

УДК 621.914  
DOI 10.22213/2410-9304-2017-4-35-41

*В. Л. Тимофеев*, доктор технических наук  
*В. Б. Федоров*, кандидат технических наук  
*В. И. Сидоренко*, кандидат технических наук  
*Р. С. Клевцова*  
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ

*В рамках теории структурно-энерговременных полей (теория СЭВ-полей) свойств физических объектов при описании резания металлических материалов предлагается использовать пространственную физико-геометрическую интерпретацию предмета исследования, рассмотренную на примере анализа процесса цилиндрического фрезерования. При одном из вариантов технологического процесса, используя параметры фрезерования  $t$ ,  $v$ ,  $t_3$  ( $t$  – глубина резания, м;  $v$  – скорость главного движения резания, м·мин<sup>-1</sup>;  $t_3$  – опытное время за одно перемещение заготовки, мин), имеем возможность операцию резания за одно перемещение заготовки представить в пространственных декартовых прямоугольных координатах в виде структурно-энерговременного поля  $\Pi_1$  (СЭВ-поле), геометрический образ которого отображен в виде прямоугольного параллелепипеда. Объему параллелепипеда ставится в соответствии физическая величина  $\Pi_1$ , являющаяся обобщенной характеристикой предмета исследования (процесса фрезерования).*

*Уравнение СЭВ-поля процесса срезания стружки за одно перемещение заготовки относительно вращающейся фрезы в октанте  $t - v - t_3$ :*

$$\Pi_1 = C \cdot \mathcal{E} \cdot V = t \cdot v \cdot t_3.$$

*Единица измерения величины  $\Pi_1$ :*

$$[\Pi_1] = [C \cdot \mathcal{E} \cdot V] = [t] \cdot [v] \cdot [t_3] = 1 \text{ мД}^3 \times 1 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ Д}^3 \times 1 \text{ минД}^3 = 1 \text{ м}^2 (\text{мин}/\text{мин}) \text{ Д}^9,$$

*где (мин/мин) – оболочка  $O$  единицы величины;  $\text{Д}^9$  – оператор движения.*

*Понятия оболочки  $O$  и оператора движения  $\text{Д}$  введены в теории СЭВ-полей для более глубокого анализа предмета исследования.*

*Выражение  $1 \text{ м}^2 (\text{мин}/\text{мин}) \text{ Д}^9$  – пример обозначения единицы измерения СЭВ-поля  $\Pi_1$ , как одного из вариантов технологии процесса фрезерования. Здесь оболочка (мин/мин) показывает, что  $\Pi_1$  является функцией времени.*

*Описанная методика дает возможность выразить каждый конкретный вариант режима фрезерования одним числовым показателем.*

*Схема физико-геометрической интерпретации предмета исследования для данной задачи позволяет обозначить каждый режим фрезерования определенной физической величиной, поскольку по осям координатного угла могут откладываться разные параметры. Она повышает геометрическую наглядность результатов, получаемых аналитическими средствами, способствуя более глубокому теоретическому осмыслению технологического процесса, а также осознанному формированию знаний и компактности их представлений.*

**Ключевые слова:** фрезерование, параметры процесса резания, пространственная физико-геометрическая интерпретация предмета исследования, структурно-энерговременное поле процесса фрезерования.

В начале 80-х годов прошлого века была предложена методика структурно-энерговременного анализа (СЭВ-анализ) для исследования различных физических явлений и технологических процессов [1]. Теоретической основой этой методики явилась разработанная теория структурно-энерговременных полей свойств физических объектов (теория СЭВ-полей) [2, 3]. Позднее с помощью указанной разработки проанализированы процессы: объемной неизотермической дендритной кристаллизации металлических расплавов [4], равномерного прямолинейного движения твердого тела в механике [5], состояние идеального газа [6], растяжение чугуна при его механическом испытании [7], изготовление стальных гнутых гофрированных про-

филей [8], обработка льносолумы [9] и др. В данной статье на основе использования СЭВ-анализа приведены результаты физико-геометрического рассмотрения процесса цилиндрического фрезерования металлической заготовки. Объект исследования – металлическая заготовка, предмет исследования – технологический процесс цилиндрического фрезерования, то есть с использованием фрезы, у которой зубья расположены на ее цилиндрической поверхности.

Процесс фрезерования можно рассматривать как взаимодействие обрабатываемой заготовки с окружающей средой. В качестве последней следует принять режущий инструмент, фрезерный станок и окружающую атмосферу. Одним из результатов применения теории СЭВ-полей к кон-

кретному исследовательскому акту является получение пространственной физико-геометрической интерпретации предмета исследования в декартовых прямоугольных координатах.

Цель статьи – ознакомить читателя с процедурой построения пространственной физико-геометрической интерпретации предмета исследования на примере анализа процесса цилиндрического фрезерования.

В общем случае геометрическое рассмотрение явлений проводится теорией СЭВ-полей с использованием шестимерного пространства в декартовых прямоугольных координатах, наименование характеристик которых переведены на язык методологической терминологии (рис. 1, а). Русские буквы С, Э, В введены для обозначения первых трех осей, по которым откладывают структурную, энергетическую и временную характеристики процесса. Латинскими буквами *S* (structure), *E* (energy), *T* (time) обозначаются вторые, так называемые оборотные оси (соответственно, структурная, энергетическая, временная). Физические величины С, Э, В, *S*, *E*, *T* – это координатные характеристики структурно-энерговременного пространства (СЭВ-пространство). Анализ можно вести одновременно в восьми октантах или в меньшем количестве октантов. Все зависит от характера задачи. По указанным координатным осям имеется возможность откладывать различные физические величины, в частности параметры процесса фрезерования (рис. 1, б).

В общем случае анализа рассмотрение проводится в восьми октантах (координатных углах) пространственной декартовой прямоугольной системы координат (см., например, [10]). При этом в основании координат в каждом октанте строят параллелепипеды  $\Pi_i$  ( $i = 1 \div 8$ ). Точка 1 – начало координат (см. рис. 1, а; 2). Расположенные в пространстве вершины параллелепипедов в виде больших светлых точек обозначаются как  $8_i$ , где индекс  $i$  соответствует номеру координатного угла ( $i = 1 \div 8$ ). Ниже параллелепипеды  $\Pi_i$  дополнительно будут обозначаться в виде  $18_i$ : например, параллелепипед в первом октанте –  $18_1$ , а параллелепипед в седьмом октанте –  $18_7$ . Номера октантов (рис. 1, а): С-Э-В – первый октант, С-Э-Т – второй, S-Э-Т – третий, S-Э-В – четвертый, S-E-B – пятый, С-E-В – шестой, С-E-T – седьмой, S-E-T – восьмой.

В настоящей задаче построение СЭВ-полей процесса фрезерования будет проведено в I, II, VI, VII октантах (рис. 1, б), хотя в принципе нет ограничений на проведение анализа в восьми октантах. Но это потребует привлечения допол-

нительных параметров процесса. Любому параллелепипеду  $\Pi_i$  ставится в соответствие определенная физическая величина с тем же обозначением. Каждая физическая величина  $\Pi_i$  – это объемное СЭВ-поле предмета рассмотрения для соответствующего октанта, поставленная в соответствие объему параллелепипеда.  $\Pi_i$  – обобщенная характеристика предмета рассмотрения для соответствующего координатного угла. Различным геометрическим элементам параллелепипедов  $\Pi_i$  (ребрам, граням, диагоналям и др.) ставятся также в соответствие определенные физические величины.

В теории СЭВ-полей введено представление о физико-геометрической структуре единицы физической величины (ф. г. с. е. величины или единица вида  $1 \text{ ЯОД}^k$ ). Здесь Я – ядро единицы, О – оболочка единицы,  $D^k$  – оператор движения. Последний необходим в обозначении единицы для более четкого отличия одних величин от других [11]. Так, физическая величина, которая поставлена в соответствие отрезку в пространстве, параллельному одной из координатных осей, имеет в обозначении своей единицы оператор движения  $D^3$ . Та же самая величина, поставленная в соответствие указанному отрезку, но который уже расположен в координатной плоскости и параллелен одной из координатных осей, имеет в обозначении своей единицы оператор движения  $D^2$ , а та же величина, поставленная в соответствие отрезку, лежащему на координатной оси, –  $D$ . В теории СЭВ-полей при оценке объемного СЭВ-поля  $\Pi_i$  все математические преобразования с величинами проводятся с использованием отрезков, находящихся только в пространстве, которым в соответствие ставятся величины, в состав единиц которых входит оператор движения  $D^3$ .

Как известно, физические величины умножаются и делятся одна на другую согласно правилам алгебры. Эти же действия одновременно производятся с единицами и размерностями. При этом может произвольно проводиться сокращение размерностей независимо от того, имеет ли вновь получаемая величина более сложный физический смысл или менее сложный. Например, единицу температуропроводности  $[a] = [\lambda]/([c] \cdot [\rho]) = 1 \text{ м}^2/\text{с}$  (где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c$  – удельная теплоемкость;  $\rho$  – плотность) получают за счет больших сокращений размерностей. В итоге имеем некоторый метрическо-временной комплекс  $\text{м}^2/\text{с}$ , в котором отсутствуют обозначения температуры и энергии, несмотря на то, что температуропроводность имеет прямое отношение к тепловым явле-

ниям. Этим размывается физический смысл величины «температуропроводность». Такой произвол по отношению к операции сокращения символов единиц до настоящего времени не получил должного объяснения, видимо, потому, что он не влияет на количественную сторону результатов исследований. В теории СЭВ-полей специально вводятся правила для ограничения такого произвола: при операции умножения величин друг на друга (считается, что в этом случае получаем величину физически более сложную в сравнении с сомножителями) сокращение символов единиц запрещается. При делении величин друг на друга сокращение символов разрешено. При запрете операции сокращения символов единиц будут появляться комплексы типа (с/с), (м/м) и др. Такие комплексы представляют оболочки О единиц измерения, которые входят в состав ф. г. с. е. величин  $1 \text{ ЯОД}^k$  и могут выполнять определенные функции в исследовательском процессе [12].

Первоначальными опытными данными о цилиндрическом фрезеровании плоской поверхности металлической заготовки являются [13]:

- длина фрезерования  $L$ , м;
- ширина фрезерования  $B$ , м;
- глубина резания  $t$ , м;
- опытное время за одно перемещение заготовки  $t_3$ , мин;
- диаметр цилиндрической фрезы  $D$ , м;
- частота вращения фрезы  $n$ ,  $\text{мин}^{-1}$ ;
- количество перемещений заготовки  $i$ .

Эти данные используют при проектировании конкретного варианта технологии фрезерования. Величина  $t_3$  – опытное значение продолжительности обработки при одном перемещении заготовки, которое может быть измерено, скажем, с помощью секундомера.

Используя первоначальные данные, получим расчетные параметры фрезерования:

- скорость главного движения резанием  $v = \pi Dn$ ,  $\text{м} \cdot \text{мин}^{-1}$ ;
- минутную подачу фрезы  $S_M = L/t_3$ ,  $\text{м} \cdot \text{мин}^{-1}$ ;
- основное (технологическое) время при фрезеровании  $t_0 = (L/S_M \times i)$ , мин;
- площадь обрабатываемой поверхности  $F = (L \times B)$ ,  $\text{м}^2$ ;
- объем металла, переводимого в стружку  $V = (L \times B \times t)$ ,  $\text{м}^3$ .

Величины  $t_3$  и  $t_0$  (при  $i = 1$ ) имеют практически одинаковые числовые значения. Однако физическая сущность их различается:  $t_3$  относится к измеряемым (опытным) величинам, а  $t_0$  – к расчетным технологическим величинам. Поэтому требуется их четко различать; первично –  $t_3$ , вторично –  $t_0$ . Сейчас и  $t_3$ , и  $t_0$  измеряются од-

ной единицей 1 мин., что затрудняет оценивать их различие. Для этого можно использовать представление о ф.г.с.е. величины или единице вида  $1 \text{ ЯОД}^k$  (где Я – ядро единицы; О – оболочка;  $\text{Д}^k$  – оператор движения), предложенной в [14]. В  $1 \text{ ЯОД}^k$  оболочка О представляет отношения типа с/с, м/м и др. Поэтому, если использовать представление об оболочке О единицы, то с целью отличия указанных величин друг от друга единицу  $t_0$  можно выразить в виде произведения  $[t_0] = [L] \times [1/S_M] = 1 \text{ м}/(\text{м}/\text{мин}) = = 1 \text{ мин} (\text{м}/\text{м})$ , в котором возникает оболочка (м/м). В то же время единицей  $t_3$  останется 1 мин.

Располагая вышеприведенными параметрами цилиндрического фрезерования, имеем возможность операцию резания за одно перемещение металлической заготовки представить в виде структурно-энергетического поля  $\Pi_1$ , геометрический образ которого в виде прямоугольного параллелепипеда показан на рис. 1, в. По координатным осям отложены структурная  $t$  (С), энергетическая  $v$  (Э) и временная  $t_3$  (В) характеристики процесса обработки металлической заготовки на фрезерном станке. Объему параллелепипеда  $12_1 3_1 4_1 5_1 6_1 7_1 8_1$  поставлена в соответствие физическая величина  $\Pi_1$ , которая названа СЭВ-полем процесса фрезерования в I октанте. Ребро  $7_1 8_1$  – СЭВ-траектория процесса фрезерования.

Запишем уравнение СЭВ-поля процесса резания стружки за одно перемещение заготовки относительно вращающейся фрезы в I октанте  $t - v - t_3$  (рис. 1, в).

$$\Pi_1 = \text{отрезок } 5_1 8_1 \times \text{отрезок } 3_1 8_1 \times \text{отрезок } 7_1 8_1 = C \cdot \text{Э} \cdot B = vt_3, \dots,$$

где отрезки  $5_1 8_1$ ,  $3_1 8_1$ ,  $7_1 8_1$  – геометрические элементы СЭВ-поля, в соответствие которым поставлены величины С, Э, В; последние существуют в физическом пространстве и потому имеют значение оператора движения в виде  $\text{Д}^3$ .

Определим единицу измерения величины  $\Pi_1$ :

$$[\Pi_1] = [C \cdot \text{Э} \cdot B] = [t] \cdot [v] \cdot [t_3] = 1 \text{ м} \text{Д}^3 \times \times 1 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1} \text{Д}^3 \times 1 \text{ мин} \text{Д}^3 = 1 \text{ м}^2 (\text{мин}/\text{мин}) \text{Д}^9,$$

где (мин/мин) – оболочка единицы величины;  $\text{Д}^9$  – оператор движения.

Понятия оболочки О и оператора движения Д введены в теории СЭВ-полей для более глубокого анализа предмета исследования.

Выражение  $1 \text{ м}^2 (\text{мин}/\text{мин}) \text{Д}^9$  – пример обозначения единицы измерения СЭВ-поля  $\Pi_1$  как одного из вариантов технологии процесса фрезерования. Здесь оболочка (мин/мин) показывает, что  $\Pi_1$  является функцией времени.

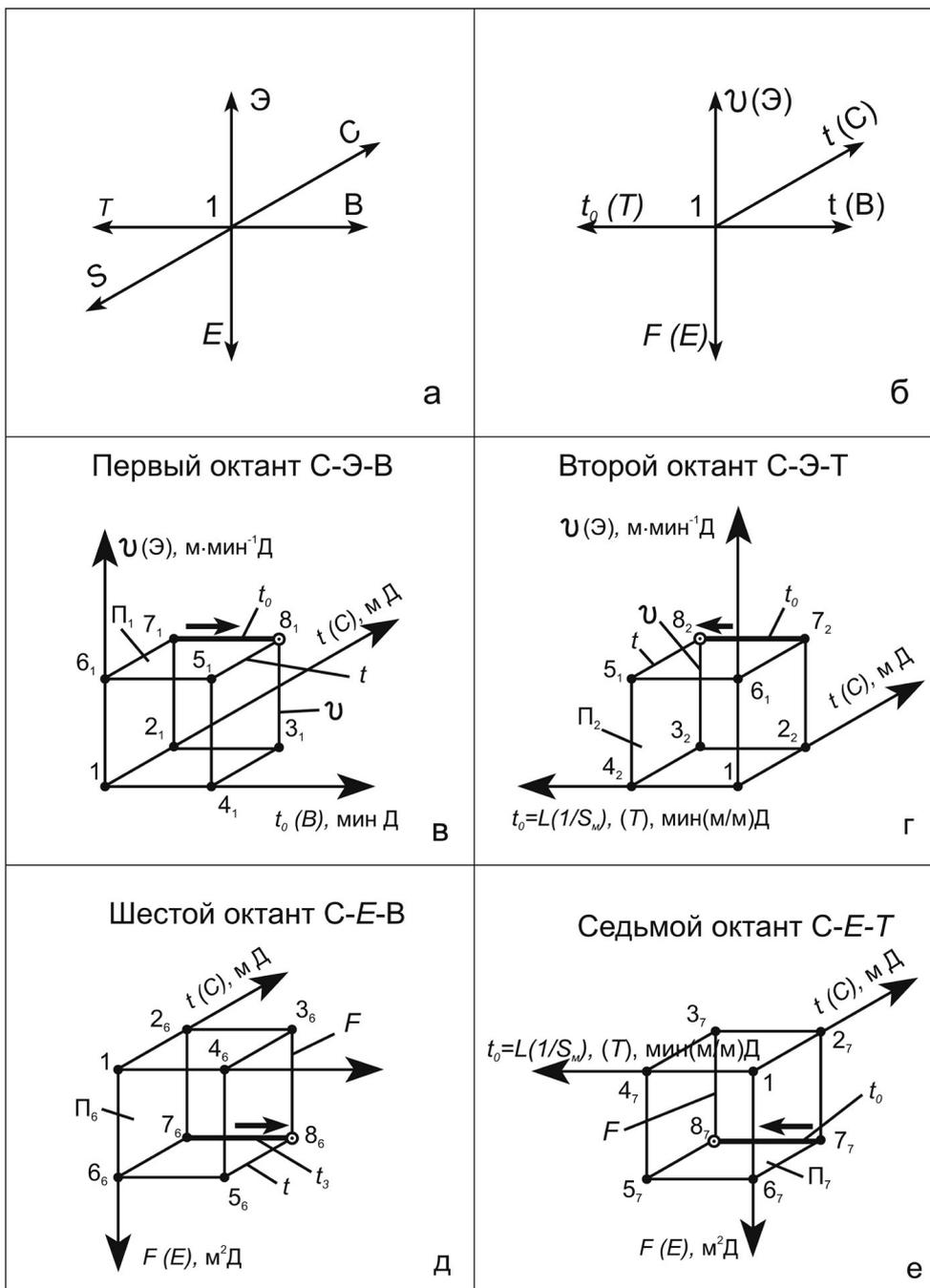


Рис. 1. СЭВ-поля процесса фрезерования

На рис. 1, г, д, е показаны другие виды СЭВ-полей –  $\Pi_2, \Pi_6, \Pi_7$ . Нетрудно заметить, что координатные углы на рис. 1, в, г, д, е могут образовать единый физико-геометрический комплекс, показанный на рис. 2.

Данная физико-геометрическая схема представляет собой пространственную физико-геометрическую интерпретацию процесса фрезерования, который в рассматриваемой задаче является предметом исследования. На рис. 2 начало координат – точка 1. Координатная плоскость ВСТ – горизонтальная плоскость,

СЭЕ – фронтальная плоскость, ВЭТЕ – профильная плоскость. Черные точки, имеющие «двойное» обозначение, являются вершинами параллелепипедов  $18_1, 18_2, 18_6, 18_7$ . Эти точки могут принадлежать одновременно нескольким октантам. Так, обозначение  $7_1 7_2$ , указывает на то, что точка, находящаяся в координатной плоскости СЭ, принадлежит одновременно I и II октантам. Точка  $2_1 2_2$ , лежащая на координатной оси С, принадлежит одновременно четырём октантам – I, II, VI, VII. Светлые большие точки  $8_1, 8_2, 8_6, 8_7$  – вершины параллелепипедов, лежащие в

пространстве. Отрезки  $(7_1 7_2) 8_1$ ,  $(7_1 7_2) 8_2$ ,  $(7_6 7_7) 8_6$ ,  $(7_6 7_7) 8_7$  – СЭВ-траектории процесса фрезерования в четырех октантах.

В таблице приведены основные СЭВ-параметры моделей  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_6, \Pi_7$  процесса обработки при одном перемещении заготовки ( $i = 1$ ). Все величины столбца 2 имеют свои геометрические образы: величины  $C_i, \mathcal{E}_i, B_i, E_i, T_i$  – это пространственные ребра параллелепипедов; произведения  $C_i \cdot \mathcal{E}_i, C_i \cdot B_i$  и др. – пространственные грани. СЭВ-поле  $\Pi_i$  – объем параллелепипеда. В столбце 3 указаны конкретные формулы, а в столбце 4 – единицы величин.

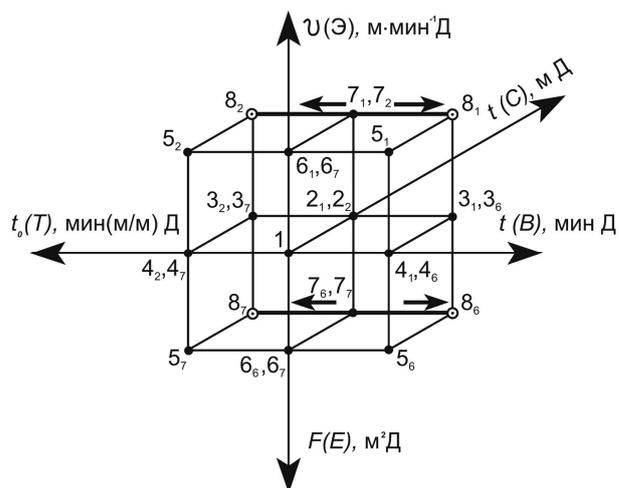


Рис. 2. Пространственная физико-геометрическая интерпретация процесса цилиндрического фрезерования

**СЭВ-параметры процесса фрезерования**

№ п/п	Общая зависимость		Конкретная зависимость	
	Величина, уравнение		Величина, уравнение	Единица измерения величины
1	2		3	4
Координатный угол $t-v-t_3$ (I октант)				
1	$C_1$		$t$	$1 мД^3$
2	$\mathcal{E}_1$		$v = \pi Dn$	$1 м \text{ мин}^{-1} Д^3$
3	$B_1$		$t_3$	$1 \text{ мин} Д^3$
4	$C_1 \cdot \mathcal{E}_1$		$\pi Dnt$	$1 м^2 \text{ мин}^{-1} Д^6$
5	$C_1 \cdot B$		$tt_3$	$1 м \text{ мин} Д^6$
6	$\mathcal{E}_1 \cdot B_1$		$\pi Dnt_3$	$1 м (\text{мин}/\text{мин}) Д^6$
7	$\Pi_1 = C_1 \cdot \mathcal{E}_1 \cdot B_1$		$\Pi_1 = t \cdot v \cdot t_3$	$1 м^2 (\text{мин}/\text{мин}) Д^9$
Координатный угол $t-v-t_0$ (II октант)				
1	$C_2$		$t$	$1 мД^3$
2	$\mathcal{E}_2$		$v = \pi Dn$	$1 м \text{ мин}^{-1} Д^3$
3	$T_2$		$t_0 = L(1/S_M)$	$1 \text{ мин} (\text{м}/\text{м}) Д^3$
4	$C_2 \cdot \mathcal{E}_2$		$\pi Dnt$	$1 м^2 \text{ мин}^{-1} Д^6$
5	$C_2 \cdot T_2$		$tL(1/S_M)$	$1 м \text{ мин} (\text{м}/\text{м}) Д^6$
6	$\mathcal{E}_2 \cdot T_2$		$\pi DnL(1/S_M)$	$1 м (\text{м}/\text{м}) (\text{мин}/\text{мин}) Д^6$
7	$\Pi_2 = C_2 \cdot \mathcal{E}_2 \cdot T_2$		$\Pi_2 = t \cdot v \cdot t_0$	$1 м^2 (\text{м}/\text{м}) (\text{мин}/\text{мин}) Д^9$
Координатный угол $t-F-t_3$ (VI октант)				
1	$C_6$		$t$	$1 мД^3$
2	$E_6$		$F = L \times B$	$1 м^2 Д^3$
3	$B_6$		$t_3$	$1 \text{ мин} Д^3$
4	$C_6 \cdot E_6$		$V = t \times F$	$1 м^3 Д^6$
5	$C_6 \cdot B_6$		$t \times t_3$	$1 м \text{ мин} Д^6$
6	$E_6 \cdot B_6$		$F \times t_3$	$1 м^2 \cdot \text{мин} Д^6$
7	$\Pi_6 = C_6 \cdot E_6 \cdot B_6$		$t \cdot F \cdot t_3$	$1 м^3 \cdot \text{мин} Д^9$
Координатный угол $t-F-t_0$ (VII октант)				
1	$C_7$		$t$	$1 мД^3$
2	$\mathcal{E}_7$		$F = L \times B$	$1 м^2 Д^3$
3	$T_7$		$t_0 = L(1/S_M)$	$1 \text{ мин} (\text{м}/\text{м}) Д^3$
4	$C_7 \cdot \mathcal{E}_7$		$t \times F$	$1 м^3 Д^6$
5	$C_7 \cdot T_7$		$t \times t_0$	$1 м \cdot \text{мин} (\text{м}/\text{м}) Д^6$
6	$\mathcal{E}_7 \cdot T_7$		$F \times t_0$	$1 м^2 \cdot \text{мин} (\text{м}/\text{м}) Д^6$
7	$\Pi_7 = C_7 \cdot \mathcal{E}_7 \cdot T_7$		$t \cdot F \cdot t_0$	$1 м^3 \cdot \text{мин} (\text{м}/\text{м}) Д^9$

Рассмотрим пример. Пусть имеем:  $L = 0,1$  м;  $B = 0,04$  м;  $D = 0,063$  м;  $v = 27$  м·мин<sup>-1</sup>;  $n = 137$  мин<sup>-1</sup>;  $t_3 = 1,0$  мин;  $t_0 = 1,0$  мин(м/м);  $S_m = L/t_3 = 0,1$  м·мин<sup>-1</sup>;  $t = 0,005$  м;  $h$  (припуск на обработку) =  $0,005$  м;  $i = 1$  (количество перемещений заготовки).

Рассчитаем значения СЭВ-полей  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_6, \Pi_7$ :

$$\Pi_1 = t \cdot v \cdot t_3 = 0,005 \text{ м} \cdot \text{Д}^3 \times 27 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1} \cdot \text{Д}^3 \times 1 \text{ мин} \cdot \text{Д}^3 = 0,135 \text{ м}^2(\text{мин}/\text{мин})\text{Д}^9;$$

$$\Pi_2 = t \cdot v \cdot t_0 = 0,005 \text{ м} \cdot \text{Д}^3 \times 27 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1} \cdot \text{Д}^3 \times 1 \text{ мин}(\text{м}/\text{м})\text{Д}^3 = 0,135 \text{ м}^2(\text{м}/\text{м})(\text{мин}/\text{мин})\text{Д}^9;$$

$$\Pi_6 = t \cdot F \cdot t_3 = 0,005 \text{ м} \cdot \text{Д}^3 \times 0,004 \text{ м}^2 \cdot \text{Д}^3 \times 1 \text{ мин} = 0,00002 \text{ м}^3 \text{ мин} \cdot \text{Д}^9;$$

$$\Pi_7 = t \cdot F \cdot t_0 = 0,005 \text{ м} \cdot \text{Д}^3 \times 0,004 \text{ м}^2 \cdot \text{Д}^3 \times 1 \text{ мин}(\text{м}/\text{м})\text{Д}^3 = 0,00002 \text{ м}^3 \text{ мин}(\text{м}/\text{м})\text{Д}^9.$$

Как видно из приведенных расчетов, физические величины  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  имеют одинаковые модули, но различные единицы измерения, что дает возможность однозначно отличать их друг от друга. Это стало возможным за счет использования представления об оболочке  $O$  единицы величины. У  $\Pi_1$  оболочка – (мин/мин), а у  $\Pi_2$  – (м/м)(мин/мин), что указывает на их различный физический смысл. Аналогичное наблюдается для величин  $\Pi_6$  и  $\Pi_7$ . Их модули равны друг другу, но единицы измерения – различны. У  $\Pi_6$  оболочка отсутствует, а у  $\Pi_7$  оболочка – (м/м). Таким образом, величины  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  (так же, как и величины  $\Pi_6$  и  $\Pi_7$ ) являются равночисленными, но неоднородными.

Приведенная на рис. 2 схема физико-геометрической интерпретации предмета исследования для данной задачи дает возможность обозначать каждый режим фрезерования определенной физической величиной, поскольку по осям координатного угла могут откладываться различные параметры процесса. Она повышает геометрическую наглядность результатов, получаемых аналитическими средствами, способствуя более глубокому теоретическому осмыслению технологического процесса, а также осознанному формированию знаний и компактности их представлений.

#### Библиографические ссылки

1. Тимофеев В. Л. Совершенствование методов контроля процесса первичной кристаллизации промышленных сплавов / Ижевский мех. ин-т.–1982. 78 с. Библиогр.: 74 назв. Деп. в ин-те Черметинформация 09.07.82, № 1641.

2. Тимофеев В. Л. Введение в теорию СЭВ-полей процесса кристаллизации / Ижевский мех. ин-т. 1991. 92 с. Библиогр.: 34 назв. Деп. в ин-те Черметинформация 15.05.91, № 5723.

3. Тимофеев В. Л. Структурно-энергетический анализ физических объектов: применение в металлургии и механике. 4-е изд., испр. и доп. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2010. 372 с.

4. Тимофеев В. Л. Введение в теорию СЭВ-полей процесса кристаллизации.

5. Тимофеев В. Л. Структурно-энергетический анализ физических объектов: применение в металлургии и механике. 1-е изд. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2004. 312 с.

6. Тимофеев В. Л., Агафонова Н. М., Федоров В. Б. Пространственная физико-геометрическая интерпретация состояния идеального газа // Вестник ИжГТУ. 2013. № 4. С. 184–188.

7. Тимофеев В. Л. Структурно-энергетический анализ физических объектов: применение в металлургии и механике.

8. Храбров В. А., Тимофеев В. Л., Шенюгин В. П., Агафонова Н. М. Пространственная физико-геометрическая интерпретация технологического процесса в машиностроении // Вестник ИжГТУ. 2012. № 4. С. 30–34.

9. Тимофеев В. Л. Структурно-энергетический анализ физических объектов: применение в металлургии и механике.

10. Тимофеев В. Л., Агафонова Н. М., Федоров В. Б. Пространственная физико-геометрическая интерпретация состояния идеального газа.

11. Тимофеев В. Л. Структурно-энергетический анализ физических объектов: применение в металлургии и механике.

12. Там же.

13. Косовский В. Л. Справочник фрезеровщика. М. : Машиностроение, 2001. 358 с.

14. Тимофеев В. Л. Структурно-энергетический анализ физических объектов: применение в металлургии и механике.

#### References

1. Timofeev V. L. (1982). *Sovershenstvovanie metodov kontrolya protsessy pervichnoi kristallizatsii promyshlennykh splavov* [Perfection of methods of control of the process of primary crystallization of industrial alloys]. Izhevskii mekh. in-t, 78 p. (in Russ.).

2. Timofeev V. L. (1991). *Vvedenie v teoriyu SEV-polei protsessy kristallizatsii* [Introduction to the theory of SET-fields of the crystallization process], Izhevskii mekh. in-t, 92 p. (in Russ.).

3. Timofeev V. L. (2010). *Struktorno-energovremennoi analiz fizicheskikh ob"ektov: primeneniye v metallovedenii i mekhanike* [Structural-energy-time analysis of physical objects: application in metallurgy and mechanics]. Izhevsk: Izd-IzhGTU, 372 p. (in Russ.).

4. Timofeev V. L. (1991). *Vvedenie v teoriyu SEV-polei protsessy kristallizatsii* [Introduction to the theory of SET-fields of the crystallization process] (in Russ.).

5. Timofeev V. L. (2004). *Strukturno-energovremennoi analiz fizicheskikh ob"ektov: primeneniye v metallovedenii i mekhanike* [Structural-energy-time analysis of physical objects: application in metallurgy and mechanics] (in Russ.).
6. Timofeev V. L., Agafonova N. M., Fedorov V. B. (2013). *Vestnik IzhGTU* [Herald of IzhSTU], no. 4, pp. 184-188 (in Russ.).
7. Timofeev V. L. (2010). *Strukturno-energovremennoi analiz fizicheskikh ob"ektov: primeneniye v metallovedenii i mekhanike* [Structural-energy-time analysis of physical objects: application in metallurgy and mechanics].
8. Khrabrov V. A., Timofeev V. L., Shenogin V. P., Agafonova N. M. (2012). *Vestnik IzhGTU* [Herald of IzhSTU], no. 4, pp. 30-34 (in Russ.).
9. Timofeev V. L. (2010). *Strukturno-energovremennoi analiz fizicheskikh ob"ektov: primeneniye v metallovedenii i mekhanike* [Structural-energy-time analysis of physical objects: application in metallurgy and mechanics].
10. Timofeev V. L., Agafonova N. M., Fedorov V. B. (2013). *Vestnik IzhGTU* [Herald of IzhSTU], no. 4, pp. 184-188 (in Russ.).
11. Timofeev V. L. (2004). *Strukturno-energovremennoi analiz fizicheskikh ob"ektov: primeneniye v metallovedenii i mekhanike* [Structural-energy-time analysis of physical objects: application in metallurgy and mechanics] (in Russ.).
12. Ibid. P. 43 (in Russ.).
13. Kosovskii V. L. (2001). *Spravochnik frezerovshchika* [Milling machine handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 358 p. (in Russ.).
14. Timofeev V. L. (2004). *Strukturno-energovremennoi analiz fizicheskikh ob"ektov: primeneniye v metallovedenii i mekhanike* [Structural-energy-time analysis of physical objects: application in metallurgy and mechanics] (in Russ.).

\*\*\*

V. L. Timofeev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU  
 V. B. Fedorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU  
 V. I. Sidorenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU  
 R. S. Klevtsova, Kalashnikov ISTU

#### Geometrical Consideration of the Process of Milling a Metal Workpiece

Within the framework of the theory of the structure-energy-time fields (the theory of SET-fields) of the properties of physical objects in describing the cutting of metallic materials, it is proposed to use the spatial physical geometric interpretation of the subject of the study, considered using the example of the analysis of the process of cylindrical milling. In one of the variants of the technological process, using the milling parameters  $t$ ,  $v$ ,  $t_3$  ( $t$  is the depth of cutting,  $m$ ;  $v$  is the speed of the main cutting motion,  $m \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $t_3$  is the test time for one transfer of the workpiece,  $\text{min}$ ), it is possible to represent the cutting operation for one movement of the workpiece in spatial Cartesian rectangular coordinates in the form of a structure-energy-time field  $\Pi_1$  (SET-field), the geometrical image of which is displayed as a rectangular parallelepiped. The volume of the parallelepiped is put in correspondence with the physical quantity  $\Pi_1$ , which is a generalized characteristic of the object of investigation (the process of milling).

The equation of the SET-field of the chip cutting process for one displacement of the workpiece relative to the rotating cutter in the octant  $t-v-t_3$  is

$$\Pi_1 = C \cdot \mathcal{E} \cdot B = t \cdot v \cdot t_3,$$

where  $\Pi$ ,  $C$ ,  $\mathcal{E}$ ,  $B$  are Russian capital letters.

The unit of measurement of value  $\Pi_1$  is:

$$[\Pi_1] = [C \cdot \mathcal{E} \cdot B] = [t] \cdot [v] \cdot [t_3] = 1 \text{ мД}^3 \times 1 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1} \text{Д}^3 \times 1 \text{ минД}^3 = 1 \text{ м}^2 (\text{мин}/\text{мин}) \text{Д}^9,$$

where  $(\text{min}/\text{min})$  is the sheath  $O$  of a unit of magnitude;

$\text{Д}^9$  ( $\text{Д}$  is the Russian capital letter) is the operator of motion.

The concepts of the sheath  $O$  and the motion operator  $\text{Д}$  are introduced in the theory of SET-fields for a deeper analysis of the subject of research.

Expression  $1 \text{ м}^2 (\text{min}/\text{min}) \text{Д}^9$  is an example of the designation of the unit of measurement of the SET-field  $\Pi_1$ , as one of the variants of the technology of the milling process. Here, the shell  $(\text{min}/\text{min})$  shows that  $\Pi_1$  is a function of time.

The described technique makes it possible to express each concrete variant of the milling mode with a single numerical index.

The scheme of the physical geometric interpretation of the subject of research for this task allows us to designate each milling mode with a certain physical value, because different parameters can be plotted along the axes of the coordinate angle. It increases the geometric visibility of the results obtained by analytical means, contributing to a deeper theoretical understanding of the technological process, as well as the conscious formation of knowledge and the compactness of their representations.

**Keywords:** Milling, parameters of the cutting process, spatial physical and geometric interpretation of the subject of research, structural-energy-time field of the milling process.

Получено: 14.11.17