

## Изследване на енергоемкостта на струговане за оптимални режими на рязане, определени при различни целеви функции

Иван Колев, Красимир Иванов, Симеон Гечевски

**Investigation of energy saving during turning for optimal cutting conditions in different target functions:** The work proposed methodology for comparing the energy consumption of a CNC turning for optimum cutting conditions set at three target functions - production cost, productivity rate and consumed energy. The results of the research are shown.

*В работата е предложена методика за сравняване на енергоемкостта на струговане със струг с ЦПУ за оптимални режими на рязане, определени при три целеви функции – технологична себестойност, технологична производителност и консумирана енергия. Показани са резултатите от направеното изследване.*

**Key words:** production cost, productivity rate, consumed energy, cutting conditions

### ВЪВЕДЕНИЕ

Освен за целите на производителността и качеството, прилагането на концепцията за устойчивост се превърна във важна тема в процесите на механично обработване. Според Fratila и Caizar (2011), концепцията за устойчиво развитие и по-чисто производство може да се отнесе за създаването на продукти и услуги, които включват екологично чисти процеси и системи така, че да бъде икономически изгодно, здравословно за служителите и привлекателно за потребителите.

В тази връзка, в стремеж да се действа паралелно по отношение на качеството, производителността и устойчивото производство, организациите са принудени да използват нетривиално техническо планиране, а не само анализа от опита на техните оператори или на спецификациите на производителя. Правилният избор на параметрите на рязане, както и подходящата за обработка техника не е лесна задача, тъй като тя изисква при реализирането на процесите едновременно да се оптимизира повече от една характеристика (Paiva и др., 2009; Brito и др., 2014). По този начин, методите за оптимизация трябва да предлагат набор от оптимални решения по критерии, които да съответстват на нуждите на организацията и да позволяват вземането на решение за избор на оптимален вариант.

От публикациите по тези проблеми се установи, че като критерии за оптимизиране продължават да се използват най-често технологичната себестойност и технологичната производителност [1, 2 и др.], а по-рядко нормата за печалба [3, 4] и машинното време [7].

В известната литература липсват данни от сравняване на енергоемкостта на механичното обработване при оптимални режими на рязане, определени при различни целеви функции.

В настоящата работа е представена методика за сравняване на енергоемкостта на механичното обработване на стругове с ЦПУ при оптимални режими на рязане, определени при целеви функции технологична себестойност, технологична производителност и консумирана електрическа енергия, както и резултати от проведеното изследване.

### УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО НА КОНСУМИРАНАТА ЕНЕРГИЯ ПРИ РАЗЛИЧНИ ОПТИМАЛНИ РЕЖИМИ НА РЯЗАНЕ

За да се проведе изследването на енергоемкостта на струговането трябва да се определят оптималните режими на рязане при трите целеви функции и да се пресметне за всички от тях консумираната електрическа енергия.

Технологичната себестойност се определя по формулата [5]:

$$K = t_m \cdot E + \frac{t_c}{T} \cdot t_m \cdot E + \frac{S}{T} \cdot t_m,$$

(1)

където  $t_m$  е машинното време, min;

$E$  – разходи за 1 min работа на струга, лв/min;

$t_c$  – време за смяна на режещия инструмент, min;

$T$  – трайност на режещия инструмент, min;

$S$  – разходи за режещ инструмент за един период на трайност, лв.

Минималната технологична себестойност се получава при оптимална скорост на рязане, определена по формулата [6]:

$$v_{ck} = \frac{C_v \cdot k_v}{\left[ (t_m - 1) + \left( t_c + \frac{S}{E} \right) \right]^m \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}}$$

(2)

Технологичната производителност се пресмята по формулата [6]:

$$Q = \frac{1}{t_m + \frac{t_c}{T} \cdot t_m},$$

(3)

а оптималната скорост на рязане при тази целева функция е [7]:

$$v_{cQ} = \frac{C_v}{\left[ (1/m - 1) \cdot t_c \right]^m \cdot f^{y_v}}$$

(4)

Консумираната електрическа енергия се определя по формулата [8]:

$$E_{ec} = P_0 \cdot K_m \cdot f^{-1} \cdot v_c^{-1} + B_0 \cdot K_m \cdot v_c^{B_1} \cdot f^{B_1} \cdot a_p^{B_1+1} + t_c \cdot K_m \cdot \frac{P_0}{C_T} \cdot v_c^{n_T-1} \cdot f^{y_T-1}, \quad (5)$$

където  $P_0$  е мощността на празен ход, kW;

$B_0$  и  $B_1$  – коефициенти в модела за специфичната консумирана енергия;

$K_m$  – коефициент ( $K_m = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000}$ );

$C_T$ ,  $n_T$  и  $y_T$  – коефициент и степенни показатели в трайностната зависимост на Тейлор.

Оптималната скорост на рязане се получава по формулата [8]:

$$v_{ce} = v_{cQ} \left[ 1 - \frac{B_0 \cdot B_1}{P_0} \cdot (a_p \cdot f)^{B_1+1} \cdot v_{ce}^{B_1+1} \right]^m,$$

(6)

Във формула (6) оптималната скорост на рязане е в неявен вид. За да се определи  $v_{ce}$  се използва числен метод.

За определяне на коефициентите в математичния модел (7) на специфичната консумирана енергия  $B_0$  и  $B_1$

$$e_{ec} = \frac{P_0}{Q} + B_0 \cdot Q^{B_1}$$

(7)

е проведено експериментално изследване, като е използван обработван материал стомана 40X (200 – 210 НВ). Изследването е проведено на струг СТ 161

със стругарски нож с означение SSBCR 2525-12 на държача и SCMT 120408PM на сменяемата пластина.

В таблица 1 са дадени получените резултати след обработване на опитните данни.

Стойности на  $P_0$ ,  $V_0$  и  $V_1$

Таблица 1

Струг	$P_0$ , kW	$V_0$	$V_1$
СТ 161	2,256	0,2539	-0,3380

В това изследване коефициентът и степенните показатели във формулата на Тейлор, дадени в таблица 2 са определени чрез математическо моделиране на препоръчителните данни за избраната твърдосплавна пластина според производителя (Sandvik Coromant). Моделирана е скоростта на рязане от трайността и подаването, като са отчетени поправъчните коефициенти за твърдост на обработвания материал и за трайност на инструмента. За обработване на данните е използвана компютърната програма „Статистика”.

Коефициенти и степенни показатели във формулата на Тейлор Таблица 2

Твърдост на материала	Сорт на пластината	$C_v$	$m$	$y_v$	$C_T$	$n_T$	$y_T$
210 HB	GC4225	408,3	0,257	0,288	$1,443 \cdot 10^{10}$	3,891	1,121

За провеждане на изследването са приети следните стойности на подаването  $f = 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4$  mm/rev. Дълбочината на рязане  $a_p = 1$  mm е постоянна;  $t_c = 5$  min;  $E = 0,1$  лв/min;  $S = 4$  лв. Мощността при неподвижно вретено (режим на готовност за работа) за струг СТ 161 е  $P_0 = 2,256$  kW. Диаметърът на обработваната повърхнина  $D = 100$  mm, а дължината на работния ход е  $L_c = 100$  mm. Трайността на режещия инструмент се пресмята по формулата:

$$T = \frac{C_T}{v_c^{n_T} \cdot f^{y_T}}$$

(8)

Изследването е извършено за посочените по-горе подавания, като за всяко от тях се определя оптималната скорост на рязане за трите целеви функции и стойностите на целевите функции.

Относителното нарастване на консумираната енергия при целеви функции технологична себестойност и технологична производителност се определя по формулите:

$$\Delta E_{eck} = \frac{E_{eck} - E_{ec}}{E_{ec}} \cdot 100\%$$

(9)

и

$$\Delta E_{ecQ} = \frac{E_{ecQ} - E_{ec}}{E_{ec}} \cdot 100\%$$

(10)

където  $E_{ec}$  е минималната консумирана енергия, kW·min;

$E_{eck}$  – консумираната енергия при целева функция технологична себестойност, kW·min;

$E_{ecQ}$  – консумираната енергия при целева функция технологична производителност, kW·min.

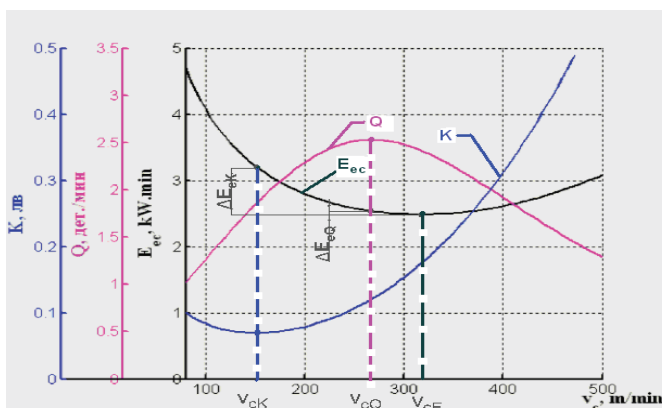
**РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО**

Стойностите на оптималните скорости на рязане и целевите функции при различните подавания са представени в табл. 3.

Стойности на оптималните скорости и на целевите функции Таблица 3

$f$ , mm/rev	$v_{cE}$ , m/min	$v_{cK}$ , m/min	$v_{cQ}$ , m/min	$E_{ec}$ , kW.min	$Q$ , дет/мин	$K$ , лв.
0.1	440	227	399	4.647	0.9	0.186
0.2	372	186	327	3.357	1.5	0.114
0.3	339	165	291	2.808	2.1	0.085
0.4	317	152	268	2.485	2.5	0.072

На фиг. 1 е показана геометричната интерпретация на целевите функции при  $f = 0,4$  mm/rev и изменение на скоростта на рязане  $v_c = 80 - 500$  m/min.



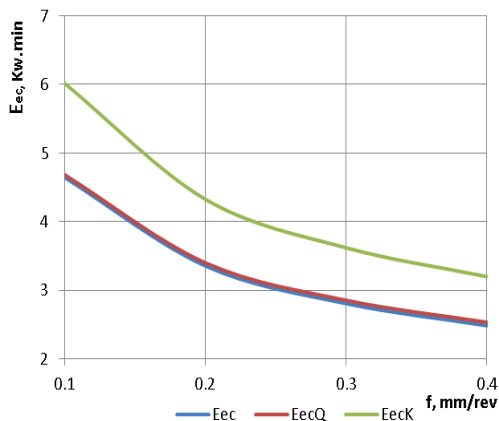
Фиг. 1. Графики на функциите  $E_{ec}=f(v_c)$ ,  $Q=f(v_c)$ ,  $K=f(v_c)$  и разликите в консумираната енергия  $\Delta E_{ecQ}$ ,  $\Delta E_{ecK}$

Резултатите от изследването на относителното нарастване на консумираната енергия  $\Delta E_{ecK}$  и  $\Delta E_{ecQ}$  са дадени в таблица 4.

Относително нарастване на консумираната енергия  $\Delta E_{ecK}$ ,  $\Delta E_{ecQ}$  Таблица 4.

$f$ , mm/rev	$v_{cE}$ , m/min	$v_{cK}$ , m/min	$v_{cQ}$ , m/min	$E_{ec}$ , kW.min	$E_{ecQ}$ , kW.min	$E_{ecK}$ , kW.min	$\Delta E_{ecQ}$ , %	$\Delta E_{ecK}$ , %
0.1	440	227	399	4.647	4.686	6.019	0.84	29.52
0.2	372	186	327	3.357	3.401	4.328	1.31	28.92
0.25	353	174	306	3.04	3.087	3.92	1.55	28.95
0.3	339	165	291	2.808	2.855	3.62	1.67	28.92
0.4	317	152	268	2.485	2.534	3.2	1.97	28.77

На фиг. 2 е представено изменението на консумираната енергия за трите целеви функции при различните подавания.



Фиг. 2. Графика на  $E_{ec}=f(f)$  за трите целеви функции  $E_{ec}$ ,  $Q$ , и  $K$

### ИЗВОДИ

От направеното изследване се установи, че оптималната скорост на рязане, определена при целева функция консумирана енергия е много близо до оптималната скорост за максимална производителност, отколкото до икономичната скорост на рязане.

За пластина SCMT 120408PM от сорт GC4225се установи, че консумираната енергия за струговане на струг с ЦПУ СТ161 и конкретен детайл при оптимален режим на рязане, определен по критерий технологична себестойност е значително по-голяма от тази при режими на рязане, определени по критерий консумирана енергия (приблизително с 28 – 29%).

Консумираната енергия при режими на рязане, определени по критерий технологична производителност не надвишават значително енергията при обработване на детайла при режими на рязане, определени по критерий консумирана енергия. В разглеждания случай това превишава енергията с 1 – 2%.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Авилова, Н. В., Гордиенко, Б. И., Краплин, М. А., Сибирский, В. В. Определение оптимальной скорости резания по критериям производительности и себестойности. СТИН, 2008, №7, 25 – 28.
- [2] Грубый, С. В. Оптимизация режимов одноинструментной лезвийной обработки. СТИН, 2008, № 1, 32 – 35; СТИН, 2008, № 2, 24 – 26.
- [3] Велчев, С. Максимална печалба - критерий за параметрична оптимизация на механичното обработване, I част. Функции на печалбата. //Машиностроене, 1994, N12, с. 301 - 304.
- [4] Велчев, С. Максимална печалба - критерий за параметрична оптимизация на механичното обработване, II част. Математичен модел и алгоритъм за решаване на оптимизационната задача. //Машиностроене, 1995, N4, с. 115 - 117.
- [5] Колев, И. Оптимизация на режимите на рязане при обработване на детайлите на агрегатни машини. Дисертация кандидат. техн. науки, ВИММЕСС, Русе, 1986, 164 с.
- [6] Колев, И. Рязане на материалите. Печ. база на РУ „Ангел Кънчев“- Русе, 2009, 186 с.

[7] Колев, И., Велчев, С., Иванов, К., Гечевски, С. Изследване влиянието на производителността на рязане върху специфичната консумирана енергия при струговане. // Научни трудове, РУ "А.Кънчев", том 51, серия 2, 2012, 153-157.

[8] Velchev, S., Kolev, I., Ivanov, K., Gechevski, S., 2014. Empirical models for specific energy consumption and optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning, Journal of Cleaner Production, Vol. 80, 14 Jun, 2014, p. 139-149.

[9] Brito, T. G., Paiva, A. P., Ferreira, J. R., Gomes, J. H. F., Balestrassi, P. P. 2014. A normal boundary intersection approach to multiresponse robust optimization of the surface roughness in end milling process with combined arrays. Precision Engineering. 38, 628–638.

[10] Fratila, D., Caizar, C. 2011. Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg3. Journal of Cleaner Production. 19, 640-645.

[11] Paiva, A. P., Paiva, E. J., Ferreira, J. R., Balestrassi, P. P., Costa, S. C. 2009. A multivariate mean square error optimization of AISI 52100 hardened steel turning. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 43, 631-643.

**За контакти:**

Доц. д-р Красимир Иванов, Катедра "ТММРМ", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 082-888 451, e-mail: kivanov@uni-ruse.bg

**Докладът е рецензиран.**