

**Ключевые слова:**

производственная система, миниатюризация компонентов, энергия физического процесса, скорость пластической деформации, энергоэффективность

ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ И ЭФФЕКТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАНКОВ

ЧАСТЬ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Александр КУЗНЕЦОВ

Рассмотрены основные закономерности физических процессов, являющихся научной базой различных видов обработки материалов в условиях современного производства. С этих позиций проанализированы достигнутые и потенциально достижимые величины таких параметров обработки, как скорость резания и энергоэффективность.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Развитие сложных технико-технологических, кибер-физических производственных систем происходит в направлении достижения ими максимальной степени идеальности функционирования. Этот процесс идет как в рамках совершенствования существующих конструктивных решений, так и при принципиальном изменении конструктивных решений, основанных на новых физических принципах или их сочетаниях. Такое направление развития обусловлено всесторонним использованием глубинных физико-химических свойств материи и энергии при их взаимодействии. Это приводит к переходу на новый уровень структурных составляющих технико-технологических систем – с макро- до микро- и наноуровня.

Требования (рис. 1) к необходимости достижения изделиями высоких показателей степени идеальности (выражением которой является точность) и ее постоянный рост особенно ярко проявляются в таких отраслях, как ОПК, авиационная, космическая, атомная, электронная, медицинская, биотехнологическая и некоторых других.

В результате качественного изменения технических систем в ходе эволюционного развития технологических укладов возник ряд важных вопросов, связанных с созданием, организацией производственных технологий и производственных

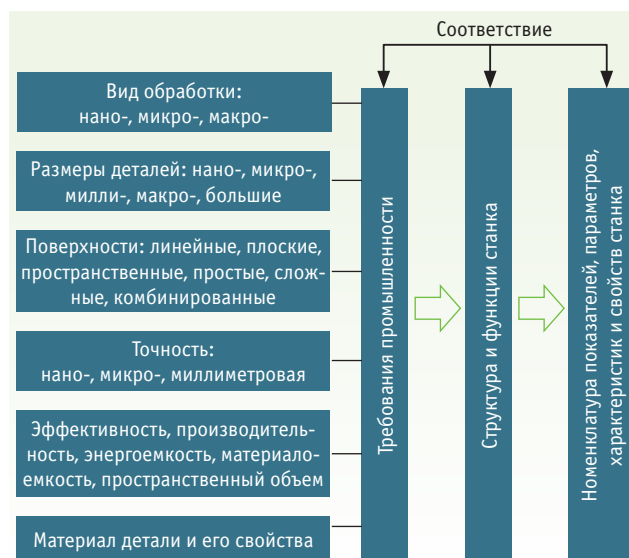


Рис. 1. Взаимосвязь требований производителей и потребителей оборудования

систем и управлением ими. Усложнился процесс подготовки и принятия решений, возросла роль конструкторских и проектных организаций, перерабатывающих информацию и материализующих ее в методических указаниях, документах и чертежах, определяющих создаваемую техническую систему.

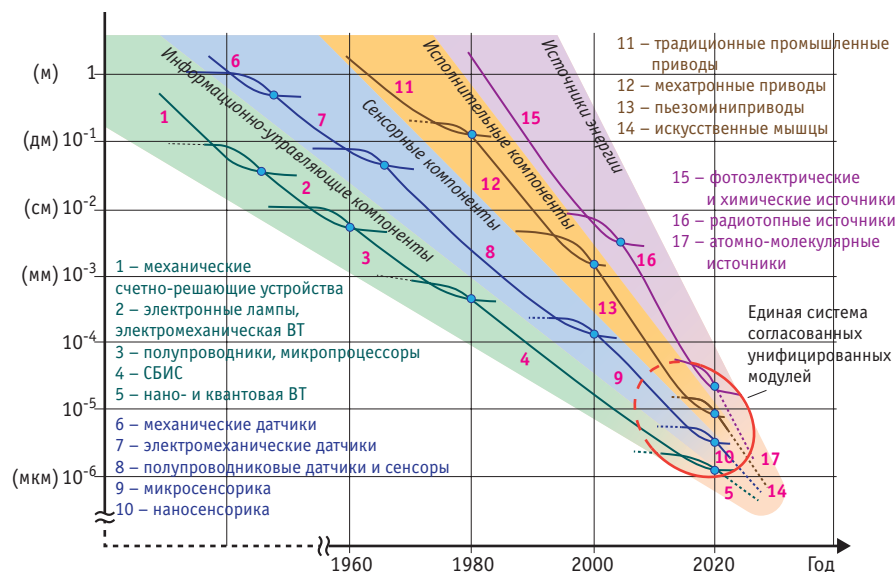


Рис. 2. Развитие компонентов технических и информационных систем [1]

В настоящее время во всех технологически развитых странах происходит рост количества и разнообразия выпускаемых изделий. Ускорение выпуска новых изделий может быть определено не только быстрым обновлением и освоением их выпуска, но и увеличением количества их однотипных видов (разнообразие), а также усложнением самих изделий. Появление новых форм и видов изделия, выполняющего конкретные технические задачи, продиктовано использованием и практическим применением новых физических законов и явлений. Быстрая замена новых изделий новейшими рассматривается как показатель научно-технического прогресса.

Для упомянутого прогресса наиболее важным направлением развития стала, например, миниатюризация компонентов (рис.2), появление микроэлектромеханических систем, микрооптоэлектромеханических и тому подобных систем, реализующих новые свойства материалов, физические принципы взаимодействия, явления и эффекты, которые базируются на широком применении фундаментальных, теоретических знаний об этом. Однако, основными элементами, сдерживающими миниатюризацию технических систем, являются исполнительные (силовые) компоненты.

Металлорежущие станки, технологическое оборудование, комплексы и системы являются основными средствами производства деталей – элементной базы – для всех перечисленных выше отраслей промышленности, и поэтому к ним предъявляются еще более жесткие требования по точности, производительности и эффективности.

Материал заготовки изделия претерпевает изменения, взаимодействуя с рабочим инструментом, причем характер и вид этих изменений зависят

от того, каковы его начальное состояние, структура и свойства, как количественно и качественно он соотносится с состоянием, структурой и свойствами материала рабочего инструмента, в каком порядке, в каком количестве и какого вида подводится энергия, а также какое количество информации об изделии содержится в программе управления рабочей инструментом. Рабочий инструмент как таковой может и отсутствовать, тогда происходит взаимодействие материала заготовки изделия и энергии в технологической среде.

Вид энергии реализуемого физического процесса является одной из основных характеристик, который определяет способ воздействия на взаимодействующие материалы изделия и рабочего инструмента. Часто принято по способу воздействия называть метод обработки, с помощью которого реализуется тот или иной технологический процесс. Передаваться могут разнообразные формы энергии: механическая, тепловая, электрическая, электромагнитная, лазерная, плазменная, химическая, гравитационная и т. п., а также различные их комбинации.

Энергия физического процесса равна работе обобщенной силы F_i на обобщенном расстоянии L_i ; $E_i = F_i \cdot L_i$, где обобщенная сила для физических процессов определяется по закономерностям физического явления процесса. Следует добавить, что в зависимости от природы возникновения, обобщенными силами являются: гравитационная, электрическая, механическая, инерции, центробежная, термодвижущая, гидродинамическая, магнитная, химическая, поляризирующая, намагничивающая, диффузионная, осмотическая, фильтрационная, термоэлектрическая, термодиффузионная, электрохимическая, седиментационная, вязкости (сдвиго-

Таблица 1. Виды и параметры обобщенной силы

Наименование движущей силы физического явления	Обобщенная сила	Параметры
Гравитация	$F = M \cdot g$	Масса, ускорение свободного падения
Механическая	$F = m \cdot a$ $F_{\omega} = m \cdot \omega^2 r$	Масса, ускорение, угловая скорость вращения
Электрическая	$U = I \cdot R$	Ток, сопротивление
Магнитная	$F_m = B \cdot V$	Магнитная индукция, магнитный поток
Тепловая	$Q = T \cdot X$	Температура, тепловое сопротивление

вой, турбулентной, объемной), торсионная, лучистого энергообмена. В табл. 1 приведены наиболее широко применяемые (реализуемые) в настоящее время обобщенные силы и их параметры.

Для обработки резанием модель разрушения определяет физическую структуру процесса – физическую модель резания (физический процесс пластического деформирования и разрушения) и тогда касательные напряжения τ_S , определяющие сдвиг

дислокации, равны $\tau_S = \tau_{xy} = \frac{F_S}{A_S}$ [2], где F_S – сила

сдвига (резания); A_S – площадь сдвига. Сдвиг происходит при равенстве касательных напряжений и действующих сил со стороны детали и инструмента (здесь не рассматриваются силы трения), в результате получим [2]:

$$\begin{aligned} \bar{F}_S &= \bar{\tau}_S A_S = m_S a_S = \rho V_S \bar{v}_S / t_S = \sum \bar{F}_{ид} = m_d a_d + m_{ин} a_{ин} = \\ &= m_d \bar{v}_d / t + m_{ин} \bar{v}_{ин} / t, \end{aligned} \quad (1)$$

где a_S – ускорение и \bar{v}_S – вектор скорости дислокации; t_S – время распространения дислокации; V_S – объем перемещаемой дислокации; m_d – масса детали; $m_{ин}$ – масса инструмента; \bar{v}_d – вектор скорости детали; $\bar{v}_{ин}$ – вектор скорости инструмента; t – время резания.

В рассматриваемом случае обработки на металлорежущих станках важной является структура силы резания, которая может быть записана как [3]:

$$\bar{F}_S = \bar{\tau}_S K_S,$$

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.) и степени их детализации. При этом величина напряжений сдвига в общем виде определяется из соотношения:

$\tau_S = \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$, где σ соответствует и определяется уравнением Джонсона-Кука [4]:

$$\bar{\sigma} = [A + B(\epsilon)^n] \times [1 + C \times \ln(\frac{\bar{\epsilon}}{\epsilon_0})] \times [1 - (\frac{T - T_0}{T_m - T_0})^m],$$

где ϵ – эффективная пластическая деформация; $\frac{\bar{\epsilon}}{\epsilon_0}$ –

эффективная скорость пластической деформации; A, B, n, C, m – зависящие от свойств материала константы, определяемые на основе экспериментальных данных; T_0, T_m – температуры окружающей среды и плавления материала соответственно. Значения K_S для выбранной из наиболее известных моделей резания [2] определяются так же, как это приведено в [3].

В то же время работа силы резания определяется величинами силы и скорости резания. Следовательно можно записать следующие соотношения:

$$\tau_S = \frac{F_S}{A_S} = \frac{F_S \cdot L}{A_S \cdot L} = \frac{F_S \cdot L}{A_S \cdot L} \cdot \frac{t}{t} = \frac{F_S \cdot v}{V} \cdot \frac{t}{t} = \frac{N}{Q_S} = \frac{J}{V}, \quad (2)$$

где F_S – сила [Н]; A_S – площадь [м²]; L – длина (перемещение при резании) [м]; t – время [с]; V – объем [м³]; v – скорость [м/с]; N – мощность [Вт]; $Q_v = V/t$ – удельная производительность [м³/с]; J – энергия [Дж], $Q_J = J/V$ – удельная энергоёмкость процесса резания (энергопроизводительность) [Дж/м³].

Физический процесс резания определяет и определяется скоростью удаления материала при резании и характеризуется скоростью относительного перемещения режущего инструмента и заготовки, которая может быть определена произведением площади резания материала в единицу времени на длину, либо произведением скорости резания на площадь резания. Таким образом, можно записать:

$$Q_v = \frac{F_S \cdot v}{\tau_S} = \frac{\tau_S \cdot K_S \cdot v}{\tau_S} = K_S \cdot v. \quad (3)$$

Следовательно, с одной стороны, производительность резания определяется (3) и обуславливает подводимую к станку мощность, реализуемую в его узлах (шпиндель, привод подач, ускорения), а потери мощности в структуре станка, очевидно, снижают его точность. А с другой стороны, от создателей станков требуется принятие мер для обеспечения устойчивости станка к энергетическим и силовым нагрузкам. При этом потери энергии в станке при передаче или преобразовании ее форм и видов должны быть минимизированы, так как приводят к снижению показателей точности станка (геометрические, жесткостные, тепловые, динамические). Это разнонаправленное влияние преобразуемой энергии на точность и производительность является базой для новых исследований и разработок, нацеленных на достижение более высокой эффективности.

BALLUFF

Инновационные решения Balluff

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ФАБРИКИ БУДУЩЕГО



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 · www.balluff.ru



В работах [14, 15] сформулированы основные направления развития станков для традиционной обработки. Учитывая данные работы [1] и в соответствии с рис. 2, важным направлением становится разработка станков для обработки мини-, микро- и наноразмерных деталей, а также процессов их обработки. Информация о геометрических параметрах, форме и свойствах изделий (рис. 1) характеризует виды технологий:

- **нанотехнологии** – характерный геометрический размер менее $10^{-7} \div 10^{-9}$ м;
- **микротехнологии** – характерный геометрический размер $10^{-7} \div 10^{-5}$ м;
- **обычные или традиционные технологии** – характерный геометрический размер больше 10^{-3} м.

Виды процесса физического явления, с точки зрения модели образования и описания механизма процесса, можно разделить на уровни относительно геометрического размера их рассмотрения:

- субмикроскопический уровень (атомные размеры порядка 10^{-9} м), когда происходит нарушение атомных связей;
- микроскопический уровень (размеры порядка $10^{-7} \div 10^{-6}$ м), когда образуются микротрещины по границам зерен;
- макроскопический уровень (размеры порядка 10^{-3} м), когда образуются трещины и происходит их движение из области концентрации напряжений.

Тогда энергетическая модель изменения точности во времени может быть представлена в виде рис. 3 [16].

Идеальная скорость распространения пластических деформаций может быть определена на основе решения уравнения движения массы элемента материала, имеющего вид [5]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4)$$

Тогда скорость распространения упругой волны $v = \sqrt{E/\rho}$ можно принять за меру скорости распространения пластической деформации. Поэтому, если принять во внимание зависимость скорости пластической деформации от скорости звука, то:

$$v_{\text{деформации}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \times e^{-\frac{A_m}{(\tau_s \times \theta^0)}} = v_{\text{звука}} \times e^{-\frac{A_m}{(\tau_s \times \theta^0)}}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости; ρ – удельная плотность; A_m – постоянная материала; τ_s – напряжение сдвига; θ^0 – температура зоны.

Движущей силой распространения трещины является энергия деформации, которая уравнивается поверхностной и кинетической энергиями, а при повышении скорости воздействия свыше предельной разрушение будет являться абсолютно хрупким.

Известно также, что скорость распространения тепловых волн определяется скоростью звука. Поэтому при сверхзвуковых скоростях происходит «отставание» теплового потока и, следовательно, уменьшение коэффициента теплопроводности металлов с увеличением скорости обработки. С учетом кинетической энергии трещины, максимально возможная скорость распространения разрушения в твердом теле составляет 0,38 от скорости звука,

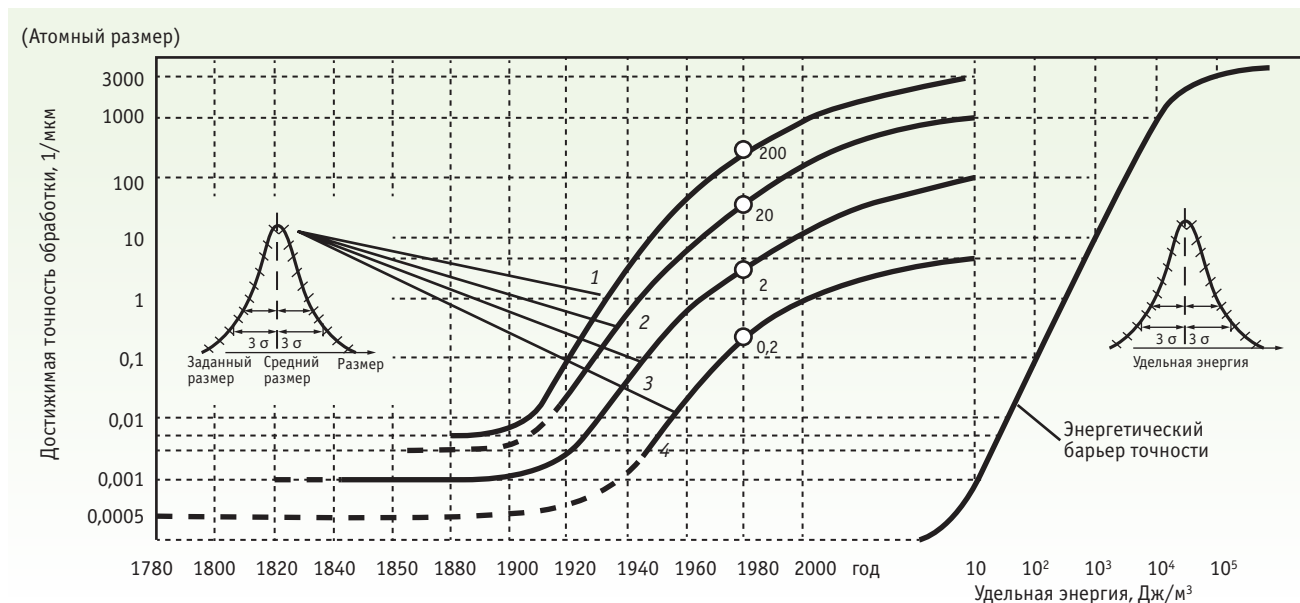


Рис. 3. Изменение точности во времени и ее взаимосвязь с удельной энергией для 1 – традиционной, 2 – прецизионной (высокоточной), 3 – высокопрецизионной, 4 – сверхпрецизионной (ультрапрецизионной) обработки

**08-10
июня 2021**

Москва
ЦВК «Экспоцентр»
Павильон 8



При поддержке:

АРСС

Ассоциация развития
стального строительства



Российский союз
поставщиков
металлопродукции

6-я Международная
специализированная выставка

Металло Конструкции 2021



12+

Место проведения:



Генеральный
информационный партнер:



Организатор:



www.mc-expo.ru

+7 (495) 734-99-66

а в рамках чисто упругой задачи этот предел увеличивается до 0,4 скорости звука [6, 7]. Представленные выше рассуждения (взаимосвязи или формулы) о скорости пластической деформации и разрушения (распространения трещины) позволяют поставить вопрос о предельно возможной скорости резания. Если принять, что толщина срезаемого материала h , а направление распространения трещины определяется углом θ , то предельная скорость резания определяется как:

$$v_{\text{резания}} = \cos\theta \times \sqrt{\frac{E}{\rho}} \times e^{-\frac{A}{(\tau_s \times \theta^0)}} = \cos\theta \times v_{\text{звук}} \times e^{-\frac{A}{(\tau_s \times \theta^0)}}. \quad (6)$$

В соответствии с (5) и (6), в табл. 2 приведены соотношения указанных скоростей и достигнутой максимальной скорости резания для различных видов обрабатываемых материалов. Их сопоставление указывает, что потенциал роста скоростей резания еще далеко не достигнут, а достигнутая скорость резания составляет не более 5–6% от теоретически возможной.

С другой стороны, зависимости (2) и (3) позволяют свести в табл. 2 и 3 удельные значения достигнутой энергопроизводительности при резании как с использованием различных физических процессов, так и для различных материалов, что определяется обобщенным параметром материала K_S и достигнутой скоростью v резания. Достижимые значения удельных характеристик процессов обработки зависят от параметров, входящих в зависимости (2)–(7), обобщение и диапазон изменения которых подробно рассмотрены в работе [7], где приведены подробные диаграммы соотношения предела прочности и модуля Юнга, а также соотношения плотности и модуля Юнга для различных материалов. На их основании приведены удельные характеристики в табл. 4, 5.

Таблица 2. Соотношения скоростей звука и распространения трещины

Материал	Скорость звука, м/с	Скорость распространения трещины, м/с ($\times 10^3$ м/мин)	Достигнутая скорость резания, $\times 10^3$ м/мин
Алмаз	12 000	7200 (432)	н/д
Алюминий, сплавы	6200	2350 (140)	8,2
Чугун	3850	1460 (88)	4,7
Сталь	5030	1900 (114)	4,0
Легированные стали	5850	2200 (132)	4,5
Титан, сплавы	4700	1780 (107)	2,3
Никель, сплавы	5600	2100 (127)	0,35

Таблица 3. Удельная энергоёмкость видов обработки

Вид обработки	Основной физический процесс	Удельная энергоёмкость, кДж/см ³
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	100–1 000
Электрохимическая	Ионизация	500–2 000
Лучевая	Ионизация	100–3 000

Рассмотренные выше закономерности также предоставляют возможность оценки направлений развития оборудования, реализующего эти процессы, по отношению к потенциальным возможностям применяемого физического процесса, в форме системы вариантов достижения требуемых энергетических показателей. Выражение (1) позволяет определиться с наиболее эффективным местом (приводы движения детали или инструмента) приложения усилий для реализации и достижения требуемых параметров и характеристик, видов и форм преобразования энергии, их оптимизации и иных задач развития, в том числе на структурном уровне рассмотрения.

Для множества лучевых методов обработки, в том числе для аддитивных технологий, требуется значительно большая величина энергии на единицу веса произведенной детали (табл. 5 сформирована по материалам [10–12]).

В настоящее время применяются многочисленные способы обработки, получения и формирования деталей и изделий, разнообразные виды технологических процессов и оборудования для их осуществления. Направления развития широкого спектра технологических методов воздействия на объект производства обуславливают необходимость разработки новых системных методов и физических принципов направлений эффективной реализации задач разработки технологических процессов и оборудования обработки как новых материалов, так и новых методов и технологий, обеспечивающих потребность эффективного общественного производства. Вид и форма энергии, реализуемого физического процесса, является одной из основных качественных характеристик, определяющих способ воздействия на взаимодействующие материалы изделия и рабочего инструмента.

Многообразие видов и форм взаимодействия материи, энергии и информации обуславливает, определяет и формирует множество возможных видов технологических процессов, а также типов

rosmould

featuring **3D-TECH Area**

Международная выставка форм, пресс-форм, штампов, услуг по проектированию изделий и их контрактному производству

15 – 17 июня 2021

МВЦ «Крокус Экспо», Москва

+Специализированный раздел выставки
Аддитивные технологии и 3D-печать

в сотрудничестве с



Организаторы:



messe frankfurt mesago

Messe Frankfurt Group

Бесплатный билет по промокоду **RM21-XHDAZ**
на сайте www.rosmould.ru

Таблица 4. Удельная энергоёмкость материалов при обработке резанием и шлифованием (по материалам [9])

Материал	Алюминий, сплавы	Чугун	Сталь	Лигированная сталь	Никель, сплавы	Титан, сплавы
Удельная энергоёмкость при резании, Вт·с/мм ³	0,4–1	1,1–5,4	2–9	2–5	4,8–6,7	2–5
Удельная энергоёмкость при шлифовании, Вт·с/мм ³	7–27	12–60	14–68	18–82	–	16–55

Таблица 5. Удельная энергоёмкость аддитивных технологий (по материалам [10–12])

Вид процесса	LDD	DMLS	DMD	EBM	FDM	SLM	SLS	SLA
Источник энергии	Лазер	Лазер	Лазер	Электронный луч	Термическая энергия	Лазер	Лазер	Лазер ультрафиолетовый
Материал	Порошок	Порошок	Порошок	Порошок, провод	Пластики, пасты	Порошок	Порошок	Порошок
Удельная энергоёмкость, МДж/кг	1052	241–339	7709	61–177	83–1247	83–588	51–144	50–149

нового оборудования или направлений его совершенствования. Параметры и характеристики физических процессов взаимодействия являются эффективным ключом решения этих задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лопота В.А.** и др. Концепция мехатронных технологий и микророботостроения. 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 // 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. **Екобори Т.** Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. М.: Металлургия, 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.: Металлургия, 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 // 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»



www.ito-tulamash.ru

300002, Россия, г. Тула,
ул. Мосина, д. 2

Тел.: +7 (4872) 32-10-38,
Тел./факс: +7 (4872) 36-51-74
E-mail: instrument@tulamash.ru



АО «ИТО-Туламаш» производит:

- режущий инструмент общемашиностроительного и специального назначения;
- мерительный инструмент;
- приспособления и вспомогательный инструмент;
- технологическую оснастку.



Отрасли применения инструмента:

- оборонная
- авиакосмическая
- нефтегазовая
- автомобильная
- химическая
- деревообрабатывающая