



ОПТИМИЗИРАНЕ НА ПРОЦЕСА НА ЕЛАСТИЧНО АБРАЗивно ОТРЯЗВАНЕ НА РОТАЦИОННИ ЗАГОТОВКИ ОТ СТОМАНА 45

OPTIMIZATION OF ELASTIC ABRASIVE CUTTING PROCESS OF ROTATING WORKPIECES MADE OF C45 STEEL

Ирина Александрова*, Миглена Николова-Пенчева
Технически университет - Габрово

Статията е постъпила на 18 януари 2016 г.; след ревизия на 15 февруари 2016 г.; приета за отпечатване на 08 март 2016 г.

Abstract

The paper presents the results of a multiobjective optimization of the elastic abrasive cutting process conditions of rotating workpieces made of C45 steel. A generalized utility function has been chosen as an optimization parameter and has been used as a complex indicator of the technological, economic and dynamic elastic abrasive cutting process parameters. For its determination an adequate theoretical and experimental model has been built, reflecting the complex influence of the elastic abrasive cutting conditions. The solution of the optimization problem has been reduced to the determination of combinations of values of the compression force, the cut-off wheel diameter and the workpiece rotational frequency for which the generalized utility function has a maximum and which guarantee an optimum combination of the following: the cut-off wheel lifetime, the tangential cutting force magnitude, the temperature of the cut piece and the cut-off operation cost and production rate.

Keywords: elastic abrasive cutting; generalized utility function based optimization; compression force; cut-off wheel diameter; workpiece rotational frequency.

ВЪВЕДЕНИЕ

Процесът абразивно отрязване се характеризира с висока производителност, универсалност и икономичност. Едновременно с това обаче той е съпроводен с интензивно износване на отрезните дискове, висока температура (над 1000°C) в зоната на рязане, искрообразуване, високо ниво на шума, опасност от злополуки, изменения в микроструктурата на материала от повърхностния слой и появата на термични дефекти [2-6,9,12,14-17,19]. Това налага необходимостта от оптимизиране на условията за реализация на процеса с цел повишаване на неговата ефективност и приложимост.

Абразивното отрязване на ротационни заготовки се реализира по различни кинематични схеми, при които отрезният диск извършва две движения - главно въртливо и радиално подавателно [6,10]. Радиалното подаване на инструмента се осигурява или по кинематичен път от отрезната машина (твърдо абразивно отрязване), или чрез поддържане на постоянна сила на притискане на диска към заготовката (еластично абразивно отрязване). Заготовката е неподвижна или се върти с постоянна честота на въртене.

Интерес представляват схемите на еластично абразивно отрязване, които осигуряват постоянна площ на моментното сечение на срязвания слой, а следователно и стабилизация на динамичните и топлинните явления, съпровождащи процеса на рязане [6,10,13]. Това е предпоставка за по-ефективно използване на отрезния

диск, както и за повишаване на качеството на обработената повърхнина.

Проведеното комплексно теоретико-експериментално изследване на процеса еластично абразивно отрязване показва сложен характер на влияние на условията на процеса (сила на притискане на отрезния диск към заготовката, честотата на въртене на заготовката и диаметър на отрезния диск) върху неговите параметри - износване и трайност на отрезния диск, време за отрязване, брой отрезни цикли и средна продължителност на един отрезен цикъл, сили и мощност на рязане, средна температура на отделената стружка, температура на отделения от отрязването детайл, технологична себестойност и производителност [2,3,6-8,13]. Това предполага, че оптималните стойности на различните целеви параметри ще се получат при различни комбинации от стойностите на управляемите фактори и налага необходимостта от провеждане на многоцелева оптимизация за определяне на оптималните условия на еластично абразивно отрязване.

Многоцелевата оптимизация предоставя по-голямо количество информация, за да се вземе обосновано решение за избор на оптимални условия на рязане. Известни са различни алгоритми за нейното реализиране, различаващи се по вида и броя на целевите параметри, както и по метода за определяне на оптималното решение [1,18,20-22]. Многоцелевата оптимизация може да се сведе до оптимизация по един основен целеви пара-

*Email: irina@tugab.bg

метър, като останалите изпълняват ролята на областни ограничения. Отсейване и разделяне на параметрите обаче не винаги са възможни и целесъобразни. Освен това се компрометира и основната идея на многоцелевата оптимизация, а именно всички изходни параметри да се разглеждат едновременно. Това много често води до нереални решения, особено когато са налице противоположни цели. Затова се препоръчва използването на методите за многоцелева оптимизация, които комбинират множеството изходни параметри в една обобщена целева функция, например обобщена функция на полезност, обобщена функция на желателност, обобщена функция на загубите и др. Методът на обобщената функция на полезност е един от най-често използваните в промишлеността [18,20-21]. Той се базира на идеята, че качеството на един продукт или процес с множество изходни параметри е напълно неприемливо, ако един от параметрите се намира извън границите на полезност. Този метод определя резултата като комбинация от изходни параметри и избира съвкупност от фактори, при която резултатът е максимален. С него изследователите или инженерите в предприятието лесно могат да определят оптималните условия за реализация на даден процес в групата от решения. Обобщената функция на полезност има много предимства в сравнение с други комбиниращи методи главно поради своята гъвкавост, т.к. позволява едновременно да се максимизират някои от изходните параметри и да се минимизират други, независимо от това дали са функционално зависими или независими.

Целта на статията е да се определят оптималните условия за реализация на процеса еластично абразивно отрязване на ротационни заготовки от стомана С45, като се проведе многоцелева оптимизация по обобщена функция на полезност.

ИЗЛОЖЕНИЕ

За да се определят оптималните условия на процеса еластично абразивно отрязване, е необходимо да се построи модел на обобщената функция на полезност, отразяващ комплексното влияние на управляемите фактори на процеса - диаметър на отрезния диск d_s , сила на притискане F и честота на въртене на заготовката n_w . Видът на обработвания материал, размерите на обработваната заготовка, характеристиката на отрезния диск и честотата на въртене на инструмента n_s , фиксирана за всяка ъглошлифовъчна машина, се избират за контролируеми фактори.

Изборът на управляемите фактори е извършен въз основа на проведеното теоретично изследване на процеса еластично абразивно отрязване [6,13]. Установено е, че честотата на въртене на заготовката n_w , силата на притискане F и диаметърът на отрезния диск d_s оказват голямо, но различно като характер и степен влияние върху дължината на контактната дъга на отрезния диск със заготовката, дълбочината на рязане и дебелината на срязвания слой материал от едно абразивно зърно, а като резултат и върху износването, трайността и режещата способност на отрезния диск, производителността на процеса, силите на рязане, средната температура на стружката и температурата на отрязания детайл:

- С увеличаване на честотата на въртене на заготовката n_w намалява дължината на контактната дъга на отрезния диск със заготовката, но се увеличава дебелината на срязвания слой материал от едно абразивно зърно. В резултат нараства натоварването на абразивните зърна и се създават предпоставки за затруднено побиране на стружките в порите на отрезния диск. Едновременно с това се променя съотношението между радиалната и тангенциалната сила на рязане, което води до влошаване на възможностите за рязане на абразивните зърна и намаляване на реалната площ на срязвания слой материал. Всичко това създава условия за интензифициране на процеса на износване на отрезния диск, влошаване на режещата му способност и до намаляване на производителността на процеса. Увеличаването на n_w и свързаното с това нарастване на дебелината на срязвания слой материал обаче са причина за намаляване на средната температура на стружката и на температурата на отрязания детайл в резултат на подобрено топлоотвеждане и увеличеното време за отрязване.

- Увеличаването на силата на притискане F води до нарастване на дължината на контактната дъга и на дълбочината на рязане. Това е предпоставка от една страна за увеличаване на производителността на процеса, но от друга - за увеличаване на износването на абразивния инструмент.

- С намаляване на диаметъра на отрезния диск намалява броят на абразивните зърна, участващи в снемането на срязвания слой за един оборот на инструмента, а в резултат се увеличава дебелината на снеманата стружка от едно абразивно зърно. Освен това при постоянна честота на въртене на отрезния диск намаляването на диаметъра води до намаляване на скоростта на рязане, което допълнително влошава възможностите за рязане на абразивните зърна. Всичко това създава условия за увеличаване на износването и влошаване на режещата способност на отрезния диск. Увеличаването на дебелината на срязвания слой материал в резултат на намаляването на скоростта на рязане (респективно на намаляването на диаметъра на отрезния диск при постоянна честота на въртене на инструмента) обаче води до намаляване на средната температура на стружката и на отрязания детайл.

Решаването на оптимизационната задача се свежда до определянето на комбинация от стойности на диаметъра на отрезния диск d_s , силата на притискане F и честотата на въртене на заготовката n_w , при която обобщената функция на полезност има максимум.

Въз основа на анализ на сложното влияние на условията на процеса еластично абразивно отрязване върху неговите параметри се приема, че теоретико-експерименталният модел на обобщената функция на полезност Φ_A има вида:

$$\Phi_A = B_0 d_s^{B_1} F^{B_2} n_w^{B_3} \quad (1)$$

където: B_0 е коефициент, отчитащ влиянието на контролируемите фактори на процеса еластично абразивно отрязване; B_1, B_2, B_3 - степенни показатели, които определят големината и характера на влияние на упра-

вляемите фактори $d_s(\tilde{x}_1)$, $F(\tilde{x}_2)$ и $n_w(\tilde{x}_3)$ върху обобщената функция на полезност Φ_A .

За да се построи моделът (1), той се линеаризира чрез логаритмична трансформация, както следва:

$$\ln \Phi_A = \ln B_0 + B_1 \ln d_s + B_2 \ln F + B_3 \ln n_w, \quad (2)$$

Като се вземат предвид взаимодействията между управляемите фактори, уравнение (2) придобива вида:

$$Z = B_0 + \sum_{i=1}^3 B_i X_i + \sum_{\substack{i=1 \\ k < i}}^3 B_{ik} X_i X_k + B_{123} X_1 X_2 X_3 \quad (3)$$

където $Z = \ln \Phi_A$, $B_0' = \ln B_0$, $X_1 = \ln \tilde{x}_1 = \ln d_s$, $X_2 = \ln \tilde{x}_2 = \ln F$, $X_3 = \ln \tilde{x}_3 = \ln n_w$.

За построяването на модела (1) е приложена методиката на планирания експеримент. Реализиран е пълен факторен експеримент с брой на опитите $N = 2^3$. Планирането на експеримента и обработването на експерименталните резултати се извършва в съответствие с методиката, представена в [1]. За проверка на значимостта на регресионните коефициенти, адекватността на модела и качеството на описание на процеса като най-информативна точка е избрано основното ниво, където са проведени три наблюдения ($n = 3$).

Границите на изменение на управляемите фактори - диаметър на отрезния диск d_s , сила на притискане F и честота на въртене на заготовката n_w , избрани въз основа на проведеното комплексно теоретико-експериментално изследване на процеса еластично абразивно отрязване [2,3,6-8,13], са представени в таблица 1.

Таблица 1. Управляеми фактори

Нива	Фактори					
	Кодирани			Натурални		
	x_1	x_2	x_3	$d_s(\tilde{x}_1)$ mm	$F(\tilde{x}_2)$ daN	$n_w(\tilde{x}_3)$ min^{-1}
Горно	+1			180	3	63
Долно	-1			120	1	16
Основно	0			147	1,7	31,7

$x_i = \frac{2(\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_{iu})}{\ln \tilde{x}_{iu} - \ln \tilde{x}_{il}} + 1$; $\tilde{x}_{iu} = 0,5(\ln x_{iu} + \ln x_{il})$;
 \tilde{x}_{iu} , \tilde{x}_{il} , \tilde{x}_{io} - горно, долно и основно ниво на фактора \tilde{x}_i ; $i = 1, 2, 3$

Експерименталните изследвания са проведени при насрещно отрязване с отрезни дискове 41-180x22.2x3.0 A30RBF върху универсален струг, комплектован със специално приспособление за отрязване (фиг. 1) [6]. Приспособлението съдържа ъглошлифовъчна машина 2, която осигурява постоянна честота на въртене на отрезния диск ($n_s = 8500 \text{ min}^{-1}$), и възел за регулиране на големината на силата на притискане F на отрезния диск 3 към заготовката 1. Ъглошлифовъчната машина (модел GA7020) е установена към предния край на рамото 5, закрепено посредством лагерната връзка 4. На противоположния край на рамото е закрепена противотежест 6, чието тегло е по-голямо от теглото на ъглошлифовъчната машина. Големината на силата на при-

тискане се регулира чрез изместване на противотежестта 6 по рамото 5. Ходът на абразивния диск при отрязване се ограничава от упорен винт. Честотата на въртене на заготовката n_w се задава от устройство за безстепенно регулиране. Обработваният материал е стомана С45 и е във вид на цилиндрични пръти с диаметър $d_w = 30 \text{ mm}$.



Фиг. 1. Приспособление за еластично абразивно отрязване: 1 – обработвана заготовка; 2 – ъглошлифовъчна машина; 3 – отрезен диск; 4 – ос за лагеруване; 5 – рамо; 6 – противотежест; 7 – аспирационна уредба

Планът на експеримента е представен в таблица 2. Обобщената функция на полезност Φ_A при различните комбинации на нивата на управляемите фактори $\tilde{x}_1 = d_s$, mm, $\tilde{x}_2 = F$, daN и $\tilde{x}_3 = n_w$, min^{-1} е определена като средноаритметична функция на полезност без тегловни коефициенти в съответствие със зависимостта [1,21]:

$$\Phi_A(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \eta_j(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3) \quad (4)$$

където: $j = 1 \div m$ - код, съответстващ на поредния номер на изследвания параметър на процеса еластично абразивно отрязване; $m = 9$ - брой изследвани параметри;

$\eta_j(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3)$ - стойности на частните функции на полезност, получени чрез трансформиране на параметрите на процеса еластично абразивно отрязване в безразмерни полезности при различни комбинации на нивата на управляемите фактори:

$$\eta_j(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3) = \frac{K_j(Y_j(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3) - Y_{jd})}{Y_{j\max} - Y_{j\min}}; \quad (5)$$

$Y_j(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3)$ - параметри на процеса еластично абразивно отрязване: $Y_1 = \delta$ - износване на отрезния диск, mm; $Y_2 = \tau$ - време за отрязване, s; $Y_3 = i$ - брой отрезни (работни цикли); $Y_4 = \tau_m$ - средно време за отрязване, s; $Y_5 = F_c$ - главна (тангенциална) сила на рязане, daN; $Y_6 = \theta_{ch}$ - средна температура на отделената стружка, °C; $Y_7 = \theta_d$ - температура на отрязания

детайл, °C; $Y_8 = Q_w$ – производителност на операцията отрязване, mm³/s; $Y_9 = C_s$ – технологична себестойност на операцията отрязване, лв.;

Y_{jd} - най-безполезен резултат на параметъра Y_j , получен в границите на допустимото факторно пространство;

$Y_{j\max}$ и $Y_{j\min}$ – граници на полезност на параметъра Y_j , съответстващи на максималната и минималната му стойност, получени при изследванията;

K_j - коефициенти на полезност: $K_j = +1$, когато повишаването на Y_j е полезно; $K_j = -1$, когато намаляването на Y_j е полезно.

Таблица 2. План на експеримента

№	Кодирани фактори			Натурални фактори			Φ_A
	x_1	x_2	x_3	d_s (\tilde{x}_1) mm	F (\tilde{x}_2) daN	n_w (\tilde{x}_3) min ⁻¹	
1	+1	+1	+1	180	3	63	0,4777
2	-1	+1	+1	120	3	63	0,5019
3	+1	-1	+1	180	1	63	0,4403
4	-1	-1	+1	120	1	63	0,4517
5	+1	+1	-1	180	3	16	0,5523
6	-1	+1	-1	120	3	16	0,5505
7	+1	-1	-1	180	1	16	0,5353
8	-1	-1	-1	120	1	16	0,5586
9	0	0	0	147	1,7	31,7	0,5020
10	0	0	0	147	1,7	31,7	0,5050
11	0	0	0	147	1,7	31,7	0,5100

Износването на отрезния диск δ , времето за отрязване τ , броят отрезни цикли i , средната продължителност на един отрезен цикъл τ_m , главната сила на рязане F_c , средната температура на отделената стружка θ_{ch} , температурата на отделения от отрязването детайл θ_d , производителността Q_w и технологичната себестойност C_s на операцията отрязване се определят чрез регресионните модели и математическите зависимости, създадени в резултат на проведеното комплексно теоретико-експериментално изследване и моделиране на параметрите на процеса еластично абразивно отрязване [2,3,6-8,13]:

$$\delta = 1,3191 - 0,0078d_s + 0,3793F + 0,0092n_w + 0,0039Fn_w; \quad (6)$$

$$\tau = 13,8064 - 0,0178d_s - F + 0,0142n_w; \quad (7)$$

$$i = \frac{\ln \frac{d_{s\min} q - p}{d_{s\max} q - p}}{\ln(q+1)}; \quad (8)$$

$$\tau_m = r - \frac{u \left(pqi + \left((q+1)^i - 1 \right) (qd_s - p) \right)}{iq^2}; \quad (9)$$

$$F_c = \frac{0,353d_w^{1,68} g^{1,32} b_s \left[(\tau n_w)^{0,5} - (\tau n_w - 60)^{0,5} \right]^{0,16}}{d_s^{0,52} t_g^{2,32} \tau^{0,76} n_w^{0,08} n_s^{0,68} (d_s + d_w)^{0,16}}; \quad (10)$$

$$\theta_{ch} = 850 + 1,83d_s - 3,91n_w; \quad (11)$$

$$\theta_d = 143,597 + 0,556d_s - 0,405n_w; \quad (12)$$

$$Q_w = \frac{\pi d_w^2 b_s}{4\tau_m} = \frac{2120,5}{\tau_m}; \quad (13)$$

$$C_s = \frac{E}{60} \tau_m + \frac{S_s}{i} = 0,0025 \tau_m + \frac{S_s}{i}, \quad (14)$$

където: p, q - коефициенти в обобщения теоретико-експериментален модел на износването $\delta = p - qd_{si-1}$ (таблица 3); r, u - коефициенти в обобщения теоретико-експериментален модел на времето за отрязване $\tau = r - ud_{si-1}$ (таблица 3);

b_s - широчина на отрезния диск, mm;

$g = (10 \div 12)\%$ - относителен дял на абразивните зърна, разположени на стъпка K_g , реално участващи в процеса на рязане;

$t_g \approx 180 \frac{d_g}{K_g}$ - стъпка между абразивните зърна

(определя се въз основа на анализ на структурата на отрезния диск, като се отчитат размерът на абразивните зърна d_g и процентното съдържание K_g на абразивни зърна в обема на отрезния диск);

E - разходи, свързани с работната заплата и експлоатацията на оборудването, лв/min;

S_s - цена на нов отрезен диск, лв.

Регресионните модели (6), (7), (11) и (12), отразяващи комплексното влияние на управляемите фактори (d_s, F и n_w) върху износването на отрезния диск δ , времето за отрязване τ , температурата на стружка θ_{ch} и температурата на отрязания детайл θ_d , са построени въз основа на проведени пълни факторни експерименти от вида $N = 2^3$, като във всяка точка на плана са реализирани по три наблюдения. Горните и долните нива на факторите са аналогични на тези, представени в таблица 1 [2,3,6-8]. Зависимостите (8), (9), (13) и (14) за броя отрезни цикли i , средното време за отрязване τ_m , производителността Q_w и технологичната себестойност C_s са получени чрез прилагане на представената в [6-8] методика за определяне на икономическата ефективност на процеса еластично абразивно отрязване и са валидни в изследваните области на изменение на управляемите фактори d_s, F и n_w . Теоретико-експерименталният модел (10) за главната сила на рязане F_c е създаден въз основа на проведеното теоретично изследване на процеса еластично абразивно отрязване [6,13], като е отчетена зависимостта между силата F_c и броя на едновременно участващите в рязане абразивни зърна, площта на срязвания слой материал от едно абразивно зърно и специфичната сила на рязане.

Таблица 3. Коефициенти p, q, r, u

p	q	r	u
$1,3191 + 0,3793F + 0,0092Fn_w - 0,0039Fn_w$	0,0078	$13,8064 - F + 0,0142n_w$	0,0178

Границите на полезност и стойностите на най-без-полезните резултати на изследваните параметри Y_j на процеса еластично абразивно отрязване са представени в таблица 4. Определените стойности на обобщената функция на полезност при различни комбинации на нивата на управляемите фактори $\tilde{x}_1 = d_s, \text{ mm}, \tilde{x}_2 = F, \text{ daN}$ и $\tilde{x}_3 = n_w, \text{ min}^{-1}$, в съответствие с реализирания план на експеримента, са представени в таблица 2.

Таблица 4. Граници на полезност и най-безполезни резултати на изследваните параметри Y_j

Параметър Y_j	Граници на полезност		Най-безполезен резултат Y_{jd}
	$Y_{j \min}$	$Y_{j \max}$	
$Y_1 = \delta, \text{ mm}$	0,504	2,8377	$Y_{1d} = Y_{1 \max}$
$Y_2 = \tau, \text{ s}$	7,8296	11,565	$Y_{2d} = Y_{2 \max}$
$Y_3 = i, \text{ бр.}$	23	79	$Y_{3d} = Y_{3 \min}$
$Y_4 = \tau_m, \text{ s}$	8,3	10,92	$Y_{4d} = Y_{4 \max}$
$Y_5 = F_c, \text{ daN}$	0,94	1,73	$Y_{5d} = Y_{5 \max}$
$Y_6 = \theta_{ch}, \text{ }^\circ\text{C}$	830	1100	$Y_{6d} = Y_{6 \max}$
$Y_7 = \theta_d, \text{ }^\circ\text{C}$	177,6	239,9	$Y_{7d} = Y_{7 \max}$
$Y_8 = Q_w, \text{ mm}^3/\text{s}$	194,18	255,48	$Y_{8d} = Y_{8 \min}$
$Y_9 = C_s, \text{ лв.}$	0,0499	0,1094	$Y_{9d} = Y_{9 \max}$

Моделът (1) се синтезира въз основа на определените стойности на обобщената функция на полезност Φ_A (таблица 2) в следната последователност [1]: определяне на регресионните коефициенти на уравнение (3) в кодиран вид; проверка на значимостта на регресионните коефициенти по критерия на Стюдънт; проверка за адекватност на модела по критерия на Фишер; проверка за качество на описание на процеса; преминаване от кодиран към натурален вид на управляемите фактори (таблица 1) и следващо антилогаритмуване на регресионното уравнение (3). Получава се следният теоретико-експериментален модел за обобщената функция на полезност:

$$\Phi_A = 1,1736 d_s^{-0,0705} \cdot F^{-0,1492+0,0565/n_w} \cdot n_w^{-0,1488} \quad (15)$$

Построеният модел е адекватен, което се доказва чрез сравняване на емпиричната \hat{F} и теоретичната F_{α,k_1,k_2} стойност на критерия на Фишер: $\hat{F} = 4,3338 < F_{\alpha,k_1,k_2} = 19,164$ ($\alpha = 0,05$ - ниво на значимост; $k_1 = n - 1 = 2$ и $k_2 = N - k' = 8 - 5 = 3$ - степени на свобода; $k' = 5$ - брой значими коефициенти в модела). Моделът описва зависимостта между обобщената

функция на полезност Φ_A и управляемите фактори на процеса еластично абразивно отрязване (диаметър на отрезния диск d_s , сила на притискане F и честота на въртене на заготовката n_w) с висока точност, като стойността на множествения коефициент на корелация е $\hat{R} = 0,9987$.

Графичната интерпретация на създадения модел (15) е представена на *фиг. 2-фиг. 4*. За визуализиране на характеристикните повърхнини и техните двумерни сечения е използвана програмната система MATLAB [11].

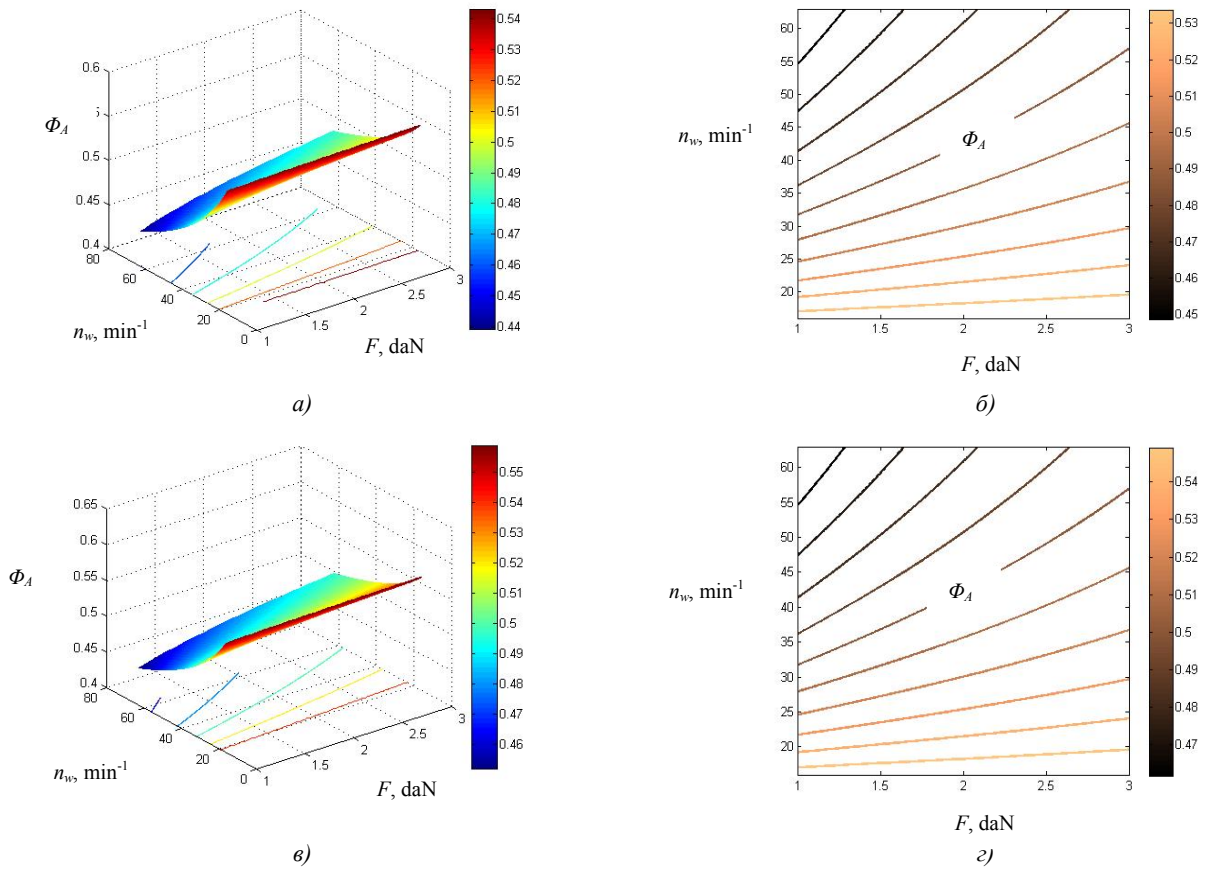
Анализът на създадения теоретико-експериментален модел за обобщената функция на полезност (15) и на построените въз основа на него графични зависимости (*фиг. 2-фиг. 4*) позволява да се определи комбинация от стойности на управляемите фактори - диаметър на отрезния диск d_s , сила на притискане F и честота на въртене на заготовката n_w , при които Φ_A има максимум. Чрез прилагане на програмната система MATLAB [11] са определени оптималните условия на процеса еластично абразивно отрязване, при които се получава максимална стойност на обобщената функция на полезност ($\Phi_A = 0,5543$): диаметър на отрезния диск $d_s = 120 \text{ mm}$; сила на притискане на абразивния инструмент към заготовката $F = 1 \text{ daN}$; честота на въртене на заготовката $n_w = 16 \text{ min}^{-1}$. При така определените оптимални условия параметрите на процеса еластично абразивно отрязване са, както следва: износване на отрезния диск $\delta = 0,972 \text{ mm}$; време за отрязване на заготовката $\tau = 10,89 \text{ s}$; брой отрезни цикли $i = 79$ бр.; средно време за отрязване $\tau_m = 9,86 \text{ s}$; главна сила на рязане $F_c = 1,46 \text{ daN}$; средна температура на отделената стружка $\theta_{ch} = 1010 \text{ }^\circ\text{C}$; температура на отрязания детайл $\theta_d = 200,7 \text{ }^\circ\text{C}$; производителност на операцията отрязване $Q_w = 215,06 \text{ mm}^3/\text{s}$; технологична себестойност на операцията отрязване $C_s = 0,0499 \text{ лв.}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

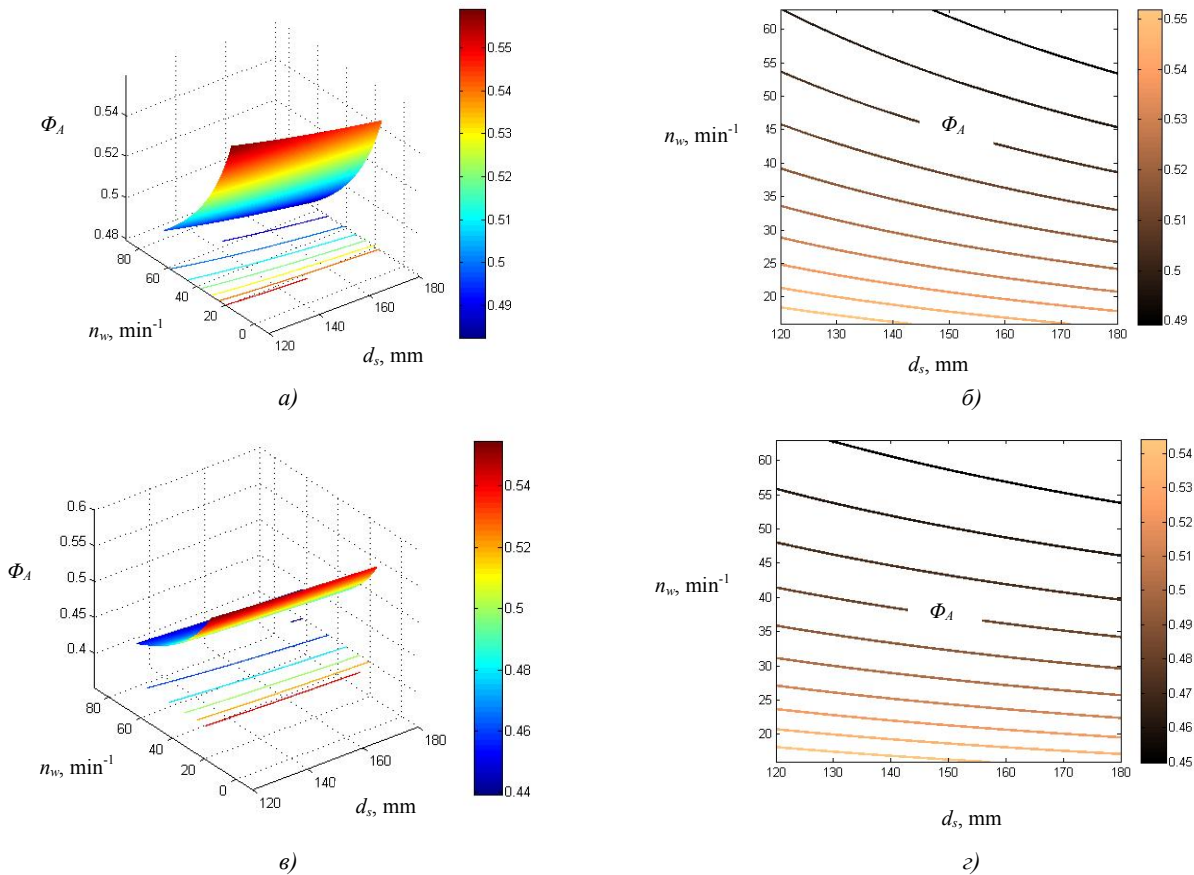
(1) В статията е предложена методика за многоцелева компромисна оптимизация на условията на процеса еластично абразивно отрязване. В качеството на параметър за оптимизация е приета обобщената функция на полезност. Тя се явява комплексен показател на технологичните, динамичните и икономическите параметри на процеса еластично абразивно отрязване.

(2) Създадената методика е приложена за определяне на оптималните условия на еластично абразивно отрязване на въртящи се ротационни заготовки от стомана С45 с диаметър $d_w = 30 \text{ mm}$ с отрезни дискове 41-180x22.2x3.0 А30RBF. Постигнати са следните резултати:

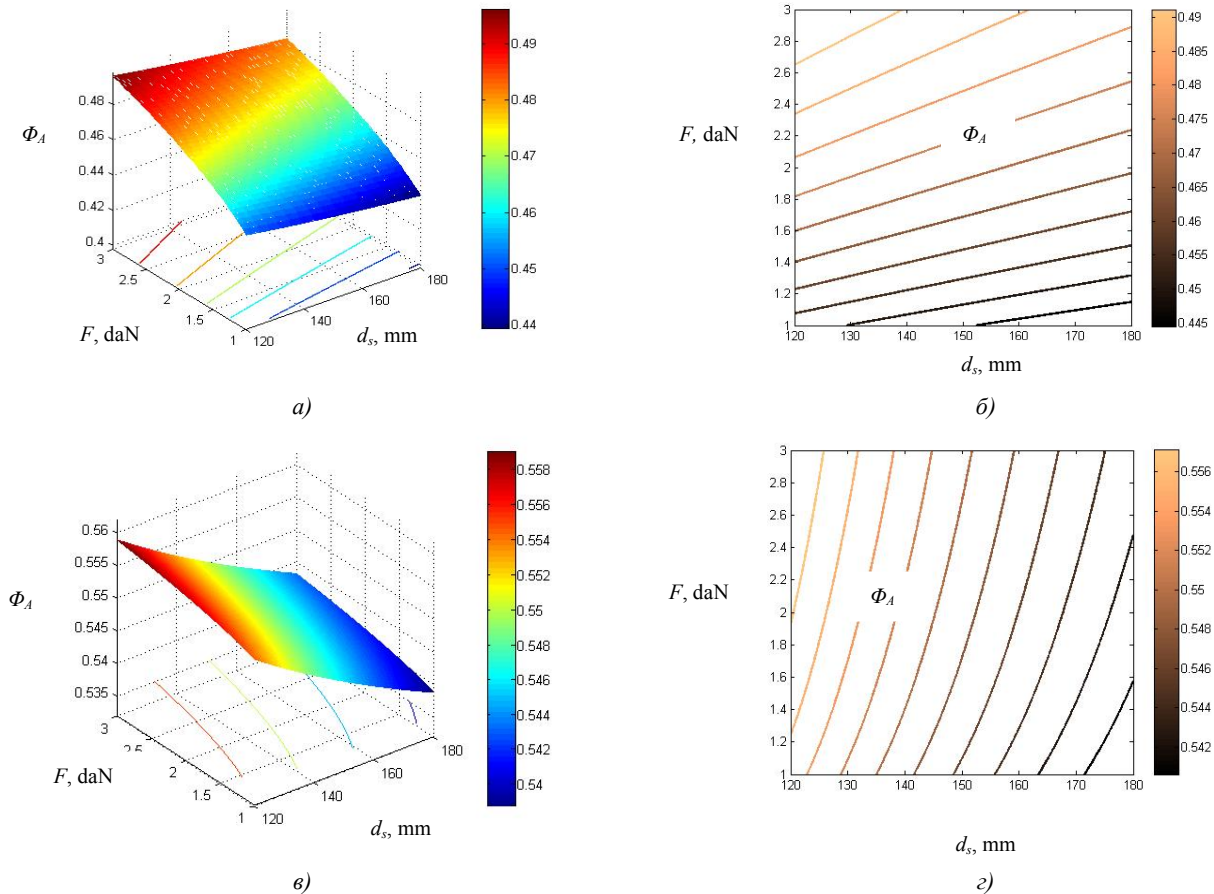
- Построен е адекватен теоретико-експериментален модел за обобщената функция на полезност, отразяващ комплексното влияние на управляемите фактори на процеса еластично абразивно отрязване (диаметър на отрезния диск d_s , сила на притискане F и честота на въртене на заготовката n_w).



Фиг. 2. Влияние на силата на притискане F и на честота на въртене на заготовката n_w върху обобщената функция на полезност Φ_A при диаметър на отрезния диск $d_s = 180\text{ mm}$ (а,б) и $d_s = 120\text{ mm}$ (в,з)



Фиг. 3. Влияние на честота на въртене на заготовката n_w и на диаметра на отрезния диск върху обобщената функция на полезност Φ_A при сила на притискане $F = 3\text{ daN}$ (а,б) и $F = 1\text{ daN}$ (в,з)



Фиг. 4. Влияние на силата на притискане F и на диаметъра на отрезния диск d_s върху обобщената функция на полезност Φ_A при честота на въртене на заготовката $n_w = 63 \text{ min}^{-1}$ (а,б) и $n_w = 16 \text{ min}^{-1}$ (в,г)

- Определени са оптималните условия на процеса еластично абразивно отрязване, както следва: диаметър на отрезния диск $d_s = 120 \text{ mm}$; сила на притискане на абразивния инструмент към заготовката $F = 1 \text{ daN}$; честота на въртене на заготовката $n_w = 16 \text{ min}^{-1}$. Те гарантират максимална трайност на отрезния диск, минимална температура на отрязания детайл, минимална сила на рязане, максимална производителност и минимална себестойност на операцията отрязване.

(3) Получените резултати позволяват да се управлява и оптимизира процеса еластично абразивно отрязване чрез избор на подходящи условия за неговата реализация. Като се отчете фактът, че абразивното отрязване се характеризира с висока производителност, универсалност и икономичност, разработената методика и теоретико-експериментални резултати, представени в тази статия, могат да се използват във всички машиностроителни фирми.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Александрова И. Основи на инженерните изследвания. Габрово: Университетско издателство „Васил Априлов“, 2003.
- [2] Александрова И, Ганев Г, Христов Х. Топлинни явления при еластично абразивно отрязване на въртящи се заготовки – част първа. М&Е 2014; 12: 38-42.
- [3] Александрова И, Ганев Г, Христов Х, Александров А. Топлинни явления при еластично абразивно отрязване на въртящи се заготовки – част втора. М&Е 2015; 1: 42-45.
- [4] Бобров В. Основы теории резания металлов. Москва: Машиностроение, 1975.
- [5] Вологин К. Выбор рациональных условий разрезания заготовок из труднообрабатываемых материалов абразивными кругами. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Москва. 2002.
- [6] Ганев Г. Еластично абразивно отрязване на ротационни заготовки в машиностроенето. Дисертация за придобиване на образователната и научна степен „доктор“, Габрово, 2013.
- [7] Ганев Г, Александрова И, Христов Х. Изследване и моделиране на времето за еластично абразивно отрязване на ротационни заготовки. М&Е 2012; 12: 26-31.
- [8] Ганев Г, Александрова И, Христов Х. Износване и трайност на абразивните инструменти при еластично абразивно отрязване. М&Е 2012; 10-11: 20-25.
- [9] Левченко Е. Теоретическое исследование особенностей работы боковых поверхностей отрезного круга при абразивной резке труб. Вісник СевНТУ 2010; 107: 114-117.
- [10] Ненков Н, Александрова И, Ганев Г. Методи за абразивно отрязване на заготовки. Машиностроене 1999; 5-6: 38-40.
- [11] Тончев Й, Витлиев В. Оптимизация с MATLAB. Прагматичен подход. Русе: Русенски университет „Ангел Кънчев“, 2013.
- [12] Ящерицын П. Основы резания материалов. Минск: БГАТУ, 2008.

- [13] Aleksandrova I, Hristov H, Ganev G. Dynamic and Technological Characteristics of the Process Elastic Abrasive Cutting of Rotating Workpieces. *Journal of the Technical University Sofia, Branch Plovdiv "Fundamental Sciences and Applications"* 2011; 16: 123-128.
- [14] Kaczmarek J. The effect of abrasive cutting on the temperature of grinding wheel and its relative efficiency. *Archives of civil and mechanical engineering* 2008; VIII(2): 81-91.
- [15] Kaczmarek J. Using a thermovision method for measuring temperatures of a workpiece during abrasive cut-off operation. *Advances in manufacturing science and technology* 2011; 35(4): 85-95.
- [16] Malkin S, Anderson R. Thermal Aspects of Grinding: Part 1. Energy Partition. *Trans. Journal of Manufacturing Science and Engineering* 1974; 96(4): 1177-1183.
- [17] Malkin S. Thermal Aspects of Grinding. Part 2. Surface Temperatures and Workpiece Burn. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 1974; 96(4): 1184-1191.
- [18] Mukherjee I, Ray P. A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers & Industrial Engineering* 2006; 50(1-2): 15-34.
- [19] Nagasaka K, Yoshida T, Kita Y, Hashimoto F. Optimum combination of operating parameters in abrasive cut-off. *Machine Tool & Manufacture* 1987; 27(2): 167-179.
- [20] Salmasnia A, Kazemzadeh R, Niaki S. An approach to optimize correlated multiple responses using principal component analysis and desirability function. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2012; 62(5): 835-846.
- [21] Stoyanov S. *Optimization of Manufacturing Processes*. Sofia: Tehnika, 1993.
- [22] Yusup N, Zain A, Hashim S. Evolutionary techniques in optimizing machining parameters: Review and recent applications (2007-2011). *Expert Systems with Applications* 2012; 39(10): 9909-9927.