E_{re} = (U_{us}^{fr} \cdot U_{us}^{fch} \cdot U_{usch}^{fr})^e \cdot (U_{us}^{fr} \cdot U_{us}^{fch} \cdot U_{usch}^{fr})^m \cdot (U_{us}^{fr} \cdot U_{us}^{fch} \cdot U_{usch}^{fr})^i \quad (4)$$

Поэтому можно записать общее выражение потерь ресурсов:

# YASKAWA

100-ЛЕТНИЙ ОПЫТ РАБОТЫ  
В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ  
ДВИЖЕНИЕМ



- Преобразователи частоты от 0,4 до 12 000 кВт
- Шпиндельные двигатели
- Комплексные сервоприводы от 0,003 до 75 кВт
- Линейные сервосистемы
- Контроллеры управления движения
- Программируемые логические контроллеры
- Роботы

## КОСПА

КОМПОНЕНТЫ  
И СИСТЕМЫ  
ПРОМЫШЛЕННОЙ  
АВТОМАТИЗАЦИИ



+7 (495) 660-28-22; [www.cospa.ru](http://www.cospa.ru)

ООО «КОСПА» ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР И СЕРВИСНЫЙ ЦЕНТР YASKAWA



$$\Delta E_{k,n} = \delta E_{k,k} + \delta E_{k,n}, \quad (5)$$

где  $\delta E_{k,k}$  – внутренние потери; потери перехода (диссипации)  $\delta E_{k,n}$  и при преобразовании одной формы ресурса  $k$  в другой вид или форму  $n$ .

Тогда (3) может быть записано:

$$U_e = \frac{E_{us}^f + E_{ch}^f}{(E_{us}^f)^r + (E_{ch}^f)^r} = \frac{E_{us}^f + E_{ch}^f}{E_{us}^f + (\Delta E_{k,n})_{us}^f + E_{ch}^f + (\Delta E_{k,n})_{ch}^f} = U_{us}^{fr} \cdot U_{us}^{fch} \cdot U_{us}^{fch} = \frac{1}{1 + (\Delta E_{k,n})_{us}^f / E_{us}^f} \cdot \frac{1 + E_{ch}^f / E_{us}^f}{1} \cdot \frac{1}{1 + (E_{ch}^f / E_{us}^f) \cdot [(E_{ch}^f + (\Delta E_{k,n})_{ch}^f) / (E_{ch}^f)] \cdot [(E_{us}^f) / (E_{us}^f + (\Delta E_{k,n})_{us}^f)]}. \quad (6)$$

Выражение (6) и (4) дает возможность оценивать интегральный показатель уровня ресурсоэффективности станков, так как входящие в него величины описывают энергоинформационные процессы и преобразования. Причем, в этом случае базой является нормированная величина самого физического процесса и вектора его пространственного изменения.

Анализируя выражение (6), получаем типовой характерный график зависимости показателя эффективности ресурса от его физического параметра процесса применения этого ресурса (рис. 10).

Точность процессов, оборудования и производств определяется уровнем соответствия или степенью приближения реальных свойств, параметров и характеристик изделия (объекта, изделия или детали) к его изображению (информационному, геометрическому, технологическому) – номинальному, заданному или идеальному значению. Изменения и взаимные связи свойств соответствующих изображений характеризуют и определяют их качественные и количественные параметры и характеристики. Поэтому необходимо различать следующие понятия, относящиеся к «точности»: точность

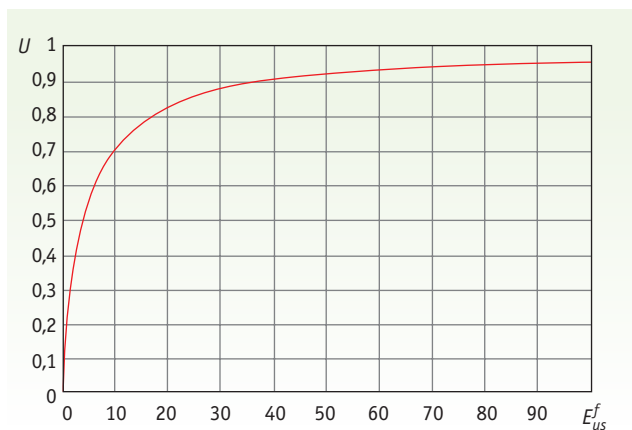


Рис. 9. График изменения эффективности применения ресурса

изделия, точность физического процесса, физически (реально) достижимая точность, технологическая точность, точность системы, структурная точность, эффективная точность и др.

В рассматриваемой нами энергоинформационной системе общее количество информации  $I_0$  состоит из информации о продукте (изделии, детали) и его свойствах  $I_w$ , физическом процессе  $I_f$  и управлении процессом  $I_c$ .

$$I_0 = \sum_{k=1}^K I_w + \sum_{m=1}^M I_f + \sum_{n=1}^N I_c. \quad (8)$$

Количество информации определяется по известной зависимости следующим образом:

$$I = - \sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i,$$

где  $I$  – количество информации;  $N$  – количество возможных событий;  $p_i$  – вероятность отдельных событий. Если вероятность появления отдельных событий одинаковая, и они образуют полную

группу событий, то есть  $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ , то формула пре-

образуется в формулу Р. Хартли:

$$I = \log_2 P$$

$$I_p = \log_2 (L/\Delta x) = -\log_2(\varepsilon_c),$$

или

$$I = K \cdot \ln(P).$$

Количество информации, которое характеризует точку  $I_p$ , линию  $I_l$ , поверхность  $I_s$  или объем  $I_v$ , равно соответственно:

$$I_p = \log_2 (L/\Delta x) = -\log_2(\varepsilon_c), \quad I_l = -3(\varepsilon_c)^{-1} \log_2(\varepsilon_c),$$

$$I_s = -3(\varepsilon_c)^{-2} \log_2(\varepsilon_c), \quad I_v = -3(\varepsilon_c)^{-3} \log_2(\varepsilon_c), \quad (9)$$

где  $\varepsilon_c = \Delta x/L$  – сравнительная погрешность,  $L$  – характерный размер.

Так, например, при задании положения точки с характерным размером в 1 м и сравнительной погрешностью  $10^{-6}$  м получим:  $I_T = 20$ ,  $I_L = 60 \cdot 10^6$ ,  $I_{пв} = 60 \cdot 10^{13}$ ,  $I_{об} = 60 \cdot 10^{18}$ . Поэтому при создании оборудования чаще всего используется сочетание аналоговой и числовой информации, что позволяет значительно снизить требуемые объемы ее преобразования (табл. 7). В частности, в металлорежущих станках направляющие перемещений представляют собой, с точки зрения информации, объем информации, который заключен в линии, что при точности перемещения в 1 мкм соответствует количеству информации, равному  $I_L = 60 \cdot 10^6$ .

# BALLUFF

Инновационные решения Balluff

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ФАБРИКИ БУДУЩЕГО



[www.balluff.ru](http://www.balluff.ru)

ООО «БАЛЛУФФ» · 115419 · Москва · Орджоникидзе ул., д. 11, стр. 44, эт. 4, оф. 1  
Тел.: +7 495 960 12 11 · E-mail: [balluff@balluff.ru](mailto:balluff@balluff.ru) · [www.balluff.ru](http://www.balluff.ru)



Таблица 7. Показатели информационной эффективности энергоинформационной системы, инвариантной к объекту исследования

Показатель	Формула	Описание	Диапазон
Количество входной информации	$I_{in} = I_{in}^{tf} + I_{in}^{ot}$	$I_{in}^{tf}$ – количество единиц входной информации, используемой в процессах преобразования и функционирования системы, необходимых для получения требуемого количества и качества выходной информации; $I_{in}^{ot}$ – количество единиц входной информации, не участвующей в процессах преобразования и функционирования системы, но содержащейся в выходной информации (например, служебная информация: номер чертежа, наименование цеха и т. д.)	
Количество выходной информации	$I_{ot} = I_{in}^{ot} + I_{ot}^{tf}$	$I_{in}^{ot}$ – количество единиц входной информации, не участвующей в процессах преобразования и функционирования системы, но содержащейся в выходной информации; $I_{ot}^{tf}$ – количество единиц выходной информации, полученной в процессах преобразования и функционирования системы	
Информационная производительность системы. Определяет затраты времени функционирования системы на единицу времени подготовки входной информации	$U_{fh} = \frac{t_f}{t_h}$	$t_f$ – время функционирования системы (переработки всего объема информации); $t_h$ – необходимое для подготовки требуемого объема входной информации, поступающей в систему	0–1
Автоматизация процесса функционирования системы	$U_{ap} = \frac{t_h}{t_f + t_h} = \frac{1}{1 + U_{fh}}$	Определяет долю времени по подготовке входной информации в общем объеме времени функционирования системы	0–1
Сложность входной информации	$U_{el} = \frac{I_{in}^{ot}}{I_{ot}^{tf}}$	Характеризует долю входной информации, не участвующей в функционировании системы, относительно информации процесса функционирования системы	0–1
Объем преобразуемой входной информации	$U_{val} = \frac{I_{ot}}{I_{in}^{tf}}$	Характеризует количество информации, приходящейся на единицу входной информации, обеспечивающей функционирование системы	0–1
Информативность входной информации	$U_{ic} = \frac{I_{us}}{I_{in}^{tf}}$	Характеризует объем используемой информации, приходящейся на единицу входной информации для управления функционированием системы; $I_{us}$ – количество преобразуемой информации, используемое системой	0–1
Снижение нетворческого труда в процессе функционирования системы	$U_{ht} = \frac{1 + U_{el}}{1 + U_{val}}$	Характеризует снижение трудозатрат на формирование данных, полученных при функционировании системы	0–1
Информационная емкость входной информации	$U_{cop} = \frac{1 + U_{el}}{2U_{el} + U_{val} + U_{ic}}$	Характеризует долю входной информации в объеме преобразуемой информации для осуществления одного цикла функционирования системы	0–1
Повышение информационной производительности	$U_{gr} = \frac{1 + U_{el}}{U_{el} + U_{val} + U_{ic}} = \frac{U_{cor}}{1 - U_{cor}}$	Характеризует снижение при применении системы количества информации, перерабатываемой вручную	0–∞

Исходя из этого, к аналоговым и иным носителям информации предъявляются требования многократного ее применения и сохранения в течение

заданного периода времени, а также недопустимости ее потери в процессе эксплуатации при внешних и внутренних воздействиях на количество

Таблица 8. Базовый набор показателей эффективности

Эффективность	Формула	Диапазон изменения
Потенциальная	$(U_{us}^{fch})^{-1} = \frac{E_{us}^f}{E_{us}^f + E_{ch}^f}$	0 ÷ 1
Использования ресурса	$U_{us}^{fr} = \frac{E_{us}^f}{(E_{us}^f)^r}$ $E_e^m = \frac{E_j}{E_i}$	0 ÷ 1
Процесса	$U_{us}^{ch} = E_{ch}^f / E_{us}^f$	0 ÷ ∞
Обеспечивающих процесс ресурсов	$U_{ch}^f = (E_{ch}^f) / (E_{ch}^f + (\Delta E_{k, n})_{ch}^f)$	0 ÷ 1
Применения ресурса	$U_{\Delta}^f = (E_{us}^f) \cdot [(E_{ch}^f + (\Delta E_{k, n})_{ch}^f)] / [(E_{us}^f + (\Delta E_{k, n})_{us}^f)]$	0 ÷ ∞
Применения обеспечивающих процесс ресурсов	$U_{\Delta}^{ch} = (E_{ch}^f) \cdot [(E_{ch}^f + (\Delta E_{k, n})_{ch}^f)] / [(E_{us}^f + (\Delta E_{k, n})_{us}^f)]$	0 ÷ ∞
Преобразования (трансформации) ресурсов	$U_{usch}^{fr} = \frac{1}{1 + (E_{ch}^f / E_{us}^f) \cdot [(E_{ch}^f + (\Delta E_{k, n})_{ch}^f) / (E_{ch}^f)] \cdot [(E_{us}^f + (\Delta E_{k, n})_{us}^f)]}$	0 ÷ 1
Фактическая (реальная)	$U_{usch}^{fr} = \frac{(E_{us}^f)^r}{(E_{us}^f)^r + (E_{ch}^f)^r}$	0 ÷ 1
Ресурсонасыщенность	$U_{usch}^f = U_{us}^{fr} \cdot U_{usch}^{fr} = \frac{E_{us}^{fr}}{(E_{us}^f)^r + (E_{ch}^f)^r}$	0 ÷ 1
Повышения ресурсонасыщенности	$(U_{us}^{fch})^{-1} (U_{usch}^{fr})^{-1} = U_r^f$	0 ÷ ∞
Интегральная эффективность	$U_e = U_{us}^{fr} \cdot U_{us}^{fch} \cdot U_{usch}^{fr}$	0 ÷ 1

и качество передаваемой и преобразуемой информации.

Тогда компоненты  $E_{us}^f$  и  $E_{ch}^f$  будут определяться информацией о физическом процессе и управлении им, а также информацией о свойстве продукта (знаменатель)  $(E_{us}^f)^r$  и оборудовании (числитель)  $E_{ch}^f$  соответственно, согласно (3). Следовательно, третий компонент  $E_e^i$  определяет эффективность параметра точности.

Следовательно, из (3) и (6) можно получить базовый набор показателей эффективности (табл. 8).

Выражение эффективности в виде (2–6) является универсальным методом оценки, поэтому применимо к анализу любых станков, в том числе осуществляющих и одновременное преобразующих несколько видов ресурсов. Этот метод дает возможность сопоставлять степень совершенства протекающих процессов, что обусловлено возможностью учета всех видов потерь как при переносе (передаче) энергии, материала и информации от источника к преобразующим механизмам и устройствам, системам так и при преобразовании в них самих.

Если ввести классы каждой из трех составляющих компонентов  $U_{us}^{fr} \times U_{us}^{fch} \times U_{usch}^{fr}$  в сум-

марную зависимость (5) для каждого вида ресурсов  $E_{re} = E_e^e \times E_e^m \times E_e^i$ , то получаем интегральные показатели классов оборудования, систем, производств по всем показателям ресурсоэффективности (табл. 9).

Для сравнения различных классов и типов оборудования, производств и систем на основании (4) можно записать:

$$\Delta E_1^2 = \frac{[(U_{us}^{fr} \cdot U_{us}^{fch} \cdot U_{usch}^{fr})_e \cdot (U_{us}^{fr} \cdot U_{us}^{fch} \cdot U_{usch}^{fr})_m \cdot (U_{us}^{fr} \cdot U_{us}^{fch} \cdot U_{usch}^{fr})_i]_2}{[(U_{us}^{fr} \cdot U_{us}^{fch} \cdot U_{usch}^{fr})_e \cdot (U_{us}^{fr} \cdot U_{us}^{fch} \cdot U_{usch}^{fr})_m \cdot (U_{us}^{fr} \cdot U_{us}^{fch} \cdot U_{usch}^{fr})_i]_1} \leq 1$$

Из вышеприведенных особенностей построения энергоинформационных систем отметим лишь некоторые особенности тенденций развития металлообрабатывающего оборудования, систем и производств, учитывая что современные технологии развиваются со скоростью, открывающей новые возможности и меняющей способ выполнения производителями традиционных операций: от машинного обучения и искусственного интеллекта до Интернета вещей и облачных вычислений. Новые процессы обработки обещают предоставить различные преимущества, в том числе повышенную эффектив-

Таблица. 9. Классы оборудования, систем, производств по интегральному показателю ресурсоэффективности

Класс ресурсоэффективности	Наименование класса ресурсоэффективности	Значение энергоэффективности класса энергоэффективности $E_e^e$	Значение производительности класса энергоэффективности $E_e^m$	Значение класса эффективности точности $E_e^j$	Значение класса ресурсоэффективности $E_{re}$
11	Чрезвычайно высокий	1,00 – 0,95	1,00 – 0,95	1,00 – 0,95	1,00 – 0,86
22	Очень высокий	0,949 – 0,9	0,949 – 0,9	0,949 – 0,9	0,85 – 0,73
33	Высокий	0,899 – 0,85	0,899 – 0,85	0,899 – 0,85	0,72 – 0,62
44	Выше среднего	0,849 – 0,8	0,849 – 0,8	0,849 – 0,8	0,61 – 0,52
55	Средний	0,799 – 0,75	0,799 – 0,75	0,799 – 0,75	0,51 – 0,43
66	Ниже среднего	0,749 – 0,65	0,749 – 0,65	0,749 – 0,65	0,42 – 0,28
77	Низкий	0,649 – 0,5	0,649 – 0,5	0,649 – 0,5	0,27 – 0,13

ность, более низкие эксплуатационные расходы, более экологичные и экологически безопасные решения и, конечно же, более высокую точность выполнения задач. Чтобы по-настоящему понять тенденции развития в области обработки, имеет смысл перечислить некоторые из новых тенденций и изменений, которые, вероятно, окажут значительное влияние на текущее состояние обработки.

Интеллектуальные решения с возможностью удаленного управления – IoT, или Интернет вещей, включают подключенные устройства (в том числе интеллектуальные датчики) для улучшения контроля над различным оборудованием и получения более подробной информации. Они также дополняют системы автоматизации, позволяя полностью оптимизировать процессы и управлять ими по-новому.

Обработка лазерным лучом – инновационный и относительно новый метод, представляющий собой термический процесс удаления материала, также известный как лазерная микрообработка (LBM). Луч лазера высокой энергии фокусируется на заготовке, а тепловая энергия передается на заданную поверхность. Металлические или неметаллические материалы удаляются посредством плавления и испарения. Обработка лазерным лучом получает все большее распространение в производстве, особенно для материалов из углеродного волокна и более прочных композитов, и быстро завоевывают популярность в промышленности. Сегодня эти технологические методы могут создавать продукты и компоненты из разнообразного сырья, включая бетон, дерево, сталь и все больший спектр металлов, сплавов, керамики и композитных материалов с металлической матрицей. Самая перспективная тенденция, связанная с этой технологией, это гибридная обработка: она включает в себя как традиционную обработку с ЧПУ, так и решения для 3D-печати, что позволяет улучшить разработку продукта. Весь процесс быстрее, эффективнее и,

возможно, более точен по сравнению с традиционными методами обработки.

Обработка с помощью лазерного луча – не единственное новшество в обработке, которое появилось в последнее время. Развиваются также нестандартные методы обработки. Среди них можно назвать электрохимическую обработку (ECM), ультразвуковую обработку или вращательную ультразвуковую обработку (RUM), гидроабразивную обработку или гидроабразивную резку (WJM) и ряд других. Каждый из нестандартных методов реализуется по-разному и предлагает специфические и эффективные преимущества.

Что касается традиционных производственных процессов, они также претерпевают трансформации в том смысле, что сталкиваются с постоянно растущими требованиями к качеству, надежности и производительности, которые удовлетворяются в области знаний и более подробно рассмотрены в [14–15]. Все эти факторы послужили причиной огромного прогресса в методологиях и приложениях теории управления во всех аспектах производства: на уровне процессов и оборудования, на уровне производственных систем и принятия решений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Лопота В.А.** и др. Концепция мехатронных технологий и микророботостроения. [http://www.energia.ru/ru/news/news-2011/public\\_07-21.pdf](http://www.energia.ru/ru/news/news-2011/public_07-21.pdf).
2. **Кузнецов А.П.** Структуры процессов и оборудования обработки резанием. Ч. 3. Модели и структуры обработки резанием // М.: Вестник Машиностроения. 2015. № 4. С. 76–87.
3. **Kuznetsov A.P., Koriath H.-J.** Energy – information regularities of increasing productivity in metalworking machine tools. EPJ Web of Conferences, v. 224, 05008 (2019). MNPS-2019. PP. 1–8.
4. **Johnson G.R., Cook W.N.** A constitutive model and data for metals subjected to large strains. High rates and high temperatures // Proc. of the 7th Intern.

- symp. on ballistics, Hague (Netherlands), 19–21 Apr. 1983. Hague: Roy. Inst. of Engrs in the Netherlands, 1983. PP. 541–547.
5. **Якобори Т.** Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. М.: Metallurgia, 1971. 264 с.
  6. **Mott N.F.** A theory of work-hardening of metal crystals. *Phil. Mag.* 1952. V. 43. No. 346. P. 1151.
  7. **Финкель В.М.** Физика разрушения. М.: Metallurgia, 1970. 376 с.
  8. **Ashby M.F.** Materials selection in mechanical design. Pergamon Press. 2005. 604 p.
  9. **Kalpakjian S., Schmid S.R.** Manufacturing engineering and technology. Prentice Hall, 2009. 1180 p.
  10. **Nassehi A., Newman S., Dhokia V., Zhu Z., Asrai R.I.** Using formal methods to model hybrid manufacturing processes. In *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*; ElMaraghy, H., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012. PP. 52–56.
  11. **Flynn J.M., Shokrani A., Newman S.T., Dhokia V.** Hybrid additive and subtractive machine tools — Research and industrial developments. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2016, 101, 79–101.
  12. **Pragana J.P.M. et al.** Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering.* 2021. V. 2. PP. 1–21.
  13. **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.
  14. **Кузнецов А.П.** Направления развития металлорежущих станков: Системные принципы. Ч. 1 // *СТАНКОИНСТРУМЕНТ.* 2020. № 3. С. 30–41.
  15. **Кузнецов А.П.** Направления развития металлорежущих станков. Ч. 2. Системные принципы // *СТАНКОИНСТРУМЕНТ.* 2020. № 4. С. 36–45.
  16. **Кузнецов А.П.** Эволюция методов оценки точности металлорежущих станков и тенденции ее изменения. Ч. 1. Эволюция понятия точность и ее физическая модель // М.: Вестник машиностроения. 2016. № 12. С. 8–16.
  17. **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.
  18. **Kuznetsov A.P., Koriath H.-J., Kalyashina A.V.** Comparative Integrated Manufacturing Efficiency in Production Engineering. *Procedia CIRP 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems.* Published by Elsevier B.V. 2017. PP. 527–532.

КУЗНЕЦОВ Александр Павлович –

доктор технических наук, профессор кафедры станков МГТУ «СТАНКИН»

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1090 руб.

### ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ Кузнецов А. П.

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2019. – 488 с.  
ISBN 978-5-94836-477-3

В книге рассматриваются методы оценки теплового режима металлорежущих станков и их наиболее теплонапряженных деталей и узлов. Приведен механизм формирования и теплофизического анализа теплового режима деталей и узлов металлорежущих станков, дана их теплофизическая классификация и описываются типовые тепловые модели. Приводятся аналитические зависимости для оценки стационарного и нестационарного тепловых режимов деталей и узлов станков. Приведена классификация методов воздействия на тепловой режим станков, описаны способы снижения, коррекции, компенсации и управления тепловым режимом металлорежущих станков.

Предлагаемая монография может быть полезна студентам, аспирантам, а также инженерам и специалистам, занимающимся вопросами повышения точности при проектировании, производстве и эксплуатации металлорежущих станков.

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; ☎ +7 495 956-3346; [knigi@technosphere.ru](mailto:knigi@technosphere.ru), [sales@technosphere.ru](mailto:sales@technosphere.ru)