



**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТРАЙНОСТТА НА МЕТАЛОРЕЖЕЩИ ИНСТРУМЕНТИ,  
СЪЗДАДЕНИ НА БАЗА НА МЕТОДА ‘METAL INJECTION MOULDING’**

**RESEARCH ON THE DURABILITY OF METAL CUTTING TOOLS MADE BY METAL  
INJECTION MOULDING METHOD**

**Калин Владимиров Анастасов**  
ТУ - Габрово

**Ирина Стефанова Александрова\***  
ТУ- Габрово

Статията е постъпила на 10 юни 2014г.; приета за отпечатване на 15 юли 2014г.

**Abstract**

*This article presents a research on the working capacity of metal cutting tools – end – mills, based on the parameter ‘durability’. The tools were made from blanks of tool material CATAMOLD M2 obtained by Metal Injection Moulding method. During the study, the over – all impact of the operating mode elements on the tools durability was determined by conducting of a planned experiment. The exponents in the expanded Taylor formula were determined for this tool material.*

**Keywords:** Metal cutting, Tools, Durability, Metal Injection Molding, Planned experiment.

**ВЪВЕДЕНИЕ**

Процесът на работа на режещите инструменти протича в особено сложни условия, свързани с изменението на силите на рязане, триенето, топлинните явления. Това предизвиква в инструмента силови и топлинни натоварвания, които той трябва да понесе, без да загуби режещите си качества в процеса на рязане. Тази устойчивост на инструментите се залага в процеса на тяхното проектиране, като се избират подходящи инструментални материали в зависимост от типа на инструмента и обработвания материал, технологията за изработване на инструментите, термичната и химико-термична обработка [4].

Трайността на металорежещия инструмент е времето, за което се достига избраният критерий на износване и инструментът запазва своите режещите качества [4]. Тя е функционално зависима от елементите на режима на рязане, геометричните параметри, материала и технологията за изработване на инструмента, стабилността на системата машина-инструмент-заготовка и др.

Един от основните материали за изработване на металорежещи инструменти са бързорезните инструментални стомани, характеризиращи се с добри режещи качества и сравнително високата трайност в сравнение с въглеродните инструментални стомани [4]. Заготовките за инструментите от тези стомани могат да бъдат получени чрез различни методи – пластична деформация, класическа прахова металургия, инжекционно формование (Metal Injection Moulding – MIM), като се отлича-

ват по своите физико-механични параметри, влияещи пряко върху трайността на получените инструменти [4].

Цел на статията е изследване и моделиране на трайността на металорежещи инструменти, изработени от заготовки от инструментална бързорезна стомана, марка Catamold M2 (DIN SC 6-5-1.3342), създадени на база на метода инжекционно формование на метали (Metal Injection Moulding – MIM).

**ИЗЛОЖЕНИЕ**

За да се изследва трайността на металорежещи инструменти от инструментална бързорезна стомана марка Catamold M2 (DIN SC 6-5-1.3342), създадени на база на метода MIM, е изработена серия палцеви фрези. Инструменталните заготовки са със следните физико-механични характеристики след синтероване и термообработка закаляване с трикратно отвяждане [2,3]:

- плътност –  $8,1 \text{ g/cm}^3$  ;
- твърдост – 66 HRC.

Инструментите са със следните геометрични параметри:

- ъгъл на наклона на зъбите –  $\omega = 30^0$  ;
- брой на режещите зъби –  $z = 2$  ;
- външен диаметър на режещата част –  $D = 5,99 \text{ mm}$  ;
- главен преден ъгъл –  $\gamma_0 = 10^0$  ;
- главен заден ъгъл –  $\alpha_0 = 15^0$  .

За провеждане на изследването е използвано следното технологично и измервателно оборудване:

- вертикален обработващ център, марка MAZAK NEXUS 510C;

\* Tel: + 359 66/ 827 288; e-mail: irina@tugab.bg

- държач цангов тип с диаметър на отвора 6 mm, за установяване и закрепване на инструментите към вретеното на машината;
- шублер индикаторен марка "Mitutoyo" с разделителна способност на скалата 0,01 mm, за отчитане на размерното диаметрално износване на инструментите;
- стойка, снабдена с индикаторен часовник, марка "Mitutoyo" с разделителна способност на скалата 0,001 mm, за измерване на действителната дълбочина на фрезване;
- монокулярен микроскоп, модел МПБ-2 с увеличителна способност 24 пъти, снабден с мерителна линия с разделителна способност 0,01 mm, за измерване на износването по задната повърхнина.

Експерименталните изследвания са проведени при обработване на заготовка от конструкционна стомана, марка С45 с измерена изходна твърдост 202НВ. В качеството на мажещо-охлаждаща течност е използван 5% емулсионен разтвор "Mobilcut 240", производство на фирма "Mobil", с дебит 8 – 10 l/min.

Трайността на инструментите се определя като време за работа до достигане на критерий на износване по задната повърхнина  $V_{BC} = 0,25$  mm.

Трайността на изследваните инструменти  $T$  е в пряка функционална зависимост от елементите на режима на рязане – скорост  $V_C$ , подаване на зъб  $f_z$  и дълбочина на нарязане  $a$ . Тази зависимост се изразява чрез разширената формула на Тейлор, общовалидна за всички процеси на рязане на металите [4]:

$$T = \frac{C_T}{V_C^{n_T} \cdot f_z^{y_T} \cdot a^{x_T}}, \quad (1)$$

където  $C_T$  – константа, отразяваща влиянието на характеристиките на обработвания материал, а  $n_T, y_T, x_T$  са степенни показатели, отразяващи влиянието на елементите на режима на рязане.

За да се изследва и моделира влиянието на елементите на режима на рязане върху трайността  $T$  е проведен пълен факторен експеримент от вида  $N=2^3$  ( $N$  – брой на опитите), като във всяка точка на факторното пространство са проведени по  $n=2$  наблюдения. Нивата на управляемите фактори са избрани въз основа на предварителни еднофакторни експерименти и са представени в таблица 1.

Таблица 1 Кодирани и натурални стойности на факторите

Независими променливи (фактори)	Връзка между кодирани и натурални стойности на факторите	Нива	
		+1	-1
Скорост на рязане $V_C$ , m/min	$x_1 = 2 \frac{\ln V_C - \ln 35}{\ln 45 - \ln 25} + 1$	45	25
Подаване на зъб $f_z$ , mm/z	$x_2 = 2 \frac{\ln f_z - \ln 0,03}{\ln 45 - \ln 0,02} + 1$	0,04	0,02
Осова дълбочина на рязане $a$ , mm	$x_3 = 2 \frac{\ln a - \ln 1,25}{\ln 2 - \ln 0,5} + 1$	2	0,5

Планът на експеримента, разширената матрица на плана и стойностите на целевия параметър  $\bar{y}_u$  ( $\bar{y}_u = (y_{u1} + y_{u2}) / 2$ ;  $y_{u1} = \ln T_{u1}$ ;  $y_{u2} = \ln T_{u2}$ ;  $T_{u1}, T_{u2}$  – трайност на палцовата фреза,  $u = 1 - 8$  – брой опити) са представени в таблица 2.

Таблица 2 План на експеримента с матрица на плана и статистическа обработка на експерименталните резултати

№	Матрица на плана								План на експеримента			Трайност, s		$\hat{y}_u$	$\bar{y}_u$	$S_{y_u}^2$
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_{1 \cdot x_2}$	$x_{1 \cdot x_3}$	$x_{2 \cdot x_3}$	$x_{1 \cdot x_2 \cdot x_3}$	$V_C$ m/min	$f_z$ mm/z	$a$ mm	$T_{u1}$	$T_{u2}$			
1	+	-	-	-	+	+	+	+	25	0,02	0,5	2400	2280	7,825	7,757	1,3.10 <sup>3</sup>
2	+	+	-	-	-	-	+	-	45	0,02	0,5	360	330	5,837	5,843	3,8.10 <sup>3</sup>
3	+	-	+	-	-	+	-	-	25	0,04	0,5	1200	1080	6,970	7,037	5,6.10 <sup>3</sup>
4	+	+	+	-	+	-	-	-	45	0,04	0,5	150	140	4,982	4,971	2,4.10 <sup>3</sup>
5	+	-	-	+	+	-	-	-	25	0,02	2	840	880	6,769	6,757	1,1.10 <sup>3</sup>
6	+	+	-	+	-	+	-	-	45	0,02	2	170	210	5,167	5,242	0,022
7	+	-	+	+	-	-	+	-	25	0,04	2	360	390	5,914	5,926	3,2.10 <sup>3</sup>
8	+	+	+	+	+	+	+	+	45	0,04	2	80	60	4,312	4,238	0,041

Обработката на експерименталните резултати е извършена в съответствие с методиката, изложена в [1], в следната последователност:

- Определяне на дисперсията на възпроизводимостта  $S_{y_u}^2$ , характеризираща грешката на съответния опит:

$$S_{y_u}^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{r=1}^n (y_{ur} - \bar{y}_u)^2 \quad (2)$$

Стойностите на  $S_{y_u}^2$  са представени в таблица 2.

- Проверка за еднородност на дисперсиите по критерия на Кохрен.

Дисперсиите са еднородни, което се доказва чрез сравняване на емпиричната  $\hat{G}$  и табличната  $G_{\alpha, k_1, k_2}$  стойности на критерия:

$$\hat{G} = \frac{S_{y_u \max}^2}{\sum_{u=1}^{N=8} S_{y_u}^2} = 0,5107; \quad (3)$$

$G_{\alpha, k_1, k_2} = 0,6798$  ( $\alpha = 0,05$  - ниво на значимост;  $k_1 = n - 1 = 1$ ,  $k_2 = N = 8$  - брой степени на свобода);

$$\hat{G} \leq G_{\alpha, k_1, k_2} \quad (4)$$

- Определяне на грешката на експеримента:

$$s_\varepsilon^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N=8} S_{y_u}^2 = 0,081 \quad (5)$$

- Определяне коефициентите на модела в кодиран вид – таблица 3.

- Проверка за значимост на коефициентите на регресия – извършва се по  $t$ -критерия на Стюдънт в съответствие със зависимостта:  $|b| \geq \Delta b = 0,058$  ( $\Delta b$  - доверителен интервал на регресионните коефициенти).

- Проверка за адекватност на модела по критерия на Фишер.

Емпиричната стойност на критерия на Фишер е:

$$\hat{F} = \frac{S^2}{S_\varepsilon^2} \quad (6)$$

където:  $S^2 = \frac{n \cdot \sum_{u=1}^{N=8} (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{N - k'} = 0,0136$  - дисперсия на адекватност;  $k' = 5$  - брой на значимите коефициенти;

$\hat{y}_u$  - стойност на целевия параметър, определена по модела – таблица 2.

Таблица 3 Числени стойности на коефициентите на модела в кодиран вид

$b_0$	5,972	значим
$b_1$	-0,8974	значим
$b_2$	-0,4276	значим
$b_3$	-0,4314	значим
$b_{12}$	0	незначим
$b_{13}$	0,0966	значим
$b_{23}$	0	незначим
$b_{123}$	0	незначим

След сравняване на емпиричната с табличната стойност на критерия се получава  $\hat{F} = 1,3458 \leq F_{\alpha, k_1, k_2} = 4,066$  ( $\alpha = 0,05$ ,  $k_1 = N(n - 1) = 8$ ,  $k_2 = N - k' = 3$ ), което показва, че моделът е адекватен.

След преминаване от кодиран към натурален вид на факторите (таблица 1) се получава разширената формула на Тейлор за трайността на палцовите фрези от инструментален материал CATAMOLD M2:

$$T = \frac{e^{12,2999}}{V_C^{3,0536} \cdot f_z^{1,2337} \cdot a^{2,288-0,4744 \cdot \ln V_C}} \quad (7)$$

Графичната интерпретация на получения теоретико-експериментален модел (7) е показана на фиг. 1 - фиг. 6.

На база на изведената зависимост (7) могат да бъдат определени:

1. Показателят на относителна трайност  $m$ :

$$m = \frac{l}{n_T} = \frac{l}{3,0536 - 0,4744 \cdot \ln a} \quad (8)$$

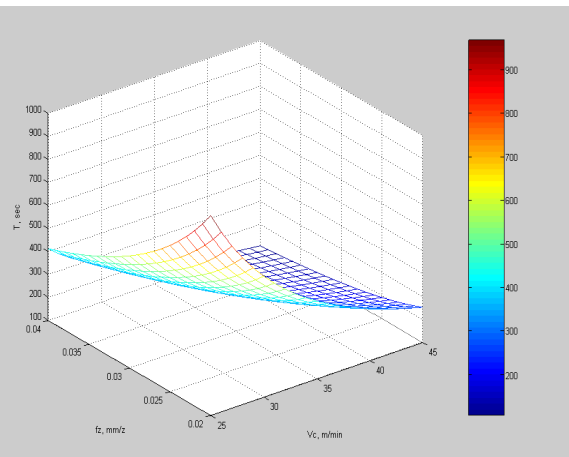
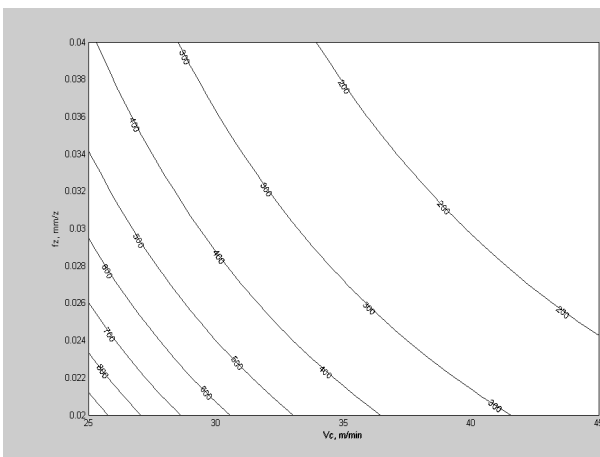
2. Допустимата скорост на рязане за този инструментален материал:

$$V_C = \frac{C_V}{T^m \cdot f_z^{y_V} \cdot a^{x_V}} \quad (9)$$

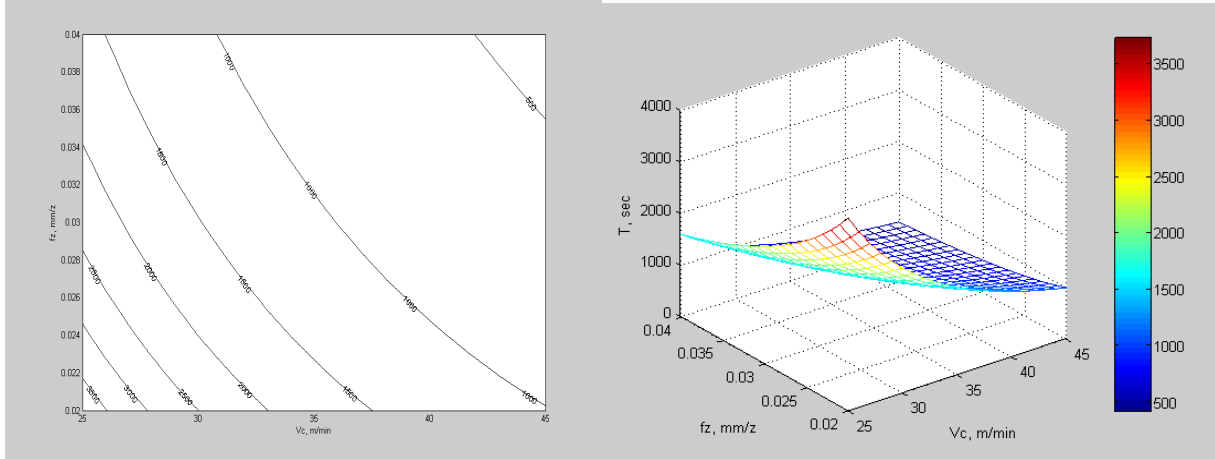
където:  $C_V = C_T^m = e^{\frac{12,2999}{3,0536 - 0,4744 \ln a}}$ ;

$$y_V = \frac{y_T}{n_T} = \frac{1,2337}{3,0536 - 0,4744 \ln a};$$

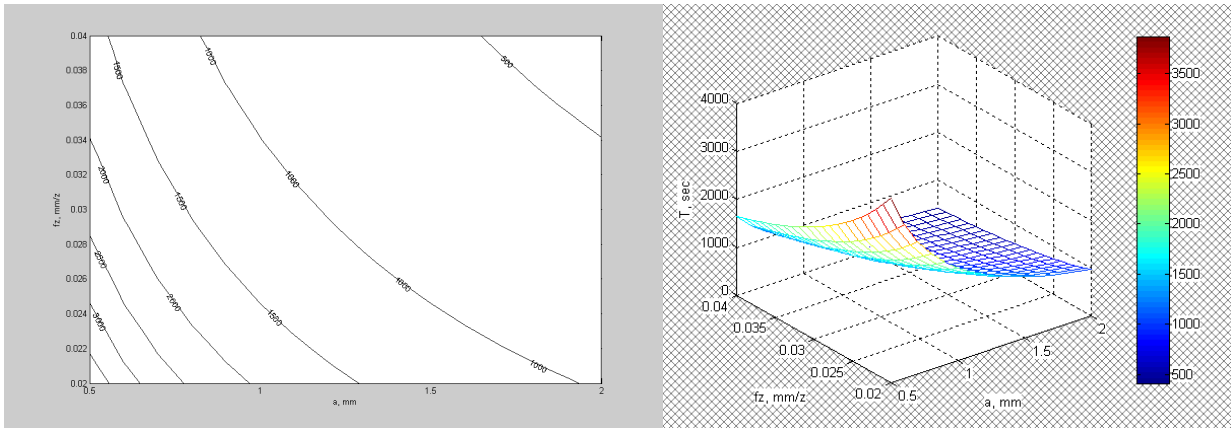
$$x_V = \frac{x_T}{n_T} = \frac{2,288}{3,0536 - 0,4744 \ln a}.$$



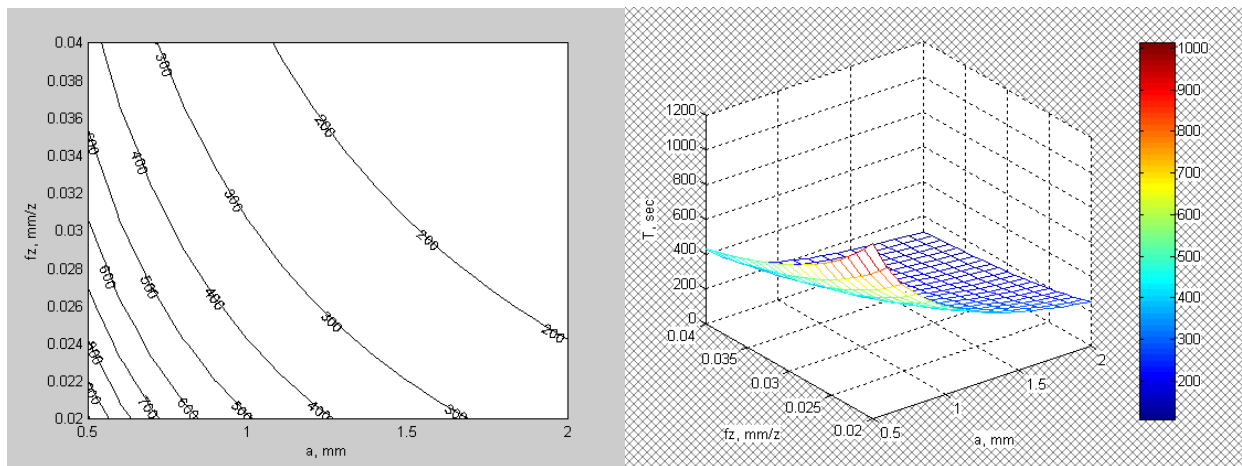
Фиг. 1. Влияние на скоростта на рязане  $V_C$  и подаването  $f_z$  върху трайността  $T$  при дълбочина на рязане  $a = 2 \text{ mm}$



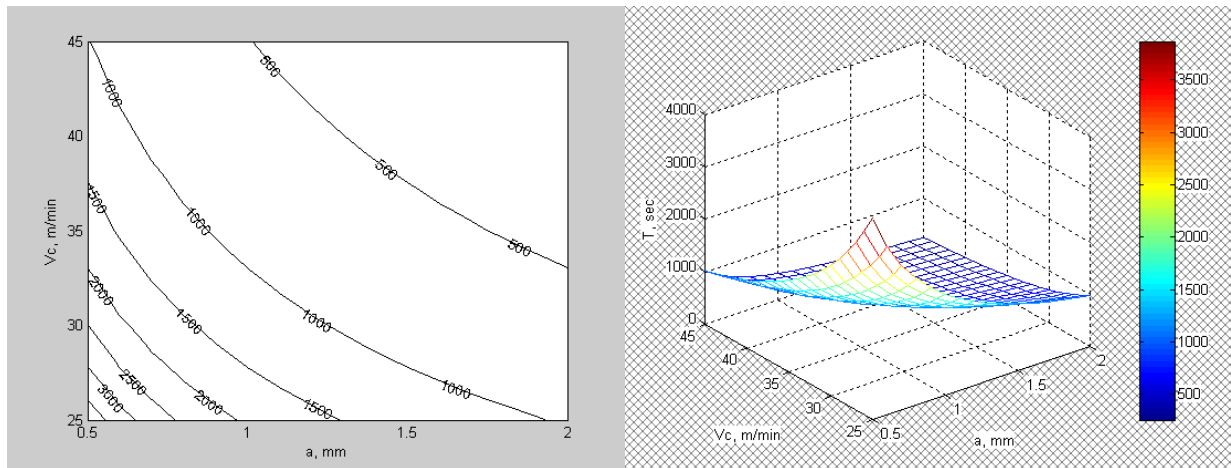
Фиг. 2. Влияние на скоростта на рязане  $V_C$  и подаването  $f_z$  върху трайността  $T$  при дълбочина на рязане  $a = 0,5 \text{ mm}$



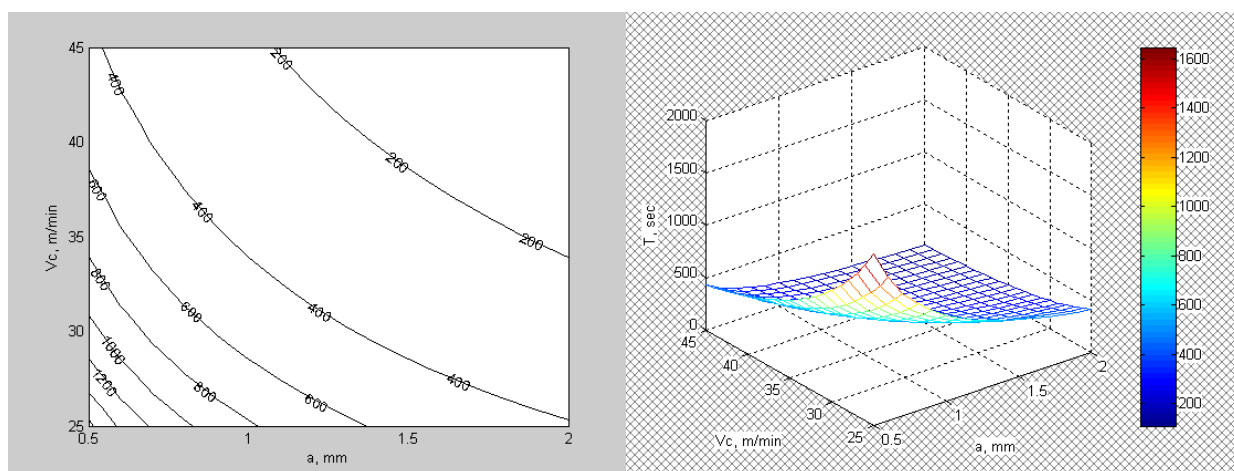
Фиг. 3. Влияние на дълбочината на рязане  $a$  и подаването  $f_z$  върху трайността  $T$  при скорост на рязане  $V_C = 25 \text{ m/min}$



Фиг. 4. Влияние на дълбочината на рязане  $a$  и подаването  $f_z$  върху трайността  $T$  при скорост на рязане  $V_C = 45 \text{ m/min}$



Фиг.5. Влияние на дълбочината на рязане  $a$  и скоростта на рязане  $V_C$  върху трайността  $T$  при подаване  $f_z = 0,02\text{mm/z}$



Фиг.6. Влияние на дълбочината на рязане  $a$  и скоростта на рязане върху трайността  $T$  при подаване  $f_z = 0,04\text{mm/z}$

Анализът на построения теоретико-експериментален модел (7) показва, че:

- най-голямо влияние върху трайността на инструментите оказва скоростта на рязане  $V_C$ , като с увеличаване на дълбочината на рязане влиянието на  $V_C$  нараства.

- подаването на зъб и дълбочината на рязане оказват съизмеримо като големина и характер влияние върху трайността  $T$ , като с увеличаването им тя намалява.

Степента на влияние на скоростта на рязане, подаването на зъб и дълбочината на рязане върху трайността на изследваните инструменти от инструментален материал CATAMOLD M2, изработени по метода MIM, може да се изрази чрез верижното неравенство:  $n_T > x_T > y_T$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изследвана е трайността на режещи инструменти, изработени от заготовки от инструментална бързорезна стомана, марка Catamold M2, създадени на база на метода Metal injection moulding.

2. Създаден е теоретико-експериментален модел за трайността на инструментите от инструментална бързорезна стомана, марка Catamold M2, създадени на ба-

за на метода Metal injection moulding, отразяващ комплексното влияние на елементите на режима на рязане. Въз основа на този модел е изведена зависимост за допустимата скорост на рязане на палцови фрези, изработени от този инструментален материал.

3. Построени са графични зависимости за трайността на изследваните палцови фрези, въз основа на които могат да се избераат комбинации от стойности на скоростта на рязане  $V_C$ , подаването на зъб  $f_z$  и дълбочината на рязане  $a$ , гарантиращи предварително зададена трайност  $T$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Александрова И. Основи на инженерните изследвания. Габрово, Университетско издателство "Васил Априлов", 2003.
- [2] Александрова ИС, КВ Анастасов. Относно възможностите за приложение на метода инжекционно формование в инструменталното производство. Сборник доклади от МНК УНИТЕХ'10, т. II, 2010, 184-188.
- [3] Александрова ИС, КВ Анастасов. Дефекти, проявени при изработване на инструментални заготовки по метода MIM. Анализ, планиране и прогнозиране. Сборник доклади от МНК УНИТЕХ'10, т. II, 2010, 215-220.
- [4] Андонов И. Рязане на металите. София, СОФТТРЕЙД, 2001.