



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ГАБРОВО
Факултет „Машиностроене и уредостроене”

маг. инж. Николай Пенков Колев

**ОПТИМИЗАЦИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРОЦЕСИ ЗА
ОБРАБОТВАНЕ НА ДЕТАЙЛИ ВЪРХУ CNC МАШИНИ
ПРИ РОБОТИЗИРАНО ЗАХРАНВАНЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1. Машинно инженерство

Докторска програма: Технология на машиностроенето

Габрово, 2026 г.



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ГАБРОВО
Факултет „Машиностроене и уредостроене ”

маг. инж. Николай Пенков Колев

**ОПТИМИЗАЦИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРОЦЕСИ ЗА
ОБРАБОТВАНЕ НА ДЕТАЙЛИ ВЪРХУ CNC МАШИНИ
ПРИ РОБОТИЗИРАНО ЗАХРАНВАНЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: **5.Технически науки**

Професионално направление: **5.1. Машинно инженерство**

Докторска програма: **Технология на машиностроенето**

Научени ръководители: **проф. д-р инж. Ирина Стефанова
Александрова**
доц. д-р инж. Христо Цанев Метев

Рецензенти: **проф. Йордан Максимов, дтн, ктн**
проф. д-р инж. Галина Николчева

Габрово, 2026 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Машиностроителна техника и технологии“ към факултет „Машиностроене и уредостроене“ на Технически университет – Габрово, проведен на 16.03.2026 г.

Дисертационният труд съдържа 114 страници и приложение. Научното съдържание е представено в увод, 4 глави и заключение и включва 41 фигури, 27 таблици и 1 приложение. Цитирани са 126 литературни източника. Номерацията на фигурите, таблиците и формулите в автореферата е в съответствие с тази в дисертацията.

Изследванията по дисертационния труд са извършени в катедра „Машиностроителна техника и технологии“ към факултет „Машиностроене и уредостроене“ на Технически университет – Габрово и във фирма „АДТЕХ“ ООД гр. Габрово

Официалната защита на дисертационния труд ще се състои на 09. 07. 2026г. от 14:30 ч. в Заседателна зала, сграда Ректорат на Технически университет – Габрово.

Автор: маг. инж. Николай Пенков Колев
e-mail: nikipkolev@abv.bg

Заглавие: ОПТИМИЗАЦИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРОЦЕСИ ЗА ОБРАБОТВАНЕ НА
ДЕТАЙЛИ ВЪРХУ CNC МАШИНИ С РОБОТИЗИРАНО ЗАХРАНВАНЕ

Тираж: 5 бр.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Въпреки предимствата си, CNC машините имат един сериозен недостатък – високата им производителност често не се използва ефективно поради необходимостта от ръчно обслужване. Захранването и разтоварването на детайли, смяната на палети и манипулирането на заготовки обикновено се извършват от оператори, което води до непредвидими престои и ограничаване на производствения капацитет. Според редица изследвания спомагателните операции съставляват 25÷40% от общото време на производствения цикъл. Това означава, че дори най-съвременната CNC машина не може да разгърне пълния си потенциал без интегрирана система за автоматизирано захранване.

Освен чисто икономически, внедряването на роботизирани системи има и социални измерения. Чрез автоматизацията операторите се освобождават от тежки и повтарящи се операции, което подобрява ергономията на труда и безопасността в производствената среда. Намалява се вероятността от злополуки, свързани с манипулиране на тежки заготовки, както и от травми, причинени от близък контакт с въртящи се части на машините.

Всички тези фактори ясно показват актуалността на проблематиката за оптимизация на технологичните процеси при обработване на детайли върху CNC машини чрез роботизирано захранване. Темата е стратегическа за развитието на българската индустрия в контекста на интеграцията ѝ в европейската производствена мрежа и постигането на целите на Индустрия 4.0 и Индустрия 5.0.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационната работа е оптимизиране на процеса CNC струговане с роботизирано захранване по критериите производителност, трайност на режещите инструменти и грапавост на обработените повърхнини и осигуряване на непрекъснат работен цикъл при обработване на термообработена (закалена и високо-температурно отвърнатата) стомана 42CrMo4.

За изпълнение на поставената цел е необходимо да се решат следните основни задачи:

1. Разработване на методика за изследване, моделиране и оптимизиране на процеса струговане върху CNC машини с роботизирано захранване.
2. Изследване и моделиране на производителността, трайността на режещите инструменти и грапавостта на обработените повърхнини при обработване на термообработена (закалена и високо-температурно отгрята) стомана 42CrMo4 при CNC струговане с роботизирано захранване.
3. Многоцелева оптимизация на процеса CNC струговане с роботизирано захранване и определяне на оптималните режими на рязане при обработване на стомана 42CrMo4.
4. Осигуряване на непрекъснат работен цикъл на работа на CNC машини с роботизирано захранване.

Методи на изследване

Представените в работата изследвания са осъществени със съвременни и адекватни за решаване на поставените задачи методи и технически средства. Приложени са методи за моделиране, статистическа обработка и анализ на експерименталните резултати, планиране на експериментите и оптимизиране посредством специализиран софтуер.

Научна новост

Научната новост се заключава в:

- Регресионни модели на параметъра Ra на грапавостта, производителността и трайността на режещите инструменти при обработване върху CNC стругови машини с два вида станции за роботизирано захранване.

- Методика за многоцелева компромисна оптимизация на процеса CNC струговане с роботизирано хранване.

- Методика за определяне на броя режещи инструменти за осигуряване на непрекъснат работен процес в зависимост от трайността на инструментите, капацитета на инструменталния магазин и на хранващия механизъм и обема на производствената програма

Приложимост

- Оптимални режими на рязане при струговане на подобрена стомана 42CrMo4 върху CNC стругове с роботизирани станции.

- Алгоритъм за софтуерен продукт за управление на работата на CNC стругове с роботизирано хранване.

Апробация на дисертационния труд

Дисертационната работа е докладвана и обсъждана на разширено заседание на катедра “Машиностроителна техника и технологии“ при ТУ–Габрово.

Етапи от дисертационната работа са обсъждани и публикувани в:

- 16th International Scientific and Practical Conference on Environment. Technology. Resources. Rezekne, Latvia, 2025;

- International Conference „Automatics and Informatics”, Varna, Bulgaria, 2025;

- International Scientific Conference UNITECH 2023, 2024, Gabrovo, Bulgaria.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд съдържа 114 страници и приложение в обем 40 страници. Научното съдържание е представено в увод, 4 глави, заключение, класификация на приносите, списък на публикации по дисертацията, използвана литература и включва 41 фигури, 27 таблици. Цитирани са 126 литературни източника.

Литературата обхваща 92 заглавия (статии, доклади, книги, учебници, дисертации, справочници и каталози, стандарти) и 34 интернет сайтове. От литературните източници 84 са на латиница.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава първа: Роботизация на CNC машини – състояние на проблема

Литературният анализ показва ясно, че макар проблемът за роботизацията на CNC производството да е добре изследван в световен мащаб, в българската научна и техническа литература все още липсват достатъчно задълбочени разработки, обединяващи технологичните, икономическите и организационните аспекти на темата. Това от своя страна обуславя необходимостта от изследване, насочено към оптимизация на CNC процесите чрез роботизирано хранване, базирано както на теоретичен модел, така и на експериментални данни.

На база направения литературен обзор могат да се формулират следните по-важни изводи:

- *Роботизираните станции за установяване на детайли върху CNC машини, особено тези с шестосови работи, са ключов елемент в модерната производствена индустрия. Те предлагат висока гъвкавост, прецизност и ефективност, което значително подобрява производствените процеси. Въпреки високите първоначални инвестиции и сложната интеграция, тези системи представляват стратегическа инвестиция, която увеличава производителността и намалява човешките грешки.*

- *Анализът на технологичните възможности, предимствата и недостатъците на разгледаните конструкции работи показва, че най-удачни за автоматизиране на сложни операции, изпълнявани върху CNC машини, са шестосовите работи. Изборът на конструкция на шестосов робот е конкретен, зависи от вида на машината и изисква изследвания за оптимизиране на технологичния процес.*
- *Установено е, че за намаляване времето на работния цикъл е необходимо да се познава трайността на инструментите с цел задаване на “живот“ с продължителност, кратна на вместимостта на роботизираната станция. Това ще позволи съвместяване на момента на смяна на инструмента с момента на зареждане на магазина с детайли и осигуряване на непрекъснат работен цикъл на машината.*
- *За осигуряване на висока производителност и качество на обработваните повърхнини при струговите CNC машини с роботизирано хранване е необходимо да се познават оптималните условия на обработване на материали с различни физико-механични свойства.*
- *За изработване на отговорни детайли в машиностроенето, работещи в условия, изискващи комбинация от висока статична якост и твърдост с висока ударна жилавост, като части на компресори, турбини, работни елементи на тежка наземна и подземна техника, детайли за селскостопански машини и др., се използва термообработена (закалена и високо-температурно отгрята) стомана 42CrMo4. Определените и препоръчвани в литературата оптимални режими на рязане за нейното обработване са валидни само за определени режещи инструменти и металорежещи машини. Липсва обаче информация за обработваемостта на тази стомана върху CNC стругови машини в условията на роботизирано хранване.*

Въз основа на направените изводи е дефинирана целта на дисертацията и задачите, с чието решение ще се постигне целта.

Глава втора: Изследване и моделиране на технологичните параметри на процеса струговане върху CNC стругови машини с роботизирано хранване.

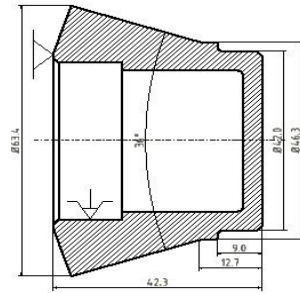
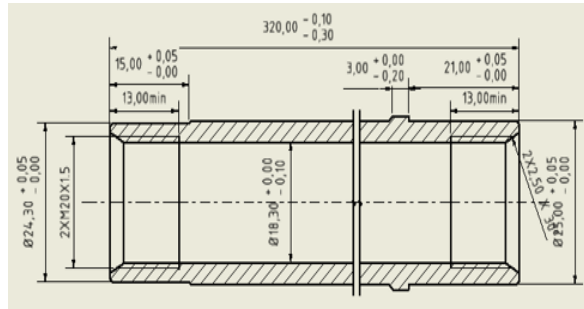
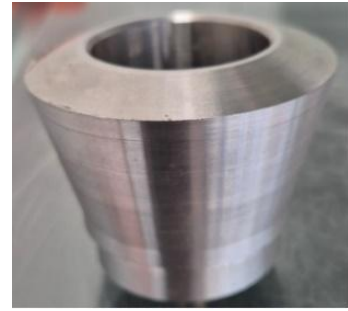
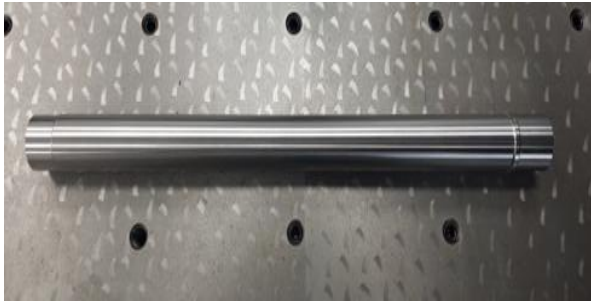
2.1. Цел на изследването

Целта е експериментално изследване и моделиране на влиянието на режима на рязане върху производителността, трайността на режещите инструменти и грапавостта на обработените повърхнини при обработване на стомана 42CrMo4 върху CNC стругови машини с роботизирано хранване.

2.2 Материали, оборудване и екипировка

2.2.1 Обработвани детайли

Изследванията са проведени в реални производствени условия във фирма АДТЕХ ООД - Габрово при обработване на два детайла с форма и размери, показани на фиг. 2.1. Обработваният материал е закалена и високо-температурно отвърнатата стомана 42CrMo4 с твърдост 33.8 HRC и граница на провлачване $f_y \geq 850$ МПа. Химичният състав на стоманата съгласно БДС EN ISO 683-2:2018, е представен в таблица 2.1.



а.

б.

Фиг. 2.1. Обработвани детайли: а – детайл 1; б – детайл 2

Таблица 2.1. Химичен състав на стомана 42CrMo4, %

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	Cu
0,38-0,45	0,17-0,37	0,50-0,80	≤0,3	0,9-1,2	0,15-0,25	≤0,035	≤0,3

2.2.2. Оборудване

Експериментите са проведени върху CNC струг HARRIS C400 – фиг. 2.2. с два вида станции за роботизирано захранване:

- *Fanuc LR Mate 200iD/7L* със система за автоматизация *BOXY Raptor AutoLoader* (фиг. 2.3). На тази роботизирана станция се извършва операция за обработване на повърхнина с диаметър $\varnothing 24,3$ mm и дължина $l = 15,0$ mm на детайл с форма и размери, показани на фиг. 2.1 а.
- *Mitsubishi RV-8CRL* със система за автоматизация *RoboPro DR800* (фиг. 2.4). На тази роботизирана станция се извършва операция за обработване на цилиндрична повърхнина с диаметър $\varnothing 42,0$ mm и на конусна повърхнина с ъгъл 36° с диаметри от $\varnothing 46,3$ mm до $\varnothing 63,4$ mm, с обща дължина $l = 42,3$ mm на детайл с форма и размери, показани на фиг. 2.1 б.

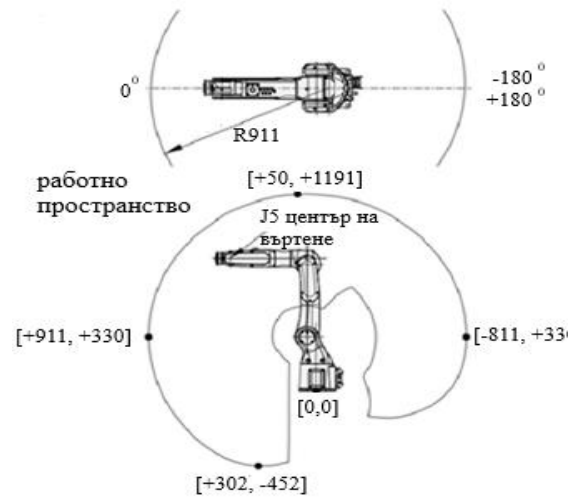
В качеството на смазочно-охлаждаща течност в процеса на работа е използван 6% разтвор на FUCHS ECOCOOL MACH 300. Тя е подавана в зоната на рязане с налягане 6 Bar.



Фиг.2.2. CNC струг HARRIS C400K



а.

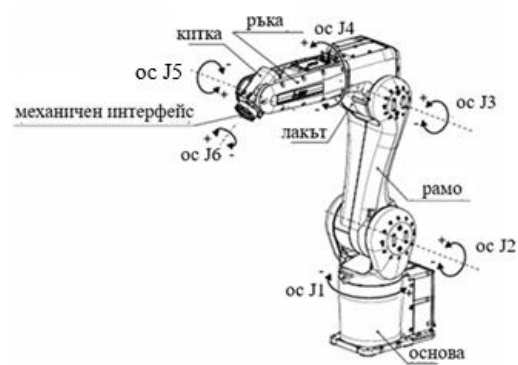


б.

Фиг. 2.3. Станция за роботизирано хранване Fanuc LR Mate 200iD/7L (а) и работен обхват на робота (б)



а.



б.

Фиг. 2.4 Станция за роботизирано хранване Mitsubishi RV-8CRL (а) и принципна схема на робота (б)

2.2.3 Режещи инструменти

Като режещи инструменти са използвани стругарски ножове с металокерамични сменяеми пластини с покрития, осигуряващи висока износоустойчивост. Означенията на инструментите и вида на използваните пластини са представени в таблица 2.2.

2.3. Изследване и моделиране на влиянието на елементите на режима на рязане върху изходните параметри на процеса струговане в условията на роботизирано хранване





2.3.1. Изследване и моделиране на изходните параметри на процеса CNC струговане с използване на роботизирана станция за зареждане Fanuc BOXY Raptor AutoLoader

Обработваните детайли са с форма и размери, показани на фиг. 2.1.а.

Експерименталните изследвания са проведени със стругарски нож SCACR 1616K-09S със следните режещи пластини (таблица 2.2):

- CCMT09T304-F1 TP2501- фирма SECO;
- CCMT09T304-MP- фирма PALBIT;
- CCMT09T304-F3M IC807- фирма ISCAR.

Таблица 2.2. Стругарски нож и металокерамични сменяеми пластини

Стругарски нож		Пластини			
Означение	Геометрия	№	Пластина	Производител	Покритие
SCACR 1616K-09S	главен установъчен ъгъл $\kappa_r = 95^\circ$ спомагателен установъчен ъгъл $\kappa'_r = 5^\circ$ заден ъгъл $\alpha = 7^\circ$ радиус на върха на инструмента $r_\varepsilon = 0.4 \text{ mm}$	1	CCMT09T304-F1 TP2501 	SECO	CVD: TiN+ Al ₂ O ₃
		2	CCMT09T304-MP 	PALBIT	CVD: TiN+ Al ₂ O ₃ +TiCN
		3	CCMT09T304-F3M IC807 	ISCAR	PVD: TiAlN+TiN
PCLXR 2525M- 12X-JHP	главен установъчен ъгъл $\kappa_r = 95^\circ$ спомагателен установъчен ъгъл $\kappa'_r = 5^\circ$ главен заден ъгъл $\alpha_0 = 6^\circ$ радиус при върха на инструмента $r_\varepsilon = 0.8 \text{ mm}$	4	CXMG 12T508 M3P IC8150 	ISCAR	CVD: TiCN+ Al ₂ O ₃ +TiCN+TiN

2.3.1.1. Изследване на грапавостта на обработваните повърхнини

Задачата на изследването е да се установи влиянието на броя обработени детайли върху грапавостта на обработваните повърхнини .

Като управляващи фактори на процеса са избрани скоростта на рязане V_c , m/min, подаването f , mm/rev и броят изработени детайли n . Дълбочината на рязане е постоянна $a_p = 1.5 \text{ mm}$.

Въз основа на предварителна информация е приет следният вид на модела:

$$Y_g = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ j < i}}^3 b_{ij} x_i x_j, \quad (2.1)$$

където: $Y_g = R_{ag}$ – индекс, съответстващ на вида на използвания инструмент ($g = 1, 2, 3$);

$X_1 = V_c$, m/min;

$X_2 = f$, mm/rev;

$X_3 = n$, бр.

Проведен е планиран експеримент с три фактора по оптимален ортогонален централно композиционен план от вида 2.2:

$$N = 2^3 + 2.3 + 1. \quad (2.2)$$

Нивата на вариране на управляващите фактори, осигуряващи работоспособност на режещите инструменти, са посочени в таблица 2.3.

Таблица 2.3. Нива на управляващите фактори

Управляващи фактори		Нива на вариране на факторите		
кодирани	натурални	-1	0	+1
X ₁	f, mm/rev	0.12	0.15	0.18
X ₂	V _c , m/min	130	150	170
X ₃	n, бр.	50	275	500

Грапавостта на обработената повърхнина е измерена с профиломер TESA Rugosurf 20 по критерия „средноаритметично отклонение от средната линия на профила“ R_a, който е най-често използваният в практиката параметър.

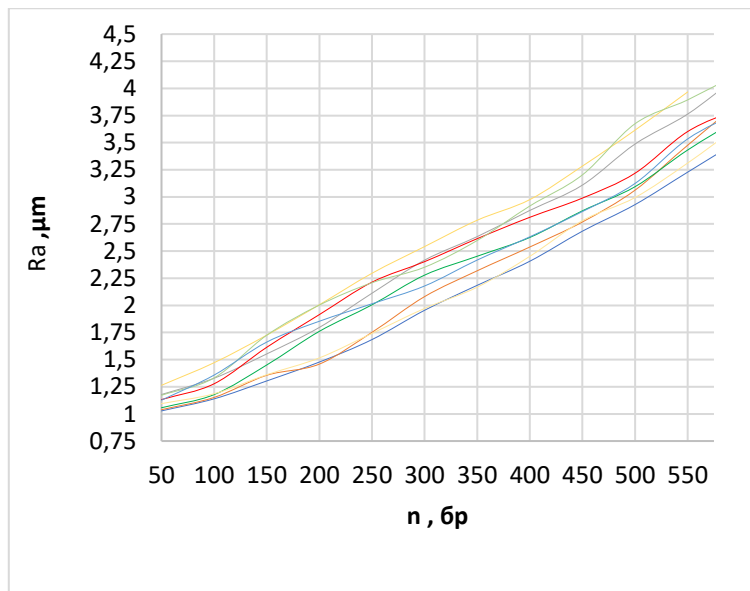
Планът на експеримента и експерименталните данни за грапавостта са представени в таблица 2.4.

Таблица 2.4. План на експеримента и експериментални данни

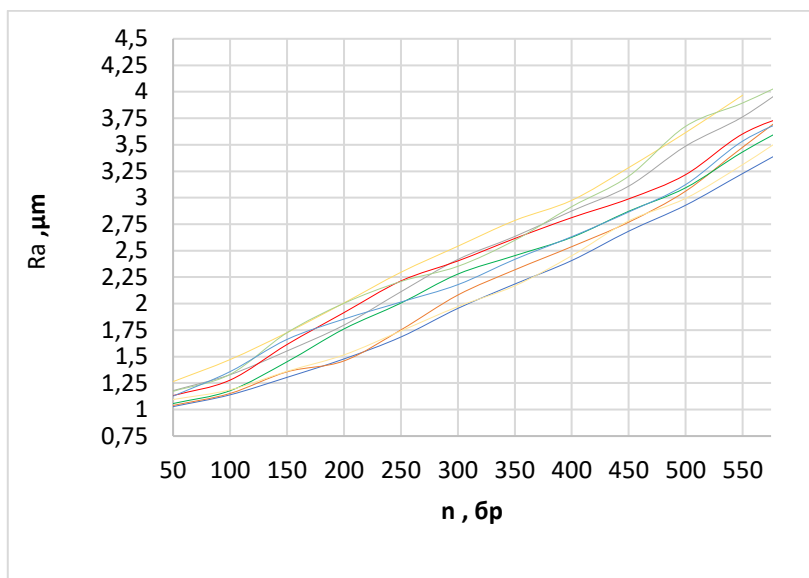
№	X ₁	X ₂	X ₃	V _c , m/min	f, mm/rev	n, бр.	Пластина SECO		Пластина PALBIT		Пластина ISCAR	
							Ra ₁ , μm	Ŕa ₁ , μm	Ra ₂ , μm	Ŕa ₂ , μm	Ra ₃ , μm	Ŕa ₃ , μm
1.	-1	-1	-1	130	0.12	50	1.028	0,993	1.179	1,094	1.168	1,080
2.	+1	-1	-1	170	0.12	50	1.179	1,195	1.183	1,248	1.189	1,146
3.	-1	+1	-1	130	0.18	50	1.039	1,107	1.254	1,238	1.235	1,237
4.	+1	+1	-1	170	0.18	50	1.264	1,309	1.543	1,436	1.389	1,304
5.	-1	-1	+1	130	0.12	500	2.929	2,926	2.998	2,989	3.022	3,018
6.	+1	-1	+1	170	0.12	500	3.487	3,495	3.641	3,725	3.605	3,680
7.	-1	+1	+1	130	0.18	500	3.062	3,039	3.114	3,133	3.182	3,175
8.	+1	+1	+1	170	0.18	500	3.615	3,609	3.952	3,914	3.927	3,838
9.	-1	0	0	130	0.15	275	1.834	1,895	2.124	2,114	2.214	2,128
10.	+1	0	0	170	0.15	275	2.276	2,280	2.518	2,581	2.351	2,492
11.	0	-1	0	150	0.12	275	2.139	2,152	2.398	2,264	2.265	2,231
12.	0	+1	0	150	0.18	275	2.352	2,266	2.426	2,430	2.305	2,389
13.	0	0	-1	150	0.15	50	1.127	1,029	1.087	1,254	1.062	1,192
14.	0	0	+1	150	0.15	500	3.124	3,145	3.495	3,440	3.523	3,428
15.	0	0	0	150	0.15	275	2.076	2,087	2.295	2,347	2.209	2,310

Стойностите на грапавостта за всеки опит са определени въз основа на проведени еднофакторни експерименти за установяване на влиянието на броя обработени детайли n върху R_a при комбинации от стойности на скоростта на рязане и подаването, представени в таблица 2.4. (фиг. 2.7).

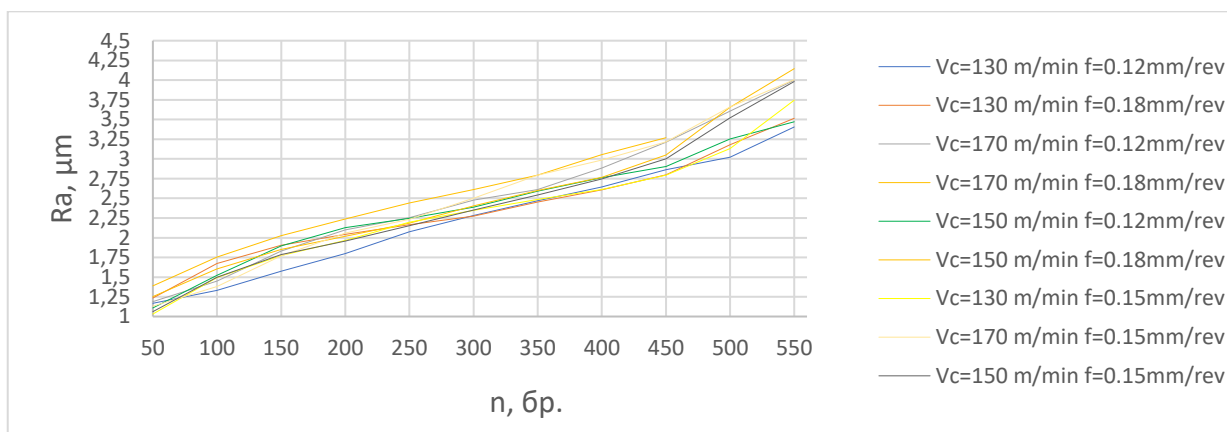
Резултатите от изследванията са обработени с програмния продукт QstatLab и са получени експериментални модели, представени в таблица 2.5. Те създават възможност за предсказване с достатъчна точност на грапавостта на обработвани детайли от стомана 42CrMo4.



а.



б.



в.

Фиг. 2.7. Изменение стойности на грапавостта в зависимост от броя на обработените детайли при струговане със сменяеми металокерамични пластини:

а - CCMT09T304-F1 TP2501- фирма SECO; б - CCMT09T304-MP- фирма PALBIT;

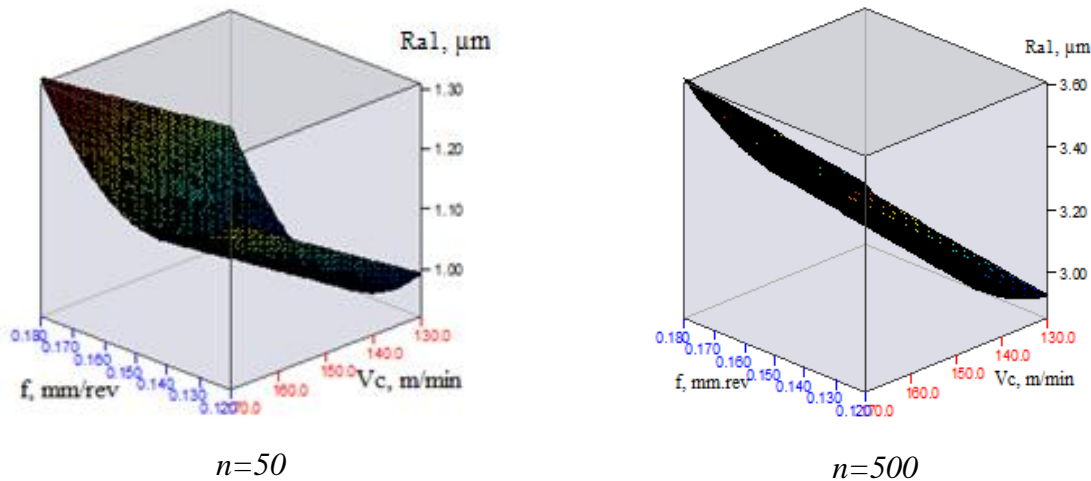
в - CCMT09T304-F3M IC807- фирма ISCAR

Таблица 2.5. Експериментални модели за грапавостта и статистически анализ

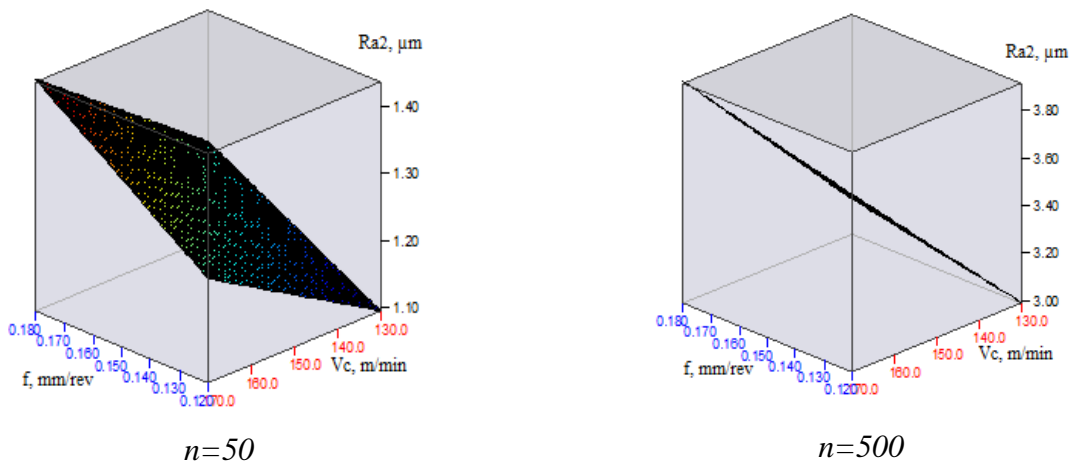
Пластина	Експериментални модели	$t_{\alpha/2, \nu}$	$\hat{F} \geq F^T$		\hat{R}^2
			\hat{F}	F^T	
ССМТ09Т304-F1 TP2501	$Ra_{,1}=2,95+0,004Vc-$ $38,77f+0,002n+135,56f^2+2,042E-5Vc.n$	2,262	700,13657	3,48166	0,99601
ССМТ09Т304-MP	$Ra_{,2}=0,596+0,02Vc.f+3,24E-5Vc.n$	2,179	870,98507	3,88529	0,99202
ССМТ09Т304- F3M IC807	$Ra_{,3} = 0,549+2,63f+3,313E-5Vc.n$	2,179	768,18043	3,88529	0,99096

Получените резултати са представени в графичен вид на фигури 2.8, 2.9 и 2.10.

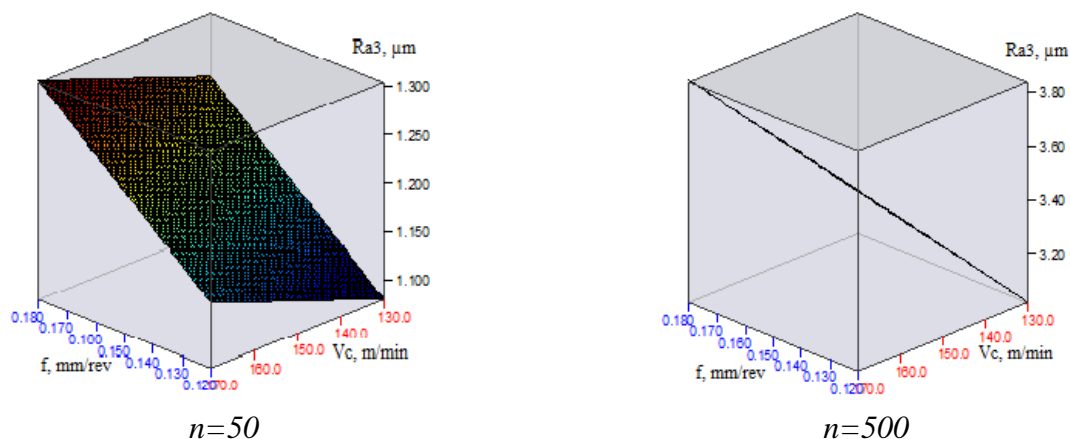
За определяне на влиянието на управляващите фактори върху грапавостта е проведен дисперсионен анализ (ANOVA). Проведения дисперсионен анализ показва, че най-силно влияние върху грапавостта оказва броят обработени детайли n , следван от скоростта на рязане Vc . Установено е, че най-силно влияние върху грапавостта оказва скоростта на рязане при струговане с минералокерамични пластини ССМТ09Т304-MP на фирма PALBIT.



Фиг. 2.8. Графични зависимости на грапавост на обработените повърхнини в зависимост от скоростта на рязане Vc , m/min ; подаването f , mm/rev и броя обработени детайли n при режещи пластини ССМТ09Т304-F1 TP2501 на фирма SECO



Фиг. 2.9. Графични зависимости на грапавост на обработените повърхнини в зависимост от скоростта на рязане Vc , m/min ; подаването f , mm/rev и броя обработени детайли n при режещи пластини ССМТ09Т304-MP на фирма PALBIT



Фиг. 2.10. Графични зависимости на грапавост на обработените повърхнини в зависимост от скоростта на рязане V_c , m/min; подаването f , mm/rev и броя обработени детайли n при режещи пластини $CCMT09T304-F3M IC807$ на фирма ISCAR
 скорост на рязане – V_c , подаване - f и брой обработени детайли – n , върху грапавост – Ra при обработване с металокерамични пластини:
 а - $CCMT09T304-F1 TP2501$ на фирма SECO; б - $CCMT09T304-MP$ на фирма PALBIT;
 в - $CCMT09T304-F3M IC807$ на фирма ISCAR

2.3.1.2. Изследване обработваемостта на стомана 42CrMo4 при струговане с инструменти с металокерамични сглобяеми пластини

Обработваемостта на стомана 42CrMo4, като основна технологична характеристика на процеса струговане, е изследвана по критериите грапавост на обработената повърхнина, трайност на режещите инструменти и производителност на процеса.

Условията за провеждане на експеримента са аналогични на тези описани в точка 2.3.1.1. Въз основа на предварителна информация е приет вид на модела - 2.3:

$$Y_i = B_0 + \sum B_i \cdot X_i + \sum B_{ii} \cdot X_i^2 + B_{12} X_1 X_2, \quad (2.3)$$

където: $X_1 = f$, mm/rev; $X_2 = V_c$, m/min.

Проведен е планиран експеримент с два фактора по оптимален ортогонален централнокомпозиционен план от вида:

$$N = 2^2 + 2 \cdot 2 + 1. \quad (2.4)$$

Планът на експеримента и експерименталните данни са представени в таблица 2.6.

Обработването на експерименталните резултати е извършено в последователността описана в т.2.3.1.1.

Таблица 2.6. План на експеримента и експериментални данни

№	f mm/rev	Vc m/min n	Трайност – T, бр. детайли			Трайност – L, mm			Време за обработване t,s			Грапавост Ra,μm		
			T ₁	T ₂	T ₃	L ₁	L ₂	L ₃	t ₁	t ₂	t ₃	Ra ₁	Ra ₂	Ra ₃
1	0.12	130	510	500	490	18661	18295	17929	5610	5500	5390	1,028	1,179	1,168
2	0.18	130	490	475	475	17929	17380	15380	3430	3325	3325	1,039	1,254	1,235
3	0.12	170	425	400	420	15551	14360	15368	3400	3200	3360	1,176	1,183	1,189
4	0.18	170	405	355	390	14819	12989	14270	2430	2130	2340	1,264	1,543	1,389
5	0.12	150	480	455	465	17563	16648	17014	4800	4550	4650	1,057	1,087	1,109
6	0.18	150	455	420	440	16648	15368	16099	2730	2520	2640	1,132	1,387	1,253
7	0.15	130	505	490	480	18478	17929	17563	4545	4410	4320	1,095	1,085	1,032
8	0.15	170	415	380	405	15185	13904	14819	2905	2660	2835	1,172	1,243	1,131
9	0.15	150	470	440	450	17197	16099	16466	3760	3520	3600	1,127	1,087	1,062

Резултатите от изследванията са обработени с програмния продукт QstatLab, като получените модели и статистическият анализ на експерименталните резултати са представени в таблица 2.7.

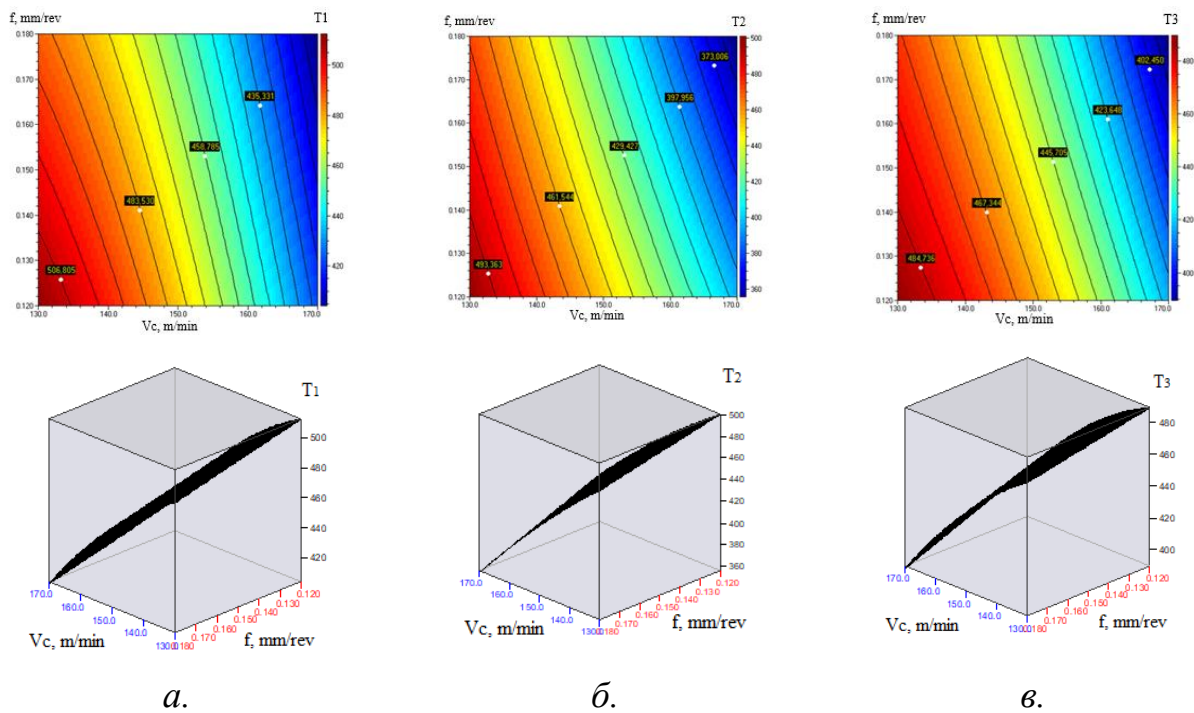
Построените модели са адекватни, тъй като условието $\hat{F} > F_{\alpha, \nu_1, \nu_2}$ е изпълнено с 95% доверителна вероятност. Изчислените \hat{F} и таблични F_{α, ν_1, ν_2} стойности на критерия на Фишер ($\alpha=0.05$; $\nu_1 = k - 1$ и $\nu_2 = N - k$ - степени на свобода) за всеки от регресионните модели са представени в таблица 2.7. Експерименталните модели описват с висока точност зависимостите между технологичните параметри и управляващите фактори. Стойностите на коефициентите на детерминация \hat{R}^2 са $0,82264 \div 1.00000$ (таблица 2.7).

Графичната интерпретация на получените модели е показана на фигури 2.12 ÷ 2.15.

За определяне на влиянието на управляващите фактори върху изследваните параметри е проведен дисперсионен анализ (ANOVA).

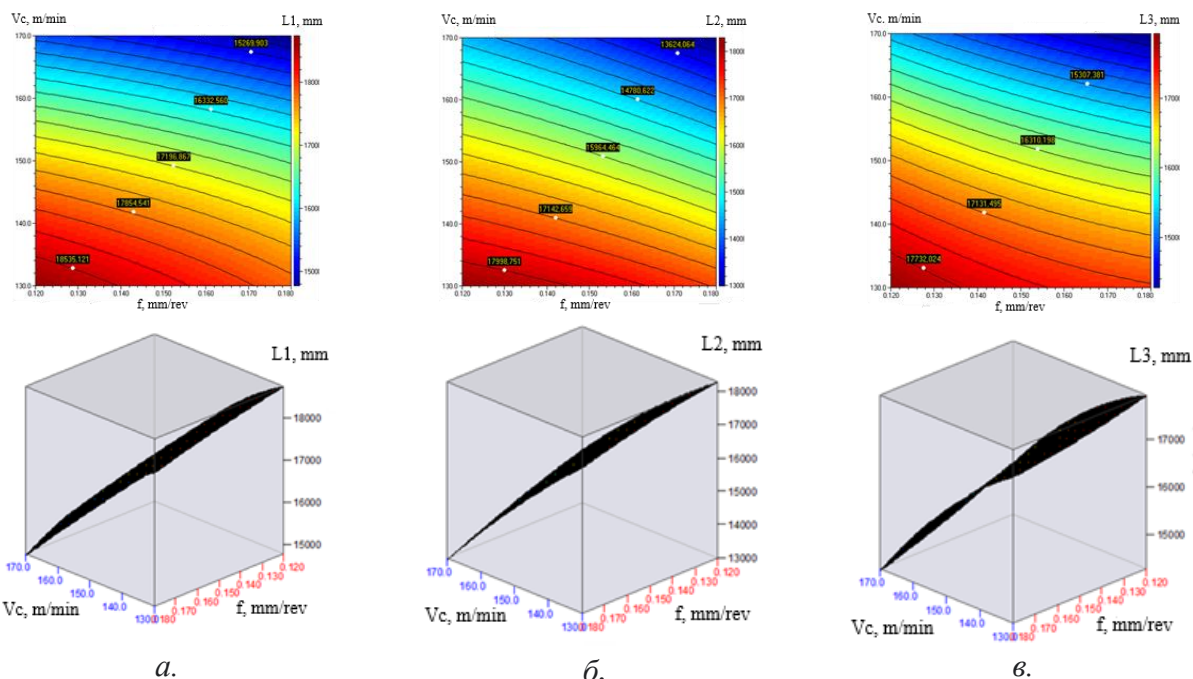
Таблица 2.7. Експериментални модели и статистически анализ

Пластина	Експериментални модели	$t_{\alpha/2}$ $\cdot \nu$	$\hat{F} \geq F^T$		\hat{R}^2
			\hat{F}	F^T	
ССМТ09Т304-F1 TP2501	$T_1 = 285 - 361,111f + 5,333V_c - 0,025V_c^2$	2,57	695,476	5,409	0,99727
	$Ra_1 = 0,976 - 2,8109f + 0,02518 f \cdot V_c$	2,447	19,553	5,143	0,82264
	$L_1 = 9489,9797 + 194,85 \cdot V_c - 44246,955 \cdot f^2 - 0,9138 \cdot V_c^2$	2,5706	981.561	5.4095	0.9973
	$t_1 = 25490,694 - 104625 \cdot f - 116,0417 \cdot V_c + 504,1667 \cdot f \cdot V_c$	2.5706	171.221	5.4095	0.9846
ССМТ09Т304-MP	$T_2 = 469,583 + 666,667f + 2,25V_c - 0,0125V_c^2 - 8,333f \cdot V_c$	2,776	1611,0	6,388	0,99876
	$Ra_2 = 9,3611 - 58,340f - 0,0597V_c + 148,704f^2 + 0,00015V_c^2 + 0,119f \cdot V_c$	3,182	43,6955	9,013	0,96388
	$L_2 = 14964,431 + 54850 \cdot f^2 + 82,25 \cdot V_c - 101481 \cdot f^2 - 0,4571 \cdot V_c^2 - 305 \cdot f \cdot V_c$	3.1825	364.178 1.10 ⁵	9.0135	1.0000
	$t_2 = 24846,468 - 98368,056 \cdot f - 112,7708 \cdot V_c + 460,4167 \cdot f \cdot V_c$	2.5706	285.4256	5.4095	0.9907
ССМТ09Т304-F3M IC807	$T_3 = 188,125 + 548,611f + 5,271 V_c - 0,0208V_c^2 - 6,25f V_c$	2,776	943,53338	6,388	0,99788
	$Ra_3 = 8,099 - 55,64f - 0,043V_c + 165,37f^2 + 0,00012V_c^2 + 0,0554f \cdot V_c$	3,182	58,25263	9,013	0,97281
	$L_3 = 8349,67221 + 192,8438 \cdot V_c + 67036,196 \cdot f^2 - 0,7621 \cdot V_c^2 - 228,9588 \cdot f \cdot V_c$	2.777	2034,1388	6.3882	0.9990
	$t_3 = 23274,375 - 93618,056 \cdot f - 102,8125 \cdot V_c + 435,4167 \cdot f \cdot V_c$	2.5706	170.9663	5.4095	0.9846



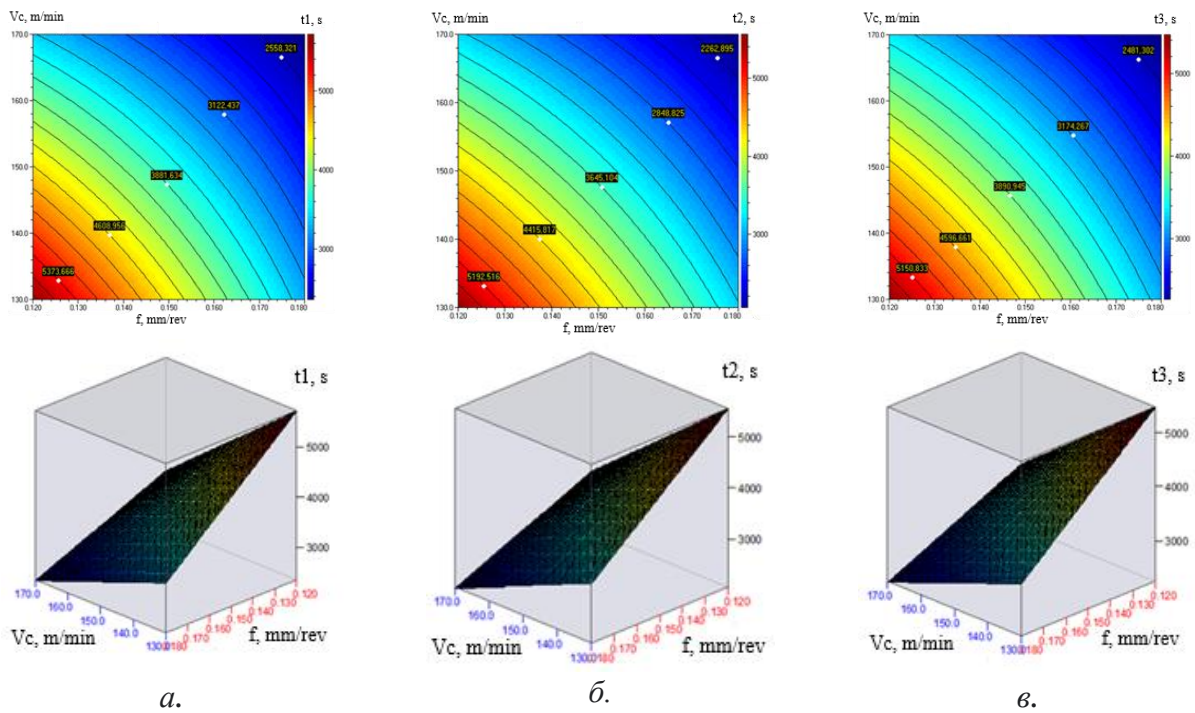
Фиг. 2.12. Влияние на условия на рязане върху трайността на режещите инструменти, оценена по критерия брой обработени детайли при обработване с режещи инструменти на различни производители:

- а - CCMT09T304-F1 TP2501- фирма SECO;
- б - CCMT09T304-MP- фирма PALBIT;
- в - CCMT09T304-F3M IC807- фирма ISCAR.

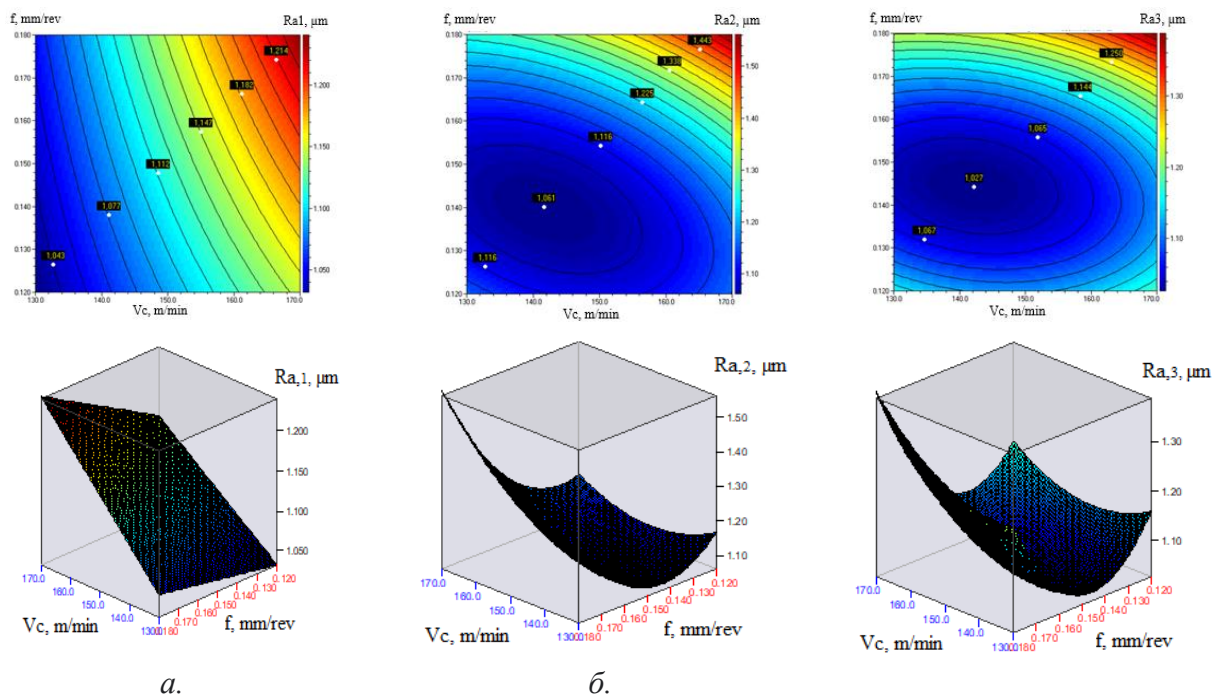


Фиг. 2.13. Влияние на условия на рязане върху трайността на режещите инструменти, оценена по критерия изминат път при обработване с режещи инструменти на различни производители:

- а - CCMT09T304-F1 TP2501- фирма SECO;
- б - CCMT09T304-MP- фирма PALBIT;
- в - CCMT09T304-F3M IC807- фирма ISCAR.



Фиг. 2.14. Влияние на условия на рязане върху производителността на процеса CNC струговане при обработване с режещи инструменти на различни производители:
 а - CCMT09T304-F1 TP2501- фирма SECO;
 б - CCMT09T304-MP- фирма PALBIT;
 в - CCMT09T304-F3M IC807- фирма ISCAR.



Фиг. 2.15. Влияние на условия на рязане върху грапавостта на обработените повърхнини при обработване с режещи инструменти на различни производители:
 а - CCMT09T304-F1 TP2501- фирма SECO;
 б - CCMT09T304-MP- фирма PALBIT;
 в - CCMT09T304-F3M IC807- фирма ISCAR.

Анализът на получените експерименталните модели и на построените въз основа на тях графични зависимости, показва, че обработваемостта на стомана 42CrMo4, оценена по критериите трайност, производителност и грапавост, зависи от елементите на режима на рязане, както следва:

- С увеличаване на V_c и f се наблюдава намаляване на трайността по критериите брой обработени детайли и изминат път от инструмента, т.е. влошаване на обработваемостта по този критерий (таблица 2.9). По-силно е влиянието на скоростта на рязане, като изменението ѝ в изследвания диапазон води до намаляване на трайността по критериите брой детайли и изминат път съответно до 29% и 25,2% за отделните пластини (таблица 2.10). С нарастване на подаването трайността намалява по критерия брой обработени детайли от 4,9 до 8,4%, а по критерия изминат път от инструмента – 5,2 до 11,2% (таблица 2.10). Най – силно е влиянието на V_c и f при струговане с пластини на фирма PALBIT. Най-голяма трайност и по двата критерия, съответно най-добра обработваемост се получава при обработване с пластините на фирма SECO с подаване $f_{min}=0,12\text{ mm/rev}$ и скорост на рязане $V_{c,min}=130\text{ m/min}$ (таблица 2.9).
- Подаването и скоростта на рязане оказват приблизително еднакво влияние върху производителността на процеса, оценена с времето за обработване. Това влияние е най-силно изразено при обработване с металокерамични пластини ССМТ09Т304-МР на фирма PALBIT, като с нарастване на V_c и f времето за обработване намалява до 48,8%. Най-висока производителност, съответно най-добра обработваемост и по този критерий се получава при обработване с пластините ССМТ09Т304-МР на фирма PALBIT с подаване $f_{max}=0,18\text{ mm/rev}$ и скорост на рязане $V_{c,max}=170\text{ m/min}$ (таблица 2.9).
- Обработваемостта на обработваната стомана по критерия грапавост се влошава с увеличаване на V_c и f (таблица 2.9). Най-силно е влиянието на скоростта при обработване с пластини ССМТ09Т304-F1 TP2501 на фирма SECO, като с нарастване на V_c в изследвания диапазон грапавостта се увеличава с 14,4% (таблица 2.9). Увеличаването на подаването води до нарастване на грапавостта в границите от 5,3 до 21,2%, като изменението на грапавостта е най-силно изразено при обработване с пластини ССМТ09Т304-МР на фирма PALBIT (таблица 2.10). Най-малка грапавост се получава при обработване с пластините ССМТ09Т304-F1 TP2501 на фирма SECO при подаване $f_{min}=0,12\text{ mm/rev}$ и скорост на рязане $V_{c,min}=130\text{ m/min}$. (таблица 2.9).

Таблица. 2.9. Граници на изменение на критериите в изследвания диапазон на режимите на рязане

Пластина	$f_{min}=0,12\text{ mm/rev}$ $V_{c,min}=130\text{ m/min}$				$f_{max}=0,18\text{ mm/rev}$ $V_{c,max}=170\text{ m/min}$			
	T,бр.	L,mm	t, s	$R_a, \mu\text{m}$	T,бр.	L,mm	t, s	$R_a, \mu\text{m}$
ССМТ09Т304-F1 TP2501	512	18661	5610	1,032	404	14819	2430	1,241
ССМТ09Т304-МР	501	18295	5500	1,166	356	12989	2130	1,561
ССМТ09Т304-F3М IC807	490	17929	5390	1,159	390	14270	2340	1,388

Таблица. 2.10. Влияние на елементите на режима на рязане върху критериите за обработваемост, %

Пластина	$f_{min}=0,12\text{ mm/rev}$, $f_{max}=0,18\text{ mm/rev}$				$V_{c,min}=130\text{ m/min}$, $V_{c,max}=170\text{ m/min}$			
	ΔT	ΔL	Δt	ΔR_a	ΔT	ΔL	Δt	ΔR_a
ССМТ09Т304-F1 TP2501	4,9	5,2	43,1	5,3	20,9	17,8	39,4	14,4
ССМТ09Т304-МР	8,4	11,2	44,6	21,2	29,1	25,2	48,8	12,9
ССМТ09Т304-F3М IC807	5,3	7,1	43,2	11,9	19,0	17,9	37,7	7,9

2.3.2. Изследване и моделиране на технологичните параметри при струговане с използване на роботизирана станция за зареждане Mitsubishi RV-8CRL

Като технологични параметри са изследвани трайността на режещите инструменти и производителността на процеса струговане при обработване на стомана 42CrMo4 върху CNC стругови машини с роботизирано захранване.

Експерименталните изследвания са проведени с режещи пластини CXMG 12T508 M3P IC8150 на фирма ISCAR, установени в призматичен държач PCLXL 2525 – 12M (таблица 2.2).

Обработваните детайли са с форма и размери, показани на фиг. 2.1.б.

Като управляващи фактори са избрани скоростта на рязане V_c , m/min, подаването f , mm/rev и дълбочината на рязане a_p mm. Нивата на вариране на управляващите фактори са посочени в таблица 2.11 и отчитат повишената износоустойчивост на използваните пластини.

Таблица 2.11. Нива на управляващите фактори

Управляващи фактори		Нива на вариране на факторите		
кодирани	натурални	-1	0	+1
x_1	V_c , m/min	180	230	280
x_2	f , mm/rev	0.15	0.20	0,25
x_3	a_p , mm	2.0	2.5	3,0

Въз основа на предварителна информация е приет вид на модела:

$$Y_{g(g=1,2)} = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i X_i + \sum_{\substack{i=1 \\ i < j}}^3 b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^3 b_{ii} X_i^2 + b_{123} X_1 X_2 X_3, \quad (2.5)$$

където: $Y_1=L$, mm; $Y_2=T$, s; $X_1 = V_c$, m/min; $X_2=f$, mm/rev; $X_3= a_p$, mm.

Проведен е планиран експеримент с три фактора по оптимален ортогонален централно - композиционен план от вида 2.6:

$$N=2^3 + 3.2+1. \quad (2.6)$$

Трайността е определена като дължина на работния ход L (mm) при обработване на повърхнините при конкретен режим на рязане, като в качеството на критерий на износване е приета грапавост на обработената повърхнина - $Ra=2,0 \mu m$, която се измерва с профиломер TESA Rugosurf 20.

Като критерий на производителността е прието общото време (основно и спомагателно) t (s) за изминаване на пътя L (mm) до достигане на зададената грапавост.

Експериментално определените стойности на трайността и производителността са представени в таблица 2.12.

Резултатите от изследванията са обработени с програмния продукт QstatLab, като получените експерименталните модели и стойностите на критерия на Стюдънт, критерия на Фишер и на коефициента на детерминация са представени в таблица 2.12.

Регресионните модели (таблица 2.13) включват само значимите регресионни коефициенти, определени в съответствие с условието $\hat{t} > t_{\alpha/2, \nu}$. ($\alpha=0,05$, $\nu = N - k$).

Построените модели са адекватни, тъй като условието $\hat{F} > F_{\alpha, \nu_1, \nu_2}$ е изпълнено с 95% доверителна вероятност (таблица 2.12).

Определените по моделите стойности са представени в таблица 2.11.

Графичната интерпретация на получените модели е показана на фиг. 2.21 и фиг. 2.22.

За определяне на влиянието на управляващите фактори върху трайността и производителността на изследвания инструмент е проведен дисперсионен анализ (ANOVA).

Таблица 2.12. План на експеримента и експериментални данни

№	Управляващи фактори			Трайност, mm		Производителност, min	
	Vc m/min	a _p mm	f mm/rev	L	\hat{L}	t	\hat{t}
1	180	2	0,15	67742	67043	427.92	419,2
2	280	2	0,15	65170	65208	266,00	266,5
3	180	3	0,15	47547	47883	295.17	295,4
4	280	3	0,15	46312	46049	187.50	184,2
5	180	2	0,25	61740	61671	234,00	234,8
6	280	2	0,25	61225	61544	148.75	146,0
7	180	3	0,25	42237	42511	159.60	156,5
8	280	3	0,25	42360	42384	102.90	109,1
9	180	2,5	0,2	52170	52294	246.67	257,5
10	280	2,5	0,2	51465	51313	158.17	157,5
11	230	2	0,2	63455	63866	234.33	233,0
12	230	3	0,2	45077	44707	164.25	152,7
13	230	2,5	0,15	53439	54063	265.30	276,6
14	230	2,5	0,25	50055	49544	147.92	146,9
15	230	2,5	0,2	51888	51803	190.13	192,8

Таблица 2.13. Експериментални модели за трайността и производителността и статистически анализ

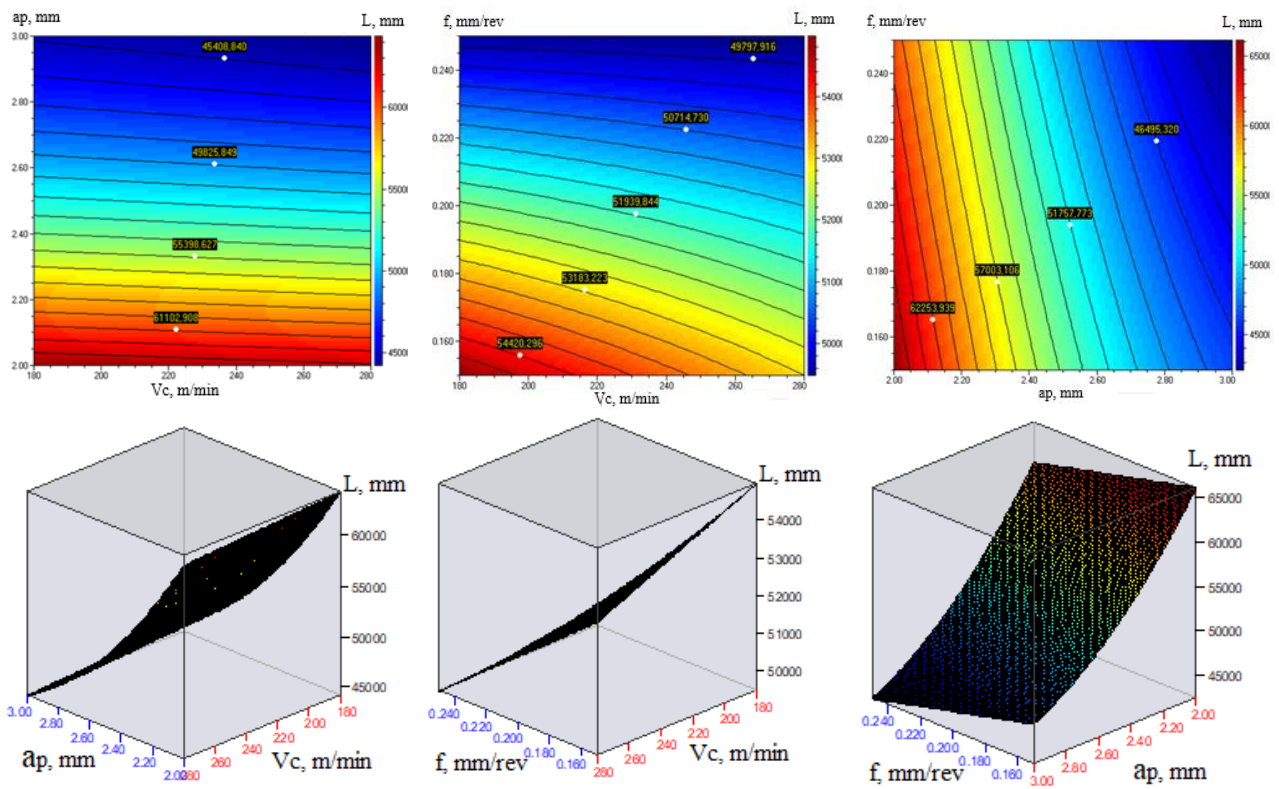
Експериментални модели	$t_{\alpha/2,\nu}$	$\hat{F} \geq F^T$		\hat{R}^2
		\hat{F}	F^T	
$L=180927.94-43.958.V_c-68821.8a_p-84458.5f+9932.4a_p^2+170.75V_c f$	2,262	963,03220	3,48166	0,9971
$T=135369.7-361.156V_c-15992,2a_p-415683.f+0,3532V_c^2+453800f^2+382.9V_c f+27300a_p f+24.84V_c a_p$	2,447	125,81918	4,14680	0,98617

Анализът на получените експериментални модели (таблица 2.13) показва, че:

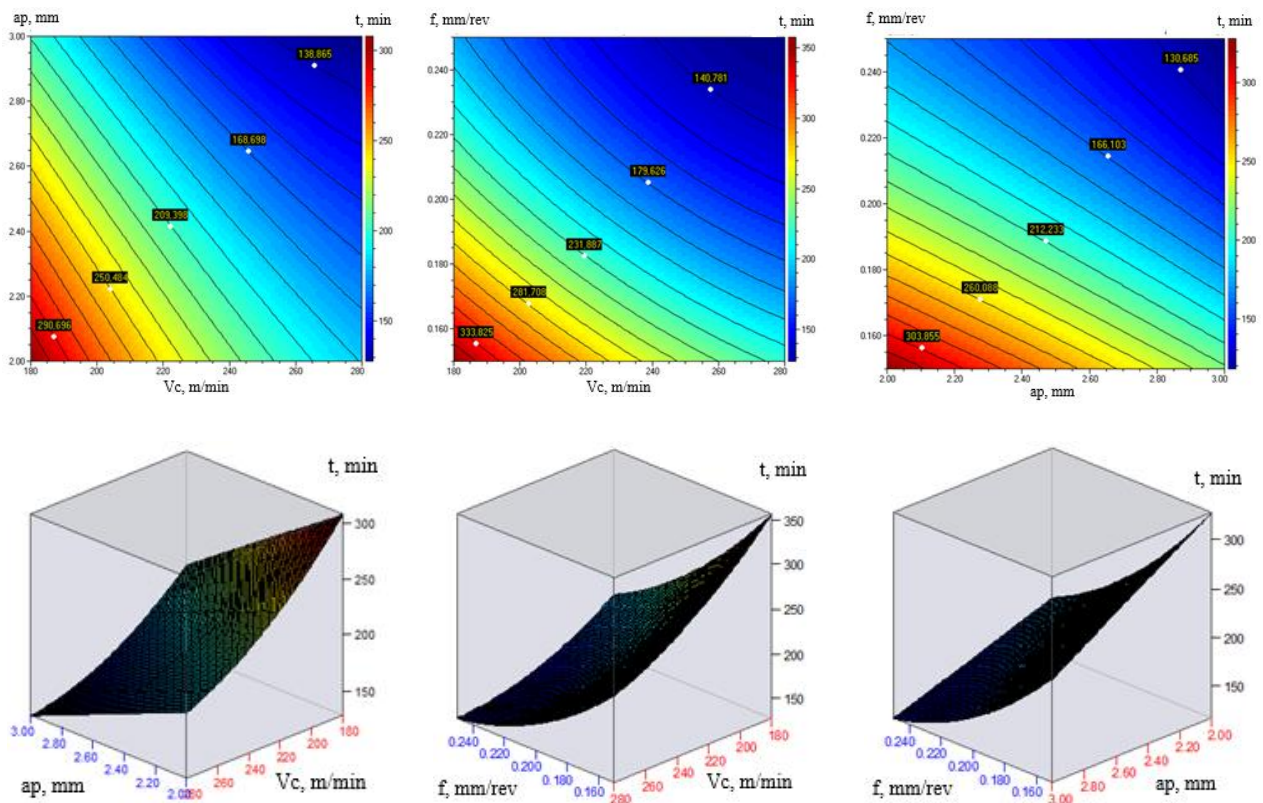
- С увеличаване на a_p , f и V_c и се наблюдава намаляване на трайността и нарастване на производителността (таблица 2.14);

Таблица 2.14. Граници на изменение на критериите в изследвания диапазон на режимите на рязане

Пластина	a _{p,min} = 2,0 mm f _{min} =0,15 mm/rev V _{c,min} = 180 m/min		a _{p,max} = 3,0 mm f _{max} =0,25 mm/rev V _{c,max} =280 m/min	
	L,mm	t, s	L,mm	t, min
CXMG 12T508 M3P IC8150	67742	25675	42360	102,9



Фиг. 2.21. Трайност в зависимост от скоростта на рязане V_c , подаването f , и дълбочината на рязане a_p



Фиг. 2.22. Производителност в зависимост от скоростта на рязане V_c , подаването f , и дълбочината на рязане a_p

- Дълбочината на рязане a_p оказва по-силно влияние върху производителността, отколкото върху трайността, като с нарастването ѝ производителността се увеличава до 45,9%, а трайността намалява с 11,2% (таблица 2.15);

Таблица 2.15. Влияние на елементите на режима на рязане върху критериите за обработваемост, %

Пластина	$a_{p,\min} = 2,0 \text{ mm}$ $a_{p,\max} = 3,0 \text{ mm}$		$f_{\min}=0,15 \text{ mm/rev}$ $f_{\max}=0,25 \text{ mm/rev}$		$V_{c,\min}=180, \text{m/min}$ $V_{c,\max}=280, \text{m/min}$	
	ΔL	Δt	ΔL	Δt	ΔL	Δt
CXMG 12T508 M3P IC8150	11,2	45,9	31,6	31,8	3,8	37,4

- Подаването f оказва приблизително еднакво влияние върху трайността на инструмента и производителността на процеса, като с увеличаването му трайността намалява с около 32% (таблица 2.15);
- Скоростта на рязане V_c влияе по-силно върху производителността, като с нарастването ѝ тя се увеличава до 37,4 %. Намаляването на трайността с увеличаването на скоростта в изследвания диапазон е минимално - до 3,8 % (таблица 2.15).

Глава трета: Многоцелева оптимизация на процеса струговане върху CNC машини с роботизирано захранване

3.1. Цел на изследването

Цел на изследването е да се определи режимът на рязане, осигуряващ най-добра комбинация между параметрите на процеса CNC струговане с роботизирано захранване (максимална производителност; максимална трайност на режещите инструменти и минимална грапавост на обработваните повърхнини).

3.2. Избор на метод и методика за провеждане на изследването

Анализът на методите за многоцелева оптимизация, показва, че по-голямо количество информация за вземане на обосновано решение за избор на оптимални условия на рязане предлагат следните два метода, които са приложени за постигане на поставената цел:

- *Определяне на компромисна оптимална област, като решаването на оптимизационната задач се свежда до определяне на Парето-оптимални решения за елементите на режима на рязане.*
- *Скаларизиране на векторния оптимизационен критерий, като е използвана обобщената целева функция на полезност.*

Методиката за многоцелева оптимизация на процеса и конкретната ѝ реализация при обработване върху CNC стругови машини с роботизирано захранване протича в две фази:

- *Моделиране с помощта на експериментален дизайн и статистическа регресия на технологичните параметри (производителност, трайност на режещите инструменти и грапавост на обработените повърхнини) на процеса CNC струговане с роботизирано захранване, представена в глава втора;*
- *Многоцелева компромисна оптимизация, базирана на генетичен алгоритъм, за определяне на оптималните условия за реализация на процеса.*

3.2.1 Определяне на компромисната оптимална област

За определяне на оптималния режим на рязане по този метод е необходимо решаването на следната система от неравенства, която включва функционални и факторни ограничения, необходими за определяне на парето фронта:

$$\begin{cases}
Y(X_1^*, X_2^*, X_3^*) = Y_{max} > Y(X_1, X_2, X_3) \\
Z(X_1^*, X_2^*, X_3^*) = Z_{min} < Z(X_1, X_2, X_3) \\
X_{1,min} \leq X_1 \leq X_{1,max} \\
X_{2,min} \leq X_2 \leq X_{2,max} \\
X_{3,min} \leq X_3 \leq X_{3,max}
\end{cases}, \quad (3.2)$$

където: $Y \equiv L$ (mm);

T (бр. детайли);

$Z \equiv t$ (s, min); R_a (μm);

X_1, X_2, X_3 - елементи на режима на рязане;

X_1^*, X_2^*, X_3^* - оптимални елементи на режима на рязане.

Моделите $Y(X_1, X_2, X_3)$ и $Z(X_1, X_2, X_3)$ за трайността и производителността при струговане с роботизираните станции Fanuc LR Mate 200iD/7L и Mitsubishi RV-8CRL са представени съответно в таблици 2.7 и 2.12, а областите на изменение на елементите на режима на рязане съответно в таблици 2.3 и 2.10.

Задачата се свежда до определяне на Парето-оптимални решения, удовлетворяващи системата неравенства (3.2), като се използват генетичен алгоритъм и програмният продукт QStatLab.

3.2.2 Многоцелева оптимизация по обобщена функция на полезност

Обобщената функция на полезност има много предимства в сравнение с други комбиниращи методи главно поради своята гъвкавост, тъй като позволява едновременно да се максимизират някои от изходните величини и да се минимизират други.

Оптимизационната задача се решава в следната последователност:

1. Построяват се експериментални модели за обобщената функция на полезност с тегловни коефициенти в зависимост от управляващите фактори на процеса струговане, общият вид на които е :

$$\Phi_{Ai} = A_0 + \sum_{j=1}^k A_j X_j + \sum_{j=1}^k A_{jj} X_j^2 + \sum_{j < l} A_{jl} X_j X_l . \quad (3.3)$$

Обобщената средноаритметична функция на полезност с тегловни коефициенти се определя при всеки опит в съответствие със зависимост 3.4:

$$\Phi_{Ai} = \sum_{i=1}^m w_i \eta_i; \quad (3.4)$$

където: m – брой на изследваните технологични параметри Q_i ($Q_i \equiv Y_i; Z_i; \eta_i$ - коефициенти на полезност; w_i - тегловни коефициенти за изследваните параметри Q_i .

Коефициентите на полезност η_i се определят от зависимост 3.5:

$$\eta_i = \frac{k_i(Q_i - Q_{iu})}{(Q_{imax} - Q_{imin})} \quad (3.5)$$

където: Q_{imax} и Q_{imin} - граници на полезност на изследваните параметри Q_i ;

Q_{iu} - най-безполезните резултати на изследваните параметри, получени в границите на факторното пространство;

$k_i = \pm 1$ - коефициенти, отчитащи полезността на нарастването на изследвания параметър.

2. Определят се комбинации от стойности на управляващите фактори (X_1^*, X_2^*, X_3^*) в изследваното факторно пространство, при които обобщените средноаритметични функции на полезност с тегловни коефициенти Φ_{Ai} имат максимална стойност:

$$\Phi_{Ai}(X_1^*, X_2^*, X_3^*) = (\Phi_{Ai})_{\max} > \Phi_{Ai}(X_1, X_2, X_3) . \quad (3.6)$$

3. С помощта на генетичен алгоритъм и на програмния продукт QStatLab се определят Парето-оптимални условия, които гарантират най-добра комбинация между изследваните технологични параметри на процеса.

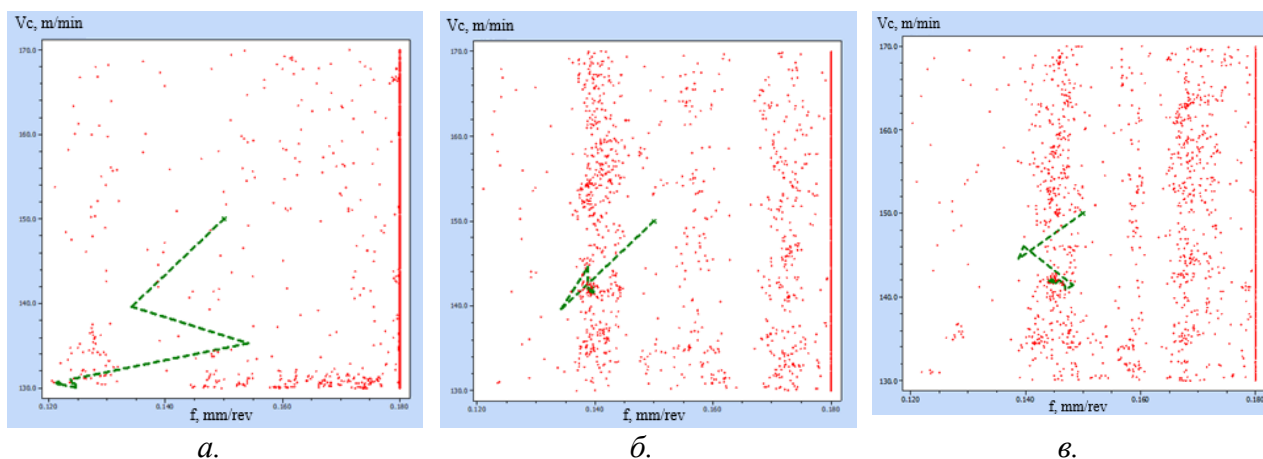
3.3. Многоцелева оптимизация на процеса струговане с използване на роботизирана станция за зареждане Fanuc BOXY Raptor AutoLoader

3.3.1. Определяне на компромисната оптимална област

Чрез използване на получените експериментални модели (таблица 2.7) и генетичен алгоритъм е проведена оптимизация на елементите на режима на рязане по критериите трайност, оценена с параметрите брой обработени детайли T и грапавост R_a . Определена е комбинация от подаване f , mm/rev и скорост на рязане V_c , m/min, при която се постига максимална трайност на режещите пластини и минимална грапавост на обработените повърхнини (таблица 3.1). Визуализация на използвания метод за търсене на оптималното решение за всяка използваните твърдосплавни пластини е представена на фиг. 3.1.

Таблица 3.1. Оптимални режими на рязане

Режещи инструменти	Оптимални режими на рязане		Технологични параметри			
	f^* , mm/rev	V_c^* , m/min	t(s) / t, min	T, бр	L, mm	Ra, μ m
CCMT09T304-F1 TP2501 SECO	0,122	130,5	5622,4/93,71	511	18701,2	1,034
CCMT09T304-MPPALBIT	0,140	141,7	4248,6/70,81	466	17093,1	1,061
CCMT09T304-F3M IC807 ISCAR	0,145	141,9	4083,5/68,06	468	17074,7	1,027



Фиг. 3.1 Визуализация на определяне на оптималния режим на рязане:

а - CCMT09T304-F1 TP2501 на фирма SECO;

б - CCMT09T304-MP на фирма PALBIT;

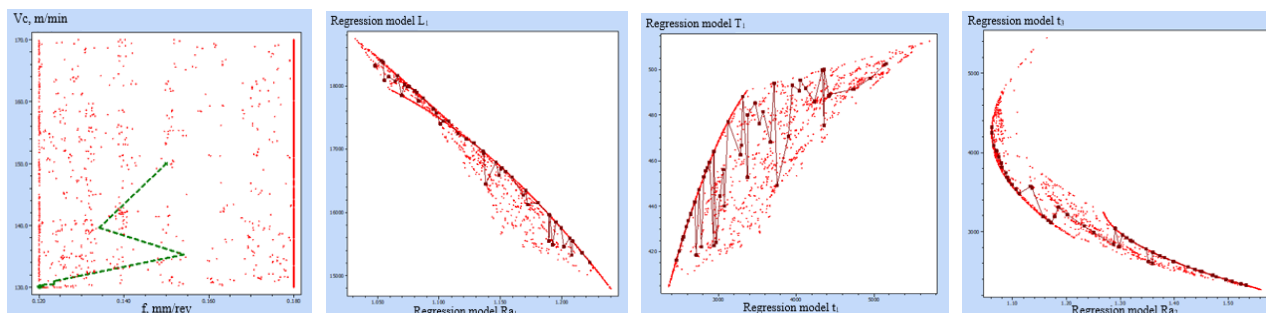
в - CCMT09T304-F3M IC807 на фирма ISCAR

Определена е комбинация между стойности на скоростта на рязане и подаването (V_c^*, f^*), при която се получава най-добра комбинация на технологичните параметри при трите вида използвани режещи пластини (таблица 3.2, фиг. 3.2). Получените резултати показват, че при определения оптимален режим на рязане най-малка грапавост и най-голяма трайност се

получават при обработване с режещите пластини SECO, а най-висока производителност - при обработване с режещите пластини ISCAR.

Таблица 3.2. Режими на рязане осигуряващи максимална трайност и минимална грапавост

Пластина	Режим на рязане			t, min	\hat{t} , min	T, бр.	\hat{T} , бр.	L, mm	\hat{L} , mm	R _a , μm	\hat{R}_a , μm
	f, mm/rev	V _c , m/min	a _p , mm								
CCMT09T304-F1TP2501 ECO	0,12	130	1,5	93,5	5715	510	512	18661	18740,9	1,028	1,032
CCMT09T304-MPPALBIT	0,12	130	1,5	91,7	5565	500	501	18295	18294,9	1,179	1,166
CCMT09T304-F3MIC807ISCAR	0,12	130	1,5	89,8	5467	490	490	17929	17933,7	1,168	1,159



Фиг. 3.2 Визуализация на определяне на оптималния режим на рязане при най-добра комбинация на технологичните параметри

3.3.2. Многоцелева оптимизация на процеса по методът на обобщената функция на полезност

3.3.2.1 Моделиране на обобщена функция на полезност

Обобщената средноаритметична функция на полезност с тегловни коефициенти е комплексен показател, характеризиращ технологичните параметри Q_i на процеса стругане (време за обработване t , трайност, определена чрез изминатия път до достигане на зададен технологичен критерий L и грапавост на обработената повърхнина Ra) ($Q_1 = t_j$, $Q_2 = L_j$ и $Q_3 = Ra_j$) и се определя в съответствие със зависимости (3.4) и (3.5):

$$\Phi_{A_i} = \sum_{i=1}^3 w_i k_i (Q_i - Q_{iu}) / (Q_{imax} - Q_{imin}), \quad (3.7)$$

където: $Q_{1u} = t_{jmax}$, $Q_{2u} = L_{jmin}$ и $Q_{3u} = Ra_{jmax}$ (таблица 2.6).

Решаването на оптимизационната задача се свежда до определяне на комбинации от стойности на управляващите фактори на процеса CNC стругане с роботизирано захранване (f^* , V_c^*), при които обобщената средноаритметична функция на полезност с тегловни коефициенти има максимум. Задачата е решена за всеки от използваните режещи инструменти (таблица 2.2), като стойностите на тегловните коефициенти са, както следва: $w_{1j} = 0.5$ за целевия параметър $Q_1 = t_j$; $w_{2j} = 0.3$ за целевия параметър $Q_2 = L_j$; $w_{3j} = 0.2$ за целевия параметър $Q_3 = Ra_j$.

Общият вид на моделите, отразяващи влиянието на скоростта на рязане и подаването върху производителността на процеса, трайността на режещите инструменти и грапавостта на обработените повърхнини, е:

$$\Phi_{A_i} = B_0 + B_1 f + B_2 V_c + B_{11} f^2 + B_{22} V_c^2 + B_{12} f V_c. \quad (3.8)$$

Моделите (3.8) са построени въз основа на експериментално определените стойности на трайността, производителността и грапавостта (таблица 2.8) и резултатите от числовите експерименти, съгласно ортогонален централно композиционен план - таблица 3.3.

При всеки опит обобщените средноаритметични функции Φ_{A1} , Φ_{A2} и Φ_{A3} се определят в съответствие със зависимост (3.6). След статистически анализ на експерименталните резултати по метода за регресионния анализ и чрез прилагане на програмния продукт QstatLab са създадени регресионни модели за Φ_{A1} , Φ_{A2} и Φ_{A3} при CNC струговане с режещи инструменти на фирми SECO, PALBIT и ISCAR (таблица 3.4).

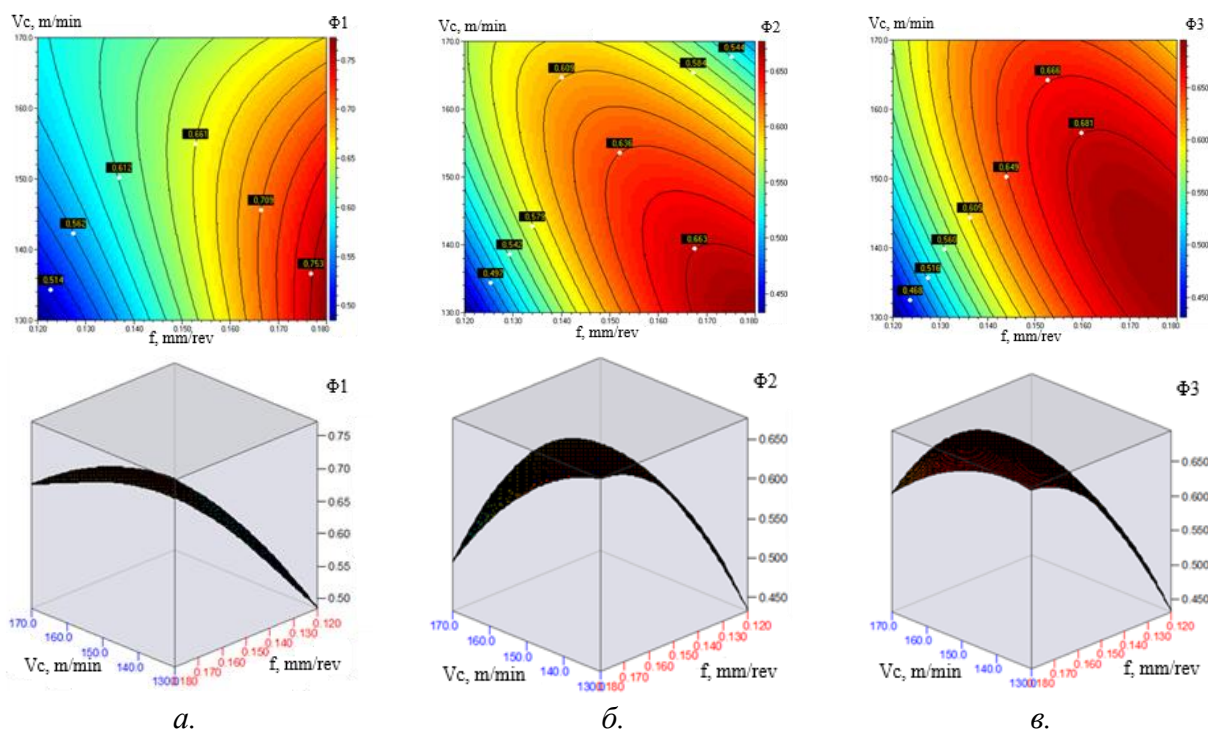
Те включват само значимите регресионни коефициенти, определени съгласно условието $\hat{t} > t_{\alpha/2, \nu}$. Регресионните модели са адекватни ($\hat{F} > F_{\alpha, \nu_1, \nu_2}$ с 95% доверителна вероятност) и описват с висока точност зависимостите между обобщените функции на полезност Φ_{A1} , Φ_{A2} и Φ_{A3} и управляващите фактори. Стойностите на коефициентите на детерминация са $\hat{R}^2 = 0.9421 \div 0.9834$ (таблица 3.4). Влиянието на условията на рязане върху обобщените средноаритметични функции на полезност в съответствие със създадените модели (таблица 3.4) е представено графично на фиг. 3.3. За да се определи степента на въздействие на управляващите фактори върху Φ_{A1} , Φ_{A2} и Φ_{A3} , е проведен дисперсионен анализ (ANOVA).

Таблица 3.3. План на експеримента и обобщени функции на полезност

№	Управляващи фактори		Коефициенти на полезност									Обобщена функция на полезност		
	f (mm/rev)	Vc (m/min)	η_{11}	η_{12}	η_{13}	η_{21}	η_{22}	η_{23}	η_{31}	η_{32}	η_{33}	Φ_1	Φ_2	Φ_3
1	0,12	130	1	0,707	0,728	1	0,935	0,871	0	0,032	0,063	0,5	0,438	0,438
2	0,18	130	0,979	0,561	0,598	0,871	0,774	0,774	0,626	0,657	0,657	0,77	0,673	0,680
3	0,12	170	0,713	0,699	0,687	0,452	0,290	0,419	0,635	0,693	0,647	0,596	0,573	0,587
4	0,18	170	0,542	0	0,299	0,323	0	0,226	0,914	1	0,940	0,662	0,5	0,598
5	0,12	150	0,944	0,885	0,843	0,806	0,645	0,710	0,232	0,304	0,276	0,545	0,523	0,520
6	0,18	150	0,798	0,303	0,563	0,645	0,419	0,548	0,828	0,888	0,853	0,767	0,630	0,704
7	0,15	130	0,870	0,889	0,992	0,968	0,871	0,806	0,306	0,345	0,371	0,617	0,612	0,626
8	0,15	170	0,720	0,583	0,8	0,387	0,161	0,323	0,777	0,848	0,797	0,649	0,589	0,655
9	0,15	150	0,808	0,885	0,934	0,742	0,548	0,613	0,532	0,601	0,578	0,650	0,642	0,660

Таблица 3.4. Експериментални модели на обобщената функция на полезност и статистически анализ на моделите

Експериментални модели	Критерий на Стюдънт	Критерий на Фишер		Коефициент на детерминация
	$t_{\alpha/2, \nu}$	\hat{F}	F_{α, ν_1, ν_2}	\hat{R}^2
$\Phi_1 = - 2,9673 - 15,85 \cdot f + 0,0292 \cdot V_c - 5,41 \cdot 10^{-5} \cdot V_c^2 - 0,085 \cdot f \cdot V_c$	2.7765	42.8112	6.3882	0.9544
$\Phi_2 = - 5,7743 + 40,1333 \cdot f + 0,0444 \cdot V_c - 64,629 \cdot f^2 - 8,54 \cdot 10^{-5} \cdot V_c^2 - 0,1283 \cdot f \cdot V_c$	3.1825	95.9719	9.0135	0.9834
$\Phi_3 = - 5,1865 + 36,5875 \cdot f + 0,03824 \cdot V_c - 65,7470 \cdot f^2 - 7,667 \cdot 10^{-5} \cdot V_c^2 - 0,0963 \cdot f \cdot V_c$	3.1825	27.0379	9.0135	0.9421



Фиг 3.3. Графични зависимости на моделите на обобщената функция на полезност при CNC стругане с режещи инструменти на фирмите: а - SECO; б - PALBIT; в – ISCAR

Анализът на експерименталните модели (таблица 3.4) и на построените въз основа на тях графични зависимости (фиг. 3.3), както и интерпретацията на резултатите от ANOVA (фиг. 3.4) показват, че подаването и скоростта на рязане оказват различно влияние върху обобщените средноаритметични функции на полезност Φ_{A1} , Φ_{A2} и Φ_{A3} :

- Подаването оказва по-голямо влияние, като с увеличаването му Φ_{A1} , Φ_{A2} и Φ_{A3} нарастват в границите $11 \div 61\%$. Влиянието на подаването е най-силно изразено при стругане с режещи инструменти на фирма ISCAR и се увеличава с намаляване на скоростта на рязане.
- Влиянието на скоростта на рязане върху Φ_{A1} , Φ_{A2} и Φ_{A3} е различно в зависимост от големината на подаването. При стругане с $f = 0.12 \text{ mm/rev}$ с увеличаване на V_c обобщените средноаритметични функции на полезност нарастват в границите от 22% до 34%. При обработване с $f \geq 0.15 \text{ mm/rev}$ нарастването на скоростта на рязане води до намаляване на Φ_{A1} , Φ_{A2} и Φ_{A3} в границите от 12 ÷ 26%. Влиянието на скоростта на рязане е най-силно изразено при стругане с режещи инструменти на фирма ISCAR и нараства с намаляване на подаването.

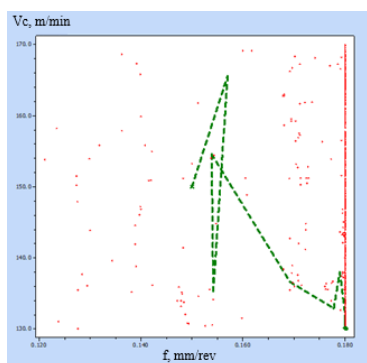
3.3.2.2. Определяне на оптималните режими на рязане

Оптималните режими на рязане (подаване f^* и скорост на рязане V_c^*) при стругане на стомана 42CrMo4 върху CNC струг с роботизирано захранване са определени чрез прилагане на генетичен алгоритъм и с помощта на програмния продукт QStatLab (таблица 3.5). Тези условия гарантират основните предимства на процеса CNC стругане с роботизирано захранване - максимална производителност (време за обработване $t \leq 3370 \text{ s}$ (56,2 min)) в съчетание с непрекъснатост на производството (трайност на режещите инструменти, оценена с изминатия път до достигане на зададен технологичен критерий на износване - $L \geq 16\,940 \text{ mm}$) и качество на обработените повърхнини (грапавост $Ra \leq 1.3 \mu\text{m}$) (таблица 3.5).

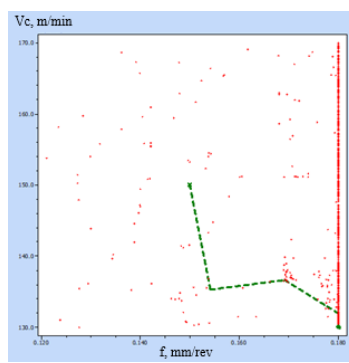
Визуализация на метода за търсене на оптималното решение за всяка от използваните твърдосплавни пластини е представена на фиг. 3.5.

Таблица 3.5. Оптимални режими на рязане

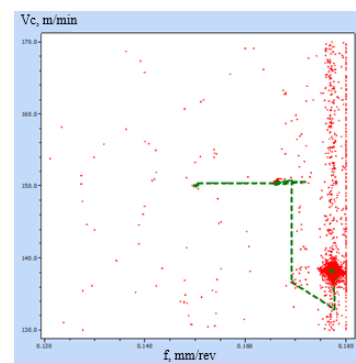
Режещ инструмент	Оптимални режими на рязане		Технологични параметри			Обобщена функция на полезност		
	f^* , mm/rev	V_c^* , m/min	t (s)/ t (min)	L , mm	R_a , μm	Φ_{A1}	Φ_{A2}	Φ_{A1}
SECO	0.18	130	3370/56,2	17 941	1.059	0.768	-	-
PALBIT	0.18	130	3254/54,2	17 380	1.269	-	0.677	-
ISCAR	0.177	138.2	3143/52,4	16 944	1.115	-	-	0.696



а.



б.



в.

Фиг. 3.5 Визуализация на определяне на оптималния режим на рязане:

а - CCMT09T304-F1 TP2501 на фирма SECO;

б - CCMT09T304-MP на фирма PALBIT;

в - CCMT09T304-F3M IC807 на фирма ISCAR

3.3.3. Сравнителен анализ на технологичните параметри на процеса струговане при оптималните режими на рязане, определени по двата метода за оптимизация

Сравнението на технологичните параметри на процеса струговане при определените по двата метода за многоцелева оптимизация оптимални стойности на елементите на режима на рязане (таблица 3.6) показва:

- по-висока производителност при работа с режимите, определени по метода на обобщената функция на полезност, като най-голяма е разликата при обработване с пластините на фирма SECO – до 40%;
- сравнима трайност на режещите инструменти при определените по двата метода оптимални режими на рязане, като разликата е от 0,77 до 4%;
- по-ниска грапавост при работа с режим на рязане, определен по метода на компромисната оптимална област, като най-голяма е разликата при обработване с пластините на фирма PALBIT – до 16,4 %.

Таблица 3.6. Сравнение на определените оптимални режими на рязане и технологичните параметри

Режещ инструмент	Компромисна оптимална област					Обобщена функция на полезност					Δt %	ΔL %	ΔR_a %
	Оптимални режими на рязане		Технологични параметри			Оптимални режими на рязане		Технологични параметри					
	f^* (mm/rev)	V_c^* (m/min)	t (min)	L (mm)	R_a (μm)	f^* (mm/rev)	V_c^* (m/min)	t (min)	L (mm)	R_a (μm)			
SECO	0.122	130,5	93,71	18701,2	1,034	0.18	130	56,2	17 941	1.059	40,03	-4,06	2,36
PALBIT	0.14	141,7	70,81	17093,1	1,061	0.18	130	54,2	17 380	1.269	23,5	1,65	16,4
ISCAR	0.145	141,9	68,06	17074,7	1,027	0.177	138.2	52,4	16 944	1.115	23,0	-0,77	7,9

3.4. Оптимизация на процеса стругане с използване на роботизирана станция за зареждане Mitsubishi RV-8CRL

3.4.1. Определяне на компромисната оптимална област

Анализът на получените резултати (таблица 2.12, фиг. 2.21 ÷ 2.24) показва, че максимална трайност на инструмента се получава при скорост на рязане $V_c = 192$ m/min, подаване $f = 0.17$ mm/rev и дълбочина на рязане $a_p = 2$ mm, а максимална производителност - при скорост на рязане $V_c = 275$ m/min, подаване $f = 0.24$ mm/rev и дълбочина на рязане $a_p = 2.8$ mm.

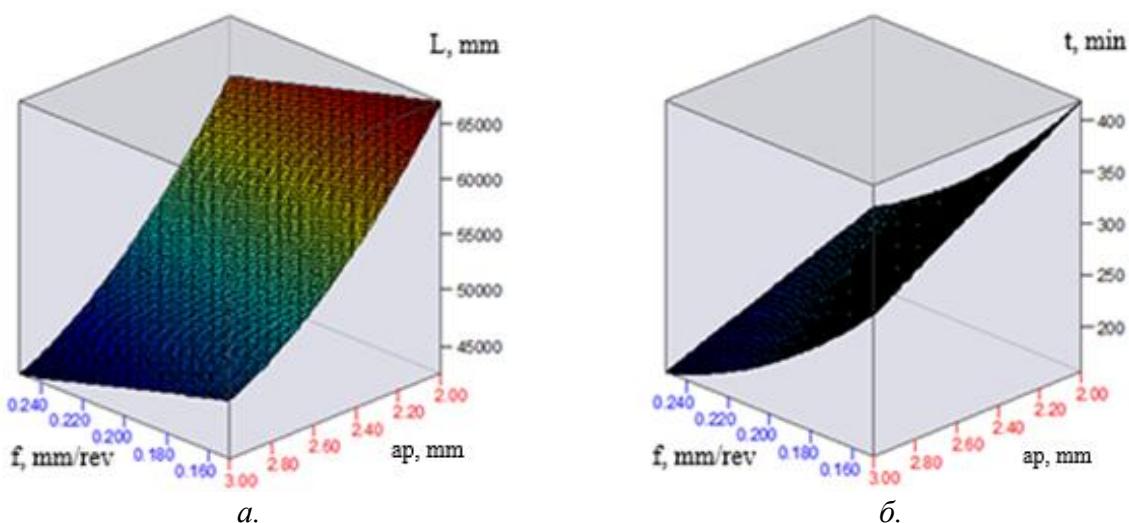
Чрез използване на получените експериментални модели (таблица 2.12) и генетичен алгоритъм е проведена компромисна оптимизация на елементите на режима на рязане, като са определени скоростта на рязане V_c , m/min, подаването f mm/rev и дълбочината на рязане a_p , mm, при които се постига комбинация между максимална трайност и максимална производителност (таблица 3.7).

Таблица 3.7. Оптимален режим на рязане и технологичните параметри

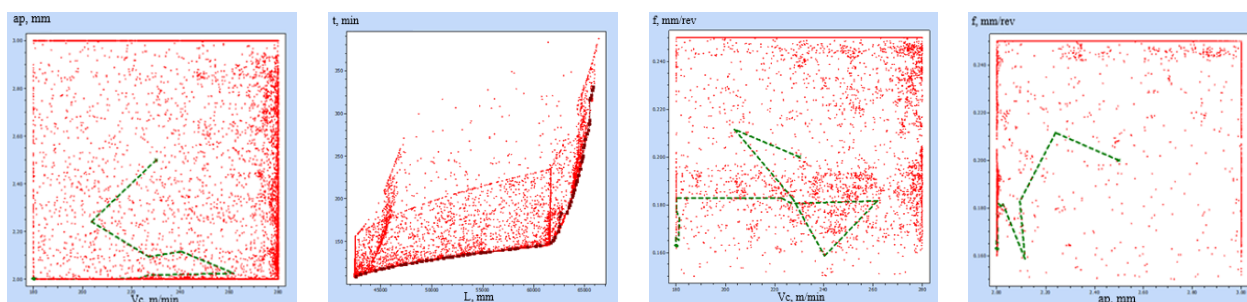
Оптимален режим на рязане			Технологични параметри	
V_c^* , m/min	a_p^* , mm	f^* , mm/rev	L , mm	t , min
180	2,0	0,16	66360,1	387,4

Трайността на режещите инструменти и производителността на процеса при оптималния режим на рязане са представени графично на фиг. 3.6.

Графичните зависимости позволяват да се избере комбинации от стойности на V_c , f и a_p , осигуряващи зададена трайност или производителност (фиг. 3.7).



Фиг. 3.6. Трайност и производителност при $V_c^* = 180$ m/min



Фиг. 3.7. Визуализация на определяне на оптималния режим на рязане при най-добра комбинация между максимална трайност и максимална производителност

3.4.2. Многоцелева оптимизация на процеса по метода на обобщената функция на полезност

3.4.2.1 Моделиране на обобщена функция на полезност

Многоцелевата оптимизация в този случай е сведена до определяне на условията на рязане - скорост на рязане V_c^* (m/min), подаване f^* (mm/rev) и дълбочина на рязане a_p^* (mm), които осигуряват комбинация между максимална трайност на режещия инструмент и максимална производителност на процеса. Общият вид на моделите, приет въз основа на извършения анализ на влиянието на скоростта на рязане, подаването и дълбочината на рязане върху производителността на процеса и трайността на режещите инструменти, е:

$$\Phi_{A_i} = B_0 + B_1 V_c + B_2 a_p + B_3 f + B_{11} V_c^2 + B_{22} a_p^2 + B_{33} f^2 + B_{12} V_c a_p + B_{23} a_p V_c + B_{13} V_c f. \quad (3.9)$$

Моделите (3.9) са построени въз основа на експериментално определените стойности на трайността и производителността, представени в таблица 2.11.

Планът на експеримента със стойностите на обобщените средноаритметични функции на полезност с тегловни коефициенти Φ_{A1} и Φ_{A2} , определени в съответствие със зависимости (3.4) и (3.5), както и изследваните параметри на процеса струговане (път L от инструмента по обработваната повърхнина до достигане на грапавост $Ra_k = 2.0 \mu\text{m}$ и време за обработване t) са представени в таблица 3.8.

Стойностите на тегловните коефициенти на обобщената средноаритметична функция на полезност са съответно: за Φ_{A1} - $w_1 = 0.2$ (за целевия параметър трайност Li); $w_2 = 0.8$ (за целевия параметър време за обработване t_j); за Φ_{A2} - $w_1 = 0.8$ (за целевия параметър трайност Li); $w_2 = 0.2$ (за целевия параметър време за обработване t_j).

В първия случай се осигурява по-висока производителност на процеса струговане чрез намаляване единичното време, а във втория случай – по-голяма трайност на режещия инструмент.

При определяне на функциите на полезност Φ_{A1} и Φ_{A2} стойностите на най-безполезния резултат и на границите на полезност на параметрите на процеса струговане са (таблица 2.11): за трайността на инструмента - $L_u = 42\ 237\ \text{mm}$; $L_g = 67\ 742\ \text{mm}$; $L_l = 42\ 237\ \text{mm}$; за времето за обработване - $t_u = 427.92\ \text{min}$; $t_g = 427.92\ \text{min}$; $t_l = 102.9\ \text{min}$.

След статистически анализ на експерименталните резултати чрез прилагане на метода за регресионния анализ и програмния продукт QstatLab са построени експериментални модели за обобщените средноаритметични функции на полезност Φ_{A1} и Φ_{A2} (таблица 3.9).

Регресионните модели са адекватни, тъй като условието $\hat{F} > F_{\alpha, \nu_1, \nu_2}$ е изпълнено с 95% доверителна вероятност. Изчислените \hat{F} и табличните F_{α, ν_1, ν_2} стойности на критерия на Фишер ($\alpha=0,05$; $\nu_1 = k - 1$ и $\nu_2 = N - k$ са степени на свобода) за всеки от регресионните модели са представени в таблица 3.8.

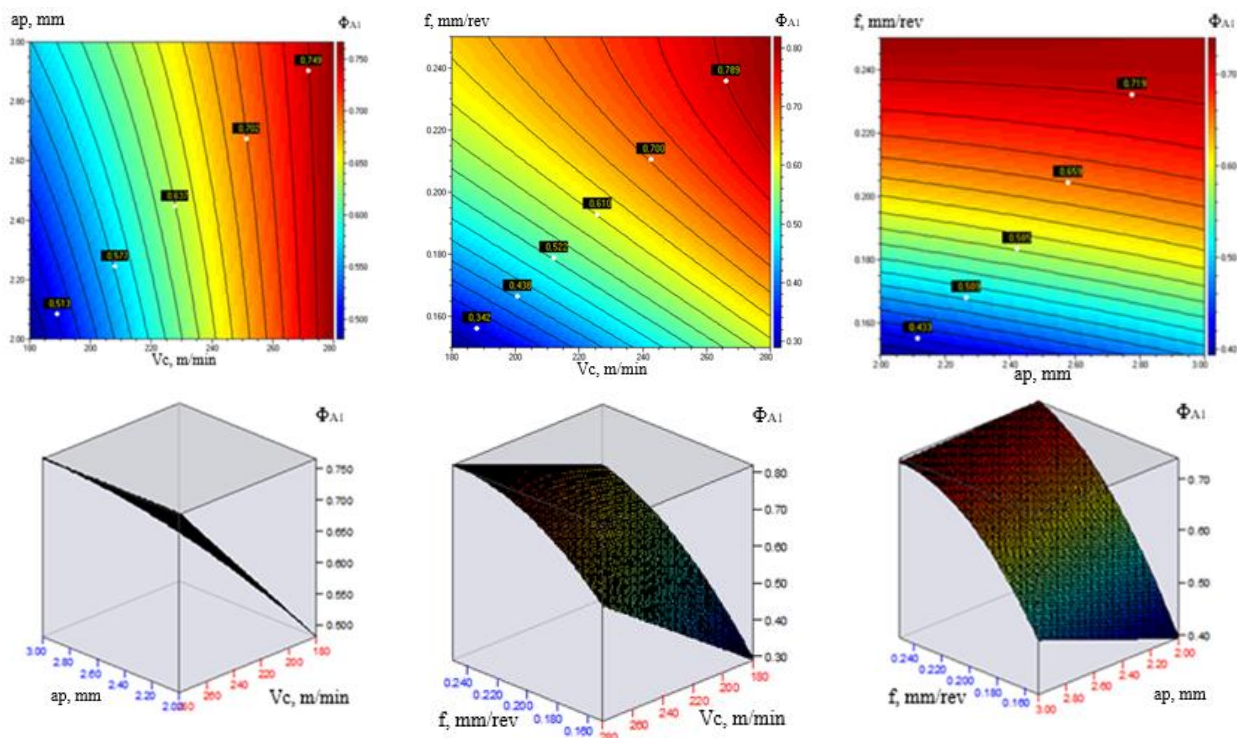
Експерименталните модели описват с висока точност зависимостите между обобщените функции на полезност Φ_{A1} и Φ_{A2} и контролните фактори. Стойностите на коефициентите на детерминация са $\hat{R}^2 = 0.971 \div 0.988$ (таблица 3.9). Влиянието на условията на рязане върху обобщените функции на полезност Φ_{A1} и Φ_{A2} е представено графично съответно на фиг. 3.8 и фиг. 3.9. За да се определи степента на въздействие на управляващите фактори върху Φ_{A1} и Φ_{A2} , е извършен дисперсионният анализ (ANOVA) с помощта на QStatLab.

Таблица 3.8. Експериментални данни и обобщена функция на полезност

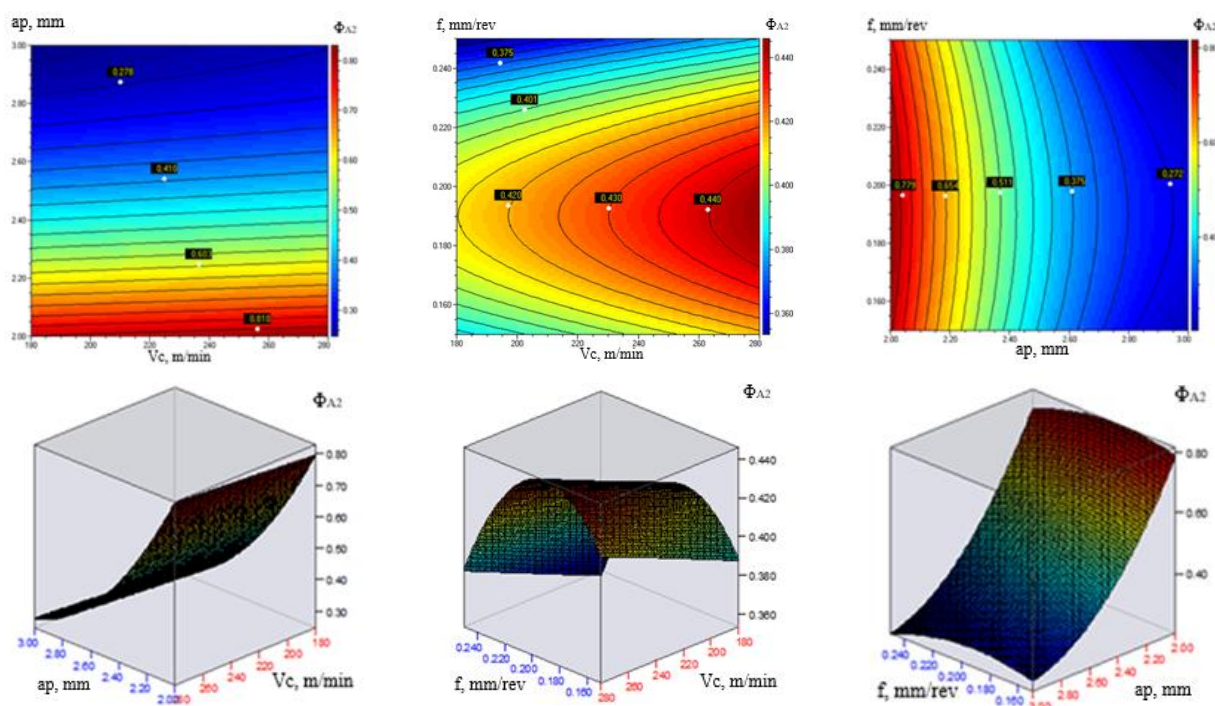
Контролни фактори			Параметри на процеса CNC струговане		Коефициенти на полезност		Обобщена функция на полезност	
x_1	x_2	x_3	L (mm)	t (min)	η_1	η_2	Φ_{A1}	Φ_{A2}
-1	-1	-1	67 742	427.92	1	0	0.2	0.8
1	-1	-1	65 170	266	0.899	0.498	0.578	0.819
-1	1	-1	47 547	295.17	0.208	0.408	0.368	0.248
1	1	-1	46 312	187.5	0.160	0.74	0.624	0.276
-1	-1	1	61 740	234	0.765	0.597	0.631	0.731
1	-1	1	61 225	148.75	0.744	0.859	0.836	0.767
-1	1	1	42 237	159.6	0	0.826	0.661	0.165
1	1	1	42 360	102.9	0.005	1	0.801	0.204
-1	0	0	52 170	246.67	0.389	0.558	0.524	0.423
1	0	0	51 465	158.17	0.362	0.83	0.736	0.456
0	-1	0	63 455	234.33	0.832	0.596	0.643	0.785
0	1	0	45 077	164.25	0.111	0.811	0.671	0.251
0	0	-1	53 439	265.3	0.265	0.500	0.453	0.312
0	0	1	50 055	147.92	0.307	0.861	0.750	0.418
0	0	0	51 888	190.13	0.378	0.732	0.661	0.449

Таблица 3.9. Експериментални модели на обобщените функции на полезност и статистически характеристики на моделите

Експериментални модели	Критерий на СТЮДЪНТ	Критерий на Фишер		Коефициент на детерминация
	$t_{\alpha/2, \nu}$	\hat{F}	F_{α, ν_1, ν_2}	\hat{R}^2
$\Phi_1 = -3,2604 + 0,0076 \cdot V_c + 0,4815 \cdot a_p + 18,061 \cdot f - 22,72 \cdot f^2 - 0,001 \cdot V_c \cdot a_p - 1,095 \cdot a_p \cdot f - 0,0145 \cdot f^2$	2,365	163.975	3.787	0.988
$\Phi_2 = 3,8723 + 0,0003 \cdot V_c + 2,7545 \cdot a_p + 6,5171 \cdot f + 0,4406 \cdot a_p^2 - 17,1429 \cdot f^2$	2,262	94.011	3.482	0.971



Фиг. 3.8 Графична визуализация на моделите на средноаритметичната обобщената функция на полезност за Φ_{A1} за CNC стругове с топливни коефициенти $W_1 = 0,2$ и $W_2 = 0,8$



Фиг.3.9. Графична визуализация на моделите на средноаритметичната обобщена функция на полезност Φ_{A1} за CNC стругове с топливни коефициенти $W_1 = 0,8$ и $W_2 = 0,2$

3.4.2.2. Определяне на оптималните режими на рязане

Оптимизационният проблем е решен чрез прилагане на генетичен алгоритъм и с помощта на програмния продукт QStatLab. Оптималните условия на рязане (скорост на рязане V_c^* , подаване f^* и дълбочина на рязане a_p^*) са тези, при които обобщените средноаритметични функции на полезност Φ_{A1} и Φ_{A2} имат максимум (таблица 3.10).

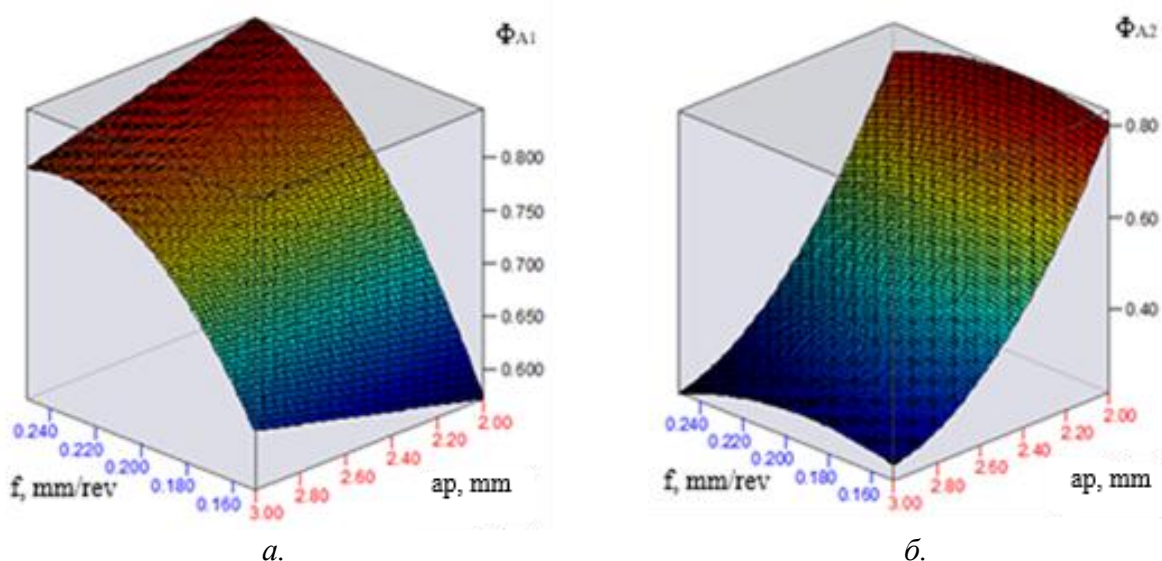
Таблица 3.10. Оптимални режими на рязане

Оптимални условия			Изходни променливи		Обобщена функция на полезност	
V_c^* , m/min	a_p^* , mm	f^* , mm/rev	L, mm	t, min	Φ_{A1}	Φ_{A2}
280	2.0	0.25	61 543.575	145,962	0.8458	-
280	2.0	0.19	63 742.485	200,159	-	0.8319

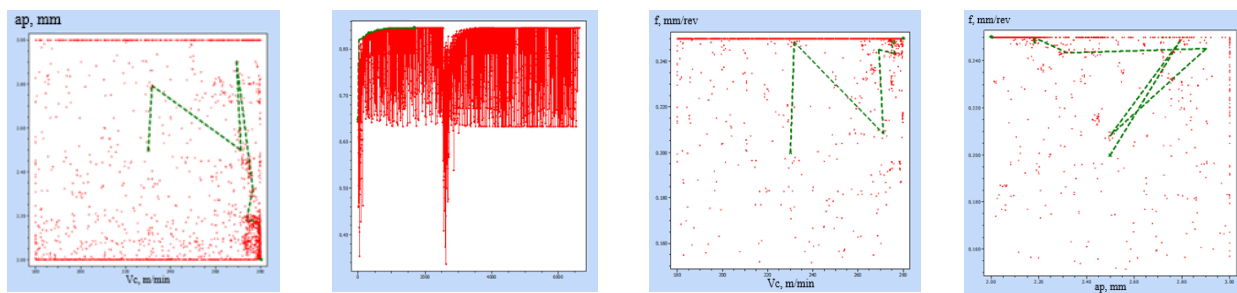
Определените Парето-оптимални решения гарантират най-добра комбинация между трайност на инструмента и производителност при струговане на закалена стомана 42CrMo4 върху CNC струг с роботизирано захранване. Условията на рязане (V_c^* , a_p^* и f^*), при които обобщената средноаритметична функция на полезност Φ_{A1} има максимум, осигуряват по-висока производителност на процеса струговане, а тези при които обобщената средноаритметична функция на полезност Φ_{A2} има максимум - по-висока трайност на режещия инструмент. Експериментално определените стойности на пътя на инструмента L , като параметър за оценка на неговата трайност, и на времето за обработване t са представени в таблица 3.10.

Влиянието на условията на рязане върху обобщената функция на полезност Φ_{A1} и Φ_{A2} при оптимална скорост на рязане $V_c^* = 280$ m/min е представено графично на фиг. 3.11

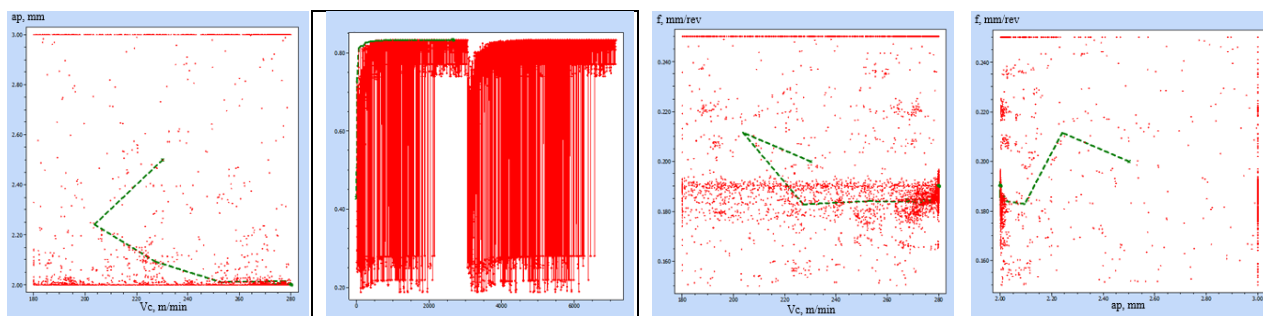
Визуализации на определяне на оптималните режими на рязане чрез прилагане на метода на обобщената средноаритметична функция на полезност (Φ_{A1} и Φ_{A2}) са показани съответно на фиг. 3.12 и фиг. 3.13.



Фиг. 3.11. Графична визуализация на моделите на средноаритметичните обобщени функции на полезност Φ_A за CNC струговане с теглови коефициенти: а - $W_1 = 0,2$ и $W_2 = 0,8$; б - $W_1 = 0,8$ и $W_2 = 0,2$ при оптимален режим на рязане $V_c^* = 280$ m/min



Фиг. 3.12 Визуализация на определяне на оптималния режим на рязане при обобщена функция на полезност Φ_{A1} с тегловни коефициенти $w_1 = 0.2$; $w_2 = 0.8$



Фиг. 3.13 Визуализация на определяне на оптималния режим на рязане при обобщена функция на полезност Φ_{A2} с тегловни коефициенти $w_1 = 0.8$; $w_2 = 0.2$

Глава четвърта: Определяне на броя режещи инструменти, осигуряващи непрекъснат работен цикъл при стругови CNC машини с роботизирано захранване

4.1. Задачи на изследването

За да се гарантира непрекъснат работен цикъл при обработване на зададен брой детайли, е необходимо:

1. Да се знае трайността на инструментите при конкретни режими на рязане.
2. Да се отчита капацитетът на магазина за заготовки (брой детайли, които могат да бъдат обработени с едно зареждане).
3. Да се отчита капацитетът на инструменталния магазин (револверната глава).
4. Да се създаде алгоритъм за определяне на минимално необходимия брой инструменти за всеки преход, така че:
 - да няма непланирани спираня поради изчерпване на трайността;
 - общият брой инструменти за операцията да не надвишава капацитета на магазина;
 - смяната на инструментите да бъде синхронизирана със захранването на магазина за заготовки и смяната на обработваната партида детайли.

Въз основа на това, разработването на методика за определяне на необходимия брой режещи инструменти, осигуряващи непрекъснат работен цикъл на работа без непланирани спираня за смяна на инструменти представлява важна стъпка към интегрирането на струговите CNC машини с роботизирано захранване в напълно автоматизирани и интелигентни производствени системи, характерни за Industry 4.0.

Задача на настоящата глава е определяне на необходимия брой режещи инструменти при операции, изпълнявани върху стругови CNC машини с роботизирано захранване, като се отчитат зададената трайност на инструментите, капацитетите на магазина за заготовки и на инструменталния магазин, така че да се гарантира непрекъснат работен цикъл на машината при обработване на зададен брой детайли.

4.2. Методика за определяне на броя на режещите инструменти

При струговите CNC машини с роботизирано хранване е от значение при зададен обем на производствената партида N и капацитет на хранващия магазин за заготовки и на инструменталния магазин, системата за управление да проверява дали трайността на инструментите е достатъчна за обработване на партидата или трябва да се активират допълнителни инструменти за отделните преходи в операцията.

Броят детайли, обработени с един инструмент при i -я технологичен преход в операцията, е:

$$N_{pi} = \text{floor} \left(\frac{L_{t,i}}{L_{w,i}} \alpha \right), \quad (4.1)$$

където: $L_{t,i}$ - трайността на инструмента, изразена чрез изминатия път до достигане за зададен технологичен критерий на износване, mm;

$L_{w,i}$ - дължина на работния ход на инструмента при обработване на повърхнината, mm;

α - коефициент на безопасност ($\alpha = 0,8 \div 0,9$);

floor () - закръгляне до най-близкото по-малко цяло число.

Необходимият брой инструменти за i -я технологичен преход в операцията $N_{t,i}$, е:

$$N_{t,i} = \text{ceil} \left(\frac{N}{N_{pi}} \right), \quad (4.2)$$

където: ceil () - закръгляне до най-близкото по-голямо цяло число.

Определеният брой инструменти за отделните преходи в операцията $N_{t,i}$ не трябва да превишава броя на позициите N_T на инструменталния магазин (револверната глава) – 4.3:

$$N_t = \sum_{i=1}^p N_{t,i} \leq N_T, \quad (4.3)$$

където: p - брой преходи в операцията.

В случай че $N_t > N_T$, са възможни следните решения:

- намаляване на броя на необходимите инструменти чрез избор на режими на рязане, осигуряващи трайност на инструментите при отделните преходи, достатъчна за спазване на условие (4.3);
- избор на машина с инструментален магазин (револверна глава) с брой позиции при спазване на условие (4.3).

При осигурено условие (4.3) необходимият брой хранвания m на магазина (палетата) на роботизираната станция със заготовки при зададен обем на производствената партида N се определя с израза 4.4:

$$m = \text{ceil}\left(\frac{N}{N_w}\right), \quad (4.4)$$

където: N_w - капацитет на захранващия магазин (палета) за заготовки.

Оставащият брой заготовки за последното захранване е:

$$N_m = N - N_w \cdot \text{floor}\left(\frac{N}{N_w}\right). \quad (4.5)$$

В зависимост от съотношението на броя детайли, обработени с един инструмент $N_{p,i}$, и обема на производствената партида N са възможни следните случаи:

1. $N_{p,i} \geq N$

В този случай не е необходима смяна на инструмента при обработване на производствената партида.

2. $N_{p,i} < N$.

Възможни са следните варианти:

2.1. Броят на детайлите, обработени с един инструмент е по-голям от капацитета на захранващия магазин (палета) - $N_{p,i} \geq N_w$.

В този случай броят пълни захранвания на магазина със заготовки, обработени с първия инструмент m_i^1 , е:

$$m_i^1 = \text{floor}\left(\frac{N_{p,i}}{N_w}\right), \quad (4.6)$$

А броят на обработените детайли до изчерпване на трайността на инструмента, оставащи за следващото захранване на магазина, се определя по 4.7:

$$N_{p,r,i}^1 = N_{p,i} - m_i^1 N_w \quad (4.7)$$

След обработването на $N_{p,r,i}^1$ детайла е необходима смяна на инструмента с допълнителен от инструменталния магазин (револверната глава) на машината, а износеният инструмент може да се смени с нов при следващото захранване на магазина.

За следващите инструменти е необходимо да се определят:

- сумарният брой захранвания на магазина със заготовки до изчерпване трайността на s_i^r инструмент (където s_i е поредният номер на инструмента ($s_i = 2 \div N_{t,i}$)) съгласно 4.8:

$$m_i^{s_i} = \text{floor} \left(\frac{\sum_{q=1}^{s_i} N_{p,i,q}}{N_W} \right); \quad (4.8)$$

- оставащият брой детайли за следващото захранване $N_{p,r,i}^{s_i}$, след които е необходима смяна на инструмента се определя съгласно 4.9:

$$N_{p,r,i}^{s_i} = \sum_{q=1}^{s_i} N_{p,i,q} - m_i^{s_i} N_W. \quad (4.9)$$

За последното захранване на магазина:

- ако $N_{p,r,i}^{s_i} \geq N_m$ - не е необходима смяна на инструмента;
- ако $N_{p,r,i}^{s_i} < N_m$ - е необходим допълнителен инструмент след обработването на $N_{p,r,i}^{s_i}$ детайла.

2.2. Броят на детайлите, обработени с един инструмент, е по-малък от капацитета на захранващия магазин (палета) - $N_{pi} < N_W$

В този случай, тъй като трайността на инструмента не може да покрие капацитета на захранващия магазин (палета), са необходими допълнителни инструменти за всяко захранване.

При първото захранване на магазина със заготовки, след обработването на $N_{p,i}$ детайла е необходима смяна на инструмента с допълнителен от инструменталния магазин (револверната глава).

Броят допълнителни инструменти $N'_{t,i}$ за обработване на останалите заготовки в магазина, е:

$$N'_{t,i,1} = \text{ceil} \left(\frac{N_W}{N_{p,i}^t} - 1 \right). \quad (4.10)$$

Общият брой обработени детайли с първия и с допълнителните инструменти се определя по 4.11:

$$N_{p\Sigma,i,1} = N_{p,i} (1 + N'_{t,i,1}). \quad (4.11)$$

Броят детайли $N'_{p,r,i}$ до изчерпване на трайността на последния инструмент, оставащи за следващото захранване на магазина (палетата), е:

$$N_{p,r,i}^1 = N_{p\Sigma,i,1} - N_W \quad (4.12)$$

След обработването на $N_{p,r,i}^1$ детайла е необходима смяна на инструмента с допълнителен от инструменталния магазин (револверната глава), а износеният инструмент може да се смени с нов при следващото захранване на магазина.

За следващите захранвания на магазина ($j > 1$, където j е поредният номер на захранване на магазина (палетата) със заготовки ($j = 1 \div m$)), необходимият брой допълнителни инструменти се определят, както следва:

- ако $N_{p,r,i}^{j-1} + N_{p,i} \geq N_W$, е необходим един допълнителен инструмент за j -мото захранване ($N'_{t,i,j} = 1$);
- ако $N_{p,r,i}^{j-1} + N_{p,i} < N_W$, необходимият брой допълнителни инструменти се определя с израза 4.13:

$$N'_{t,i,j} = \text{ceil} \left(\frac{N_W - N_{p,r,i}^{j-1}}{N_{p,i}} \right). \quad (4.13)$$

Общият брой обработени детайли се пресмята с 4.14:

$$N_{p\Sigma,i,j} = N_{p,i} N'_{t,i,j} + N_{p,r,i}^{j-1}. \quad (4.14)$$

Броят детайли $N_{p,r,i}^j$ до изчерпване на трайността на последният инструмент, оставащи за следващото захранване на магазина, след обработването на които е необходима смяна на инструмента, се определят със зависимост 4.15:

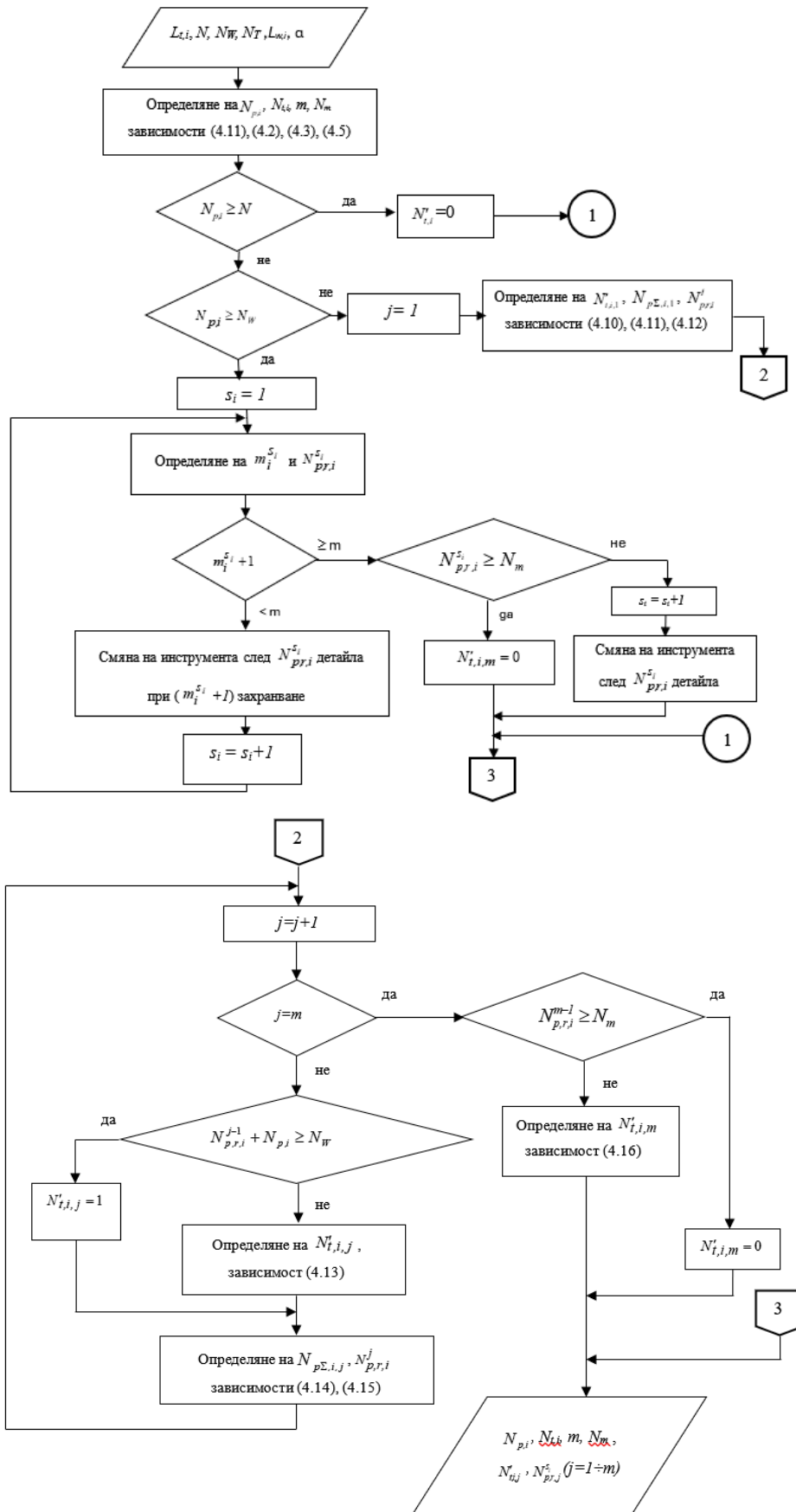
$$N_{p,r,i}^j = N_{p\Sigma,i,j} - N_W \quad (4.15)$$

За последното захранване на магазина ($j = m$):

- ако $N_{p,r,i}^{m-1} \geq N_m$, не е необходима смяна на инструмента;
- ако $N_{p,r,i}^{m-1} < N_m$, необходимият брой допълнителни инструменти след обработването на $N_{p,r,i}^{m-1}$ детайла се определя по 4.16:

$$N'_{t,i,m} = \text{ceil} \left(\frac{N_m - N_{p,r,i}^{m-1}}{N_{p,i}} \right). \quad (4.16)$$

На база на създадената методика е съставена блок – схема на алгоритъм (фиг. 4.1), която може да се използва за създаване на софтуерен продукт за определяне на необходимия брой режещи инструменти при зададена трайност на инструмента, обем на производствената партида, капацитети на инструменталния магазин (револверна глава) и на захранващия механизъм. Софтуерният продукт може да се използва за управление на работата на стругови CNC машини с роботизирано захранване.



Фиг.4.1. Блок-схема на алгоритъм за определяне на необходимия брой режещи инструменти при CNC машини с роботизирано захранване

4.3. Приложение на методиката за определяне на броя на режещите инструменти

Разработената методика е приложена при обработване на детайли от стомана 42CrMo4 върху върху CNC струг HARRIS C400 със станция за роботизирано захранване FANUC BOXI Raptor Auto Loader. Обработването се извършва на един преход ($i=1$) с режещи инструменти с металокерамични сменяеми пластини CСMT09Т304-F1 TP2501 на фирма SECO. Използвани са създадените във глава втора експериментални модели за трайността на пластините, отразяващи влиянието на подаването f и скоростта на рязане V_c (таблица 2.7), при които трайността на режещия инструмент е определена с изминатия път L_t (mm) от инструмента по обработваната повърхнина до достигане на технологичен критерий на износване - грапавост $Ra_k = 2.0 \mu\text{m}$. Дължината на работния ход на инструмента при обработване на повърхнината е $L_w = 37 \text{ mm}$. При режим на рязане $f = 0,18 \text{ mm/tr}$ и $V_c = 130 \text{ mm/min}$ трайността е $L_t = 18\ 661 \text{ mm}$ (табл. 2.6).

При приет обем на производствената партида $N = 2000$ детайла със зависимости (4.1) и (4.2) са определени:

- броят детайли, обработени с един инструмент: $N_p = 453$;
- необходимият брой инструменти: $N_t = 5$.

Разгледани са два варианта на магазини за заготовки с капацитет $N_W = 300$ и 900 броя, отговарящи на случаите $N_{p,i} \geq N_W$ и $N_{p,i} < N_W$.

Коефициентът на безопасност е $\alpha = 0.9$.

С помощта на зависимости (4.4) и (4.5) са получени:

- необходимият брой захранвания на магазина: $t = 7$ при $N_W = 300$ броя и $t = 3$ при $N_W = 900$ броя;
- броят заготовки при последното захранване: $N_m = 200$.

Получените резултати за необходимите допълнителни инструменти и на оставащия брой детайли при отделните захранвания, след които е необходима смяна на инструмента, са дадени в таблица 4.1.

Таблица 4.1. Брой допълнителни инструменти и брой детайли до смяна на инструментите

j	$N_W = 300 (N_{p,i} \geq N_W)$							$N_W = 900 (N_{p,i} < N_W)$		
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3
Брой допълнителни инструменти $N'_{t,j}$	-	1	-	1	1	-	1	1	2	1
Брой детайли до смяна на инструмента $N_{p,r}$	-	153	-	6	159	-	12	453	6	12

АНАЛИЗ И ИЗВОДИ

Въз основа на получените резултати от проведените изследвания могат да се формулират следните основни изводи:

1. Изследвано е влиянието на елементите на режима на рязане върху технологичните параметри (производителност, трайност на режещите инструменти и грапавост на обработваните повърхнини) на процеса струговане върху CNC стругови машини с два вида станции с роботизирано захранване при обработване на детайли от стомана 42CrMo4 и са получени адекватни експериментални модели с висока точност. Използвани са режещи инструменти с различни сменяеми металокерамични пластини.

2. Установено е, че влиянието на елементите на режима на рязане върху технологичните параметри на процеса CNC струговане зависи от вида на роботизираната станция и на използваните режещи инструменти:

- При обработване с роботизирана станция *Fanuc LR Mate 200iD/7L* най-силно влияние върху трайността на инструментите оказва скоростта на рязане, като най-висока трайност показват пластините на фирма *SECO*. Нарастването на скоростта на рязане и подаването водят до съответно нарастване на грапавостта на обработените повърхнини, като най-малка грапавост се получава при обработване с пластините на фирма *SECO*. Подаването и скоростта на рязане оказват приблизително еднакво влияние върху производителността, като влиянието е най-силно изразено при обработване с пластини на фирма *PALBIT*.
- При обработване с роботизирана станция *Mitsubishi RV-8CRL* най-голямо влияние върху трайността на режещите инструменти оказва подаването, а върху производителността - дълбочината на рязане. Скоростта на рязане влияе по-силно върху производителността, като с нарастването ѝ тя се увеличава. Намалването на трайността с увеличаването на скоростта в изследвания диапазон е минимално.

3. Разработена е методика за многоцелева компромисна оптимизация на процеса струговане върху CNC машини с роботизирано захранване по два метода: определяне на компромисна оптимална област; оптимизация по обобщената средноаритметична функция на полезност с тегловни коефициенти. Чрез прилагането и са определени оптималните режими на рязане, осигуряващи най-добра комбинация между технологичните параметри (производителност, трайност на режещите инструменти и грапавост на обработените повърхнини) на процеса CNC струговане с два вида станции за роботизирано захранване (*Fanuc LR Mate 200iD/7L* и *Mitsubishi RV-8CRL*) при обработване на детайли от стомана 42CrMo4 с режещи инструменти на фирми *SECO*, *PALBIT* и *ISCAR* (таблици 3.1, 3.2 и 3.10).

4. Направен е сравнителен анализ на технологичните параметри на процеса при определените оптимални режимите на рязане по двата метода за оптимизация (таблици 3.6 и 3.11). Установено е, че:

- при използване на роботизирана станция *Fanuc LR Mate 200iD/7L* се получават: по-висока производителност при работа с режимите, определени по метода на обобщената функция на полезност, като най-голяма е разликата при обработване с пластините на фирма *SECO* (до 40%); сравнима трайност на режещите инструменти при определените по двата метода оптимални режими на рязане, като разликата е от 0,77 до 4%; по-ниска грапавост при работа с режими на рязане, определени по метода на компромисната оптимална област, като най-голяма е разликата при обработване с пластините на фирма *PALBIT* (до 16,4 %) ;
- при използване на роботизирана станция *Mitsubishi RV-8CRL* се получават: по-висока производителност при работа с режимите, определени по метода на обобщената функция на полезност, като разликата е от 48,3% до 57,3% в зависимост от оптималната стойност на подаването; сравнима трайност при определените по двата метода оптимални режими на рязане, като разликата е от 3,9% до 5,7%.

5. Разработена е методика за определяне на необходимия брой режещи инструменти при операции, изпълнявани върху стругови CNC машини с роботизирано захранване, в зависимост от трайността им при определен режим на рязане, капацитетите на инструменталния магазин и на захранващия механизъм и обема на производствената партида. Методиката дава възможност за прогнозиране на броя обработени детайли, при които даден инструмент излиза от употреба, което налага необходимостта от активиране на допълнителни инструменти.

6. В съответствие с методиката за определяне на необходимия брой режещи инструменти е разработен алгоритъм, който може да се използва за създаване на софтуерен продукт за

управление на работата на стругови CNC машини с роботизирано захранване и осигуряване на непрекъснат работен цикъл при обработване на зададена партида детайли.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

А. Научно-приложни

- Експериментални модели на параметъра Ra на грапавостта, производителността и трайността на режещите инструменти при обработване върху CNC стругови машини с два вида станции за роботизирано захранване.
- Методика за многоцелева компромисна оптимизация на процеса CNC струговане с роботизирано захранване.
- Методика за определяне на броя режещи инструменти за осигуряване на непрекъснат работен процес в зависимост от трайността на инструментите, капацитета на инструменталния магазин и на захранващия механизъм и обема на производствената програма.

Б. Приложни

- Оптималните режими на рязане при струговане на подобрена стомана 42CrMo4 върху CNC стругове с роботизирани станции.
- Алгоритъм за софтуерен продукт за управление на работата на CNC стругове с роботизирано захранване, осигурявайки непрекъснат производствен процес за дадена партида детайли.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДОКТОРАНТУРАТА

1. **Kolev N.**, Aleksandrova I., Metev H., Investigation of roughness in machining of 42CrMo4+QT steel on robot-feed CNC machines. International Scientific Conference UNITECH 2023, Gabrovo, Bulgaria, Proceedings, 17-18 November 2023, pp. П80 - П85, ISSN 1313-230X.

2. **Kolev N.**, Technological capabilities and application of robots for feeding CNC machines. International Scientific Conference UNITECH 2024, Gabrovo, Bulgaria, Proceedings, 21-22 November 2024, ISSN 1313-230X.

3. **Kolev N.**, Aleksandrova I., Metev H., Investigating and modeling the durability and performance of metal cutting tools when machining rotary workpieces on robotically powered CNC lathes. International Scientific Conference UNITECH 2024, Gabrovo, Bulgaria, Proceedings, 21-22 November 2024, ISSN 1313-230X.

4. H. Metev, I. Aleksandrova, **N. Kolev**. Investigation of The Machinability of 42CrMo4+QT Steel in Tool Turning with Carbide Inserts on CNC Machines With Robotic Power Supply. Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Conference. Rezekne, Latvia, 2025, vol. IV pp. 225 - 233. <https://doi.org/10.17770/etr2025vol4.8414>, ISSN 2256-070X. (Scopus).

5. H. Metev, I. Aleksandrova, **N. Kolev**. Multi-Objective Optimization of Cutting Parameters for CNC Turning 42CrMo4 Hardened Steel Using Utility Function. Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Conference. Rezekne, Latvia, 2025, vol. IV. pp. 217 - 223. <https://doi.org/10.17770/etr2025vol4.8413>, ISSN 2256-070X. (Scopus).

6. Aleksandrova, H. Metev, **N. Kolev**. Multi-Purpose Optimization of the Turning Process on CNC Machines with Robotic Loading. International Conference AUTOMATICS AND INFORMATICS`2025, October 09 - 11, 2025, Varna, Bulgaria (ICAI'25). DOI: [10.1109/ICAI67591.2025.11324854](https://doi.org/10.1109/ICAI67591.2025.11324854).

7. Aleksandrova, H. Metev, **N. Kolev**. Determining the Number of Cutting Tools, Ensuring a Continuous Work Cycle in CNC Turning Machines with Robotic Loading. International Conference AUTOMATICS AND INFORMATICS`2025, October 09 - 11, 2025, Varna, Bulgaria (ICAI'25). DOI: [10.1109/ICAI67591.2025.11324509](https://doi.org/10.1109/ICAI67591.2025.11324509).

TITLE: OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR PART PROCESSING ON CNC MACHINES WITH ROBOTIC FEEDING

Author: mag. eng. Nikolay Penkov Kolev

ABSTRACT: *For the manufacture of critical parts in mechanical engineering, operating in conditions requiring a combination of high static strength and hardness with high impact toughness, such as parts of compressors, turbines, working elements of heavy ground and underground equipment, parts for agricultural machinery, etc., heat-treated (hardened and high-temperature annealed) steel 42CrMo4 is used. The optimal cutting modes for its processing specified and recommended in the literature are valid only for certain cutting tools and metal-cutting machines. However, there is no information on the machinability of this steel on CNC lathes in conditions of robotic feeding. In this regard, the aim of the dissertation work is to optimize the CNC turning process with robotic feeding according to the criteria of productivity, durability of cutting tools and roughness of the machined surfaces and ensuring a continuous work cycle when processing heat-treated (hardened and high-temperature tempered) steel 42CrMo4.*

In the research process, two robotic loading stations Fanuc LR Mate 200iD/7L and Mitsubishi RV-8CRL were used. The technological processes of turning on CNC machines with robotic feeding were studied and modeled. Multi-objective optimization of the studied technological processes was carried out. A methodology was developed for determining the number of cutting tools ensuring a continuous work cycle when turning on CNC machines with robotic feeding.

Keywords: *CNC turning; robotic stations; mathematical models; multi-objective optimization; continuous duty cycle*