

## Изследване влиянието на елементите на режима на рязане върху специфичния разход на енергия при струговане

Стефан Велчев, Иван Колев, Красимир Иванов, Симеон Гечевски

**Abstract:** В статията са представени резултатите от изследване на специфичния разход на енергия при струговане на струг с цифрово програмно управление. Разгледани са два математични модела. При първия от тях, специфичният разход на енергия е функция от мощността на рязане и честотата на въртене на вретеното, а при втория – от производителността на рязане. Резултатите от проведени експериментални и от паралелни числени изследвания са използвани да се оцени точността на двата модела и за определяне характера на влияние на различните фактори. Установено е, че и двата модела имат достатъчна за практиката точност, но първият модел е по-точен, а с увеличаване на елементите на режима на рязане, специфичния разход на енергия намалява.

**Keywords:** Specific energy consumption, cutting conditions, CNC turning,

### 1. СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Намаляването на потреблението на енергия при механично обработване на детайлите, изисква познаване на нейната консумация, като функция на машината и параметрите на технологичния процес. В това отношение съществуват проучвания, основани главно на приблизителни изчисления, но нито документацията на металорежещите машини, нито съществуващите методи на оценка биха дали съществен резултат.

Достатъчно информативен за потребената при работа енергия е специфичният разход на енергия  $e_{ec}$ , който се представя като отношение на мощността на общата консумирана енергия  $P_{ec}$  и производителността на рязане  $Q$ :

$$e_{ec} = \frac{P_{ec}}{Q}, \text{ kW} \cdot \text{min}/\text{cm}^3 \quad (1)$$

Производителността на рязане  $Q$  се определя по формулата:

$$Q = v_c f a_p, \text{ cm}^3/\text{min}, \quad (2)$$

където  $v_c$  е скоростта на рязане, m/min;

$f$  - подаване за оборот, mm/rev;

$a_p$  - дълбочина на рязане, mm

Изследването на зависимостите на специфичния разход на енергия от елементите на режима на рязане е необходимо, за да се създадат предпоставки за оптимизация на тези елементи по критерий минимален разход на енергия.

За апроксимиране на тези зависимости са използвани различни математични модели, които накратко ще бъдат разгледани.

За пресмятането на специфичния разход на енергия при челно фрезозане на алуминиева сплав е използвана формулата [6]:

$$E_{cs} = \frac{P_c}{60 \eta Z}, \text{ kWh}/\text{cm}^3, \quad (3)$$

където  $P_c$  е мощността на рязане, kW;

$Z$  - производителност на рязането  $\text{cm}^3/\text{min}$ ;

$\eta$  - к.п.д. на фрезозата машина.

Мощността на рязане се определя чрез периферната сила на рязане, изразена чрез математичен модел от елементите на режима на рязане при фрезозане, който е полином от втора степен. С такъв полином е апроксимирана и зависимостта на к.п.д. от момента на рязане и честотата на въртене на вретеното. Получени са зависимости на  $E_{cs}$  от елементите на режима на рязане, представени графично, а математичните им модели са твърде сложни и важат за дадена фрезоза машина, даден инструмент и обработван материал.

Резултати за влиянието на елементите на режима на рязане – скорост на рязане, подаване и дълбочина на рязане и радиуса при върха на пластината, върху консумираната мощност при струговане на инструментална стомана AISI P-2 на струг с ЦПУ без и с охлаждане и охлаждане с течен азот, са дадени в [3]. Получени са математични модели за мощността на консумираната енергия, апроксимираща зависимостта ѝ от тези фактори във вид на полином от втора степен. Същият модел за консумираната мощност от тези фактори при струговане на алуминиева сплав 7075 е получен чрез експериментални изследвания, дадени в [4]. От тези модели могат да се получат и съответните модели за специфичния разход на енергия от елементите на режима на рязане. Освен че имат сложна структура, те също важат само за даден инструмент и даден обработван материал.

Експериментални данни за влиянието на дълбочината на рязане и подавателната скорост върху специфичния разход при фрезозане са дадени в [5], а за консумираната мощност при фрезозане на алуминий в зависимост от дълбочината на фрезозане са дадени в [8].

Целта на настоящата работа е чрез експериментални и числени изследвания, да се установи влиянието на елементите на режима на рязане при струговане върху специфичния разход на енергия.

## 2. МАТЕМАТИЧНИ МОДЕЛИ НА СПЕЦИФИЧНИЯ РАЗХОД НА ЕНЕРГИЯ

Математичните модели на зависимостта на специфичния разход на енергия от елементите на режима на рязане при струговане могат да се получат от математичния модел на зависимостта на мощността на консумираната енергия от мощността на рязане и честотата на въртене на вретеното [1] и от математичния модел на зависимостта на специфичния разход на енергия от производителността на рязане [2].

В първия случай от зависимостта (1) се получава математичният модел:

$$e_{ec} = \frac{a_o + a_1 n + (b_o + b_1 n + b_2 n^{b_1}) P_c^{B_1} + P_c}{v_c \cdot a_p \cdot f}, \quad (4)$$

$$\text{където } P_c = \frac{C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \cdot v_c^{1+n_{F_c}}}{6 \cdot 10^4} \quad (5)$$

Стойностите на коефициентите и степенните показатели на моделите (4) и (5) са дадени в [1]. Моделът (4) нататък ще бъде означаван като  $e_{ec} = f(P_c, n)$ .

Във втория случай от модела

$$e_{ec} = \frac{P_o}{Q} + C_o Q^{B_1} \quad (6)$$

след заместване на  $Q$  се получава моделът, изразяващ зависимостта на  $e_{ec}$  от елементите на режима на рязане:

$$e_{ec} = \frac{P_o}{v_c \cdot f \cdot a_p} + B_o \cdot v_c^{B_1} \cdot f^{B_1} \cdot a_p^{B_1}. \quad (7)$$

Стойностите на  $P_o$ ,  $B_o$  и  $B_1$  са дадени в [2]. Моделът ще бъде по-нататък цитиран като  $e_{ec} = f(Q)$ .

Предимството на модела (4) е, че той не зависи за дадена стругова машина от вида на инструмента и на обработвания материал. За да се определи влиянието на  $v_c$ ,  $f$  и  $a_p$  върху  $e_{ec}$  е достатъчно да е известен моделът на главната сила на рязане, получен чрез опитно изследване или с използване на справочни данни.

## 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ

### 3.1. Методика на изследването

Целта на изследването е да се оценят математичните модели  $e_{ec} = f(P_c, n)$  и  $e_{ec} = f(Q)$ . За да се намали броят на опитите се прие да се изследва частично влиянието на подаването върху специфичния разход на енергия при дадена скорост на рязане и дълбочина на рязане, както и чрез тестове, при които се варира случайно с елементите на режима на рязане. Изследванията са проведени на струг СТ161 с CNC управление, върху образци от обработван материал 40X (210HB), със стругарски нож с пластина SCMT120408PM сорт 4225 и държач SSBCR2525-12 (Sandvik Coromant), [9]. За измерване мощността на консумираната енергия на входа на главния превод и входа на машината е разработена система за измерване, включваща токови трансформатори и отчитащи прибори тип PM1200 (Schneider electric). Чрез промишлен интерфейс RS485 приборите са свързани към преносим компютър ПК, където се съхраняват измерваните стойности.

### 3.2. Резултати от експерименталното изследване и анализ

На фиг. 1а са показани зависимостите на специфичния разход на енергия от подаването при различни скорости и дълбочини на рязане, като опитните стойности са означени с точки, а стойностите според модела  $e_{ec} = f(P_c, n)$  - с линии. Относителната грешка между предсказаните  $\hat{e}_{ec}$  по този модел и опитните  $e_{ec}$  стойности

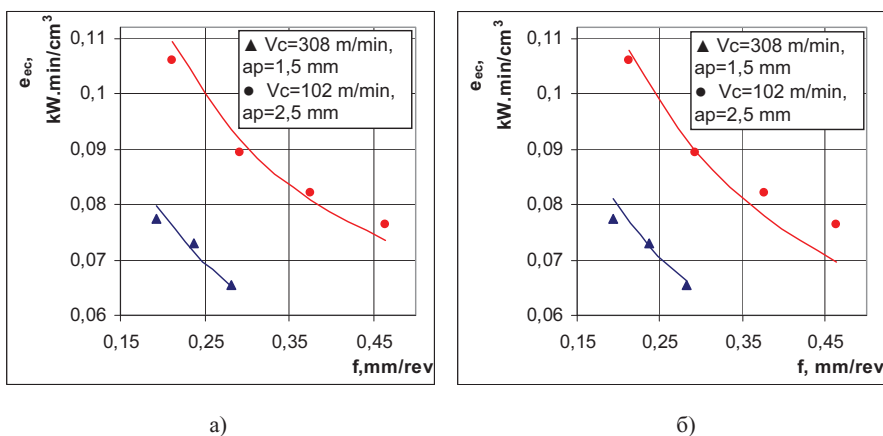
$$\Delta e_{ec} = \frac{\hat{e}_{ec} - e_{ec}}{e_{ec}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

не е по-голяма от 4%.

На фиг. 1б са показани същите зависимости, като предсказаните стойности, означени с линии са според модела  $e_{ec} = f(Q)$ . Относителната грешка в този случай достига 8%.

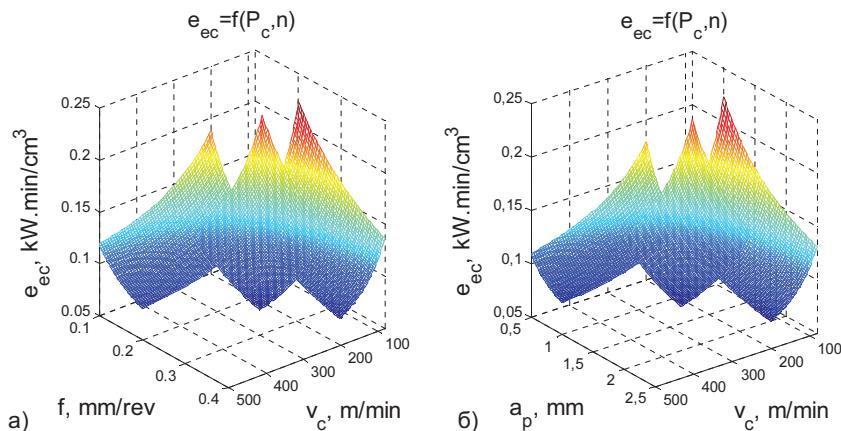
В табл. 1 са дадени резултатите от 8 теста на двата модела.

При вариране на скоростта на рязане, подаването и дълбочината на рязане в широки граници, относителната грешка на модела  $e_{ec} = f(P_c, n)$  не превишава 4%, а на модела  $e_{ec} = f(Q)$  - 9%, т.е. потвърждава се резултата от предното изследване. Оказва се, че моделът  $e_{ec} = f(P_c, n)$  е по-точен от модела  $e_{ec} = f(Q)$ .



Фиг. 1. Влияние на подаването върху специфичния разход на енергия: а) математичен модел  $e_{ec} = f(P_c, n)$ , б) математичен модел  $e_{ec} = f(Q)$

#### 4. ЧИСЛЕНО ИЗСЛЕДВАНЕ

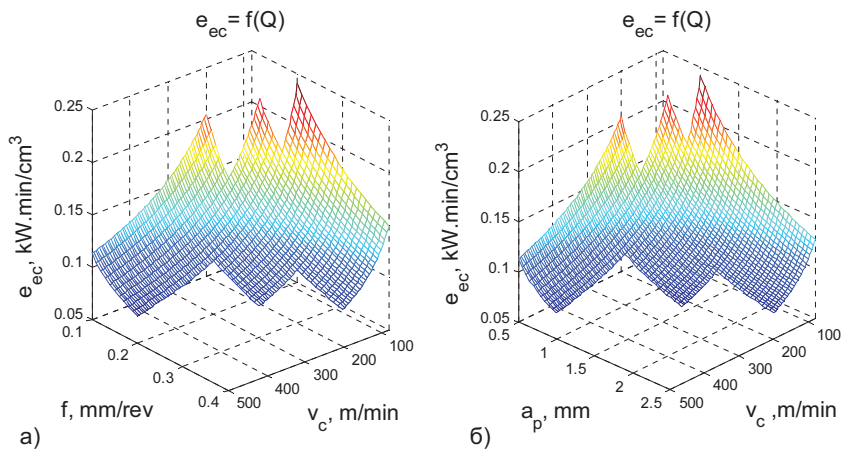


Фиг.2. Влияние на елементите на режима на рязане върху специфичния разход на енергия при стругане на стомана 40X според модела  $e_{ec} = f(P_c, n)$

а) от скоростта на рязане и подаването ( $a_p = 1,0$  mm);

б) от скоростта на рязане и дълбочината на рязане ( $f = 0,2$  mm/rev).

Изследването на влиянието на елементите на режима на рязане върху специфичния разход на енергия може да се извърши посредством моделите  $e_{ec} = f(P_c, n)$  и  $e_{ec} = f(Q)$ , тъй като се установи, че те имат достатъчна за практиката точност. Пресмятането на специфичния разход на енергия посредством тези модели е валидно в областта на вариране на елементите на режима на рязане при I, II и III серия опити при изследването на силата на рязане (фиг. 1 и табл. 1). На фиг. 2 е



Фиг. 3. Влияние на елементите на режима на рязане върху специфичния разход на енергия при стругане на стомана 40X според модела  $e_{ec} = f(Q)$

а) от скоростта на рязане и подаването ( $a_p = 1,0$  mm);

б) от скоростта на рязане и дълбочината на рязане ( $f = 0,2$  mm/rev)

показано влиянието на елементите на режима на рязане при струговане на стомана 40X според модела  $e_{ec} = f(P_c, n)$  върху специфичния разход на енергия. От графиките на зависимостта на  $e_{ec}$  от скоростта на рязане и подаването на (фиг. 2а), от скоростта на рязане и дълбочината на рязане (фиг. 2б) се вижда, че с увеличаване на елементите на режима на рязане, специфичният разход на енергия намалява. Най-малка стойност той достига при най-големи стойности на  $v_c$ ,  $f$  и  $a_p$  в интервалите на варирането им.

На фиг. 3. са показани графично същите зависимости според модела  $e_{ec} = f(Q)$ .

Табл. 1. Резултати от проведените тестове

Тест №	1	2	3	4	5	6	7	8
Скорост на рязане, m/min	73	102	160	210	247	308	395	495
Подаване, mm/rev	0,315	0,280	0,160	0,385	0,140	0,195	0,190	0,120
Дълбочина на рязане, mm	2,5	1,5	1,0	2,0	0,75	1,5	1,0	0,5
Производителност на рязане, cm <sup>3</sup> /min	57,49	42,84	25,60	161,7	25,94	87,78	75,05	29,7
Мощност на консумираната енергия, kW	6,39	4,90	4,11	9,15	4,15	6,90	6,66	5,05
Специфичен разход на енергия (CPE), kW.min/cm <sup>3</sup>	0,1112	0,1144	0,1605	0,0566	0,1600	0,0786	0,0887	0,1700
Предсказана стойност на CPE според модела $e_{ec} = f(P_c, n)$	0,1076	0,1165	0,1585	0,0559	0,1599	0,0816	0,0904	0,1663
Относителна грешка, %	-3,27	1,82	-1,24	-1,15	0,06	3,88	1,89	-2,16
Предсказана стойност на CPE според модела $e_{ec} = f(Q)$	0,1038	0,1239	0,1730	0,0594	0,1633	0,0817	0,0891	0,1567
Относителна грешка, %	-6,62	9,35	6,72	5,04	2,04	0,12	0,41	7,82

И в този случай ( $e_{ec} = f(Q)$ ), общото влияние на елементите на режима на рязане е същото, както според модела  $e_{ec} = f(P_c, n)$ .

Степента на влиянието на елементите на режима на рязане върху специфичния разход на енергия според двата модела, се различава и е дадена в табл. 2. При увеличаване на елементите на режима 4 пъти ( $k_v = k_f = k_a = 4$ ) според модела  $e_{ec} = f(P_c, n)$ , коефициентите на намаляване на специфичния разход на енергия са съответно  $k_e = 2,33$ ,  $k_e = 2,48$  и  $k_e = 2,14$ .

Табл. 2. Влияние на относителното увеличение на елементите на режима върху намалението на специфичния разход на енергия

№	$v_c$ , m/min	$K_v$	$f$ , mm/rev	$K_f$	$a_p$ , mm	$K_a$	Модел $e_{ec} = f(P_c, n)$		Модел $e_{ec} = f(Q)$	
							$e_{ec}$ kW.min/cm <sup>3</sup>	$K_e$	$e_{ec}$ kW.min/cm <sup>3</sup>	$K_e$
1.	100	4	0,20	-	1,0	-	0,1880	2,33	0,2051	2,38
2.	400						0,0807		0,0860	
3.	200	-	0,10	4	1,0	-	0,1920	2,48	0,2051	2,38
4.			0,40				0,0773		0,0860	
5.	200	-	0,2	-	0,5	4	0,1835	2,14	0,2051	2,38
6.					2,0		0,0858		0,086	

Както следва да се очаква, според модела  $e_{ec} = f(Q)$  при четирикратно увеличаване на елементите на режима, коефициентът на намаляване на

специфичния разход е еднакъв -  $k_e = 2,38$ . Тези стойности на  $k_e$  вадат за дадените стойности на елементите на режима на рязане. Стойностите на намаляване на специфичния разход на коефициентите на енергия според двата модела са твърде близки, с изключение на влиянието на дълбочината на рязане според модела  $e_{ec} = f(P_c, n)$ .

## 5. ИЗВОДИ

Формирани са два математични модела на зависимостта на специфичния разход на енергия при струговане на стомана 40X на струг с цифрово управление СТ161 от елементите на режима на рязане. Първият модел се основава на мощността на рязане и честотата на въртене на вретеното – модел  $e_{ec} = f(P_c, n)$ , а вторият – на производителността на рязането – модел  $e_{ec} = f(Q)$ . От направената оценка на моделите чрез експериментални изследвания – частично чрез вариране на подаването и чрез тестове със случайни режими на рязане, вариращи в широки граници се установи, че при използване на модела  $e_{ec} = f(P_c, n)$  се допуска грешка до 4%, а при модела  $e_{ec} = f(Q)$  - до 8%, т.е. моделите имат достатъчна за практиката точност, но първият модел е по-точен.

Чрез числени изследвания се установи, че специфичният разход на енергия намалява с увеличаването на елементите на режима на рязане. Степента на влияние на скоростта на рязане, подаването и дълбочината на рязане според модела  $e_{ec} = f(Q)$  е еднаква. При четирикратно увеличаване на  $v_c$ ,  $f$  и  $a_p$ , специфичният разход на енергия намалява 2,38 пъти. Според моделът  $e_{ec} = f(P_c, n)$  степента на влияние на елементите на режима на рязане, макар и слабо изразено, е различно. При четирикратно увеличаване на  $v_c$ ,  $f$  и  $a_p$ , намаляването на специфичния разход на енергия е съответно 2,33, 2,48, и 2,14 пъти. Тези стойности са близки до съответните стойности според модела  $e_{ec} = f(Q)$ .

Зависимостите на специфичния разход на енергия от елементите на режима на рязане могат да се използват за тяхното оптимизиране по критерий минимален разход на енергия при струговане.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Велчев С., Колев, И., Иванов К., Ненов Г. Изследване на мощността на консумираната електрическа енергия при струговане. // Науч. тр. на РУ «Ангел Кънчев», Русе, т. 51, серия 2, 2012, 144 - 152.
- [2] Колев, И., Велчев С., Иванов К., Гечевски С. Изследване влиянието на производителността на рязане върху специфичната консумирана енергия при струговане. // Науч. тр. на РУ «Ангел Кънчев», Русе, т. 51, серия 2, 2012, 153 - 157.
- [3] Aggarwal, A., H, Singh., P, Kumar., M, Singh. Optimizing power consumption for CNC turned parts using response surface methodology and Taguchi's technique – A comparative analysis. J. Mat. Proces. Technol., vol.200, iss 1-3, 2008, 373 – 384.
- [4] Bhushan, R., K. Optimization of cutting parameters of minimizing power consumption and maximizing tool life during of Al alloy SIC particle composites. J. of cleaner Production, 39, 2013, 242-254.
- [5] Dietmar, A., Vere, A. Energy consumption forecasting and optimization for tool machines. MM science journal, March, 64/65, 2009.
- [6] Draganescu, F., Gheorghe, M., Doicin, C.V. Models of machine tool efficiency and specific consumed energy. J. Mater. Process. Technol., 2003, №141, 9–15.
- [7] Dufloy, J. R. , Kellens, K , Renaldi , Guo, Y , Dewulf, W. Critical Comparison of Methods to Determine the Energy Input for Discrete Manufacturing Processes. CIRP Annals - Manufacturing Technology 61,iss.1, 2012, 63–66.

[8] Newman, S., T., Naseehi, A., Imani-Asrai, R., Dhokia, V. Energy efficient process planning for CNC machining. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol.5, iss.2, 2012, 127-136.

[9] Sandvik Coromant, 2011. Main catalogue. Cutting tools from Sandvik Coromant.

**За контакти:**

проф. д-р инж. Иван Колев, Катедра "Технология на машиностроенето и металоурежещи машини", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 082 888 544, e-mail: [kolev@uni-ruse.bg](mailto:kolev@uni-ruse.bg).

**Докладът е рецензиран**