

УДК 621.91.01

**МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ
В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК
(Полоцкий государственный университет)*

Проанализированы современные тенденции и концепции развития машиностроения. Приведены методологические принципы проведения теоретических и экспериментальных исследований процесса резания, обобщенная кинематическая схема резания и схема формирования поверхностей, зависимости кинематических и физических характеристик процесса резания от условий обработки, подтверждающие их взаимосвязь. Описаны универсальные стенды и аппаратура для исследования обработки резанием применительно к станкам с числовым программным управлением, представлена общая структура технологической системы. Обосновано создание единой управляющей платформы процесса резания и самообучающихся систем.

Ключевые слова: методология, машиностроение, процесс резания, кинематика, физические характеристики, станок с числовым программным управлением, самообучающаяся система.

Введение. Развитие науки о резании материалов определяется, с одной стороны, современными достижениями в области исследований физико-химических явлений, а с другой – происходящими техническими переменами в машиностроительном производстве. Исследования процесса резания по своей структуре, логической организации применяемых методов и средств должны учитывать происходящие изменения в фундаментальной науке и производственной деятельности.

В настоящее время эти достижения и изменения обобщены в концепциях технологических укладов (уклады I–VI) или промышленных революций («индустрия 1,0» – «индустрия 4,0») и развития образования («университет 1,0» – «университет 4,0») [1–5]. Технологический уклад – это совокупность сопряженных производств, имеющих одинаковый технический уровень и развивающихся синхронно. В 2010 году в развитых странах доля производительных сил четвертого технологического уклада (период интенсивного развития 1930–1970 гг.) составляла 20%, пятого (1970–2010 гг.) – 60% и прогнозного шестого (2010–2050 гг.) – 5%.

Примерно с 2002 года разрабатывается теория конвергенции – сближения, слияния каких-либо параметров и элементов в независимых друг от друга явлениях, которая предполагает объединение и синергетическое усиление наноразмерных, биологических, информационных и когнитивных (НБИК) технологий [6]. Результатом НБИК конвергенции будет полное слияние этих технологий в единую научно-технологическую область знания. Предполагается переход к природоподобным технологиям. При этом необходимо учитывать реализуемую в настоящее время концепцию устойчивого или гармоничного развития, предусматривающую баланс цивилизации и природы, в том числе инноваций, и восприимчивость к ним производства [7]. В связи с этим развивается теория мобильного производства, позволяющая обосновывать быстрый и с минимальными финансовыми затратами технологический переход предприятия к выпуску инновационной продукции [8]. Мобильные производства основываются на разработке технологических модулей – переходов операций технического процесса, учитывающих материалы, конструктивные элементы и поверхности детали, вид обработки резанием и его режимы, технологическое оборудование и оснастку. Для реализации технологических модулей и мобильного развития производства на их основе необходимо, чтобы оборудование и оснастка были многофункциональными [9]. Многофункциональность обеспечивается за счет применения металлорежущих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), реализующих трех-, четырех- и пятиосевую обработку резанием, и быстроперестраиваемой технологической оснасткой модульного типа. В основу принципиальных конструктивных схем многофункционального модульного оборудования и оснастки положены кинематические схемы резания, предложенные профессором Г.И. Грановским [11–13], которые в настоящее время интенсивно реализуются и развиваются.

Следует также отметить, что главные этапы развития науки о резании материалов соответствуют этим концепциям и определяются требованиями механизации и автоматизации технологических процессов, масштабами производства, изменением источников энергии, применением наноматериалов, микроэлектроники, нейронных сетей, искусственного интеллекта, информатизацией производства на основе интернет-технологий.

Основная часть. Анализ кинематических схем резания свидетельствует о том, что их многообразие (порядка 700 схем) можно свести к некоторой обобщенной (единой) кинематической схеме резания, представленной на рисунке 1. Кинематическая схема резания условно изображается в прямоугольной системе координат, оси которой имеют определенную направленность: ось *OZ* – вдоль вектора линей-

ной скорости \bar{v}_e движения резания; ось OX – вдоль оси вращательного движения резания; ось OY – по радиусу к вращательному движению. Движение резания – результирующее движение режущего инструмента и заготовки в процессе резания. Обрабатываемая заготовка Z и режущий инструмент PI , представленные в виде окружных сечений их разнообразных форм, могут совершать поступательные и вращательные элементарные движения резания $D_1 \dots D_6$ вдоль и вокруг осей OX , OY и OZ , т.е. иметь согласно базовым положениям теоретической механики шесть степеней свободы (кинематические признаки).

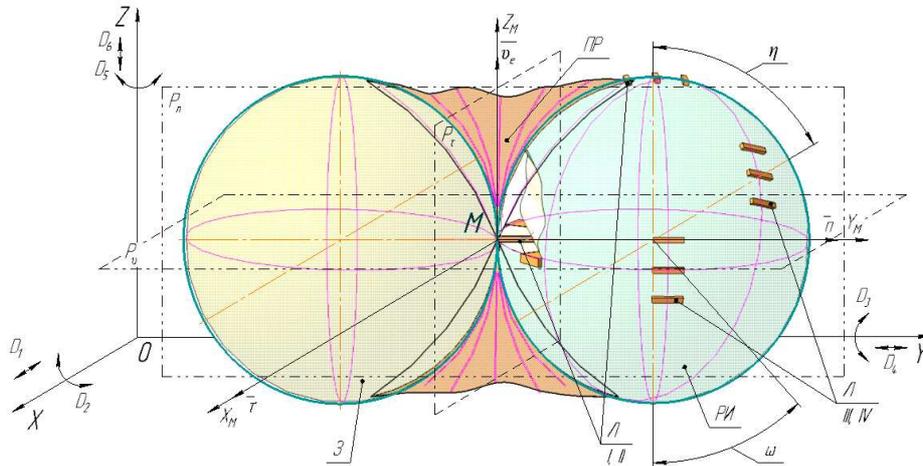


Рисунок 1. – Обобщенная кинематическая схема резания

Лезвия L инструмента PI могут находиться на периферии (положения I и II) и торце (положения III и IV) окружных сечений внешней и внутренней поверхностей воображаемой сферы (конструктивные признаки). В точке M лезвия L в координатной системе x_M, y_M, z_M проведены касательный $\bar{\tau}$, нормальный \bar{n} и бинормальный (в данном случае \bar{v}) векторы (репер Френе), которые определяют положение отсчетных для геометрических параметров лезвия плоскостей: основной $P_v - P_v$, главной секущей $P_\tau - P_\tau$ и касательной $P_n - P_n$. Оси вращения окружных сечений заготовки и инструмента расположены под углами ω и η относительно друг друга в двух диаметрально противоположных плоскостях (установочные признаки). Сочетание элементарных движений $D_1 \dots D_6$ и положений заготовки, инструмента и лезвий в процессе резания обеспечивают формирование поверхности резания по выпуклой, вогнутой и плоской формам.

Обобщенную кинематическую схему резания можно привести к схеме той или иной разновидности обработки резанием путем введения дополнительных условий:

1) принятие любого из элементарных движений резания, направление линейной скорости которого параллельно оси OZ , является главным движением резания. Главное движение резания – элементарное движение резания, осуществляемое с наибольшей скоростью;

2) исключение из обобщенной кинематической схемы резания тех движений, которые не реализуются в данной разновидности резания;

3) изменение расположения оси неглавного вращательного движения (окружности) путем ее поворота относительно точки M установки оси этого движения в положение, параллельное той координатной оси, относительно которой задан угол взаимной установки инструмента и заготовки;

4) корректировка направлений элементарных движений резания с учетом конкретной разновидности резания;

5) установление соотношений линейных скоростей элементарных движений резания.

Например, для четырехэлементной кинематической схемы резания (рисунок 2) примем: вращательное движение заготовки D_1 и его линейную скорость v_1 главным движением резания D_r и v_r соответственно; вращательное движение инструмента D_2 и его линейную скорость v_2 – касательным движением резания D_k и v_k соответственно; поступательные движения инструмента D_3 и D_4 и их линейные скорости v_3 и v_4 – движениями подачи D_{s1} и D_{s2} и скоростями подачи v_{s1} и v_{s2} соответственно. Тогда результирующая линейная скорость движения резания будет равна

$$v_e = v_1 + v_2 + v_3 + v_4 = v_r + v_k + v_{s1} + v_{s2} = v_r \left(1 + \frac{v_k}{v_r} + \frac{v_{s1}}{v_r} + \frac{v_{s2}}{v_r} \right) = v_r \cdot (1 + i_k + i_{s1} + i_{s2}).$$

Трансформация четырехэлементной кинематической схемы в более простые, описывающие традиционные виды обработки резанием, проводится при определенных передаточных отношениях i_k, i_{s1}, i_{s2} , величинах и направлениях линейных скоростей v_r, v_k, v_{s1}, v_{s2} элементарных движений резания.

Например, при $i_k = i_{s1} = i_{s2} = 0$ и $v_r \neq 0$ имеют место строгание, долбление, протягивание; при $v_r \gg v_s$ и $i_k = i_s = 0, R_{v_s} = i_k v$ – точение; при $v_r > v_k > v_s$ и $i_{s2} = 0$ – ротационное точение или фрезоточение; при $v_r > v_s$ и $i_k = i_{s2} = 0, v_{s1}$ оси $v_r, R_{v_r} = \text{const}$ – осевая обработка; при $v_r > v_{s1}$ и $i_k = i_{s2} = 0, v_s \perp$ оси $v_r, R_{v_r} = \text{const}$ – фрезерование; при $v_r > v_{s1}, v_k \neq 0, v_{s2} = 0$ – зубофрезерование и т. д.

Здесь R_{v_r} – радиус траектории главного движения резания.

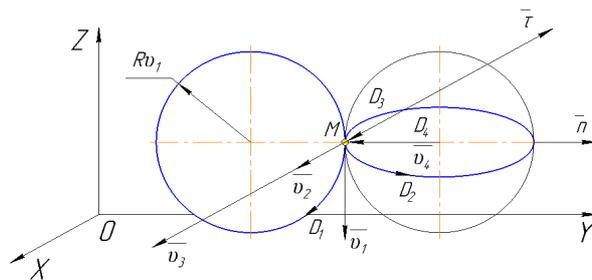


Рисунок 2. – Четырехэлементная кинематическая схема

Реализация двух-, трех- и четырехэлементных кинематических схем резания на современных станках с ЧПУ приводит к таким видам обработки, как винтовая интерполяция, трепанация, трохойдальное и плунжерное резание, и другим. Как правило, в этих видах обработки используется касательное движение или врезание по касательной режущих лезвий. Согласно [12], касательное движение – это прямолинейное поступательное или вращательное движение режущего инструмента, скорость которого меньше скорости главного движения резания и направлена по касательной к режущей кромке, предназначенное для того, чтобы сменить контактирующие с заготовкой участки режущей кромки.

Профессор В.Ф. Бобров [15] трактует это понятие несколько шире и рассматривает точение резцом, режущая кромка которого есть касательная к обработанной поверхности или перемещается вдоль самой себя. Доказано [16; 17], что касательное движение режущей кромки снижает силы трения, температуру и мощность резания. Принято принципиальное положение теории резания [18; 19], согласно которому каждой паре обрабатываемого и инструментального материалов соответствует оптимальная скорость резания, обеспечивающая минимальное значение температуры резания. Именно эти преимущества касательного движения и принципиальное положение теории резания обуславливают развитие трех-, четырех- и пятиосевой обработки сложных поверхностей деталей на станках с ЧПУ.

Для описания траекторий и поверхностей резания предложен универсальный принцип продольного сложнофункционального формирования [8], который предусматривает образование поверхности,

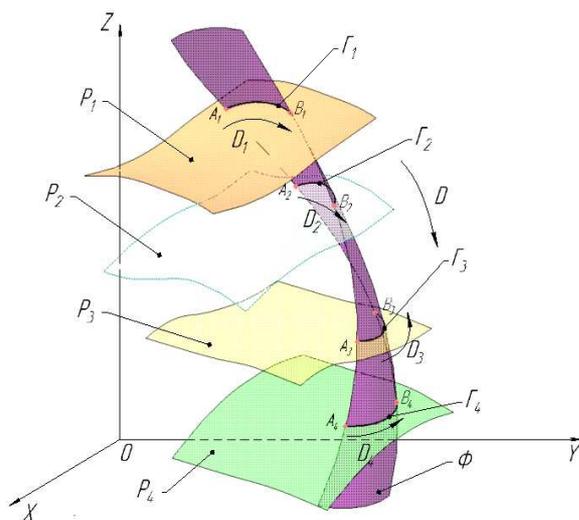


Рисунок 3. – Общая схема формирования поверхности

как показано на рисунке 3, кривой линией Γ , расположенной на некоторой поверхности P и перемещающейся по ней путем движения D (в сечениях $D_1 \dots D_4$) этой поверхности в пространстве с функциональным изменением ее формы (в сечениях $P_1 \dots P_4$) и формы кривой линии (в сечениях $\Gamma_1 \dots \Gamma_4$).

Образуемая при этом поверхность называется формируемой поверхностью Φ . Кривая, осуществляющая при своем пространственном движении формирование поверхности, называется формирующей линией, а поверхность, на которой она расположена, – формирующей поверхностью.

Пространственное перемещение формирующей линии – формирующее движение; траектория рассматриваемой точки формирующей линии в формирующем движении – след формирования.

Общий случай формирования поверхности представляет собой сложный процесс, определяемый множеством различных характеристик, которые разделяются на две группы: 1) характеристики формы; 2) характеристики движения.

Указанные выше характеристики определяют:

- степень сложности формирующей поверхности и формирующей линии;
- степень изменяемости формы формирующей поверхности и формы формирующей линии;
- степень свободы формирующей поверхности в пространстве и формирующей линии на формирующей поверхности.

Для многоосевой обработки на станках с ЧПУ в большинстве случаев можно выделить четыре возможных варианта её реализации:

1) *характер перемещения* формирующей плоскости с параметром P_p (плоскость в любом случае смещается – иначе не было бы поверхности) при двух заданных вариантах перемещения:

- однокоординатное (по оси Z) ортогональное (перпендикулярное плоскости) перемещение – $P_p = 0$;
- вращательное перемещение плоскости (вокруг оси X , расположенной в самой плоскости) – $P_p = 1$.

2) *степень подвижности* формирующей линии в формирующей плоскости с параметром P_1 :

- формирующая линия неподвижна – $P_1 = 0$;
- формирующая линия имеет перемещение в формирующей плоскости – $P_1 = 1$;

3) *степень изменяемости* формирующей линии в формирующей плоскости с параметром I_1 :

- формирующая линия неизменна $I_1 = 0$;
- формирующая линия изменяется $I_1 = 1$;

4) *степень сложности* формирующей линии с параметрами F_1 :

- формирующая линия F_1 прямолинейна;
- формирующая линия F_1 криволинейна.

Получено математическое выражение*, описывающее формирование линейчатой поверхности прямой линией во вращающейся плоскости, имеющее по координате z следующий вид:

$$z = \frac{k + tg \left[n_\phi \cdot \phi \cdot P_p + n_z \cdot z \cdot (1 - P_p) \right]}{1 - k \cdot tg \left[n_\phi \cdot \phi \cdot P_p + n_z \cdot z \cdot (1 - P_p) \right]} \cdot \left[x + C_\phi \cdot \phi \cdot P_p + C_z \cdot z \cdot (1 - P_p) \right] \pm \pm \frac{b}{\sqrt{1 - k^2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{k + tg \left[n_\phi \cdot \phi \cdot P_p + n_z \cdot z \cdot (1 - P_p) \right]}{1 - k \cdot tg \left[n_\phi \cdot \phi \cdot P_p + n_z \cdot z \cdot (1 - P_p) \right]}} + P_p \cdot (m_\phi - k \cdot C_\phi) \cdot \phi + (1 - P_p) \cdot (m_z - k \cdot C_z) \cdot z \cdot \sin(P_p \cdot \phi). \tag{1}$$

Съем припуска с заготовки определяется возможными сочетаниями параметров режущей кромки K и траектории T резания в способах копирования K , огибания O и пересечения $П$. Режущая кромка и траектория резания являются уровнями варьирования, а копирование, огибание и пересечение – факторами обработки. Исходя из этого, например, при обработке цилиндрической поверхности детали возможно 12 способов ее формирования и срезания припуска (таблица 1).

Таблица 1. – Способы обработки цилиндрической поверхности детали

№ способа	Образование линии формы	Образование изменения формы	Образование способа
1	Копированием (РКК)	Траектория	Копированием (ТК)
2	Огибанием (РКО)		Копированием (ТК)
3	Пересечением (РКП)		Копированием (ТК)
4	Копированием (РКК)		Огибанием (ТО)
5	Огибанием (РКО)		Огибанием (ТО)
6	Пересечением (РКП)		Огибанием (ТО)
7	Копированием (ТК)	Режущая кромка	Копированием (РКК)
8	Копированием (ТК)		Огибанием (РКО)
9	Копированием (ТК)		Пересечением (РКП)
10	Огибанием (ТО)		Копированием (РКК)
11	Огибанием (ТО)		Огибанием (РКО)
12	Огибанием (ТО)		Пересечением (РКП)

Для трехэлементной кинематической схемы резания с двумя вращательными и одним поступательным движениями съем припуска с заготовки определяется следующим передаточным отношением:

$$i = \frac{m}{z_n} \cdot \frac{d}{D}. \tag{2}$$

* Экспликация формул здесь и далее приведена в таблице 2.

Таблица 2. – Экспликация используемых формул

Условные обозначения	Наименование параметров
$D_1 \dots D_6$	поступательные и вращательные элементарные движения резания;
$\bar{v}_1 \dots \bar{v}_6$	векторы линейной скорости элементарного движения резания;
\bar{v}_e	вектор скорости движения резания;
$\bar{\tau}$	касательный вектор;
\bar{n}	нормальный вектор;
Rv_r	радиус траектории главного движения резания;
P_P	параметр формообразующей плоскости;
I_1	параметр изменяемости формирующей линии;
F_1	параметр сложности формирующей линии;
Φ	угловая координата плоскости P ;
X, Z	линейные координаты плоскости P ;
b, k	коэффициенты линейного и углового перемещений соответствующей координаты;
$n_\phi, n_z, m_p, m_z,$	поправочные коэффициенты на скорость перемещения плоскости P
C_p, C_z, C_ϕ	по соответствующей координате;
i_k, i_{s1} и i_{s2}	передаточные отношения (кинематические коэффициенты) между главным движением, касательным движением и движением подачи соответственно;
ω, η	углы установки осей режущего инструмента и заготовки относительно друг друга;
$Z_{л}$	число лезвий режущего инструмента;
Z_1	целое число угловых шагов режущих лезвий инструмента;
a_μ	толщина срезаемого слоя в точке M ;
S_o	подача на оборот;
μ	угол контакта;
γ_r	передний угол режущего лезвия инструмента;
$\gamma_k, \alpha_k, \lambda_k$	кинематические углы соответственно передний, задний и наклона режущей кромки;
d, D	диаметры соответственно режущего инструмента и заготовки;
\bar{n}_n, \bar{n}_z	нормальный вектор соответственно со стороны передней и задней поверхностей лезвия;
$\bar{\tau}_k$	касательный вектор к режущей кромке лезвия;
l	коэффициент, представляющий собой значение длины контакта при $\mu = 90^\circ$;
C, K	поправочные коэффициенты с соответствующими индексами;
t	глубина резания;
v_s, v_k и v_r	соответственно скорости подачи, касательного и главного движений резания;
x, y, z	дробные показатели степени с соответствующими индексами;
m	кинематическая характеристика схемы резания;
S_o	величина подачи инструмента за один оборот заготовки;
θ	угловое положение точки на режущей кромке;
$\frac{v_{ex1}}{v_{ez1}}$ и $\frac{v_{ey1}}{v_{ez1}}$	соотношения проекций скорости резания на соответствующие оси координат;
r, z, t	координаты и время в точке тела;
r_u, μ_u, z_u	координаты источника теплоты;
t_r	текущее время;
t_u	время действия источника теплоты;
q	интенсивность источника теплоты;
λ	коэффициент теплопроводности материала;
$I_o(ar)$	функция Бесселя;
\sum	суммирование по положительным корням характеристического уравнения $\alpha I_n(\alpha r) = 0$

Толщина срезаемого слоя для трехэлементной кинематической схемы резания может быть определена по формуле из [3]:

$$a_\mu = S_o \cdot \mu \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{v_k}{v}\right)^2 + 1}} \cdot m, \tag{3}$$

а для четырехэлементной кинематической схемы резания – по следующей формуле:

$$a_{\mu} = S_o \cdot \mu \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{v_{\kappa}}{v}\right)^2 + 1}} \cdot m \pm \frac{d}{2} \cdot (\sin \mu + 1). \quad (4)$$

Кинематические углы режущего лезвия инструмента определяются между передней и задней поверхностями режущей кромки и векторами – нормальным, касательным и скорости резания (см. рисунок 1).

Передний угол:

$$\operatorname{tg} \gamma_{\kappa} = \frac{(\overline{v_e} \cdot \overline{n_n} \cdot \overline{\tau_e}) \cdot |\overline{v_e}|}{(\overline{v_e}) \cdot \overline{n_n} \cdot \left| \left[\overline{\tau_{\kappa}} \cdot \overline{v_e} \right] \right|}. \quad (5)$$

Задний угол:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\kappa} = \frac{(\overline{v_e} \cdot \overline{n_s}) \cdot \left| \left[\overline{\tau_{\kappa}} \cdot \overline{v_e} \right] \right|}{(\overline{v_e} \cdot \overline{n_s} \cdot \overline{\tau_{\kappa}}) \cdot |\overline{v_e}|}. \quad (6)$$

Угол наклона режущей кромки:

$$\operatorname{tg} \lambda_{\kappa} = \frac{(\overline{v_e} \cdot \overline{\tau_{\kappa}})}{\left| \left[\overline{\tau_{\kappa}} \cdot \overline{v_e} \right] \right|}. \quad (7)$$

Для подвижной системы координат $X Y Z$ (см. рисунок 1) векторы $\overline{v_e}$, $\overline{n_n}$, $\overline{n_s}$ и $\overline{\tau_{\kappa}}$ выражены через их проекции на соответствующие координатные оси и получены формулы, например, для расчета кинематического переднего угла режущего лезвия инструмента в виде

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\operatorname{tg} \gamma_r - \frac{v_{ex_1}}{v_{ez_1}} \sin \theta + \frac{v_{ey_1}}{v_{ez_1}} \cos \theta}{1 + \operatorname{tg} \gamma_r \left(\frac{v_{ex_1}}{v_{ez_1}} \sin \theta - \frac{v_{ey_1}}{v_{ez_1}} \cos \theta \right)} \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{v_{ex_1}}{v_{ez_1}} \right)^2 + \left(\frac{v_{ey_1}}{v_{ez_1}} \right)^2}{1 + \left(\frac{v_{ex_1}}{v_{ez_1}} \sin \theta - \frac{v_{ey_1}}{v_{ez_1}} \cos \theta \right)^2}}. \quad (8)$$

Для расчета температуры в инструменте и детали с источником теплоты в виде криволинейного треугольника, действующего в течение определенного времени, получена следующая формула:

$$i\theta(r, z, t) = \frac{2q}{R^2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi k}} \cdot \left\{ l \cdot \sin^{\mu} \mu (2R - l \cdot \sin^{\mu} \mu) \cdot \left[2\sqrt{t} \exp\left(-\frac{z^2}{4kt}\right) - \frac{z\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{kt}}\right) \right] + \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \times \right. \\ \left. \times \sum_{\substack{\alpha \\ \alpha \neq 0}} \frac{\exp(-\alpha r) \cdot I_o(\alpha r)}{\alpha \cdot I_o^2(\alpha R)} \int_{R \cdot l \sin^{\mu} \mu}^R r_u I_o(\alpha r_u) \cdot \int_0^{\alpha \sqrt{kt}} \exp\left[-\left(\frac{z\alpha}{2x} - x\right)^2\right] dx \right\}. \quad (9)$$

Физические характеристики процесса резания также определяются экспериментальным путем с использованием специальных стенов, смонтированных на базе универсальных металлорежущих станков и станков с ЧПУ. Использование универсальных устройств, регистрирующей аппаратуры, системы ЧПУ, соединенной с ЭВМ, обеспечивает одновременную фиксацию и управление в полуавтоматическом или автоматическом режимах в процессе резания скоростями движений инструмента и заготовки, геометрией их контактных поверхностей, параметрами стружкообразования, сил и температуры резания, износа лезвий и состояния поверхностей детали.

Стенд может использоваться для физического моделирования и диагностики других процессов контактного взаимодействия тел, например, различных видов трения деталей машин.

На рисунке 4 представлен экспериментальный стенд на базе универсально-заточного станка 1 модели 3М642 с приспособлением для наружного круглого шлифования 2. Элементы схемы смонтиро-

ваны на передней панели несущей конструкции и включают программируемый логический контроллер 3, частотные преобразователи 4, операторскую панель 5 и энкодер 6.



Рисунок 4. – Стенд на базе универсально-заточного станка модели 3М642

В результате проведенных экспериментальных исследований процесса резания на вышеприведенных стендах получены следующие зависимости:

- длины контакта передней поверхности инструмента со стружкой

$$l_n = l \cdot \sin^{\lambda_e} \mu;$$

$$l = \frac{C_1 \cdot S^{y_1}}{\left(\frac{v_k}{v_r}\right)^{z_1}};$$

- коэффициента усадки стружки

$$K_a = c_k \cdot t^{x_k} \cdot v_s^{y_k} \cdot v^{z_k} \cdot \left(\frac{v_k}{v}\right)^{m_k} \cdot K_k;$$

- силы резания

$$P = C_p \cdot t^{x_p} \cdot v_s^{y_p} \cdot v^{z_p} \cdot \left(\frac{v_k}{v}\right)^{m_p} \cdot K_p;$$

- температуры резания

$$\theta = C_\theta \cdot t^{x_\theta} \cdot v_s^{y_\theta} \cdot v^{z_\theta} \cdot \left(\frac{v_k}{v}\right)^{m_\theta} \cdot K_\theta;$$

- стойкости инструмента

$$T = \frac{C_T \cdot K_T}{t^{x_T} \cdot v_s^{y_T} \cdot v^{z_T} \cdot \left(\frac{v_k}{v}\right)^{m_T}};$$

- качества обработанной поверхности детали

$$R_z = \frac{C_{R_z} \cdot t^{x_{R_z}} \cdot v_k^{y_{R_z}} \cdot K_{R_z}}{v^{z_{R_z}} \cdot \left(\frac{v_k}{v}\right)^{m_{R_z}}}.$$

Приведенные математические модели, описывающие кинематические и геометрические параметры, физические и технологические характеристики процесса резания, взаимосвязаны между собой и образуют систему резания, которую необходимо рассматривать во взаимосвязи с технологической и производственной системами [21].

Общая структура технологической системы $ТС$, включающая систему резания $СР$, представлена в виде схемы на рисунке 5. На входе этой системы находятся заготовка, инструмент, станок, приспособление и технологическая среда с собственными параметрами, объединенные кинематической схемой резания (видом

обработки резанием) и режимом резания (скорость, подача, глубина резания), которые являются своеобразным и наиболее «гибким» регулятором процесса резания. Процесс резания определяется различными параметрами: деформационными, динамическими, тепловыми, электромагнитными и их характеристиками.

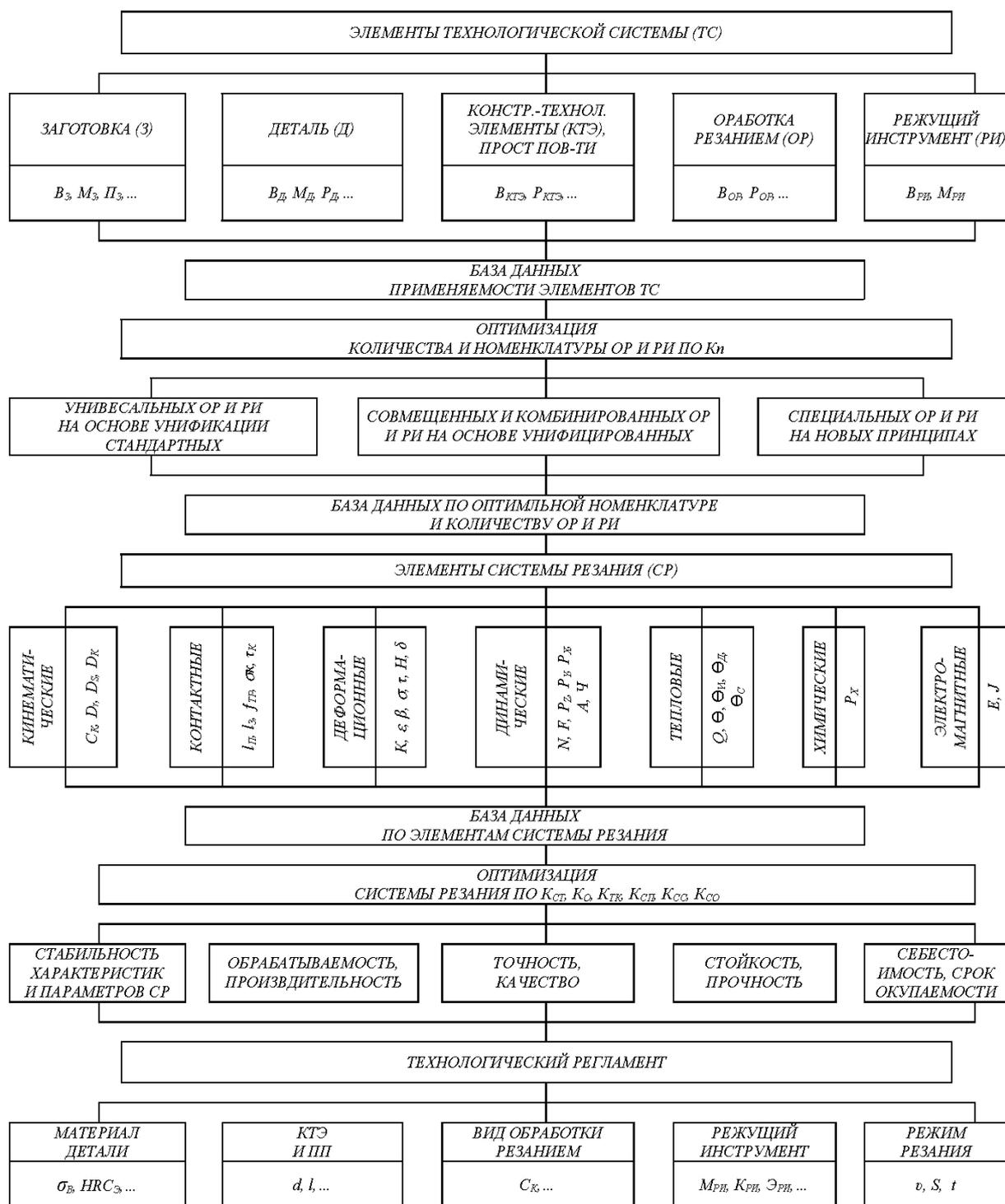


Рисунок 5. – Структура технологической системы

На выходе системы резания желательно получить наилучшие показатели, характеризующие цели обработки – производительность, качество и себестоимость. По каждому компоненту и показателю системы резания может быть сформирована база данных, введены критерии получения наилучших (оптимальных) значений показателей, т.е. создана система автоматизированного проектирования процесса резания, металлорежущих станков и режущих инструментов [20].

По входным компонентам технологической системы: заготовке, детали и ее конструктивным элементам, а также поверхностным компонентам: виду обработки, режущему инструменту и т.д. – формируются базы данных с учетом характеризующих их параметров, таких как: вид (*B*); материал (*M*); припуск (*L*); размер (*P*) и т.п. Базы данных оптимизируются по критерию применимости номенклатуры изделий. Далее рассматриваются элементы системы резания *CP* и формируются их базы данных, которые оптимизируются по различным критериям, а именно стойкости, обрабатываемости и т.д. В конечном итоге формируется технологический регламент, учитывающий свойства обрабатываемого материала, форму и параметры конструктивных элементов и поверхностей детали, характеристики вида обработки резанием и тип режущего инструмента, а также режим резания. Из технологических регламентов складывается весь технологический процесс механической обработки поверхностей детали. Этот процесс должен быть дополнен технологией сборки изделий, должен учитывать условия эксплуатации и утилизации изделий, т.е. весь жизненный цикл изделия.

Таким образом, полученные математические и физические модели процесса резания в виде обобщающих теоретических и эмпирических зависимостей выходных характеристик и показателей от входных параметров обработки, а также разработанные исследовательские стенды и технологическая система позволяют создавать единую управляющую платформу процесса резания, открытые системы ЧПУ станков со встроенными модулями нейропроцессоров и модулями связи с интернетом.

В настоящее время такие системы функционируют (например, САД-системы) и используются при разработке управляющих программ станков с ЧПУ, т.е. адаптированы с САМ-системами. Решается задача введения в действующие системы ЧПУ самообучающихся функциональных (электронных) блоков, которые позволяли бы системе самой выбирать (без участия оператора) наилучшие варианты обработки при изменении их условий. Данные функциональные блоки могут быть построены на нейронных сетях (искусственный интеллект) и связаны с интернетом (цифровые технологии) [23–25].

Таким образом, при разработке методологии исследования процесса резания материалов необходимо учитывать следующие факторы:

1) общие тенденции циклического развития экономики – технологические уклады; наличие в стране одновременно нескольких технологических укладов; необходимость устойчивого развития – баланса природы и цивилизации, инноваций и восприимчивости к ним экономики;

2) концепции обобщения достижений науки в различных сферах деятельности (естествознании и философии), связь науки, образования («университет 1,0» – «университет 4,0») и промышленности («индустрия 1,0» – «индустрия 4,0»); развитие объединяющих (природоподобных) технологий – НБИК (нано, био-, инфо-, а также когнитивных технологий);

3) результаты глубоких исследований строения материи и физико-химических процессов – частицы Хигса, наличие трех и более осей симметрии в кристаллах и других достижений;

4) индивидуализацию мелкосерийного многономенклатурного производства изделий на основе интернет-технологий, облачных технологий, искусственного интеллекта, нейронных сетей и т.п.; переход от типовых и групповых технологий к гибким модульным и мобильным технологиям; развитие трех-, четырех- и пятимерных технологий, аддитивных и гибридных технологий, автоматизации и роботизации производства;

5) повышение требований к качеству изделий, обеспечение точности деталей на наноуровне; развитие новых материалов деталей и инструментов, в том числе покрытий;

6) систематизацию обработки резанием; создание обобщенных кинематических схем резания; универсальные принципы формообразования поверхностей; моделирование явлений процесса резания; разработку многофункциональных станков и технологической оснастки, обеспечивающих на одном рабочем месте обработку различных конструктивных элементов и поверхностей деталей с наивысшей производительностью и точностью;

7) развитие высокоскоростной обработки материалов лезвийным режущим инструментом, изменение физических и химических явлений процесса высокоскоростного резания по сравнению с традиционным;

8) оптимизацию и управление функционированием технологической системы по комплексному критерию (производительность, качество и себестоимость).

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологический уклад [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.
2. Глазьев, С.Ю. Эволюция технико-экономических систем: возможности и границы централизованного регулирования / С.Ю. Глазьев, Д.С. Львов, Г.Г. Фетисов. – М. : Наука, 1992. – 207 с.
3. Перес, К. Технологические революции и финансовый капитал : динамика пузырей и периодов процветания / К. Перес. – М. : Дело, 2011. – 232 с.
4. Третья волна (Тоффлер) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.
5. Патрик де Вос. Информация как суть четвертой промышленной революции / де Вос Патрик // Станочный парк. – 2017. – С. 29–31.

6. Конвергенция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.
7. Устойчивое развитие [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.
8. Попок, Н.Н. Мобильная реорганизация машиностроительного производства / Н.Н. Попок. – Минск : Технопринт, 2001. – 396 с.
9. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 316 с.
10. Грановский, Г.И. Кинематика резания / Г.И. Грановский. – М. : Машгиз, 1948. – 199 с.
11. Виды обработки резанием. Термины и определения общих понятий : ГОСТ 25761-83.
12. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий : ГОСТ 25762-83.
13. Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий : ГОСТ 25751-83.
14. Попок, Н.Н. Анализ особенностей кинематики и геометрии процесса высокоскоростного резания / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, М.В. Черневич // Технология – оборудование – инструмент – качество : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Минск : Бизнес-офсет, 2014. – С. 93–95.
15. Бобров, В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В.Ф. Бобров. – М. : Машгиз, 1962. – 152 с.
16. Бобров, В.Ф. Резание металлов самовращающимися резцами / В.Ф. Бобров, Д.Е. Иерусалимский. – М. : Машиностроение, 1972. – 111 с.
17. Попок, Н.Н. Исследование процесса ротационного резания принудительно вращающимися инструментами : дис. ... канд. техн. наук / Н.Н. Попок. – Минск, 1983. – 274 с.
18. Рейхель, В. Методика определения стойкости резца и обрабатываемости материала / В. Рейхель // Мирская техника. – 1936. – № 4. – С. 6–14.
19. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. – М. : Машиностроение, 1976. – 278 с.
20. Хмельницкий, Р.С. Автоматизация станочного оборудования для высокоскоростной обработки резанием / Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов, Г.И. Гвоздь // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы VI междунар. науч.-практ. конф. ; ред. кол.: А.М. Малярович (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнес-офсет, 2018. – С. 111–112.
21. Новоселов, Ю.А. Методологические основы и пути разработки САПР ротационного резания / Ю.А. Новоселов, Н.Н. Попок // Изв. вузов. Машиностроение. – М. : Изд. МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1987. – № 5. – С. 125–128.
22. Попок, Н.Н. Теоретические и технологические основы мобильного многономенклатурного производства с интенсификацией механической обработки поверхностей деталей типа тел вращения : дис. ... д-ра техн. наук / Н.Н. Попок. – Минск, 2002. – 341 с.
23. Пашкевич, В.М. Повышение точности механической обработки и сборки изделий машиностроительного производства на основе построения и использования компьютерных обучающих систем : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.М. Пашкевич. – Минск, 2007. – 46 с.
24. Гулаков, К.В. Моделирование многомерных объектов на основе когнитивных карт с нейросетевой идентификацией параметров : автореф. дис. ... канд. техн. наук / К.В. Гулаков. – Брянск, 2013. – 19 с.
25. Кабалдин, Ю.Г. Управление технологическим оборудованием предприятия в условиях цифровых производств на основе искусственного интеллекта и облачных технологий / Ю.Г. Кабалдин, Д.А. Шатагин, А.М. Кузьмишина // МА и ППСИМ. – Н. Новгород, 2018. – № 1. – С. 15–26.

Поступила 14.02.2019

METHODOLOGY OF RESEARCH OF PROCESS OF CUTTING OF MATERIALS IN MODERN CONDITIONS OF DEVELOPMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

N. POPOK

The modern trends and concepts of the development of mechanical engineering are analyzed. The methodological principles of conducting theoretical and experimental studies of the cutting process, a generalized kinematic scheme of cutting and a diagram of the formation of surfaces, the dependences of the kinematic and physical characteristics of the cutting process on the processing conditions, confirming their relationship, are given. Universal stands and equipment for the study of cutting processing as applied to machine tools are described, with numerical control, the general structure of the technological system is given. The creation of a unified control platform for the cutting process and self-learning systems is justified.

Keywords: methodology, mechanical engineering, cutting process, kinematics, physical characteristics, machine tool numerically controlled, self-learning system.