

## РОЗДІЛ II. ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА АВТОТРАНСПОРТУ

УДК 621.9.02

**М.С. Степанов**, д-р техн. наук

**М.С. Иванова**, асистент

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ И ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОГО ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА НА СИЛУ РЕЗАНИЯ

**М.С. Степанов**, д-р техн. наук

**М.С. Иванова**, асистент

Национальний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ЯВИЩ ТА ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОГО ОСЬОВОГО ІНСТРУМЕНТУ НА СИЛУ РІЗАННЯ

**Mikhail Stepanov**, Doctor of Technical Sciences

**Marina Ivanova**, assistant

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

### RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THERMOMECHANICAL PHENOMENA AND COMBINED AXIAL TOOL PARAMETERS ON CUTTING FORCE

*Рассмотрено формирование суммарной осевой силы резания и крутящего момента при обработке отверстия комбинированным осевым инструментом на примере трехступенчатого сверла в зависимости от принципа работы ступеней. В результате сравнительного анализа суммарных осевых сил резания и крутящих моментов при обработке как трехступенчатым сверлом с различными конструктивными параметрами, так и стандартным спиральным сверлом определен наиболее эффективный вариант соотношения диаметров ступеней комбинированного осевого инструмента.*

**Ключевые слова:** глубина резания, подача, частота вращения, осевая сила, крутящий момент, комбинированный осевой инструмент, температурные деформации.

*Розглянуто формування сумарної осьової сили різання і крутного моменту під час оброблення отвору комбінованим осьовим інструментом на прикладі тріступінчастого свердла залежно від принципу роботи ступенів. У результаті порівняльного аналізу сумарних осьових сил різання і крутних моментів під час оброблення як тріступінчастим свердлом з різними конструктивними параметрами, так і стандартним спіральним свердлом визначений найбільш ефективний варіант співвідношення діаметрів ступенів комбінованого осьового інструменту.*

**Ключові слова:** глибина різання, подача, частота обертання, осьова сила, крутний момент, комбінований осьовий інструмент, температурні деформації.

*The formation of the total thrust force and torque in hole-making operations with combined axial tool according to the steps principle of operation, for example a three-step drill is considered in the article. A comparative analysis of the total thrust forces and torques in hole-making operations with three-step drill with various design parameters and a standard twist drill was performed. The most effective diameters ratio of stages in combined axial tool was determined.*

**Key words:** cutting depth, feed, cutting speed, thrust force, torque, combined axial tool, thermal deformation.

**Постановка проблемы.** При механической обработке материалов важными характеристиками этого процесса наряду с другими являются сила резания и крутящий момент. От них зависят условия работы оборудования и инструмента, точность обработки детали, энергетические затраты и другие показатели технологического процесса. Как известно, обработка отверстий более сложный и трудоемкий процесс по сравнению с обработкой наружных цилиндрических поверхностей, который во многом зависит от температурных явлений, происходящих при обработке отверстия осевым инструментом. Процесс обработки отверстия комбинированным осевым инструментом (КОИ) сопровождается еще более сложными условиями по сравнению с обработкой элементарным осевым инструментом. Особенно это проявляется при параллельном и параллельно-последовательном принципе работы ступеней, когда в резании принимают участие одновременно несколько ступеней. Это приводит к концентрации сил резания,

возрастанию температур нагрева как инструмента, так и детали, увеличению объема срезаемого материала, что может стать причиной появления погрешностей обработки, ускорения износа инструмента, усложнения выведения стружки или ее пакетирования. Кроме того, при обработке КОИ характерны также еще более сложные условия подвода СОЖ, трение стружки и инструмента по обрабатываемой поверхности и т. д. Однако общий припуск при обработке отверстий КОИ распределяется между ступенями, а глубина резания каждой ступенью не является постоянной величиной. Причиной этого является то, что после обработки каждой ступенью появляются погрешности, связанные с искажением продольного профиля отверстия, принимающего бочкообразную форму из-за температурных деформаций детали и инструмента в зоне резания, в результате чего результирующие силы резания могут изменяться.

**Анализ исследований и публикаций.** Значительное количество исследований как отечественных, так и зарубежных авторов посвящено исследованию температурного состояния при обработке отверстий [1–4]. В работе [3] установлены особенности влияния первой ступени комбинированного осевого инструмента на температурное состояние детали в зоне резания второй ступени. В работе [4] на основе энергетического метода, основанного на изучении совместных температурных явлений и процесса изнашивания инструмента при обработке отверстий КОИ, предложен аналитический метод определения режимов резания. Однако данные о влиянии термомеханических явлений, происходящих при обработке КОИ на результирующие силы резания и крутящие моменты, отсутствуют.

**Цель статьи.** Целью данной статьи является изучение влияния конструктивных параметров КОИ и режимов резания на термомеханические явления, происходящие в зоне резания и влияющие на силовые параметры процесса обработки.

**Изложение основного материала.** Изменению температурных условий обработки и, как следствие, изменению результирующей осевой составляющей силы резания и крутящего момента способствуют различные факторы (рис. 1).



Рис. 1. Факторы, влияющие на изменение силы резания и крутящего момента при обработке отверстий КОИ, зависящие от температуры

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

В процессе обработки КОИ осевая составляющая силы резания и крутящий момент зависят от принципа работы ступеней (последовательно, параллельно, параллельно-последовательно). Теплота, генерируемая в зоне резания ступени КОИ, в немалой степени определяется ее подогревом от теплового воздействия впереди идущей ступени. Например, после обработки  $i$ -ой ступенью изменяется температура обрабатываемой поверхности, что может повлиять на твердость обрабатываемого материала, изменение глубины резания и т. п. для каждой последующей  $i+1$ -ой ступени.

Рассмотрим процесс температурной деформации отверстий, полученных после обработки каждой ступенью инструмента.

Теоретическое значение глубины резания для  $i$ -ой ступени КОИ:

$$t_i = \frac{D_{Hi} - D_{Oi}}{2}, \quad (1)$$

где  $D_{Hi}$  – диаметр  $i$ -ой ступени КОИ, мм;

$D_{Oi}$  – диаметр отверстия до обработки  $i$ -ой ступени КОИ, мм.

В наибольшей степени тепловому воздействию подвергается область детали, непосредственно связанная с зоной резания.

После нагрева в результате резания радиус отверстия будет увеличиваться на величину:

$$\Delta_{rO} = r_O \cdot \alpha_t \cdot T, \quad (2)$$

где  $r_O$  – радиус обрабатываемого отверстия;

$\alpha_t$  – коэффициент линейного расширения обрабатываемого материала;

$T$  – средняя температура детали, увеличивающаяся за счет тепла, выделяющегося при обработке отверстия.

$$\text{Величина } T \text{ определяется как } T = 0,55 \cdot T_{\max}, \quad (3)$$

где  $T_{\max}$  – максимальная температура нагрева детали.

Поэтому фактическую глубину резания  $i$ -ой последующей ступенью КОИ можно найти, подставив выражение (2) в выражение (1) и выполнив некоторые преобразования:

$$t_{\phi i} = \frac{1}{2} [D_{Hi} - D_{Oi} \cdot (1 + \alpha_t \cdot T)] = r_{Hi} - r_{Oi} (1 + \alpha_t \cdot T). \quad (4)$$

Выражение (4) справедливо, когда температурными деформациями инструмента пренебрегают. Однако во многих случаях [1] тепловые деформации инструмента следует учитывать, т. к. инструмент расширяется, причем неравномерно по длине рабочей части. Величина расширения инструмента может быть определена:

$$\Delta D(y) = 2\beta \cdot \int_0^{r_H} \theta(r_H, y) \cdot dr, \quad (5)$$

где  $\beta$  – коэффициент линейного расширения материала инструмента;

$\theta(r, y)$  – температура инструмента на расстоянии  $r_H$  от оси.

С учетом вышеизложенного выражение (4) примет вид:

$$t_{\phi i} = r_{Hi} - r_{Oi} \cdot (1 + \alpha_t \cdot T) + \beta \cdot \int_0^{r_H} \theta(r_H, y) \cdot dr. \quad (6)$$

Воспользуемся зависимостью для определения осевой составляющей силы резания, которая учитывает твердость обрабатываемой поверхности при обработке ступенчатым сверлом. Тогда для  $i$ -ой ступени

$$P_{oi} = C_i \cdot t_i^x \cdot S_i^y \cdot HB_i^N; \quad (7)$$

где  $HB_i^N$  – твердость материала по Бринеллю, обрабатываемого соответствующей ступенью;

$S_i$  – подача, мм/об;

$C, x, y, N$  – эмпирические коэффициенты и показатели степени, учитывающие условия обработки.

Таким образом, учитывая выражения (6) и (7) результирующая осевая сила резания при параллельной работе ступеней КОИ с учетом изменения твердости материала, глубины резания и деформаций инструмента под действием температурного расширения системы инструмент-заготовка:

$$P_{o\Sigma} = C \cdot S^y \cdot \sum_{i=2}^n \left\{ HB_i^N \cdot \left[ r_{Ii} - r_{Oi} \cdot (1 + \alpha_t \cdot T) + \beta \cdot \int_0^{r_{II}} \theta(r_{II}, y) \cdot dr \right]^x \right\}. \quad (8)$$

Следует отметить также, что значительное влияние, возможно решающее, оказывает размер перемычки первой ступени (трехступенчатого сверла), который является функцией диаметра и определяется как  $(0,08 \dots 0,09)d$  [5].

С учетом вышеизложенных теоретических представлений исследовано влияние некоторых конструктивных параметров КОИ (табл. 1) на силовые характеристики процесса резания. Режимы обработки принимали в соответствии с техническими нормативами [6] и данными [7] для сверления стандартными сверлами.

Результаты суммарной осевой силы резания и крутящего момента, полученные при обработке ступенчатыми сверлами с параллельным принципом работы ступеней, сравнивали с результатами осевой составляющей силы резания, полученными при сверлении стандартными сверлами с диаметрами  $D_{св}$ , равным диаметру последней ступени ступенчатого сверла  $D_{In}$ .

Результаты аналитических исследований представлены на рис. 2–4.

Таблица 1

Исследуемые параметры обработки и конструктивные параметры КОИ

№ инструмента	Диаметр ступеней, мм			Материал		Режим резания	
	$D_{In}$	$D_{II2}$	$D_{II3}$	Заготовка	Инструмент	Скорость, м/мин	Подача, мм/об
1	5	20	30	Сталь 45X	P6M5	28	0,1...0,2
2	10	20	30				
3	15	20	30				

При исследовании влияния подачи инструмента на суммарную осевую силу резания установили, что при обработке трехступенчатым инструментом, обеспечивающим съем разными глубинами резания, суммарная осевая составляющая силы резания и суммарный крутящий с увеличением подачи инструмента возрастают.

Величина суммарных осевых сил и крутящих моментов при обработке КОИ на 17...28 % меньше, чем при обработке стандартным инструментом, независимо от подачи (рис. 2).

При обработке гладкого отверстия трехступенчатым сверлом с параллельной схемой работы ступеней, когда общая глубина резания распределяется между ступенями инструмента, на величину суммарной осевой силы резания и крутящего момента также влияет величина диаметра первой ступени (рис. 3).

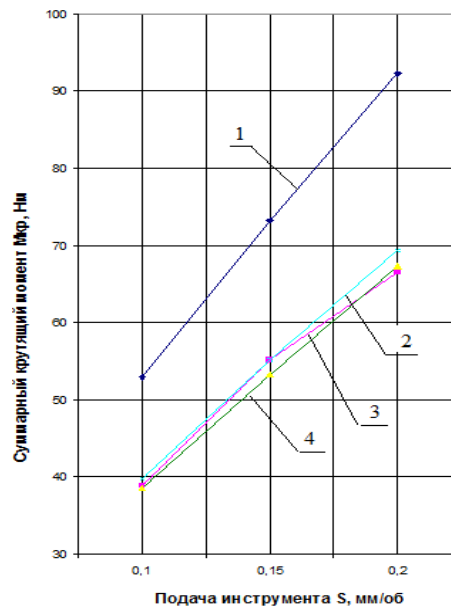
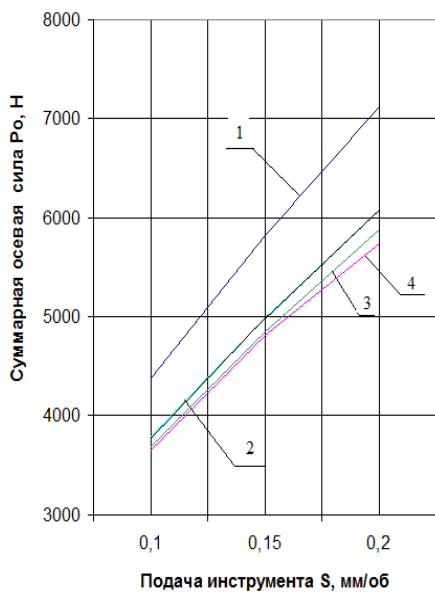


Рис. 2. Влияние подачи инструмента на: а – суммарную осевую составляющую; б – суммарный крутящий момент;

1 – стандартный инструмент  $D=30$  мм; 2 – трехступенчатое сверло  $D_1/D_2/D_3=15/20/30$  мм; 3 – трехступенчатое сверло  $D_1/D_2/D_3=10/20/30$  мм; 4 – трехступенчатое сверло  $D_1/D_2/D_3=5/20/30$  мм

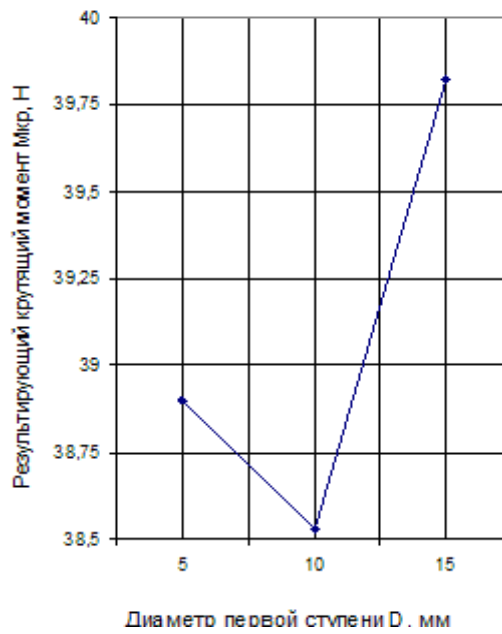
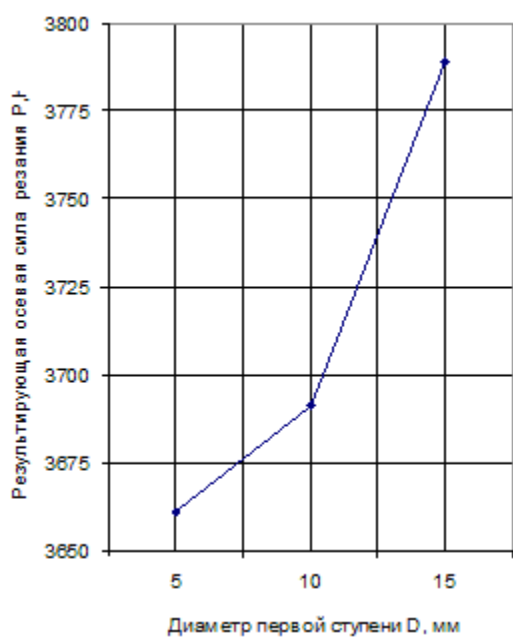


Рис. 3. Влияние величины первой ступени трехступенчатого сверла на: а – суммарную осевую силу резания; б – суммарный крутящий момент;

длина отверстия  $L_0 = 20$  мм; скорость  $v=28$  м/мин, подача  $S=0,1$  мм/об

Анализ графиков (рис. 3) показывает, что с уменьшением диаметра первой ступени суммарная осевая сила резания и крутящий момент уменьшаются. Таким образом, при обработке отверстия диаметром  $D_0 = 30$  мм наиболее эффективным из рассмотренных вариантов является использование трехступенчатого КОИ с диаметром первой ступени  $D_{ш1} = 5$  мм.

Кроме того, необходимо также исследовать влияние диаметра второй ступени в комплексе с диаметром первой ступени (рис. 4). Исследования проводились для следу-

ющего рода соотношений диаметров  $D_{II1}/D_{II2}$ : 1/3; 1/4; 1/5; 2/3; 1/2; 2/5; 1/1; 3/4; 3/5 (табл. 2) при таких начальных условиях: материал заготовки – сталь 45Х, материал инструмента – Р6М5, скорость резания  $v=28$  м/мин, подача  $S=0,1$  мм/об.

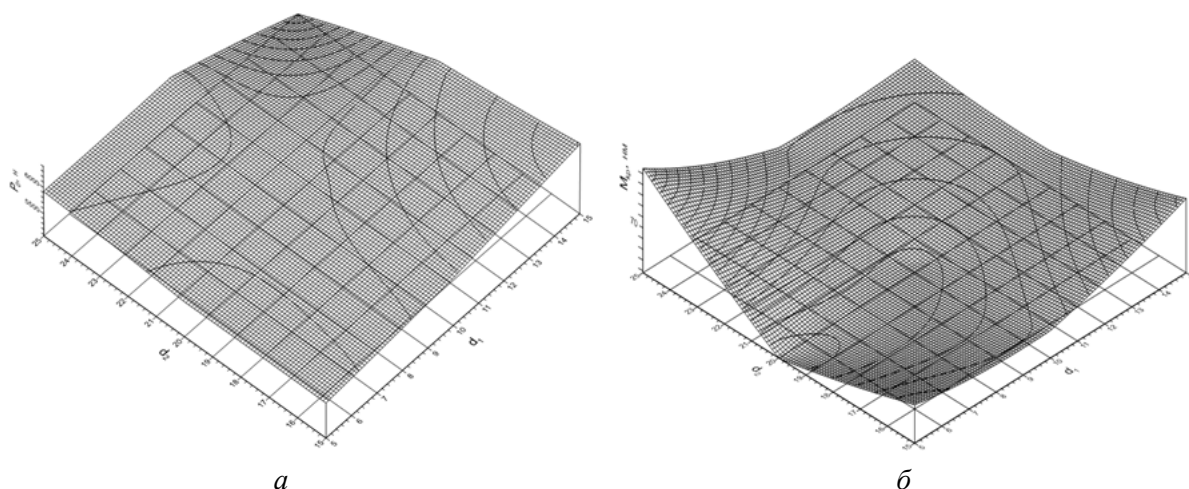


Рис. 4. Область исследуемых значений в зависимости от сочетания диаметров  $D_{II1}/D_{II2}$  ступеней трехступенчатого сверла при  $D_{III} = 30$  мм: а – суммарных осевых сил; б – суммарных крутящих моментов

Таблица 2

## Исходные данные и результаты расчета

№ п/п	Диаметр ступени КОИ			Силовые параметры		Примечание
	$D_{II1}$	$D_{II2}$	$D_{III}$	$P_{0\Sigma}$	$M_{kp\Sigma}$	
1	5	15	30	5743	69,5	
2	5	20		5741	66,5	min
3	5	25		5922,5	74,6	
4	10	15		5984	68,65	
5	10	20		5877,5	67,25	
6	10	25		5981,3	69,6	
7	15	15		6408	72,27	max
8	15	20		6075	69,34	
9	15	25		6074,5	69,87	

Установлено, что в исследуемом диапазоне диаметров ступеней КОИ наиболее приемлемым является соотношение 1/4 ( $D_{II1} = 5, D_{II2} = 20$ ), а не целесообразным – 1/1 ( $D_{II1} = 15, D_{II2} = 15$ ). Разница в осевых силах может достигать 500 Н, а в моментах – 6 Нм, что составляет около 10 %. Минимальное значение  $P_{0\Sigma}$  составляет 5741 Н, а  $M_{kp\Sigma}$  66,5 Нм.

**Выводы и предложения.** Предложена математическая модель определения суммарной осевой силы резания КОИ с учетом тепловых деформаций инструмента и отверстия, а также изменения механических свойств обрабатываемого материала. В результате аналитических исследований установлено, что при обработке отверстия КОИ величины результирующей осевой силы и крутящего момента ниже, чем при обработке стандартным инструментом, диаметр которого равен диаметру максимальной ступени КОИ. Это объясняется разбиением общего припуска между ступенями, уменьшением ширины перемычки, изменением механических свойств материала и температурных деформаций детали и инструмента из-за нагрева от предыдущей ступени. Таким образом, применение КОИ целесообразно не только с точки зрения повышения производительности обработки, но и для уменьшения усилий резания на 10–28 % в зависимости от соотношения диаметров ступеней.

**Список использованных источников**

1. *Теплофізика* механічної обробки : підручник / О. В. Якимов, А. В. Усов, П. Т. Слободяник, Д. В. Юргачов. – Одеса : Астропринт, 2000. – 256 с.
2. *Барац Я. И.* Тепловые явления при обработке отверстий / Я. И. Барац, Л. Р. Милованова // *Стин.* – 2008. – № 4. – С. 22–26.
3. *Татьянченко А. Г.* Особенности развития тепловых процессов при чистовой обработке отверстий комбинированным осевым инструментом / А. Г. Татьяначенко, И. Н. Лаппо // *Вестник СевГТУ.* – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. – Вып. 140: Машиноприборостроение и транспорт. – С. 178–183.
4. *Малишко А. О.* Основы теорії проектування осьових комбінованих інструментів : авто-реф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / І. О. Малишко. – Донецьк : ДонДТУ, 1995. – 36 с.
5. *Кириллов К. Н.* Сверла повышенной жесткости для труднообрабатываемых материалов / К. Н. Кириллов // *Спиральные сверла : сборник материалов всесоюзного совещания по сверлам / под ред. К. П. Имшенника.* – М. : Машиностроение, 1966. – С. 38–53.
6. *Общемашиностроительные* нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с ЧПУ : в 2 ч. – М. : Экономика, 1990. – 208 с.
7. *Справочник* технолога машиностроителя : в 2 т. Т. 2 / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.

УДК 519.711:621.365

**Р.М. Хрестін**, викладач

Нікопольський технікум Національної металургійної академії України, м. Нікополь, Україна

**РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ**

**Р.Н. Хрестин**, преподаватель

Никополюский техникум Национальной металлургической академии Украины, г. Никополь, Украина

**РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ**

**Roman Khriestin**, teacher

Nikopol College of National Metallurgical Academy of Ukraine, Nikopol, Ukraine

**DESIGN OF THE STRUCTURE OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE ENERGY BLOCK ELECTRIC ARC FURNACE**

*Розглянуто математичну модель енергетичного блока дугової сталеплавильної печі, яка є складовою частиною для створення системи управління режимами плавлення. Створено блок-схему моделі теплового блока, яка дозволяє визначити динаміку температур, потужностей та енергій плавильного процесу. Проведено аналіз цих параметрів. Аналіз показав відповідність результатів моделювання та результатів, що отримані на діючих печах.*

**Ключові слова:** енергетичні режими дугової печі, керування параметрами плавлення, математична модель, динамічні зміни енергій та потужностей печі, температура шихти, температура дуги.

*Рассмотрена структура математической модели энергетического блока дуговой сталеплавильной печи, которая является основой для создания системы управления режимами плавки. Создана блок-схема модели теплового блока, которая позволяет определять динамику температур, мощностей и энергий плавильного процесса. Проведен анализ этих параметров. Анализ показал соответствие результатов моделирования и результатов, полученных на действующих печах.*

**Ключевые слова:** энергетические режимы дуговой печи, управление параметрами плавки, математическая модель, динамические изменения энергий и мощностей печи, температура шихты, температура дуги.

*The structure of the mathematical model of the energy block electric arc furnace, which is part for the establishment of a system of management of modes of melting. Created block diagram model of the thermal unit, which allows you to determine the dynamics of temperature, power and energy of the melting process. These parameters are analyzed. Analysis has shown conformity the simulation results and the results obtained on the working furnaces.*

**Key words:** energy regimes arc furnace, control of parameter smelting, the mathematical model, the dynamic changes in the energy and power of the furnace, the temperature of the metal, the temperature of the arc.