



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
НОВИ САД



ОПТИМИЗАЦИЈА ТЕХНОЛОШКОГ ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ТАНКОЗИДНИХ АЛУМИНИЈУМСКИХ СТРУКТУРА

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментор:
Проф. др Дејан Лукић

Кандидат:
Јован Вукман

Нови Сад, 2022. године

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Јован Вукман
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција)	др Дејан Лукић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Наслов рада:	Оптимизација технолошког процеса обраде танкозидних алуминијумских структура
Језик публикације (писмо):	Српски (ћирилица)
Физички опис рада:	Страница 232 Поглавља 8 Референци 265 Табела 130 Слика 83 Графикона 0 Прилога 0
Научна област:	Машинско инжењерство
Ужа научна област (научна дисциплина):	Производно машинство
Кључне речи / предметна одредница:	Оптимизација технолошких процеса, параметри обраде, танкозидне структуре, алуминијумске легуре, методе оптимизације, фази логика, вишекритеријумско одлучивање
Резиме на језику рада:	У оквиру дисертације разматрани су поједини проблеми који се јављају при обради танкозидних структура, који се односе на нетачност димензија, толеранције облика и положаја површина, квалитет обраде површина и производност. Допринос овог истраживања је усмерен на стварање основних и напредних знања у области оптимизације параметара технолошког процеса обраде танкозидних структура од легуре алуминијума с обзиром на дефинисане критеријуме производности, тачности и квалитета обраде. Поред тога, допринос је и у јачању општих и примењених знања везаних за пројектовање и оптимизацију технолошких процеса у индустријским условима. Практична примена резултата истраживања је оријентисана на аутомобилску, војну и ваздухопловну индустрији, као и друге области где се примењују танкозидне компоненте од алуминијумских легура.

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истоветности штампане и електронске верзије и о личним подацима;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају на факултету у штампаном и електронском облику и не кориче се са тезом.

Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	24.06.2021
Датум одбране: (Попуњава одговарајућа служба)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	<p>Председник: др Марин Гостимировић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан: др Ацо Антић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан: др Стево Боројевић, ванредни професор, Машински факултет, Универзитет у Бања Луци</p> <p>Члан: др Мијодраг Милошевић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан: др Драган Родић, доцент, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан, ментор: др Дејан Лукић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p>
Напомена:	

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Jovan Vukman
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	Dejan Lukić, PhD, associate professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Thesis title:	Optimization technological process of machining thin-walled aluminium structures
Language of text (script):	Serbian language (Cyrillic)
Physical description:	Pages 232 Chapters 8 References 265 Tables 130 Illustrations 83 Graphs 0 Appendices 0
Scientific field:	Mechanical Engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Production engineering
Subject, Key words:	Process planning optimization, machining parameters, thin-walled structures, aluminium alloys, optimization methods, fuzzy logic, multi-criteria decision making
Abstract in English language:	Within the dissertation, some problems that arise during the machining of thin-walled structures, related to the inaccuracy of dimensions, tolerances of the shape and position of surfaces, the quality of surface processing and productivity, were considered. The contribution of this research is aimed at creating basic and advanced knowledge in the field of the optimization machining process planning parameters of the thin-walled aluminum alloy structures with regard to the defined criteria of productivity, accuracy and processing quality. In addition, the contribution is in the strengthening of general and applied knowledge related to the design and optimization of machining processes in industrial conditions. The practical application of research results is oriented towards the automotive, military and aviation industries, as well as other areas where thin-walled components made of aluminum alloys are applied.

² The author of doctoral dissertation has signed the following Statements:

56 – Statement on the authority,

5B – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5r – Statement on copyright licenses.

The paper and e-versions of Statements are held at the faculty and are not included into the printed thesis.

Accepted on Scientific Board on:	24.06.2021
Defended: (Filled by the faculty service)	
Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution)	<p>President: dr Marin Gostimirović, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: dr Aco Antić, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: dr Stevo Borojević, associate professor, Mechanical Faculty, University of Banja Luka</p> <p>Member: dr Mijodrag Milošević, associate professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: dr Dragan Rodić, assistant professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member, mentor: dr Dejan Lukić, associate professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p>
Note:	

САЖЕТАК

У оквиру **прве целине** дата су *уводна разматрања, теоријске основе, преглед владајућих ставова и актуелног стања у области истраживања.*

Детаљном анализом литературних информација дошло се до закључка о изузетном значају танкозидних алуминијумских структура као конструкционих делова у војној, аутомобилској и другим гранама индустрије, због високих механичких карактеристика, одличног односа између масе и носивости, добре хомогености, релативно ниске цене, добре обрадљивости итд. Исто тако закључено је да је област машинске обраде танкозидних структура од легура алуминијума у последње време предмет истраживања многих истраживача широм света. Анализирани су и описани основни проблеми који се јављају при њиховој обради које је потребно решити кроз оптимизацију технолошких процеса, што представља основни предмет и циљ истраживања.

У складу са предметом и циљем истраживања постављена је основна хипотеза дисертације којом се тврди да промена улазних параметара (режима обраде, стратегија обраде и дебљине зида) утиче на тачност, квалитет и производност обраде танкозидних алуминијумских делова.

Друга целина обухватила је *поставку и опис методологије истраживања*, која је имала за циљ давање одговора на основни предмет истраживања „Како на бази постављених критеријума оптимизације применом одговарајућих метода пронаћи најбоље решење технолошког процеса обраде танкозидне алуминијумске структуре као објекта оптимизације, за одређене производне услове“?. Основне етапе методологије су приказане помоћу одговарајућег алгорита, где су на улазу дефинисани оптимизациони задаци за два различита типа обрадних процеса, средњебрзинску и високобрзинску обраду, на основу којих су постављени планови експеримената и реализовани одговарајући процеси обраде и мерења остварених резултата.

Трећа, фундаментална целина се односи на резултате дисертације остварене кроз примену више метода, које су имале за циљ оптимизацију параметара технолошког процеса обраде танкозидних линијских структура од легуре алуминијума.

У оквиру поглавља 5.1 примењена је методологија одзивне површине и анализе варијансе (ANOVA) за оптимизацију параметара средњебрзинске обраде. На почетку је извршена анализа резултата мерења са контролом граничних вредности. Након тога применом методологија одзивне површине добијени су емпиријски модели за време обраде, одступање дебљине зида, одступање управности, одступање равности и храпавост обрађене површине у зависности од улазних параметара, дебљине зида и помака стратегије путање алата. На бази емпиријских модела добијени су 3D површински дијаграми одзивних површина, чијом анализом су дефинисани одговарајући закључци међусобног утицаја параметара. Главни циљ оптимизације који се даље разматрао је био избор оптималне вредности помака који генерише најмање одступање мере дебљине зида. На излазу су добијене оптималне вредности помака за различите дебљине зида од 0,5 до 1,5 mm, применом корака од 0,1 mm.

У оквиру поглавља 5.2 примењена је фази логика као метода вештачке интелигенције у оптимизацији квалитета обраде посматраних танкозидних делова при средњебрзинској обради. Применом ове методе рачунарске интелигенције,

креиран је интелегентни модел за предвиђање и анализу храпавости обрађене површине. Дизајн система фази логике је подељен у три основне фазе. Прва фаза се односила на дефинисање фази променљивих, друга фаза на формирање свих скупова фази подскупова променљивих са одговарајућим функцијама припадности, док је трећа фаза представљала формирање фази правила. Као фази логички алат за прорачун коришћен је MATLAB. Анализа добијених резултата је извршена применом Mamdani фази система резоновања, на основу којих је закључено да просечно одступање експерименталних резултата и фази вредности за храпавост обрађене површине износи 12.3 %, што се може прихватити као задовољавајуће за овај тип истраживања.

У оквиру поглавља 5.3 и 6.2 извршена је вишекритеријумска оптимизација параметара технолошког процеса средњебрзинске и високобрзинске обраде, применом 14 метода вишекритеријумског одлучивања (*енгл. Multi-Criteria Decision Making-MCDM*). На почетку је представљен проблем вишекритеријумског одлучивања, као и основне методе које су коришћене у раду. Након тога је представљен модел интегралног вишекритеријумског вредновања, односно рангирања алтернативних решења, којим је дефинисана методологија избора оптималног решења примене великог броја метода, кроз корелациону анализу. За решавање проблема одређивања оптималних параметара технолошког процеса обраде изабране су четири варијанте функција циља: 1. Једнака значајност критеријума (где сви критеријуми имају једнак тежински коефицијент), 2. Тачност обраде (где су најзначајнији критеријуми тачност мера, тачност облика и тачност положаја), 3. Производност (где је најзначајнији критеријум време обраде, односно количина скинуте струготине) и 4. Квалитет обраде (где је најзначајнији критеријум добијена храпавост обрађене површине). За сваку од наведених функција циља дефинисани су тежински коефицијенти критеријума оптимизације применом АХП методе и проверена доследност доносиоца одлуке прорачуном коефицијената конзистенције.

На бази резултата 14 MCDM метода, применом методологије интегралног оцењивања/рангирања, добијен је оптималан ранг параметара технолошког процеса обраде и рангови осталих алтернатива ових параметара за сваку од постављених функција циља.

У оквиру поглавља 6.1, на основу добијених експерименталних резултата извршена је ANOVA анализа, регресиона анализа и на крају оптимизација параметара процеса високобрзинске обраде танкозидних линијски делова. Реализована је једнокритеријумска оптимизација критеријума храпавости обрађене површине, количине уклоњеног материјала, одступања дебљине зида, равности површина, паралелности површина и управности површина у зависности од улазних фактора, дебљине зида, броја обртаја, помака, дубине обраде и стратегија обраде-путање алата.

Основни допринос овог истраживања је усмерен на стварање основних и напредних знања у области оптимизације елемената технолошког процеса обраде танкозидних структура од легуре алуминијума с обзиром на дефинисане критеријуме производности, тачности и квалитета обраде. Поред тога допринос је и у јачању општих и примењених знања везаних за пројектовање и оптимизацију технолошких процеса у индустријским условима.

ABSTRACT

In the **first part**, introductory considerations, theoretical foundations, an overview of the ruling attitudes the current situation in the field of research are given.

A detailed analysis of literature information led to the conclusion of the exceptional importance of thin-walled aluminum structures as structural parts in the military, automotive and other branches of industry, due to high mechanical characteristics, excellent ratio between mass and load capacity, good homogeneity, low price, good machinability, etc. It was also concluded that the field of machining of thin-walled structures made of aluminum alloys has recently been the subject of research by many researchers around the world. The basic problems that arise during their machining, which need to be solved through the optimization of technological processes, are analyzed, and described, which is the main subject and goal of the research.

In accordance with the subject and goal of the research, the basic hypothesis of the dissertation was set, which claims that the change of input parameters (cutting parameters, tool path strategy and wall thickness) affects the accuracy, quality, and productivity of machining thin-walled aluminum parts.

The second unit included the setting and description of the research methodology, which aimed to answer the basic research subject "How to find the best solution for the technological process of thin-walled aluminum structure processing as an object of deoptimization, for certain production conditions, based on the set optimization criteria using appropriate methods"?. The basic stages of the methodology are shown using the appropriate algorithm, where the optimization tasks for two different types of machining processes, medium-speed, and high-speed machining, are defined at the input, on the basis of which the plans of the experiments are set and the corresponding processes of processing and measurement of the achieved results are implemented.

The third, fundamental unit refers to the results of the dissertation achieved through the application of several methods, which aimed to optimize the parameters of the technological process of machining thin-walled linear structures made of aluminum alloy.

Within the framework of chapter 5.1, the methodology of the response surface and the analysis of variance (ANOVA) was applied for the optimization of the parameters of medium-speed processing. At the beginning, the analysis of the measurement results was carried out with the control of limit values. After that, by applying the response surface methodology, empirical models were obtained for processing time, wall thickness deviation, squareness deviation, flatness deviation and roughness of the machined surface depending on the input parameters, wall thickness and tool path strategy shift. Based on empirical models, 3D surface diagrams of responsive surfaces were obtained, with the analysis of which the corresponding conclusions of the mutual influence of parameters were defined. The main optimization objective that was further considered was the selection of the optimal displacement value that generates the smallest deviation of the wall thickness measurement. At the output, optimal displacement values were obtained for different wall thicknesses from 0.5 to 1.5 mm, using steps of 0.1 mm.

In chapter 5.2, fuzzy logic was applied as an artificial intelligence method in optimizing the processing quality of the observed thin-walled parts during medium-speed processing. By applying this computer intelligence method, an intelligent model was created for predicting and analyzing the roughness of the treated surface. The design of the fuzzy logic system is divided into three basic phases. The first phase was related to the definition of fuzzy variables, the second phase was to the formation of all sets of fuzzy

subsets of variables with the appropriate fitness functions, while the third phase represented the formation of fuzzy rules. MATLAB was used as a fuzzy logic calculation tool. The analysis of the obtained results was conducted by applying the Mamdani fuzzy reasoning system, based on which it was concluded that the average deviation of experimental results and fuzzy values for the roughness of the treated surface is 12.3%, which can be accepted as satisfactory for this type of research

Within chapters 5.3 and 6.2, multi-criteria optimization of technological process planning of medium-speed and high-speed machining was conducted, using 14 methods of multi-criteria decision making (Multi-Criteria Decision Making-MCDM). At the beginning, the problem of multi-criteria decision-making was presented, as well as the basic methods used in the work. After that, a model of integral multi-criteria evaluation, i.e., ranking of alternative solutions, was presented, which defined the methodology of choosing the optimal solution using a large number of methods, through correlation analysis. To solve the problem of determining the optimal parameters of the technological processing planning, four variants of the objective function were chosen: 1. Equal importance of criteria (where all criteria have the same weighting coefficient), 2. Accuracy of machining (where the most important criteria are accuracy of measurements, accuracy of shape and accuracy of position), 3. Productivity (where the most important criterion is machining time, that is, the amount of chips removed) and 4. Machining quality (where the most important criterion is the roughness of the machined surface). For each of the stated objective functions, the weighting coefficients of the optimization criteria were defined using the AHP method and the consistency of the decision maker was checked by calculating the consistency coefficients.

Based on the results of 14 MCDM methods, using the integral evaluation/ranking methodology, the optimal ranking of parameters of the technological processing planning and the rankings of other alternatives of these parameters for each of the set objective functions were obtained. Within the framework of chapter 6.1, based on the obtained experimental results, ANOVA analysis, regression analysis and finally optimization of process parameters of high-speed machining of thin-walled linear parts were performed. A one-criteria optimization of the criteria of the roughness of the machined surface, the amount of material removed, wall thickness deviations, surface flatness, surface parallelism and surface perpendicularity were realized depending on the input factors, wall thickness, number of revolutions, displacement, machining depth and machining tool path strategy.

The main contribution of this research is aimed at creating basic and advanced knowledge in the field of optimization of elements of the technological process of processing thin-walled aluminum alloy structures, considering the defined criteria of productivity, accuracy and machining quality. In addition, the contribution is in the strengthening of general and applied knowledge related to the design and optimization of technological processes in industrial conditions.

САДРЖАЈ

СПИСАК СЛИКА	IV
СПИСАК ТАБЕЛА	VIII
ПРЕГЛЕД СКРАЋЕНИЦА	XIII
ПРЕГЛЕД ОЗНАКА	XV
КОРИШЋЕНИ СОФТВЕРИ	XV
1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА.....	1
1.1 Предмет истраживања.....	1
1.2 Циљеви истраживања.....	5
1.3 Хипотезе истраживања.....	6
1.4 Фазе истраживања.....	7
1.5 Структура докторске дисертације	8
2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ И ПРЕГЛЕД ВЛАДАЈУЋИХ СТАВОВА У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА.....	10
2.1 Прилази у пројектовању и оптимизацији технолошких процеса	10
2.2 Основне конструкционе карактеристике танкозидних делова	15
2.3. Основне технолошке карактеристике танкозидних делова.....	17
2.3.1 Деформације при обради танкозидних делова	17
2.3.2 Савремени трендови у процесу обраде танкозидних делова	21
2.3.3 Карактеристични параметри технолошког процеса обраде танкозидних делова	23
3. ПРЕГЛЕД АКТУЕЛНОГ СТАЊА У ОБЛАСТИ ОБРАДЕ ТАНКОЗИДНИХ ДЕЛОВА	25
3.1 Преглед истраживања у области статичких и динамичких проблема обраде	25
3.2 Преглед истраживања у области аналитичких модела	26
3.3 Преглед примене рачунарских технологија у области истраживања.....	27
3.3.1 Предвиђање вибрација.....	27
3.3.2 Предвиђање димензионалних грешака	28
3.4 Преглед истраживања у области оптимизације процеса израде танкозидних делова	29
3.5 Завршна разматрања литературних истраживања у области обраде танкозидних делова	33
4. ПОСТАВКА И ОПИС МЕТОДОЛОГИЈЕ ИСТРАЖИВАЊА.....	36
4.1 Дефинисање методологије истраживања.....	36
4.1.1 Метода централног композитног планирања експеримента.....	38
4.1.2 Taguchi-јева метода планирања експеримента	38
4.2 Дефинисање оптимизационих задатака за средњебрзинску обраду.....	40
4.2.1 Дефинисање материјала и припремка	40

4.2.2	Дефинисање обратка	41
4.2.3	Дефинисање алата за обраду глодањем	41
4.2.4	Избор CNC машине алатке и СХП-а.....	42
4.2.5	Избор САМ програмских система	43
4.3	Дефинисање оптимизационих задатака за високобрзинску обраду.....	43
4.3.1	Дефинисање материјала и припремка	44
4.3.2	Дефинисање обратка	44
4.3.3	Дефинисање алата за обраду глодањем	44
4.3.4	Избор CNC машине алатке и СХП-а.....	44
4.3.5	Избор САМ програмских система	45
4.4	Поставка планова експеримената	46
4.4.1	План експеримента за средњебрзинску обраду	46
4.4.2	План експеримента за високобрзинску обраду.....	50
4.5	Пројектовање варијанти технолошког процеса обраде.....	53
4.6	Мерење резултата експерименталних истраживања.....	53
4.6.1	Мерење резултата експеримената при средњебрзинској обради	53
4.6.2	Мерење резултата експеримената за високобрзинску обраду	57
5.	ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАМЕТАРА ТЕХНОЛОШКОГ ПРОЦЕСА СРЕДЊЕБРЗИНСКЕ ОБРАДЕ	60
5.1	Примена методологије одзивне површине	60
5.1.1	Анализа резултата мерења и контрола граничних вредности	60
5.1.2	Вредновање експерименталних резултата и оптимизација.....	65
5.1.3	Верификација оптимизационих резултата	67
5.1.4	Завршна разматрања оптимизације параметара средњебрзинске обраде.....	67
5.2.	Примена фази логике у оптимизацији квалитета обраде танкозидних делова ...	68
5.2.1	Основне примене фази логике у посматраном истраживању	68
5.2.2	Дизајн система фази логике за анализу и оптимизацију квалитета обраде	69
5.2.3	Анализа добијених резултата применом Mamdani фази система.....	76
5.3.	Вишекритеријумска оптимизација параметара технолошког процеса средњебрзинске обраде	79
5.3.1	Основе вишекритеријумског одлучивања.....	79
5.3.2	Модел интегралног вишекритеријумског рангирања алтернатива	82
5.3.3	Дефинисање функција циља и одређивање тежинских коефицијената критеријума	84
5.3.4.	Примена метода вишекритеријумске оптимизације.....	87
5.3.5	Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 1. функције циља	88
5.3.5.1	Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације	88

5.3.5.2 Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 1. функцију циља	91
5.3.6 Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 2. функције циља	96
5.3.6.1 Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације	96
5.3.6.2 Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 2 функцију циља	99
5.3.7 Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 3. функције циља	104
5.3.7.1 Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације	104
5.3.7.2 Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 3 функцију циља	107
5.3.8 Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 4. функције циља	112
5.3.8.1 Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације	112
5.3.8.2 Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 4 функцију циља	115

6. ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАМЕТАРА ТЕХНОЛОШКОГ ПРОЦЕСА ВИСОКОБРЗИНСКЕ

ОБРАДЕ	121
6.1 Примена ANOVA и регресионе анализе	121
6.1.1 Оптимизација параметара процеса обраде у функцији храпавости обрађене површине	122
6.1.1.1 Анализа варијансе (ANOVA) за храпавост обрађене површине.....	125
6.1.1.2 Регресиона анализа за храпавост обрађене површине.....	127
6.1.1.3 Оптимизација добијених резултата за храпавост обрађене површине.....	130
6.1.2 Оптимизација параметара процеса обраде у функцији количине уклоњеног материјала.....	131
6.1.2.1 Анализа варијансе (ANOVA) за количину уклоњеног материјала	133
6.1.2.2 Регресиона анализа за количину уклоњеног материјала	134
6.1.2.3 Оптимизација добијених резултата за количину уклоњеног материјала ...	137
6.1.3 Оптимизација параметара процеса обраде у функцији одступања дебљине зида танкозидног дела	138
6.1.3.1 Анализа варијансе (ANOVA) за одступање дебљине зида	140
6.1.3.2 Регресиона анализа за одступање дебљине зида - Да	141
6.1.3.3 Оптимизација добијених резултата за одступање дебљине зида.....	144
6.1.4 Оптимизација параметара процеса обраде у функцији равности површина	145
6.1.4.1 Анализа варијансе (ANOVA) за одступање дебљине зида	147
6.1.4.3 Регресиона анализа за одступање дебљине зида	148
6.1.4.2 Оптимизација добијених резултата за одступање равности површина.....	151
6.1.5 Оптимизација параметара процеса обраде у функцији паралелности површина	152
6.1.5.1 Анализа варијансе (ANOVA) за паралелност површина.....	154

6.1.5.2 Регресиона анализа за паралелност површина.....	155
6.1.5.3. Оптимизација добијених резултата за одступање паралелности површина	158
6.1.6 Оптимизација параметара процеса обраде у функцији управности површина	159
6.1.6.1 Анализа варијансе (ANOVA) за управност површина.....	161
6.1.6.2 Регресиона анализа за управност површина.....	162
6.1.6.3 Оптимизација добијених резултата за одступање управности површина ..	165
6.2. Вишекритеријумска оптимизација параметара технолошког процеса високобрзинске обраде	166
6.2.1 Дефинисање функција циља и одређивање тежинских коефицијената критеријума	166
6.2.2 Примена метода вишекритеријумске оптимизације	168
6.2.3 Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 1. функције циља	168
6.2.3.1 Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације за 1. функцију циља	168
6.2.3.2 Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 1. функцију циља	172
6.2.4 Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 2. функције циља	178
6.2.4.1 Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације за 2. функцију циља	178
6.2.4.2 Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 2. функцију циља	181
6.2.5 Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 3. функције циља	186
6.2.5.1 Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације за 3. функцију циља	186
6.2.5.2. Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 3. функцију циља	189
6.2.6 Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 4. функције циља	195
6.2.6.1 Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације за 4. функцију циља	195
6.2.6.2 Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 4. функцију циља	198
7. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА.....	204
8. ЛИТЕРАТУРА.....	212

СПИСАК СЛИКА

Слика 1.1. Основни појмови техноекономске оптимизације	2
Слика 1.2. Нивои варијантности технолошких процеса израде производа	2
Слика 2.1. Различити облици танкозидних делова	16
Слика 2.2. Фактори који утичу на деформације при обради танкозидних делова ...	18
Слика 2.3. Грешке обраде танкозидних линијских делова	19
Слика 2.4. Савијање зида и грешке облика при обради танкозидних линијских делова	19
Слика 2.5. 2D приказ анализе деформације у хоризонталном правцу при обради кружне криволинијске танкозидне структуре	20
Слика 2.6. Процес обрада од високе ка ниској крутости криволинијског дела	20
Слика 2.7. Процес обрада од ниске ка високој крутости криволинијског дела (а) путања алата, (б) стартна тачка и (в) правац обраде	21
Слика 2.8. Скица настанка лома услед грешака у стратегији обраде.....	21
Слика 2.9. Различите технике комбиновања пролаза при обради глодањем танкозидних делова: (а) нема преклапања пролаза са једне и друге стране,	23
Слика 2.10. Параметри обраде танкозидних делова	23
Слика 2.11. Параметри процеса глодања који утичу на израду танкозидних делова	24
Слика 3.1. Шематска илустрација танкозидних делова (а) CAD модел турбине (лопатице); (б) сегмент лопатице; (ц) модални облик почетног радног комада и (д) модификације структуре додавањем додатне масе	29
Слика 3.2. Утицајни параметри технолошког процеса обраде танкозидних структура	34
Слика 4.1. Основни алгоритам методологије истраживања.....	36
Слика 4.2. 3D модел танкозидне структуре линијског типа за различите дебљине зида.....	37
Слика 4.3. Оптимизациони задатак процеса средњебрзинске обраде глодањем танкозидних линијских делова.....	40
Слика 4.4. Тип глодала коришћени при експерименту-вретенасто глодало произвођача Sandvik Coromant	41
Слика 4.5. Троосни обрадни центар EMCO MILL 450.....	42
Слика 4.6. Путање кретања алата за машинску обраду.....	43
Слика 4.7. Оптимизациони задатак процеса високобрзинске обраде глодањем танкозидних линијских делова.....	43
Слика 4.8. Вретенасто глодало произвођача YG.....	44
Слика 4.9. Обрадни центар DIGMA HSC 850.....	45
Слика 4.10. Путање кретања алата за машинску обраду у програмском систему Cimatron.....	46
Слика 4.11. Поступак дефинисање нумеричких и нунумеричких фактора у софтверу DesignExpert.....	47

Слика 4.12. Поступак дефинисање фактора за стратегију путање алата у софтверу DesignExpert	47
Слика 4.13. Редослед извођења пролаза при обради танкозидних алуминијумских структура за средњебрзинску обраду при дубини обраде $a_p=3\text{ mm}$	53
Слика 4.14. Мерење на КММ дебљине зида, одступања управности и равности	54
Слика 4.15. Приказ плана мерења хрпавости обрађених површина - R_a	55
Слика 4.16. КММ Mitotoyo Strato – APEX 9166.....	58
Слика 4.17. Мерење хрпавости (R_a) применом уређаја Mitotoyo SJ-301	58
Слика 5.1. Интервали мерених вредности за време обраде, дебљину зида, одступање управности, одступање равности и хрпавост обрађене површине.....	61
Слика 5.2. Време обраде T за стратегије обраде Путања 1 и Путања 3.....	62
Слика 5.3. 3D површински дијаграм одзивних површина одступања дебљине зида Δa за стратегију обраде - Путања 1	62
Слика 5.4. 3D површински дијаграм одступања дебљине зида Δa за стратегију обраде Путања 3.....	63
Слика 5.5. 3D површински дијаграм одступања управности Δb за стратегију обраде Путања 1	64
Слика 5.6. 3D површински модел одступања равности Δc за стратегију обраде Путања 1	64
Слика 5.7. 3D површински дијаграм за хрпавост обрађене површине R_a при коришћењу стратегије обраде Путања 3	65
Слика 5.8. Систем фази закључивања	68
Слика 5.9. Matandі систем фази закључивања за дефинисани проблем – улазно излазни дијаграм.....	70
Слика 5.10. Функције припадности за улазне величине: а) дебљину зида, б) вредност помака, ц) стратегију обраде и излазну величину д) хрпавост обрађене површине	75
Слика 5.11. Поређење експерименталних резултата са фази вредностима и приказ просечне грешке.....	76
Слика 5.12. 3D приказ хрпавост обрађене површине за случај кад су дебљина зида и стратегија обраде променљиве за вредности помака а) 150 mm/min ; б) 250 mm/min и в) 350 mm/min	77
Слика 5.13. 2D приказ утицај хрпавости обрађене површине када су дебљина зида и помака константе вредности а) 0.5 mm и 150 mm/min ; б) 1 mm и 250 mm/min ; и в) 1.5 mm и 350 mm/min	77
Слика 5.14. Приказ ANOVA резултата утицај улазних фактора на хрпавост обрађене површине.....	78
Слика 5.15. Релација елемената код вишекритеријумског одлучивања	81
Слика 6.1. S/N одзив за хрпавост обрађене површине	124
Слика 6.2. Одзив средње хрпавости по утицајним факторима	125
Слика 6.3. Одговарајуће расподеле за хрпавост обрађене површине.....	128
Слика 6.4. Контурни приказ различитих предикционих фактора на хрпавост обрађене површине.....	129

Слика 6.5. Површински приказ између два предикциона фактора и једног одзивног фактора (храпавост обрађене површине).....	129
Слика 6.6. Тагисхи-јеву предикциони резултати за оптимилане улазне параметре применом софтвера MiniTab.....	130
Слика 6.7. S/N одзив на количину уклоњеног материјала по утицајним факторима за функцију циља што веће то боље	132
Слика 6.8. Утицајни фактори на количину уклоњеног материјала - MRR.....	133
Слика 6.9. Одговарајуће расподеле за количину уклоњеног материјала	135
Слика 6.10. Контурни приказ различитих предикционих фактора на количину уклоњеног материјала.....	136
Слика 6.11. Површински приказ између два предикциона фактора и једног одзивног фактора (количине уклоњеног материјала).....	136
Слика 6.12. Предикциони резултати за оптималне режиме обраде за количину уклоњеног материјала	137
Слика 6.13. S/N одзив за одступање дебљине зида.....	139
Слика 6.14. Утицајни фактори на одступање дебљине зида	140
Слика 6.15. Приказ одговарајућих расподела за одступање дебљине зида - Да.....	142
Слика 6.16. Приказује контурни приказ различитих предикционих параметара за одступање дебљине зида - Да.....	143
Слика 6.17. Приказан површински приказ између два предикциона параметра и једног одзивног параметра	143
Слика 6.18. Тагисхи-јеву предикциони резултати за оптимилане улазне параметре применом софтвера MiniTab.....	144
Слика 6.19. S/N одзив за равност површина	146
Слика 6.20. Утицајни фактори на равност површина.....	147
Слика 6.21. Тагисхи-јеву предикциони резултати за оптимилане улазне параметре применом софтвера MiniTab.....	151
Слика 6.22. Приказ одговарајућих расподела за равност површина.....	149
Слика 6.23. Контурни приказ различитих предикционих параметара за одступање равности површина - Дв.....	150
Слика 6.24. Површински приказ између два предикциона параметра и једног одзивног параметра за одступање равности површина.....	150
Слика 6.25. S/N однос за паралелност површина.....	153
Слика 6.26. Одзив паралелности површина по утицајним факторима.....	154
Слика 6.27. Одговарајуће расподеле за одступање паралелности површина.....	156
Слика 6.28. Контурни приказ различитих предикционих параметара за одступање паралелности површина - Дс.....	157
Слика 6.29. Површински приказ између два предикциона параметра и једног одзивног параметра параметара за одступање паралелности површина - Дс.....	157
Слика 6.30. Тагисхи-јеву предикциони резултати за оптимилане улазне параметре применом софтвера MiniTab.....	158
Слика 6.31. S/N однос за управност површина	160
Слика 6.32. Утицајни фактори на управност површина	161
Слика 6.33. Одговарајуће расподеле за одступање управности површина	163
Слика 6.34. Контурни приказ различитих предикционих параметара за одступање управности површина - Дд.....	164

Слика 6.35. Површински приказ између два предкициона параметра и једног одзивног параметра параметара за одступање управности површина – Δd 164

Слика 6.36. Таguchi-јеви предикциони резултати за оптимилане улазних параметара применом софтвера MiniTab 165

СПИСАК ТАБЕЛА

<i>Табела 3.1. Ефекат параметара обраде на преостале напоне, силе резања, увијање и хрпавост обрађене површине</i>	<i>31</i>
<i>Табела 4.1. Механичке особине легуре алуминијума 7075.....</i>	<i>40</i>
<i>Табела 4.2. Хемијски састав легуре алуминијума 7075</i>	<i>41</i>
<i>Табела 4.3. Карактеристике алата R216.32-10025-AK32A</i>	<i>42</i>
<i>Табела 4.4. Карактеристике обрадног центра EMCO MILL 450.....</i>	<i>42</i>
<i>Табела 4.5. Карактеристике алата</i>	<i>44</i>
<i>Табела 4.6. Карактеристике поменутог обрадног центра</i>	<i>45</i>
<i>Табела 4.7. Улазни параметри и нивои варијације.....</i>	<i>46</i>
<i>Табела 4.8. Општи план експеримента за средњебрзинску обраду.....</i>	<i>48</i>
<i>Табела 4.9. План експеримента за средњебрзинску обраду.....</i>	<i>49</i>
<i>Табела 4.10. Улазни параметри и нивои варијације.....</i>	<i>50</i>
<i>Табела 4.11. Општи Тагучијеве ортогоналним низ L27 са 13 нивоа варијације.....</i>	<i>51</i>
<i>Табела 4.12 Дефинисана матрица плана експеримента.....</i>	<i>52</i>
<i>Табела 4.13. План експеримента и резултати мерења/прорачуна</i>	<i>56</i>
<i>Табела 4.14. План експеримента и резултати мерења/прорачуна</i>	<i>59</i>
<i>Табела 5.1. Емпиријски модели одзива</i>	<i>61</i>
<i>Табела 5.2. Критеријуми и циљеви оптимизационог процеса</i>	<i>66</i>
<i>Табела 5.3. Подешавање оптималних параметара и предикција одзива за различите дебљине зида (стратегија обраде Путања 1)</i>	<i>66</i>
<i>Табела 5.4. Резултати верификационог теста.....</i>	<i>67</i>
<i>Табела 5.5. Упоредни резултати експеримента и примене фази логике за хрпавост обрађене површине</i>	<i>71</i>
<i>Табела 5.6. Скуп правила FIS модела.....</i>	<i>72</i>
<i>Табела 5.7. ANOVA резултати.....</i>	<i>78</i>
<i>Табела 5.8. Варијанте значајности функција циља при вишекритеријумској оптимизацији</i>	<i>85</i>
<i>Табела 5.9. Хијерархијска структура поређења критеријума за варијанту 3 функције циља</i>	<i>85</i>
<i>Табела 5.10. Корац 1 и 2 АНР апроксимативне методологије одређивања тежинских коефицијената</i>	<i>86</i>
<i>Табела 5.11. Корац 3 и 4 АНР апроксимативне методологије одређивања тежинских коефицијената</i>	<i>86</i>
<i>Табела 5.12. Случајни коефицијенти конзистентности - RI за различите бројеве - n</i>	<i>86</i>
<i>Табела 5.13. Тежински коефицијенти критеријума оптимизације за постављене функције циља</i>	<i>87</i>
<i>Табела 5.14. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 1 функције циља.....</i>	<i>88</i>
<i>Табела 5.15. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара примењених метода ВКО.....</i>	<i>92</i>

Табела 5.16. Вредности <i>Spirman</i> -ових коефицијената корелације рангова примењених метода ВКО.....	93
Табела 5.17. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација.....	94
Табела 5.18. Вредности <i>Spirman</i> -ових коефицијената корелације рангова - друга итерација.....	95
Табела 5.19. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 1 функције циља.....	95
Табела 5.20. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 2 ф-је циља.....	96
Табела 5.21. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара примењених метода ВКО.....	100
Табела 5.22. Вредности <i>Spirman</i> -ових коефицијената корелације рангова примењених метода ВКО.....	101
Табела 5.23. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација.....	102
Табела 5.24. Вредности <i>Spirman</i> -ових коефицијената корелације рангова – друга итерација.....	103
Табела 5.25. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 2 функције циља.....	103
Табела 5.26. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 3 функције циља.....	104
Табела 5.27. Резултати поређења рангова алтерн. нивоа параметара примењених метода ВКО.....	108
Табела 5.28. Вредности <i>Spirman</i> -ових коефицијената корелације рангова примењених метода ВКО.....	109
Табела 5.29. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација.....	110
Табела 5.30. Вредности <i>Spirman</i> -ових коефицијената корелације рангова – друга итерација.....	111
Табела 5.31. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 3 функције циља.....	111
Табела 5.32. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 4 функције циља.....	112
Табела 5.33. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара примењених метода ВКО.....	116
Табела 5.34. Вредности <i>Spirman</i> -ових коефицијената корелације рангова примењених метода ВКО.....	117
Табела 5.35. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација А.....	118
Табела 5.36. Вредности Спирманових коефицијената корелације рангова - друга итерација А.....	118

Табела 5.37. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација Б.....	119
Табела 5.38. Вредности <i>Spiritman</i> -ових коефицијената корелације рангова – друга итерација Б.....	119
Табела 5.39. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 4 функције циља.....	120
Табела 6.1. Вредност <i>S/N</i> односа за хрпавост обрађене површине.....	123
Табела 6.2. <i>S/N</i> одзив за хрпавост обрађене површине.....	123
Табела 6.3. Одзив хрпавости обрађене површине по утицајним факторима.....	124
Табела 6.4. Резултати ANOVA анализе за хрпавост обрађене површине.....	126
Табела 6.5. Коефицијенти ANOVA регресионе једначине.....	127
Табела 6.6. Коефицијенти регресионе једначине.....	128
Табела 6.7. Вредност <i>S/N</i> односа за количину уклоњеног материјала.....	131
Табела 6.8. <i>S/N</i> одзив за количину уклоњеног материјала.....	132
Табела 6.9. Одзив количине уклоњеног материјала по утицајним факторима.....	132
Табела 6.10. Резултати ANOVA анализе за количину уклоњеног материјала.....	134
Табела 6.11. Коефицијенти ANOVA регресионе једначине.....	134
Табела 6.12. Коефицијенти регресионе једначине за количину уклоњеног материјала.....	135
Табела 6.13. Оптимални улазни параметри и сигнификатни параметри.....	137
Табела 6.14. Вредност <i>S/N</i> односа за одступање дебљине зида– Да.....	138
Табела 6.15. <i>S/N</i> одзив за одступање дебљине зида за функцију циља мање је боље.....	139
Табела 6.16. Одзив одступање дебљине зида по утицајним факторима.....	139
Табела 6.17. Резултати ANOVA анализе за одступање дебљине зида.....	141
Табела 6.18. Коефицијенти ANOVA регресионе једначине.....	141
Табела 6.19. Коефицијенти регресионе једначине за одступање дебљине зида - Да.....	142
Табела 6.20. Оптимални улазни параметри и сигнификатни параметри.....	144
Табела 6.21. Вредност <i>S/N</i> односа за равност површина.....	145
Табела 6.22. <i>S/N</i> одзив за равност површина за функцију циља мање је боље.....	146
Табела 6.23. Одзив равности површина по утицајним факторима.....	146
Табела 6.24. Резултати ANOVA анализе за равност површина.....	148
Табела 6.25. Коефицијенти ANOVA регресионе једначине.....	148
Табела 6.26. Оптимални улазни параметри и сигнификатни параметри.....	151
Табела 6.27. Коефицијенти регресионе једначине за равност површина.....	149
Табела 6.28. Вредност <i>S/N</i> односа за паралелност површина.....	152
Табела 6.29. <i>S/N</i> одзив за паралелност површина за функцију циља мање је боље.....	153
Табела 6.30. Одзив паралелности површина по утицајним факторима.....	153
Табела 6.31. Резултати ANOVA анализе за паралелност површина.....	155
Табела 6.32. Коефицијенти ANOVA регресионе једначине за паралелност површина.....	155
Табела 6.33. Коефицијенти регресионе једначине за паралелност површина.....	156
Табела 6.34. Оптимални улазни параметри и сигнификатни параметри.....	158
Табела 6.35. Вредност <i>S/N</i> односа за одступање управности површина.....	159

Табела 6.36. <i>S/N</i> одзив за управност површина за функцију циља мање је боље.....	160
Табела 6.37. Одзив управности површина по утицајним факторима.....	160
Табела 6.38. Резултати ANOVA анализе за управност површина.....	162
Табела 6.39. Коефицијенти ANOVA регресионе једначине за управност површина	162
Табела 6.40. Коефицијенти регресионе једначине за управност површина	163
Табела 6.41. Оптимални улазни параметри и сигнификатни параметри	165
Табела 6.42. Варијанте значајности функција циља при вишекритеријумској оптимизацији параметара вискобрзинске обраде.....	166
Табела 6.43. Хијерархијска структура поређена критеријума по паровима за варијанту 2 функције циља	166
Табела 6.44. Кораца 1 и 2 апроксимативне АНР методологије одређивања тежинских коефицијената	167
Табела 6.45 Кораца 3 и 4 апроксимативне АНР методологије одређивања тежинских коефицијената.....	167
Табела 6.46. Тежински коефицијенти критеријума оптимизације за постављене функције циља	168
Табела 6.47. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 1 функције циља	169
Табела 6.48. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара примењених на методе ВКО.....	173
Табела 6.49. Вредности <i>Spirman</i> -ових коефицијената корелације рангова примењених метода ВКО.....	174
Табела 6.50. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација А.....	175
Табела 6.51. Вредности <i>Spirman</i> -ових коефицијената корелације рангова – друга итерација А.....	175
Табела 6.52. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација Б.....	176
Табела 6.53. Вредности <i>Spirman</i> -ових коефицијената колерације рангова- друга итерација Б.....	176
Табела 6.54. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 1 функције циља	177
Табела 6.55. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 2 функције циља	178
Табела 6.56. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара примењених метода ВКО.....	182
Табела 6.57. <i>Spirman</i> -ови коефицијенти корелације рангова примењених метода ВКО.....	183
Табела 6.58. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација.....	184
Табела 6.59. Вредности <i>Spirman</i> -ових коефицијената корелације рангова – друга итерација.....	185
Табела 6.60. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 2 функције циља	185
Табела 6.61. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 3 функције циља	186

Табела 6.62. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара примењених метода ВКО.....	190
Табела 6.63. Вредности Spirtan-ових коефицијената корелације рангова између примењених метода ВКО.....	191
Табела 6.64. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација А.....	192
Табела 6.65. Вредности Spirtan-ових коефицијената корелације рангова – друга итерација А.....	192
Табела 6.66. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација Б.....	193
Табела 6.67. Вредности Spirtan-ових коефицијената корелације рангова – друга итерација Б.....	193
Табела 6.68. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 3 функције циља.....	194
Табела 6.69. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 4 функције циља.....	195
Табела 6.70. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара примењених метода ВКО.....	199
Табела 6.71. Вредности Spirtan-ових коефицијената корелације рангова између примењених метода ВКО.....	200
Табела 6.72. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација А.....	201
Табела 6.73. Вредности Spirtan-ових коефицијената корелације рангова - друга итерација А.....	201
Табела 6.74. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација Б.....	202
Табела 6.75. Вредности Spirtan-ових коефицијената корелације рангова - друга итерација Б.....	202
Табела 6.76. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 4 функције циља.....	203

ПРЕГЛЕД СКРАЋЕНИЦА

Скраћенице	Назив на енглеском језику	Назив на српском језику
SHP	-	Средство за Хлађење и Подмазивање
CAPP	Computer Aided Process Planning	Рачунаром подржано пројектовање технолошких процеса
CAD	Computer Aided Design	Рачунаром подржано пројектовања
CAM	Computer Aided Manufacturing	Рачунаром подржана производња
CIM	Computer Integrated Manufacturing,	Рачунаром интегрисана производња
PPC	Production Planning and Control	Планирање и управљање производњом
CAQ	Computer Aided Quality	Рачунаром подржани квалитет
FT	Feature Technologies	Типски облици
STEP	STandard for the Exchange of Product model data	Стандард за креирање, размену и дељење дигиталних података о производу
STEP-NC	STEP Numerical Control	Проширени STEP стандард за програмирање CNC машина
CNC	Computer Numerical Control	Нумеричко управљање применом рачунара
FEM	Finite Element Method	Методе коначних елемената
MRR	Material Removal Rate	Количина уклоњеног материјала
CAx	Computer Aided technologies	Генерички назив за програмске системе који омогућавају рачунарску подршку различитим инжењерским активностима (CAD, CAPP, CAM,...)
SLD	Stability Lobes Diagrams	Дијаграми стабилности
SDM	Structural Dynamic Modification	Структурна динамичка модификација
FSM	Finite Strip Model	Моделирања коначних трака
PSO	Particle Swarm Optimization	Оптимизације роја честица
ANOVA	ANalysis Of VAriance	Анализа варијансе
NSGA II	Non-dominated sorting genetic algorithm	Недоминатни генетски алгоритам
ANN	Artificial Neural Network	Вештачке неуронске мреже
CCD	Central Composite Design	Централни композитни план
FCCD	Face-Centred CCD	Ка центру оријентисан централни композитни план
CCCD	Circumscribed CCD	Сферни централни композитни план
ICCD	Inscribed CCD	Уписани централни композитни план

S/N	<i>Signal-to-Noise</i>	<i>Однос сигнал/шум</i>
ANOM	<i>Analysis of Means</i>	<i>Анализа средњих вредности</i>
2D	<i>Two-Dimensional</i>	<i>Дводимензионални (радионички) цртежи</i>
3D	<i>Three-Dimensional</i>	<i>Тродимензионални модели</i>
TPS	<i>Tool Path Strategy</i>	<i>Стратегије путање алата</i>
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>	<i>Методологија одзивних површина</i>
MF	<i>Membership function</i>	<i>Функције чланства</i>
MIMO	<i>Multiple-Input-Multiple-Output</i>	<i>Више-улазни-више-излазни модел система</i>
MISO	<i>Multiple-Input-Single-Output</i>	<i>Више-улазни-један-излазни модел система</i>
MADM	<i>Multiple-Attribute Decision Making</i>	<i>Вишекритеријумска анализа или вишеатрибутивно одлучивање - дискретне методе</i>
MODM	<i>Multiple Objective Decision Making</i>	<i>Вишециљно одлучивање - континуиране методе</i>
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>	<i>Метода Аналитичких Хијерархијских Процеса</i>
GRA	<i>Grey Relational Analysis</i>	<i>Сива релациона анализа</i>
MOORA	<i>Multi-Objective Optimization Method by Ratio Analysis</i>	<i>Метода вишециљне оптимизације анализом односа</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution</i>	-
ROV	<i>Range Of Value</i>	-
COPRAS	<i>COmplex PProportional Assessment of alternatives</i>	-
ARAS	<i>Additive Ratio Assessment</i>	-
WASPAS	<i>Weighted Aggregates Sum Product Assessment</i>	-
VIKOR	<i>Multicriteria Optimization and Compromise Solution</i>	<i>Вишекритеријумска оптимизација и КОмпромисно Решење</i>
OCRA	<i>Operational Competitiveness Rating Analysis</i>	-
EDAS	<i>Evaluation based on Distance from Average Solution</i>	-
MABAC	<i>Multi-Attributive Border Approximation area Comparison</i>	-
SAW	<i>Simple Additive Weighting</i>	<i>Метода једноставних адитивних тежина</i>
SPW	<i>Simple Product Weighting</i>	
C.I.	<i>Confidence Interval</i>	<i>Интервал поверења</i>
DOF	<i>Degress Of Freedom</i>	<i>Степени слободе</i>
BKO	-	<i>Вишекритеријумска оптимизација</i>

ПРЕГЛЕД ОЗНАКА

Ознака	Назив на енглеском језику	Назив на српском језику
a_d	<i>Axial depth of cut</i>	Аксијална дубина обраде
r_d	<i>Radial depth of cut</i>	Радијална дубина обраде
f_r	<i>feed rate</i>	Помак
n_s	<i>Spindle speed</i>	Број обртаја
(a)	<i>Wall thickness</i>	Дебљине зида
(f)	<i>Feed rate value</i>	Величине помака
(T)	<i>Machining time</i>	Време обраде
(Δa)	<i>Wall thickness deviation</i>	Одступање тачности димензија
(Δb)	<i>Perpendicularity deviation</i>	Одступање управности површина код средњебрзинске обраде
(Δc)	<i>Flatness deviation</i>	Одступање од равности површина код средњебрзинске обраде
(Ra)	<i>Surface roughness</i>	Површинска хрпавоста
(Δb)	<i>Flatness deviation</i>	Одступање од равности површина код високобрзинске обраде
(Δc)	<i>Parallelism deviation</i>	Одступање од паралелности површина код високобрзинске обраде
(Δd)	<i>Perpendicularity deviation</i>	Одступање управности површина код високобрзинске обраде
(n)	<i>Number of revolution</i>	Број обртаја
(δ)	<i>Depth of cut</i>	Дубина обраде
(DC)	<i>Cutting diameter</i>	Пречник глодала
(KCH)	<i>Corner chamfer</i>	Оборена ивица
(DCON)	<i>Connection diameter</i>	Пречник прихвата

КОРИШЋЕНИ СОФТВЕРИ

Microsoft Office - Word
 Microsoft Office - Excel
 SolidWork2016
 Cimatron
 MasterCAM X7
 MiniTab
 Design Expert

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

1.1 Предмет истраживања

У последње време тржиште захтева од произвођача брзо освајање нових производа, остваривање високог квалитета и ниску цену коштања производа. То је могуће остварити само ефикасним производним процесима са кратким производним циклусима, брзим реаговањем на захтеве купаца са што мањим трошковима производње. У оквиру производних система доминантну улогу у испуњавању захтева тржишта имају техничке функције - развој производа и производних технологија, које су у последњих пар деценија значајно напредовале, највише захваљујући примени рачунара и информационих технологија.

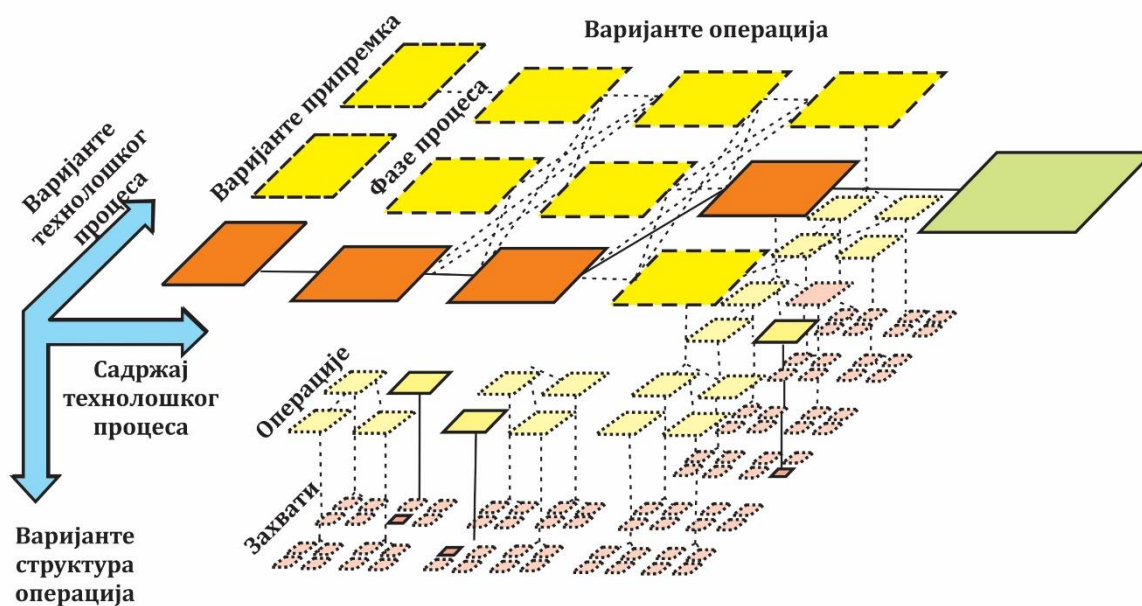
Две основне активности у процесу развоја производа су пројектовање и производња, које је неопходно у што већој мери интегрисати [1]. Технолошка припрема производње представља основну интеграциону компоненту или „мост“ између ове две активности, и треба да задовољи захтеве пројектаната производа са једне стране, а са друге стране да уважи технолошке могућности производног система. Основна активност технолошке припреме се односи на пројектовање и оптимизацију технолошких процеса израде производа. Императив савремене глобалне производње је пројектовање рационалних и оптималних технолошких процеса, при чему су основни критеријуми оптимизације тачност, квалитет, производност и економичност.

Научна дисциплина која се бави проучавањем оптимизације разноврсних објеката назива се теорија оптимизације. У основи појма и општег значења оптимизације садржана је методологија помоћу које се одређује најповољнији резултат или решење за одређене услове. Посебан део теорије оптимизације који се примењује у производњи и техници уопште чини техноекономска оптимизација, која је базирана на групи техничких и економских критеријума. Међу основне појмове техноекономске оптимизације спадају циљеви, објекти, методе и услови под којим се врши оптимизација, слика 1.1. Циљ оптимизације се исказује преко критеријума оптимизације, односно функција циља, а применом метода оптимизације се остварује постављени циљ на дефинисаном објекту оптимизације при одређеним условима [2, 3].



Слика 1.1. Основни појмови техноекономске оптимизације [2]

Технолошки процеси израде производа у машинској индустрији карактеришу се варијантношћу решења, најчешће у свим фазама пројектовања, слика 1.2. Ове карактеристике технолошког процеса условљене су улазним подацима, који су обухваћени цртежом и обимом производње производа, потом расположивом технолошком опремом, припремцима и радном снагом, као и техноекономским условима и субјективним опредељењем технолога. Технолошки процеси представљају један од најзначајнијих објеката оптимизације у производним предузећима. Усвајањем одређених варијанти технолошког процеса врши се дефинисање одређених елемената и декомпоновање технолошког процеса на основу чега је могуће извршити његову спољашњу и унутрашњу оптимизацију [3, 4].



Слика 1.2. Нивои варијантности технолошких процеса израде производа [4]

Варијантност технолошких процеса на макро нивоу је у избору оптималне методе или поступка обраде, припремка, врсте и редоследа операција и захвата, елемената обрадног система (*машина, алата, прибора, мерила*), односно на микро нивоу у избору параметара обраде (*дубине, помака, брзине, броја обртаја*),

стратегије обраде, услова обраде, система за хлађење и подмазивање (СХП), итд. Спољашња оптимизација технолошког процеса се односи на избор оптималних елемената технолошког процеса на макро нивоу, док се унутрашња оптимизација односи на избор оптималних елемената технолошког процеса на микро нивоу [2–4].

Као последица динамичног тржишта и глобализације производње, пред производне системе се постављају веома оштри захтеви у смислу проналажења оптималних решења технолошких процеса у циљу постизања максималних техничких и економских ефеката. Сходно томе значајни напори се улажу у развој напредних метода и техника за пројектовање и оптимизацију технолошких процеса израде производа.

Системи за рачунаром подржано пројектовање технолошких процеса израде производа у суштини обухватају задатке који се односе на интерпретацију података о производу, анализу технологичности конструкције производа, избор или пројектовање припремака, избор основних метода израде, дефинисање операција и захвата обраде и њиховог редоследа извођења, избор одговарајућих машина, алата, прибора и мерила, дефинисање параметара и стратегије обраде, као и одређивање времена и трошкова обраде. Рачунаром подржано пројектовање технолошких процеса (енгл. *Computer Aided Process Planning, CAPP*) је кључно за интеграцију рачунаром подржаног пројектовања (енгл. *Computer Aided Design, CAD*) и рачунаром подржане производње (енгл. *Computer Aided Manufacturing, CAM*) као основних елемената рачунаром интегрисане производње (енгл. *Computer Integrated Manufacturing, CIM*). Резултати ове активности су веома битни за функционисање производног система и са апсеката планирања и управљања производњом – (енгл. *Production Planning and Control, PPC*) и рачунаром подржаног квалитета – (енгл. *Computer Aided Quality, CAQ*) [5–7].

У развоју система за пројектовање технолошких процеса, односно *CAPP* система и њиховој интеграцији са другим функцијама производног система примењују се бројне методе и технике. На основу анализе литературе закључено је да се ови системи највише заснивају на примени технологија базираних на типским облицима (енгл. *Feature Technologies, FT*), базама знања, вештачким неуронским мрежама, генетским алгоритмима, фази логици, Интернет технологијама, агент-базираним методама, стандардима за размену и дељење података о производу (*STEP/STEP-NC* стандард) итд. [4, 6, 8-17].

За потребе оптимизације технолошких процеса обраде развијен је велики број аналитичких и експерименталних метода, које се могу користити за проблеме једнокритеријумске и вишекритеријумске оптимизације. Међутим свака од ових метода нуди одређене предности, али има и одређене недостатке који се односе на ефикасну имплементацију. У већини случајева оптимизација технолошког процеса се базира на теорији оптимизације и укључује аналитичке или експериментално-

статистичке методе, методе математичког моделирања, методе вештачке интелигенције и др. [2, 3]. Проблеми оптимизације технолошких и обрадних процеса могу бити веома тешки за разумевање и решавање од стране инжењера који нису експерти из ове области. Може се рећи да не постоји универзални метод који би био најбољи за оптимизацију технолошких процеса обраде, већ је то врло често комбинација више различитих метода и прилаза.

Савремено тржиште специјализованих производа захтева употребу материјала високих механичких карактеристика, мале масе, релативно ниске цене коштања и добру обрадљивост, што је све садржано у легурама алуминијума. Танкозидне алуминијумске структуре се највише користе као конструкциони делови у ваздухопловној, аутомобилској и војној индустрији због своје хомогености и одличног односа између носивости конструкције и тежине. Као пример тих компоненти могу се навести следећи основни облици: уздужна ребра, попречна ребра, носачи, преграде и друго. Овакве структуре се веома често сусрећу и као сложени конструкциони елементи у алатничарству.

Производња наведених танкозидних структура углавном настаје уклањањем материјала из пуних припремака, чак и до 95% од њихове масе. Процес производње оваквих структура је дуготрајан и веома захтеван. Због тако велике запремине скидања материјала потребно је постићи високу производност [18-20]. Са друге стране постизање високе производност ограничава недостатак крутости танких зидова што доводи до појаве грешака у процесу обраде [21]. Основни проблеми који се могу јавити при обради танкозидних структура су [22]:

- *Нетачност димензија, облика и односа површина,*
- *Висока храпавост обрађених површина,*
- *Пластичне деформације танких зидова,*
- *Појава вибрација при обради,*
- *Заостали напони у материјалу,*
- *Савијање обратка и алата при обради,*
- *Генерисање велике количине топлоте у обратку и др.*

Као последица ових проблема могу се јавити и трајне деформације структуре делова, као и нетачности које могу изазвати и појаву шкарта. На наведене проблеме утичу многобројни параметри технолошког процеса обраде, међу којима су најзначајнији следећи [23]:

- *Елементи обрадног система (машина, алати, прибори),*
- *Режими обраде (дубина, помак, брзина/број обртаја),*
- *Стратегије путање алата,*
- *Материјал обратка,*
- *СХП и др.*

Сходно претходно изнетим ставовима, основни предмет истраживања у овом раду се односи на оптимизацију технолошког процеса обраде танкозидних структура од легура алуминијума, као делова који имају одговарајуће специфичности конструкције, израде и примене. У том циљу примениће се одговарајући прилази за пројектовање и оптимизацију технолошких процеса који базирају на примени савремених метода и техника пројектовања и оптимизације, метода инжењерског експериментисања, метода математичког моделирања и метода вештачке интелигенције уз коришћење одговарајућих софтверских алата опште и специјализоване намене.

1.2 Циљеви истраживања

Основни циљ истраживања усмерен је на оптимизацију технолошког процеса обраде танкозидних структура од легура алуминијума применом савремених инжењерских прилаза и метода.

Сходно постављеном циљу развиће се и применити одговарајућа методологија за оптимизацију параметара технолошког процеса обраде танкозидних структура.

Основне етапе ове методологије су:

- *Дефинисање оптимизационих задатака,*
- *Поставка плана експеримената,*
- *Пројектовање варијанти технолошког процеса са одређеним ограничењима,*
- *Извођење експеримената,*
- *Мерење и анализа резултата експеримената,*
- *Математичко моделирање,*
- *Вредновање резултата и примена метода оптимизације,*
- *Верификација математичких модела и*
- *Креирање подлога за оптимално управљање технолошким процесима.*

На основу постављене методологије у наставку су детаљније дефинисани задаци појединих етапа и очекивани резултати.

Прве активности се односе на дефинисање оптимизационих задатака и поставку плана експеримената. Овде ће се приказати поставка плана вишефакторних експеримената технолошког процеса за средњебрзинску и високобрзинску обраду глодањем танкозидних делова од изабране легуре алуминијума на бази дефинисаног оптимизационог задатка.

Основни улазни параметри технолошког процеса обраде посматраних делова су изабрани из групе следећих величина: врсте операција/захвата обраде одређених типских облика, врсте обрадних система (средњебрзинска и високобрзинска *CNC* машина), врсте резних алата, врсте стратегија обраде, области

режима обраде (дубина, помак, брзина/број обртаја), *CXII*, дебљине зидова танкозидних делова. Основни критеријуми оптимизације из групе контролисаних величина су време обраде, односно количина уклоњеног материјала, квалитет обрађене површине, тачност мера и тачност облика и односа површина (толеранције облика и положаја).

У оквиру пројектовања варијанти технолошких процеса примениће се савремени прилази везани за „*feature*“ технологије, *CAD/CAM* системи за варијантно пројектовање технолошког процеса обраде и добијање пост процесираних управљачких информација за обраду на *CNC* обрадним системима.

На основу добијених резултата реализованих експерименталних истраживања креираће се математички модели зависности карактеристика времена обраде/производности, тачности мера, тачности геометријског облика, тачности међусобног односа површина и квалитета обрађених површина као критеријума оптимизације од улазних фактора, као што су помак, брзина/број обртаја, дубина обраде, стратегије путање алата и дебљине зида. Захваљујући дефинисању математичких релација између улазних и излазних карактеристика технолошког процеса обраде, омогућена је једнокритеријумска оптимизација параметара технолошких процеса применом одређених метода техноекономске оптимизације. У циљу добијања свеобухватне оцене технолошких процеса примениће се вишекритеријумска оптимизација на бази дефинисања тежинских коефицијената значајности критеријума оптимизације и вредновање карактеристика постављених варијанти технолошких процеса обраде.

Добијени резултати истраживања представљају подлогу за оптимално управљање технолошким процесима обраде танкозидних структура.

На овај начин се жели унапредити функција технолошке припреме производње која тренутно представља уско грло у производном окружењу, односно интеграцији процеса пројектовања производа и њихове производње. Методологија базира на општости примене, где се на релативно брз и једноставан начин може доћи до поузданих података за оптимално пројектовање технолошких процеса израде танкозидних делова. Врло лако се може применити и на друге облике танкозидних структура, за друге материјале, уз укључивање и других улазно-излазних параметара обрадног процеса и друге критеријуме оптимизације.

1.3 Хипотезе истраживања

У складу са дефинисаном методологијом и циљевима истраживања постављене су следеће хипотезе истраживања, које ће се верификовати у самој дисертацији.

Прва хипотеза је у вези са основним оптимизационим задатком дисертације:

- ❖ *Промена улазних параметара обраде (дубине обраде, помака и броја обртаја/брзине обраде), стратегије путање алата, као и дебљине танкозидних структура утиче на тачност, квалитет и производност обраде танкозидних алуминијумских делова.*

Како би се обезбедила захтевана тачност, квалитет, производност и економичност обраде посматраних танкозидних делова, неопходно је квантификовати релације између улазних параметара технолошког процеса и излазних перформанси, односно критеријума процеса обраде математичким моделирањем. На основу експерименталних истраживања технолошког процеса обраде одређених танкозидних структура могуће је (друге хипотезе):

- ❖ *Извршити анализу утицаја улазних параметара на излазне перформансе технолошког процеса, односно критеријуме оптимизације,*
- ❖ *Развити одговарајуће математичке моделе за постављене критеријуме оптимизације технолошког процеса обраде,*
- ❖ *Извршити вишекритеријумски избор квалитетних параметара обраде,*
- ❖ *Поставити подлоге за оптимално управљање технолошким процесима обраде.*

1.4 Фазе истраживања

Истраживања у предложеној докторској дисертацији под називом „Оптимизација технолошког процеса обраде танкозидних алуминијумских структура“ су подељена у неколико фаза, чија реализација омогућава остваривање задатих циљева.

Прва фаза обухвата уводна разматрања и преглед стања у области истраживања на бази анализе расположиве литературне грађе.

Друга фаза се односи на дефинисање предмета, циља и хипотеза истраживања. На бази претходног, извршена је анализа проблема истраживања и дефинисани су неопходни ресурси за њихову реализацију.

Сходно предмету и циљу, постављена је методологија истраживања са приказом и дефинисањем основних етапа њене реализације. У оквиру методологије први корак се односи на дефинисање оптимизационих задатака који се морају поклапати са циљем истраживања.

Потом следи поставка плана експерименталних истраживања, са претходним извођењем пробних експеримената, који су имали за циљ да потврде валидност избора параметара технолошког процеса и њихових ограничења. Позитивном оценом пробних експерименталних истраживања уследила је реализација обимних експерименталних испитивања по предложеном плану експеримената. У овој фази извршено је прикупљање свих релевантних података из процеса обраде и њихова

детаљна анализа, као и понављање експеримената у случају откривених пропуста или грешака.

План експеримента је у директној вези са пројектовањем технолошких процеса обраде дефинисаног облика танкозидног дела, јер се у оквиру њега дефинишу параметри технолошког процеса и генеришу управљачки програми за конкретну обраду на *CNC* машинама.

Након реализације експеримената следило је мерење експерименталних података, обрада и анализа резултата. На основу добијених резултата реализованих експерименталних истраживања у наредној фази су развијени математички модели дефинисаних критеријума оптимизације. Применом одређених метода оптимизације извршена је оптимизација параметара технолошког процеса и вишекритеријумско вредновање технолошких процеса на бази одређивања тежинских коефицијената ових критеријума.

Завршне фазе дисертације се односе на дискусију резултата истраживања, закључна, односно сумарна разматрања и преглед литературних информација које су коришћени у дисертацији.

1.5 Структура докторске дисертације

У **првом поглављу** дата су уводна разматрања о оптимизацији технолошких процеса израде танкозидних делова од легуре алуминијума. Такође, објашњени су основни мотиви и представљен је предмет, циљ и хипотезе истраживања докторске дисертације.

Теоријске основе и преглед владајућих ставова у области истраживања, приказани су у **другом поглављу**. Дат је приказ тренутног стања у подручју обраде танкозидних производа/делова.

Преглед актуелног стања у области обраде танкозидних делова приказан је у **трећем поглављу**. У оквиру овог поглавља, акценат је дат на прегледу истраживања у области статичких и динамичких проблема обраде, као и анализи динамичких модела обраде. Исто тако, обухваћена је анализа и рачунарских технологија које се користе при обради танкозидних делова, као и оптимизација процеса израде.

Поставка и опис методологије истраживања су приказани у **четвртном поглављу**. Акценат је дат на развој методологије истраживања која треба да да одговор на питање: „Како на бази постављених критеријума оптимизације, применом одговарајућих метода оптимизације пронаћи најбоље решење изабраног објекта оптимизације за одређене услове“?. Извршена је и поставка плана експеримента са тачно дефинисаним бројем узорака, променљивим факторима у виду стратегија и параметара обраде, врсте и облика танкозидне структуре. Након тога, реализовано је варијанто пројектовање технолошких процеса обраде танкозидних делова. У оквиру ове фазе извршено је моделовање танкозидне

структуре одговарајућих димензија, пројектовање варијанти технолошког процеса, као и генерисање управљачких информација за процесе машинске обраде узорака.

Након експерименталних истраживања, приступило се мерењу резултата експеримента. Извршена су мерења дебљине зида, одступања управности, равности и паралелности површина, времена обраде и квалитета обрађене површине.

У **петом и шестом поглављу**, приказани су основни резултати истраживања кроз примену више различитих метода, које су имале за циљ оптимизацију параметара технолошког процеса обраде танкозидних линијских структура од легуре алуминијума. У оквиру поглавља 5 приказани су резултати оптимизације средњебрзинске обраде, док су у поглављу 6 приказани резултати оптимизације високобрзинске обраде.

Завршна разматрања су дата у **седмом поглављу**, док се **осмо поглавље** односи на преглед коришћене литературе у изради докторске дисертације.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ И ПРЕГЛЕД ВЛАДАЈУЋИХ СТАВОВА У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА

У циљу што бољег представљања проблематике која се обрађује у дисертацији, приказан је преглед теоријских основа и владајућих ставова у подручју посматраног истраживања. Прво је дат преглед савремених прилаза у пројектовању и оптимизацији технолошких процеса а потом у области танкозидних структура и процеса њихове обраде, као и везе ове две области.

2.1 Прилази у пројектовању и оптимизацији технолошких процеса

Тржиште од привреде захтева економичну и ефикасну производњу, као и брзо прилагођавање захтевима потрошача. Производња се мора што детаљније предвидети, планирати, припремити и организовати, а резултати постигнути одређеним методама и средствима треба да се мере и упоређују са подацима планираним у појединим активностима производног система.

Посебан значај за развој и унапређење производње има функција припреме производње [24]. Опсег рада припреме производње односи се на развој и обликовање производа, планирање и разраду документације и информација за производњу, као и на све мере и функције које осигуравају и контролишу реализацију процеса производње. Системски прилаз у раду припреме производње је основни предуслов за економичну и продуктивну производњу [25]. Припрема производње у индустрији прераде метала се дели на техничку и оперативну припрему. Техничка припрема производње обухвата две најважније техничке функције производних система. Прва се односи на пројектовање производа, позната под називом конструкциона припрема, а друга на пројектовање и оптимизацију технолошких процеса, позната под називом технолошка припрема производње. Оперативна припрема обухвата функције које се односе на планирање и управљање производњом.

Основни задаци који се решавају у оквиру технолошке припреме производње су [24]:

- *Анализа технологичности конструкције производа,*
- *Пројектовање технолошких процеса производње (у ужем смислу),*
- *Оптимизацију технолошких процеса производње,*
- *Конструисање специјалних алата, прибора, мерила и других уређаја,*
- *Моделирање и симулација технолошких процеса и других активности,*
- *Генерисање управљачких информација за обраду, монтажу, мерење, транспорт, руковање материјалом итд.,*
- *Одређивање времена и трошкова производње,*

- Дефинисање врсте и количине појединих средстава за рад,
- Дефинисање норматива материјала, времена итд.,
- Дефинисање врста и количина помоћног и потрошног материјала,
- Дефинисање упутстава за рад,
- Дефинисање сложености процеса рада, стручности и броја радника,
- Пројектовање технолошких основа производног система,
- Пројектовање технолошких решења заштите животне средине од примењених технологија.

У развоју савремених *CAPP* система и њиховој интеграцији са другим функцијама и активностима производног система и глобалног пословног окружења примењују се бројне методе и технике, које се могу користити засебно или интегрално [13, 24, 26, 27]:

- Методе засноване на типским облицима (енгл. *feature technologies*),
- Методе вештачке интелигенције,
- Агент-базиране методе,
- Интернет-базиране методе,
- Методе базиране на *STEP* стандарду, и др.

Појам "*feature*" се у нашем окружењу може срести под различитим терминима, као карактеристика, својство, особина, облик, форма, обележје, значајка, итд., док су у овом раду усвојени термини типски облик и типски технолошки облик. Према једној дефиницији "*feature*" представља семантичку група или атом моделирања, одређен скупом параметара, који се користи за опис објекта који се не може додатно разложити, са аспекта једне или више активности у вези са пројектовањем и применом производа [28, 29, 30]. Методологије засноване на типским облицима су прво биле тема интеграције *CAD/CAM* система, да би интензивнијим развојем *CAPP* система постале основа за интеграцију *CAD/CAPP/CAM* система.

Вештачка интелигенција се односи на развој интелигентних рачунарских система, који имају карактеристике повезане са интелигентним понашањем човека, као што су разумевање, учење, размишљање и решавање проблема [12]. У области пројектовања и оптимизације технолошких процеса, односно развоја *CAPP* система, највећу примену су нашле следеће методе или технике вештачке интелигенције [13]:

- Експертни системи,
- Неуронске мреже,
- Генетски алгоритми и
- Фази логика.

Појам "*агент технологије*" се први пут помиње од стране *Hewitt* 1997. године, који је представио модел базиран на дистрибуираној вештачкој интелигенцији. У

последњих десетак година агент-базиране технологије су нашле широку примену у различитим гранама технике, укључујући пројектовање и производњу [15]. С обзиром на њихову свеобухватност и робусност, агент-базиране технологије имају много различитих дефиниција. Агенти представљају софтвере који има способности да самостално, без интервенције корисника, извршавају постављени задатак и извештавају корисника о завршетку задатка или појави очекиваног догађаја. Друга дефиниција каже да је агент програмски систем који у интеракцији са окружењем има способност да флексибилно и самостално реагује у складу са циљевима који су му постављени. Три кључна захтева агент технологија су интеракција са окружењем, аутономност и флексибилност [31].

Примена рачунара и информационих технологија обезбедила је већу ефикасност у пројектовању и производњи. Међутим, истраживачи и индустрија се и даље суочавају са изазовом размене и дељења информација између различитих функција и одговарајућих апликација у производном систему, укључујући и *САРР* системе. Основни узрок ових проблема се односи на неусаглашеност представљања података о производу у његовом животном веку [32]. Дигитални подаци о производу морају садржати довољно информација које се могу употребити за различите активности током целог животног века производа. Да би се ово остварило, *STEP* је од самог почетка био развијен као модуларни стандард који садржи већи број делова (*енгл. Parts*), сврстаних у серије (*енгл. Series*) [15, 32]. До сада постављен већи број различитих концепта повезивања *СAx* система у процесу производње производа применом *STEP* стандарда, а неки од њих су приказани у радовима [14, 15, 33-38]. *STEP*-ом подржано пројектовање технолошких процеса је доживело још интензивнији развој од времена развоја и објављивања *STEP-NC* стандарда, а неки од прегледних радова из ове области су [14, 15, 38-43].

Одређивањем вредности параметара којима се остварује оптимална вредност перформансе може се постићи значајно повећање ефикасности технолошких процеса са многобројних техноекономских аспеката производа [44, 45]. Независно од примењене технологије, неопходно је одредити параметре процеса тако да утицај неконтролисаних фактора на перформансе процеса буде занемарљив. Избором најповољнијих параметара процеса може се направити баланс између квалитета производа и цене. У суштини главни циљеви оптимизације технолошких процеса укључују: смањење трошкова обраде, смањење времена обраде, повећање производности, повећање тачности и квалитета производа и повећање профита. Такође, може се узети комбинација ових циљева па се тада приступа решавању вишекритеријумске оптимизације, којима се показује укупан квалитет технолошких процеса. Оптимизација технолошких процеса обично подразумева унутрашњу и/или спољашњу техноекономску оптимизацију [2-4, 45, 46].

Као што је раније наведено оптимизација технолошког процеса се базира на теорији оптимизације и укључује експериментално-статистичке методе, методе математичког моделирања, методе вештачке интелигенције и др. Математички,

оптимизација представља поступак дефинисања најповољнијих решења из скупа могућих решења према одређеним критеријумима који се изражавају математичким функцијама тзв. функцијама циља. Формулисање проблема оптимизације обрадних процеса укључује дефинисање функција стања процеса, функција ограничења, критеријума оптимизације и функција циља. Код машинске обраде најчешће функције стања су постојаност алата, хабање алата, температура обраде, отпор, моменат и сила обраде, квалитет обраде итд. Функције ограничења су систематизоване у четири групе које су променљиве у зависности од врсте процеса обраде: ограничења дубине обраде, ограничења брзина обраде, ограничења помака и сложена ограничења, где је најзначајније ограничење инсталисана снага машине. Најчешћи критеријуми оптимизације су: време обраде, трошкови обраде, тачност обраде, производност, економичност, профит, степен искоришћења капацитета итд. Функција циља или функција оптимизације најчешће представља минимизацију или максимизацију наведених критеријума оптимизације [2-4].

Теорија планирања експеримента представља квалитативно новији приступ за побољшање и оптимизацију производа и процеса који има широку примену у науци и инжењерству [44]. Планирање експеримента је системски приступ који подразумева припрему, физичку реализацију експеримента, обраду експерименталних података и анализу резултата према унапред утврђеном плану. Једна од најважнијих предности планирања експеримента је редукација броја експеримената без смањења количине и квалитета информација које се могу добити, а на основу којих се могу донети валидни и објективни закључци [44-48].

Друге предности методологије планирања експеримента су [45, 48-50]:

- *Постепено извођење експеримента у етапама - корак по корак, идући од једноставнијих ка сложенијим плановима,*
- *Једноставна статистичка регресиона и дисперзиона анализа експерименталних резултата,*
- *Могућност квалитативне и квантитативне оцене утицаја сваког фактора и њихових могућих интеракција на функцију циља,*
- *Могућност лаке оптимизације процеса који је предмет истраживања, на основу добијеног емпиријског модела функције циља,*
- *Минимални временски и материјални ресурси за реализацију експеримената,*
- *Елиминисање субјективног утицаја истраживача.*

Савремено пројектовање технолошких процеса обраде захтева анализу свих техничко-технолошких и економских параметара процеса и примену научних метода у циљу моделирања и дефинисања оптималних карактеристика процеса обраде [2, 3, 50, 51]. Моделирање процеса обраде је привукло пажњу великог броја истраживача имајући у виду значај моделирања за остваривање укупних

техноекономских ефеката израде производа [51, 52]. Према томе, предикционо моделирање процеса обраде је од виталног значаја јер се дефинишу математички модели који у одговарајућем степену тачности и валидности адекватно описују процес обраде. Основни циљеви моделирања су [50]:

- *Симулација варијантних решења, анализа и предикција стања процеса још у фази пројектовања технологије,*
- *Дефинисање математичких модела који су неопходни за оптимизацију процеса и изналажење оптималних решења,*
- *Креирање модела управљања за дати систем, односно објекте оптимизације,*
- *Научна истраживања и практична примена у реалним процесима.*

Математичким моделом се симулира понашање реалног система, процеса или објекта, а изражава се једначином или системом једначина [53]. Математичко моделирање обрадних процеса заснива се на примени знања и представља први корак у технооекономској оптимизацији. Заправо, математичко моделирање и оптимизација су методе надградње које имају за циљ производњу јефтинијих и квалитетнијих производа уз истовремено ефикасније искоришћење ресурса. У том смислу неопходни су експлицитни функционални модели који се могу креирати различитим методама. Независно од примењене методе моделирања, при креирању математичких модела неопходно је извршити систематску анализу и идентификацију параметара са интервалом варијације за које се сматра да су утицајни. Методе моделирања су усавршаване развојем примењене математике, статистике, операционих истраживања, теорије инжењерског експериментисања и метода вештачке интелигенције. Која ће метода од постојећих бити коришћена зависи од објекта моделирања, захтеваног степена поузданости модела, врсте процеса, односно система, расположиве опреме, потребе оптимизације и изградње система управљања [50]. Уопштена класификација укључује аналитичке и емпиријске методе моделирања [47].

Како су процеси обраде прилично сложене природе коју карактерише мноштво динамичких интеракција параметара процеса, примена аналитичких модела је ограничена [54]. Иако је креирање аналитичких модела могуће у неким поједностављеним ситуацијама, већина обрадних процеса је сложена, и стога, емпиријски модели који су мање општи, практичнији и јефтинији се све чешће примењују [55]. Дефинисање емпиријских модела подразумева коришћење различитих техника прикупљања података. У ту сврху користе се експериментални подаци, реални подаци из производње, симулирани подаци или њихова комбинација. Коришћење реалних података из производње и експерименталних података чини математичке моделе робусним [56]. Досадашња истраживања у области моделирања обрадних процеса показују да су најпогоднији математички модели полинома првог и другог степена. Међутим, у случајевима када не постоје

одговарајући аналитички модели, или када полиноми нижег реда не дају задовољавајуће резултате, вештачке неуронске мреже нуде добар алтернативни приступ за емпиријско моделирање обрадних процеса [55].

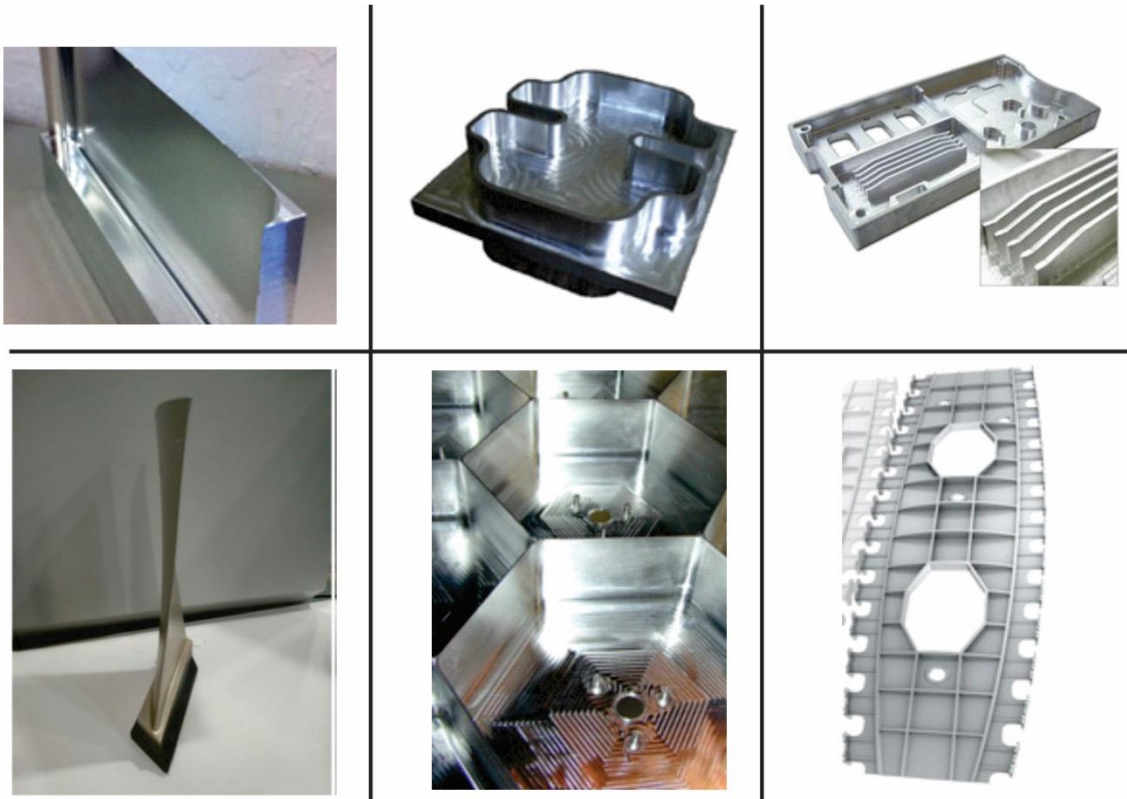
За управљање технолошким процесом обраде, постоје два основна приступа, адаптивно управљање и симулација и управљање на основу математичких модела. Основна разлика између ова два приступа је то што се адаптивно управљање заснива на повратној вези, а управљање на основу математичких модела има карактеристике директне везе [57, 58]. Технике адаптивног управљања се заснивају на мониторингу процеса обраде мерења одређених перформанси процеса на основу којих се врши управљање факторима процеса у реалном времену [58, 59], што понекад може да продужи укупно време производње и створи додатне трошкове. Код управљања процесима обраде, заснованом на моделима, први корак у успостављању ефикасног система управљања је креирање математичких модела којима се успостављају релације између параметара и перформанси технолошког процеса. Оба приступа управљања процесима обраде, свака са својим предностима и недостацима, имају за циљ побољшање укупне ефикасности, максимизацију искоришћења производних ресурса, минимизацију интервенција од стране оператера, задовољење различитих критеријума (производност, економичност, тачност, квалитет), и др.

2.2 Основне конструкционе карактеристике танкозидних делова

Због своје хомогености, отпорности на корозију и одличног односа између носивости и масе танкозидне алуминијумске компоненте се све више користе као структурални делови у ваздухопловној, аутомобилској, војној и другим гранама електро-машинске индустрије. Нови дизајн ових компоненти усмерен је на монолитне делове уместо на већи број компоненти које је потребно након обраде склопити. На овај начин добија се конструкција са добрим механичким карактеристикама, бољег квалитета и тачности, мање масе, са мањим временом и трошковима производње [59].

Анализом литературних информација идентификовани су следећи основни облици танкозидних структура који се израђују поступком машинске обраде, слика 2.1 [60-64]:

- *Облици линијског типа,*
- *Облици правоугаоног типа,*
- *Облици троугаоног типа,*
- *Облици шестоугаоног типа,*
- *Сложени облици.*



Слика 2.1. Различити облици танкозидних делова [60-64]

Поред претходне поделе, постоји неколико других препорука на основу којих се може вршити подела танкозидних делова. **Fitzgerald** [65] је предложио водич помоћу којих се уочава разлика између танкозидних и дебелозидних цилиндара на основу дистрибуције константног напона кроз зид. Теорија танких зидова цилиндра и сфере се заснива на претпоставци која указује на однос дебљине зида и пречника у односу $1/10$, као област раздвајања између танкозидних и дебелозидних цилиндра. **Yang** [66] је дао препоруке на основу којих се могу разликовати јако танке плоче, танке плоче и дебеле плоче:

- *Јако танке плоче* = $h/p < (1/100)$;
- *Танке плоче* = $(1/100) \leq h/p \leq (1/5)$ и
- *Дебеле плоче* = $h/p > (1/5)$.

Где је:

p = најкраће растојање између две ивице на плочи и
 h = дебљина плоче.

Такође, према [67] поделу танкозидних делова могуће је извести на бази односа димензионих карактеристика површина, висине и дебљине дела:

- *Мала висина у односу на дебљину 15:1,*
- *Умерена висина у односу на дебљину <30:1,*
- *Врло велика висина у односу на дебљину $\geq 30:1$.*

Према **Kennedy** [68] дебљина зидова код танкозидних делова се креће у дијапазону од 1 mm до 2.5 mm.

Горе наведене препоруке, могу се посматрати као опште за дефинисање карактеристика и поделе танкозидних делова. Међутим, због све већих захтева у погледу тачности обрађене површине, обрада танкозидних делова се све више посматра са аспекта: *Да ли се зид савија или не?*, тј. колико се савија и да ли то утиче на тачност обраде. Како би смо били што прецизнији, еластична деформација танкозидног дела може бити већа или једнака прописаној толеранцији и може се записати у облику:

$$\delta \geq T \quad (2.1)$$

Где су:

δ = еластична деформација зида и

T = дозвољена (прописана) толеранција.

2.3. Основне технолошке карактеристике танкозидних делова

Производња танкозидних структура углавном се реализује уклањањем велике количине материјала из пуних припремака, што износи чак и до 95% од њихове почетне масе. Процес производње оваквих структура је дуготрајан и веома захтеван. Због велике количине скидања материјала потребно је постићи високу производност [19-21]. Са друге стране високу производност ограничава мала крутости танких зидова, која утиче на појаву грешака у процесу обраде [22]. Поред тога, јављају се и трајне деформације структура, које могу изазвати и појаву шкарта. На наведене проблеме утичу многобројни фактори технолошког процеса обраде, као што су елементи обрадног система (машина, алат, прибор), режими обраде, стратегије путање алата, СХП и др. [23]. У оквиру овог истраживања посматраће се процес обраде глодањем, као најзаступљенији код посматраних танкозидних делова.

2.3.1 Деформације при обради танкозидних делова

Главна разлика између процеса обраде танкозидних делова и процеса обраде „нормалних“ делова се огледа у томе што се код танкозидних делова веома мала количина/дебљина материјала супротставља силама резања при обради глодањем. То за последицу има малу крутост дела, што резултира појавом вибрација и деформација. Због тога, утицај параметара обраде глодањем на танкозидне делове је знатно израженији него при процесима обраде „нормалних“ делова са већим дебљинама зидова.

Постоје многи фактори који утичу на тачност обраде танкозидних делова. Према [69] најутицајнији фактори су следећи:

- **Напони и деформације** – с обзиром да је зид обратка јако танак под дејством спољашњих сила, нпр. сила стезања може доћи до деформације обратка што доводи до појаве димензионалне грешке или грешке облика;
- **Деформације изазване вибрацијама** – под дејством сила резања (позово оних које се јављају у радијалном правцу) настанак вибрација и деформација изазива појаву грешака у погледу димензионалне тачности, тачности облика, тачности положаја и храпавости обрађене површине;
- **Погрешан правац одвођења струготине** при обради;
- **Топлотне деформације** које се јављају у зони процеса обраде и
- **Погрешан метод и начин обраде** изабран од стране пројектанта технологије.

На слици 2.2 приказани су фактори који утичу на деформацију при обраду танкозидних делова [70].

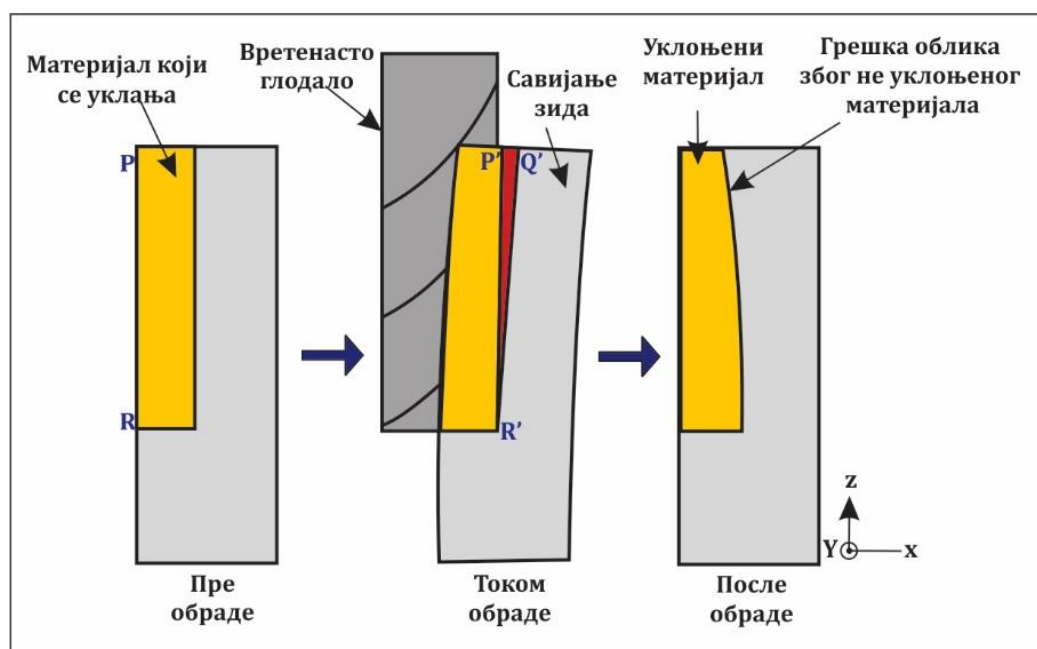
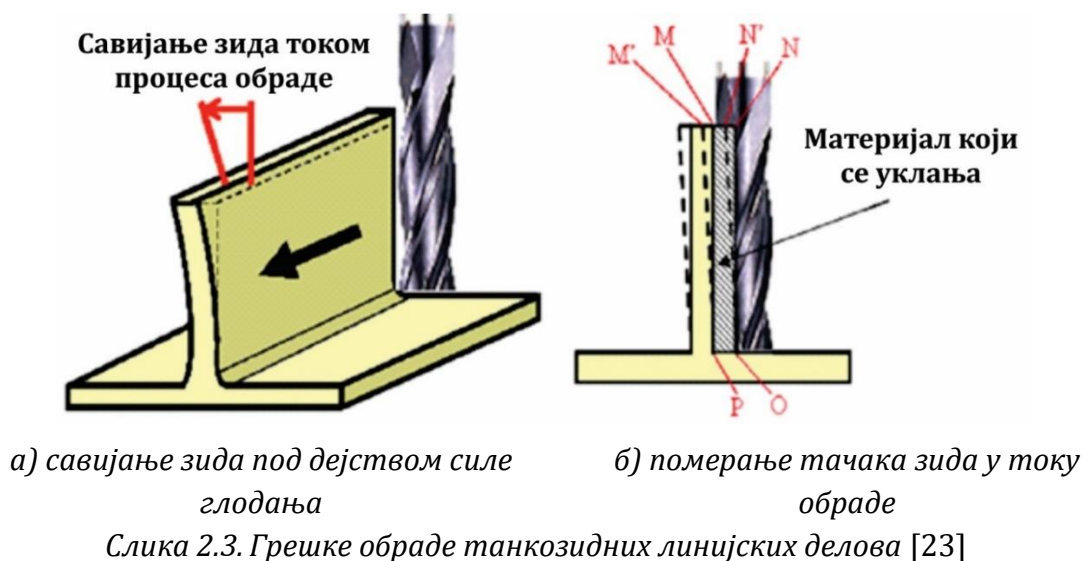


Слика 2.2. Фактори који утичу на деформације при обради танкозидних делова [70]

Уско прописане толеранције на компонентама производа представљају велики изазов за произвођаче, што је нарочито изражено при обради танкозидних делова. Због слабе крутости танкозидне структуре велика је вероватноћа да ће доћи до појаве деформације током процеса обраде, што за последицу има појаву одступања толеранција мера, облика и положаја, као и грешака у квалитету обрађене површине [23, 69, 70].

На слици 2.3 приказане су грешке толеранција мера, облика и положаја које се јављају током процеса обраде танкозидних линијских делова. Материјал који је шрафиран у области $MNOP$ је предвиђен за уклањање. Међутим, под дејством сила које се јављају при обради глодањем, долази до савијања танког зида, при чему се тачка M помера ка тачки M' , а на исти начин долази и до померања тачке N ка тачки N' . Као резултат угиба (савијања) зида долази до уклањања материјала у области

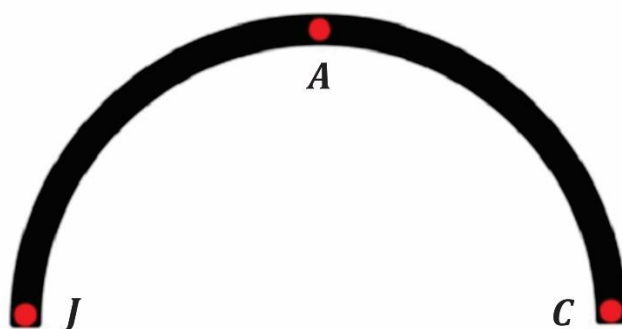
$MN'OP$ што резултира појавом наведених грешака у области NON' . На слици 2.4 приказано је савијање зида и грешке облика при обради танкозидних делова.



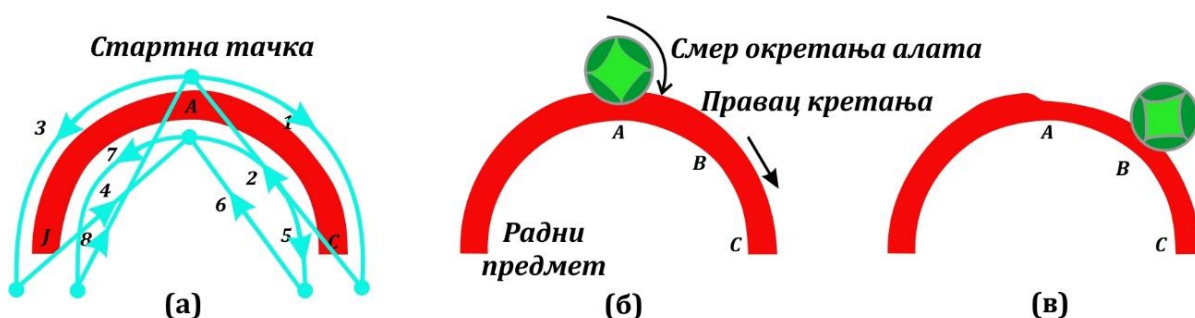
Деформације које се јављају код кривих танкозидних делова, настају углавном под дејством сила резања [72]. Силе резања су директно повезане са параметрима обраде, што говори да је избор одговарајућих параметара обраде од велике важности. Крутост танкозидних делова је мала, међутим, за различите положаје алата током процеса обраде, крутост се значајно мења. Осим тога, како се крутост константно мења заједно са процесом уклањања материјала са обратка, различите путање алата доводе до различитих углова нагиба танкозидне структуре. Према

томе, избор одговарајуће стратегије обраде, односно путање алата је такође значајно.

У поређењу са равним (линијским) танкозидним структурама, криве односно кружне танкозидне структуре су стабилније (круће) због структуре која је слична троуглу, што је приказано на слици 2.5. [73]. Када сила резања дејствује на тачку A , материјал на странама AJ и AC врши отпор продирања. Када материјал апсорбује довољно снаге да успостави равнотежу са силом резања, тада је савијање материјала мало. Међутим, када сила резања делује на слободан крај или близу слободног краја, као што је случај код тачке C и тачке J , у таквим условима отпор продирања који се јавља код материјала није довољан да се супротстави сили резања, долази до појаве деформација у циљу остваривања равнотеже сила, а као резултат смањује се количина уклоњеног материјала. Исти случај је и код вертикалне обраде кривих танкозидних делова. Са слике 2.6, може се закључити да је крутост у тачки A далеко већа него у тачки C , због тога што је тачка A ограничена материјалом са обе стране, док се тачка C налази на слободном крају танкозидне структуре.



Слика 2.5. 2D приказ анализе деформације у хоризонталном правцу при обради кружне криволинијске танкозидне структуре [73]

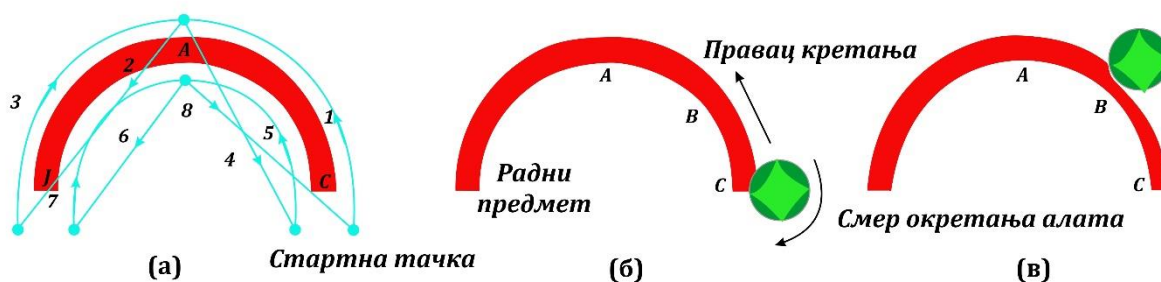


Слика 2.6. Процес обрада од високе ка ниској крутости криволинијског дела [73]

(а) путања алата, (б) стартна тачка и (в) правац обраде

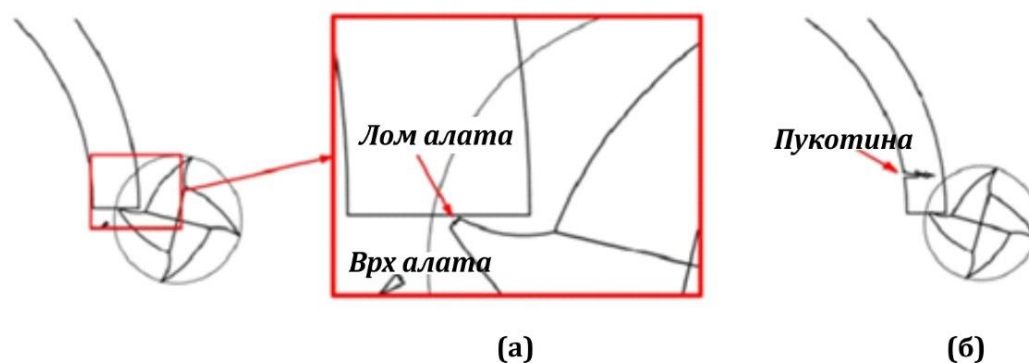
Код стратегије обраде која је приказана на слици 2.7 почетак обраде је у тачки C . Обрада која се изводи од тачке C ка тачки A има за последицу кретање из ниске ка високој крутости, док се материјал уклања на начин који је приказан на слици

2.7б и 2.7в. Крутост која се јавља када се обрада изводи из тачке *C* ка тачки *B* је знатно мања него она која се јавља у случају од тачке *B* до тачке *A*. Овакав начин обраде доводи до појаве вибрација и великих деформација.



Слика 2.7. Процес обраде од ниске ка високој крутости криволинијског дела [73]
(а) путања алата, (б) стартна тачка и (в) правац обраде

Код дефинисања стратегије обраде потребно је правилно изабрати улаз/излаз алата у/из захвата. У случају да се не води рачуна о овим елементима стратегије, може доћи до оштећења резног алата услед изненадне колизије са ивицом дела, што је приказано на слици 2.8а. При томе долази до одвајања (одламања) материјала уместо уклањања материјала. С обзиром на малу дебљину дела, јавља се тзв. *феномен резне ивице*, односно појаве пукотине на делу због мале чврстоће, што је приказано на слици 2.8б.



Слика 2.8. Скица настанка лома услед грешака у стратегији обраде [73]

(а) делимично увећан изглед лома и (б) пукотина

2.3.2 Савремени трендови у процесу обраде танкозидних делова

Непознавање процеса и примена застарелих метода обраде танкозидних делова од лаких легура има за последицу остваривање мање производности и економичности као и потешкоће у погледу остваривања тачности и квалитета израде делова.

Грешке које могу настати током обраде могу се отклонити применом једне или више техника, као што су [28]:

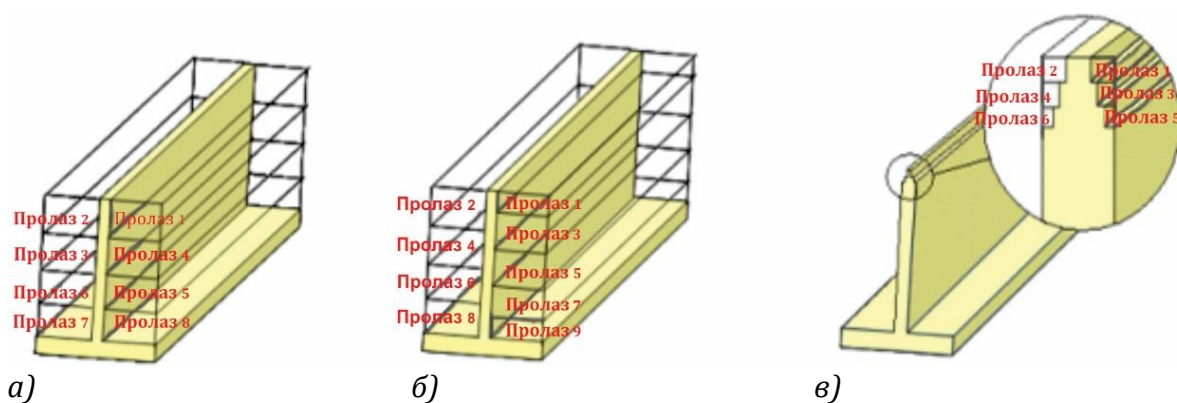
- *Избор одговарајуће врсте и броја захвата и пролаза којима се остварују задати квалитети обрађене површине и одговарајуће толеранције,*
- *Калибрисање завршних пролаза у циљу задовољења тачности и квалитета обраде,*
- *Квалитетна припрема и провера валидности CNC управљачког програма;*
- *Коришћење прилаза који се заснива на елиминацији деформација при обради уз задовољење крутости зидова дела,*
- *Примена метода коначних елемента у моделирању процеса обраде.*

Како би се превазишли недостаци који се јављају у обради танкозидних делова, све више се примењују методе коначних елемената (*енгл. Finite Element Method, FEM*) за моделирање утицаја промене параметара и стратегије обраде на грешке обраде. Применом метода коначних елемената може се извршити предикција грешака у обради резањем, на основу чега се могу смањити ове грешке и елиминисати пробна подешавања у производним погонима, која су често веома скупа, дуготрајна и захтевају употребу додатних ресурса. Међутим, овакав начин поседује и одређени недостатак због тога што је потребно дуго време за рачунарску анализу у зависности од сложености проблема. Некада дуга рачунарска анализа ограничава свакодневну индустријску примену, због тога што се предузећа свакодневно сусрећу са новим производним захтевима које је потребно што пре решити. Такође, ограничене могућности пројектовања у *FEM* софтверима захтевају превођење модела из неког *CAD* софтвера, што за последицу може имати проблеме у погледу губитка података о производу [74-76].

У циљу превазилажења проблема појаве савијања танкозидних делова при обради глодањем која доводи до деформација и смањене тачности, истраживане су многе стратегије, које се могу груписати на следеће начине [74-83]:

- *Оптимизација услова при обради глодањем,*
- *Оптимизација геометрије алата,*
- *Оптимизација стратегије обраде,*
- *Пројектовање и израда одговарајућих стезних прибора и*
- *Наизменично (слика 2.9) или истовремено глодање са обе стране танкозидних припремака (машине са два главна вретена).*

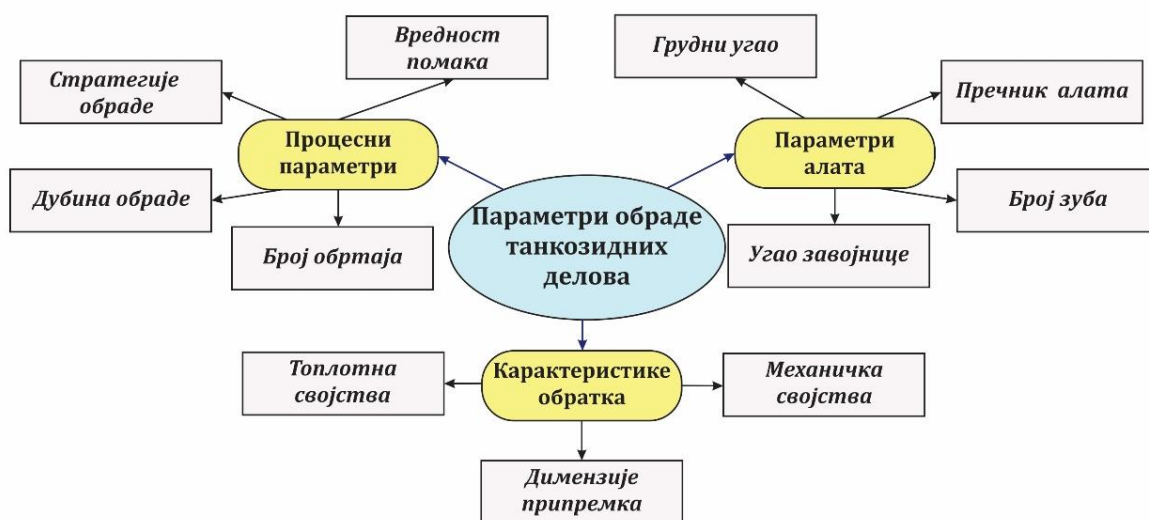
Квалитет обрађене површине представља важан параметар при обради танкозидних делова. Делови од легура алуминијума поседују релативно низак модул еластичности, што за последицу има појаву еластичне деформације обратка при обради глодањем. Ова појава утиче на количину уклоњеног материјала (*енгл. Material Removal Rate - MRR*) и доводи до лошег квалитета обрађене површине, лома обратка и смањења продуктивности [71].



Слика 2.9 Различите технике комбиновања пролаза при обради глодањем танкозидних делова: (а) нема преклапања пролаза са једне и друге стране, (б) преклапање пролаза са једне и друге стране и в) степенести пролази [73]

2.3.3 Карактеристични параметри технолошког процеса обраде танкозидних делова

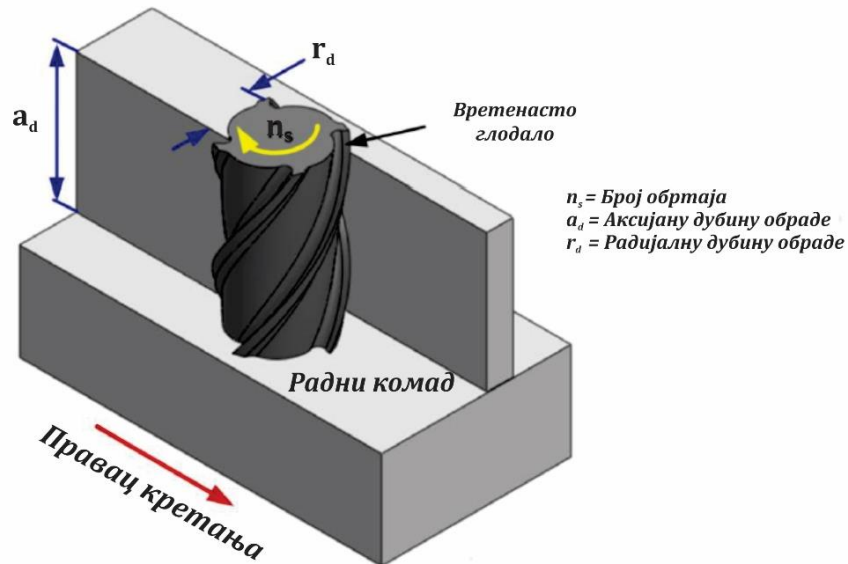
У инжењерској пракси појављују се бројни параметри технолошког процеса обраде танкозидних делова који утичу на излазне конструкционе и техноекономске карактеристике производа и процеса. Избор одговарајућих параметара представља изазов с обзиром на сложеност обраде танкозидних делова [71, 60]. Аутор [71], је параметре обраде танкозидних делова груписао у три групе: процесни параметри, параметри алата и карактеристике обратка, слика 2.10. Процесни параметри или параметри обраде се дефинишу: дубином резања, помаком, бројем обртаја/брзином обраде и стратегијом обраде.



Слика 2.10. Параметри обраде танкозидних делова [71]

Такође према аутору [71], параметри процеса обраде глодањем танкозидних делова обухватају (слика 2.11):

- Аксијалну дубину обраде (енгл. *Axial depth of cut - a_d*),
- Радијалну дубину обраде (енгл. *Radial depth of cut - r_d*),
- Помак (енгл. *feed rate - f_r*),
- Број обртаја (енгл. *Spindle speed - n_s*) /Брзина резања (енгл. *Cutting speed - v_s*),
- Стратегије обраде/Путања алата (енгл. *Machining strategy/ tool path*).



Слика 2.11. Параметри процеса глодања који утичу на израду танкозидних делова [71]

Параметри алата обухватају: пречник алата, број зуба, нападни угао и леђни угао алата. Параметре обратка чине: карактеристичне димензије дела са толеранцијама и квалитетима обраде, механичке карактеристике и топлотне карактеристике дела.

3. ПРЕГЛЕД АКТУЕЛНОГ СТАЊА У ОБЛАСТИ ОБРАДЕ ТАНКОЗИДНИХ ДЕЛОВА

Паралелно са повећањем тржишних захтева за обрадом танкозидних структура (делова) од различитих легура, реализују се истраживања која су оријентисана на оптимизацију конструкције у циљу смањења масе, деформација, вибрација, односно повећања носивости и чврстоће, као и на оптимизацију технолошких процеса израде ових компоненти у циљу смањења времена и трошкова обраде, смањења грешака у погледу остварења толеранција мера, облика и положаја, односно повећања квалитета обраде.

3.1 Преглед истраживања у области статичких и динамичких проблема обраде

При обради танкозидних делова један од основних проблема представља појава вибрација као последица мале крутости поменутих делова. Вибрације које могу настати при обради се деле на самопобудне и принудне (слободне) вибрације [84].

Самопобудне вибрације јављају се у случају када је фреквентни одзив побуђен од стране самог процеса обраде, односно услед трења у систему алат-обрадак, термо-механичких ефеката или као последица регенеративног ефекта [85]. Поменуте појаве су последица вибрације алата током процеса обраде, али је најважнији фреквентни одзив који потиче од обратка, с обзиром да се константно мења због геометријске варијације попречног пресека струготине [84-88]. Овакво циклично понашање за последицу има честу промену фреквентног одзива система и нестабилан процес обраде [89-91]. Нестабилан процес обраде доводи до повећане хрпавости обраде, што утиче на испуњење захтева квалитета обрађене површине [84,92,93].

Додатни проблеми, који су повезани са малом крутошћу дела су у вези са димензионалним грешкама у процесу обраде, због појаве савијања танкозидног дела. Ови статички проблеми се не узимају у обзир при обради делова са већом крутошћу [84, 94, 95].

Статичко савијање може се јавити као последица интеракције сила резања [96], на које утицај имају стратегије обраде (истосмерно и супротносмерно глодање), као и параметри обраде [96-101]. Увођење процеса високобрзинске обраде глодањем има за последицу смањење сила резања и мање заостале напоне, али исто тако ови процеси не могу у потпуности да уклоне појаву савијања дела [102-104].

Denkena u Schmidt [105] су дефинисали побољшани модел симулације, којим се предвиђа облик одступања дела од задатог облика. Ова појава се појављује за време процеса глодања крајева танкозидних структура који су непогодни за

обраду. У раду је разматран утицај сила резања које изазивају угиб танкозидних структура и појаву грешака на обрађеним деловима. Развијен је метод суперпонирања напрезања на основу статичког и динамичког облика грешке приликом обраде.

Периферно глодање танкозидних структура моделирано је од стране **Budak** и **Altintas** [106]. Развијени модел обезбеђује задовољавајуће предикције сила резања и димензионалних површинских грешака извијања резног алата и танкозидне структуре током обраде глодањем. Такође, овај модел обезбеђује предикцију грешака облика и помака дуж путање алата, како би се током обраде глодањем ови параметри могли одржати у дефинисаним границама.

Arnaud u cap. [107] истраживали су стабилност процеса машинске обраде танкозидних алуминијумских структура. Систем је креиран коришћењем динамичког механистичког модела, док су динамички параметри система добијени применом методе коначних елемената. Резултат рада показује добру корелацију између моделираних и експерименталних резултата вредности сила резања, као и амплитуде и фреквенције вибрација које доводе до појаве самопобудних вибрација (*eng. chatter*) на предметима обраде.

Експериментално истраживање стабилности процеса глодања танкозидне алуминијумске структуре, преко мерења сила резања и убрзања, извршено је у **Rusinek** и сар. [108]. Анализа је извршена преко класичних дијаграма стабилности и рекурентне квантификационе анализе. Резултати рада указују да је варијација модалних параметара при процесу резања танкозидних структура кључна за предикцију дијаграма стабилности. Такође, аутори указују да се предложени индекс стабилности може користити у сврху одређивања граничне стабилности процеса, ако су критичне (улазне) вредности исправно дефинисане.

3.2 Преглед истраживања у области аналитичких модела

Већина аналитичких модела, односно истраживања на ову тему је заснована на развоју нових метода за предвиђање понашања система базираних на фреквентном одзиву [109] и деформација које настају као последица сила резања [110]. Заједнички циљ ових истраживања је базиран на избору оптималне геометрије алата и параметара обраде, који као резултат имају добијање константне дебљина струготине уз што мање вибрације. Већина ових истраживања се може груписати на:

- **Предвиђање сила резања** → очекиване силе резања могу се израчунати помоћу механичког модела, који је прилагођен параметрима обраде, алату, као и материјалу у функцији коефицијента силе,
- **Динамички модел** → након прорачуна сила резања, стабилност система се може одредити помоћу функције фреквентног одзива (енгл. *Frequency Response Function, FRF*) и вредности параметара обраде (енгл. *cutting parameters*) и

- **Модел савијања дела** → чак иако су силе при обради резањем стабилне и нема појаве тзв. подрхтавања, може и даље доћи до савијања дела (увијања) што највише зависи од крутости материјала и померања (одступања) контактне тачке која се јавља између алата и обратка.

3.3 Преглед примене рачунарских технологија у области истраживања

На основу прегледа литературе дошло се до закључка да је у посматраној области истраживања у великој мери заступљена примена рачунарских технологија (енгл. *Computer Aided technologies, CAx*). Најзаступљенија је примена метода коначних елемента (енгл. *Finite Element Method, FEM*), које се користе за предикцију и анализу појаве вибрација, као и за симулацију савијања танкозидних делова током процеса обраде (најчешће глодањем и стругањем) [97]. Почетне силе које се јављају при обради резањем се израчунавају помоћу механичких модела, који су базирани на експерименталним подацима [96] или се добијају применом одговарајућих софтвера, као што су *AdvanEdge TM, VERICUT®*, *DEFORMTM* [101-112]. Поједини аутори су користили комерцијалне софтвере *ANSYS™* и *ABAQUS* за добијање функције фреквентног одзива система, динамичког понашања и модела савијања дела [113-121]. Анализом литературних извора, истраживања се могу груписати на:

- *Предвиђање вибрација,*
- *Предвиђање димензионалних грешака.*

3.3.1 Предвиђање вибрација

Истраживања везана за предвиђање појаве вибрација током процеса обраде се углавном односе на две групе: појаву тзв. подрхтавања (енгл. *Chatter*) и фреквенције осциловања (енгл. *Amplification*) [97].

Предвиђање тзв. појаве подрхтавања започиње са израчунавањем фреквентног одзива припремка и вретена машине применом теста са чекићем [19, 92, 122-126]. Побуђивање једне тачке на резном алату и различитих тачака на припремку се региструје помоћу акцелерометра. Подаци који се добију се обрађују и филтрирају како би се одредила матрица фреквентног одзива и матрица пригушења [97, 127]. Овако добијени резултати доводе до општег динамичког модела који зависи од параметара обраде. Параметри обраде директно утичу на ефикасност процеса и на његову стабилност. У циљу истовременог обезбеђивања стабилности и ефикасности процеса, већина истраживача користи дијаграме стабилности (енгл. *Stability Lobes Diagrams, SLD*) [127].

За одређивање параметара обраде код танкозидних делова, у циљу редуковања подрхтавања, најчешће коришћени алати су дијаграми стабилности [128-132]. Дијаграми стабилности представљају област стабилности где се неће јављати вибрације, на основу броја обртаја и аксијалне дубине обраде.

Фреквенција осциловања и резонанца се одређују на основу диференцијалних једначина динамичког понашања система. Ови модели су углавном развијени у *MATLAB*-у или *C++* [88, 133-136]. Међутим, оваква решења су временски ограничена и имају ниску тачност. Због тога, поједини аутори користе *FEM* методе за предвиђање вибрација. Код оваквих истраживања, веома је важно размотрити количину уклоњеног материјала, као и трошење резног алата. Због тога, истраживачи морају константно да врше поставку и анализу динамичког система и његову стабилност, који захтевају додатно рачунарско време [97].

Аутори [137, 138] су развили систем за структурну динамичку модификацију (енгл. *Structural Dynamic Modification, SDM*). У поменути систем убацили су ажурирање промене количине уклоњеног материјала/масе током времена обраде. *Li u cap* [96] су развили динамички модел са циљем побољшања храпавости обрађене површине при обради делова лопатица турбине. За прорачун одговарајућих сила које се јављају при процесу глодања у *X* и *Y* правцу коришћене су одговарајуће стратегије обраде и параметри обраде. Такође су користили *ANSYS* софтвер, као алат за примену методе коначних елемената. Испитивања храпавости обрађене површине лопатице турбине показала су да је квалитет знатно побољшан након оптимизације улазних параметара, чиме су аутори потврдили свој модел. *Ahmadi* [139] је истраживао поређење метода моделирања коначних трака (енгл. *Finite Strip Model, FSM*), анализе метода коначних елемената и полу аналитичких метода за динамичко испитивање обраде танкозидних делова.

3.3.2 Предвиђање димензионалних грешака

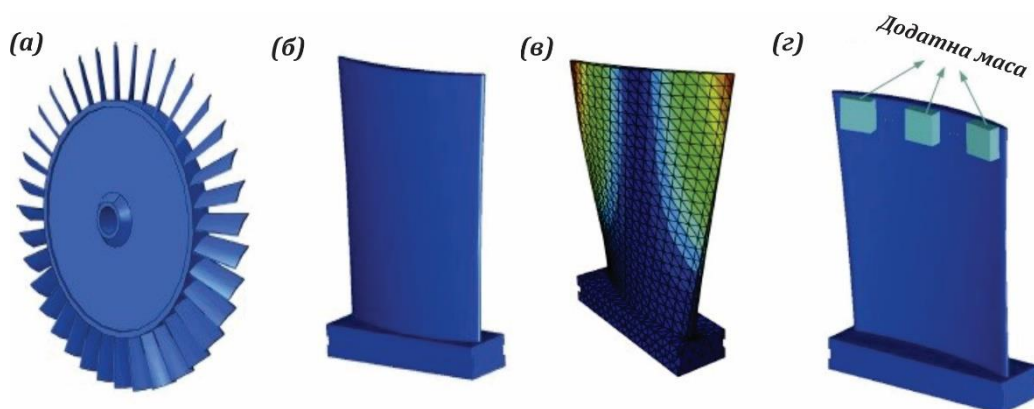
Предвиђање димензионалних грешака применом рачунара се углавном односи на укључивање симулације у циљу одређивање савијености дела и смањење димензионих одступања. *Yan u cap.* у раду [98] истраживали су утицај променљиве дубине обраде на обраду танкозидних делова. Аутори радова [99, 140, 141] истраживали су утицај дебљине зида на димензионалне грешке. Утицај помака на димензионалне грешке, испитиван је од стране аутора [98, 142]. Утицај стезног прибора на предвиђање димензионалних грешака испитиван је у радовима [91, 143]. Поједини аутори су истраживали утицај позиције алата на димензионалне грешке [111, 134].

Kanchana u cap. [144] користе приступ базиран на методи коначних елемената и анализе фреквентног одзива за танкозидне авио компоненте које се обрађују глодањем. Аутори су потврдили да је анализом фреквентног одзива обратка који је изложен динамичким силама резања могуће генерисати оптималне брзине резања са аспекта тачности обраде и високе динамичке крутости танкозидних структура.

На појаву димензионалних грешака може да утиче и појава заосталих напона, који могу бити проузроковани параметрима обраде, као што је геометрија алата

[145, 146], дубина обраде [99, 147], захтевани квалитет, стратегије путање алата [148-153], температура и силе резања које се јавља у процесу обраде [154-156].

Такође, аутори у радовима [156-172] су разматрали процесе обраде танкозидних компоненти, при чему су коришћене методе коначних елемената за симулацију деформација које се јављају при обради, а све у циљу повећања тачности димензија и облика делова који се обрађују. **Wan** и сарадници [163] су истраживали оптимизацију и побољшање стабилности процеса обраде глодања додавањем додатне масе на танкозидне делове, слика 3.1.



Слика 3.1. Шематска илустрација танкозидних делова (а) CAD модел турбине (лопатице); (б) сегмент лопатице; (в) модални облик почетног радног комада и (г) модификација структуре додавањем додатне масе [154]

3.4 Преглед истраживања у области оптимизације процеса израде танкозидних делова

Избор и оптимизација параметара обраде се може реализовати помоћу експерименталних метода које су засноване на статистичким моделима или моделима вештачке интелигенције (неуронске мреже, фази логика, оптимизација роја честица *PSO – Particle Swarm Optimization*, генетски алгоритми,...).

Параметри обраде танкозидних делова се такође проучавају на бази експерименталних истраживања, али и применом статистичких метода [173-179]. Истраживачи су помоћу ANOVA методе анализирали на који начин параметри резања и стратегија обраде утичу на хрпавост обрађене површине и на димензионалне грешке.

Оптимизација параметара обраде са аспекта смањења деформације приликом обраде вршена је од стране **Sapthagiri u Rao** [180]. Поменути аутори су користили **Taguchi** метод за експериментално испитивање. Испитивали су значај параметара обраде (брзина, помак, дубина обраде, ширина резања, стратегије обраде) и утицај средства за хлађење и подмазивање (*CXII*) на смањење температуре алата, као утицајних параметара на деформацију делова током обраде. Аутори рада [165] користили су ANOVA анализу за редуковање савијања

конзоле разматрањем различитих углова нагиба. **Izamshah u cap.** [23] су током истраживања добили општи модел сила обраде применом ANOVA анализе, обучавањем скупа података помоћу FEM симулације.

Oliveira и cap. [176] истраживали су утицај смера међусобног кретања алата и предмета обраде (истосмерно и супротносмерно глодање) на грешке облика и храпавост обрађене површине при обради танкозидних делова од алатних челика *AISI H13* на 4-осној глодалици. Резултати који су добијени показују да избор истосмерног и супротносмерног глодања има значајан утицај на грешке облика. Истосмерно глодање оставља више од 0,2mm материјала, док супротносмерно глодање уклања више од 0,2mm материјала него што је дефинисано цртежом дела. Такође, коришћена је ANOVA метода за оптимизацију параметара обраде. Закључено је да при обради глодањем помак по зубу има незнатно већи утицај од дубине резања на грешку облика (тачност облика), а у екстремних случајевима и до 1,5 пута већи утицај.

Sridhar u Babu [165] су истраживали утицај количине уклоњеног материјала на савијање танкозидних делова. За истраживање користили су 2^2 план експеримента (*енгл. Two level full factorial experimental design*) комбинујући параметре обраде легуре алуминијума Al2014: помак, брзину, дубину и ширину обраде. Применом ANOVA методе закључено је да помак, дубина и ширина обраде имају највећи утицај на савијање дела при обради. Повећање помака, дубине и ширине обраде доводи до повећања увијања танкозидног дела. Такође закључено је да је боље повећати количину уклоњеног материјала кроз повећање помака и брзине, него кроз повећање дубине обраде и ширине обраде, како не би дошло до савијања зида дела.

Qu u cap [175] оптимизовали су параметре обраде при глодању танкозидних делова са становишта сила резања, храпавости обрађене површине и количине уклоњеног материјала. За проналажење оптималног решења коришћен је оптимизациони модел недоминантног генетског алгоритма (*енгл. Non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA II*).

Bolar u cap. [151] истраживали су утицај помака, броја зуба и стратегије обраде на квалитет обрађене површине, грешке облика и савијање при обради криволинијских делова од легуре алуминијума *Al 2024*. За план експеримента користили су Тагучи Л9 план експеримента. Закључено је да се на конкавној страни криволинијског дела јављају веће силе резања. Такође, комбиновани приступ обраде конкавне и конвексне стране даје бољи квалитет обрађене површине. Исто тако, дошло се до закључка да алат са четири зуба даље бољи квалитет обрађене површине у односу на алат са три зуба.

Das u cap. [181] истраживали су утицај пет различитих прилаза у обради танкозидних делова и њихов утицај на тачност дебљине зида, као и на квалитет обрађене површине. Приступ обраде на којем се постепено повећава аксијална

дубина обраде са константном вредношћу помака резултирала је бољом тачношћу димензија и квалитетом обрађене површине, у односу на остала четири приступа.

Yan u cap. [98] применили су на експериментални метод подешавање максималне дубине обраде као функције силе резања, тако да нема никаквог савијања дела.

Сви наведени модели могу се користити као поједностављени модели за примену адаптивног управљања, смањење потребног времена и модификовање параметара обраде за што краће време [85]. Утицај параметара обраде на заостале напоне, силе резања, увијање дела и хрпавост обрађене површине приказани су у табели 3.1.

Табела 3.1. Ефекат параметара обраде на преостале напоне, силе резања, увијање и хрпавост обрађене површине [85]

	Заостали напони	Силе при резању	Савијање дела (деформације)	Хрпавост обрађене површине
Број обртаја	↓	↑	↑	↓
Помак	↑	↑	↑ / ↓	↑
Дубина обраде	↑	↑	↑	↑
Број пролаза	↑		↑	↑
Количина уклоњеног материјала		↑		↑

1 Истосмерно глодање повећава увијање дела, док супротносмерно глодање смањује увијање дела.

Pandian u cap. [182] у оквиру својих истраживања анализирали су утицај силе резања на деформације при обради танкозидних делова, услед чега се јављају различите дебљине зида, при врху веће а у корену мање. Аутори су развили вештачку неуронску мрежу (енгл. *Artificial Neural Network, ANN*) за предикцију силе резања током обраде танкозидних делова и алгоритам за оптимизацију применом метода роја честица (енгл. *Particle Swarm Optimization, PSO*) у циљу одређивања оптималне брзине и помака обраде.

Liu [183] је истраживао утицај еластичне деформације при варијацији дебљине зида, дужине зида и висине зида танкозидних делова. Анализом истраживања дошао је до закључка да се смањењем дебљине зида вредност еластичне деформације повећава. Такође је закључио да се вредност деформације повећава са повећањем висине зида танкозидних делова.

Novak-Marcincin u cap. [184] испитали су могућност брзе анализе одговарајуће стратегије путање алата у процесу обраде глодањем различитих типских облика (правоугаоних, ротационих, Л-жљеба, Т-жљеба, итд.). На основу

добити резултата развијено је софтверско решење за помоћ при избору оптималне стратегије обраде глодањем на основу минималног времена израде као критеријума оптимизације. Урађена је и провера резултата добијених применом софтвера и експерименталних резултата, који су показали задовољавајући ниво тачности, са грешком мањом од 10%.

Msaddek u cap. [185] су представили методологију оптимизације стратегија машинске обраде на примеру обраде цепова сложеног облика. Аутори су у ту сврху развили аналитички модел којим моделирају вредност помака у односу на стратегију путање алата. Резултат рада идентификује дивергентну паралелну спиралну путању алата као оптималну путању алата за израду посматраних радних предмета.

Baranek u cap. [186] су се усмерили на истраживање утицаја начина уклањања материјала на квалитет обраде танкозидних структура. Током експерименталних истраживања усвојена су три начина уклањања материјала са различитим редоследом извођења захвата и пролаза, као и обрада са и без СХП. Резултати истраживања указали су на оптималне стратегије са применом СХП које дају најбоље резултате у погледу димензионе тачности и квалитета обрађених површина.

Ratchev u cap [187] приказују виртуелно окружење за симулацију и предикцију одступања танкозидних структура приликом машинске обраде. Модел за уклањање материјала базиран је на итеративном воксел алгоритму трансформације. У раду је предложено и експериментално тестирано неколико трансформационих стратегија. Аутори закључују да се уклањање материјала са структура малих крутости може применити и на хомогена окружења без потребе за додатним трансформацијама модела дела.

Gao Y.Y. u cap. [188] извршили су анализу пројектовања путање алата и компензацију деформација обраде полукружних површина од тешко обрадивог материјала (*TC4 – титанијум*) при високо брзинском глодању.

Gang [189] је спровео студију о деформацији танкозидних делова од легуре титанијума *Ti6Al4V* при процесу обраде глодањем. Извршено је поређење резултата између симулираног и експерименталног деформисања које се јавља у процесу резања. Закључено је да су установљени модели коначних елемената тачни и да се могу користити за предвиђање деформација које се јављају при обради резањем.

Cheng u cap. [190] су такође извршили симулацију деформација при обради и експериментално испитивање танкозидних делова од легуре алуминијума *TC4*. На основу анализа карактеристика деформација и сила резања дефинисан је математички модел за обраду вретенастим глодалом.

Qasim u cap. [191] поставили су два циља. Први циљ се односио на развој математичког модела за предвиђање компоненти сила резања у свим правцима на

основу предложених вредности улазних променљивих. На основу модела добијају се оптималне комбинације улазних променљивих како би се пронашле оптималне силе резања, а самим тим извршила и аутоматизација процеса глодања кроз развој програмског система. Други њихов циљ се односио на примену развијеног модела за оптимизацију параметара обраде као што су помак, брзина резања, аксијална и радијална дубина обраде и анализа њихових утицаја.

Shamsuddin u cap [192] извршили су поређење стратегија за обраду глодањем на танкозидним деловима од алуминијума. На основу добијених резултата, закључили су да ограничења која се односе на храпавост обрађене површине, време обраде и тачност дебљине зида су врло битни са становништва остваривања високе производности израде танкозидних делова. Најбољи резултати у погледу тачности дебљине зида остварени су применом спиралног глодања, док се иста стратегија није најбоље показала са становништва квалитета обрађене површине.

Pompa [28] је развио систем за аутоматизовано генеративно пројектовање технолошких процеса танкозидних производа који се обрађују на високобрзинским машинама.

Izamshah [23, 173] се бавио развојем хибридног система за предикцију деформације савијање зида приликом обраде танкозидних делова од легура титанијума који се користе у авио индустрији.

Поједини *CAM* софтвери поседују оптимизационе модуле који интегришу динамичке грешке индуковане у виду података о силама резања, док остали софтвери интегришу само силу и путању обраде у *FEM* софтверима.

Rai u sar. [80] разматрали су еластопластичне деформације у 3D виртуалном окружењу за предикцију нелинеарног понашања током процеса обраде. Аутори рада [193] укључили су вештачке неуронске мреже у *CAM* систем у циљу побољшања предикције увијања танкозидног дела.

3.5 Завршна разматрања литературних истраживања у области обраде танкозидних делова

Из претходне анализе литературних извора може се закључити да је област процеса обраде танкозидних структура, односно делова већ дуги низ година актуелан предмет истраживања широм света.

Како се повећавају тржишни захтеви за обрадом танкозидних структура, истовремено се реализују истраживања која су оријентисана на оптимизацију конструкције и технолошких процеса израде ових компоненти. Оптимизација конструкције се врши у циљу смањења масе, деформација, вибрација, односно повећања носивости и чврстоће, док се оптимизација технолошких процеса врши у

циљу смањења времена и трошкова обраде, односно повећања тачности мера, облика и положаја, квалитета обраде итд.

Идентификовано је да не постоји универзални модел или јединствени приступ који би се могао имплементирати у овој области. Наведена истраживања су оријентисана на поједине улазно/излазне параметре технолошких процеса обраде танкозидних делова, при чему су примењиване разне методе и технике. Сходно томе, овакво стање намеће закључак да је оправдано вршити даља истраживања у области машинске обраде танкозидних структура у циљу оптимизације и унапређења технолошких процеса њихове израде, у смислу повећања производности, економичности, продуктивности, тачности и квалитета израде делова [194]. Анализом великог броја литературних извора, извршена је систематизација утицајних параметара обраде на танкозидне структуре, што је приказано на слици 3.2.



Слика 3.2. Утицајни параметри технолошког процеса обраде танкозидних структура [195]

Основне групе параметара обраде танкозидних делова чине [195]:

- **Параметри технолошког процеса:** Врста и облик припремка (одливак, шипка, лим...), Врста и редослед процеса (операција) обраде (нпр. ливење, обрада резањем, термичка обрада...), Врста и редослед захвата обраде (нпр. чеоно и обимно глодање, груба и фина обрада...),

- **Параметри обрадног система:** *Машина алатка (крутост, тачност, расположиви режими обраде...), Алат (врста, материјал, геометрија, број резних ивица, карактеристични углови резних ивица...), Прибор (врста, начин и место позиционирања, силе стезања,...), СХП (врста, концентрација, чистоћа, начин довођења средства, притисак,...),*
- **Параметри обратка:** *Врста материјала, Механичке карактеристике (тврдоћа, чврстоћа, еластичност, жилавост,...), Физичко-хемијске карактеристике (структура, хемијски састав, густина, топлотне карактеристике, отпорност на корозију,...), Технолошке карактеристике (параметри обрадљивости), Геометријске карактеристике (облик: линијски, троугаони, правоугаони, шестоугаони и сложени; однос дебљине и висине зида; тачност мера, облика и односа површина; квалитет обрађених површина, ...), и*
- **Параметри захвата обраде:** *дубина обраде, помак, брзина обраде/број обртаја, стратегије путање алата.*

Могућност примене резултата истраживања може бити од значаја у аутомобилској, војној и ваздухопловној индустрији, алатничарству, енергетици, прецизној механици, и другим областима где се примењују танкозидне компоненте.

Практична примена резултата истраживања има за циљ повећање тачности, квалитета, флексибилности, производности и економичности производње танкозидних делова, јачања знања у областима специфичности обраде танкозидних делова и лаких легура алуминијума, као и општих знања везаних за пројектовање и оптимизацију технолошких процеса у индустријским условима.

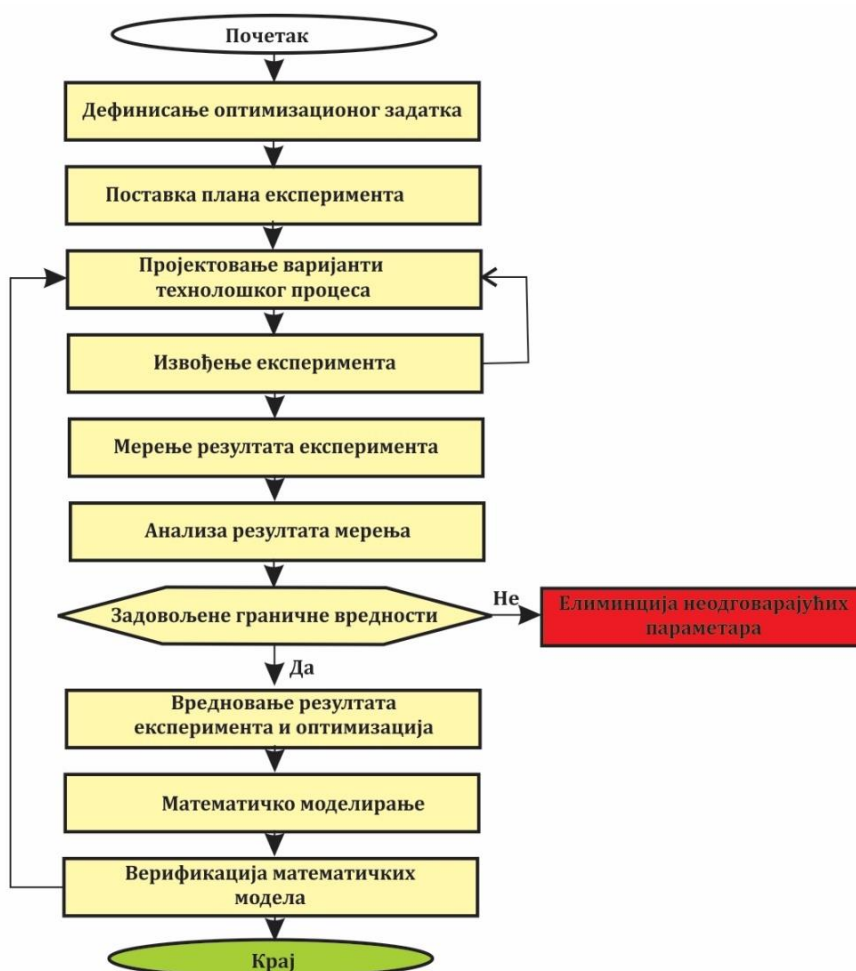
4. ПОСТАВКА И ОПИС МЕТОДОЛОГИЈЕ ИСТРАЖИВАЊА

4.1 Дефинисање методологије истраживања

Теорија оптимизације као научна дисциплина има све већу примену у решавању инжењерских проблема, где се на бази постављених критеријума оптимизације/функција циља, применом одговарајућих метода оптимизације проналази најбоље решење на изабраном објекту оптимизације за одређене услове.

У циљу остварења дефинисаних задатака у посматраној дисертацији постављена је методологија за оптимизацију технолошког процеса израде танкозидних структура. Методологија базира на општости примене, где се на једноставан начин може доћи до поузданих података за квалитетно пројектовање технолошких процеса израде танкозидних делова.

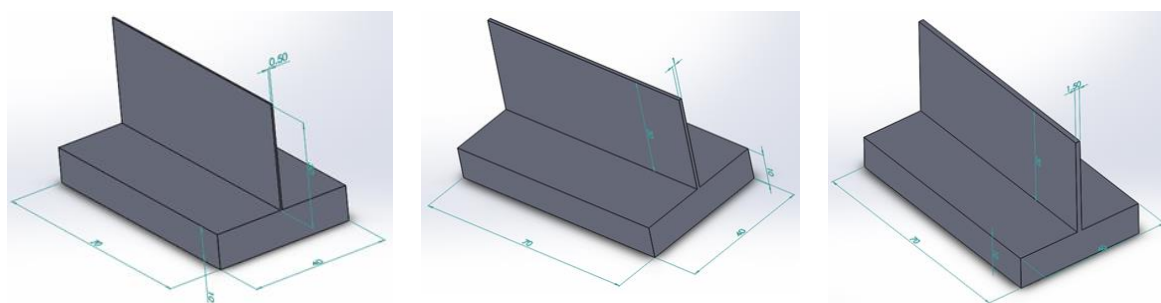
Основне етапе методологије оптимизације пројектовања технолошког процеса обраде танкозидних структура од легуре алуминијума су приказане помоћу алгоритма на слици 4.1.



Слика 4.1. Основни алгоритам методологије истраживања

Објекат истраживања у овом раду представљају танкозидне структуре линијског типа од легуре алуминијума, дебљине зида 0,5 - 1,5mm, умерене и велике висине у односу на дебљину зида (20:1, 30:1 и 60:1), слика 4.2.

Производња танкозидних делова се базира на скидању велике количине материјала са пуних припремака. Процес израде ових делова је веома захтеван, јер се од технолошког процеса захтева испуњење бројних конструкционо-технолошких карактеристика, за чије остварење је неопходно користити квалитетне обрадне системе.

а) $a=0,5\text{ mm}$ б) $a=1\text{ mm}$ в) $a=1,5\text{ mm}$

Слика 4.2. 3D модел танкозидне структуре линијског типа за различите дебљине зида

Анализом конструкционо-технолошких захтева танкозидних структура, као и могућности обрадних система који су били расположиви у посматраном истраживању у разматрање су узете две врсте CNC обрадних система, односно процеса обраде према брзини обраде:

- Средњебрзинска обрада,
- Високобрзинска обрада.

Сходно томе у наставку су посебно дефинисани оптимizacionи задаци, односно методологије истраживања оптимизације технолошког процеса обраде глодањем танкозидних структура за средњебрзинску и високобрзинску обраду.

Методологије се заснивају на примени теорије експерименталних истраживања, односно одговарајућих вишефакторних планова експеримената. Метод вишефакторне статистичке анализе развијен је од стране енглеског научника *R. Fišera*, који омогућује истовремено варирање више утицајних фактора на различитим нивоима [196-198].

Теорија планирања експеримената у инжењерству има за циљ побољшање и оптимизацију различитих инжењерских процеса, са бројним предностима које су наведене у поглављу 2.1.

Процедура планирања експеримената је заснована на статистичком приступу и укључује више активности [44, 199-202]: (а) препознавање и формулисање проблема, (б) избор зависних (излазних) променљивих (в) избор

независних (улазних) променљивих, као и нивоа и опсега интервала, (г) избор плана експеримената, (д) извођење експеримената, (ђ) статистичка обрада и анализа експерименталних података, (е) закључци и препоруке.

Без обзира на крајњи циљ предузетих истраживања избор математичког модела, који адекватно описује процес, а чије креирање по могућности треба извршити уз минимални утрошак ресурса је најзначајнији сегмент у примени планирања експеримената.

До сада је развијен врло велики број различитих експерименталних планова у многим областима, као што су факторни, парцијални факторни, централни композитни (*Box-Wilson*-ови планови), *Box-Behnken*-ови, *Plackett-Burmann*-ови и *Taguchi*-јеви експериментални планови [200]. Према литературним подацима највећу примену имају *Box-Wilson*-ови централни композитни и *Taguchi*-јеви експериментални планови, који су и примењени у овом истраживању. За оптимизацију параметара средњебрзинске обраде танкозидних структура примењен је *Централни композитни план*, док је код високобрзинске обраде примењена *Taguchi*-јева метода [200-202].

4.1.1 Метода централног композитног планирања експеримента

Етапа избора и креирања плана експеримента за *средњебрзинску обраду* реализована је применом програмског система *Design-Expert*. Овај програмски систем подржава велики број експерименталних метода истраживања, док је за посматрани случај изабрана метода централног композитног плана (*енгл. Central Composite Design, CCD*).

Централни композитни план представља збир пуног факторског плана (2^k) и експеримената у централној тачки (n_0). Пун факторски план подразумева извођење експеримената на -1 и $+1$ нивоима, који представљају минималну и максималну вредност улазних променљивих фактора. Експерименти у централној тачки се изводе за нулти ниво свих улазних фактора [201].

Постоје три типа централног композитног плана:

- *Ка центру оријентисан централни композитни план (енгл. Face-Centred CCD – FCCD),*
- *Сферни централни композитни план (енгл. Circumscribed CCD – CCCD),*
- *Уписани централни композитни план (енгл. Inscribed CCD-ICCD).*

4.1.2 Taguchi-јева метода планирања експеримента

Taguchi-јева метода планирања експеримента представља јединствену и веома моћну технику за експерименталну анализу и оптимизацију производа или процеса. Како би се елиминисали недостаци класичног планирања експеримената који се огледају у сувише сложенем и дуготрајном извођењу великог броја

експеримената, алтернатива је пронађена у *Taguchi*-евој методи заснованој на примени специјалних, парцијалних факторних планова добијених из ортогоналних планова којима се покрива читав експериментални простор од интереса, и то са минималним бројем експеримената [201, 203-205].

Према *Taguchi*-ју, стратегија оптимизације процеса/производа укључује 3 аспекта планирања:

- Планирање система,
- Планирање параметара (фактора),
- Планирање толеранција.

Taguchi је предложио збирну статистичку оцену која обједињује информацију о средњим вредностима и варијансе у једну меру перформансе, познату под називом однос сигнал/шум (енгл. *Signal-to-Noise (S/N) ratio*). Такође, *Taguchi* је без коришћења било каквог модела, емпиријски утврдио да однос сигнал/шум даје (скоро) оптималну комбинацију нивоа фактора, где је варијанса минимална, а средња вредност близу циљне вредности. Према томе, за разлику од класичног планирања експеримента где се користи средња вредност мерења, примена ТМ захтева да се експериментални резултати трансформишу у односе сигнал/шум. За детаљније испитивање важности утицаја главних фактора и њихових интеракција на одзив може да се користи анализа варијансе (енгл. *ANalysis Of VAriance - ANOVA*) [44, 202-203]. *Taguchi* је међутим уместо *ANOVA* анализе препоручио анализу средњих вредности и *S/N* односа користећи 2D графике одзива. Анализа средњих вредности (енгл. *Analysis of Means ANOM*) представља статистички приступ који служи за одређивање средњих *S/N* односа за сваки фактор и сваки од његових нивоа. Постоје три категорије *S/N* односа [44, 201, 207-210]:

а) што мање то боље:

$$\gamma = S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4.1)$$

б) што веће то боље:

$$\gamma = S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.2)$$

с) номинално најбоље:

$$\gamma = S/N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad (4.3)$$

Где су:

- y_i i -та посматрана вредност одзива,
- n - број посматрања у експерименту,
- \bar{y} - просечна вредност посматраних вредности (одзива),
- s - варијанса.

На пример, средњи S/N однос фактора Q на нивоу k може се израчунати преко следеће једначине [44, 201, 208]:

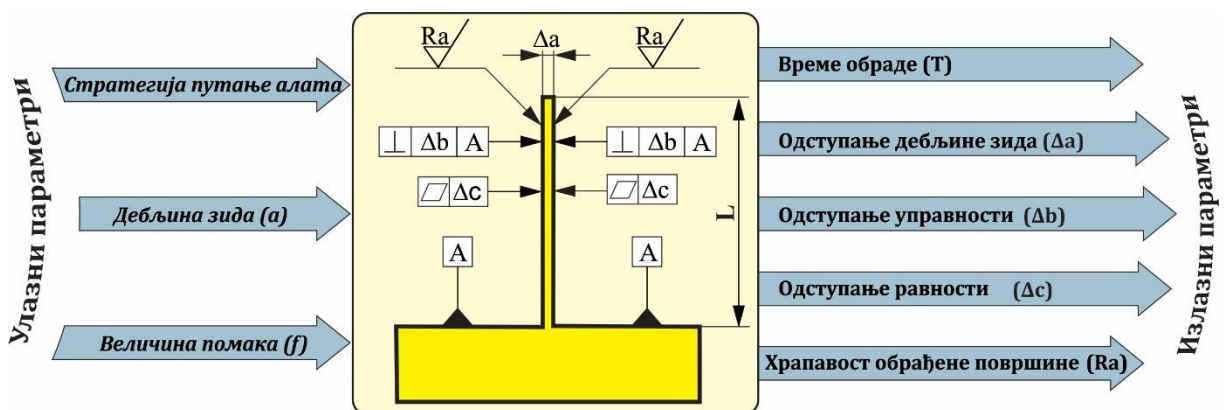
$$\bar{n}_{Qk} = \text{average } (SN)_{Qk} = \frac{1}{n_{Qk}} \sum_{i=1}^{n_{Qk}} |(SN)_{Qk}|_i \quad (4.4)$$

Где су:

- n_{Qk} - број појављивања фактора Q на нивоу k у Тагучијевој експерименталној матрици,
- $(S/N)_{Qk}$ - S/N однос који се односи на фактор Q на нивоу k .

4.2 Дефинисање оптимизационих задатака за средњебрзинску обраду

Основни оптимизациони задатак за средњебрзинску обраду се односи на дефинисање утицаја стратегије путање алата (енгл. *Tool Path Strategy - TPS*), дебљине зида (a) и величине помака (f) на време обраде (T), одступање тачности димензија (Δa), тачности облика и положаја (Δb и Δc), као и површинске храпавости (Ra), при обради глодањем, слика 4.3.



Слика 4.3. Оптимизациони задатак процеса средњебрзинске обраде глодањем танкозидних линијских делова

4.2.1 Дефинисање материјала и припремка

Припремак од кога се израђује танкозидна структура при средњебрзинској обради има призматични облик димензија $40 \times 40 \times 70$ mm. Материјал припремака за израду танкозидних делова је легура алуминијума $Al\ 7075$ ($AlZnMgCu1.5$), чије механичке карактеристике су приказане у табели 4.1, а хемијски састав у табели 4.2.

Табела 4.1. Механичке особине легуре алуминијума 7075

Темпер	T6
Затезна чврстоћа R_m (MPa)	560
$R_{p0.2}$, MPa	500
Граница истегања, A%	7
Тврдоћа, HBW	150

Табела 4.2. Хемијски састав легуре алуминијума 7075

Алуминијум, Al	87,1 ÷ 91,4 %
Хром, Cr	0,18 ÷ 0,28 %
Бакар, Cu	1,2 ÷ 2,0 %
Жељезо, Fe	≤ 0,50 %
Магнезијум, Mg	2,10 ÷ 2,90 %
Манган, Mn	≤ 0,30 %
Силицијум, Si	≤ 0,40 %
Титанијум, Ti	≤ 0,20 %
Цинк, Zn	5,1 ÷ 6,1 %
Остали	≤ 0,05 %

4.2.2 Дефинисање обратка

За средњебрзинску обраду у програмском систему *Solid Works 2016* креирано је пет 3D модела обратка, с обзиром на број варијација дебљине зида који су дефинисани планом експеримента. Модели се разликују по димензионалним вредностима, односно по дебљини танкозидне структуре линијског типа, која је предмет испитивања, као што је приказано на слици 4.2.

4.2.3 Дефинисање алата за обраду глодањем

За обраду танкозидних алуминијумских структура при средњебрзинској обради изабран је алат – вретенасто глодало ознаке *R216.32-10025-AK32A* од тврдог метала, са четири зуба. Пречник глодала је *10 mm*, а дужина резне ивице износи *32 mm*, што испуњава захтеве геометрије танкозидне структуре. Тип глодала је изабран на основу препорука произвођача алата за обраду алуминијумских материјала [212], чији изглед је приказан на слици 4.4. Карактеристике посматраног алата приказане су у табели 4.3.



Слика 4.4. Вретенасто глодало произвођача *Sandvik Coromant* [212]

Табела 4.3. Карактеристике алата R216.32-10025-AK32A [212]

Ознака	Оборена ивица (КСН)	Пречник глодала (DC)	Пречник прихвата (DCON)	Дужина резне ивице (L3)	Укупна дужина (L2)
R216.32-10025-AK32A H10F	45°	10 mm	10 mm	32 mm	90 mm

4.2.4 Избор CNC машине алатке и СХП-а

Експерименти средњебрзинске обраде су извршени у Лабораторији за пројектовање технолошких процеса применом рачунара на Машинском факултету у Бањалуци, која поседује троосни обрадни центар *EMCO MILL 450*, слика 4.5. Карактеристике машине су дате у табели 4.4. Као средство за подмазивање и хлађење (СХП), коришћено је уље *EPN-32* произвођача Оптима -Модрича.



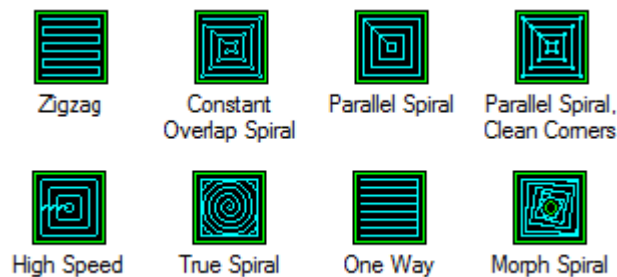
Слика 4.5. Троосни обрадни центар EMCO MILL 450

Табела 4.4. Карактеристике обрадног центра EMCO MILL 450

Карактеристике	
Максимални број обртаја	12000 o/min
Помак	20000 mm/min
Снага мотора	11 kW
Радни простор X-осе	600 mm
Радни простор Y-осе	500 mm
Радни простор Z-осе	500 mm
CNC управљачка јединица	Sinumerik 810D/840D
Дужина стола	700 mm
Ширина стола	520 mm
Максимална тежина дела	500 kg
Магаџин алата	20

4.2.5 Избор САМ програмских система

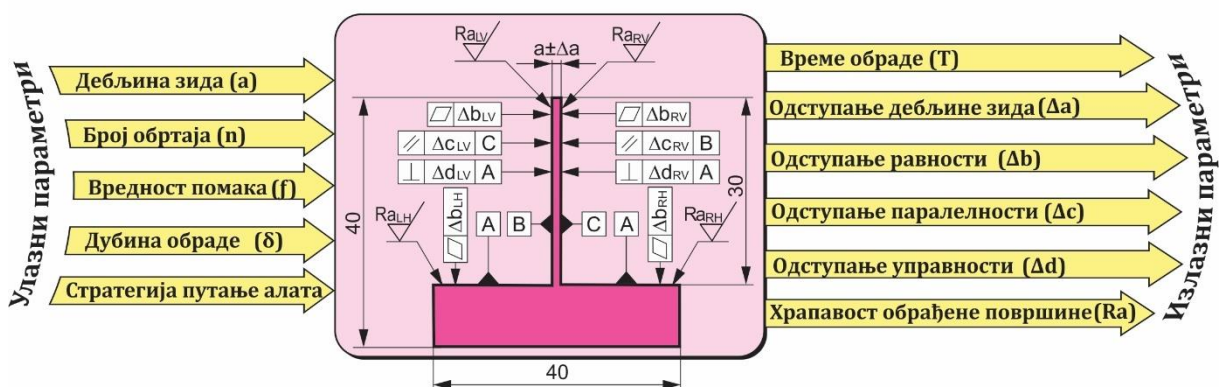
Генерисање управљачких програма за реализацију експеримента при *средњебрзинској обради* извршено је применом програмског систем *MasterCAM X7*. Програмски систем *MasterCAM X7* има више стратегија обраде-путања кретања алата, док су за реализацију експеримента коришћење *Zigzag*, *TrueSpiral*, *Parallel Spiral*, *Parallel Spiral, Clean Corners*, слика 4.6. За сваку од наведених путања кретања алата дефинисан је корак између пролаза од 8 mm , на основу препоруке произвођача алата [212]. Током прелиминарних истраживања, закључено је завршна обрада, тј. завршни пролаз због недовољне крутости танкозидних делова не даје очекиване резултате, па се због тога ова опција није користила.



Слика 4.6. Путање кретања алата за машинску обраду

4.3 Дефинисање оптимизационих задатака за високобрзинску обраду

Основни оптимизациони задатак за *високобрзинску обраду* се односи на дефинисање утицаја следећих улазних параметара: дебљина зида (a), број обртаја (n), помак (f), дубина обраде (δ) и стратегије путање алата (енгл. *Tool Path Strategy - TPS*), на излазне мерене и прорачунате параметре: време обраде (T)/количина скинуте струготине у јединици времена (енгл. *Material Removal Rate, MRR*), одступање мере дебљине зида (Δa), одступање од равности површина (Δb), одступање од паралелности површина (Δc), одступање управности површина (Δd) и хрпаваост обрађених површина (Ra), слика 4.7.



Слика 4.7. Оптимизациони задатак процеса високобрзинске обраде глодањем танкозидних линијских делова

4.3.1 Дефинисање материјала и припремка

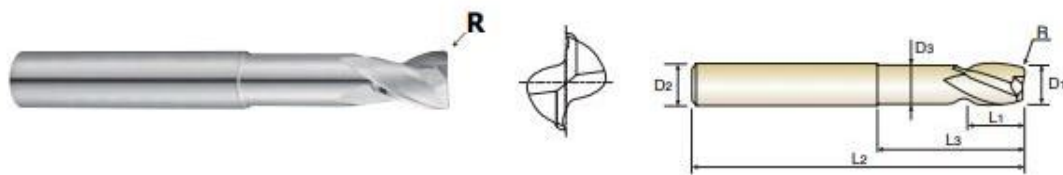
Припремак од којег се израђује танкозидна структура при високобрзинској обради је такође призматичног облика, димензија $40 \times 40 \times 70$ mm. Материјал припремака за израду танкозидних делова је легура алуминијума $Al\ 7075$ ($AlZnMgCu1.5$), чије механичке карактеристике и хемијски састав приказане у претходном поглављу (табеле 4.1 и 4.2).

4.3.2 Дефинисање обратка

За високобрзинску обраду дефинисање 3D модела обратка, као и радионичког цртежа извршено је такође помоћу софтвера *SolidWorks 2016*. С обзиром да постоје три варијације дебљине зида танкозидног дела са вредностима од 0,5, 1,0 и 1,5 mm, дефинисана су три 3D модела.

4.3.3 Дефинисање алата за обраду глодањем

За обраду танкозидних алуминијумских делова при високобрзинској обради изабран је алат произвођача YG, са ознаком *E5909080* [213]. Пречник глодала је 8 mm и има две резне ивице. Материјал алата је од тврдог метала (енгл. *Carbide*). Облик глодала приказан је на слици 4.8, чије карактеристике су приказане у табели 4.5. Приликом обраде коришћена су три алата, при чему су исти мењани на сваких 9 експеримената, односно након сваке промене дебљине зида.



Слика 4.8. Вретенасто глодало произвођача YG

Табела 4.5. Карактеристике алата [213]

Ознака	Радијус врха (R)	Пречник глодала (D ₁)	Пречник прихвата (D ₂)	Дужина резне ивице (L ₁)	Дужина испод прихвата (L ₃)	Укупна дужина (L ₂)	Пречник стабла (D ₃)
E5909080	R 0,6	8 mm	8 mm	10 mm	30 mm	70 mm	7,2 mm

4.3.4 Избор CNC машине алатке и СХП-а

За високобрзинску обраду експериментална истраживања су изведена на високобрзинском петоосном CNC вертикалном обрадном центру за глодање - *DIGMA HSC 850*, слика 4.9. Поменути машина налази се у компанији „Фрезал д.о.о.“ из Руме. Карактеристике поменутог обрадног центра приказане су у табели 4.6. При реализацији експерименталних истраживања коришћено је хлађење помоћу ваздуха.



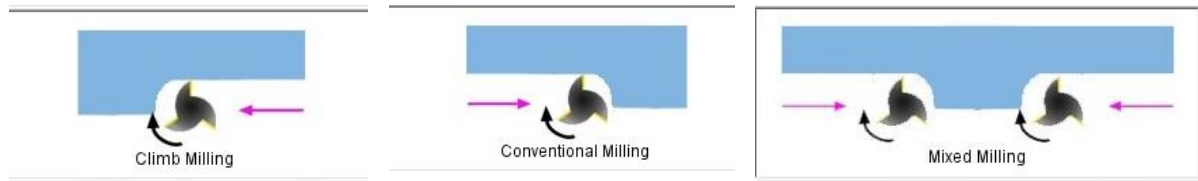
Слика 4.9. Обрадни центар DIGMA HSC 850

Табела 4.6. Карактеристике поменутог обрадног центра

Карактеристике	
Максималан број обртаја	40000 o/min
Максималан помак	20000 mm/min
Снага мотора	13 kW
Радни простор X-осе	850 mm
Радни простор Y-осе	600 mm
Радни простор Z-осе	500 mm
CNC управљачка јединица	Heidenhain Plus HS Atek
Дужина стола	900 mm
Ширина стола	650 mm
Максимална тежина дела	800 kg
Магацин алата	30

4.3.5 Избор САМ програмских система

За реализацију експеримента при *високобрзинској обради*, осим већ горе поменутог програмског система *SolidWorks 2016* за креирање тродимензионалних модела, коришћен је и програмски систем *Cimatron 11*, за генерисање управљачких програма. Коришћене стратегије обраде у програмском систему *Cimatron su*: *climb*, *convencional* и *mixed*, слика 4.10. Примењене стратегије обраде су у табелама означене на следећи начин : *climb -1*, *convencional - 2* и *mixed - 3*.



Слика 4.10. Путање кретања алата за машинску обраду у програмском систему Cimatron

4.4 Поставка планова експеримената

С обзиром да су се експеримент реализовали независно за средњебрзинску и високобрзинску обраду, креирана су два плана експеримента. У претходном поглављу већ је речено да је за *средњебрзинску обраду* примењен централни композитни план, док је за *високобрзинску обраду* примењена Тагучијева метода.

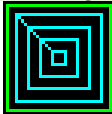
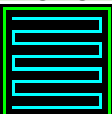
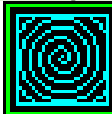
4.4.1 План експеримента за средњебрзинску обраду

За *средњебрзинску обраду* планом експеримента дефинисана су три улазна променљива фактора, од чега су два нумеричка и један ненумерички, са укупно 33 експеримента. Резултати експеримента обрађени су применом софтвера *DesignExpert*.

Први нумерички фактор представља дебљина зида танкозидног дела (a), чија доња гранична вредност износи 0,5 mm, а горња гранична вредност 1,5 mm. Други нумерички фактор је вредност помака (f), чија доња гранична вредност износи 150 mm/min, а горња гранична вредност 350 mm/min. Као трећи ненумерички фактор изабране су три различите стратегије путање алата на бази препорука из литературе [28, 106, 182, 188, 195, 211] за обраду танкозидних структура (табела 4.7, слике 4.11 и 4.12):

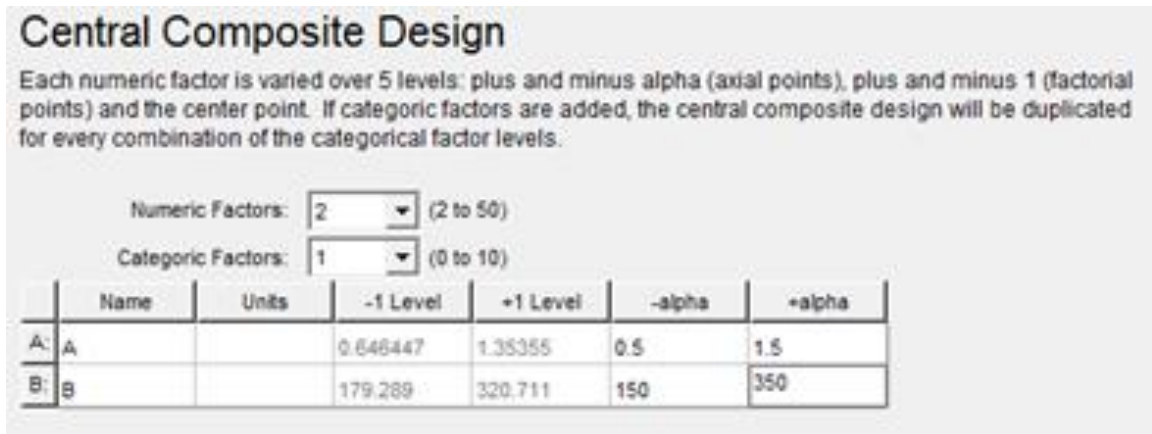
- Стратегија путање алата 1 → *Parallel Spiral*,
- Стратегија путање алата 2 → *Zigzag*,
- Стратегија путање алата 3 → *True Spiral*.

Табела 4.7. Улазни параметри и нивои варијације

Параметар и ознака	Јединица	Ниво		
Дебљина зида (a)	mm	0,50; 0,65; 1,00; 1,35; 1,50	0,50; 0,65; 1,00; 1,35; 1,50	0,50; 0,65; 1,00; 1,35; 1,50
Помак (f)	mm/min	150,00; 179,29; 250,00; 320,71; 350,00	150,00; 179,29; 250,00; 320,71; 350,00	150,00; 179,29; 250,00; 320,71; 350,00
Стратегије путање алата (TPS) - MasterCAM X7	-	Path 1 - <i>Parallel Spiral</i> 	Path 2 - <i>Zigzag</i> 	Path 3 - <i>True Spiral</i> 

Као излазни параметри процеса обраде - критеријуми оптимизације изабрани су:

- *Производност-као функција времена обраде T (min),*
- *Одступање дебљине зида Δa (mm),*
- *Одступање управности Δb (mm),*
- *Одступање равности Δc (mm),*
- *Квалитет/храпавост обрађене површине Ra (μm).*



Слика 4.11. Поступак дефинисање нумеричких и нумеричких фактора у софтверу *DesignExpert*



Слика 4.12. Поступак дефинисање фактора за стратегију путање алата у софтверу *DesignExpert*

Уносом потребних улазних података у програмски систем *DesignExpert*, добијена је табела плана експеримената са комбинованим вредностима на основу дефинисаних величина. Дефинисана су 33 експеримента која су неопходна у циљу добијања излазних вредности параметара. Општи план експеримента приказан је у табели 4.8.

Табела 4.8. Општи план експеримента за средњебрзинску обраду

Редни број	Улазни фактори		
	Дебљина зида (mm)	Помак (mm/min)	Стратегија путање алата - TPS
1.	-1	-1	Путања 1
2.	1	-1	Путања 1
3.	-1	1	Путања 1
4.	1	1	Путања 1
5.	-1,41421	0	Путања 1
6.	1,414214	0	Путања 1
7.	0	-1,41421	Путања 1
8.	0	1,414214	Путања 1
9.	0	0	Путања 1
10.	0	0	Путања 1
11.	0	0	Путања 1
12.	-1	-1	Путања 2
13.	1	-1	Путања 2
14.	-1	1	Путања 2
15.	1	1	Путања 2
16.	-1,41421	0	Путања 2
17.	1,414214	0	Путања 2
18.	0	-1,41421	Путања 2
19.	0	1,414214	Путања 2
20.	0	0	Путања 2
21.	0	0	Путања 2
22.	0	0	Путања 2
23.	-1	-1	Путања 3
24.	1	-1	Путања 3
25.	-1	1	Путања 3
26.	1	1	Путања 3
27.	-1,41421	0	Путања 3
28.	1,414214	0	Путања 3
29.	0	-1,41421	Путања 3
30.	0	1,414214	Путања 3
31.	0	0	Путања 3
32.	0	0	Путања 3
33.	0	0	Путања 3

У табели 4.9 приказан је план експеримента за *средњебрзинску обраду*, са дефинисаним вредностима нумеричких фактора за дебљину зида и помак, као и за не нумерички фактор који се односи на стратегије путање алата.

Табела 4.9. План експеримента за *средњебрзинску обраду*



Редни број	Улазни фактори		
	Дебљина зида - <i>a</i> (mm)	Помак - <i>f</i> (mm/min)	Стратегија путање алата - <i>TPS</i>
1.	0,65	179,29	Путања 1
2.	1,35	179,29	Путања 1
3.	0,65	320,71	Путања 1
4.	1,35	320,71	Путања 1
5.	0,5	250,00	Путања 1
6.	1,5	250,00	Путања 1
7.	1,0	150,00	Путања 1
8.	1,0	350,00	Путања 1
9.	1,0	250,00	Путања 1
10.	1,0	250,00	Путања 1
11.	1,0	250,00	Путања 1
12.	0,65	179,29	Путања 2
13.	1,35	179,29	Путања 2
14.	0,65	320,71	Путања 2
15.	1,35	320,71	Путања 2
16.	0,5	250,00	Путања 2
17.	1,5	250,00	Путања 2
18.	1,0	150,00	Путања 2
19.	1,0	350,00	Путања 2
20.	1,0	250,00	Путања 2
21.	1,0	250,00	Путања 2
22.	1,0	250,00	Путања 2
23.	0,65	179,29	Путања 3
24.	1,35	179,29	Путања 3
25.	0,65	320,71	Путања 3
26.	1,35	320,71	Путања 3
27.	0,5	250,00	Путања 3
28.	1,5	250,00	Путања 3
29.	1,0	150,00	Путања 3
30.	1,0	350,00	Путања 3
31.	1,0	250	Путања 3
32.	1,0	250	Путања 3
33.	1,0	250	Путања 3

4.4.2 План експеримента за високобрзинску обраду

За високобрзинску обраду основни оптимизациони задатак се односи на одређивање оптималних параметара обраде посматраних танкозидних делова којима се остварује висока производност, тачност мера и квалитет обраде, тачност облика и односа површина.

Претпостављајући да су математичке релације улазних параметара и перформанси процеса сложене и нелинеарне, изабрана су три нивоа варирања за сваки од пет улазних параметара: дебљина зида (a), број обртаја (n), помак (f), дубина обраде (δ), као и стратегија обраде (TPS), табела 4.10.

Табела 4.10. Улазни параметри и нивои варијације

Параметар и ознака	Јединица	Ниво		
		0,5	1,0	1,5
Дебљина зида (a)	mm	0,5	1,0	1,5
Број обртаја (n)	o/min	6000	12000	24000
Помак (f)	mm/min	600	1200	2400
Дубина обраде (δ)	mm	1	2	3
Стратегије путање алата (TPS) - Cimatron	-			

При избору вредности параметара узете су у обзир литературне препоруке, техничко-технолошка ограничења машине и алата, карактеристике материјала обраде и претходна експериментална истраживања.

На основу изабраних променљивих фактора процеса и одговарајућих нивоа варијације, креирана је експериментална план матрица у складу са стандардним *Taguchi*-евим ортогоналним низом L27 (табела 4.11). Овај план обезбеђује равномерну расподелу експерименталних тачака у оквиру изабраног експерименталног хипер-простора и експеримент високе резолуције. Такође овај ортогонални низ је изабран како би се провериле интеракције између фактора. Ортогонални низ L27 се састоји од 13 колона (фактори) и 27 редова (експериментални опити), при чему су улазни нивои параметара у посматраном случају прикључени колонама 1, 2, 5, 9 и 12.

Табела 4.11. Општи Тагучи-јев ортогоналним низ L27 са 13 нивоа варијације

Р. број	Фактори												
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]
1.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3.	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4.	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5.	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6.	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7.	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8.	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9.	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10.	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11.	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12.	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13.	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14.	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15.	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16.	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17.	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18.	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19.	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20.	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21.	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22.	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23.	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24.	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25.	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26.	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27.	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Након дефинисања фактора процеса и нивоа варијације, *Taguchi*-јев план експеримената се извршава по редоследу који је приказан у табели 4.12, при чему:

- Колона А представља дебљину зида танкозидног дела (a),
- Колона Б представља број обртаја (n),
- Колона Ц представља вредност помака (f),
- Колона Д представља дубину обраде (δ),
- Колона Е представља стратегију обраде (TPS).

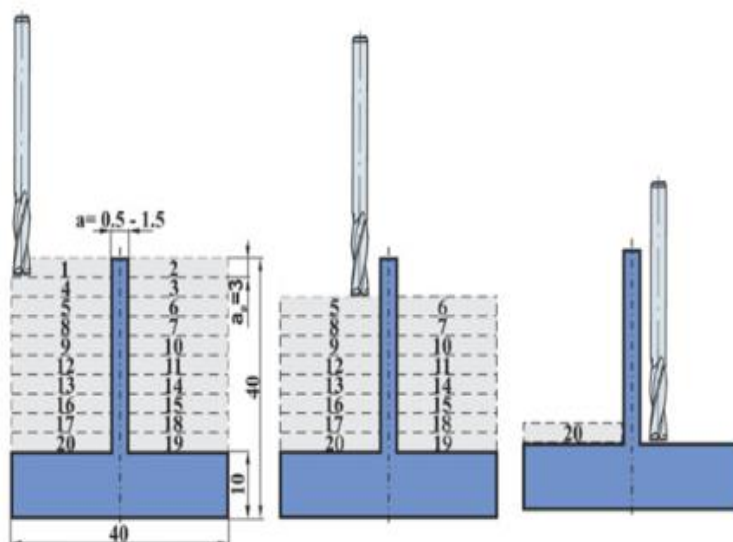
Табела 4.12 Дефинисана матрица плана експеримента

Р. број	А	Б	Ц	Д	Е
1.	0,5	6000	600	1	1
2.	0,5	6000	1200	2	2
3.	0,5	6000	2400	3	3
4.	0,5	12000	600	2	3
5.	0,5	12000	1200	3	1
6.	0,5	12000	2400	1	2
7.	0,5	24000	600	3	2
8.	0,5	24000	1200	1	3
9.	0,5	24000	2400	2	1
10.	1,0	6000	600	2	2
11.	1,0	6000	1200	3	3
12.	1,0	6000	2400	1	1
13.	1,0	12000	600	3	1
14.	1,0	12000	1200	1	2
15.	1,0	12000	2400	2	3
16.	1,0	24000	600	1	3
17.	1,0	24000	1200	2	1
18.	1,0	24000	2400	3	2
19.	1,5	6000	600	3	3
20.	1,5	6000	1200	1	1
21.	1,5	6000	2400	2	2
22.	1,5	12000	600	1	2
23.	1,5	12000	1200	2	3
24.	1,5	12000	2400	3	1
25.	1,5	24000	600	2	1
26.	1,5	24000	1200	3	2
27.	1,5	24000	2400	1	3

4.5 Пројектовање варијанти технолошког процеса обраде

У оквиру ове етапе извршено је моделирање танкозидних структура одговарајућих димензија, као и пројектовање варијанти технолошког процеса са одговарајућим улазним факторима према дефинисаном плану експеримента како за *средњебрзинску обраду* тако и за *високобрзинску обраду*, применом одговарајућег CAD/CAM система. Основни излазни резултат ове етапе представљају управљачки програми за обраду 33 узорка за *средњебрзинску обраду* и 27 узорка за *високобрзинску обраду* на изабраним CNC машинама алаткама.

При дефинисању обраде усвојен је редослед извођења пролаза према слици 4.13, са стратегијом наизменичне обраде једне и друге стране зида на делу, при чему је на слици приказан случај са дужином обраде од $a_p=3$ mm (за *средњебрзинску обраду*). Методологија извођења пролаза за *високобрзинску обраду* је базирана на истом принципу, с том разликом што дубина обраде имала променљиву вредност која се кретала у интервалу $a_p=1$ mm, $a_p=2$ mm и $a_p=3$ mm.



Слика 4.13. Редослед извођења пролаза при обради танкозидних алуминијумских структура за средњебрзинску обраду при дубини обраде $a_p=3$ mm [177]

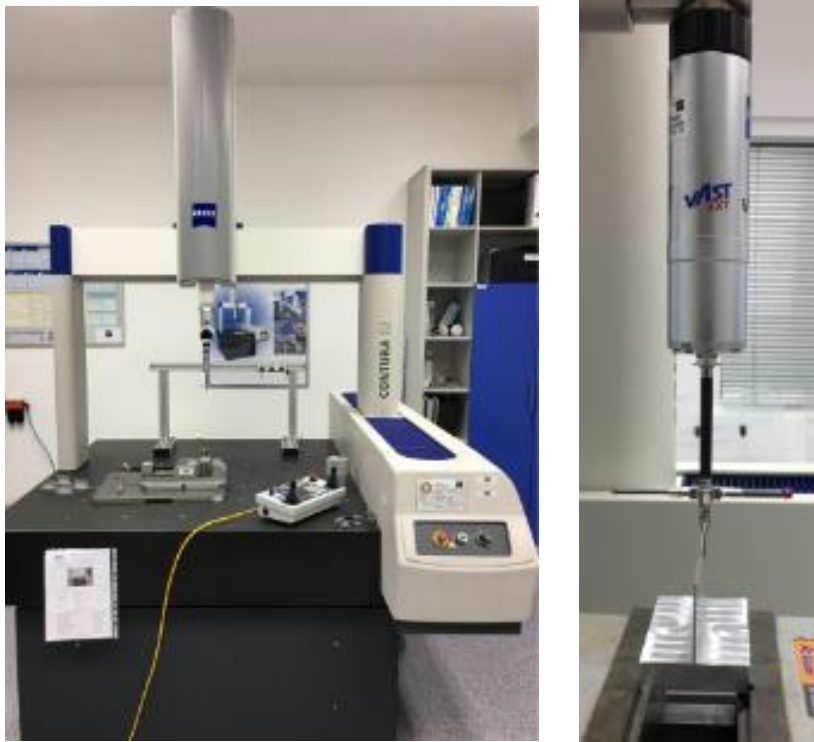
4.6 Мерење резултата експерименталних истраживања

4.6.1 Мерење резултата експеримената при средњебрзинској обради

Планом истраживања предвиђено је мерење следећих карактеристичних параметара:

- Одступање дебљине зида – Δa ,
- Одступање управности – Δb ,
- Одступање равности – Δc ,
- Храпавост обрађене површине – R_a ,
- Времена обраде – T .

Мерење димензионалних карактеристика обрађених танкозидних делова је извршено на координатној мерној машини *Zeiss Contura G2*, слика 4.14а, применом сензора за мерењем на додир *Zeiss Vast XXT*, који је приказан на слици 4.14б. Максимална дозвољена грешка мерења је $MPE = 1,9 \mu\text{m}$ за мерење димензија према ISO 10360-2:2009.



а)

б)

Слика 4.14. Мерење на КММ дебљине зида, одступања управности и равности

Дебљина зида (а) је мерена на три места на једнаким одстојањима по дужини дела а потом је прорачуната средња вредност одступања мере дебљине зида (Δa) као излазни параметар.

Одступање управности (Δb) је мерено за леву и десну страну зида, тако да имамо:

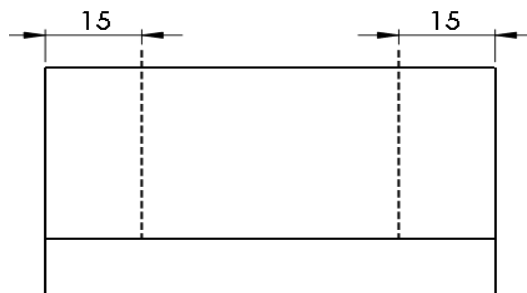
- Δb_{LV} – одступање управности леве вертикалне стране зида и
- Δb_{DV} – одступање управности десне вертикалне стране зида

Одступање од равности (Δc) је мерено за леву и десну страну, као и за хоризонталну и вертикалну површину дела. Тако да имамо следећа одступања равности:

- Δc_{RV} – десна вертикална страна зида,
- Δc_{RH} – десна хоризонтална површина,
- Δc_{LV} – лева вертикална страна зида,
- Δc_{LH} – лева хоризонтална страна зида.

Мерење храпавости обрађених површина извршено је уређајем *INNOVATEST*. Уређај поседује могућност мерења параметара Ra (0,03-6,35) μm и Rz (0,2-25,3) μm , а изводи се дијамантским врхом од 2 μm , са резолуцијом 0,01 μm .

С обзиром да је у питању линијски део, подељен је на леву и десну страну, тако да је мерена храпавост леве стране хоризонталне и вертикалне површине Ra_{LH} и Ra_{LV} , као и десне стране Ra_{RH} и Ra_{RV} , управно на правац кретања глодала, са обе стране зида на одстојању 15mm од чела, слика 4.15.



Слика 4.15. Приказ плана мерења храпавости обрађених површина - Ra

Мерење времена обраде извршено је за различите нивое алтернативних улазних параметара, тј. на основу одговарајуће дебљине зида, помаке и стратегије обраде.

Експериментална план матрица са резултатима мерења (Δa , Δb , Δc , Ra , T) је приказана у табели 4.13.

Табела 4.13. План експеримента и резултати мерења/прорачуна

Опит Број	Улазни параметри			Излазни параметри - критеријуми оптимизације				
	a (mm)	f (mm/min)	TPS	T (min)	Δa (mm)	Δb (mm)	Δc (mm)	Ra (μm)
1.	0,65	179	Parallel Spiral	42,66	0,050	0,040	0,038	0,49
2.	1,35	179	Parallel Spiral	42,65	0,074	0,036	0,022	1,17
3.	0,65	321	Parallel Spiral	24,85	0,006	0,041	0,036	0,55
4.	1,35	321	Parallel Spiral	24,78	0,028	0,033	0,019	1,16
5.	0,50	250	Parallel Spiral	30,91	0,016	0,060	0,035	0,49
6.	1,50	250	Parallel Spiral	31,11	0,048	0,029	0,011	1,41
7.	1,00	150	Parallel Spiral	50,35	0,032	0,018	0,017	0,97
8.	1,00	350	Parallel Spiral	23	0,009	0,025	0,018	1,06
9.	1,00	250	Parallel Spiral	31,21	0,031	0,017	0,030	1,12
10.	1,00	250	Parallel Spiral	31,21	0,032	0,013	0,026	1,35
11.	1,00	250	Parallel Spiral	31,21	0,025	0,015	0,029	1,37
12.	0,65	179	Zigzag	31,75	1,252	1,060	0,417	1,98
13.	1,35	179	Zigzag	31,33	0,123	0,510	0,271	2,21
14.	0,65	321	Zigzag	18,9	1,051	1,469	0,668	2,90
15.	1,35	321	Zigzag	18,65	0,401	0,872	0,361	2,07
16.	0,50	250	Zigzag	23,6	1,906	1,221	0,336	2,18
17.	1,50	250	Zigzag	22,76	0,179	0,729	0,332	2,03
18.	1,00	150	Zigzag	36,96	0,585	1,765	0,692	2,37
19.	1,00	350	Zigzag	16,71	1,085	0,841	0,306	2,08
20.	1,00	250	Zigzag	23,46	0,867	0,598	0,301	2,35
21.	1,00	250	Zigzag	23,46	0,713	0,952	0,028	2,17
22.	1,00	250	Zigzag	23,46	0,678	0,789	0,032	2,53
23.	0,65	179	TrueSpiral	68,8	0,161	0,054	0,052	0,38
24.	1,35	179	TrueSpiral	67,73	0,140	0,028	0,018	0,83
25.	0,65	321	TrueSpiral	38,21	0,121	0,059	0,034	0,40
26.	1,35	321	TrueSpiral	37,86	0,167	0,032	0,018	0,69
27.	0,50	250	TrueSpiral	49,58	0,112	0,047	0,070	0,50
28.	1,50	250	TrueSpiral	48,28	0,065	0,023	0,017	0,83
29.	1,00	150	TrueSpiral	80,51	0,132	0,033	0,025	0,71
30.	1,00	350	TrueSpiral	35,46	0,070	0,029	0,018	0,56
31.	1,00	250	TrueSpiral	49,38	0,112	0,023	0,022	0,71
32.	1,00	250	TrueSpiral	49,38	0,109	0,031	0,027	0,67
33.	1,00	250	TrueSpiral	49,38	0,110	0,019	0,026	0,68

4.6.2 Мерење резултата експеримената за високобрзинску обраду

Као што је наведено планом истраживања, мерени су следећи карактеристични параметри:

- Време обраде – T (min),
- Одступање мере дебљине зида – Δa (mm),
- Одступање од равности површина – Δb (mm),
- Одступање од паралелности површина – Δc (mm),
- Одступање управности површина – Δd (mm),
- Храпавост обрађене површине – Ra (μm).

На основу измереног времена обраде за различите нивое алтернативних улазних параметара, извршен је прорачун количине скинуте струготине у јединици времена (MRR), као критеријума оптимизације који исказује производност обраде, према формули (4.5):

$$MRR = \frac{V}{T} \text{ (mm}^3/\text{min)} \quad (4.5)$$

Где су:

- V – запремина скинутог материјала (mm^3),
- T – време обраде (min).

Мерење наредна четири параметра (Δa , Δb , Δc и Δd) извршено је у компанији „Унимет д.о.о“ из Каћа, применом *KMM Mitutoyo Strato – APEX 9166*, слика 4.16. За сваки параметар је вршено више мерења према слици 4.7, а потом су израчунате њихове средње вредности као коначни излазни параметри.

Дебљина зида (a) је мерена на пет места на једнаким одстојањима по дужини дела а потом је прорачуната средња вредност одступања мере дебљине зида (Δa) као излазни параметар.

Одступање од равности (Δb) је мерено за леву и десну страну и хоризонталну и вертикалну површину дела. Тако да имамо следећа одступања равности:

- Δb_{RV} – десна вертикална страна зида,
- Δb_{RH} – десна хоризонтална површина,
- Δb_{LV} – лева вертикална страна зида,
- Δb_{LH} – лева хоризонтална страна зида.

Одступање од паралелности (Δc) је мерено за леву и десну страну зида, односно:

- Δc_{LV} – одступање од паралелности леве вертикалне стране зида,
- Δc_{RV} – одступање од паралелности десне вертикалне стране зида.

Одступање управности (Δd) је мерено за леву и десну страну зида, тако да имамо:

- Δd_{LV} – одступање управности леве вертикалне стране зида,
- Δd_{DV} – одступање управности десне вертикалне стране зида

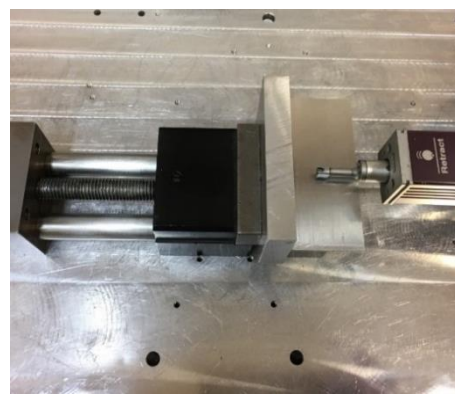
Мерење храпавости извршено је у истој компанији применом уређаја *Mitutoyo SJ-301*, слика 4.17. Храпавост је мерена управно на правац кретања алата. С обзиром да је у питању линијски део, подељен је на леву и десну страну, тако да је мерена храпавост леве стране хоризонталне и вертикалне површине Ra_{LH} и Ra_{LV} , као и десне стране Ra_{RH} и Ra_{RV} .



Слика 4.16. КММ Mitutoyo Strato – APEX 9166



а) Хоризонталне површине



б) Вертикалне површине

Слика 4.17. Мерење храпавости (Ra) применом уређаја Mitutoyo SJ-301

Експериментална план матрица са резултатима мерења (T , Δa , Δb , Δc , Δd , Ra) и прорачунима (MRR) су приказани у табели 4.14.

Табела 4.14. План експеримента и резултати мерења/прорачуна

Опун Број	Улазни параметри					Изразни параметри – критеријуми оптимизације						
	a	n	f	δ	TPS	T	MRR	Δa	Δb	Δc	Δd	Ra
	mm	o/min	mm/min	mm	-	hh:mm:ss	mm ³ /min	mm	mm	mm	mm	μm
1.	0,5	6000	600	1	1	00:36:40	2262,252	0,0420	0,03875	0,0690	0,0840	0,2500
2.	0,5	6000	1200	2	2	00:11:30	7213,043	0,0240	0,12725	0,2415	0,3830	1,3100
3.	0,5	6000	2400	3	3	00:19:29	4257,558	0,0260	0,04925	0,0845	0,1220	0,8300
4.	0,5	12000	600	2	3	00:21:06	3931,280	0,0160	0,04850	0,1035	0,1160	0,8425
5.	0,5	12000	1200	3	1	00:42:10	1967,178	0,0160	0,03475	0,0645	0,0925	0,3375
6.	0,5	12000	2400	1	2	00:09:16	8951,117	0,0220	0,06475	0,1085	0,1015	0,8600
7.	0,5	24000	600	3	2	00:47:16	1754,924	0,0120	0,04175	0,1160	0,1335	0,4100
8.	0,5	24000	1200	1	3	00:17:17	4799,514	0,0260	0,03375	0,0875	0,1195	0,3950
9.	0,5	24000	2400	2	1	00:08:37	9626,320	0,0380	0,03975	0,0685	0,1000	0,2925
10.	1,0	6000	600	2	2	00:22:33	3631,929	0,0600	0,05750	0,1355	0,1250	1,5325
11.	1,0	6000	1200	3	3	00:29:03	2819,277	0,0380	0,02525	0,1355	0,1730	0,5800
12.	1,0	6000	2400	1	1	00:11:23	7194,940	0,0100	0,02050	0,1135	0,1170	0,5100
13.	1,0	12000	600	3	1	01:03:54	1281,690	0,0080	0,01150	0,0890	0,0940	0,1375
14.	1,0	12000	1200	1	2	00:17:46	4609,670	0,0560	0,02375	0,0600	0,1090	0,6325
15.	1,0	12000	2400	2	3	00:05:28	14980,790	0,0260	0,03650	0,0905	0,1510	1,0050
16.	1,0	24000	600	1	3	00:28:03	2919,786	0,0420	0,01650	0,1305	0,1195	0,1850
17.	1,0	24000	1200	2	1	00:12:00	6825,000	0,0280	0,01550	0,0790	0,1405	0,1925
18.	1,0	24000	2400	3	2	00:23:00	3560,870	0,0360	0,02475	0,0960	0,1060	0,3050
19.	1,5	6000	600	3	3	00:58:06	1391,566	0,0240	0,26175	0,0925	0,2325	0,2575
20.	1,5	6000	1200	1	1	00:17:49	4537,801	0,0140	0,27300	0,2115	0,3290	0,3825
21.	1,5	6000	2400	2	2	00:06:13	13004,660	0,0660	0,31675	0,3165	0,4715	1,9800
22.	1,5	12000	600	1	2	00:31:23	2576,236	0,0400	0,28875	0,2180	0,3335	1,1600
23.	1,5	12000	1200	2	3	00:11:17	7165,647	0,0160	0,29850	0,2790	0,4590	1,3275
24.	1,5	12000	2400	3	1	00:21:59	3677,842	0,0100	0,27100	0,1790	0,2725	0,4075
25.	1,5	24000	600	2	1	00:21:33	3751,740	0,0100	0,27100	0,3480	0,3215	0,1500
26.	1,5	24000	1200	3	2	00:35:27	2280,677	0,0120	0,27875	0,2615	0,4245	0,2725
27.	1,5	24000	2400	1	3	00:08:18	9740,964	0,0120	0,27475	0,2100	0,3400	0,5050

5. ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАМЕТАРА ТЕХНОЛОШКОГ ПРОЦЕСА СРЕДЊЕБРЗИНСКЕ ОБРАДЕ

5.1 Примена методологије одзивне површине

Последњих деценија, у бројним подручјима научно-стручних истраживања примењује се статистичко планирање експеримената, а изузетно је корисна његова употреба при оптимизацији технолошких и производних процеса. Њиховом употребом значајно се смањује број експерименталних тестова, односно утрошак материјала и времена потребног за извођење експеримената, а са друге стране омогућава се добар увид у утицај процесних параметара на процес екстракције у виду приноса, а такође је могуће открити и међусобну интеракцију између испитиваних параметара.

У статистички дизајнираним експериментима методологија одзивних површина заузима значајно место у комбинацији математичких и статистичких техника примењених у моделовању и анализи излазних величина од интереса који су под утицајем улазних параметара, при чему је циљ оптимизација излазних величина, односно критеријума оптимизације [200, 216 - 217].

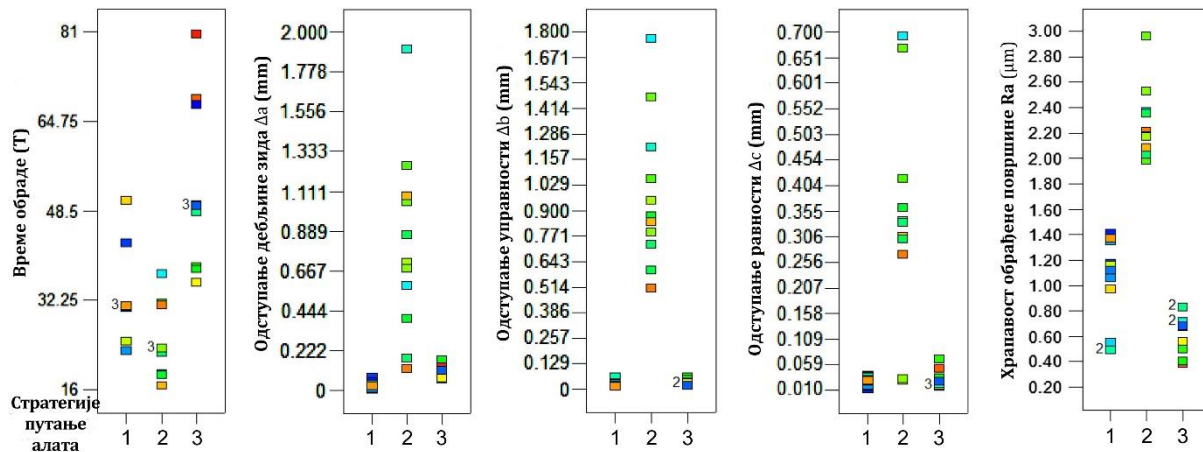
Методологија одзивних површина (енгл. *Response Surface Methodology- RSM*) коју су први пут 1951. године применили и представили аутори *Box* и *Wilson* [218], представља оптимизациони систем који омогућава утврђивање релација међу процесним параметрима екстракције, као и њихов појединачан утицај на процес екстракције. Приступ методологије одзивних површина оптимизацији процесних параметара екстракције се најчешће примењује коришћењем централног композитног дизајна [218].

Примена анализе варијансе (ANOVA) служи за процену степена тачности примењене методологије. *RSM* методологија омогућава детерминисање свеобухватног експерименталног дизајна са циљем да се са највећом прецизношћу и адекватношћу утврде релације параметара на процес, као и њихове потенцијалне интеракције. Могућност да формирањем и дефинисањем једначине модела омогући не само математичку релацију утицаја процесних параметара на екстракцију, већ и касније предвиђање излазне величине екстракционог процеса на основу детерминисане једначине модела сврстава *RSM* као врло погодну методологију за детерминисање екстракционих процеса [218-220].

5.1.1 Анализа резултата мерења и контрола граничних вредности

У овој етапи анализирани су интервали вредности излазних параметара добијених мерењем за све три стратегије путање алата: времена обраде (T), одступања дебљине зида (Δa), одступања управности (Δb), одступања равности (Δc) и храпавост обрађене површине (Ra).

Анализом интервала граничних вредности (слика 5.1) свих мерених величина закључено је да се вредности одступања дебљине зида ($\max \Delta a = 0,2 \text{ mm}$), управности ($\max \Delta b = 0,1 \text{ mm}$), равности ($\max \Delta c = 0,1 \text{ mm}$) и храпавости ($\max Ra = 1,6 \text{ }\mu\text{m}$) за стратегију путање алата 2 не налазе унутар дозвољених вредности, због чега је искључена из даљег разматрања [177].



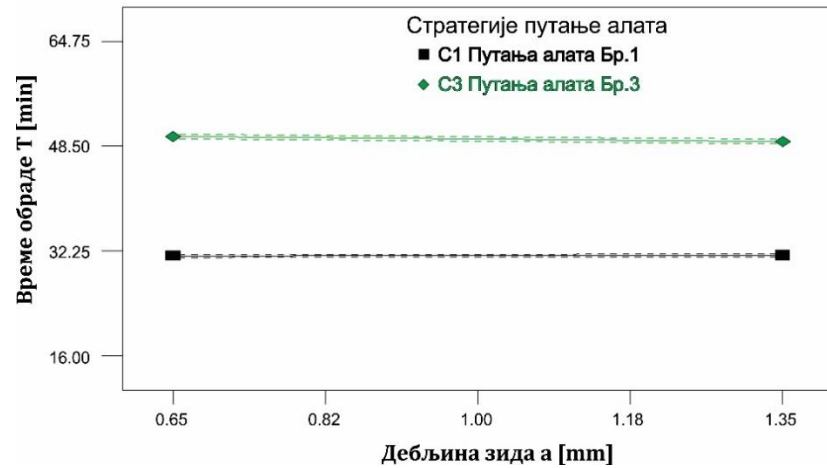
Слика 5.1. Интервали мерених вредности за време обраде, дебљину зида, одступање управности, одступање равности и храпавост обрађене површине

Након тога пришло се емпиријском моделовању одзива за преостале две стратегије обраде, тј. путању 1 и путању 3. Резултати емпиријских модела за обе стратегије су приказани у табели 5.1. Сви модели су добијени применом квадратног полинома са одређеним трансформацијама у циљу добијања бољих резултата.

Табела 5.1. Емпиријски модели одзива

Стратегија обраде	Емпиријски модели	Одзив
Путања 1	$\ln T = 4.89861 + 2.14456 \cdot 10^{-3} \cdot a - 7.7971 \cdot 10^{-3} \cdot f + 7.84629 \cdot 10^{-6} \cdot f^2$	Време обраде
Путања 1	$\sqrt{\Delta a} = 0.66044 - 0.32615 \cdot a - 2.34118 \cdot 10^{-3} \cdot f + 1.68538 \cdot 10^{-3} \cdot a \cdot f$	Одступање дебљине зида
Путања 1	$\ln \Delta b = 1.51485 - 5.24519 \cdot a - 0.020474 \cdot f + 2.29188 \cdot a^2 + 4.12498 \cdot 10^{-5} \cdot f^2$	Одступање управности
Путања 1	$\frac{1}{\sqrt{\Delta c}} = 3.20174 + 3.36622 \cdot a$	Одступање равности
Путања 1	$\sqrt{Ra} = -0.80634 + 1.80076 \cdot a + 5.71813 \cdot 10^{-3} \cdot f - 1.67948 \cdot 10^{-3} \cdot a \cdot f - 0.44182 \cdot a^2 - 8.04146 \cdot 10^{-6} \cdot f^2$	Храпавост обрађене површине
Путања 3	$\ln T = 5.437 - 0.02208 \cdot a - 8.04091 \cdot 10^{-3} \cdot f + 7.84629 \cdot 10^{-6} \cdot f^2$	Време обраде
Путања 3	$\sqrt{\Delta a} = 0.85989 - 0.44928 \cdot a - 1.96566 \cdot 10^{-3} \cdot f + 1.68538 \cdot 10^{-3} \cdot a \cdot f$	Одступање дебљине зида
Путања 3	$\ln \Delta b = 1.70287 - 5.24519 \cdot a - 0.020474 \cdot f + 2.29188 \cdot a^2 + 4.12498 \cdot 10^{-5} \cdot f^2$	Одступање управности
Путања 3	$\frac{1}{\sqrt{\Delta c}} = 2.52262 + 3.74762 \cdot a$	Одступање равности
Путања 3	$\sqrt{Ra} = -0.78597 + 1.57972 \cdot a + 5.71813 \cdot 10^{-3} \cdot f - 1.67948 \cdot 10^{-3} \cdot a \cdot f - 0.44182 \cdot a^2 - 8.04146 \cdot 10^{-6} \cdot f^2$	Храпавост обрађене површине

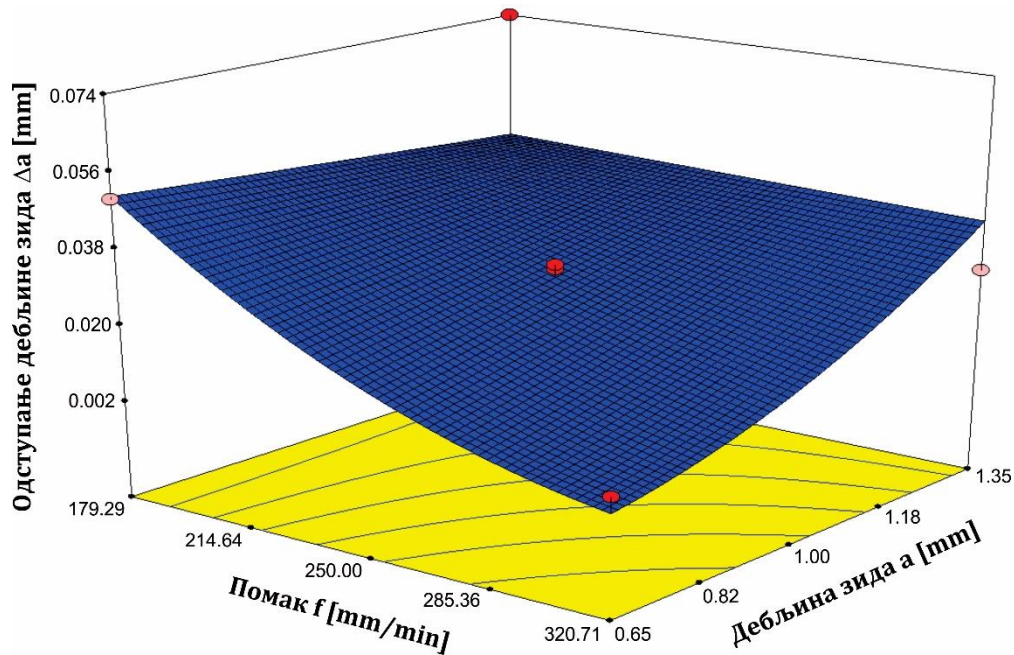
Резултати мерења код обе стратегије обраде показали су да на време обраде значајно утиче вредност помака, док са друге стране, дебљина зида нема велики утицај. Закључено је да је време обраде за путању 1 значајно мање од времена обраде за путању 3, за исте вредности помака, што се може видети и на слици 5.2.



Слика 5.2. Време обраде T за стратегије обраде Путања 1 и Путања 3

На основу изведених експеримената и емпиријског моделовања, добијени су графички резултати, тј. 3D површински дијаграми, чија су објашњења дата у наставку.

Утицај вредности помака (f) и дебљине зида (a) на одступање дебљине зида (Δa) за случај путање 1 је приказан на слици 5.3. Такође се да закључити да максимално одступање дебљине зида за ову стратегију путање алата износи 0,05 mm, а минимално одступање је 0,02 mm.

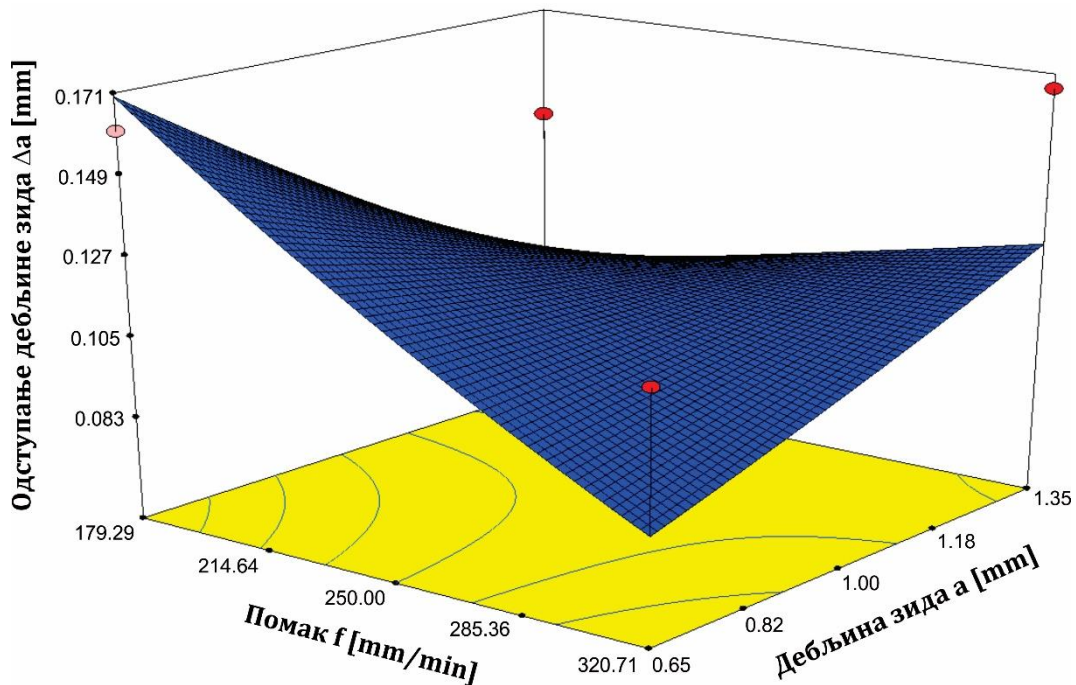


Слика 5.3. 3D површински дијаграм одзивних површина одступања дебљине зида Δa за стратегију обраде - Путања 1

Одступање дебљине зида (Δa) се смањује са већим вредностима помака. Модел је такође показао да је одступање дебљине зида пропорционално дебљини зида и што је дебљина зида већа, вредност помака има све мањи утицај на одступање дебљине зида.

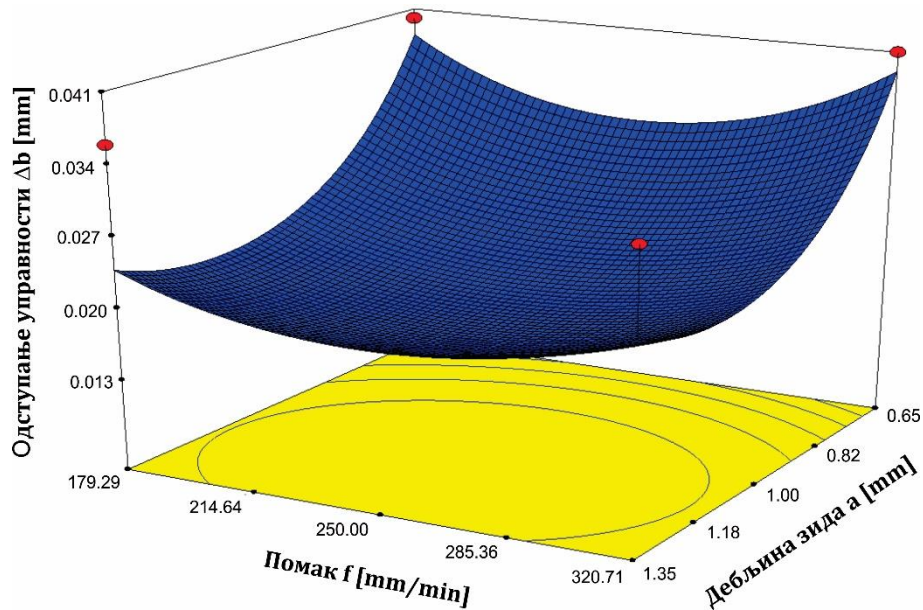
3D површински дијаграм за одступање дебљине зида (Δa) у зависности од помака (f) и дебљине зида (a) за стратегију обраде путања 3 је приказан на слици 5.4. У овом случају, максимално одступање дебљине зида износи 0,17 mm а минимално одступање је 0,08 mm. Одступање дебљине зида (Δa) за стратегију обраде путања 3 је такође јако повезано са вредношћу помака и са малом дебљином зида, док је мањи утицај вредности помака примећен за већу дебљину зида.

Може се закључити да стратегија обраде путања 1, даје знатно боље резултате када се посматра утицај одступања дебљине зида.



Слика 5.4. 3D површински дијаграм одступања дебљине зида Δa за стратегију обраде Путања 3

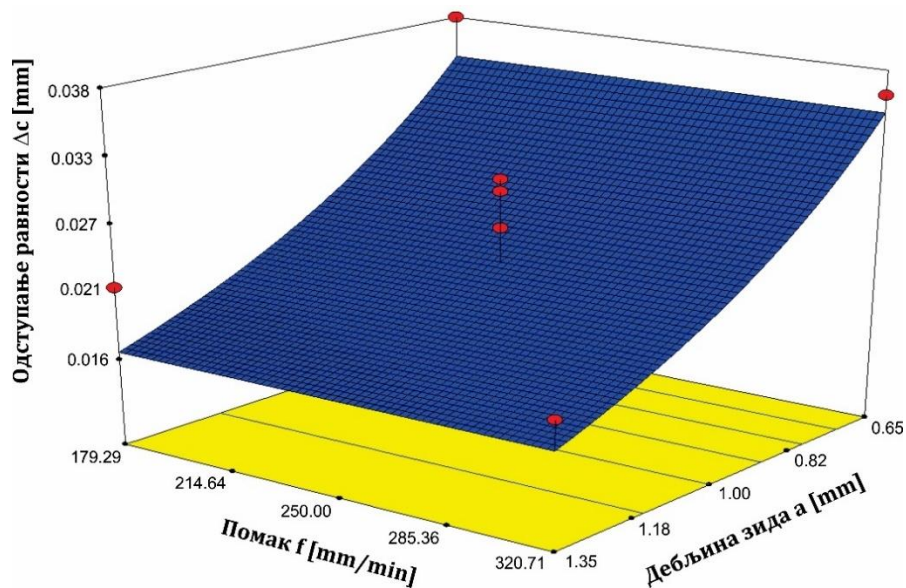
3D површински дијаграми за одступање управности (Δb) применом стратегије обраде путања 1 је приказан на слици 5.5. Модели за одступање управности (Δb) за обе стратегије обраде приказују исти тренд, као и код дебљине зида, нпр. одступање управности је веће за мању дебљину зида, док вредност помака нема неки значајни утицај на одступање управности. Најбољи резултат у погледу одступања управности се постиже са средњим вредностима помака. Максимална вредност одступања управности (Δb) за стратегију обраде путања 1 је 0,04 mm, док је за стратегију обраде путања 3 остварена вредност од 0,05 mm.



Слика 5.5. 3D површински дијаграм одступања управности Δb за стратегију обраде Путања 1

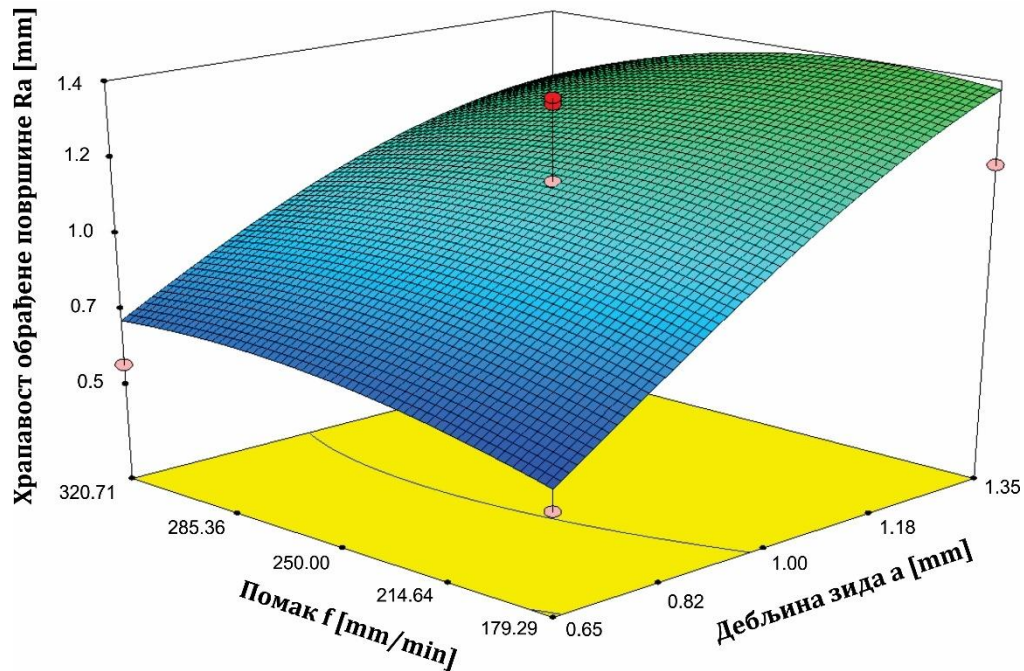
Утицај вредности помака и дебљине зида на одступање равности (Δc) за стратегију обраде путања 1 је приказан помоћу 3D површинског дијаграма на слици 5.6. Одступање равности за обе стратегије обраде путању 1 и путању 3, показује исте зависности, нпр. одступање равности је значајно повезано за дебљином зида, док вредност помака нема значајнији утицај.

Одступање равности је инверзно пропорционално дебљини зида. Максимална вредност одступања (Δc) за стратегију обраде путања 1 има вредност од 0,035 mm. и она је незнатно мања него код стратегије обраде путања 3, чија вредност износи 0,04 mm., за случај када је дебљина зида $a = 0,65$ mm.



Слика 5.6. 3D површински модел одступања равности Δc за стратегију обраде Путања 1

3D површински дијаграм храпавости обрађене површине (Ra) за случај када се користи стратегија обраде *путања 1* је приказан на слици 5.7. Такође, и у овом случају, модел храпавости обрађене површине за ове стратегије обраде показује исту зависност, нпр. храпавост обрађене површине је пропорционална дебљини зида, док вредност помака инверзно утиче на дебљину зида и то само при већим вредностима дебљине зида. Максимална храпавост обрађене површине је остварена за случај када се користи *путања 1* и износила је $Ra = 1,41 \mu m$ и била је већа него за стратегију обраде *путања 3*, чија је вредност износила $Ra = 0,83 \mu m$.



Слика 5.7. 3D површински дијаграм за храпавост обрађене површине Ra при коришћењу стратегије обраде *Путања 3*

Узевши у обзир емпиријске моделе и 3D површинске дијаграме, може се закључити да стратегија обраде *путања 1* има предност у односу на стратегију обраде *путања 3* у погледу времена обраде, одступања дебљине зида, одступања управности и одступања равности. Стратегија обраде *путања 3*, има предност у односу на стратегију обраде *путања 1* само код критеријума храпавости обрађене површине. На основу претходно изнетих ставова, оптимизација параметара процеса обраде танкозидних делова извршена је само за стратегију обраде *путања 1*, тј. *Parallel spiral*.

5.1.2 Вредновање експерименталних резултата и оптимизација

Дефинисани емпиријски модели су коришћени за оптимизацију процеса обраде за стратегију обраде *путања 1*. Главни циљ оптимизације је избор оптималне вредности помака за одређену дебљину зида, која се креће од 0,5 mm до 1,5 mm, применом корака од 0,1 mm, који ће генерисати најмању вредност одзива, нпр. најмање одступање дебљине зида при обради танкозидних делова.

Критеријуми и циљеви оптимизационог процеса су приказани у табели 5.2. На основу ове табеле, може се видети да је највећи тежински коефицијент додељен одступању дебљине зида, с обзиром да је предмет ових експерименталних истраживања повезан са обрадом танкозидних делова, где је главна геометријска карактеристика дебљина зида дела.

Табела 5.2. Критеријуми и циљеви оптимизационог процеса

Одзив	Циљ	Најнижи лимит	Највећи лимит	Тежински коефицијент
Дебљина зида	Једнако дефинисаној вредности	0,5	1,5	1
Вредност помака	У опсегу	150	350	1
Време обраде	Минимално	10	90	1
Одступање дебљине зида	Минимално	0,005	1	10
Одступање управности	Минимално	0,01	1,85	1
Одступање равности	Минимално	0,01	0,7	1
Храпавост обрађене површине	Минимално	0,2	3,2	1

Оптималне вредности помака за различите дебљине зида и одговарајуће предикционе вредности одзива за стратегију обраде путања 1, приказане су у табели 5.3. Резултати показују да осим за максималну дебљину зида од 1,5 mm, вредност помака треба да буде на максималној вредности $f = 350 \text{ mm/min}$.

Табела 5.3. Подешавање оптималних параметара и предикција одзива за различите дебљине зида (стратегија обраде Путања 1)

a [mm]	f [mm/min]	T [min]	Δa [mm]	Δb [mm]	Δc [mm]	Ra [μm]
0,5	350	22,9	0,07	0,042	0,05	0,76
0,6	350	22,9	0,054	0,037	0,06	0,77
0,7	350	22,9	0,001	0,043	0,03	0,7
0,8	350	22,9	0,003	0,036	0,029	0,8
0,9	350	22,9	0,006	0,031	0,026	0,9
1,0	350	22,9	0,011	0,029	0,023	1,0
1,1	350	22,9	0,017	0,027	0,021	1,0
1,2	350	22,9	0,025	0,028	0,019	1,1
1,3	350	23	0,034	0,029	0,017	1,1
1,4	350	23	0,044	0,032	0,016	1,1
1,5	293	23	0,056	0,037	0,015	1,1

5.1.3 Верификација оптимизационих резултата

Верификација оптимизационих резултата је извршена на два узорка са дебљином зида од $a = 0,7 \text{ mm}$ и $a = 1,2 \text{ mm}$. Након обраде узорака, приступило се процесу мерења узорака на исти начин као што је урађено у процесу претходних експерименталних истраживања за 33 танкозидна дела.

Добијени резултати верификационог теста обраде танкозидних делова су приказани у табели 5.4. На основу анализе ових података, може се закључити да резултати из верификационог теста одступају од предикционих вредности за мање од 10 %. Ови резултати се могу прихватити као задовољавајући, узимајући у обзир сложеност процеса израде танкозидних делова, услова при обради, крутости машине алатке, појаве вибрација, и осталих утицајних фактора који су наведени у претходним поглављима.

Табела 5.4. Резултати верификационог теста

Узорак	Стратегија обраде	a [mm]	f [mm/min]		T [min]	Δa [mm]	Δb [mm]	Δc [mm]	Ra [μm]
1	1	0,7	350	Предикциона вредност	22,9	0,001	0,043	0,03	0,7
2	1	1,2	350		22,9	0,025	0,028	0,019	1,1
1	1	0,7	350	Измерена вредност	23	0,001	0,041	0,033	0,76
2	1	1,2	350		23,3	0,027	0,027	0,020	1,18
1	1	0,7	350	Одступање вредности	0,4 %	0%	4,6%	10%	8,5%
2	1	1,2	350		1,7 %	8%	3,6%	5,3%	7,2%

5.1.4 Завршна разматрања оптимизације параметара средњебрзинске обраде

На основу добијених и анализираних резултата, може се закључити да стратегија путање алата Путања 1 - *Parallel spiral*, остварује најбоље вредности одзива за дебљину зида у интервалу од 0,5 mm до 1,5 mm. Такође, потребно је истаћи значај генерисаних емпиријских модела који дају увод у процес обраде у оквиру разматраног истраживања.

Провера резултата оптимизације показује максимално одступање од 10 % у измереним и предвиђеним вредностима, што представља значајно постићнуће у области средњебрзинске обраде танкозидних линијских структура.

5.2. Примена фази логике у оптимизацији квалитета обраде танкозидних делова

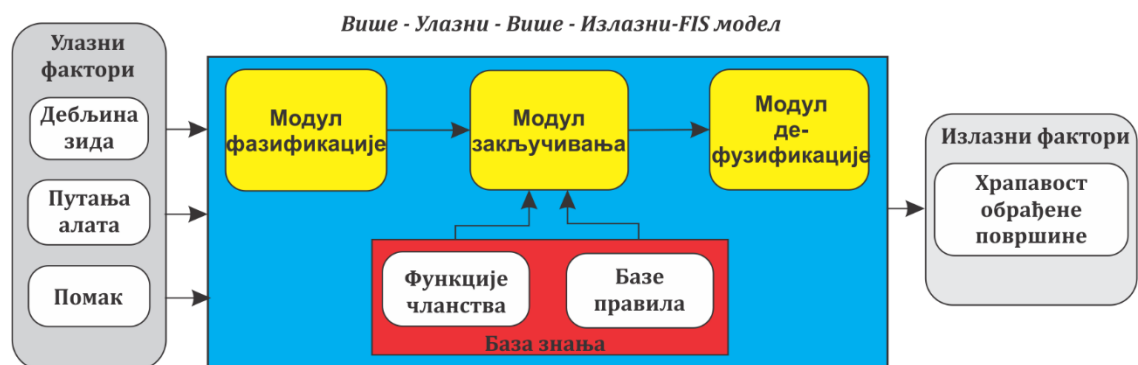
Применом методе рачунарске интелигенције, односно фази логике, креиран је интелигентни модел за предвиђање и анализу хрпавости обрађене површине. За креирање модела коришћен је централни композициони план. Због релативно малог броја експерименталних тачака оправдана је примена фази логике. Други разлог њене примене је потенцијална могућност проширења модела на више излазних променљивих.

5.2.1 Основне примене фази логике у посматраном истраживању

Фази логика (*енгл. Fuzzy logic*) представља метод који данас има врло широку примену у разним областима науке и технике. Процес фази закључивања укључује функције припадности (*енгл. Membership function, MF*), фази логичке операције (*енгл. Fuzzy logics operators*) као и “ако-онда” правила (*енгл. If-then rules*) [220 - 225]. Основна структура фази система закључивања састоји се од три концептуалне компоненте [220]:

- Базе правила, која садржи селекцију фази правила,
- Базе података са којом се дефинишу функције чланства, које се користе у оквиру фази правила и
- Механизми за резонување, са којима се изводе процедуре закључивања на основу правила за извођење излазних података (слика 5.8).

Параметри *if-then* правила су такође познати као предуслови или премисе фази моделирања и они дефинишу фази регију улазног простора, док излазни параметри одређују одговарајући излаз [221].



Слика 5.8. Систем фази закључивања [220]

Постоје три типа система фази закључивања: *Mamdani*, *Sugeno* и *Tsukamoto* [225-227]. Прва два типа су најчешће коришћени у различитим применама [228-229].

Mamdani систем фази закључивања је најпознатији тип због своје примене у развијању фази модела и он је коришћен у овом истраживању. Такође, *Mamdani FIS* може да се користи директно за оба модела система:

- више-улазни-више-излазни (енгл. *Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO*),
- више-улазни-један-излазни (енгл. *Multiple-Input-Single-Output, MISO*).

Код *Mamdani* система излазна величина процеса закључивања је фази скуп. Овакав фази скуп захтева агрегациони процес у поступку дефазификације. Резултујући фази скупови се комбинују помоћу оператора агрегације: и (*AND*), или (*OR*) и не (*NOT*) [230].

Системи фази базе знања се формирају на основу експертског знања, аутоматског генерисања правила или ручно писаних правила на основу плана експеримента, која су заснована на претходно измереним подацима. Независно на начин формирања, све базе знања генерално имају исту форму. На пример, у систему са једним улазом и једним излазом, база знања R садржи n правила, која се записују у следећем облику:

$$R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\} \quad (5.1)$$

Где n -то правило има следећи облик:

$$AKO X je A ONDA Y je B \quad (5.2)$$

Или у математичком облику:

$$\{AKO (preduslov_i) ONDA (posledica_i)\}_{i=1}^n \quad (5.3)$$

Где A и B представљају језичке (лингвистичке) вредности дефинисане фази скупом у опсезима X и Y , редоследно. У једначини (5.2), први део правила „ X је A “ представља предуслов (енгл. *premise*), док други део правила „ Y је B “ представља последицу (енгл. *consequent*). Улаз у *if-then* правило представља тренутну вредност улазне променљиве, док је излаз уопште дефазификован [230-232].

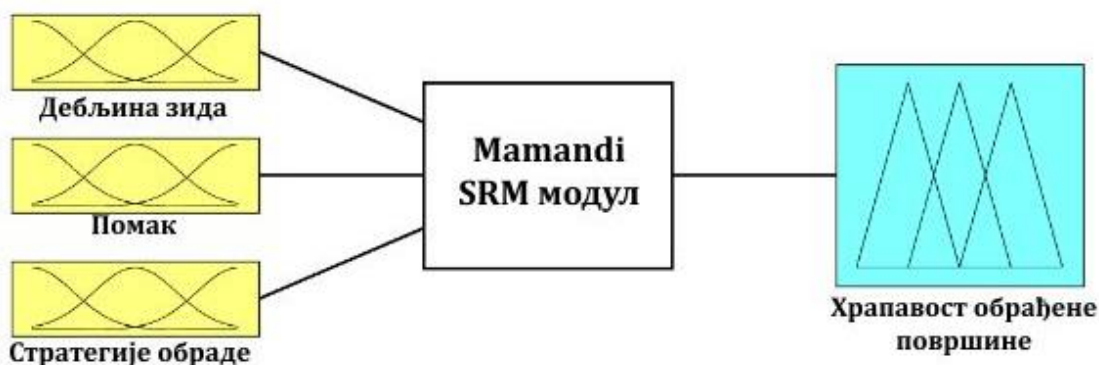
5.2.2 Дизајн система фази логике за анализу и оптимизацију квалитета обраде

Основни циљ који је дефинисан за овај део истраживања се односио на анализу и оптимизацију квалитета обрађене површине танкозидних линијских делова од легуре алуминијума, применом фази логике.

Дизајн система фази логике је подељен у три фазе. Прва фаза се односи на дефинисање фази променљивих. Друга фаза, је праћена са формирањем свих скупова фази подскупова променљивих са одговарајућим функцијама припадности. Трећа фаза представља формирање фази правила.

Улазне променљиве у фази систем у оквиру овог дела истраживања су *дебљина зида, помак и стратегија обраде*, као што је дефинисано у оквиру поглавља 4.2. Излазна променљива из система је храпавост обрађене површине Ra . У табели 5.5 упоредно су приказани експериментални резултати и добијени резултати примене фази логике за храпавост обрађене површине. Као фази логички алат за прорачун коришћен је *MATLAB*. За скуп проблема, структура скупа система је приказана на слици 5.9.

Фази изрази за различите улазне променљиве приказани су у табели 5.6. На пример, параметри за дебљину зида, су дефинисани следећим редом (*најнижи, низак, средњи, висок и највиши*), при чему је највећи степен чланства једнак јединици. Према томе, одговарајућа тренутна вредност ће бити (0,50; 0,65; 1,00; 1,35; 1,50) за дебљину зида, док су за помак вредности (150,00; 179,29; 250,00; 320,71; 350,00). Сваки експеримент ће резултирати одређеним излазним параметрима, који ће се сврставати у одговарајући фази скуп излазних променљивих. С обзиром да стратегија обраде представља категорични параметар функције припадности за тај улазни фактор су дефинисане као *RATH 1, RATH 2* и *RATH 3*. Дугим речима, свака тачка експеримента представља једно фази правило. Експерименти који се према плану понављају обухваћени су једним фази правилом. Према томе генерисано је укупно 26 фази правила који чине базу знања.



Слика 5.9. *Mamandi* систем фази закључивања за дефинисани проблем – улазно излазни дијаграм

Табела 5.5. Упоредни резултати експеримента и примене фази логике за храпавост обрађене површине

Редни број	Дебљина зида (mm)	Помак (mm/min)	Стратегија обраде	Храпавост обрађене површине - експерименталне вредности Ra (μm)	Фази храпавост обрађене површине Ra _f (μm)
1.	1,35	250	PATH 1	0,5	0,61
2.	1,35	320,71	PATH 1	0,6	0,83
3.	1,5	150	PATH 1	1	1,10
4.	1	350	PATH 1	1,1	1,00
5.	1	250	PATH 1	1,1	0,91
6.	0,65	179,29	PATH 1	1,2	1,33
7.	0,65	320,71	PATH 1	1,2	1,31
8.	1	179,29	PATH 1	1,2	1,32
9.	0,5	250	PATH 1	1,4	1,32
10.	1	250	PATH 1	1,4	0,91
11.	1	250	PATH 1	1,4	0,91
12.	1	179,29	PATH 2	2	2,07
13.	0,5	250	PATH 2	2	2,07
14.	0,65	320,71	PATH 2	2,1	2,08
15.	1	350	PATH 2	2,1	2,39
16.	0,65	179,29	PATH 2	2,2	2,08
17.	1,35	250	PATH 2	2,2	2,06
18.	1	250	PATH 2	2,2	2,30
19.	1,5	150	PATH 2	2,4	2,41
20.	1	250	PATH 2	2,4	2,30
21.	1	250	PATH 2	2,5	2,30
22.	1,35	320,71	PATH 2	3	2,87
23.	1	179,29	PATH 3	0,4	0,56
24.	1,35	320,71	PATH 3	0,4	0,67
25.	1,35	250	PATH 3	0,5	0,61
26.	1	350	PATH 3	0,6	0,71
27.	0,65	320,71	PATH 3	0,7	0,72
28.	1,5	150	PATH 3	0,7	0,72
29.	1	250	PATH 3	0,7	0,69
30.	1	250	PATH 3	0,7	0,69
31.	1	250	PATH 3	0,7	0,69
32.	0,65	179,29	PATH 3	0,8	0,83
33.	0,5	250	PATH 3	0,8	0,85
Просечна грешка 12,3 %					

Табела 5.6. Скуп правила FIS модела

Редни број	Дебљина зида (mm)	Помак (mm/min)	Стратегија обраде	Храпавост обрађене површине (μm)
1.	HIGH	MEDIUM	PATH 1	A
2.	HIGH	HIGH	PATH 1	B
3.	HIGHEST	LOWEST	PATH 1	D
4.	MEDIUM	HIGHEST	PATH 1	D
5.	MEDIUM	MEDIUM	PATH 1	D
6.	LOW	LOW	PATH 1	E
7.	LOW	HIGH	PATH 1	E
8.	MEDIUM	LOW	PATH 1	E
9.	LOWEST	MEDIUM	PATH 1	E
10.	MEDIUM	LOW	PATH 2	F
11.	LOWEST	MEDIUM	PATH 2	F
12.	LOW	HIGH	PATH 2	F
13.	MEDIUM	HIGHEST	PATH 2	F
14.	LOW	LOW	PATH 2	F
15.	HIGH	MEDIUM	PATH 2	F
16.	MEDIUM	MEDIUM	PATH 2	F
17.	HIGHEST	LOWEST	PATH 2	G
18.	HIGH	HIGH	PATH 2	H
19.	MEDIUM	LOW	PATH 3	A
20.	HIGH	HIGH	PATH 3	A
21.	HIGH	MEDIUM	PATH 3	A
22.	MEDIUM	HIGHEST	PATH 3	B
23.	LOW	HIGH	PATH 3	B
24.	HIGHEST	LOWEST	PATH 3	B
25.	MEDIUM	MEDIUM	PATH 3	B
26.	LOW	LOW	PATH 3	C
27.	LOWEST	MEDIUM	PATH 3	C

Број функције припадности коришћених за први излазни одговор је девет, тј. $A, B, C, D, E, F, G, H, I$, док је за други излазни одговор број функције припадности осам, тј. A, B, C, D, E, F, G, H . Прецизнији резултати се добијају коришћењем већег броја функције припадности. Сваки фази скуп је дефинисан посебном функцијом припадности. Функције припадности за улазне величине: дебљину зида танкозидног дела, помака и стратегије обраде, као и за излазну величину су приказане на слици 5.10.

Фази логика коришћене дефинисане скупове представља у облику функција припадности (енгл. *arbitrary curve*). Постоји велики број функција припадности, као што су троугаона, трапезна, Гаусова, итд. Због једноставног подешавања у оквиру овог истраживања примењена је Гаусова функција припадности за моделирање

храпавости. Симетрична Гаусова функција зависи од два параметра, и дата је следећим изразом:

$$f(x, \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.4)$$

Где су:

- c - средња вредност u
- σ - стандардна девијација.

Концепт фази логичког закључивања за систем са три улаза и једним излазом описан је на следећи начин: база знања састоји се од групе *AKO-ONDA* правила за (укупно 26) три улаза: x_1 – дебелина зида, x_2 – вредност помака и x_3 – стратегија обраде и једног излаза: y_1 –храпавост обрађене површине.

Према томе, општи облик система са више улаза и једним излазом описан је кроз следећу једначину:

$$\begin{aligned} & \text{Улаз: } x_1 \text{ је } A_1 \text{ и } x_2 \text{ је } B_1 \text{ и } x_3 \text{ је } C_1 \\ R_1: & x_1 \text{ је } A_1 \text{ и } x_2 \text{ је } B_1 \text{ и } x_3 \text{ је } C_1 \text{ ONDA } y_1 \text{ је } D_1 \\ R_2: & x_1 \text{ је } A_2 \text{ и } x_2 \text{ је } B_2 \text{ и } x_3 \text{ је } C_2 \text{ ONDA } y_1 \text{ је } D_2 \\ & \vdots \\ R_i: & x_1 \text{ је } A_i \text{ и } x_2 \text{ је } B_i \text{ и } x_3 \text{ је } C_i \text{ THEN } y_1 \text{ је } D_i \\ & \text{Излаз: } y_1 \text{ is } D \end{aligned} \quad (5.5)$$

Лингвистичке вредности A_i, B_i, C_i, D_i и E_i дефинисане од стране фази скупа како за улазне величине x_1, x_2, x_3 , тако и за излазну величину y_1 . Након дефинисања степена припадности за сваки скуп следи процес импликације (исход коњункције према логичким операторима), који модификује фази скуп на основу претходних степена припадности (*енгл. antecedent*). Најчешћи начин за модификовање излазног фази скупа је скраћивање помоћу функције *MIN*. Свако правило из постојеће базе правила пролази кроз фазу импликације, па се свако правило може представити преко једначине:

$$\begin{aligned} \mu_{Ri} &= \mu_{(A_i \wedge B_i \wedge C_i \wedge D_i \wedge E_i \wedge F_i \wedge G_i \Rightarrow H_i)}(x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5) = \\ &= [\mu_{A_i}(x_1) \wedge \mu_{B_i}(x_2) \wedge \mu_{C_i}(x_3)] \Rightarrow \mu_{D_i}(y_1) \end{aligned} \quad (5.6)$$

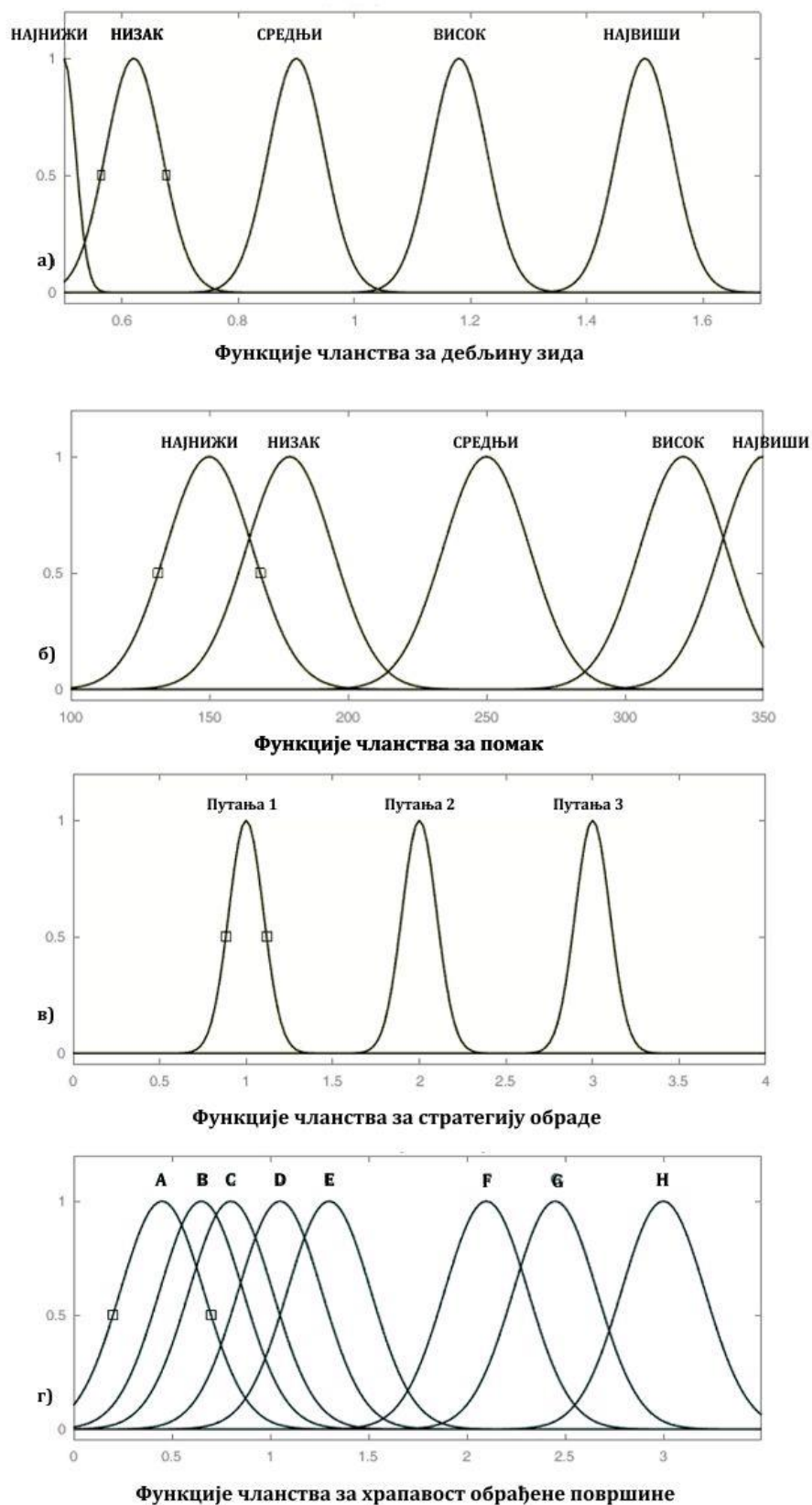
У циљу извршавања процеса импликације коришћен је *Mamdani MIN* оператор. При чему оператор импликације узима као улазну функцију претходника (*енгл. antecedent*) $\mu_{A_i}(x_1) \wedge \mu_{B_i}(x_2) \wedge \mu_{C_i}(x_3)$ док функција $\mu_{D_i}(y_1)$ представља последицу (*енгл. consequent*). Свако дефинисано правило има свој тежински коефицијент, који се креће у интервалу од 0 до 1, који се примењује на број који је додељен од стране претходника.

На крају, метода дефазификације се користи за трансформацију фази излазне вредности у дискретну вредност y_0 . Дефазификација је извршена применом методе центра гравитације (енгл. *Center of Gravity*). Бројчана вредност представља апсцису центра гравитације фази скупа. Поменута вредност добија се акумулацијом излазних скупова сваког правила. Бројчане вредности за модел са једним излазом се дефинишу на основу једначине:

$$y_1' = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu_{Di}(y_1)}{\sum_{i=1}^n \mu_{Di}(y_1)} \quad (5.7)$$

Где су:

- y_1' - представља дефазификовану излазну величину за хравност обрађене површине (излаз добијен на основу улазног вектора, чија је предикција добијена на основу T и θ вредности у овој студији),
- μ_{Di} - представља функцију припадности након процеса агрегације,
- y_1 - представља излазну променљиву, односно средњу вредност центра региона посматраног фази скупа.

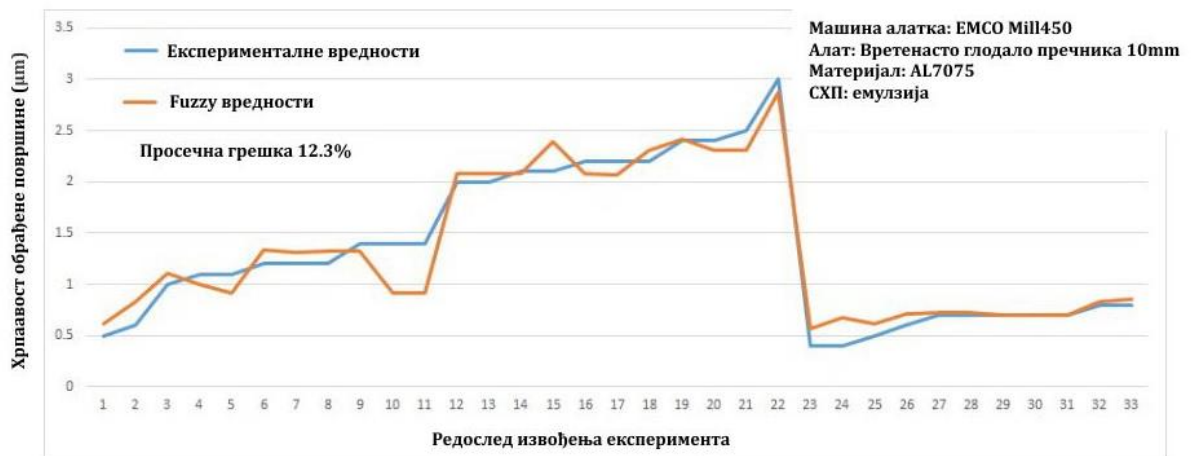


Слика 5.10. Функције припадности за улазне величине: а) дебљину зида, б) вредност помака, в) стратегију обраде и излазну величину г) храпавост обрађене површине

5.2.3 Анализа добијених резултата применом Mamdani фази система

Анализом добијених резултата, може се закључити да просечно одступање фази вредности за храпавост обрађене површине износи 12,3 %. Релативна грешка модела је незнатно већа од просечне вредности. Према тренутној литератури, модел се сматра успешним ако има грешку до 10% [225-227]. У овом раду, добијени модел је коришћен за анализу и испитивање утицаја улазних параметара на храпавост обрађене површине, односно квалитет обраде. Стога се релативна грешка фази модела може сматрати прихватљивом.

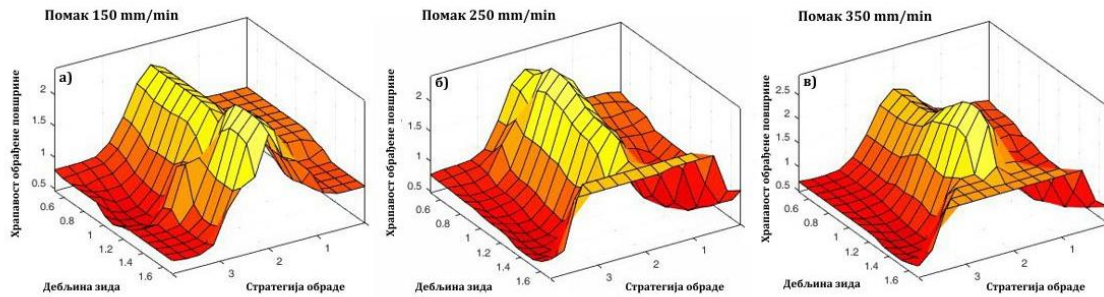
На слици 5.11, приказана су поређења експерименталних резултата и добијених фази вредности за храпавост обрађене површине. Доказано је, да је ова метода која је коришћена у раду применљива и да се може користити за одређивање храпавости обрађене површине, унутар прихватљиве процентуалне грешке за глодање танкозидних делова од легуре алуминијума. Такође, анализом крива које су јако близу једна другој, може се закључити да постоји блиска подударност. На основу анализе грешке модела може се оценити да је модел адекватан.



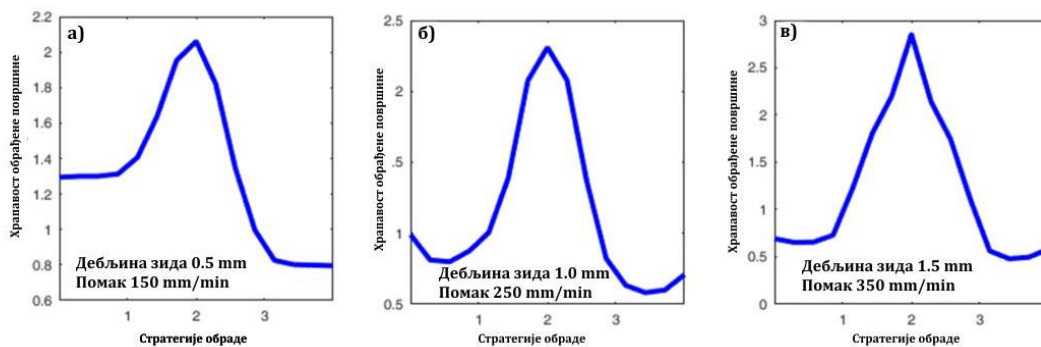
Слика 5.11. Поређење експерименталних резултата са фази вредностима и приказ просечне грешке

Слика 5.12, приказује тродимензионалне профил површине добијене током фази моделирања следећих параметара обраде: дебљине зида, вредности помака и стратегије обраде на храпавост обрађене површине. Варијација је вршена на такав начин да се два улазна параметра варирају, а један мора да буде стално константан. Може се видети колико је снажан утицај стратегије обраде на храпавост површине за различите дебљине зида и константну вредност помака. Слика 5.13 показују да *Path 2* стратегија обраде има велики утицај на храпавост обрађене површине. Најзначајнији фактор који утиче на храпавост површине је стратегија обраде. На основу претходног и анализе фази модела може се закључити да при промени стратегије обраде се значајно мења храпавост обрађене површине.

Свака измена стратегије обраде доводи до значајних промена макро геометрије обрађене површине. Са стратегијом обраде *Zig-Zag (Path 2)* остварује се највећа вредност хрпавости обрађене површине. С друге стране стратегије обраде *Parallel Spiral –(Path 1)* и *True Spiral – (Path 3)* остављају најмање трагове алата на обрађеној површини. На основу 3D дијаграма фази модела (скупа могућих решења), најнижа вредност хрпавости обрађене површине остварује се са стратегијом обраде *True Spiral*, слика 5.13.



Слика 5.12. 3D приказ хрпавости обрађене површине за случај кад су дебљина зида и стратегија обраде променљиве за вредности помака а) 150 mm/min; б) 250 mm/min и в) 350 mm/min



Слика 5.13. 2D приказ утицај хрпавости обрађене површине када су дебљина зида и помака константе вредности а) 0,5 mm и 150 mm/min; б) 1,0 mm и 250 mm/min; и в) 1,5 mm и 350 mm/min

Резултати добијени фази логиком, који су претходно приказани, такође су потврђени применом ANOVA анализе. На основу табеле 5.7 може се установити утицај, односно процентуални удео сваког улазног фактора на хрпаваост обрађене површине. Према томе највећи примат заузима стратегија обраде са 98,9 %, затим дебљина зида 0,68% и на крају помак са 0,42% удела. Међутим, добро је познато да када је за улазне факторе Ф-вредност мања од 1 онда се ти параметри искључују из даље анализе. Мало процентуално учешће помака оправдава се чињеницом да није било могуће варирати помак у ширим границама, јер би у супротном дошло до оштећења обратка.

Поред табеларног приказа *ANOVA* анализа приказује резултате у виду одзивних графика који омогућавају визуелну идентификацију утицаја улазних фактора. На основу слике 5.14, јасно се види да се храпавост обрађене површине значајно мења са променом стратегије обраде. На основу ове слике, може се посматрати ефекат сваког параметра на различитим нивоима. Најбоља храпавост обрађене површине остварена је када је дебљина зида износила $1,35\text{ mm}$, док је најнеповољнија храпавост остварена при дебљини зида од $0,5\text{ mm}$. Вредност помака има такође утицај на храпавост обрађене површине, и он се огледа на следећи начин: најбоља храпавост се постиже при помаку од 350 mm/min , док је најнеповољнија храпавост при помаку од 150 mm/min и 250 mm/min . Стратегија обраде, као трећи фактор даје најбоље резултате у погледу храпавости обрађене површине када се користи путања *PATH 3*, док је најнеповољнија стратегија обраде *PATH 2 (Zig-Zag)*, што је потврђено анализом фази модела.

Табела 5.7. *ANOVA* резултати

Улазни параметри	Степени слободe	Збир квадрата	Средњи квадрат	F-вредност	P-вредност	Удео %
Дебљина зида	4	0,2183	0,05457	0,73	0,579	0,68
Вредност помака	3	0,1027	0,03424	0,46	0,713	0,42
Стратегија обраде	2	15,8370	7,91848	106,28	0,000	98,90
Грешке	23	1,7137	0,07451	-	-	
Укупно	32	1,6070	0,09453	-	-	100

Слика 5.14. Приказ *ANOVA* резултата утицај улазних фактора на храпавост обрађене површине

На основу резултата који су добијени применом *Mamdani* фази система резоновања, применом правила која су претходно дефинисана и описана у овом поглављу на основу експерименталних података, показују подударарања са резултатима експеримента. Ово показује да су одабрани типови механизма за закључавање функције припадности (*gaussmf*) као и метода *MIN-MAX* и центра гравитације добар избор.

Такође, може се закључити да се фази логика може успешно применити на овакав тип истраживања. Допринос овог истраживања није само у поређењу добијених експерименталних података за храпавост обрађене површине применом фази логике, већ и при анализи који улазни параметар поседује највећи утицај на храпавост обрађене површине.

5.3. Вишекритеријумска оптимизација параметара технолошког процеса средњебрзинске обраде

5.3.1 Основе вишекритеријумског одлучивања

Пројектанти се веома често сусрећу са потребом избора оптималног решења производа, процеса, ресурса, итд. [28, 128]. У таквим ситуацијама се поред великог броја алтернатива јавља и велики број критеријума, што све заједно чини проблем избора много сложенијим. Постојање више алтернатива и критеријума, од којих неке треба максимизирати а неке минимизирати, значи да се одлуке доносе у конфликтним условима и да се за решавање ових сложених задатака морају применити технике вишекритеријумског одлучивања (енгл. *Multi-Criteria Decision Making - MCDM*). Ове методе су засноване на научним принципима који омогућују ефикасан начин одређивања оптималног решења [233, 234].

Проблеми вишекритеријумског одлучивања су веома разуђени, али и поред тога имају неке заједничке карактеристике [235]:

- Већи број критеријума, који се дефинишу од стране доносиоца одлуке,
- Већи број алтернатива, које се усвајају од стране доносиоца одлуке,
- Присуство некомпатибилности и постојање конфликта међу критеријумима. Појава да је једна алтернатива боља од друге за један критеријум, док је друга боља од прве за други критеријум,
- Неупоредиве јединице мера атрибута,
- Избор врсте проблема вишекритеријумског одлучивања су или пројектовање најбоље алтернативе или избор најбоље алтернативе из коначног скупа претходно дефинисаних алтернатива.

У зависности од природе алтернатива, поставке проблема, као и самог процеса избора коначног решења проблеми вишекритеријумског одлучивања се могу поделити у две основне групе [237, 238]:

1. Вишекритеријумска анализа или вишеатрибутивно одлучивање (енгл. *multiple-attribute decision making, MADM*) – дискретне методе,
2. Вишециљно одлучивање (енгл. *multiple objective decision making, MODM*) – континуиране методе.

С обзиром да се у посматраном случају проблем одлучивања односи на ограничен број унапред познатих алтернатива, подразумева се примена

вишекритеријумске анализе. Бројни истраживачи и научници развили су велики број MCDM метода, почев од интуитивних па до софистицираних аналитичких метода. Ове методе се могу користити да се идентификује једна најпожељнија алтернатива, да се рангирају алтернативе, да се изабере ограничен број алтернатива, односно да се групишу у класе или да се једноставно издвоје прихватљиве од неприхватљивих алтернатива [233, 238].

Код рашчлањивања процеса одлучивања на фазе постоје сличности и разлике, али се углавном могу свести на следеће фазе:

1. Идентификација и формулација проблема одлучивања и дефинисање функције/а циља,
2. Формирање модела и матрице одлучивања - одређивање скупа алтернатива и критеријума, а након тога прикупљање одговарајућих података у виду атрибута/перформанси,
3. Преференције доносиоца одлуке у погледу значајности критеријума, при чему се на излазу добијају тежински коефицијенти критеријума,
4. Избор и примена MCDM методе/а - одређивање агрегатне функције на основу које се добијају укупне оцене алтернатива у моделу одлучивања,
5. Анализа осетљивости решења - стабилност решења у случају малих промена вредности тежинских коефицијената,
6. Избор најприхватљивије/"оптималне" алтернативе и/или рангирање алтернатива (ако се користи једна MCDM метода, или за сваку MCDM методу ако се користи више метода),
7. Корелациона анализа и интегрални избор најприхватљивије/"оптималне" алтернативе и/или рангирање алтернатива (за случај коришћења више MCDM метода за решавање истог проблема),
8. Анализа добијених резултата кроз контролу извршења одлуке.

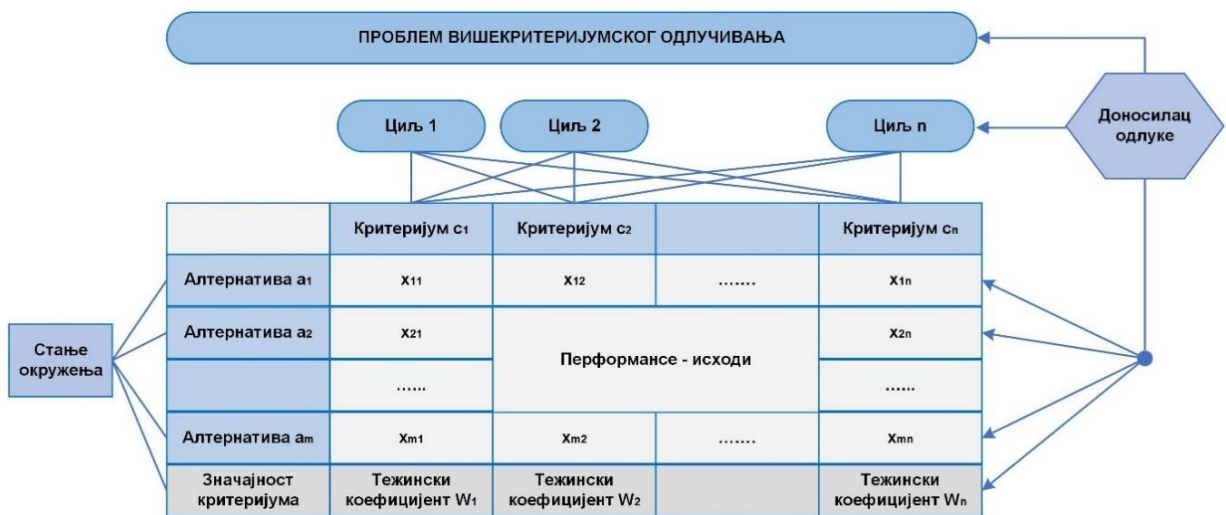
Проблем вишекритеријумског одлучивања се дефинише користећи следеће основне елементе [236, 239]:

- Доносилац одлуке – особа или тим људи који су задужени за доношење одлуке,
- Алтернативе – могућа или изводљива решења проблема одлучивања (усвојене алтернативне варијанте производа, процеса, ресурса...),
- Критеријуми – битне карактеристике алтернатива на основу којих се врши њихова оцена и вредновање,
- Атрибути/перформансе – карактеристике или вредности алтернативе по посматраним критеријумима, могу се изразити квантитативно (бројчано) или квалитативно (дескриптивно описати) - који се преводе у квантитативне помоћу одговарајућих скала за трансформацију лингвистичких израза у бројчане вредности,
- Циљ – представља намеру у смислу жељених карактеристика решења

проблема и исказује се преко функције циља која може бити минимална или максимална,

- Тежински коефицијенти – преференција или значајност критеријума у моделу одлучивања и алтернатива за сваки критеријум посебно (код неких метода као што је метода аналитичких хијерархијских процеса, енгл. АНР),
- Стање окружења – чине фактори који утичу на вредност перформанси алтернатива.

Основни проблем вишекритеријумског одлучивања се може приказати преко релација између наведених најбитнијих елемената вишекритеријумског одлучивања, циљевима, критеријумима и алтернативама (слика 5.15). Централно место заузима матрица одлучивања која се састоји од скупа редова и колона којима у приказане перформансе коначног скупа алтернатива у односу на усвојени скуп критеријума. На овај начин се обезбеђује јасна визуелизација проблема одлучивања.



Слика 5.15. Релација елемената код вишекритеријумског одлучивања [236]

Методe за решавање проблема вишекритеријумског одлучивања имају за циљ да изврше оцену и вредновање (m) алтернатива A_i ($i=1,2,\dots,m$) у односу на (n) критеријума C_j ($j=1,2,\dots,n$) сагледавајући атрибуте свих алтернатива у односу на сваки критеријум x_{ij} и релативну значајност критеријума које су представљене тежинским коефицијентима W_j ($j=1,2,\dots,n$) [236, 240].

Општа математичка формулација вишекритеријумске анализе има облик према (5.8), који се може тумачити на следећи начин: применити методу вишекритеријумског одлучивања за избор најбоље алтернативе из скупа могућих алтернатива узимајући у обзир перформансе алтернатива у односу на разматране критеријуме.

$$\begin{aligned} & \text{Max/Min } \{C_1(x), C_2(x), \dots, C_n(x)\} \\ & \text{Pri ograničenju: } x \in A = [a_1, a_2, \dots, a_m] \end{aligned} \quad (5.8)$$

MCDM је научна област која се врло брзо и интензивно развија, а доказ за то су бројне методе које су развијене и које се и даље развијају [233, 238, 241-247]. Ове методе су развијене као математички алати за пружање подршке доносиоцима одлуке у процесу решавања проблема, засноване су научним принципима како би се на ефикасан и ефективан начин одредила „оптимална“ решења.

У овом раду изабране су за примену следеће *MCDM* методе које су развијене од стране следећих истраживача: *GRA* (енгл. *Grey Relational Analysis*) [248], *AHP* (енгл. *Analytic Hierarchy Process*) [249], *MOORA* (енгл. *Multi-Objective Optimization Method by Ratio Analysis*) [250], *TOPSIS* (енгл. *Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution*) [237], *ROV* (енгл. *Range Of Value*) [251], *COPRAS* (енгл. *COmplex PProportional Assessment of alternatives*) [252], *ARAS* (енгл. *Additive Ratio ASsessment*) [253], *WASPAS* (енгл. *Weighted Aggregates Sum Product ASsessment*) [254], *VIKOR* (срп. *оптимизација и КОмпромисно Решење*) [255], *OCRA* (енгл. *Operational Competitiveness Rating Analysis*) [256], *EDAS* (енгл. *Evaluation based on Distance from Average Solution*) [257, 258], *MAVAC* (енгл. *Multi-Attributive Border Approximation area Comparison*) [259], *SAW* (енгл. *Simple Additive Weighting*) [260] и *SPW* (енгл. *Simple Product Weighting*) [233].

Основна карактеристика ових метода је да буду транспарентне и једноставне, да обезбеде комплетно рангирање алтернатива, да обезбеде употребу мин и мах критеријума, да могу користити квантитативни и квалитативни подаци, да не захтевају експертско знање из области математике и не захтевају коришћење специјализованих софтвера [233, 238, 244].

У највећем броју радова примењује се једна или пар *MCDM* метода за избор оптималне варијанте производа, процеса, ресурса, материјала итд. У случају када се примењује већи број ових метода потребно је извршити њихово поређење и доношење коначне интегралне одлуке о избору оптималног решења кроз примену корелационе анализе [233, 261-263].

5.3.2 Модел интегралног вишекритеријумског рангирања алтернатива

Применом више различитих *MCDM* метода на исти проблем могу се добити различити резултати рангова алтернатива чак и када су примењене од стране истог доносиоца одлуке, па се јавља проблем конфликта резултата одлучивања. Како би се ови конфликти могли статистички анализирати и изабрале методе чији ће резултати представљати основу за одлучивање и избор оптималне алтернативе и њиховог ранга потребно је узети у разматрање што више различитих метода које би чиниле довољан узорак [233, 261-263].

У циљу смањења ризика од доношења погрешних одлука у овом раду се примењује велики број различитих *MCDM* метода, а кроз итеративни поступак потребно је изабрати минимално две методе које ће представљати основу за интегрално доношење одлуке о избору оптималне алтернативе и рангова алтернатива. У посматраном случају ове методе се бирају, применом следеће

методологије која се реализује кроз више итерација на бази одговарајућих параметара корелације са граничним вредностима:

1. Прва итерација

У првој итерацији врши се поређење рангова свих примењених MCDM метода и одређују се вредности *Spirman*-ових коефицијената њихове међусобне корелације (R_i), укупан *Kendal*-ов коефицијент корелације (W) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације (R) свих MCDM метода, као и стандардне девијације по нивоима (σ_i), односно вредности максималне и просечне стандардне девијације (σ_{\max} и σ_{sr}). Ови коефицијенти се пореде са граничним-прихватљивим вредностима и уколико су сви у дозвољеним границама неће се вршити даље итерације, већ се може формулисати коначно решење – рангови алтернативних нивоа решења.

а) *Spirman*-ов коефицијент корелације (R_i)

Spirman-ов коефицијент корелације (R_i) омогућава квантификовање степена корелације између било која два скупа рангова алтернатива која су добијена применом различитих MCDM метода, и израчунава се према формули (5.9). *Spirman*-ови коефицијенти корелације (R_i) треба да се налазе у границама $0,9 \leq R_i \leq 1$ [264].

$$R_i = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N d_i^2}{N(N^2-1)} \quad (5.9)$$

Где су:

- N - величина узорка (број алтернатива које се рангирају),
- X_i и Y_i – прорачунске вредности излазних коефицијената за било које две MCDM методе,
- x_i и y_i – рангови алтернатива у моделу добијени на бази вредности X_i и Y_i ,
- $d_i = (x_i - y_i)$ - разлика између рангова алтернатива две MCDM методе.

б) *Kendal*-ов коефицијент корелације

Kendal-ов коефицијент корелације се користи за одређивање степена корелације рангова свих алтернатива када се за одлучивање користи три или више MCDM метода, што одговара случају који се истражује у овом раду. *Kendal*-ов коефицијент корелације (W) се израчунава применом једначине (5.10). *Kendal*-ов коефицијент корелације треба да се налази у границама $0,9 \leq W \leq 1$ [265]:

$$W = \frac{12 \cdot \sum_{i=1}^k T_j^2}{k^2 \cdot m(m^2-1)} - \frac{3(m+1)}{m-1} \quad (5.10)$$

Где су:

- T_j - збир суме квадрата рангова за сваку алтернативу,
- m – број алтернатива које се рангирају,
- k – број примењених MCDM метода.

в) Просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације (R)

Просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације представља корелацију свих парова рангова алтернатива добијених применом различитих MCDM метода у моделу одлучивања. Најједноставнија формула за његово одређивање је на бази *W-Kendal*-овог коефицијента корелације, према формули (5.11). Просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације (R) треба да се налази у границама $0,9 \leq R \leq 1$ [265].

$$R = \frac{k \cdot W - 1}{k - 1} \quad (5.11)$$

д) Стандардна девијација

Стандардна девијација дефинише колико у просеку елементи узорка одступају од аритметичке средине. У посматраном случају одређују се вредности стандардне девијације по нивоима-алтернативама (σ_i), а потом се одређују вредности максималне и просечне стандардне девијације (σ_{\max} и σ_{sr}). Просечна стандардна девијација треба да је у следећим границама $\sigma_{sr} \leq 1,5-2$ [264].

2. Друга и даље итерације

У оквиру друге итерације из даље анализе изостављају се методе које не задовољавају граничне вредности претходно дефинисаних *Spirman*-ових коефицијената корелације и врши се поновно одређивање свих коефицијената корелације, као и њихово поређење са граничним вредностима.

Поступак се понавља све док се не пронађу бар две MCDM методе које задовољавају постављене граничне вредности коефицијената корелације. Што је више метода које задовољавају постављене услове и што је већи степен корелације примењених метода решење је боље и тачније. Уколико се не пронађе оптимално решење, потребно је применити неке друге MCDM методе који ће задовољити услове корелационе анализе.

5.3.3 Дефинисање функција циља и одређивање тежинских коефицијената критеријума

У циљу одређивања оптималних параметара технолошког процеса обраде са различитих аспеката, односно за различите функције циља било је неопходно правилно дефинисати критеријуме оптимизације, а након тога одредити њихове тежинске коефицијенте. Као методологија за дефинисање тежинских коефицијената изабрана је *АНР* метода, која на једноставан начин кроз међусобно упоређивање критеријума на излазу даје поуздане податке, који се додатно проверавају степеном конзистентности. Изабране су четири варијанте значајности функција циља посматраног технолошког процеса обраде, према табели 5.8.

Табела 5.8. Варијанте значајности функција циља при вишекритеријумској оптимизацији

Варијанта	Функција циља / Најзначајнији критеријуми оптимизације
1.	Једнака значајност критеријума
2.	Тачност обраде (тачност мера, облика и односа површина)
3.	Производност (време обраде)
4.	Квалитет обраде (храпавост обрађене површине)

Примена методологије одређивања тежинских коефицијената критеријума приказана је на примеру варијанте 3, где је као основна функција циља дефинисана производност, а најзначајнији критеријум оптимизације је време обраде, као еквивалент производности. Одговарајућа хијерархијска структура поређења критеријума сваког са сваким, представљена је матрицом одлучивања у табели 5.9.

Табела 5.9. Хијерархијска структура поређења критеријума за варијанту 3. функције циља

	T	Δa	Δb	Δc	Ra
T	1	3	5	5	3
Δa		1	2	2	1
Δb			1	1	1/2
Δc				1	1/2
Ra					1

За одређивање тежинских коефицијената у моделу – нормализованих сопствених вектора критеријума примењена је апроксимативна АНР метода, која се састоји од четири корака.

Први корак се односи на дефинисање прерађене матрице – табеле поређења свих критеријума, где вредности испод дијагонале матрице добијају инвертоване вредности изнад дијагонале. Други корак се односи на одређивање суме свих елемената колона у табели. Резултати прва два корака су приказани у табели 5.10. У трећем кораку извршено је дељење елемената сваке колоне са сумом вредности те колоне, која је добијена у претходном кораку. У оквиру четвртог корака одређена је сума сваког реда а потом средња вредност тог реда. Колона која се састоји од ових средњих вредности представља нормализовани сопствени вектор критеријума (колона W_j), односно тежинске коефицијенте критеријума W_j . Резултати трећег и четвртог корака дати су у табели 5.11.

Табела 5.10. Корази 1 и 2 АНР апроксимативне методологије одређивања тежинских коефицијената

	T	Δa	Δb	Δc	Ra
T	1,0000	3,0000	5,0000	5,0000	3,0000
Δa	0,3333	1,0000	2,0000	2,0000	1,0000
Δb	0,2000	0,5000	1,0000	1,0000	0,5000
Δc	0,2000	0,5000	1,0000	1,0000	0,5000
Ra	0,3333	1,0000	2,0000	2,0000	1,0000
Укупно	2,0667	6,0000	11,0000	11,0000	6,0000

Табела 5.11. Корази 3 и 4 АНР апроксимативне методологије одређивања тежинских коефицијената

	T	Δa	Δb	Δc	Ra	Укупно	W_j	λ_i
T	0,4839	0,5000	0,4545	0,4545	0,5000	2,3930	0,4786	5,0127
Δa	0,1613	0,1667	0,1818	0,1818	0,1667	0,8583	0,1717	5,0046
Δb	0,0968	0,0833	0,0909	0,0909	0,0833	0,4453	0,0891	5,0024
Δc	0,0968	0,0833	0,0909	0,0909	0,0833	0,4453	0,0891	5,0024
Ra	0,1613	0,1667	0,1818	0,1818	0,1667	0,8583	0,1717	5,0046
							Σ=1,0000	λ_{max}=5,0127

У циљу одређивања доследности доносиоца одлуке, извршен је прорачун коефицијента конзистентности. Прво је дефинисан индекс конзистентности CI према формули (5.12), а потом и степен или коефицијент конзистентности CR , према (5.13), при чему је случајни индекс $RI=1,12$ преузет из табеле 5.12 на основу броја критеријума ($n=5$). Вредност резултата $CR=0,0028 \leq 0,1$, што значи да је грешка у процени упоређивања критеријума веома мала, на основу чега можемо закључити да је међусобно поређење критеријума извршено на задовољавајући начин.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{5,0127 - 5}{5 - 1} = 0,0032 \quad (5.12)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,0032}{1,12} = 0,0028 \quad (5.13)$$

Табела 5.12. Случајни коефицијенти конзистентности - RI за различите бројеве - n

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	1,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Применом приказаног поступка одређени су тежински коефицијенти критеријума за све четири варијанте значајности функције циља, што је приказано у табели 5.13. На основу вредности израчунатих коефицијената конзистентности CR може се закључити да је ниво грешака поређења критеријума за све варијанте много мањи од граничног ниво $CR \leq 0,1$.

Табела 5.13. Тежински коефицијенти критеријума оптимизације за постављене функције циља

	Варијанте функције циља							
	Вар. 1	Ранг	Вар. 2	Ранг	Вар. 3	Ранг	Вар. 4	Ранг
T	0,2000	1-5	0,0694	5	0,4786	1	0,1717	2-3
Δa	0,2000	1-5	0,3865	1	0,1717	2-3	0,1717	2-3
Δb	0,2000	1-5	0,2121	2-3	0,0891	4-5	0,0891	4-5
Δc	0,2000	1-5	0,2121	2-3	0,0891	4-5	0,0891	4-5
Ra	0,2000	1-5	0,1198	4	0,1717	2-3	0,4786	1
Коефицијент конзистентност и CR	0		0,0053		0,0028		0,0028	

5.3.4. Примена метода вишекритеријумске оптимизације

У циљу одређивања оптималних параметара технолошког процеса средњебрзинске обраде танкозидних делова коришћени су резултати реализованих експеримената, табела 4.13. Избор оптималног алтернативног нивоа параметара технолошког процеса и њихово рангирање реализовано је применом 14 метода вишекритеријумске оптимизације, односно одлучивања (ВКО): GRA, AHP, MOORA, TOPSIS, ROV, COPRAS, ARAS, WASPAS, VIKOR, OCRA, EDAS, MABAC, SAW и SPW.

У наставку су приказани резултати примене наведених метода за све четири варијанте функција циља.

5.3.5 Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 1. функције циља

5.3.5.1 Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације

У табели 5.14 приказани су резултујући коефицијенти примене појединих метода ВКО на основу којих је извршено рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса.

Табела 5.14. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 1. функције циља

Бр. Екс.	Метода ВКО									
	GRA		AHP		MOORA		TOPSIS		ROV	
	GRG	Ранг	F_i	Ранг	Y_i	Ранг	$CCo(P_i)$	Ранг	U_i	Ранг
1	0,7626	7	0,0327	15	-0,0601	7	0,8924	9	0,4472	7
2	0,6873	20	0,0286	19	-0,0747	18	0,8660	14	0,4222	18
3	0,8267	1	0,0772	1	-0,0428	1	0,9562	1	0,4754	1
4	0,7693	5	0,0403	9	-0,0552	5	0,9097	5	0,4536	5
5	0,8008	3	0,0451	4	-0,0483	2	0,9360	2	0,4667	2
6	0,7321	9	0,0420	7	-0,0664	12	0,8774	12	0,4344	12
7	0,7242	12	0,0433	6	-0,0723	17	0,8561	19	0,4219	19
8	0,8023	2	0,0661	2	-0,0495	3	0,9223	3	0,4619	3
9	0,7367	8	0,0410	8	-0,0609	8	0,9003	7	0,4443	8
10	0,7304	10	0,0453	3	-0,0654	10	0,8821	10	0,4361	10
11	0,7281	11	0,0445	5	-0,0660	11	0,8804	11	0,4351	11
12	0,2877	32	0,0097	32	-0,2776	30	0,4117	30	0,2295	30
13	0,4416	26	0,0121	29	-0,1571	23	0,7015	23	0,3334	23
14	0,3305	30	0,0127	28	-0,3380	33	0,3321	33	0,1620	32
15	0,4324	27	0,0145	26	-0,1949	27	0,6065	27	0,3102	27
16	0,3118	31	0,0116	31	-0,3136	31	0,3481	32	0,2028	31
17	0,4460	25	0,0137	27	-0,1708	24	0,6608	24	0,3295	24
18	0,2644	33	0,0084	33	-0,3313	32	0,3722	31	0,1607	33
19	0,4213	28	0,0153	25	-0,2267	29	0,5219	29	0,2867	29
20	0,3724	29	0,0119	30	-0,2103	28	0,5760	28	0,2918	28
21	0,4776	23	0,0183	23	-0,1752	26	0,6387	26	0,3267	25
22	0,4773	24	0,0171	24	-0,1726	25	0,6501	25	0,3233	26
23	0,7142	16	0,0273	21	-0,0904	20	0,7986	21	0,4018	20
24	0,6767	21	0,0309	17	-0,0919	21	0,8013	20	0,3937	21
25	0,7685	6	0,0310	16	-0,0591	6	0,9032	6	0,4535	6
26	0,7206	14	0,0331	14	-0,0644	9	0,8953	8	0,4442	9
27	0,6964	19	0,0254	22	-0,0756	19	0,8585	18	0,4276	17
28	0,7235	13	0,0369	11	-0,0697	13	0,8663	13	0,4285	15
29	0,6761	22	0,0274	20	-0,1012	22	0,7676	22	0,3774	22
30	0,7819	4	0,0385	10	-0,0530	4	0,9183	4	0,4583	4
31	0,7140	17	0,0335	13	-0,0716	15	0,8630	17	0,4282	16
32	0,7108	18	0,0297	18	-0,0717	16	0,8636	16	0,4288	14
33	0,7165	15	0,0348	12	-0,0711	14	0,8636	15	0,4291	13

Табела 5.14. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 1. функције циља - наставак

Бр. Екс.	Метода ВКО									
	COPRAS		ARAS		WASPAS		VIKOR		OCRA	
	U_j	Ранг	U_i %	Ранг	U_j %	Ранг	Q_i	Ранг	P_i	Ранг
1	71,8728	7	42,3175	15	0,3509	15	0,2047	9	86,1154	10
2	58,8666	18	37,0532	19	0,3081	19	0,2444	13	85,3101	13
3	100,000	1	100,000	1	0,5675	2	0,0000	1	87,7847	2
4	79,7473	5	52,1937	9	0,4210	8	0,1347	5	87,1633	4
5	88,4192	3	58,4080	4	0,4240	7	0,0682	2	87,1362	5
6	67,1442	11	54,3916	7	0,4289	6	0,2208	12	86,4963	9
7	62,9144	14	56,0952	6	0,4324	5	0,3141	19	87,0910	6
8	89,9977	2	85,5547	2	0,5684	1	0,0993	3	88,0118	1
9	72,4110	6	53,1274	8	0,4184	9	0,1407	6	87,0535	7
10	67,9223	9	58,5947	3	0,4490	3	0,2048	10	87,0334	8
11	67,2623	10	57,5964	5	0,4353	4	0,2107	11	87,1709	3
12	12,0501	30	12,6068	32	0,0979	32	0,6934	30	22,8119	31
13	23,3850	23	15,7225	29	0,1249	28	0,5589	23	71,4453	23
14	9,8198	33	16,4560	28	0,1240	29	0,9979	32	18,2940	32
15	17,5586	27	18,7148	26	0,1462	26	0,5647	25	55,1985	25
16	10,5096	31	14,9693	31	0,1140	31	0,9331	31	0,0000	33
17	20,5378	25	17,6770	27	0,1391	27	0,5252	22	65,2976	24
18	10,0790	32	10,8974	33	0,0840	33	1,0000	33	28,9315	30
19	14,8021	29	19,7874	25	0,1521	25	0,6042	26	33,8934	29
20	16,4640	28	15,3826	30	0,1227	30	0,6562	29	44,7665	28
21	20,1525	26	23,6545	23	0,1748	23	0,5607	24	49,5121	27
22	20,9090	24	22,1604	24	0,1673	24	0,6460	27	52,9242	26
23	46,8094	21	35,3827	21	0,2808	21	0,5117	20	81,6905	22
24	48,0386	20	40,0369	17	0,3161	18	0,5150	21	83,1847	19
25	69,9712	8	40,1502	16	0,3337	16	0,1548	7	83,6298	17
26	65,1718	12	42,8447	14	0,3512	14	0,1663	8	82,6543	21
27	54,7991	19	32,8900	22	0,2717	22	0,2980	18	83,2712	18
28	64,1362	13	47,8387	11	0,3865	11	0,2849	14	86,0126	12
29	43,8652	22	35,4901	20	0,2845	20	0,6557	28	83,1573	20
30	82,1651	4	49,8156	10	0,4175	10	0,1224	4	86,0310	11
31	60,9317	16	43,4140	13	0,3529	13	0,2953	17	84,4050	15
32	60,4258	17	38,4964	18	0,3201	17	0,2944	16	84,3121	16
33	61,1895	15	45,0243	12	0,3622	12	0,2938	15	84,4763	14

Табела 5.14. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 1. функције циља - наставак

Бр. Екс.	Метода ВКО							
	EDAS		MABAC		SAW		SPW	
	S_i	Ранг	S_i	Ранг	S_i	Ранг	S_i	Ранг
1	0,9313	6	0,1588	7	0,3803	16	0,3214	12
2	0,8649	18	0,1087	18	0,3318	20	0,2845	16
3	1,0000	1	0,2150	1	0,5972	1	0,5379	2
4	0,9451	5	0,1716	5	0,4378	10	0,4043	6
5	0,9717	3	0,1978	2	0,4444	8	0,4036	7
6	0,9021	11	0,1330	12	0,4760	4	0,3818	9
7	0,9089	10	0,1080	19	0,4561	7	0,4086	5
8	0,9760	2	0,1881	3	0,5766	2	0,5602	1
9	0,9176	7	0,1528	8	0,4399	9	0,3970	8
10	0,9013	12	0,1365	10	0,4855	3	0,4126	3
11	0,8997	13	0,1346	11	0,4598	5	0,4109	4
12	0,1664	30	-0,2768	30	0,1523	32	0,0435	30
13	0,5067	23	-0,0688	23	0,1640	31	0,0857	25
14	0,0694	32	-0,4118	32	0,2087	27	0,0394	32
15	0,3821	27	-0,1152	27	0,2280	26	0,0645	27
16	0,1034	31	-0,3302	31	0,1858	30	0,0423	31
17	0,4711	26	-0,0768	24	0,2012	28	0,0771	26
18	0,0405	33	-0,4144	33	0,1292	33	0,0387	33
19	0,3135	29	-0,1622	29	0,2479	24	0,0562	29
20	0,3430	28	-0,1522	28	0,1878	29	0,0576	28
21	0,4968	25	-0,0822	25	0,2605	23	0,0891	23
22	0,5064	24	-0,0890	26	0,2463	25	0,0883	24
23	0,8396	22	0,0679	20	0,3465	19	0,2151	22
24	0,8486	20	0,0516	21	0,3646	17	0,2676	19
25	0,9114	8	0,1712	6	0,3962	15	0,2713	18
26	0,8877	17	0,1528	9	0,4091	13	0,2932	15
27	0,8560	19	0,1196	17	0,3169	22	0,2265	21
28	0,9099	9	0,1213	15	0,4217	11	0,3513	11
29	0,8396	21	0,0190	22	0,3244	21	0,2446	20
30	0,9531	4	0,1809	4	0,4590	6	0,3759	10
31	0,8951	15	0,1208	16	0,3985	14	0,3073	14
32	0,8922	16	0,1218	14	0,3575	18	0,2827	17
33	0,8966	14	0,1226	13	0,4118	12	0,3126	13

5.3.5.2 Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 1. функцију циља

На бази добијених резултата из претходног поглавља који се односе на појединачно оцењивање и рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса обраде на основу четрнаест различитих метода, применом методологије интегралног оцењивања решења извршено је свеобухватно поређење и рангирање тридесет и три нивоа параметара према плану експеримента.

У циљу добијања свеобухватног коначног рангирања нивоа параметара технолошког процеса обраде танкозидних алуминијумских делова на бази резултата примене четрнаест вишекритеријумских метода (ВКО) тестирана је сагласност добијених вредности параметара корелације са постављеним граничним вредностима, на бази описане методологије у поглављу 5.3.2.

У табели 5.15 дат је преглед рангова алтернативних нивоа, вредности стандардне девијације по нивоима (σ_i), док су у доњем делу табеле дате вредности максималне стандардне девијације (σ_{max}) и просечне стандардне девијације (σ_{sr}), *Kendal*-ов коефицијент корелације (W) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације (R).

У табели 5.16 приказане су вредности *Spirman*-ов коефицијената корелације рангова алтернативних нивоа параметара свих примењених метода *ВКО* по паровима.

У посматраном случају након прве итерације је констатовано да се резултати добијени применом посматраних 14 метода не могу користити за интегрално рангирање алтернативних нивоа параметара јер нису задовољене граничне вредности првог задатог критеријума ($0,9 \leq R_i \leq 1$), односно постоји бар једна комбинација метода (овде и много више) чији је *Spirman*-ов коефицијент корелације R_i мањи од граничне вредности 0,9.

Сходно томе да у оквиру прве итерације нису остварени задати критеријуми морало се приступити другој итерацији која је приказана у наставку са одговарајућим резултатима.

Након анализе резултата у табели 5.16, закључено је да постоји група метода *ВКО* које задовољавају све постављене критеријуме, што је кроз примену друге итерације и доказано:

Друга итерација обухвата интегралну примену следећих 8 метода *ВКО*: *GRA*, *AHP*, *COPRAS*, *ARAS*, *WASPAS*, *OCRA*, *EDAS* и *SPW*. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара дати су у табели 5.17, а вредности *Spirman*-ов коефицијента корелације у табели 5.18.

Табела 5.15. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара примењених метода ВКО

Бр. Екс.	GRA	AHP	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	ARAS	WASPAS	VIKOR	OCRA	EDAS	MAVAC	SAW	SPW	σ - Станд. девијација
1	7	15	7	9	7	7	15	15	9	10	6	7	16	12	3,697
2	20	19	18	14	18	18	19	19	13	13	18	18	20	16	2,405
3	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	0,426
4	5	9	5	5	5	5	9	8	5	4	5	5	10	6	1,956
5	3	4	2	2	2	3	4	7	2	5	3	2	8	7	2,107
6	9	7	12	12	12	11	7	6	12	9	11	12	4	9	2,653
7	12	6	17	19	19	14	6	5	19	6	10	19	7	5	5,941
8	2	2	3	3	3	2	2	1	3	1	2	3	2	1	0,770
9	8	8	8	7	8	6	8	9	6	7	7	8	9	8	0,929
10	10	3	10	10	10	9	3	3	10	8	12	10	3	3	3,524
11	11	5	11	11	11	10	5	4	11	3	13	11	5	4	3,577
12	32	32	30	30	30	30	32	32	30	31	30	30	32	30	0,975
13	26	29	23	23	23	23	29	28	23	23	23	23	31	25	2,905
14	30	28	33	33	32	33	28	29	32	32	32	32	27	32	2,093
15	27	26	27	27	27	27	26	26	25	25	27	27	26	27	0,756
16	31	31	31	32	31	31	31	31	31	33	31	31	30	31	0,663
17	25	27	24	24	24	25	27	27	22	24	26	24	28	26	1,672
18	33	33	32	31	33	32	33	33	33	30	33	33	33	33	0,941
19	28	25	29	29	29	29	25	25	26	29	29	29	24	29	1,990
20	29	30	28	28	28	28	30	30	29	28	28	28	29	28	0,842
21	23	23	26	26	25	26	23	23	24	27	25	25	23	23	1,453
22	24	24	25	25	26	24	24	24	27	26	24	26	25	24	1,027
23	16	21	20	21	20	21	21	21	20	22	22	20	19	22	1,555
24	21	17	21	20	21	20	17	18	21	19	20	21	17	19	1,604
25	6	16	6	6	6	8	16	16	7	17	8	6	15	18	5,071
26	14	14	9	8	9	12	14	14	8	21	17	9	13	15	3,775
27	19	22	19	18	17	19	22	22	18	18	19	17	22	21	1,912
28	13	11	13	13	15	13	11	11	14	12	9	15	11	11	1,729
29	22	20	22	22	22	22	20	20	28	20	21	22	21	20	2,065
30	4	10	4	4	4	4	10	10	4	11	4	4	6	10	3,028
31	17	13	15	17	16	16	13	13	17	15	15	16	14	14	1,492
32	18	18	16	16	14	17	18	17	16	16	16	14	18	17	1,345
33	15	12	14	15	13	15	12	12	15	14	14	13	12	13	1,225
Максимална стандардна девијација σ_{max}=															5,941
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr}=															2,064
Kendal-ов коефицијент корелације W=															0,940
Просечан Spirtan-ов коефицијент корелације R=															0,935

Табела 5.16. Вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације рангова примењених метода ВКО

	<i>GRA</i>	<i>AHP</i>	<i>MOORA</i>	<i>TOPSIS</i>	<i>ROV</i>	<i>COPRAS</i>	<i>ARAS</i>	<i>WASPAS</i>	<i>VIKOR</i>	<i>OCRA</i>	<i>EADS</i>	<i>MABAC</i>	<i>SAW1</i>	<i>SPW1</i>
<i>GRA</i>	1,0000	0,9241	0,9789	0,9652	0,9729	0,9853	0,9241	0,9572	0,9572	0,9168	0,9796	0,9729	0,9211	0,9221
<i>AHP</i>		1,0000	0,8947	0,8820	0,8817	0,9205	1,0000	0,8733	0,8733	0,9459	0,9158	0,8817	0,9893	0,9121
<i>MOORA</i>			1,0000	0,9940	0,9963	0,9936	0,8947	0,9816	0,9816	0,9011	0,9733	0,9963	0,8837	0,9047
<i>TOPSIS</i>				1,0000	0,9923	0,9870	0,8820	0,9876	0,9876	0,8957	0,9602	0,9923	0,8707	0,8941
<i>ROV</i>					1,0000	0,9870	0,8817	0,9830	0,9830	0,8897	0,9629	1,0000	0,8723	0,8910
<i>COPRAS</i>						1,0000	0,9205	0,9739	0,9739	0,9328	0,9859	0,9870	0,9081	0,9345
<i>ARAS</i>							1,0000	0,8733	0,8733	0,9459	0,9158	0,8817	0,9893	0,9806
<i>WASPAS</i>								1,0000	0,9656	0,9502	0,9121	0,8753	0,9896	0,9856
<i>VIKOR</i>									1,0000	0,8830	0,9442	0,9830	0,8650	0,8814
<i>OCRA</i>										1,0000	0,9378	0,8897	0,9178	0,9756
<i>EADS</i>											1,0000	0,9629	0,8723	0,9622
<i>MABAC</i>												1,0000	0,8723	0,8910
<i>SAW1</i>													1,0000	0,9622
<i>SPW1</i>														1,0000

Друга итерација

Табела 5.17. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација

Бр. екс.	GRA	АНР	COPRAS	ARAS	WASPAS	OCRA	EDAS	SPW	Сред. вред. рангова	Ранг алтернативе	σ – Станд. девијација
1	7	15	7	15	15	10	6	12	10,88	11	3,9074
2	20	19	18	19	19	13	18	16	17,75	18	2,2520
3	1	1	1	1	2	2	1	2	1,38	1	0,5175
4	5	9	5	9	8	4	5	6	6,38	4	1,9955
5	3	4	3	4	7	5	3	7	4,50	3	1,6903
6	9	7	11	7	6	9	11	9	8,63	10	1,8468
7	12	6	14	6	5	6	10	5	8,00	9	3,5051
8	2	2	2	2	1	1	2	1	1,63	2	0,5175
9	8	8	6	8	9	7	7	8	7,63	7	0,9161
10	10	3	9	3	3	8	12	3	6,38	4	3,7773
11	11	5	10	5	4	3	13	4	6,88	6	3,8336
12	32	32	30	32	32	31	30	30	31,13	31	0,9910
13	26	29	23	29	28	23	23	25	25,75	25	2,6592
14	30	28	33	28	29	32	32	32	30,50	30	2,0000
15	27	26	27	26	26	25	27	27	26,38	27	0,7440
16	31	31	31	31	31	33	31	31	31,25	32	0,7071
17	25	27	25	27	27	24	26	26	25,88	26	1,1260
18	33	33	32	33	33	30	33	33	32,50	33	1,0690
19	28	25	29	25	25	29	29	29	27,38	28	1,9955
20	29	30	28	30	30	28	28	28	28,88	29	0,9910
21	23	23	26	23	23	27	25	23	24,13	23	1,6421
22	24	24	24	24	24	26	24	24	24,25	24	0,7071
23	16	21	21	21	21	22	22	22	20,75	22	1,9821
24	21	17	20	17	18	19	20	19	18,88	19	1,4577
25	6	16	8	16	16	17	8	18	13,13	13	4,8825
26	14	14	12	14	14	21	17	15	15,13	16	2,7484
27	19	22	19	22	22	18	19	21	20,25	20	1,6690
28	13	11	13	11	11	12	9	11	11,38	12	1,3025
29	22	20	22	20	20	20	21	20	20,63	21	0,9161
30	4	10	4	10	10	11	4	10	7,88	8	3,2266
31	17	13	16	13	13	15	15	14	14,50	15	1,5119
32	18	18	17	18	17	16	16	17	17,13	17	0,8345
33	15	12	15	12	12	14	14	13	13,38	14	1,3025
Максимална стандардна девијација σ_{max}=											4,8825
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr}=											1,8553
Kendal-ов коефицијент корелације W=											0,9547
Просечан Spearman-ов коефицијент корелације R=											0,9513

Табела 5.18. Вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације рангова - друга итерација

	<i>GRA</i>	<i>AHP</i>	<i>COP</i>	<i>ARAS</i>	<i>WAS</i>	<i>OCRA</i>	<i>EDAS</i>	<i>SPW</i>
<i>GRA</i>	1,0000	0,9241	0,9853	0,9241	0,9195	0,9168	0,9796	0,9221
<i>AHP</i>		1,0000	0,9205	1,0000	0,9967	0,9459	0,9158	0,9121
<i>COP</i>			1,0000	0,9205	0,9161	0,9328	0,9856	0,9345
<i>ARAS</i>				1,0000	0,9967	0,9459	0,9158	0,9806
<i>WAS</i>					1,0000	0,9502	0,9121	0,9856
<i>OCRA</i>						1,0000	0,9378	0,9756
<i>EDAS</i>							1,0000	0,9622
<i>SPW</i>								1,0000

На основу добијених резултата који су приказани у табелама 5.17 и 5.18, донесен је закључак да је за комбинацију *BKO* метода: *GRA*, *AHP*, *COPRAS*, *ARAS*, *WASPAS*, *OCRA*, *EDAS* и *SPW*:

1. **Задовољен први критеријум** – *Spirman*-ов коефицијент корелација рангова је за све комбинације метода у оквиру граничне вредности $0,9 \leq R_i \leq 1$ ($R_{\min} = 0,9121$).
2. **Задовољен други критеријум** – *Kendal*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq W$ ($W = 0,9547$) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq R$ ($R = 0,9513$) су у оквиру граничних вредности.
3. **Задовољен трећи критеријум**, просечна стандардна девијација је у оквиру граничне вредности $\sigma_{sr} \leq 1,5-2$ ($\sigma_{sr} = 1,8553$).

На основу претходне анализе оптимални ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса је дат у табели 5.17, а у табели 5.19 је приказано 5 најбоље ранжираних нивоа параметара са вредностима параметара обраде (*a*, *s* и стратегија обраде) и критеријума оптимизације (*T*, Δa , Δb , Δc и *Ra*).

Табела 5.19. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 1. функције циља

Бр. екс.	<i>a</i> (mm)	<i>s</i> (m/min)	Страт. обраде	<i>T</i> (min)	Δa (mm)	Δb (mm)	Δc (mm)	<i>Ra</i> (μm)	Ранг
3	0,65	321	Пут. 1	24,85	0,006	0,041	0,036	0,55	1
8	1,00	350	Пут 1	23,00	0,009	0,025	0,018	1,06	2
5	0,50	250	Пут 1	30,91	0,016	0,060	0,035	0,49	3
4	1,35	321	Пут 1	24,78	0,028	0,033	0,019	1,16	4
10	1,00	250	Пут 1	31,21	0,032	0,013	0,026	1,35	5

5.3.6 Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 2. функције циља

5.3.6.1 Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације

У табели 5.20 приказани су резултујући коефицијенти појединих метода ВКО на основу којих је извршено рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса.

Табела 5.20. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 2. функције циља

Бр. Екс.	Метода ВКО									
	GRA		AHP		MOORA		TOPSIS		ROV	
	GRG	Ранг	F_i	Ранг	Y_i	Ранг	$CCo(P_i)$	Ранг	U_i	Ранг
1	0,7203	6	0,0313	14	-0,0345	6	0,9623	5	0,4730	5
2	0,6427	22	0,0284	17	-0,0441	17	0,9443	13	0,4575	18
3	0,7560	1	0,1138	1	-0,0243	1	0,9805	1	0,4860	1
4	0,7011	8	0,0441	8	-0,0322	5	0,9600	6	0,4728	6
5	0,7414	3	0,0540	3	-0,0275	3	0,9762	2	0,4821	2
6	0,6741	14	0,0436	9	-0,0385	12	0,9456	12	0,4630	13
7	0,6746	13	0,0485	6	-0,0366	8	0,9534	8	0,4641	12
8	0,7288	5	0,0898	2	-0,0273	2	0,9664	3	0,4787	3
9	0,6738	15	0,0450	7	-0,0347	7	0,9584	7	0,4692	8
10	0,6695	17	0,0496	5	-0,0372	9	0,9495	10	0,4646	10
11	0,6661	19	0,0510	4	-0,0372	10	0,9489	11	0,4643	11
12	0,2569	32	0,0049	32	-0,3227	30	0,3651	31	0,2013	30
13	0,4049	28	0,0094	25	-0,1302	23	0,8025	23	0,3671	23
14	0,3145	30	0,0056	30	-0,3732	32	0,3603	32	0,1421	32
15	0,4189	26	0,0074	27	-0,1951	27	0,6814	25	0,3130	27
16	0,2719	31	0,0054	31	-0,4000	33	0,2164	33	0,1375	33
17	0,4084	27	0,0086	26	-0,1551	24	0,7547	24	0,3475	24
18	0,2446	33	0,0046	33	-0,3353	31	0,4872	29	0,1717	31
19	0,4395	25	0,0071	28	-0,2677	29	0,4681	30	0,2547	29
20	0,3426	29	0,0060	29	-0,2312	28	0,5638	28	0,2824	28
21	0,4462	24	0,0127	23	-0,1874	26	0,6387	27	0,3234	26
22	0,4482	23	0,0117	24	-0,1788	25	0,6612	26	0,3278	25
23	0,7167	7	0,0218	21	-0,0577	22	0,9105	22	0,4470	20
24	0,6495	21	0,0295	15	-0,0539	20	0,9188	20	0,4462	21
25	0,7454	2	0,0250	20	-0,0411	13	0,9427	14	0,4698	7
26	0,6795	9	0,0293	16	-0,0465	18	0,9254	19	0,4627	14
27	0,6678	18	0,0213	22	-0,0499	19	0,9328	18	0,4573	19
28	0,6780	11	0,0372	10	-0,0384	11	0,9527	9	0,4648	9
29	0,6525	20	0,0257	19	-0,0566	21	0,9131	21	0,4414	22
30	0,7311	4	0,0360	11	-0,0318	4	0,9643	4	0,4771	4
31	0,6760	12	0,0315	13	-0,0436	15	0,9402	17	0,4615	16
32	0,6733	16	0,0273	18	-0,0440	16	0,9412	15	0,4614	17
33	0,6786	10	0,0327	12	-0,0433	14	0,9410	16	0,4620	15

Табела 5.20. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 2. функције циљ - наставак

Бр. Екс.	Метода ВКО									
	COPRAS		ARAS		WASPAS		VIKOR		OCRA	
	U_j	Ранг	U_i %	Ранг	U_j %	Ранг	Q_i	Ранг	P_i	Ранг
1	69,0052	10	27,4986	14	0,2697	14	0,0443	6	145,0253	10
2	55,9535	13	24,9351	17	0,2479	17	0,0777	16	143,6389	13
3	100,000	1	100,000	1	0,6076	1	0,0000	1	147,9368	2
4	78,8214	4	38,7093	8	0,3591	9	0,0552	7	146,7862	5
5	86,9928	3	47,4291	3	0,3739	6	0,0143	2	146,9957	3
6	66,5377	11	38,3209	9	0,3671	7	0,0846	19	145,6123	9
7	71,7429	7	42,6043	6	0,4009	4	0,0682	11	146,7655	6
8	95,7607	2	78,8698	2	0,5854	2	0,0406	4	148,1988	1
9	72,6829	6	39,5424	7	0,3666	8	0,0579	8	146,6278	8
10	69,0782	9	43,5956	5	0,4021	3	0,0786	17	146,6333	7
11	69,2389	8	44,8402	4	0,4005	5	0,0804	18	146,9874	4
12	6,0960	30	4,3434	32	0,0438	32	0,7323	31	43,2209	32
13	16,2119	23	8,2778	25	0,0733	25	0,2714	23	127,6643	23
14	5,2832	32	4,9578	30	0,0503	30	0,7630	32	44,3971	31
15	10,2922	27	6,5141	27	0,0654	27	0,3808	25	102,2109	25
16	4,8822	33	4,7840	31	0,0481	31	1,0000	33	0,0000	33
17	13,1777	24	7,5910	26	0,0708	26	0,3195	24	119,3992	24
18	5,8934	31	4,0334	33	0,0392	33	0,7200	30	69,2314	29
19	7,3750	29	6,1972	28	0,0633	28	0,6107	29	59,7235	30
20	8,6823	28	5,2651	29	0,0546	29	0,5122	28	77,7145	28
21	10,8226	26	11,1947	23	0,1006	23	0,4120	27	87,1791	27
22	11,5000	25	10,2826	24	0,0945	24	0,3962	26	91,9030	26
23	39,3203	22	19,1927	21	0,1911	21	0,1193	21	137,3030	22
24	44,6214	20	25,9250	15	0,2520	16	0,1190	20	139,5983	20
25	54,1331	16	21,9804	20	0,2233	20	0,0426	5	140,2659	18
26	48,5669	18	25,7456	16	0,2537	15	0,0651	10	137,9621	21
27	44,9993	19	18,7438	22	0,1880	22	0,0768	15	140,2684	17
28	65,1730	12	32,6539	10	0,3219	10	0,0642	9	144,6110	11
29	42,8144	21	22,5719	19	0,2234	19	0,1442	22	139,8817	19
30	75,0021	5	31,6319	11	0,3191	11	0,0282	3	144,3101	12
31	54,5266	15	27,6368	13	0,2733	13	0,0706	13	141,5204	15
32	53,6560	17	23,9630	18	0,2412	18	0,0706	14	141,4993	16
33	54,7151	14	28,6923	12	0,2813	12	0,0698	12	141,6468	14

Табела 5.20. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 2. функције циљ - наставак

Бр. экс.	Метода ВКО							
	EDAS		MABAC		SAW		SPW	
	S _i	Ранг	S _i	Ранг	S _i	Ранг	S _i	Ранг
1	0,9531	8	0,1752	5	0,2968	16	0,2426	12
2	0,9140	15	0,1443	18	0,2801	18	0,2157	14
3	1,0000	1	0,2013	1	0,6480	1	0,5672	2
4	0,9689	4	0,1748	6	0,3753	9	0,3430	7
5	0,9827	3	0,1935	2	0,3880	8	0,3598	5
6	0,9462	12	0,1552	13	0,4251	6	0,3091	9
7	0,9659	5	0,1575	12	0,4329	4	0,3689	4
8	0,9949	2	0,1866	3	0,5910	2	0,5798	1
9	0,9566	7	0,1676	8	0,3926	7	0,3405	8
10	0,9501	10	0,1584	10	0,4453	3	0,3589	6
11	0,9513	9	0,1578	11	0,4275	5	0,3736	3
12	0,1418	30	-0,3682	30	0,0696	32	0,0181	31
13	0,5815	23	-0,0366	23	0,0905	28	0,0561	23
14	0,0700	32	-0,4865	32	0,0843	29	0,0162	32
15	0,3715	27	-0,1448	27	0,0996	26	0,0312	27
16	0,0152	33	-0,4959	33	0,0805	31	0,0158	33
17	0,5122	24	-0,0759	24	0,0972	27	0,0445	24
18	0,1192	31	-0,4273	31	0,0595	33	0,0190	30
19	0,2474	29	-0,2614	29	0,1044	25	0,0223	29
20	0,3085	28	-0,2059	28	0,0839	30	0,0253	28
21	0,4568	26	-0,1241	26	0,1599	23	0,0413	26
22	0,4718	25	-0,1152	25	0,1473	24	0,0418	25
23	0,8485	22	0,1233	20	0,2470	21	0,1352	22
24	0,8826	18	0,1215	21	0,3167	15	0,1872	17
25	0,9034	17	0,1688	7	0,2787	19	0,1678	20
26	0,8786	20	0,1546	14	0,3263	14	0,1810	18
27	0,8696	21	0,1438	19	0,2272	22	0,1489	21
28	0,9480	11	0,1589	9	0,3717	11	0,2721	10
29	0,8823	19	0,1121	22	0,2730	20	0,1737	19
30	0,9615	6	0,1833	4	0,3719	10	0,2664	11
31	0,9143	14	0,1521	16	0,3343	13	0,2124	15
32	0,9108	16	0,1521	17	0,2881	17	0,1942	16
33	0,9150	13	0,1532	15	0,3464	12	0,2161	13

5.3.6.2 Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 2 функцију циља

На основу добијених резултата из претходног поглавља који се односе на појединачно оцењивање и рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса обраде помоћу четрнаест различитих метода ВКО, применом методологије интегралног оцењивања решења извршено је свеобухватно поређење и рангирање тридесет и три нивоа параметара према плану експеримента.

У циљу добијања свеобухватног коначног рангирања нивоа параметара технолошког процеса обраде танкозидних алуминијумских делова на бази резултата примене четрнаест вишекритеријумских метода тестирана је сагласност добијених вредности параметара корелације са постављеним граничним вредностима.

У табели 5.21 дат је преглед рангова алтернативних нивоа, вредности стандардне девијације по нивоима (σ_i), док су у доњем делу табеле дате вредности максималне стандардне девијације (σ_{max}) и просечне стандардне девијације (σ_{sr}), *Kendal*-ов коефицијент корелације (W) и просечан *Spirman*-ових коефицијент корелације (R).

У табели 5.22 приказане су вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације рангова алтернативних нивоа параметара свих примењених метода ВКО по паровима.

У посматраном случају након прве итерације је констатовано да се резултати добијени применом посматраних 14 метода ВКО не могу користити за интегрално рангирање алтернативних нивоа параметара јер нису задовољене граничне вредности првог задатог критеријума ($0,9 \leq R_i \leq 1$), односно постоји бар једна комбинација метода (овде и више) чији је *Spirman*-ов коефицијент корелације R_i мањи од граничне вредности 0,9.

Како у оквиру прве итерације нису остварени задати критеријуми морало се приступити другој итерацији која је приказана у наставку са одговарајућим резултатима.

Након анализе резултата у табели 5.22, закључено је да постоји група метода ВКО које задовољавају све постављене критеријуме, што је кроз примену друге итерације и доказано.

Друга итерација обухвата интегралну примену следећих 10 метода ВКО: *AHP*, *MOORA*, *TOPSIS*, *ROV*, *COPRAS*, *ARAS*, *OCRA*, *EDAS*, *MABAC* и *SPW*. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара дати су у табели 5.23, а вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације у табели 5.24.

Табела 5.21. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара примењених метода ВКО

Бр. Екс.	GRA	AHP	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	ARAS	WASPAS	VIKOR	OCRA	EDAS	MAVAC	SAW	SPW	σ - Стандардна девијација
1	6	14	6	5	5	10	14	14	6	10	8	5	16	12	4,012
2	22	17	17	13	18	13	17	17	16	13	15	18	18	14	2,525
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	0,363
4	8	8	5	6	6	4	8	9	7	5	4	6	9	7	1,697
5	3	3	3	2	2	3	3	6	2	3	3	2	8	5	1,742
6	14	9	12	12	13	11	9	7	19	9	12	13	6	9	3,293
7	13	6	8	8	12	7	6	4	11	6	5	12	4	4	3,204
8	5	2	2	3	3	2	2	2	4	1	2	3	2	1	1,089
9	15	7	7	7	8	6	7	8	8	8	7	8	7	8	2,129
10	17	5	9	10	10	9	5	3	17	7	10	10	3	6	4,361
11	19	4	10	11	11	8	4	5	18	4	9	11	5	3	5,090
12	32	32	30	31	30	30	32	32	31	32	30	30	32	31	0,917
13	28	25	23	23	23	23	25	25	23	23	23	23	28	23	1,834
14	30	30	32	32	32	32	30	30	32	31	32	32	29	32	1,099
15	26	27	27	25	27	27	27	27	25	25	27	27	26	27	0,852
16	31	31	33	33	33	33	31	31	33	33	33	33	31	33	0,994
17	27	26	24	24	24	24	26	26	24	24	24	24	27	24	1,231
18	33	33	31	29	31	31	33	33	30	29	31	31	33	30	1,490
19	25	28	29	30	29	29	28	28	29	30	29	29	25	29	1,550
20	29	29	28	28	28	28	29	29	28	28	28	28	30	28	0,646
21	24	23	26	27	26	26	23	23	27	27	26	26	23	26	1,626
22	23	24	25	26	25	25	24	24	26	26	25	25	24	25	0,893
23	7	21	22	22	20	22	21	21	21	22	22	20	21	22	3,891
24	21	15	20	20	21	20	15	16	20	20	18	21	15	17	2,410
25	2	20	13	14	7	16	20	20	5	18	17	7	19	20	6,335
26	9	16	18	19	14	18	16	15	10	21	20	14	14	18	3,505
27	18	22	19	18	19	19	22	22	15	17	21	19	22	21	2,174
28	11	10	11	9	9	12	10	10	9	11	11	9	11	10	0,975
29	20	19	21	21	22	21	19	19	22	19	19	22	20	19	1,251
30	4	11	4	4	4	5	11	11	3	12	6	4	10	11	3,549
31	12	13	15	17	16	15	13	13	13	15	14	16	13	15	1,490
32	16	18	16	15	17	17	18	18	14	16	16	17	17	16	1,160
33	10	12	14	16	15	14	12	12	12	14	13	15	12	13	1,610
Максимална стандардна девијација σ_{max}=															5,941
Средња вредност стандардне девијације σ_{st}=															2,064
Kendal-ов коефицијент корелације W=															0,933
Просечан Spirtan-ов коефицијент корелације R=															0,928

Табела 5.22. Вредности Spirtan-ових коефицијената корелације рангова примењених метода ВКО

	GRA	AHP	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	ARAS	WASPAS	VIKOR	OCRA	EADS	MABAC	SAW1	SPW1
GRA	1,0000	0,7814	0,8643	0,8432	0,9104	0,8259	0,7814	0,7731	0,9265	0,7680	0,8259	0,9104	0,7727	0,7567
AHP		1,0000	0,9452	0,9275	0,9084	0,9616	1,0000	0,9957	0,8305	0,9666	0,9632	0,9084	0,9866	0,9860
MOORA			1,0000	0,9916	0,9850	0,9913	0,9452	0,9957	0,9385	0,9649	0,9903	0,9850	0,9208	0,9569
TOPSIS				1,0000	0,9763	0,9860	0,9275	0,9178	0,9368	0,9652	0,9836	0,9763	0,8977	0,9495
ROV					1,0000	0,9642	0,9084	0,8977	0,9639	0,9261	0,9569	1,0000	0,8824	0,9138
COPRAS						1,0000	0,9616	0,9532	0,9118	0,9799	0,9936	0,9642	0,9378	0,9753
ARAS							1,0000	0,9957	0,8305	0,9666	0,9936	0,9084	0,9866	0,9860
WASPAS								1,0000	0,8155	0,9602	0,9542	0,8977	0,9933	0,9840
VIKOR									1,0000	0,8553	0,9071	0,9639	0,8025	0,8366
OCRA										1,0000	0,9779	0,9261	0,9402	0,9883
EADS											1,0000	0,9569	0,8824	0,9682
MABAC												1,0000	0,8824	0,9138
SAW1													1,0000	0,9682
SPW1														1,0000

Друга итерација

Табела 5.23. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација

Бр. Екс.	AHP	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	ARAS	OCRA	EDAS	MAVAC	SPW	Сред. вред. рангова	Ранг алтернатив	σ Станд. девијације
1	14	6	5	5	10	14	10	8	5	12	8,90	10	3,6347
2	17	17	13	18	13	17	13	15	18	14	15,50	16	2,1213
3	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1,20	1	0,4216
4	8	5	6	6	4	8	5	4	6	7	5,90	4	1,4491
5	3	3	2	2	3	3	3	3	2	5	2,90	3	0,8756
6	9	12	12	13	11	9	9	12	13	9	10,90	12	1,7288
7	6	8	8	12	7	6	6	5	12	4	7,40	7	2,7162
8	2	2	3	3	2	2	1	2	3	1	2,10	2	0,7379
9	7	7	7	8	6	7	8	7	8	8	7,30	6	0,6749
10	5	9	10	10	9	5	7	10	10	6	8,10	9	2,1318
11	4	10	11	11	8	4	4	9	11	3	7,50	8	3,3747
12	32	30	31	30	30	32	32	30	30	31	30,80	30	0,9189
13	25	23	23	23	23	25	23	23	23	23	23,40	23	0,8433
14	30	32	32	32	32	30	31	32	32	32	31,50	32	0,8498
15	27	27	25	27	27	27	25	27	27	27	26,60	27	0,8433
16	31	33	33	33	33	31	33	33	33	33	32,60	33	0,8433
17	26	24	24	24	24	26	24	24	24	24	24,40	24	0,8433
18	33	31	29	31	31	33	29	31	31	30	30,90	31	1,3703
19	28	29	30	29	29	28	30	29	29	29	29,00	29	0,6667
20	29	28	28	28	28	29	28	28	28	28	28,20	28	0,4216
21	23	26	27	26	26	23	27	26	26	26	25,60	26	1,4298
22	24	25	26	25	25	24	26	25	25	25	25,00	25	0,6667
23	21	22	22	20	22	21	22	22	20	22	21,40	22	0,8433
24	15	20	20	21	20	15	20	18	21	17	18,70	19	2,3118
25	20	13	14	7	16	20	18	17	7	20	15,20	15	4,9621
26	16	18	19	14	18	16	21	20	14	18	17,40	18	2,3664
27	22	19	18	19	19	22	17	21	19	21	19,70	20	1,7029
28	10	11	9	9	12	10	11	11	9	10	10,20	11	1,0328
29	19	21	21	22	21	19	19	19	22	19	20,20	21	1,3166
30	11	4	4	4	5	11	12	6	4	11	7,20	5	3,5528
31	13	15	17	16	15	13	15	14	16	15	14,90	14	1,2867
32	18	16	15	17	17	18	16	16	17	16	16,60	17	0,9661
33	12	14	16	15	14	12	14	13	15	13	13,80	13	1,3166
Максимална стандардна девијација σ_{max}=													4,9621
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr}=													1,5522
Kendal-ов коефицијент корелације W=													0,9650
Просечан Spearman-ов коефицијент корелације R=													0,9623

Табела 5.24. Вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације рангова – друга итерација

	<i>AHP</i>	<i>MOOR</i>	<i>TOP</i>	<i>ROV</i>	<i>COP</i>	<i>ARAS</i>	<i>OCRA</i>	<i>EDAS</i>	<i>MAB</i>	<i>SPW</i>
<i>AHP</i>	1,000	0,9452	0,9275	0,9084	0,9616	1,000	0,966	0,9632	0,9084	0,9860
<i>MOOR</i>		1,000	0,9916	0,9850	0,9913	0,9452	0,9649	0,9903	0,9850	0,9569
<i>TOP</i>			1,000	0,9763	0,9860	0,9275	0,9652	0,9836	0,9763	0,9495
<i>ROV</i>				1,000	0,9642	0,9084	0,9261	0,9569	1,000	0,9138
<i>COP</i>					1,000	0,9616	0,9799	0,9936	0,9642	0,9753
<i>ARAS</i>						1,000	0,9666	0,9632	0,9084	0,9860
<i>OCRA</i>							1,000	0,9779	0,9261	0,9883
<i>EDAS</i>								1,000	0,9569	0,9682
<i>MAB</i>									1,000	0,9138
<i>SPW</i>										1,000

На основу добијених резултата који су приказани у табелама 5.23 и 5.24, донесен је закључак да комбинација 10 метода *BKO*: *AHP*, *MOORA*, *TOPSIS*, *ROV*, *COPRAS*, *ARAS*, *OCRA*, *EDAS*, *MABAC* и *SPW*:

1. **Задовољен први критеријум** – *Spirman*-ов коефицијент корелација рангова је за све комбинације метода у оквиру граничне вредности $0,9 \leq R_i \leq 1$ ($R_{\min} = 0,9084$).
2. **Задовољен други критеријум** – *Kendal*-ов коефицијент корелације ($W = 0,9650$) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq R$ ($R = 0,9623$) су у оквиру граничних вредности.
3. **Задовољен трећи критеријум**, просечна стандардна девијација је у оквиру граничне вредности $\sigma_{sr} \leq 1,5-2$ ($\sigma_{sr} = 1,5522$).

На основу претходног закључка оптимални ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса је дат у табели 5.23, а у табели 5.25 је приказано 5 најбоље ранжираних нивоа параметара са вредностима параметара обраде (a , s и стратегијом обраде) и критеријума оптимизације (T , Δa , Δb , Δc и Ra).

Табела 5.25. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 2. функције циља

Бр. Екс.	a (mm)	s (m/min)	Страт. обраде	T (min)	Δa (mm)	Δb (mm)	Δc (mm)	Ra (μm)	Ранг
3	0,65	321	Пут. 1	24,85	0,006	0,041	0,036	0,55	1
8	1,00	350	Пут. 1	23,00	0,009	0,025	0,018	1,06	2
5	0,50	250	Пут. 1	30,91	0,016	0,060	0,035	0,49	3
4	1,35	321	Пут. 1	24,78	0,028	0,033	0,019	1,16	4
30	1,00	350	Пут. 3	35,46	0,070	0,029	0,018	0,56	5

5.3.7 Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 3. функције циља

5.3.7.1 Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације

У табели 5.26 приказани су резултујући коефицијенти примене појединих метода ВКО на основу којих је извршено рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса.

Табела 5.26. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 3. функције циља

Бр. екс.	Метода ВКО									
	GRA		AHP		MOORA		TOPSIS		ROV	
	GRG	Ранг	F_i	Ранг	Y_i	Ранг	$CCo(P_i)$	Ранг	U_i	Ранг
1	0,7534	8	0,0303	11	-0,1057	12	0,7346	15	0,3946	12
2	0,6891	18	0,0250	22	-0,1193	13	0,7210	16	0,3721	15
3	0,8136	1	0,0734	1	-0,0670	1	0,9089	1	0,4615	1
4	0,7719	5	0,0392	4	-0,0788	3	0,8818	3	0,4418	3
5	0,7878	4	0,0443	3	-0,0795	4	0,8475	4	0,4399	4
6	0,7546	7	0,0348	8	-0,0975	9	0,8152	8	0,4094	10
7	0,7419	11	0,0328	10	-0,1284	19	0,6642	26	0,3525	23
8	0,8079	2	0,0610	2	-0,0718	2	0,9026	2	0,4529	2
9	0,7435	10	0,0361	7	-0,0920	6	0,8277	5	0,4185	6
10	0,7439	9	0,0375	6	-0,0963	7	0,8177	6	0,4112	7
11	0,7381	12	0,0382	5	-0,0965	8	0,8169	7	0,4106	9
12	0,2708	32	0,0173	32	-0,2297	30	0,5572	29	0,2809	29
13	0,4070	26	0,0193	31	-0,1479	21	0,7385	14	0,3494	25
14	0,2997	30	0,0262	19	-0,2387	31	0,5887	27	0,2788	30
15	0,3803	27	0,0278	16	-0,1490	22	0,7540	13	0,3739	14
16	0,2863	31	0,0220	29	-0,2508	33	0,5144	32	0,2765	31
17	0,4075	25	0,0242	26	-0,1391	20	0,7745	10	0,3754	13
18	0,2614	33	0,0150	33	-0,2487	32	0,5591	28	0,2426	32
19	0,3536	28	0,0303	12	-0,1779	27	0,6652	25	0,3544	22
20	0,3321	29	0,0223	28	-0,1790	28	0,6733	20	0,3364	26
21	0,4513	23	0,0252	21	-0,1576	23	0,7105	17	0,3582	21
22	0,4453	24	0,0246	23	-0,1589	24	0,7050	18	0,3517	24
23	0,6872	19	0,0243	25	-0,1658	25	0,5359	31	0,2939	27
24	0,6776	20	0,0229	27	-0,1684	26	0,5386	30	0,2868	28
25	0,7560	6	0,0303	13	-0,0986	10	0,7718	11	0,4108	8
26	0,7273	14	0,0286	15	-0,1044	11	0,7688	12	0,4021	11
27	0,6702	21	0,0245	24	-0,1261	18	0,6700	24	0,3632	17
28	0,7368	13	0,0288	14	-0,1232	14	0,6813	19	0,3633	16
29	0,6634	22	0,0210	30	-0,1930	29	0,4797	33	0,2426	33
30	0,7940	3	0,0334	9	-0,0914	5	0,8002	9	0,4199	5
31	0,7194	16	0,0268	18	-0,1260	17	0,6708	23	0,3607	20
32	0,7070	17	0,0253	20	-0,1256	16	0,6714	21	0,3617	18
33	0,7204	15	0,0275	17	-0,1255	15	0,6713	22	0,3617	19

Табела 5.26. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 3. функције циља - наставак

Бр. экс.	Метода ВКО									
	COPRAS		ARAS		WASPAS		VIKOR		OCRA	
	U_j	Ранг	U_i %	Ранг	U_j %	Ранг	Q_i	Ранг	P_i	Ранг
1	63,5437	11	41,3026	11	0,3700	11	0,3238	16	63,8177	10
2	56,1210	13	34,0928	22	0,3138	19	0,3751	19	62,9811	13
3	100,000	1	100,000	1	0,6490	1	0,0161	1	65,5688	1
4	84,8343	3	53,3872	4	0,4813	4	0,0605	3	64,8583	4
5	84,3311	4	60,2687	3	0,4890	3	0,1181	4	65,0142	3
6	68,7494	9	47,3579	8	0,4201	8	0,1894	8	64,0841	9
7	53,1341	17	44,6270	10	0,3662	12	0,4867	26	64,2163	8
8	93,8778	2	83,1134	2	0,6153	2	0,0196	2	65,5609	2
9	72,9327	6	49,1443	7	0,4317	7	0,1695	5	64,6269	6
10	69,7627	7	51,0669	6	0,4390	5	0,1862	6	64,5542	7
11	69,6076	8	51,9896	5	0,4389	6	0,1876	7	64,7075	5
12	22,8473	30	23,5675	32	0,1987	32	0,4885	27	19,0141	32
13	40,2819	21	26,2698	31	0,2378	31	0,3425	17	56,1710	23
14	21,4226	32	35,7269	19	0,2864	24	0,5616	28	19,8561	31
15	36,2733	24	37,8471	16	0,3203	18	0,2756	13	45,4358	25
16	20,1065	33	29,9973	29	0,2441	29	0,5668	29	0,0000	33
17	40,5923	20	32,9869	26	0,2901	23	0,2691	12	52,9016	24
18	21,4407	31	20,4064	33	0,1747	33	0,6213	30	30,7151	29
19	29,0080	29	41,2412	12	0,3362	15	0,3211	15	26,5761	30
20	30,2058	28	30,3180	28	0,2576	28	0,3829	20	34,2026	28
21	35,1019	26	34,3419	21	0,2914	22	0,3192	14	38,4748	27
22	35,3996	25	33,4499	23	0,2862	25	0,3619	18	40,3977	26
23	40,1117	22	33,1368	25	0,2781	26	0,7810	31	59,7339	22
24	39,9521	23	31,1431	27	0,2664	27	0,7880	32	60,6154	20
25	66,4023	10	41,1910	13	0,3721	10	0,2479	10	61,8568	17
26	62,5129	12	38,9344	15	0,3536	13	0,2647	11	60,7343	19
27	52,2113	19	33,3013	24	0,2995	21	0,4556	22	61,5342	18
28	54,9024	14	39,1519	14	0,3439	14	0,4440	21	63,3605	12
29	35,0354	27	28,5305	30	0,2431	30	1,0000	33	60,4415	21
30	73,2034	5	45,5020	9	0,4163	9	0,2032	9	63,6574	11
31	53,0719	18	36,4295	18	0,3235	17	0,4595	25	61,9981	16
32	53,1670	16	34,4285	20	0,3115	20	0,4574	23	62,0067	15
33	53,2897	15	37,4034	17	0,3293	16	0,4574	24	62,0639	14

Табела 5.26. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 3. функције циља - наставак

Бр. Екс.	Метода ВКО							
	EDAS		MABAC		SAW		SPW	
	S_i	Ранг	S_i	Ранг	S_i	Ранг	S_i	Ранг
1	0,8192	10	0,0830	12	0,3959	17	0,3442	11
2	0,7391	18	0,0379	15	0,3339	28	0,2937	15
3	1,0000	1	0,2168	1	0,6675	1	0,6305	1
4	0,9312	3	0,1774	3	0,5024	5	0,4602	4
5	0,9285	4	0,1736	4	0,5035	4	0,4744	3
6	0,8322	9	0,1127	10	0,4538	9	0,3864	8
7	0,7518	14	-0,0012	23	0,3802	19	0,3521	10
8	0,9749	2	0,1996	2	0,6244	2	0,6061	2
9	0,8572	6	0,1309	6	0,4485	11	0,4149	6
10	0,8363	8	0,1162	7	0,4635	7	0,4146	7
11	0,8364	7	0,1150	9	0,4560	8	0,4218	5
12	0,1938	31	-0,1443	29	0,2891	31	0,1083	32
13	0,5592	24	-0,0074	25	0,2990	30	0,1766	24
14	0,2319	30	-0,1486	30	0,4484	12	0,1243	30
15	0,5452	25	0,0417	14	0,4669	6	0,1737	26
16	0,1508	32	-0,1532	31	0,3732	21	0,1150	31
17	0,6040	22	0,0447	13	0,3938	18	0,1863	23
18	0,1144	33	-0,2209	32	0,2477	33	0,1016	33
19	0,4456	28	0,0026	22	0,5155	3	0,1570	28
20	0,4229	29	-0,0333	26	0,3750	20	0,1402	29
21	0,5340	27	0,0103	21	0,4086	14	0,1743	25
22	0,5365	26	-0,0027	24	0,4003	16	0,1720	27
23	0,6395	20	-0,1184	27	0,3346	27	0,2215	21
24	0,6285	21	-0,1326	28	0,2998	29	0,2330	20
25	0,8157	11	0,1155	8	0,4293	13	0,3149	13
26	0,7773	12	0,0981	11	0,4025	15	0,3046	14
27	0,7339	19	0,0203	17	0,3396	26	0,2594	19
28	0,7613	13	0,0205	16	0,3680	22	0,3197	12
29	0,5784	23	-0,2209	33	0,2733	32	0,2130	22
30	0,8591	5	0,1337	5	0,4511	10	0,3815	9
31	0,7445	17	0,0153	20	0,3579	24	0,2892	17
32	0,7458	16	0,0172	18	0,3424	25	0,2806	18
33	0,7474	15	0,0171	19	0,3658	23	0,2928	16

5.3.7.2 Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 3 функцију циља

На основу добијених резултата из претходног поглавља који се односе на појединачно оцењивање и рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса обраде помоћу четрнаест различитих метода *ВКО*, применом методологије интегралног оцењивања решења извршено је свеобухватно поређење и рангирање тридесет и три нивоа параметара према плану експеримента.

У циљу добијања свеобухватног коначног рангирања нивоа параметара технолошког процеса обраде танкозидних алуминијумских делова на бази резултата примене четрнаест вишекритеријумских метода тестирана је сагласност добијених вредности параметара корелације са постављеним граничним вредностима.

У табели 5.27 дат је преглед рангова алтернативних нивоа, вредности стандардне девијације по нивоима (σ_i), док су у доњем делу табеле дате вредности максималне стандардне девијације (σ_{max}) и просечне стандардне девијације (σ_{sr}), *Kendal*-ов коефицијент корелације (W) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације (R).

У табели 5.28 приказане су вредности *Spirman*-ов коефицијената корелације рангова алтернативних нивоа параметара свих примењених метода *ВКО* по паровима.

У посматраном случају након прве итерације је констатовано да се резултати добијени применом посматраних 14 метода *ВКО* не могу користити за интегрално рангирање алтернативних нивоа параметара јер нису задовољене граничне вредности првог задатог критеријума ($0,9 \leq R_i \leq 1$), односно постоји бар једна комбинација метода (овде и знатно више) чији је *Spirman*-ов коефицијент корелације R_i мањи од граничне вредности 0,9.

Како у оквиру прве итерације нису остварени задати критеријуми морало се приступити другој итерацији која је приказана у наставку са одговарајућим резултатима.

Након анализе резултата у табели 5.28, закључено је да постоји група метода *ВКО* које задовољавају све постављене критеријуме, што је кроз примену друге итерације и доказано:.

Друга итерација обухвата интегралну примену следећих пет *ВКО* метода: *MOORA*, *ROV*, *COPRAS*, *WASPAS* и *MAVAC*. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара дати су у табели 5.29, а вредности *Spirman*-ов коефицијената корелације у табели 5.30.

Табела 5.27. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара примењених метода ВКО

Бр. Екс.	GRA	AHP	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	ARAS	WASPAS	VIKOR	OCRA	EDAS	MAVAC	SAW	SPW	σ – Стандардна девијација
1	8	11	12	15	12	11	11	11	16	10	10	12	17	11	2,464
2	18	22	13	16	15	13	22	19	19	13	18	15	28	15	4,274
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,000
4	5	4	3	3	3	3	4	4	3	4	3	3	5	4	0,745
5	4	3	4	4	4	4	3	3	4	3	4	4	4	4	0,497
6	7	8	9	8	10	9	8	8	8	9	9	10	9	8	0,852
7	11	10	19	26	23	17	10	12	26	8	14	23	19	10	6,402
8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0,000
9	10	7	6	5	6	6	7	7	5	6	6	6	11	6	1,729
10	9	6	7	6	7	7	6	5	6	7	8	7	7	7	0,975
11	12	5	8	7	9	8	5	6	7	5	7	9	8	5	2,007
12	32	32	30	29	29	30	32	32	27	32	31	29	31	32	1,604
13	26	31	21	14	25	21	31	31	17	23	24	25	30	24	5,215
14	30	19	31	27	30	32	19	24	28	31	30	30	12	30	5,969
15	27	16	22	13	14	24	16	18	13	25	25	14	6	26	6,358
16	31	29	33	32	31	33	29	29	29	33	32	31	21	31	3,074
17	25	26	20	10	13	20	26	23	12	24	22	13	18	23	5,542
18	33	33	32	28	32	31	33	33	30	29	33	32	33	33	1,672
19	28	12	27	25	22	29	12	15	15	30	28	22	3	28	8,338
20	29	28	28	20	26	28	28	28	20	28	29	26	20	29	3,490
21	23	21	23	17	21	26	21	22	14	27	27	21	14	25	4,219
22	24	23	24	18	24	25	23	25	18	26	26	24	16	27	3,339
23	19	25	25	31	27	22	25	26	31	22	20	27	27	21	3,718
24	20	27	26	30	28	23	27	27	32	20	21	28	29	20	4,033
25	6	13	10	11	8	10	13	10	10	17	11	8	13	13	2,759
26	14	15	11	12	11	12	15	13	11	19	12	11	15	14	2,293
27	21	24	18	24	17	19	24	21	22	18	19	17	26	19	2,951
28	13	14	14	19	16	14	14	14	21	12	13	16	22	12	3,197
29	22	30	29	33	33	27	30	30	33	21	23	33	32	22	4,586
30	3	9	5	9	5	5	9	9	9	11	5	5	10	9	2,530
31	16	18	17	23	20	18	18	17	25	16	17	20	24	17	2,987
32	17	20	16	21	18	16	20	20	23	15	16	18	25	18	2,887
33	15	17	15	22	19	15	17	16	24	14	15	19	23	16	3,272
Максимална стандардна девијација σ_{max}=															8,338
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr}=															3,151
Kendal-ов коефицијент корелације W=															0,860
Просечан Spirtan-ов коефицијент корелације R=															0,850

Табела 5.28. Вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације рангова примењених метода ВКО

	GRA	AHP	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	ARAS	WASPAS	VIKOR	OCRA	EADS	MABAC	SAW1	SPW1
GRA	1,0000	0,8509	0,9355	0,8483	0,8483	0,9535	0,8509	0,8957	0,5755	0,9318	0,9759	0,8483	0,5498	0,9649
AHP		1,0000	0,8590	0,7667	0,8616	0,8382	1,0000	0,9846	0,7965	0,8269	0,8646	0,8616	0,8526	0,8683
MOORA			1,0000	0,8777	0,9579	0,9916	0,8590	0,9184	0,7965	0,9211	0,9676	0,9579	0,6146	0,9495
TOPSIS				1,0000	0,9308	0,8399	0,7667	0,8072	0,9706	0,7132	0,7747	0,9308	0,7420	0,7523
ROV					1,0000	0,9298	0,8616	0,9718	0,9198	0,8145	0,8924	1,0000	0,7393	0,8620
COPRAS						1,0000	0,8382	0,9001	0,7838	0,9472	0,9846	0,9298	0,5588	0,9693
ARAS							1,0000	0,9846	0,7965	0,8269	0,8646	0,8616	0,8526	0,8683
WASPAS								1,0000	0,7965	0,8690	0,9128	0,8616	0,8061	0,9128
VIKOR									1,0000	0,6441	0,7279	0,9198	0,8336	0,7052
OCRA										1,0000	0,9612	0,8145	0,4769	0,9823
EADS											1,0000	0,8145	0,7393	0,5535
MABAC												1,0000	0,7393	0,8620
SAW1													1,0000	0,8835
SPW1														1,0000

Друга итерација

Табела 5.29. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација

Бр. Екс.	MOORA	ROV	COPRAS	WASPAS	MAVAC	Сред. вред. рангова	Ранг алтернатив	σ Стандардна. девијације
1	12	12	11	11	12	11,60	11	0,5477
2	13	15	13	19	15	15,00	14	2,4495
3	1	1	1	1	1	1,00	1	0,0000
4	3	3	3	4	3	3,20	3	0,4472
5	4	4	4	3	4	3,80	4	0,4472
6	9	10	9	8	10	9,20	9	0,8367
7	19	23	17	12	23	18,80	21	4,6043
8	2	2	2	2	2	2,00	2	0,0000
9	6	6	6	7	6	6,20	6	0,4472
10	7	7	7	5	7	6,60	7	0,8944
11	8	9	8	6	9	8,00	8	1,2247
12	30	29	30	32	29	30,00	30	1,2247
13	21	25	21	31	25	24,60	25	4,0988
14	31	30	32	24	30	29,40	29	3,1305
15	22	14	24	18	14	18,40	18	4,5607
16	33	31	33	29	31	31,40	32	1,6733
17	20	13	20	23	13	17,80	17	4,5497
18	32	32	31	33	32	32,00	33	0,7071
19	27	22	29	15	22	23,00	23	5,4314
20	28	26	28	28	26	27,20	28	1,0954
21	23	21	26	22	21	22,60	22	2,0736
22	24	24	25	25	24	24,40	24	0,5477
23	25	27	22	26	27	25,40	26	2,0736
24	26	28	23	27	28	26,40	27	2,0736
25	10	8	10	10	8	9,20	9	1,0954
26	11	11	12	13	11	11,60	11	0,8944
27	18	17	19	21	17	18,40	18	1,6733
28	14	16	14	14	16	14,80	13	1,0954
29	29	33	27	30	33	30,40	31	2,6077
30	5	5	5	9	5	5,80	5	1,7889
31	17	20	18	17	20	18,40	18	1,5166
32	16	18	16	20	18	17,60	16	1,6733
33	15	19	15	16	19	16,80	15	2,0494
Максимална стандардна девијација σ_{max}=								5,4314
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr}=								1,8041
Kendal-ов коефицијент корелације W=								0,9537
Просечан Spearman-ов коефицијент корелације R=								0,9502

Табела 5.30. Вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације рангова – друга итерација

	MOORA	ROV	COPRAS	WASPAS	MABAC
MOORA	1,0000	0,9579	0,9916	0,9184	0,9579
ROV		1,0000	0,9298	0,9178	1,0000
COPRAS			1,0000	0,9001	0,9298
WASPAS				1,0000	0,9178
MABAC					1,0000

На основу добијених резултата који су приказани у табелама 5.29 и 5.30, закључено је да комбинација пет *BKO* метода *MOORA*, *ROV*, *COPRAS*, *WASPAS* и *MABAC*:

1. **Задовољен први критеријум** – *Spirman*-ов коефицијент корелација рангова је за све комбинације метода у оквиру граничне вредности $0,9 \leq R_i \leq 1$ ($R_{\min}=0,9001$).
2. **Задовољен други критеријум** – *Kendal*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq W$ ($W=0,9537$) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq R$ ($R=0,9502$) су у оквиру граничних вредности.
3. **Задовољен трећи критеријум**, просечна стандардна девијација је у оквиру граничне вредности $\sigma_{sr} \leq 1,5-2$ ($\sigma_{sr}=1,8041$).

На основу претходне анализе параметара корелације оптимални ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса је дат у табели 5.29, а у табели 5.31 је приказано 5 најбоље ранжираних нивоа параметара са вредностима параметара обраде (a , s и стратегијом обраде) и критеријума оптимизације (T , Δa , Δb , Δc и Ra).

Табела 5.31. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 3. функције циља

Бр. екс.	a (mm)	s (m/min)	Страт. обраде	T (min)	Δa (mm)	Δb (mm)	Δc (mm)	Ra (μm)	Ранг
3	0,65	321	Пут. 1	24,85	0,006	0,041	0,036	0,55	1
8	1,00	350	Пут. 1	23,00	0,009	0,025	0,018	1,06	2
4	1,35	321	Пут. 1	24,78	0,028	0,033	0,019	1,16	3
5	0,50	250	Пут. 1	30,91	0,016	0,060	0,035	0,49	4
30	1,00	350	Пут. 3	35,46	0,070	0,029	0,018	0,56	5

5.3.8 Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 4. функције циља

5.3.8.1 Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације

У табели 5.32 приказани су резултујући коефицијенти примене појединих метода ВКО на основу којих је извршено рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса.

Табела 5.32. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 4. функције циља

Бр. Екс.	Метода ВКО									
	GRA		AHP		MOORA		TOPSIS		ROV	
	GRG	Ранг	F_i	Ранг	Y_i	Ранг	$CCo(P_i)$	Ранг	U_i	Ранг
1	0,7281	12	0,0408	6	-0,0656	5	0,8986	5	0,4504	5
2	0,6904	18	0,0254	22	-0,1035	19	0,7654	19	0,3875	18
3	0,8017	2	0,0771	1	-0,0530	1	0,9420	1	0,4709	1
4	0,7790	3	0,0347	11	-0,0867	13	0,7875	16	0,4148	13
5	0,7618	5	0,0521	3	-0,0552	2	0,9371	2	0,4675	2
6	0,7540	6	0,0314	19	-0,1058	20	0,7232	22	0,3828	20
7	0,7455	7	0,0357	8	-0,0951	16	0,7993	14	0,3983	16
8	0,8192	1	0,0563	2	-0,0785	8	0,8141	13	0,4276	8
9	0,7442	8	0,0343	13	-0,0898	15	0,7921	15	0,4094	15
10	0,7436	9	0,0344	12	-0,1022	17	0,7375	20	0,3884	17
11	0,7377	10	0,0350	10	-0,1032	18	0,7331	21	0,3866	19
12	0,2648	32	0,0124	32	-0,2573	30	0,3997	30	0,2219	30
13	0,3990	27	0,0138	28	-0,1843	24	0,5342	24	0,2757	25
14	0,3152	30	0,0136	29	-0,3185	33	0,2869	33	0,1306	33
15	0,4051	26	0,0162	25	-0,1975	25	0,5227	25	0,2781	24
16	0,2878	31	0,0135	30	-0,2966	32	0,3103	32	0,1860	31
17	0,4127	25	0,0155	26	-0,1807	23	0,5571	23	0,2918	23
18	0,2516	33	0,0106	33	-0,2833	31	0,3925	31	0,1730	32
19	0,3964	28	0,0168	23	-0,2293	28	0,4368	27	0,2533	27
20	0,3324	29	0,0134	31	-0,2310	29	0,4207	29	0,2355	29
21	0,4532	23	0,0166	24	-0,2032	26	0,4832	26	0,2680	26
22	0,4441	24	0,0154	27	-0,2173	27	0,4355	28	0,2401	28
23	0,6480	22	0,0424	5	-0,0866	12	0,8195	12	0,4192	12
24	0,6854	19	0,0288	21	-0,1066	21	0,7809	17	0,3827	21
25	0,7116	16	0,0438	4	-0,0614	3	0,9139	3	0,4614	3
26	0,7196	13	0,0332	15	-0,0779	7	0,8735	6	0,4346	7
27	0,6488	21	0,0355	9	-0,0771	6	0,8713	7	0,4351	6
28	0,7374	11	0,0329	16	-0,0877	14	0,8302	11	0,4125	14
29	0,6712	20	0,0293	20	-0,1098	22	0,7662	18	0,3765	22
30	0,7762	4	0,0403	7	-0,0636	4	0,9113	4	0,4543	4
31	0,7162	14	0,0328	17	-0,0848	11	0,8467	10	0,4197	11
32	0,7017	17	0,0320	18	-0,0829	9	0,8531	8	0,4230	9
33	0,7157	15	0,0340	14	-0,0832	10	0,8516	9	0,4224	10

Табела 5.32. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 4. функције циља – наставак

Бр. Екс.	Метода ВКО									
	COPRAS		ARAS		WASPAS		VIKOR		OCRA	
	U_j	Ранг	U_i %	Ранг	U_j %	Ранг	Q_i	Ранг	P_i	Ранг
1	80,5109	5	52,9219	6	0,4691	6	0,0729	5	65,5329	7
2	51,3958	19	32,9798	22	0,2953	22	0,2513	18	64,1469	13
3	100,000	1	100,000	1	0,6545	1	0,0000	1	66,9084	1
4	61,6174	12	45,0106	11	0,3823	11	0,2091	16	65,7039	4
5	95,7192	2	67,6015	3	0,5528	2	0,0125	2	66,5136	2
6	50,6080	20	40,7058	19	0,3421	19	0,3079	22	64,8440	12
7	56,9859	16	46,3224	8	0,3845	10	0,1938	13	65,6850	5
8	68,4899	6	73,0399	2	0,4997	3	0,1695	12	66,4546	3
9	59,5180	15	44,4706	13	0,3745	15	0,2087	15	65,6229	6
10	52,4058	17	44,6261	12	0,3629	17	0,2873	19	65,3644	9
11	51,9400	18	45,3860	10	0,3608	18	0,2940	20	65,5015	8
12	16,9352	30	16,0363	32	0,1330	32	0,6625	28	19,3254	31
13	26,6367	23	17,8711	28	0,1564	28	0,6312	25	56,2887	23
14	13,8701	33	17,6312	29	0,1426	30	1,0000	33	19,1397	32
15	23,2847	25	20,9821	25	0,1775	25	0,5987	24	45,4337	25
16	14,3742	32	17,5134	30	0,1421	31	0,7568	31	0,0000	33
17	26,2223	24	20,1403	26	0,1742	26	0,5702	23	53,0074	24
18	15,6480	31	13,7980	33	0,1161	33	0,8153	32	30,8070	29
19	19,2688	29	21,8218	23	0,1789	23	0,6372	27	26,5304	30
20	19,8310	28	17,3571	31	0,1475	29	0,7194	29	34,0627	28
21	22,9359	26	21,5798	24	0,1785	24	0,6343	26	38,4803	27
22	21,8886	27	20,0074	27	0,1672	27	0,7500	30	40,1124	26
23	59,6242	14	55,0406	5	0,4545	7	0,1975	14	62,0181	22
24	49,7065	21	37,3310	21	0,3231	21	0,2478	17	62,5165	20
25	83,0220	4	56,8371	4	0,4931	4	0,0435	3	63,5630	17
26	65,8451	8	43,0161	15	0,3810	12	0,0825	6	62,1998	21
27	66,5346	7	46,0937	9	0,4012	8	0,1162	7	63,3685	18
28	61,0882	13	42,6984	16	0,3753	14	0,1456	11	64,9043	11
29	48,5225	22	37,9776	20	0,3294	20	0,2955	21	62,6743	19
30	83,0521	3	52,3008	7	0,4707	5	0,0456	4	65,1838	10
31	62,1688	11	42,5242	17	0,3756	13	0,1383	10	63,6590	16
32	63,3723	9	41,5443	18	0,3707	16	0,1335	8	63,6999	15
33	63,3192	10	44,1368	14	0,3875	9	0,1343	9	63,7490	14

Табела 5.32. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 4. функције циља - наставак

Бр. Екс.	Метода ВКО							
	EDAS		МАВАС		SAW		SPW	
	S_i	Ранг	S_i	Ранг	S_i	Ранг	S_i	Ранг
1	0,9464	4	0,2113	5	0,5137	6	0,4244	5
2	0,7516	21	0,0853	18	0,3133	22	0,2773	22
3	1,0000	1	0,2523	1	0,6732	1	0,6358	1
4	0,8276	14	0,1400	13	0,3960	15	0,3687	8
5	0,9876	2	0,2454	2	0,5756	3	0,5300	2
6	0,7484	22	0,0760	20	0,3716	20	0,3127	19
7	0,8215	15	0,1071	16	0,3986	14	0,3705	7
8	0,8727	8	0,1656	8	0,5114	7	0,4880	3
9	0,8118	16	0,1292	15	0,3883	16	0,3607	9
10	0,7567	19	0,0872	17	0,3855	17	0,3403	14
11	0,7554	20	0,0836	19	0,3768	18	0,3447	11
12	0,1768	30	-0,2457	30	0,1865	32	0,0795	30
13	0,4595	23	-0,1382	25	0,1881	31	0,1248	23
14	0,0646	33	-0,4284	33	0,2164	28	0,0688	33
15	0,3795	26	-0,1334	24	0,2483	24	0,1068	26
16	0,0814	32	-0,3176	31	0,2094	29	0,0748	31
17	0,4578	24	-0,1059	23	0,2259	27	0,1225	24
18	0,1135	31	-0,3436	32	0,1582	33	0,0739	32
19	0,2873	29	-0,1831	27	0,2646	23	0,0932	28
20	0,2882	28	-0,2186	29	0,2060	30	0,0890	29
21	0,3950	25	-0,1536	26	0,2437	25	0,1133	25
22	0,3713	27	-0,2095	28	0,2277	26	0,1067	27
23	0,8840	7	0,1488	12	0,5670	4	0,3421	12
24	0,7890	18	0,0759	21	0,3646	21	0,2817	21
25	0,9469	3	0,2331	3	0,5867	2	0,3996	6
26	0,8591	12	0,1796	7	0,4361	9	0,3260	18
27	0,8895	6	0,1807	6	0,4694	8	0,3330	15
28	0,8495	13	0,1354	14	0,4023	13	0,3483	10
29	0,8038	17	0,0633	22	0,3738	19	0,2849	20
30	0,9435	5	0,2191	4	0,5147	5	0,4267	4
31	0,8599	11	0,1498	11	0,4183	11	0,3328	16
32	0,8683	9	0,1564	9	0,4126	12	0,3287	17
33	0,8680	10	0,1552	10	0,4335	10	0,3416	13

5.3.8.2 Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 4 функцију циља

На основу резултата из претходног поглавља који се односе на појединачно оцењивање и рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса обраде помоћу четрнаест различитих метода *ВКО*, применом методологије интегралног оцењивања решења извршено је свеобухватно поређење и рангирање тридесет и три нивоа параметара према реализованом плану експеримента.

У циљу добијања свеобухватног коначног рангирања нивоа параметара технолошког процеса обраде посматраних танкозидних алуминијумских делова на бази резултата примене четрнаест вишекритеријумских метода тестирана је сагласност добијених вредности параметара корелације са постављеним граничним вредностима.

У табели 5.33 дат је преглед рангова алтернативних нивоа, вредности стандардне девијације по нивоима стандардне девијације по нивоима (σ_i), док су у доњем делу табеле дате вредности максималне стандардне девијације (σ_{max}) и просечне стандардне девијације (σ_{sr}), *Kendal*-ов коефицијент корелације (W) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације (R).

У табели 5.34 приказане су вредности *Spirman*-ов коефицијената корелације рангова алтернативних нивоа параметара свих примењених метода *ВКО* по паровима.

У посматраном случају након прве итерације је констатовано да се резултати добијени применом посматраних 14 метода *ВКО* не могу користити за интегрално рангирање алтернативних нивоа параметара јер нису задовољене граничне вредности првог задатог критеријума ($0,9 \leq R_i \leq 1$), односно постоји бар једна комбинација метода (овде и много више) чији је *Spirman*-ов коефицијент корелације R_i мањи од граничне вредности 0,9.

Како у оквиру прве итерације нису остварени задати критеријуми морало се приступити другој итерацији која је приказана у наставку са одговарајућим резултатима.

Након анализе резултата у табели 5.34, дошло се до закључка да постоје две комбинације метода *ВКО* које задовољавају све постављене критеријуме, што је кроз примену друге итерације и доказано:

- **Друга итерација А**, обухвата интегралну примену 9 *ВКО* метода: *AHP*, *MOORA*, *ROV*, *COPRAS*, *ARAS*, *WASPAS*, *EDAS*, *MABAC* и *SAW*. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара дати су у табели 5.35, а вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације у табели 5.36.
- **Друга итерација Б**, обухвата интегралну примену такође 9 *ВКО* метода: *MOORA*, *TOPSIS*, *ROV*, *COPRAS*, *WASPAS*, *VIKOR*, *EDAS*, *MABAC* и *SAW*. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара дати су у табели 5.37, а *Spirman*-ових коефицијената корелације у табели 5.38.

Табела 5.33. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара примењених метода ВКО

Бр. Екс.	GRA	AHP	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	ARAS	WASPAS	VIKOR	OCRA	EDAS	MABAC	SAW	SPW	σ – Стандардна девијација
1	12	6	5	5	5	5	6	6	5	7	4	5	6	5	1,916
2	18	22	19	19	18	19	22	22	18	13	21	18	22	22	2,565
3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,267
4	3	11	13	16	13	12	11	11	16	4	14	13	15	8	3,995
5	5	3	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	0,852
6	6	19	20	22	20	20	19	19	22	12	22	20	20	19	4,363
7	7	8	16	14	16	16	8	10	13	5	15	16	14	7	4,080
8	1	2	8	13	8	6	2	3	12	3	8	8	7	3	3,783
9	8	13	15	15	15	15	13	15	15	6	16	15	16	9	3,221
10	9	12	17	20	17	17	12	17	19	9	19	17	17	14	3,610
11	10	10	18	21	19	18	10	18	20	8	20	19	18	11	4,697
12	32	32	30	30	30	30	32	32	28	31	30	30	32	30	1,216
13	27	28	24	24	25	23	28	28	25	23	23	25	31	23	2,504
14	30	29	33	33	33	33	29	30	33	32	33	33	28	33	1,910
15	26	25	25	25	24	25	25	25	24	25	26	24	24	26	0,730
16	31	30	32	32	31	32	30	31	31	33	32	31	29	31	1,027
17	25	26	23	23	23	24	26	26	23	24	24	23	27	24	1,393
18	33	33	31	31	32	31	33	33	32	29	31	32	33	32	1,167
19	28	23	28	27	27	29	23	23	27	30	29	27	23	28	2,503
20	29	31	29	29	29	28	31	29	29	28	28	29	30	29	0,949
21	23	24	26	26	26	26	24	24	26	27	25	26	25	25	1,122
22	24	27	27	28	28	27	27	27	30	26	27	28	26	27	1,328
23	22	5	12	12	12	14	5	7	14	22	7	12	4	12	5,653
24	19	21	21	17	21	21	21	21	17	20	18	21	21	21	1,569
25	16	4	3	3	3	4	4	4	3	17	3	3	2	6	4,814
26	13	15	7	6	7	8	15	12	6	21	12	7	9	18	4,786
27	21	9	6	7	6	7	9	8	7	18	6	6	8	15	4,864
28	11	16	14	11	14	13	16	14	11	11	13	14	13	10	1,900
29	20	20	22	18	22	22	20	20	21	19	17	22	19	20	1,562
30	4	7	4	4	4	3	7	5	4	10	5	4	5	4	1,840
31	14	17	11	10	11	11	17	13	10	16	11	11	11	16	2,665
32	17	18	9	8	9	9	18	16	8	15	9	9	12	17	4,127
33	15	14	10	9	10	10	14	9	9	14	10	10	10	13	2,225
Максимална стандардна девијација σ_{max}=															5,653
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr}=															2,582
Kendal-ов коефицијент корелације W=															0,910
Просечан Spearman-ов коефицијент корелације R=															0,903

Табела 5.34. Вредности Spirman-ових коефицијената корелације рангова примењених метода ВКО

	GRA	AHP	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	ARAS	WASPAS	VIKOR	OCRA	EADS	MABAC	SAW1	SPW1
GRA	1,0000	0,8329	0,7731	0,7189	0,7701	0,7968	0,8329	0,8138	0,7343	0,9495	0,7293	0,7701	0,7470	0,8967
AHP		1,0000	0,9051	0,8610	0,9044	0,9017	1,0000	0,9713	0,8650	0,9319	0,9068	0,9044	0,9439	0,9562
MOORA			1,0000	0,9820	0,9987	0,9970	0,9051	0,9562	0,9833	0,7727	0,9813	0,9987	0,9582	0,9047
TOPSIS				1,0000	0,9823	0,9753	0,8610	0,9318	0,9950	0,7229	0,9799	0,9823	0,9472	0,8693
ROV					1,0000	0,9950	0,9044	0,9579	0,9856	0,7677	0,9789	1,0000	0,9616	0,9001
COPRAS						1,0000	0,9017	0,9542	0,9783	0,7968	0,9776	0,9950	0,9479	0,9164
ARAS							1,0000	0,9713	0,8650	0,8319	0,9068	0,9044	0,9439	0,9562
WASPAS								1,0000	0,9315	0,7978	0,9589	0,9579	0,9803	0,9432
VIKOR									1,0000	0,7386	0,9706	0,9856	0,9425	0,8757
OCRA										1,0000	0,7467	0,7677	0,7189	0,9154
EADS											1,0000	0,9789	0,9616	0,8927
MABAC												1,0000	0,9616	0,9001
SAW1													1,0000	0,8927
SPW1														1,0000

Друга итерација А

Табела 5.35. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација А

Бр. Екс.	AHP	MOORA	ROV	COPRAS	ARAS	WASPAS	EDAS	MABAC	SAW	Сред. вред. рангова	Ранг алтернатива	σ Стан. Девација
1	6	5	5	5	6	6	4	5	6	5,33	5	0,7071
2	22	19	18	19	22	22	21	18	22	20,33	20	1,8028
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,00	1	0,0000
4	11	13	13	12	11	11	14	13	15	12,56	12	1,4240
5	3	2	2	2	3	2	2	2	3	2,33	2	0,5000
6	19	20	20	20	19	19	22	20	20	19,89	19	0,9280
7	8	16	16	16	8	10	15	16	14	13,22	14	3,5277
8	2	8	8	6	2	3	8	8	7	5,78	6	2,6822
9	13	15	15	15	13	15	16	15	16	14,78	16	1,0929
10	12	17	17	17	12	17	19	17	17	16,11	17	2,4210
11	10	18	19	18	10	18	20	19	18	16,67	18	3,8406
12	32	30	30	30	32	32	30	30	32	30,89	30	1,0541
13	28	24	25	23	28	28	23	25	31	26,11	27	2,7588
14	29	33	33	33	29	30	33	33	28	31,22	32	2,1667
15	25	25	24	25	25	25	26	24	24	24,78	24	0,6667
16	30	32	31	32	30	31	32	31	29	30,89	30	1,0541
17	26	23	23	24	26	26	24	23	27	24,67	23	1,5811
18	33	31	32	31	33	33	31	32	33	32,11	33	0,9280
19	23	28	27	29	23	23	29	27	23	25,78	26	2,7285
20	31	29	29	28	31	29	28	29	30	29,33	29	1,1180
21	24	26	26	26	24	24	25	26	25	25,11	25	0,9280
22	27	27	28	27	27	27	27	28	26	27,11	28	0,6009
23	5	12	12	14	5	7	7	12	4	8,67	8	3,8079
24	21	21	21	21	21	21	18	21	21	20,67	22	1,0000
25	4	3	3	4	4	4	3	3	2	3,33	3	0,7071
26	15	7	7	8	15	12	12	7	9	10,22	9	3,3458
27	9	6	6	7	9	8	6	6	8	7,22	7	1,3017
28	16	14	14	13	16	14	13	14	13	14,11	15	1,1667
29	20	22	22	22	20	20	17	22	19	20,44	21	1,7401
30	7	4	4	3	7	5	5	4	5	4,89	4	1,3642
31	17	11	11	11	17	13	11	11	11	12,56	12	2,6034
32	18	9	9	9	18	16	9	9	12	12,11	11	4,0757
33	14	10	10	10	14	9	10	10	10	10,78	10	1,8559
Максимална стандардна девијација σ_{\max}=												4,0757
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr}=												1,7418
Kendal-ов коефицијент корелације W=												0,9588
Просечан Spirtan-ов коефицијент корелације R=												0,9557

Табела 5.36. Вредности Spirtan-ових коефицијената корелације рангова - друга итерација А

	AHP	MOOR	ROV	COP	ARAS	WAS	EDAS	MAB	SAW
AHP	1,0000	0,9051	0,9044	0,9017	1,0000	0,9713	0,9068	0,9044	0,9439
MOOR		1,0000	0,9987	0,9970	0,9051	0,9562	0,9813	0,9987	0,9582
ROV			1,0000	0,9950	0,9044	0,9579	0,9789	1,0000	0,9616
COP				1,0000	0,9017	0,9542	0,9776	0,9950	0,9479
ARAS					1,0000	0,9713	0,9068	0,9044	0,9439
WAS						1,0000	0,9589	0,9579	0,9803
EDAS							1,0000	0,9789	0,9616
MAB								1,0000	0,9616
SAW									1,0000

Друга итерација Б

Табела 5.37. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација Б

Бр. Екп.	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	WASPAS	VIKOR	EDAS	MABAC	SAW	Сред. вред. рангова	Ранг алтернатива	σ - Станд. Девације
1	5	5	5	5	6	5	4	5	6	5,11	5	0,6009
2	19	19	18	19	22	18	21	18	22	19,56	19	1,6667
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,00	1	0,0000
4	13	16	13	12	11	16	14	13	15	13,67	14	1,7321
5	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2,11	2	0,3333
6	20	22	20	20	19	22	22	20	20	20,56	22	1,1304
7	16	14	16	16	10	13	15	16	14	14,44	15	2,0069
8	8	13	8	6	3	12	8	8	7	8,11	7	2,9768
9	15	15	15	15	15	15	16	15	16	15,22	16	0,4410
10	17	20	17	17	17	19	19	17	17	17,78	17	1,2019
11	18	21	19	18	18	20	20	19	18	19,00	18	1,1180
12	30	30	30	30	32	28	30	30	32	30,22	30	1,2019
13	24	24	25	23	28	25	23	25	31	25,33	25	2,5981
14	33	33	33	33	30	33	33	33	28	32,11	33	1,8333
15	25	25	24	25	25	24	26	24	24	24,67	24	0,7071
16	32	32	31	32	31	31	32	31	29	31,22	31	0,9718
17	23	23	23	24	26	23	24	23	27	24,00	23	1,5000
18	31	31	32	31	33	32	31	32	33	31,78	32	0,8333
19	28	27	27	29	23	27	29	27	23	26,67	27	2,2361
20	29	29	29	28	29	29	28	29	30	28,89	29	0,6009
21	26	26	26	26	24	26	25	26	25	25,56	26	0,7265
22	27	28	28	27	27	30	27	28	26	27,56	28	1,1304
23	12	12	12	14	7	14	7	12	4	10,44	11	3,5395
24	21	17	21	21	21	17	18	21	21	19,78	20	1,8559
25	3	3	3	4	4	3	3	3	2	3,11	3	0,6009
26	7	6	7	8	12	6	12	7	9	8,22	8	2,3333
27	6	7	6	7	8	7	6	6	8	6,78	6	0,8333
28	14	11	14	13	14	11	13	14	13	13,00	13	1,2247
29	22	18	22	22	20	21	17	22	19	20,33	21	1,9365
30	4	4	4	3	5	4	5	4	5	4,22	4	0,6667
31	11	10	11	11	13	10	11	11	11	11,00	12	0,8660
32	9	8	9	9	16	8	9	9	12	9,89	10	2,5712
33	10	9	10	10	9	9	10	10	10	9,67	9	0,5000
Максимална стандардна девијација σ_{max}=												3,5395
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr}=												1,3477
Kendal-ов коефицијент корелације W=												0,9756
Просечан Spirtan-ов коефицијент корелације R=												0,9737

Табела 5.38. Вредности Spirtan-ових коефицијената корелације рангова – друга итерација Б

	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	WASPAS	VIK	EDAS	MABAC	SAW
MOORA	1,0000	0,9820	0,9987	0,9970	0,9562	0,9833	0,9813	0,9987	0,9582
TOPSIS		1,0000	0,9823	0,9753	0,9318	0,9950	0,9799	0,9823	0,9472
ROV			1,0000	0,9950	0,9579	0,9856	0,9789	1,0000	0,9616
COPRAS				1,0000	0,9542	0,9783	0,9776	0,9950	0,9479
WASPAS					1,0000	0,9315	0,9589	0,9579	0,9803
VIK						1,0000	0,9706	0,9856	0,9425
EDAS							1,0000	0,9789	0,9616
MABAC								1,0000	0,9616
SAW									1,0000

На основу добијених резултата који су приказани у табелама 5.35 и 5.36, може се закључити да комбинација 9 ВКО метода: *AHP, MOORA, ROV, COPRAS, ARAS, WASPAS, EDAS, MABAC* и *SAW*:

1. **Задовољен први критеријум** – *Spirman*-ов коефицијент корелација рангова је за све комбинације метода у оквиру граничне вредности $0,9 \leq R_i \leq 1$ ($R_{\min} = 0,9017$).
2. **Задовољен други критеријум** – *Kendal*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq W$ ($W = 0,9588$) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq R$ ($R = 0,9557$) су у оквиру граничних вредности.
3. **Задовољен трећи критеријум**, просечна стандардна девијација је у оквиру граничне вредности $\sigma_{sr} \leq 1,5-2$ ($\sigma_{sr} = 1,7418$).

На основу добијених резултата који су приказани у табелама 5.37 и 5.38, може се закључити да комбинација 9 ВКО метода: *MOORA, TOPSIS, ROV, COPRAS, WASPAS, VIKOR, EDAS, MABAC* и *SAW*:

1. **Задовољен први критеријум** – *Spirman*-ов коефицијент корелација рангова је за све комбинације метода у оквиру граничне вредности $0,9 \leq R_i \leq 1$ ($R_{\min} = 0,9315$).
2. **Задовољен други критеријум** – *Kendal*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq W$ ($W = 0,9756$) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq R$ ($R = 0,9737$) су у оквиру граничних вредности.
3. **Задовољен трећи критеријум**, просечна стандардна девијација је у оквиру граничне вредности $\sigma_{sr} \leq 1,5-2$ ($\sigma_{sr} = 1,3477$).

Анализом добијених резултата посматраних варијанти друге итерације А и Б, закључак је да је боља варијанта Б, због повољнијих резултата корелационих фактора, па је она усвојена као меродавна.

На основу тога оптимални ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса је дат у табели 5.37, а у табели 5.39 је издвојено 5 најбоље ранжираних нивоа параметара са вредностима параметара обраде (a , s и стратегијом обраде) и критеријума оптимизације (T , Δa , Δb , Δc и Ra).

Табела 5.39. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 4. функције циља

Бр. Екс.	a (mm)	s (m/min)	Страт. обраде	T (min)	Δa (mm)	Δb (mm)	Δc (mm)	Ra (μm)	Ранг
3	0,65	321	Пут. 1	24,85	0,006	0,041	0,036	0,55	1
5	0,50	250	Пут. 1	30,91	0,016	0,060	0,035	0,49	2
25	0,65	321	Пут. 3	38,21	0,121	0,059	0,034	0,40	3
30	1,00	350	Пут. 3	35,46	0,070	0,029	0,018	0,56	4
1	0,65	179	Пут. 1	42,66	0,050	0,040	0,038	0,49	5

6. ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАМЕТАРА ТЕХНОЛОШКОГ ПРОЦЕСА ВИСОКОБРЗИНСКЕ ОБРАДЕ

6.1 Примена ANOVA и регресионе анализе

На основу реализованог *Taguchi* L27 експерименталног плана извршена је ANOVA анализа, регресиона анализа и на крају оптимизација параметара технолошког процеса високобрзинске обраде танкозидних линијских делова од легуре алуминијума.

Уобичајени начин анализе и сумирања експерименталних резултата је коришћењем ANOVA (*енгл. Analysis of Variance*) табеле. ANOVA представља статистичку технику која се користи за процену релативног значаја сваког фактора процеса. Главни циљ ANOVA анализе је да из резултата експеримента добије одговор, колико варијација сваког фактора утиче на укупну варијацију посматраног резултата. За сет резултата $Y_1, Y_2 \dots Y_n$, укупна варијација се може израчунати додавањем одступања појединачних података од средње вредности [209].

Појам *грешка*, се према већини литературних извора, означава као експериментална грешка. У реланости, то није случај, јер грешка представља збирни утицај свих фактора који нису укључени у експерименталну студију, плус свака експериментална грешка ако је присутна [209].

Грешка комбинује ефекте из три извора:

1. *Фактори који су искључени из експеримента (фактори који су искључени из експеримента због времена или буџетских ограничења)*
2. *Фактори шума (фактори за које се зна да утичу на резултате) и*
3. *Експериментална грешка (претпоставка да се грешке јављају због неконтролисаних фактора).*

За дефинисање ANOVA табеле, потребно је реализовати следеће кораке: *збирна табела, прорачун суме квадрата, степен слободе, варијације, рачунарску вредност F теста, анализа варијансе.*

Интервал поверења (*енгл. Confidence Interval-C.I.*) се рачуна употребом вредности из ANOVA табеле. Добија се доња и горња граница овог интервала, у оквиру које треба да падне средња перформанса актуелних узорака. *C.I.* се рачуна за жељени ниво поверења. Ниво поверења је субјективан избор корисника. Већина корисника користи ниво поверења између 80 и 95%. Међутим, пожељно је да интервал поверења буде фиксан (на пример 90 или 95%) за све прорачуне и предикцију у експерименту. Једначина за *C.I.* садржи два појма које треба

разјаснити. Први је стандардна вредност F односа. F вредност, како се често назива, се бира из табела на основу два броја. У случају да се С.І. рачуна на бази оптимума перформанси, ова два броја за F -однос су $F(n_1, n_2)$, где је n_1 степен слободе средње перформансе (увек је 1), а n_2 је степен слободе грешке. Други појам је ефективни број понављања [209].

Једначина за прорачун С.І. гласи:

$$C.I. = \pm \sqrt{F_{\alpha(1.n_2)} * V_{greška(\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{ver}})}} \quad (6.1)$$

Где су:

- $F(n_1, n_2)$ -вредности из F табеле за степен слободе грешке на жељеном нивоу поверења,
- $V_{greška}$ -варијанса грешке (из ANOVA табеле),
- n_{ver} -број понављања валидације,
- n - ефективни број понављања.

Ефективни број понављања (n) се одређује на следећи начин:

$$n = \frac{N}{1+v} \quad (6.2)$$

Где су:

- N -укупан број експеримената валидације,
- v -укупан степен слободе свих фактора.

6.1.1 Оптимизација параметара процеса обраде у функцији храпавости обрађене површине

Код анализе добијене храпавости обрађене површине посматрају се утицаји дебљине зида танкозидне структуре, броја обртаја, помака, дубине обраде и стратегије обраде. С обзиром да је циљ да храпавост обрађене површине буде што мања, за функцију циља је изабрана "што мања вредност то боља (енгл. *Smaller is better*)". За овако постављену функцију циља S/N за сваку тачку експеримента се рачуна уз помоћ обрасца:

$$S/N = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6.3)$$

У табели 6.1 приказани су вредности S/N односа за храпавост обрађене површине, на основу улазних вредности за свих 27 експеримената.

Табела 6.1. Вредност S/N односа за храповост обрађене површине

Редни број	A	B	C	D	E	Ra	S/N однос
1	0,5	6000	600	1	1	0,2500	12,0412
2	0,5	6000	1200	2	2	1,3100	-2,3454
3	0,5	6000	2400	3	3	0,8300	1,6184
4	0,5	12000	600	2	3	0,8425	1,4886
5	0,5	12000	1200	3	1	0,3375	9,4345
6	0,5	12000	2400	1	2	0,8600	1,3100
7	0,5	24000	600	3	2	0,4100	7,7443
8	0,5	24000	1200	1	3	0,3950	8,0681
9	0,5	24000	2400	2	1	0,2925	10,6775
10	1,0	6000	600	2	2	1,5325	-3,7080
11	1,0	6000	1200	3	3	0,5800	4,7314
12	1,0	6000	2400	1	1	0,5100	5,8486
13	1,0	12000	600	3	1	0,1375	17,2339
14	1,0	12000	1200	1	2	0,6325	3,9788
15	1,0	12000	2400	2	3	1,0050	-0,0433
16	1,0	24000	600	1	3	0,1850	14,6566
17	1,0	24000	1200	2	1	0,1925	14,3114
18	1,0	24000	2400	3	2	0,3050	10,3140
19	1,5	6000	600	3	3	0,2575	11,7845
20	1,5	6000	1200	1	1	0,3825	-8,3474
21	1,5	6000	2400	2	2	1,9800	-5,9333
22	1,5	12000	600	1	2	1,1600	-1,2892
23	1,5	12000	1200	2	3	1,3275	-2,4607
24	1,5	12000	2400	3	1	0,4075	7,7974
25	1,5	24000	600	2	1	0,1500	16,4782
26	1,5	24000	1200	3	2	0,2725	11,2927
27	1,5	24000	2400	1	3	0,5050	5,9342

Вредности S/N за сваки фактор су приказани у табели 6.2. Средњи S/N одзив за сваки утицајни фактор је приказан у табели 6.3.

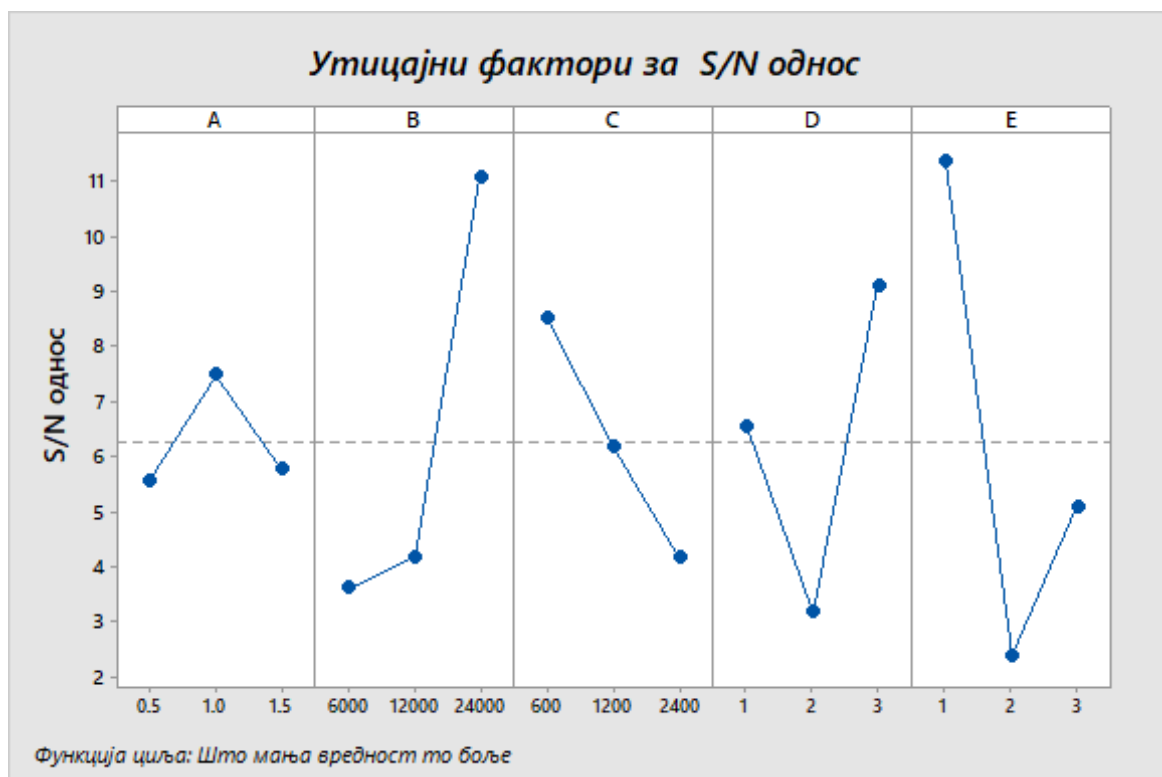
Табела 6.2. S/N одзив за храповост обрађене површине

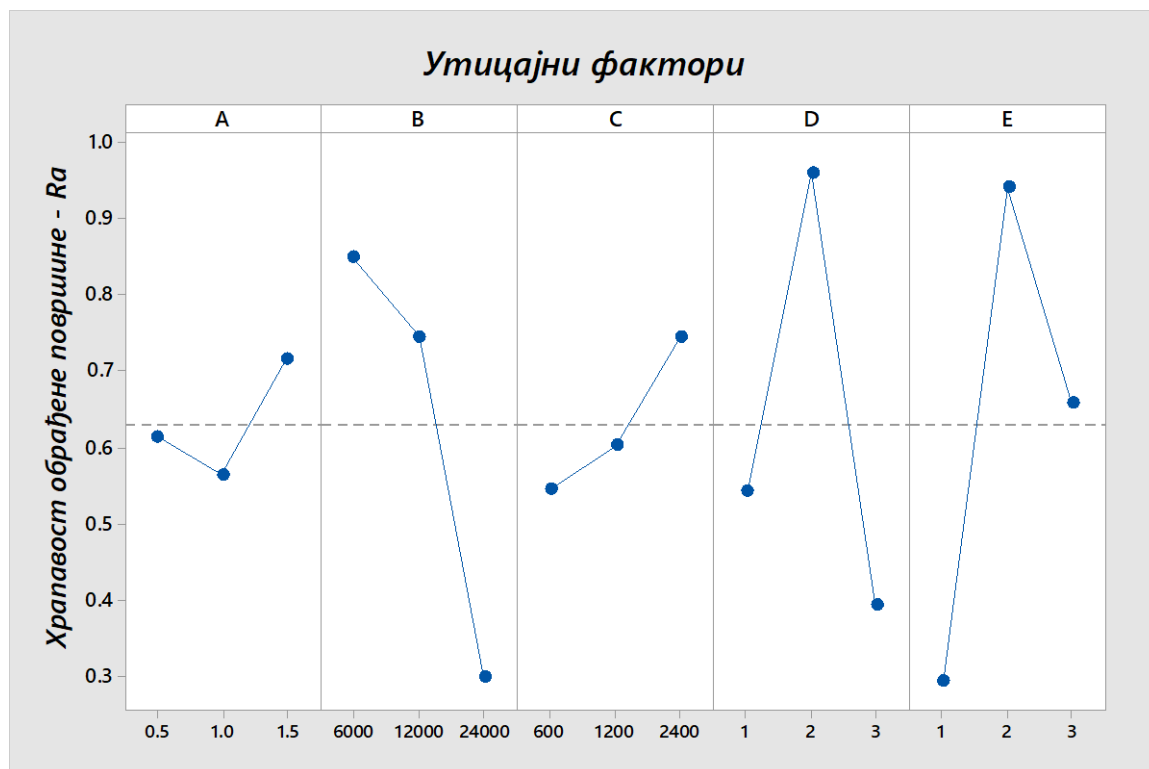
Ниво	A	B	C	D	E
1	5,560	3,598	8,492	6,544	11,352
2	7,480	4,161	6,151	3,163	2,374
3	5,772	11,053	4,169	9,106	5,086
Разлика	1,921	7,455	4,323	5,943	8,978
Ранг	5	2	4	3	1

Табела 6.3. Одзив хрпавости обрађене површине по утицајним факторима

Ниво	A	B	C	D	E
1	0,6142	0,8481	0,5472	0,5422	0,2956
2	0,5644	0,7456	0,6033	0,9592	0,9403
3	0,7158	0,3008	0,7439	0,3931	0,6586
Разлика	0,1514	0,5472	0,1967	0,5661	0,6447
Ранг	5	3	4	2	1

На слици 6.1, приказан је S/N одзив за хрпавост обрађене површине по утицајним факторима, док је на слици 6.2, приказан одзив средње аритметичке хрпавости обрађене површине по утицајним факторима.

Слика 6.1. S/N одзив за хрпавост обрађене површине



Слика 6.2. Одзив средње храпавости по утицајним факторима

Анализом резултата, који су приказани у табели 6.2 и на слици 6.1, може се закључити да највећи утицај на храпавост обрађене површине имају стратегија обраде, број обртаја и дубина обраде. Такође, најмањи утицај на храпавост обрађене површине има дебљина зида танкозидног дела. Стратегија обраде има највећи утицај на храпавост обрађене површине, због тога што алат у зависности од контуре кретања оставља траг, док дебљина зида при нижим режимима обраде не утиче јер су и вибрације знатно мање. На основу табеле 6.3 и слике 6.2, можемо одредити оптималне режиме обраде у оквиру понуђених нивоа фактора, на основу функције циља “што мања вредност то боље”.

6.1.1.1 Анализа варијансе (ANOVA) за храпавост обрађене површине

У циљу одређивања сигнификантности сваког фактора на одзивну површину (карактеристику), у ANOVA методи примењује се Фишеров тест (енгл. *Fisher's test, F-value*), тј. одређује се *F-вредност*. *F-вредност* је дефинисана као однос утицај фактора доспеле варијансе на варијансу услед инхерентне грешке у систему [200, 214-216]. Дефинисана *F-вредност* се потом упоређује са критичном вредношћу (енгл. *critical F-value - Fcr*) [214]. Ако је израчуната *F-вредност* мања од критичне *Fcr* вредности значи да утицај поменутог фактора није значајан на изабраном поверењу или/и није битан у поређењу са дефинисаном грешком система. За посматрани случај, који се односи на утицај храпавости обрађене површине, степени слободе (енгл. *Degress Of Freedom - DOF*) за сваки од улазних фактора износе 2 и грешка система *DOF* је 16, па је због тога *Fcr* вредност на нивоу

поверења од 95% једнака **3.35**. Резултати анализе варијансе за функцију храпавости обрађене површине су приказани у табели 6.4.

Резултати *ANOVA* анализе показују да су од пет улазних фактора, *F-вредности* фактора који се односе на број обртаја, дубину обраде и стратегију обраде већи од критичне вредности *F_{cr}*, што имплицира да су ови фактори сигнификантни у поређењу са фактором грешке и да имају значајан утицај на одзивну површину. Док са друге стране дебљина зида и помак немају значајни утицај јер су њихове *F-вредности* мање од критичне вредности *F_{cr}*.

Такође, у оквиру *ANOVA* анализе користи се још један квалитетни алат за евалуацију резултата, *P-вредност* (енгл. *p-value*). *P-вредност* се користи у циљу указивања који фактори имају сигнификантан утицај на одзивне површине. Што је *P-вредност* мања на α -нивоу сигнификантности, више је сигнификантан одговарајући фактор [216]. У посматраном случају, за функцију храпавости обрађене површине, на основу *P-вредност* са нивоом поверења 95% ($\alpha=0,05$), фактори који се односе на број обртаја, дубину обраде и стратегију обраде су сигнификантни, док су фактори за дебљину зида и помак нису сигнификантни и могу се занемарити.

Коришћење процентуалног учешћа (*%P*) у *ANOVA* анализи помоћно решење за квантитативну евалуацију утицајних фактора на одзивне површине. Дебљина зида утиче са 1,80%, број обртаја утиче са 25,51%, помак утиче са 3,09%, дубина обраде утиче са 25,95%, а највећи утицај на храпавост обрађене површине има стратегија обраде са 31,49%. Грешка експеримента износи 12,51%, односно то је утицај других фактора који се при овом експерименту нису разматрали. Коефицијенти *ANOVA* регресионе једначине приказани су у табели 6.5.

Табела 6.4. Резултати *ANOVA* анализе за храпавост обрађене површине

Фактори	<i>DOF</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i> - <i>Вредност</i>	<i>P</i> - <i>Вредност</i>	Процентуално учешће % <i>P</i>
<i>A</i>	2	0.1072	0,05359	1,18	0,332	1,80
<i>B</i>	2	1,5232	0,76160	16,80	0,000	25,51
<i>C</i>	2	0,1847	0,09237	2,04	0,163	3,09
<i>D</i>	2	1,5497	0,77486	17,09	0,000	25,95
<i>E</i>	2	1,8804	0,94022	20,74	0,000	31,49
Грешка	16	0,7255	0,04534			12,51
Укупно	26	5,9708				100 %

Табела 6.5. Коефицијенти ANOVA регресионе једначине

Фактори	Коеф.	SE Коеф.	T-Вредност	P-Вредност	VIF
Константе	0,6315	0,0410	15,41	0,000	
A					
0,5	-0,0173	0,0580	-0,30	0,769	1,33
1,0	-0,0670	0,0580	-1,16	0,264	1,33
B					
6000	0,2166	0,0580	3,74	0,002	1,33
12000	0,1141	0,0580	1,97	0,067	1,33
C					
600	-0,0843	0,0580	-1,45	0,165	1,33
1200	-0,0281	0,0580	-0,49	0,634	1,33
D					
1	-0,0893	0,0580	-1,54	0,143	1,33
2	0,3277	0,0580	5,65	0,000	1,33
E					
1	-0,3359	0,0580	-5,80	0,000	1,33
2	0,3088	0,0580	5,33	0,000	1,33

6.1.1.2 Регресиона анализа за храпавост обрађене површине

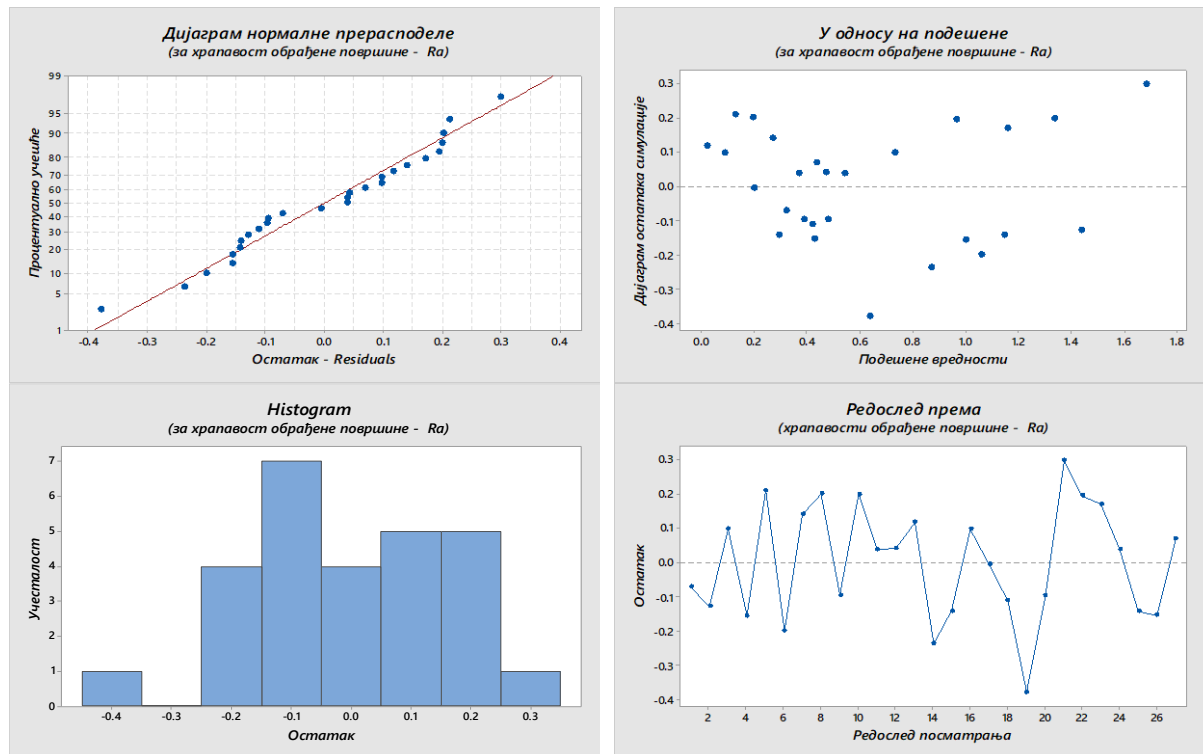
Путем регресионе анализе добија се регресиона једначина за линеарни модел зависности улазних фактора, дебљине зида (A), броја обртаја (B), помака (C), дубине обраде (D) и стратегије обраде (E) на храпавост обрађене површине (Ra), која је дата у наставку (6.4).

$$Ra = 0,6315 - 0,0173 A_{0,5} - 0,0670 A_{1,0} + 0,0844 A_{1,5} + 0,2166 B_{6000} + 0,1141 B_{12000} - 0,3306 B_{24000} - 0,0843 C_{600} - 0,0281 C_{1200} + 0,1124 C_{2400} - 0,0893 D_{1+} + 0,3277 D_{2-} - 0,2384 D_{3-} - 0,3359 E_{1+} + 0,3088 E_{2+} + 0,0271 E_{3-} \quad (6.4)$$

У табели 6.6 приказани су коефицијенти претходно дефинисане регресионе једначине за линеарни модел. На слици 6.3 приказане су одговарајуће расподеле за храпавост обрађене површине. На слици 6.4 дат је контурни приказ различитих предикционих параметара на храпавост обрађене површине, док је на слици 6.5 дат површински приказ између два предикциона параметра и једног одзивног параметра - Ra.

Табела 6.6. Коефицијенти регресионе једначине

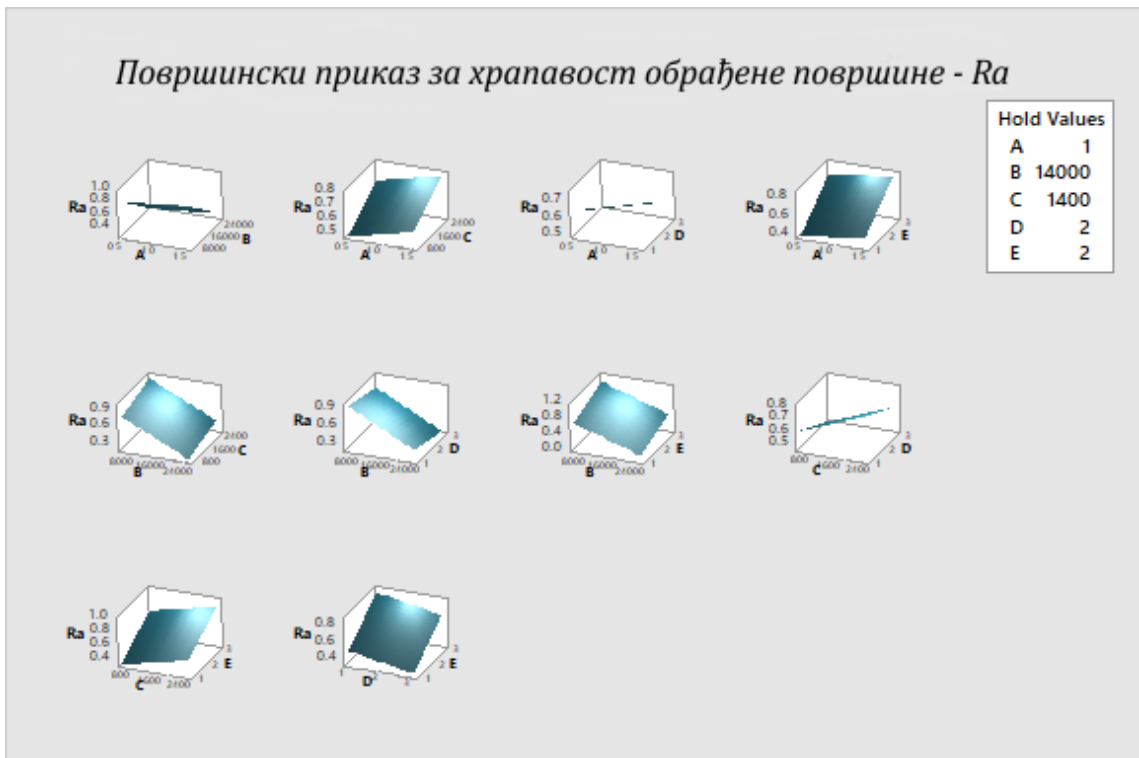
Фактори	Коеф.	SE Коеф.	T-Вредност	P-Вредност	VIF
Константе	0,600	0,404	1,49	0,152	
A	0,102	0,194	0,52	0,606	1,00
B	-0,000031	0,000011	-2,96	0,007	1,00
C	0,000110	0,000106	1,04	0,309	1,00
D	-0,0746	0,0971	-0,77	0,451	1,00
E	0,1815	0,0971	1,87	0,075	1,00



Слика 6.3. Одговарајуће расподеле за хрпавост обрађене површине



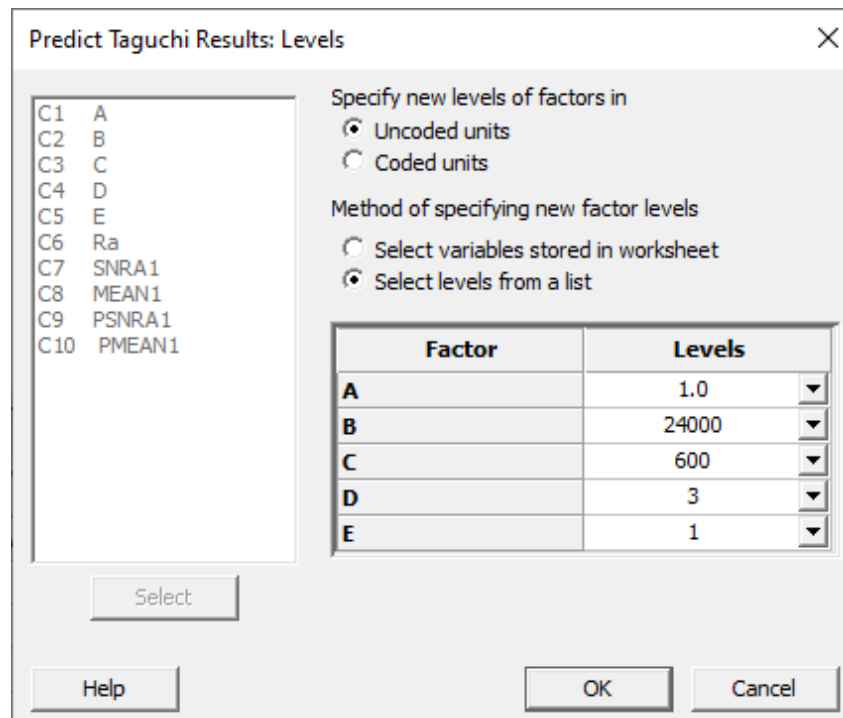
Слика 6.4. Контурни приказ различитих предикционих фактора на храпавост обрађене површине



Слика 6.5. Површински приказ између два предикциона фактора и једног одзивног фактора (храпавост обрађене површине)

6.1.1.3 Оптимизација добијених резултата за храпавост обрађене површине

Након дефинисања оптималних улазних параметара, предвиђени су оптимални одзиви применом *Taguchi-јеве* и *ANOVA* методе. Предикција оптимума улазних параметара у циљу добијања најмање храпавости обрађене површине применом *Taguchi-јеве* методе је пронађена на следећим нивоу: *A2-B3-C1-D3-E1*. На слици 6.6 приказани су *Taguchi-јеву* предикциони резултати за оптималне улазне параметре применом софтвера *MiniTab*. Након проналажења оптималних улазних параметара добијеног *S/N* одзива, применом једначине 6.3 добијена је зависност улазних фактора на храпавост обрађене површине *Ra*. У табели 6.6 приказани су оптимални улазни параметри и сигнификанти фактори.



Слика 6.6. *Taguchi-јеву* предикциони резултати за оптималне улазне параметре применом софтвера *MiniTab*

Табела 6.6. Оптимални улазни параметри и сигнификанти параметри

Одзив	Оптимални улазни параметри	Сигнификантни параметри	Предикција оптималног одзива	
			<i>S/N</i> одзив	Вредност
Храпавост обрађене површине - <i>Ra</i>	<i>A2-B3-C1-D3-E1</i>	<i>B-D-E</i>	22,4003	0,0183

6.1.2 Оптимизација параметара процеса обраде у функцији количине уклоњеног материјала

Код анализе производности, тј. количине уклоњеног материјала, посматра се утицај дебљине зида танкозидне структуре, броја обртаја, помака, дубине обраде и стратегије обраде на производност - MRR. С обзиром да је циљ да производност буде што већа, онда ће се за функцију циља изабрати "што већа вредност то боља (енгл. *Larger is better*)". За овако постављену функцију циља S/N за сваки експеримент се рачуна уз помоћ обрасца:

$$S/N = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6.5)$$

У табели 6.7 приказани су вредности S/N односа за количину уклоњеног материјала, на основу улазних вредности експерименталних резултата.

Табела 6.7. Вредност S/N односа за количину уклоњеног материјала

Редни број	A	B	C	D	E	MRR	S/N однос
1.	0,5	6000	600	1	1	2262,2522	67,0908
2.	0,5	6000	1200	2	2	7213,0435	77,1624
3.	0,5	6000	2400	3	3	4257,5579	72,5832
4.	0,5	12000	600	2	3	3931,2796	71,8907
5.	0,5	12000	1200	3	1	1967,1781	65,8769
6.	0,5	12000	2400	1	2	8951,1169	79,0375
7.	0,5	24000	600	3	2	1754,9242	64,8852
8.	0,5	24000	1200	1	3	4799,5140	73,6239
9.	0,5	24000	2400	2	1	9626,3201	79,6692
10.	1,0	6000	600	2	2	3631,9290	71,2027
11.	1,0	6000	1200	3	3	2819,2771	69,0028
12.	1,0	6000	2400	1	1	7194,9398	77,1405
13.	1,0	12000	600	3	1	1281,6901	62,1557
14.	1,0	12000	1200	1	2	4609,6696	73,2734
15.	1,0	12000	2400	2	3	14980,7939	83,5107
16.	1,0	24000	600	1	3	2919,7861	69,3070
17.	1,0	24000	1200	2	1	6825,0000	76,6821
18.	1,0	24000	2400	3	2	3560,8696	71,0311
19.	1,5	6000	600	3	3	1391,5663	62,8701
20.	1,5	6000	1200	1	1	4537,8010	73,1369
21.	1,5	6000	2400	2	2	13004,6646	82,2820
22.	1,5	12000	600	1	2	2576,2355	68,2197
23.	1,5	12000	1200	2	3	7165,6474	77,1051
24.	1,5	12000	2400	3	1	3677,8420	71,3119
25.	1,5	24000	600	2	1	3751,7401	71,4847
26.	1,5	24000	1200	3	2	2280,6770	67,1613
27.	1,5	24000	2400	1	3	9740,9639	79,7720

Вредности S/N за сваки фактор су приказани у табели 6.8. Средњи S/N одзив за сваки утицајни фактор је приказан у табели 6.9.

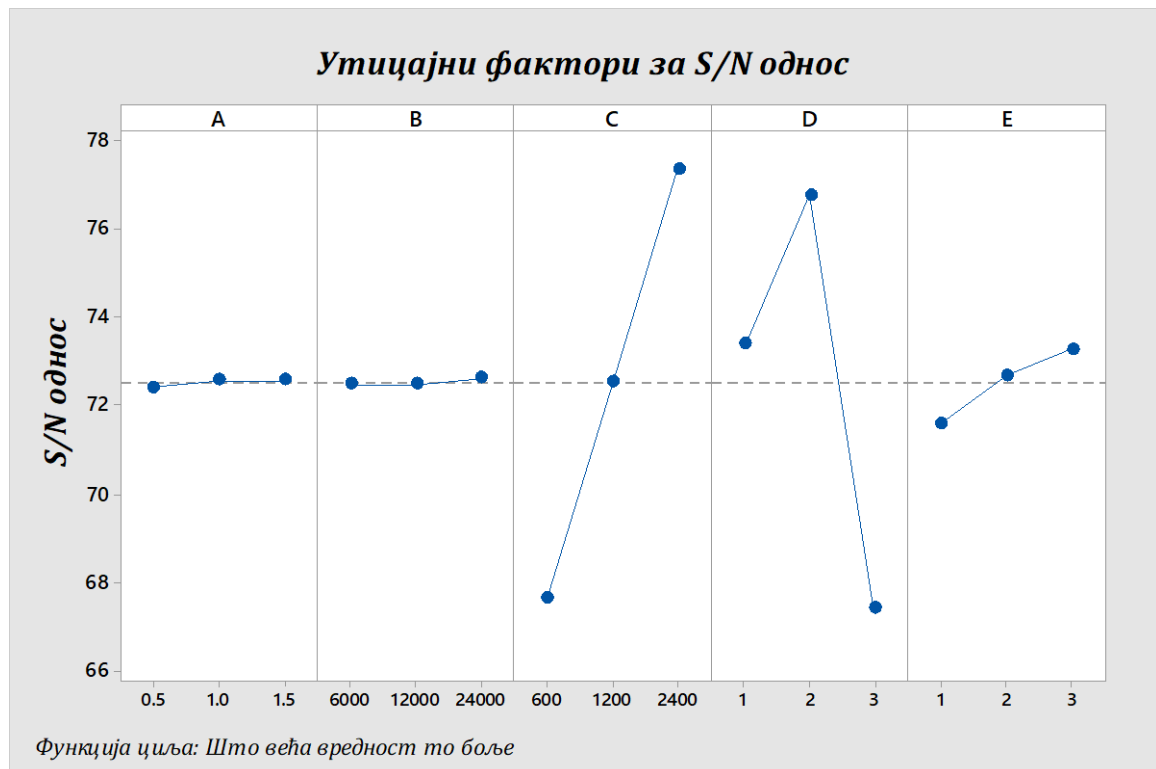
Табела 6.8. S/N одзив за количину уклоњеног материјала

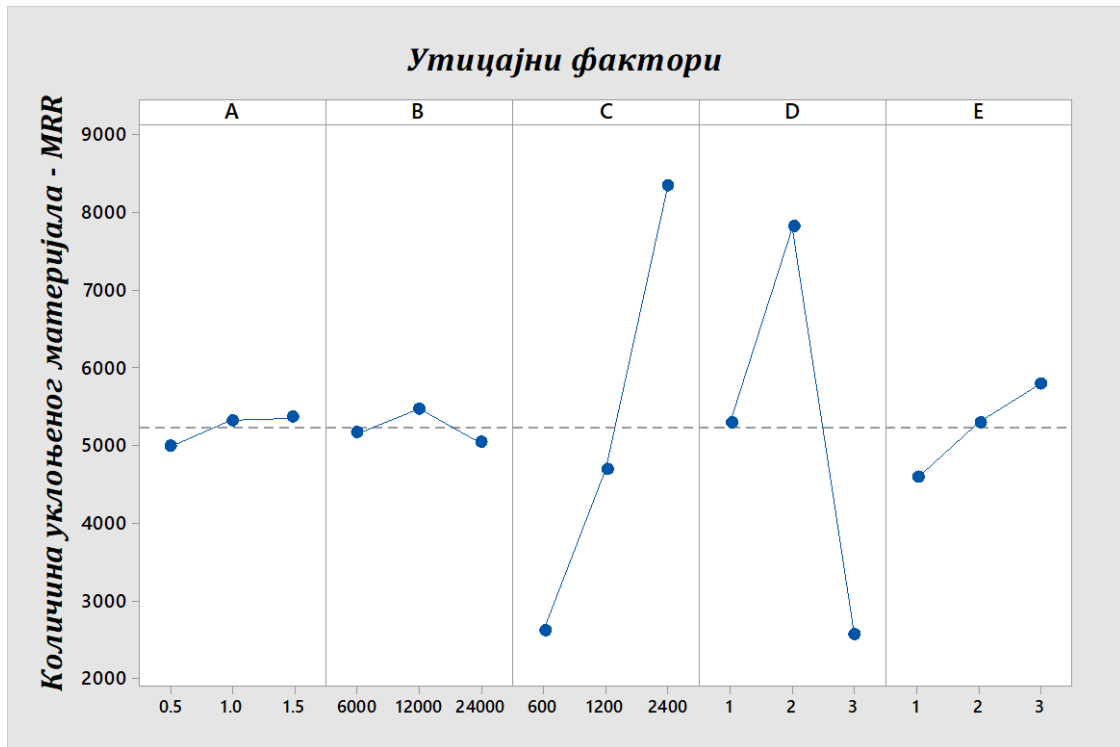
Ниво	A	B	C	D	E
1	72,42	72,50	67,68	73,40	71,62
2	72,59	72,49	72,56	76,78	72,70
3	72,59	72,62	77,37	67,43	73,30
Разлика	0,17	0,14	9,69	9,35	1,68
Ранг	4	5	1	2	3

Табела 6.9. Одзив количине уклоњеног материјала по утицајним факторима

Ниво	A	B	C	D	E
1	4974	5146	2611	5288	4569
2	5314	5460	4691	7792	5287
3	5347	5029	8333	2555	5778
Разлика	374	431	5722	5238	1209
Ранг	5	4	1	2	3

На слици 6.7 приказан је S/N одзив на количину уклоњеног материјала по утицајним факторима, док је на слици 6.8 приказан одзив количине уклоњеног материјала по утицајним факторима.

Слика 6.7. S/N одзив на количину уклоњеног материјала по утицајним факторима за функцију циља што веће то боље



Слика 6.8. Утицајни фактори на количину уклоњеног материјала - MRR

Анализом резултата, који су приказани у табели 6.9, као и на основу слике 6.8, може се закључити да највећи утицај на количину уклоњеног материјала имају помак, дубина обраде и стратегије обраде. Такође, најмањи утицај на количину уклоњеног материјала има број обртаја. На основу табеле 6.8 и слике 6.7, можемо одредити оптималне режиме обраде у оквиру понуђених нивоа фактора, а на основу функције циља “што већа вредност то боље”.

6.1.2.1 Анализа варијансе (ANOVA) за количину уклоњеног материјала

Анализа је спроведена са нивоом поузданости од 95%. У табели 6.10 приказани су резултати ANOVA анализе за количину уклоњеног материјала.

Резултати ANOVA анализе показују да су од пет улазних фактора, *F*-вредности фактора који се односе на помак и дубину обраде већи од критичне вредности *F_{cr}* (*F_{cr}* вредности на нивоу поверења од 95% једнака **3,35**) што имплицира да су ови фактори сигнификантни у поређењу са фактором грешке и да имају значајан утицај на одзивну површину. Док са друге стране дебљина зида, број обртаја и стратегије обраде немају значајни утицај, је су њихове *F*-вредности мање од критичне вредности *F_{cr}*. Дебљина зида на количину уклоњеног материјала не утиче јер је ограничена са становишта крутости, када се бирају режими. На количину уклоњеног материјала дебљина зида утиче са 0,24 %, број обртаја утиче са 0,28 % а, помак утиче са 46,38 %, дубина обраде утиче са 37,95 %, а стратегија обраде утиче са 2,04 %. На грешку експеримента отпада 13,11 %, односно на утицај других фактора који се при овом експерименту нису разматрали. Коефицијенти

ANOVA регресионе једначине за количину уклоњеног материјала приказани су у табели 6.11, а регресиона једначина је дата у наставку.

Табела 6.10. Резултати ANOVA анализе за количину уклоњеног материјала

Фактори	DF	Adj SS	Adj MS	F-Вредност	P-Вредност	Процентуално учешће % P
A	2	769496	384748	0,14	0,867	0,24
B	2	895428	447714	0,17	0,847	0,28
C	2	150972229	75486115	28,31	0,000	46,38
D	2	123527106	61763553	23,16	0,000	37,95
E	2	6655015	3327508	1,25	0,314	2,04
Грешка	16	42660272	2666267			13,11
Укупно	26	325479546				100,00

Табела 6.11. Коефицијенти ANOVA регресионе једначине

Фактори	Коеф.	SE Коеф.	T-Вредност	P-Вредност	VIF
Константе	5212	314	16,58	0,000	
A					
0,5	-238	444	-0,54	0,600	1,33
1,0	102	444	0,23	0,821	1,33
B					
6000	-66	444	-0,15	0,884	1,33
12000	249	444	0,56	0,584	1,33
C					
600	-2600	444	-5,85	0,000	1,33
1200	-521	444	-1,17	0,258	1,33
D					
1	76	444	0,17	0,866	1,33
2	2581	444	5,81	0,000	1,33
E					
1	-642	444	-1,45	0,168	1,33
2	75	444	0,17	0,867	1,33

6.1.2.2 Регресиона анализа за количину уклоњеног материјала

Путем регресионе анализе добија се једначина зависности улазних фактора, у овом експерименту дебљине зида, броја обртаја, помака, дубине обраде и стратегије обраде на излазну карактеристику, а то је у овом случају количина уклоњеног материјала. Једначина је дата у наставку:

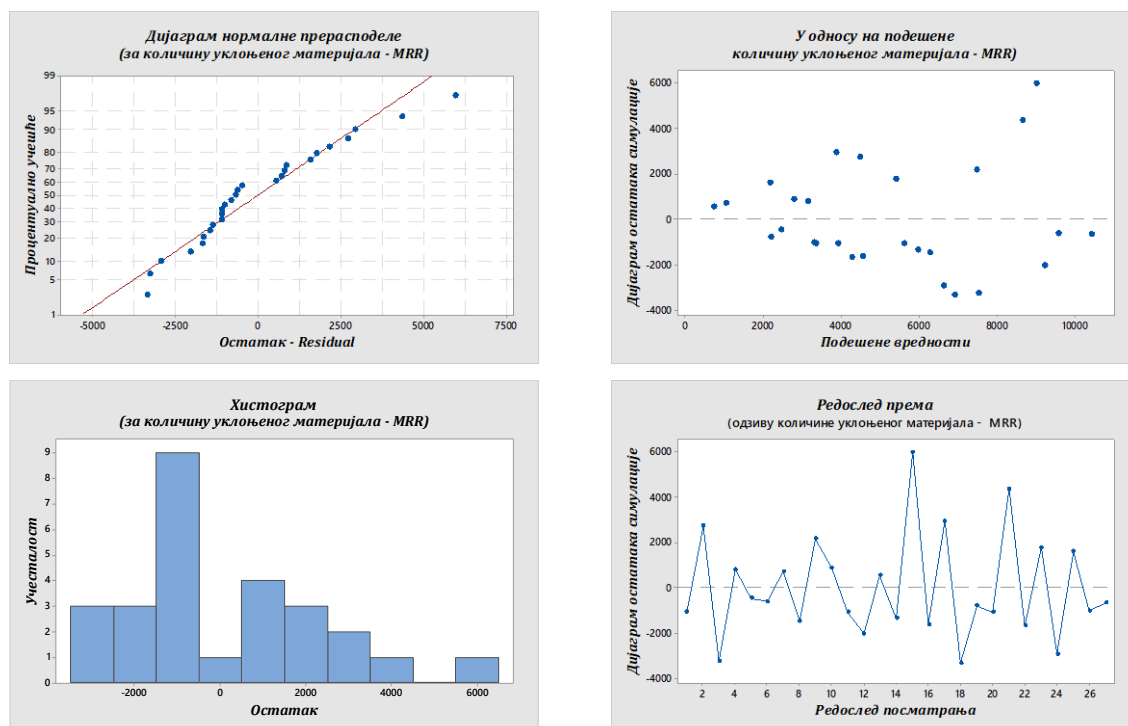
$$MRR = 5212 - 238A_{0,5} + 102A_{1,0} + 136A_{1,5} - 66B_{6000} + 249B_{12000} - 183B_{24000} - 2600C_{600} - 521C_{1200} + 3121C_{2400} + 76D_1 + 2581 D_2 - 2657D_3 - 642E_1 + 75E_2 + 567E_3 \quad (6.6)$$

У табели 6.12 приказани су коефицијенти регресионе једначине. На слици 6.9 приказане су одговарајуће расподеле за количину уклоњеног материјала. Слика 6.10 приказује контурни приказ различитих предикционих параметара на

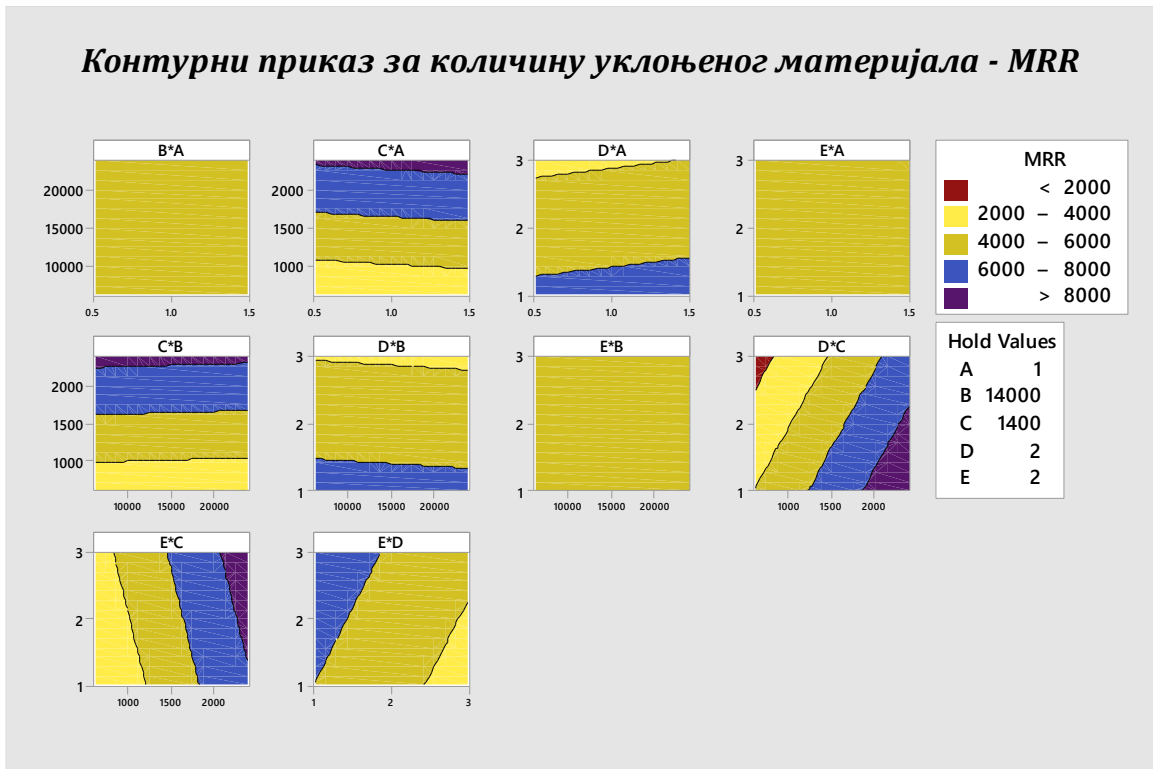
количину уклоњеног материјала, док је на слици 6.11 приказан површински приказ између два предикциона параметра и једног одзивног параметра.

Табела 6.12. Коефицијенти регресионе једначине за количину уклоњеног материјала

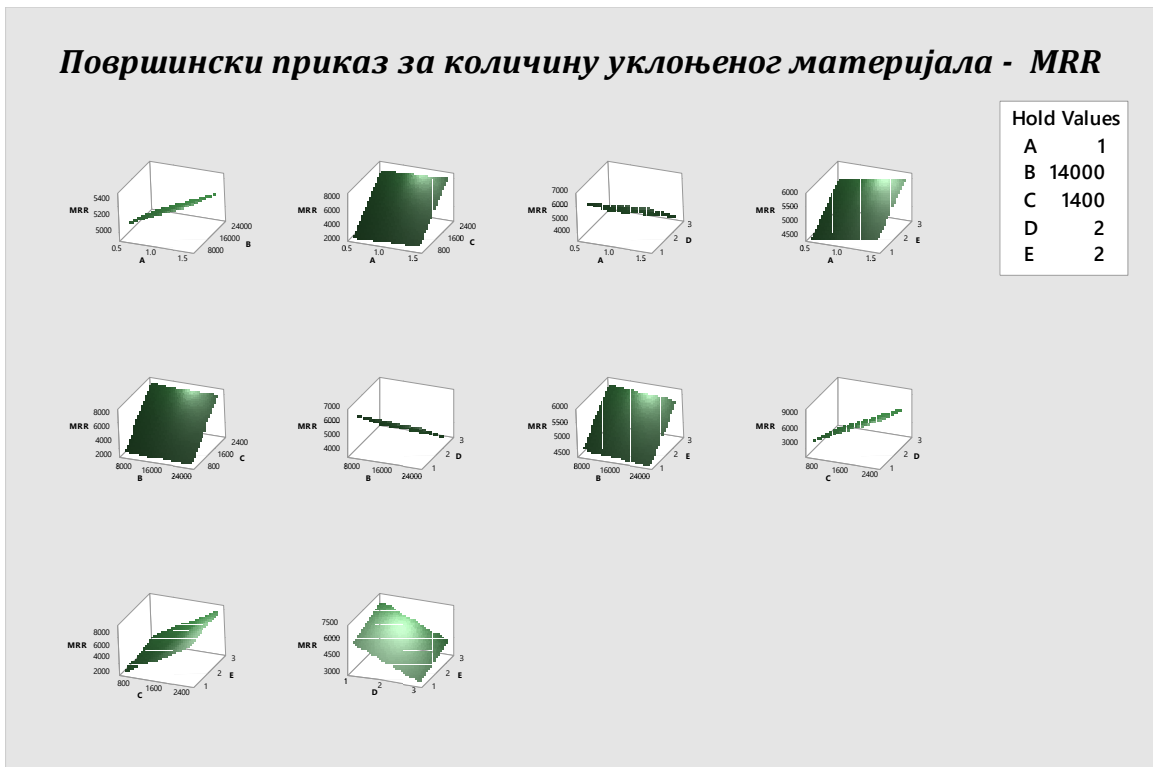
Фактори	Коеф.	SE Коеф.	T-Вредност	P-Вредност	VIF
Константе	2091	2476	0.84	0.408	
A	374	1189	0.31	0.756	1.00
B	-0.0107	0.0649	-0.17	0.871	1.00
C	3.158	0.649	4.87	0.000	1.00
D	-1367	595	-2.30	0.032	1.00
E	605	595	1.02	0.321	1.00



Слика 6.9. Одговарајуће расподеле за количину уклоњеног материјала



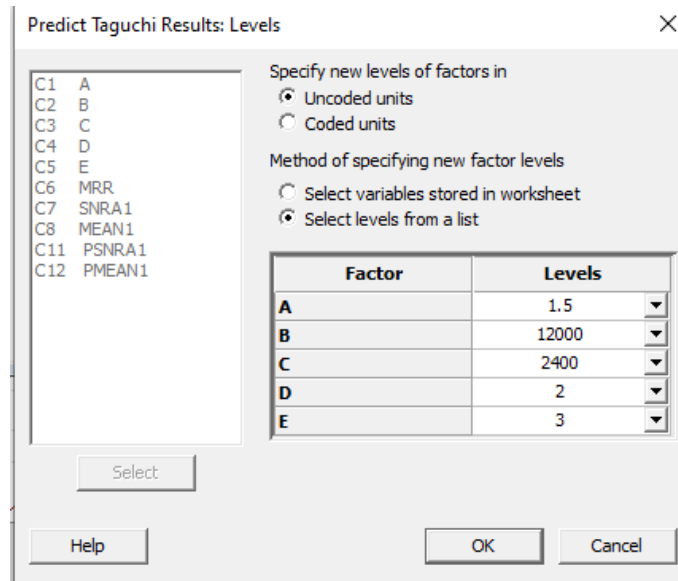
Слика 6.10. Контурни приказ различитих предикционих фактора на количину уклоњеног материјала



Слика 6.11. Површински приказ између два предикциона фактора и једног одзивног фактора (количине уклоњеног материјала)

6.1.2.3 Оптимизација добијених резултата за количину уклоњеног материјала

Након дефинисања оптималних улазних параметара за количину уклоњеног материјала, предвиђени су оптимални одзиви применом *Taguchi-јеве* и *ANOVA* методе. Предикција оптимума улазних параметара у циљу добијања највеће количине уклоњеног материјала применом *Taguchi-јеве* методе је пронађена на нивоу: *A3-B2-C3-D2-E3*. На слици 6.12 приказани су *Taguchi-јеве* предикциони резултати за оптималне улазне параметре применом софтвера *MiniTab*. Након проналажења оптималних улазних параметара и добијеног *S/N* одзива, применом једначине 6.6 добијена је зависност улазних фактора на количину уклоњеног материјала - *MRR*. У табели 6.13 приказани су оптимални улазни параметри и сигнификантни фактори.



Слика 6.12. Предикциони резултати за оптималне режиме обраде за количину уклоњеног материјала

Табела 6.13. Оптимални улазни параметри и сигнификантни параметри

Одзив	Оптимални улазни параметри	Сигнификантни параметри	Предикција оптималног одзива	
			<i>S/N</i> одзив	Вредност
Количина уклоњеног материјала - <i>MRR</i>	<i>A3-B2-C3-D2-E3</i>	<i>C-D</i>	82,3806	9183,8

6.1.3 Оптимизација параметара процеса обраде у функцији одступања дебљине зида танкозидног дела

Код анализе одступања дебљине зида танкозидне структуре посматра се утицај дебљине зида, броја обртаја, помака, дубине обраде и стратегије обраде на одступање дебљине зида танкозидне структуре – Δa . С обзиром да је потребно да одступање дебљине зида буде што мања, онда ће се за функцију циља изабрати “што мања вредност то боље”. За овако постављену функцију циља S/N за сваки експеримент се рачуна уз помоћ обрасца:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6.7)$$

У табели 6.14 приказани су вредности S/N односа за одступање дебљине зида танкозидног дела, на основу улазних вредности реализованих експеримената.

Табела 6.14. Вредност S/N односа за одступање дебљине зида – Δa .

Редни број	A	B	C	D	E	Одступање дебљине Δa	S/N однос
1	0,5	6000	600	1	1	0,042	27,5350
2	0,5	6000	1200	2	2	0,024	32,3958
3	0,5	6000	2400	3	3	0,022	33,1515
4	0,5	12000	600	2	3	0,016	35,9176
5	0,5	12000	1200	3	1	0,008	41,9382
6	0,5	12000	2400	1	2	0,006	44,4370
7	0,5	24000	600	3	2	0,008	41,9382
8	0,5	24000	1200	1	3	0,026	31,7005
9	0,5	24000	2400	2	1	0,038	28,4043
10	1,0	6000	600	2	2	0,060	24,4370
11	1,0	6000	1200	3	3	0,034	29,3704
12	1,0	6000	2400	1	1	0,002	53,9794
13	1,0	12000	600	3	1	0,004	47,9588
14	1,0	12000	1200	1	2	0,012	38,4164
15	1,0	12000	2400	2	3	0,026	31,7005
16	1,0	24000	600	1	3	0,034	29,3704
17	1,0	24000	1200	2	1	0,012	38,4164
18	1,0	24000	2400	3	2	0,008	41,9382
19	1,5	6000	600	3	3	0,016	35,9176
20	1,5	6000	1200	1	1	0,002	53,9794
21	1,5	6000	2400	2	2	0,066	23,6091
22	1,5	12000	600	1	2	0,032	29,8970
23	1,5	12000	1200	2	3	0,008	41,9382
24	1,5	12000	2400	3	1	0,002	53,9794
25	1,5	24000	600	2	1	0,002	53,9794
26	1,5	24000	1200	3	2	0,012	38,4164
27	1,5	24000	2400	1	3	0,002	53,9794

Средњи S/N одзив за сваки утицајни фактор је приказан у табели 6.15 а одзив средње хрпавости за сваки утицајни фактор је приказан у табели 6.16.

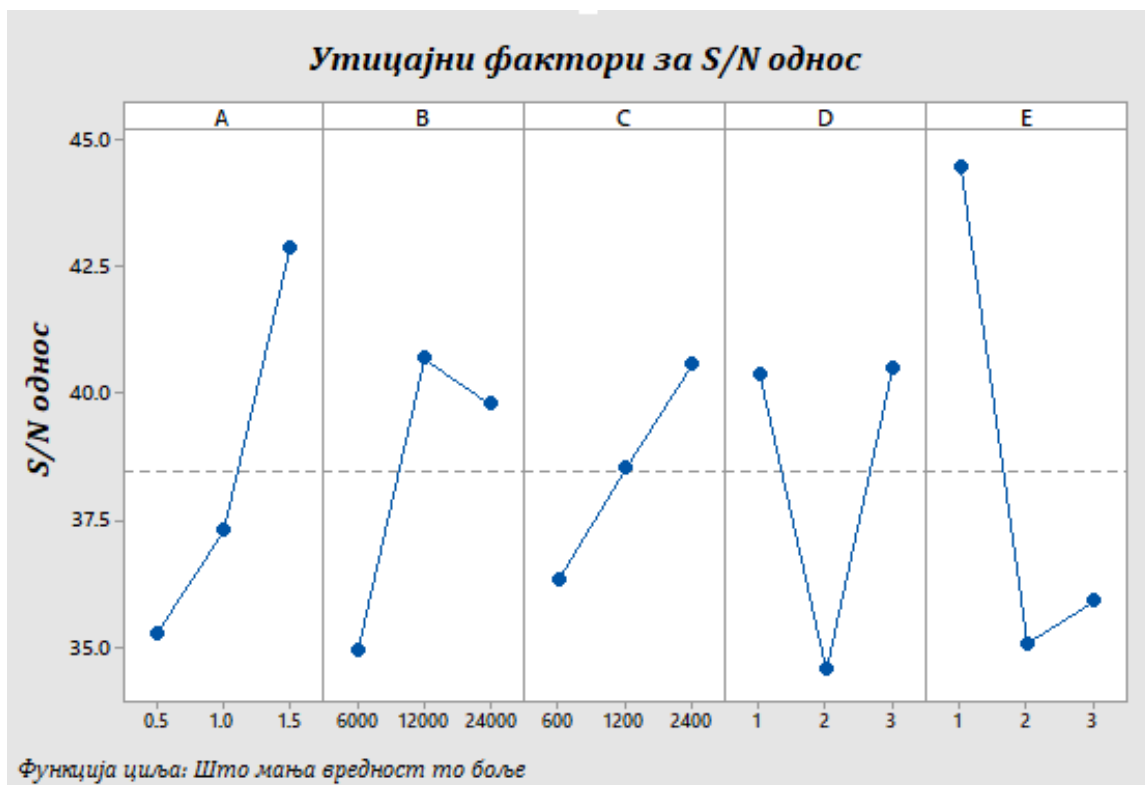
Табела 6.15. S/N одзив за одступање дебљине зида за функцију циља мање је боље

Ниво	A	B	C	D	E
1	35,27	34,93	36,33	40,37	44,46
2	37,29	40,69	38,51	34,53	35,05
3	42,86	39,79	40,58	40,51	35,89
Разлика	7,59	5,76	4,25	5,98	9,41
Ранг	2	4	5	3	1

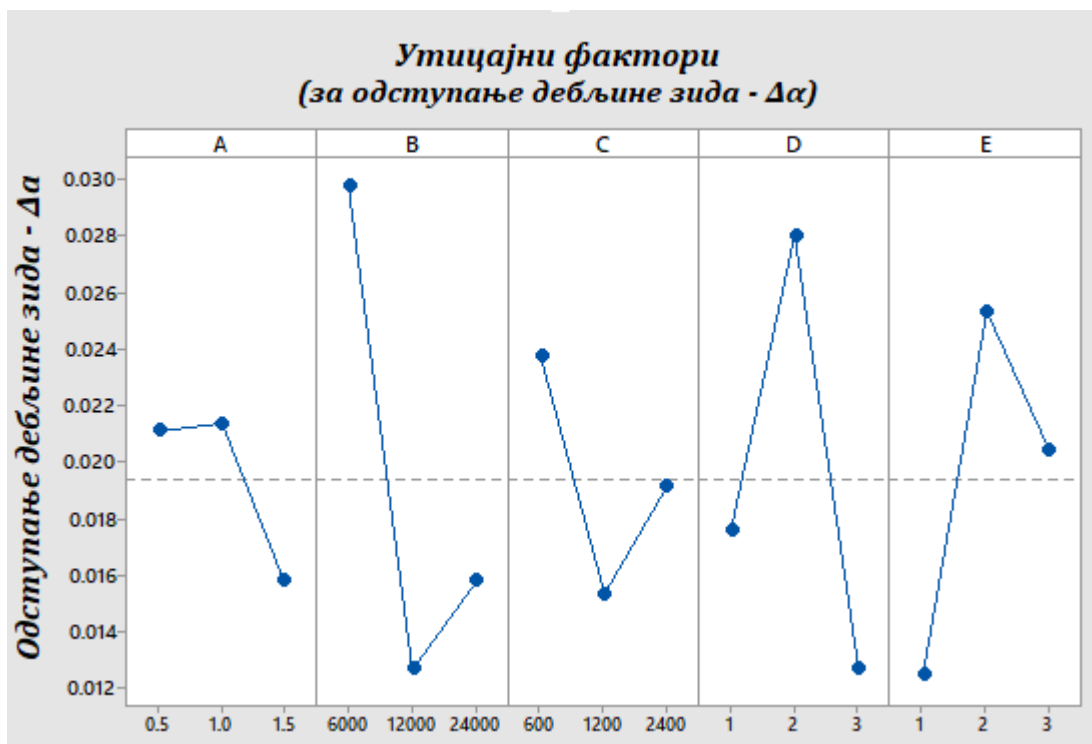
Табела 6.16. Одзив одступање дебљине зида по утицајним факторима

Ниво	A	B	C	D	E
1	0,02111	0,02978	0,02378	0,01756	0,01244
2	0,02133	0,01267	0,01533	0,02800	0,02533
3	0,01578	0,01578	0,01911	0,01267	0,02044
Разлика	0,00556	0,01711	0,00844	0,01533	0,01289
Ранг	5	1	4	2	3

На слици 6.13 приказан је S/N одзив за одступање дебљине зида, док је на слици 6.14 приказано одступање дебљине зида по утицајним факторима.



Слика 6.13. S/N одзив за одступање дебљине зида



Слика 6.14. Утицајни фактори на одступање дебљине зида

Анализом резултата, који су приказани у табели 6.15, као и на основу слике 6.13, може се закључити да највећи утицај на одступање дебљине зида имају стратегија обраде, дебљина зида и дубина обраде. Такође, најмањи утицај на одступање дебљине зида има помак. На основу табеле 6.16 и слике 6.14, може се одредити оптимални режими обраде у оквиру понуђених нивоа фактора, а на основу функције циља “што мања вредност то је боље”.

6.1.3.1 Анализа варијансе (ANOVA) за одступање дебљине зида

Резултати ANOVA анализе показују да су свих пет улазних фактора, F -вредности улазних фактора мањи од критичне вредности F_{cr} (F_{cr} вредности на нивоу поверења од 95% једнака **3,35**) што имплицира да су ови фактори несигнификантни. Резултати анализе варијансе за анализу одступања дебљине зида су приказани у табели 6.17. Анализа је спроведена са нивоом поузданости од 95%.

На одступање дебљине зида, фактор дебљина зида утиче са 2,22 %, број обртаја утиче са 18,65 %, помак утиче са 4,02 %, дубина обраде утиче са 13,77 %, а стратегија обраде утиче са 9,51 %. На грешку експеримента отпада 51,82 % односно на утицај других фактора који се при овом експерименту нису разматрали.

Коефицијенти ANOVA регресионе једначине за количину уклоњеног материјала приказани су у табели 6.18, а регресиона једначина је дата у наставку.

Табела 6.17. Резултати ANOVA анализе за одступање дебљине зида

Фактори	DOF	Adj SS	Adj MS	F-Вредност	P-Вредност	Процентуално учешће % P
A	2	0.000178	0.000089	0.34	0.715	2,22
B	2	0.001495	0.000748	2.88	0.085	18,65
C	2	0.000322	0.000161	0.62	0.55	4,02
D	2	0.001104	0.000552	2.13	0.152	13,77
E	2	0.000762	0.000381	1.47	0.26	9,51
Грешке	16	0.004153	0.00026			51,82
Укупно	26	0.008015				

Табела 6.18. Коефицијенти ANOVA регресионе једначине

Фактори	Коеф.	SE Коеф.	T-Вредност	P-Вредност	VIF
Константе	0,01941	0,00310	6,26	0,000	
A					
0.5	0,00170	0,00438	0,39	0,703	1,33
1.0	0,00193	0,00438	0,44	0,666	1,33
B					
6000	0,01037	0,00438	2,37	0,031	1,33
12000	-0,00674	0,00438	-1,54	0,144	1,33
C					
600	0,00437	0,00438	1,00	0,334	1,33
1200	-0,00407	0,00438	-0,93	0,367	1,33
D					
1	-0,00185	0,00438	-0,42	0,678	1,33
2	0,00859	0,00438	1,96	0,068	1,33
E					
1	-0,00696	0,00438	-1,59	0,132	1,33
2	0,00593	0,00438	1,35	0,195	1,33

6.1.3.2 Регресиона анализа за одступање дебљине зида - Да

Путем регресионе анализе добија се једначина зависности улазних фактора, у овом експерименту дебљине зида, броја обртаја, помака, дубине обраде и стратегије обраде на излазну карактеристику, а то је у овом случају одступање дебљине зида. Једначина је дата у наставку:

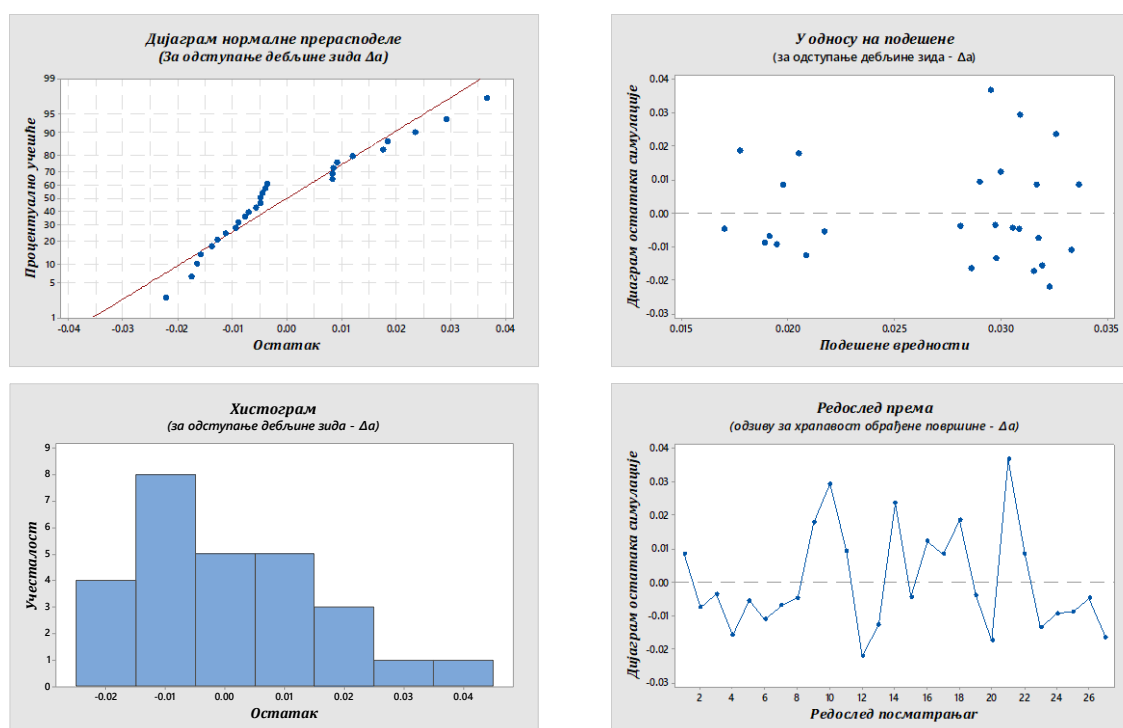
$$\text{Одступање}\Delta = 0,01941 + 0,00170A_{0,5} + 0,00193A_{1,0} + 0,00363A_{1,5} + 0,01037B_{6000} - 0,00674B_{12000} - 0,00363B_{24000} + 0,00437C_{600} - 0,00407C_{1200} - 0,00030C_{2400} - 0,00185D_1 + 0,00859D_2 - 0,00674D_3 - 0,00696E_1 + 0,00593E_2 + 0,00104E_3 \quad (6.8)$$

У табели 6.19 приказани су коефицијенти регресионе једначине. На слици 6.15 приказане су одговарајуће расподеле за одступање дебљине зида - Да. Слика 6.16 приказује контурни приказ различитих предикционих параметара за

одступање дебљине зида - Δa , док је на слици 6.17 приказан површински приказ између два предикциона параметра и једног одзивног параметра.

Табела 6.19. Коефицијенти регресионе једначине за одступање дебљине зида - Δa

Фактори	Коеф.	SE Коеф.	T-Вредност	P-Вредност	VIF
Константе	0,0329	0,0177	1,86	0,077	
A	-0,00533	0,00851	-0,63	0,538	1,00
B	-0,000001	0,000000	-1,36	0,189	1,00
C	-0,000002	0,000005	-0,38	0,706	1,00
D	-0,00244	0,00426	-0,57	0,572	1,00
E	0,00400	0,00426	0,94	0,358	1,00



Слика 6.15. Приказ одговарајућих расподела за одступање дебљине зида - Δa



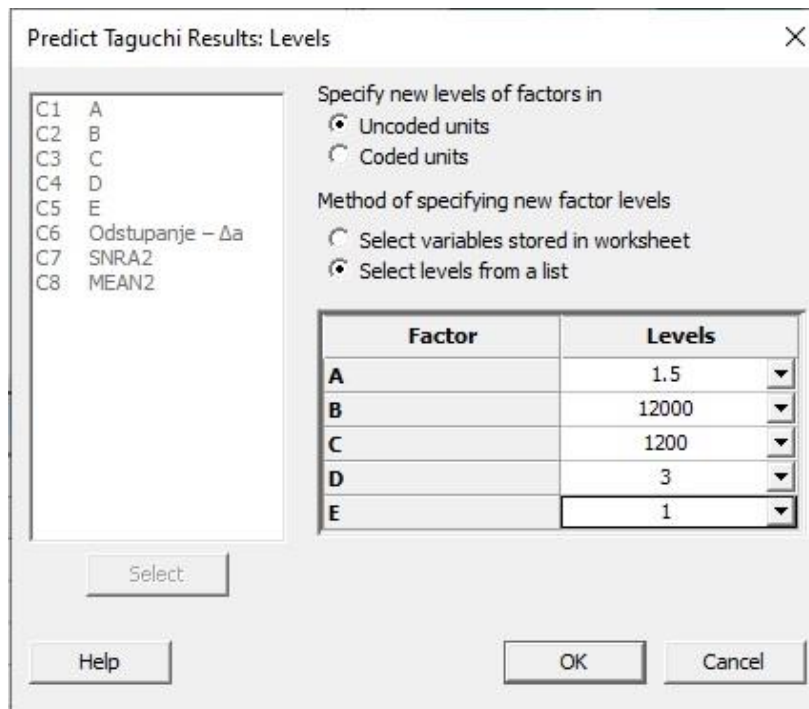
Слика 6.16. Приказује контурни приказ различитих предикционих параметара за одступање дебљине зида - Δa



Слика 6.17. Приказан површински приказ између два предикциона параметра и једног одзивног параметра

6.1.3.3 Оптимизација добијених резултата за одступање дебљине зида

Након дефинисања оптималних улазних параметара, предвиђени су оптимални одзиви применом *Taguchi-јеве* и *ANOVA* методе. Предикција оптимума улазних параметара у циљу добијања најмањег одступања дебљине зида применом *Taguchi-јеве* методе је пронађена на нивоу: *A3-B2-C2-D3-E1*. На слици 6.18 приказани су *Taguchi-јеве* предикциони резултати за оптималне улазне параметре применом софтвера *MiniTab* (улазне факторе). Након проналажења оптималних улазних параметара и добијеног *S/N* одзив, применом једначине 6.3 добијена је зависност улазних фактора на одступање дебљине зида Δa . У табели 6.20 приказани су оптимални улазни параметри и сигнификантни фактори.



Слика 6.18. *Taguchi-јеве* предикциони резултати за оптималне улазне параметре применом софтвера *MiniTab*

Табела 6.20. Оптимални улазни параметри и сигнификантни параметри

Одзив	Оптимални улазни параметри	Сигнификантни параметри	Предикција оптималног одзива	
			<i>S/N</i> одзив	Вредност
Одступање дебљине зида - Δa	<i>A3-B2-C2-D3-E1</i>	-	36.8938	0,00234

6.1.4 Оптимизација параметара процеса обраде у функцији равности површина

Код анализе равности површина посматра се утицај дебљине зида, броја обртаја, помака, дубине обраде и стратегије обраде на равност површина - Δb . С обзиром да равност површине треба да буде што мања, онда ће се за функцију циља изабрати “што мања вредност то боље”. За овако постављену функцију циља S/N за сваки експеримент се рачуна уз помоћ обрасца:

$$S/N = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6.9)$$

У табели 6.21 приказани су вредности S/N односа за одступање дебљине зида танкозидног дела, на основу улазних вредности.

Табела 6.21. Вредност S/N односа за равност површина

Редни број	A	B	C	D	E	Равност површина Δb	S/N однос
1	0,5	6000	600	1	1	0,03875	28,2346
2	0,5	6000	1200	2	2	0,12725	17,9068
3	0,5	6000	2400	3	3	0,04925	26,1519
4	0,5	12000	600	2	3	0,0485	26,2852
5	0,5	12000	1200	3	1	0,03475	29,1809
6	0,5	12000	2400	1	2	0,06475	23,7752
7	0,5	24000	600	3	2	0,04175	27,5869
8	0,5	24000	1200	1	3	0,03375	29,4345
9	0,5	24000	2400	2	1	0,03975	28,0133
10	1,0	6000	600	2	2	0,0575	24,8066
11	1,0	6000	1200	3	3	0,02525	31,9548
12	1,0	6000	2400	1	1	0,0205	33,7649
13	1,0	12000	600	3	1	0,0115	38,7860
14	1,0	12000	1200	1	2	0,02375	32,4867
15	1,0	12000	2400	2	3	0,0365	28,7541
16	1,0	24000	600	1	3	0,0165	35,6503
17	1,0	24000	1200	2	1	0,0155	36,1934
18	1,0	24000	2400	3	2	0,02475	32,1285
19	1,5	6000	600	3	3	0,26175	11,6423
20	1,5	6000	1200	1	1	0,273	11,2767
21	1,5	6000	2400	2	2	0,31675	9,9857
22	1,5	12000	600	1	2	0,28875	10,7896
23	1,5	12000	1200	2	3	0,2985	10,5011
24	1,5	12000	2400	3	1	0,271	11,3406
25	1,5	24000	600	2	1	0,271	11,3406
26	1,5	24000	1200	3	2	0,27875	11,0957
27	1,5	24000	2400	1	3	0,27475	11,2212

Средњи S/N одзив за сваки утицајни фактор је приказан у табели 6.22, а одзив равности површина за сваки утицајни фактор је приказан у табели 6.23.

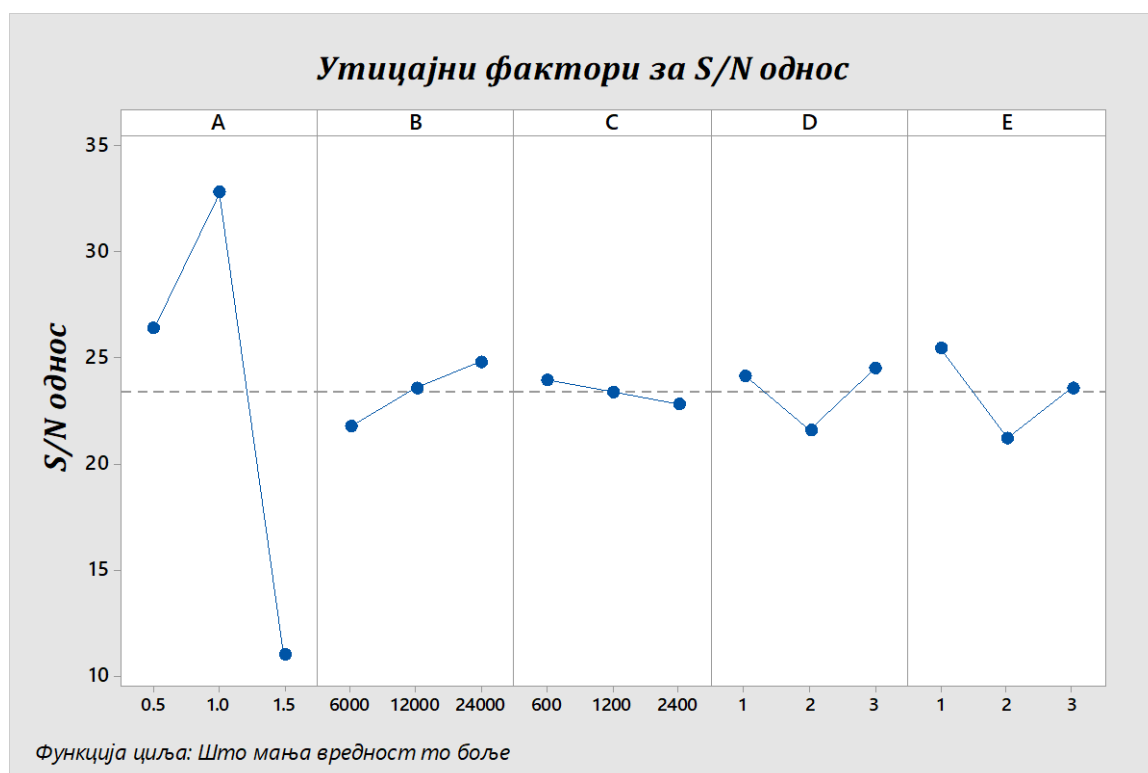
Табела 6.22. S/N одзив за равност површина за функцију циља мање је боље-брисати зелене-осечена

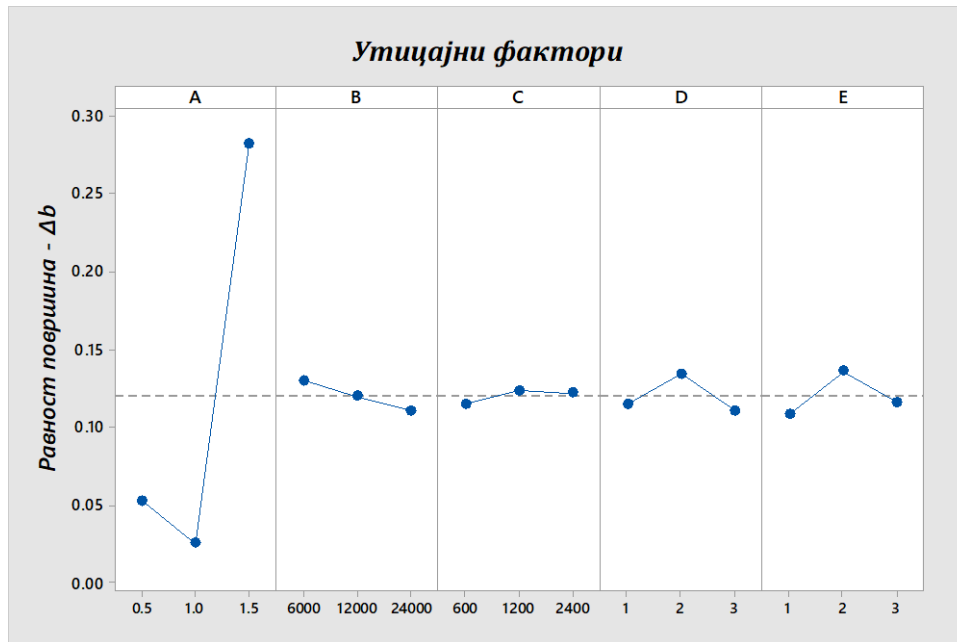
Ниво	A	B	C	D	E
1	26,29	21,75	23,90	24,07	25,35
2	32,73	23,54	23,34	21,53	21,17
3	11,02	24,74	22,79	24,43	23,51
Разлика	21,70	2,99	1,11	2,90	4,17
Ранг	1	3	5	4	2

Табела 6.23. Одзив равности површина по утицајним факторима

Ниво	A	B	C	D	E
1	0,05317	0,13000	0,11511	0,11494	0,10842
2	0,02575	0,11978	0,12339	0,13458	0,13600
3	0,28158	0,11072	0,12200	0,11097	0,11608
Разлика	0,25583	0,01928	0,00828	0,02361	0,02758
Ранг	1	4	5	3	2

На слици 6.19 приказани су утицајни фактори за S/N однос на равности површина, док су на слици 6.20 приказани утицајних фактора на равност површина.

Слика 6.19. S/N одзив за равност површина



Слика 6.20. Утицајни фактори на равност површина

Анализом резултата, који су приказани у табели 6.22, као и на основу слике 6.20, може се закључити да највећи утицај на равност површина имају дебљина зида, стратегија обраде и број обртаја. Такође, најмањи утицај на одступање дебљине зида има помак. На основу табеле 6.23 и слике 6.19, можемо одредити оптималне режиме обраде у оквиру понуђених нивоа фактора, а на основу функције циља “што мања вредност то је боље”.

6.1.4.1 Анализа варијансе (ANOVA) за одступање дебљине зида

Резултати ANOVA анализе показују да су од свих пет улазних фактора, *F*-вредности улазних фактора једино фактор помака нема вредност већу од критичне вредности *F_{cr}* (*F_{cr}* вредности на нивоу поверења од 95% једнака **3,35**) што имплицира да је овај фактор несигнификантан, док су остали фактори сигнификантани. Међутим, поређењем процентуалног учешћа сигнификантних фактора, дебљина зида је значајно доминантна, па је она узета као сигнификантан фактор. Резултати анализе варијансе за анализу производности су приказани у табели 6.24. Анализа је спроведена са нивоом поузданости од 95%.

На одступање равности површина, фактор дебљина зида утиче са 97,06 %, број обртаја утиче са 0,460 %, помак утиче са 0,097 %, дубина обраде утиче са 0,790 %, а стратегија обраде утиче са 1 %. На грешку експеримента отпада 0,600 % односно на утицај других фактора који се при овом експерименту нису разматрали.

Коефицијенти ANOVA регресионе једначине за количину уклоњеног материјала приказани су у табели 6.25, а регресиона једначина је дата у наставку.

Табела 6.24. Резултати ANOVA анализе за равност површина

Фактори	DOF	Adj SS	Adj MS	F-Вредност	P-Вредност	Процентуално учешће % P
A	2	0,355130	0,177565	1285,37	0,000	97,06
B	2	0,001674	0,000837	6,06	0,011	0,46
C	2	0,000354	0,000177	1,28	0,305	0,097
D	2	0,002877	0,001438	10,41	0,001	0,79
E	2	0,003649	0,001824	13,21	0,000	1,00
Грешка	16	0,002210	0,000138			0,60
Укупно	26	0,365894				

Табела 6.25. Коефицијенти ANOVA регресионе једначине

Фактори	Коеф.	SE Коеф.	T-Вредност	P-Вредност	VIF
Константе	0,12017	0,00226	53,13	0,000	
A					
0,5	-0,06700	0,00320	-20,94	0,000	1,33
1,0	-0,09442	0,00320	-29,52	0,000	1,33
B					
6000	0,00983	0,00320	3,07	0,007	1,33
12000	-0,00039	0,00320	-0,12	0,905	1,33
C					
600	-0,00506	0,00320	-1,58	0,134	1,33
1200	0,00322	0,00320	1,01	0,329	1,33
D					
1	-0,00522	0,00320	-1,63	0,122	1,33
2	0,01442	0,00320	4,51	0,000	1,33
E					
1	-0,01175	0,00320	-3,67	0,002	1,33
2	0,01583	0,00320	4,95	0,000	1,33

6.1.4.3 Регресиона анализа за одступање дебљине зида

Путем регресионе анализе добићемо једначину зависности улазних фактора, у овом експерименту дебљине зида, броја обртаја, помака, дубине обраде и стратегије обраде на излазну карактеристику, а то је у овом случају равност површина. Једначина је дата у наставку:

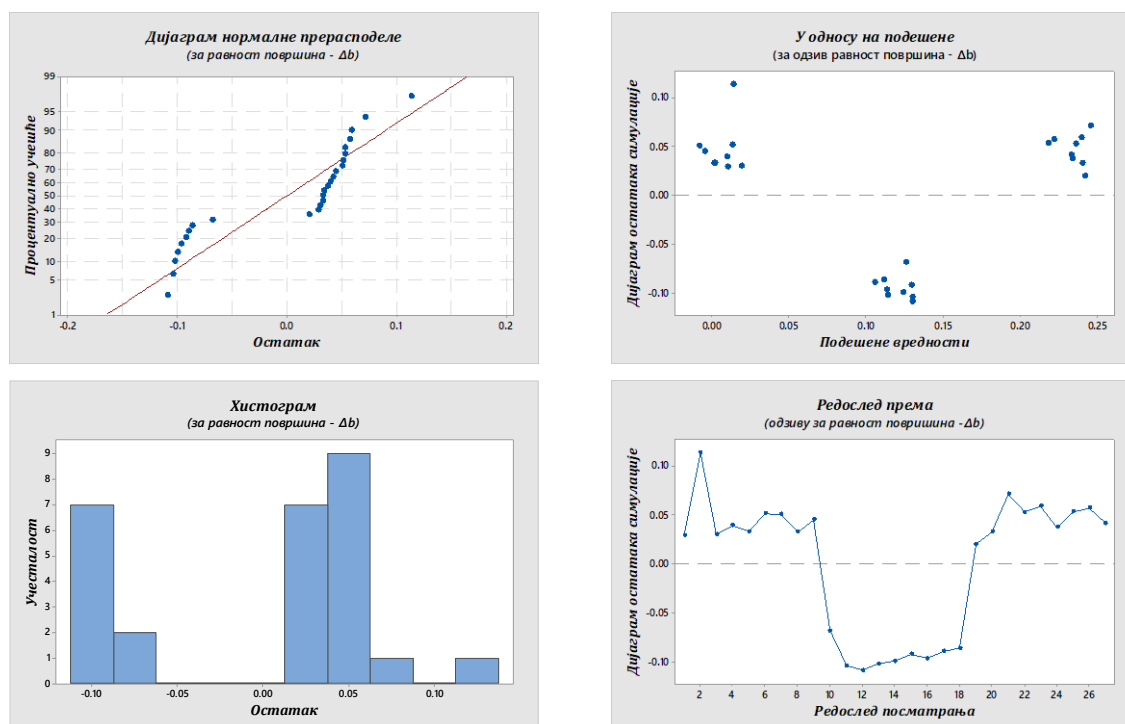
$$\Delta b\text{-равност површина} = 0,12017 - 0,06700A_{0,5} - 0,09442A_{1,0} + 0,16142A_{1,5} + 0,00983B_{6000} - 0,00039B_{12000} - 0,00944B_{24000} - 0,00506C_{600} + 0,00322C_{1200} + 0,00183C_{2400} - 0,00522D_1 + 0,01442D_2 - 0,00919D_3 - 0,01175E_1 + 0,01583E_2 - 0,00408E_3 \quad (6.10)$$

У табели 6.26 приказани су коефицијенти регресионе једначине. На слици 6.21 приказане су одговарајуће расподеле за одступање дебљине зида - Δb . Слика 6.22 приказује контурни приказ различитих предикционих параметара за

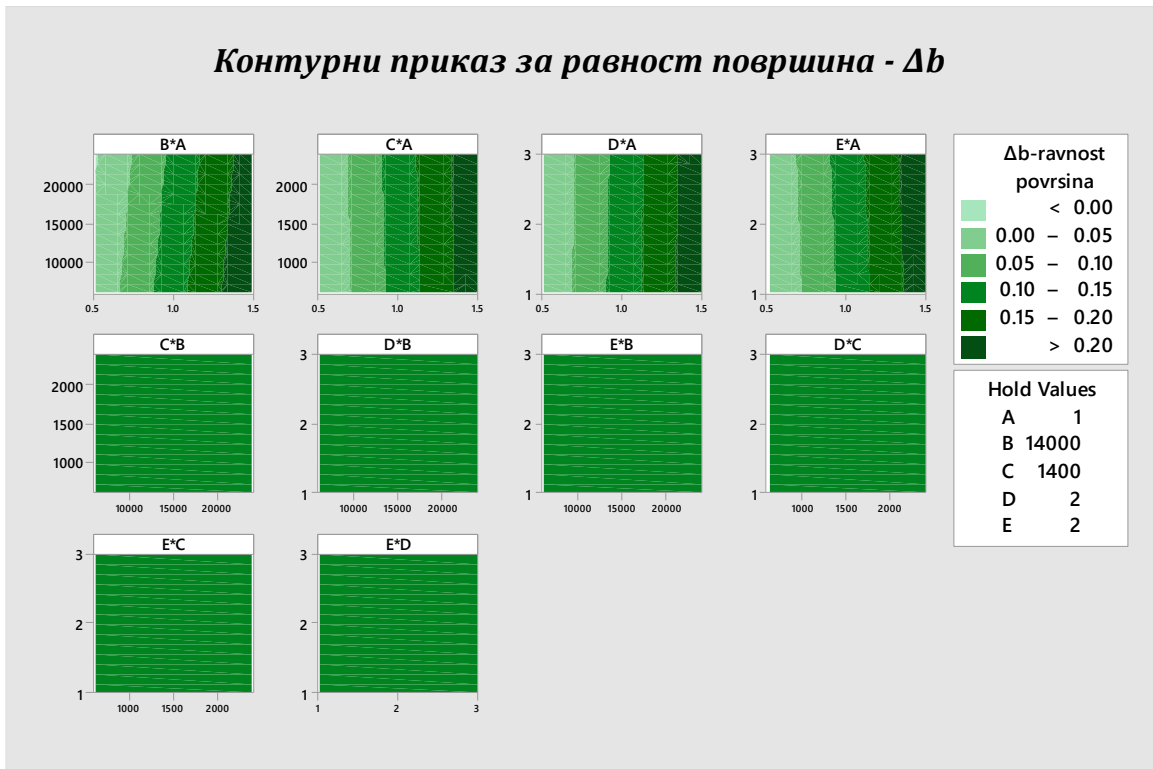
одступање равности површина - Δb , док је на слици 6.23 приказан површински приказ између два предикциона параметра и једног одзивног параметра.

Табела 6.26. Коефицијенти регресионе једначине за равност површина

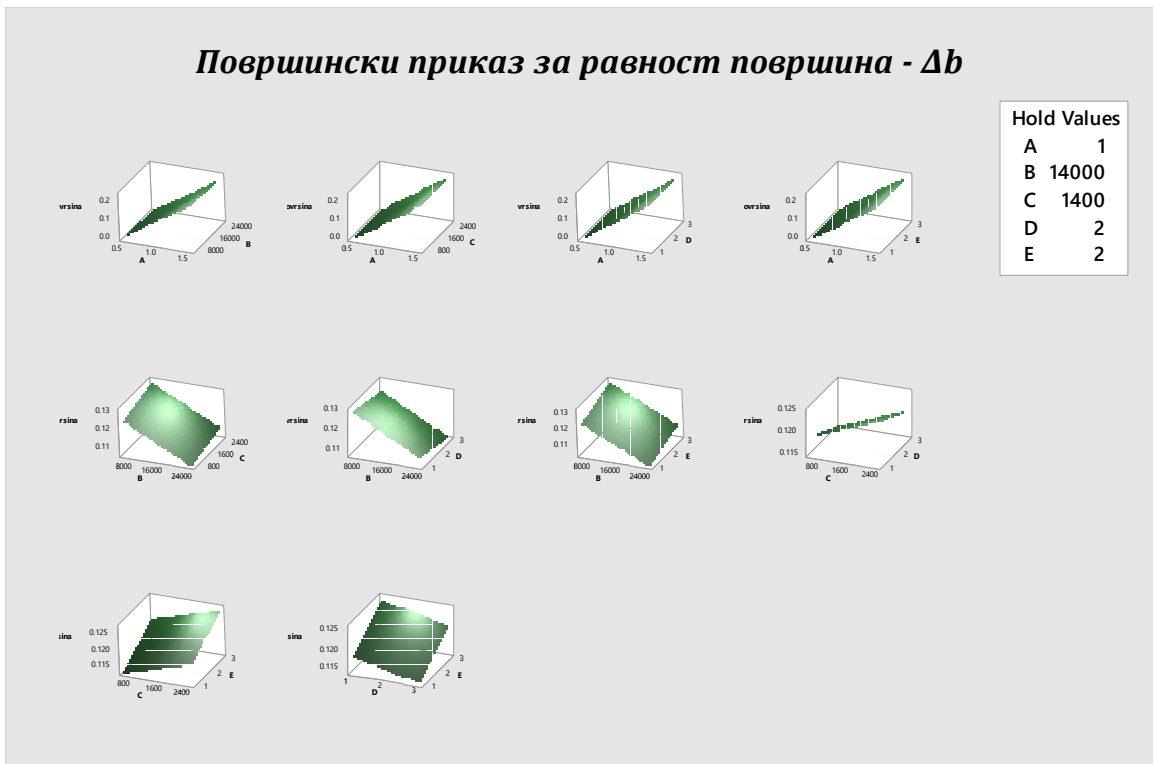
Фактори	Коеф.	SE Коеф.	T-Вредност	P-Вредност	VIF
Константе	-0,1019	0,0769	-1,33	0,199	
A	0,2284	0,0370	6,18	0,000	1,00
B	-0,000001	0,000002	-0,51	0,616	1,00
C	0,000003	0,000020	0,15	0,879	1,00
D	-0,0020	0,0185	-0,11	0,915	1,00
E	0,0038	0,0185	0,21	0,838	1,00



Слика 6.21. Приказ одговарајућих расподела за равност површина



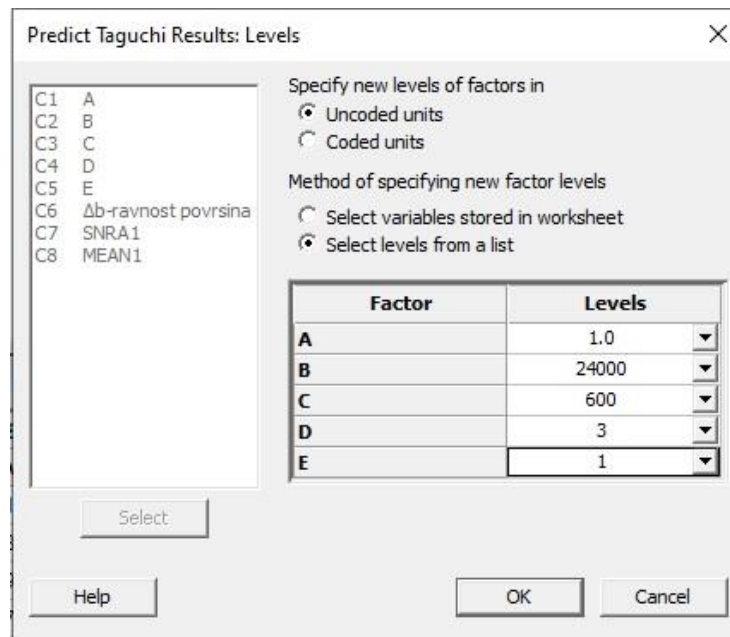
Слика 6.22. Контурни приказ различитих предикционих параметара за одступање равности површина - Δb



Слика 6.23. Површински приказ између два предикциона параметра и једног одзивног параметра за одступање равности површина

6.1.4.2 Оптимизација добијених резултата за одступање равности површина

Након дефинисања оптималних режима обраде, предвиђени су оптимални одзиви применом *Taguchi-јеве* и *ANOVA* методе. Предикција оптимума улазних параметара у циљу добијања најмањег одступања равности површина применом *Taguchi-јеве* методе је пронађена на нивоу: *A2-B3-C1-D3-E1*. На слици 6.24 приказани су *Taguchi-јеве* предикциони резултати за оптималне режиме обраде применом софтвера *MiniTab*. Након проналажења оптималних режима обраде и добијеног *S/N* одзив, применом једначине 6.3 добијена је зависност улазних фактора на равност површина Δb . У табели 6.27 приказани су улазни параметри и сигнификантни параметри.



Слика 6.24. *Taguchi-јеве* предикциони резултати за оптималне улазне параметре применом софтвера *MiniTab*

Табела 6.27. Оптимални улазни параметри и сигнификантни параметри

Одзив	Оптимални улазни параметри	Сигнификантни параметри	Предикција оптималног одзива	
			<i>S/N</i> одзив	Вредност
Равност површина Δb	<i>A2-B3-C1-D3-E1</i>	A	4.89084	0,2443

6.1.5 Оптимизација параметара процеса обраде у функцији паралелности површина

Код анализе паралелности посматра се утицај дебљине зида, броја обртаја, помака, дубине обраде и стратегије обраде на паралелност површина - Δc . С обзиром да функција циља за паралелност површина треба да буде што мања, онда ће се за функцију циља изабрати “што мања вредност то боље”. За овако постављену функцију циља S/N за сваки експеримент се рачуна уз помоћ обрасца:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6.11)$$

У табели 6.28 приказани су вредности S/N односа за паралелност површина, на основу улазних вредности.

Табела 6.28. Вредност S/N односа за паралелност површина

Редни број	A	B	C	D	E	Паралелност површина Δc	S/N однос
1	0,5	6000	600	1	1	0,069	23,2230
2	0,5	6000	1200	2	2	0,242	12,3416
3	0,5	6000	2400	3	3	0,085	21,4628
4	0,5	12000	600	2	3	0,104	19,7011
5	0,5	12000	1200	3	1	0,065	23,8088
6	0,5	12000	2400	1	2	0,109	19,2914
7	0,5	24000	600	3	2	0,116	18,7108
8	0,5	24000	1200	1	3	0,088	21,1598
9	0,5	24000	2400	2	1	0,069	23,2861
10	1,0	6000	600	2	2	0,136	17,3612
11	1,0	6000	1200	3	3	0,136	17,3612
12	1,0	6000	2400	1	1	0,114	18,9000
13	1,0	12000	600	3	1	0,089	21,0122
14	1,0	12000	1200	1	2	0,060	24,4369
15	1,0	12000	2400	2	3	0,091	20,8670
16	1,0	24000	600	1	3	0,131	17,6877
17	1,0	24000	1200	2	1	0,079	22,0474
18	1,0	24000	2400	3	2	0,096	20,3545
19	1,5	6000	600	3	3	0,093	20,6771
20	1,5	6000	1200	1	1	0,212	13,4937
21	1,5	6000	2400	2	2	0,317	9,99252
22	1,5	12000	600	1	2	0,218	13,2308
23	1,5	12000	1200	2	3	0,279	11,0879
24	1,5	12000	2400	3	1	0,179	14,9429
25	1,5	24000	600	2	1	0,348	9,16841
26	1,5	24000	1200	3	2	0,262	11,65057
27	1,5	24000	2400	1	3	0,210	13,55561

Средњи S/N одзив за сваки утицајни фактор је приказан у табели 6.29, а одзив паралелности површина за сваки утицајни фактор је приказан у табели 6.30.

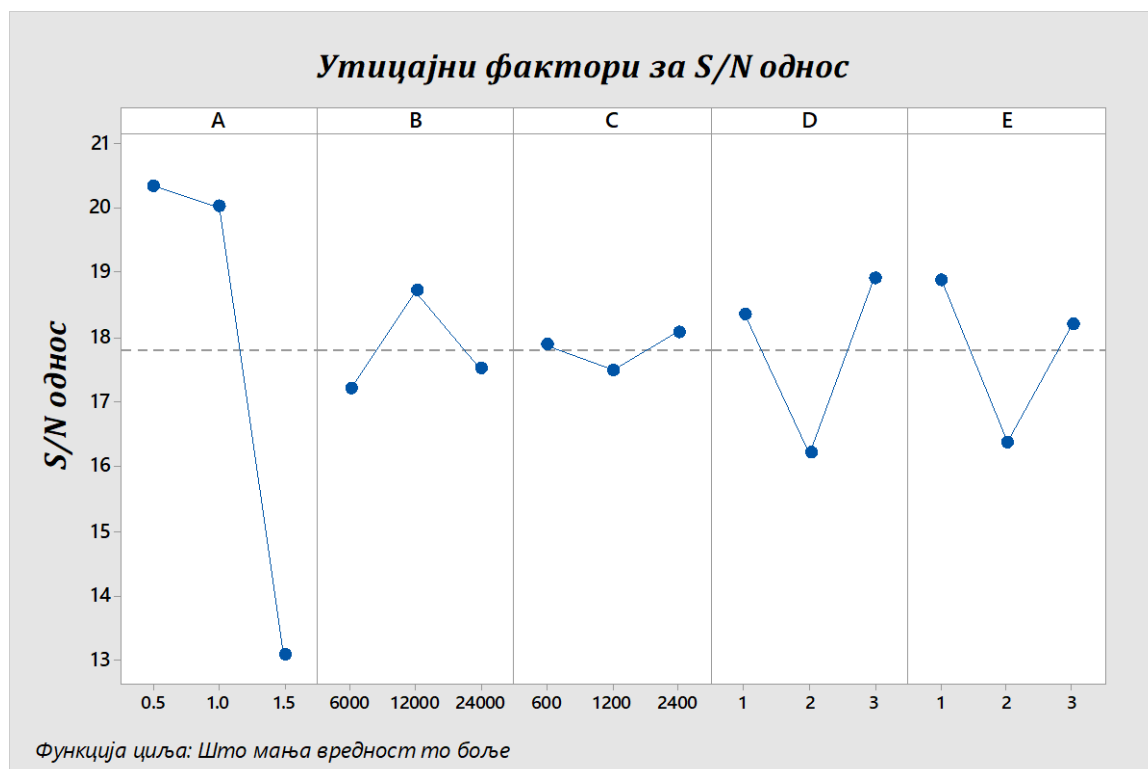
Табела 6.29. S/N одзив за паралелност површина за функцију циља мање је боље-

Ниво	A	B	C	D	E
1	20,33	17,20	17,86	18,33	18,88
2	20,00	18,71	17,49	16,21	16,37
3	13,09	17,51	18,07	18,89	18,17
Разлика	7,24	1,51	0,59	2,68	2,50
Ранг	1	4	5	2	3

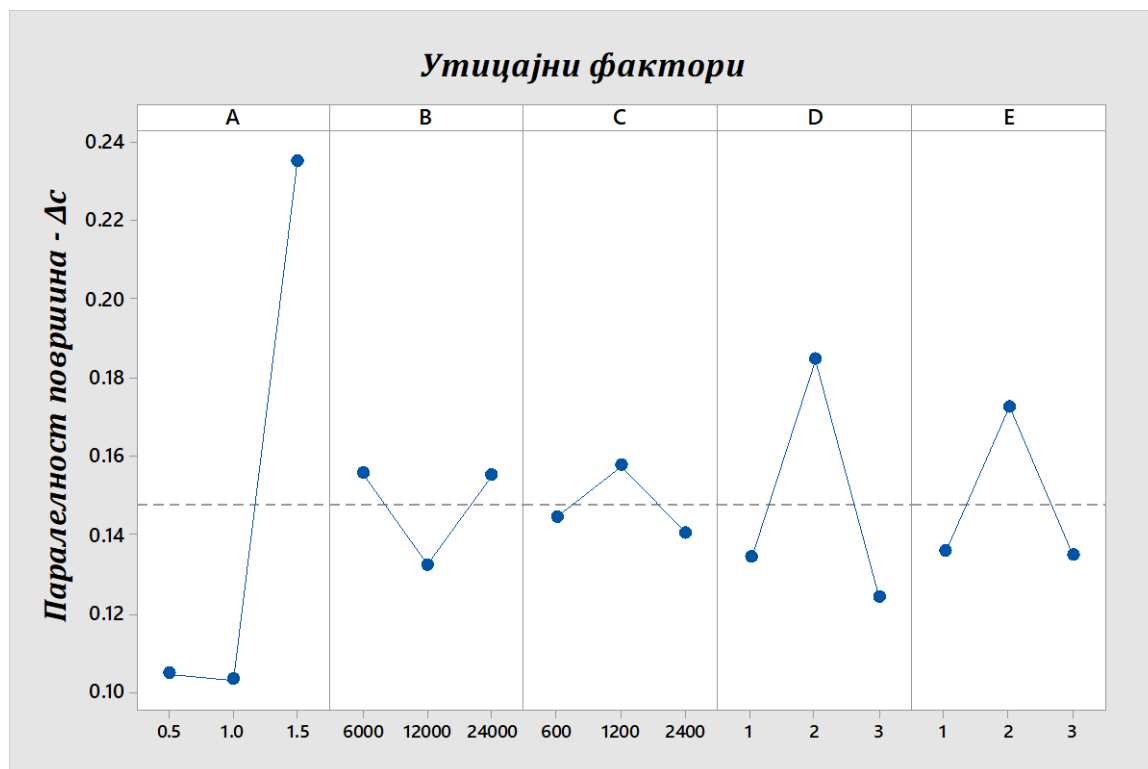
Табела 6.30. Одзив паралелности површина по утицајним факторима

Ниво	A	B	C	D	E
1	0,1048	0,1556	0,1447	0,1343	0,1358
2	0,1033	0,1324	0,1578	0,1847	0,1726
3	0,2351	0,1552	0,1408	0,1243	0,1348
Разлика	0,1318	0,0231	0,0170	0,0604	0,0378
Ранг	1	4	5	2	3

На слици 6.25 приказан је S/N одзив за одступање паралелности површина по утицајним факторима, док је на слици 6.26 приказан одзив паралелности површина по утицајним факторима.



Слика 6.25. S/N однос за паралелност површина



Слика 6.26. Одзив паралелности површина по утицајним факторима

Анализом резултата, који су приказани у табели 6.29, као и на основу слике 6.25, може се закључити да највећи утицај на паралелност површина имају дебљина зида, дубина обраде и стратегија обраде. Такође, најмањи утицај на одступање дебљине зида има помак. На основу табеле 6.30 и слике 6.26 можемо одредити оптималне режиме обраде у оквиру понуђених нивоа фактора, а на основу функције циља “што мања вредност то је боље”.

6.1.5.1 Анализа варијансе (ANOVA) за паралелност површина

Резултати ANOVA анализе показују да од свих пет улазних фактора, F -вредности улазних фактора већу вредност од критичне вредности F_{cr} (F_{cr} вредности на нивоу поверења од 95% једнака **3,35**) имају фактори који се односе на дебљину зида, дубину обраде што имплицира да су ови фактори сигнификантни. Остали фактори, који се односе на број обртаја и помак су мањи од критичне вредности и они су не сигнификантни. Резултати анализе варијансе за анализу производности су приказани у табели 6.31. Анализа је спроведена са нивоом поузданости од 95%.

На одступање паралелности површина, фактор дебљина зида утиче са 57,39 %, број обртаја утиче са 1,76 %, помак утиче са 0,80, дубина обраде утиче са 10,50 %, а стратегија обраде утиче са 4,65 %. На грешку експеримента отпада 24,90 % односно на утицај других фактора који се при овом експерименту нису разматрали.

Коефицијенти ANOVA регресионе једначине за паралелност површина приказани су у табели 6.32, а регресиона једначина је дата у наставку.

Табела 6.31. Резултати ANOVA анализе за паралелност површина

Фактори	DOF	Adj SS	Adj MS	F-Вредност	P-Вредност	Процентуално учешће % P
A	2	0,103064	0,051532	18,43	0,000	57,39
B	2	0,003159	0,001580	0,57	0,579	1,76
C	2	0,001428	0,000714	0,26	0,778	0,80
D	2	0,018858	0,009429	3,37	0,060	10,50
E	2	0,008354	0,004177	1,49	0,254	4,65
Грешка	16	0,044726	0,002795			24,90
Укупно	26	0,179589				

Табела 6.32. Коефицијенти ANOVA регресионе једначине за паралелност површина

Фактори	Коеф.	SE Коеф.	T-Вредност	P-Вредност	VIF
Константе	0,1477	0,0102	14,52	0,000	
A					
0,5	-0,0429	0,0144	-2,98	0,009	1,33
1,0	-0,0445	0,0144	-3,09	0,007	1,33
B					
6000	0,0078	0,0144	0,54	0,595	1,33
12000	-0,0153	0,0144	-1,06	0,304	1,33
C					
600	-0,0031	0,0144	-0,21	0,834	1,33
1200	0,0100	0,0144	0,70	0,495	1,33
D					
1	-0,0135	0,0144	-0,94	0,363	1,33
2	0,0369	0,0144	2,57	0,021	1,33
E					
1	-0,0120	0,0144	-0,83	0,418	1,33
2	0,0249	0,0144	1,73	0,103	1,33

6.1.5.2 Регресиона анализа за паралелност површина

Путем регресионе анализе добићемо једначину зависности улазних фактора, у овом експерименту дебљине зида, броја обртаја, помака, дубине обраде и стратегије обраде на излазну карактеристику, а то је у овом случају паралелност површина. Једначина је дата у наставку:

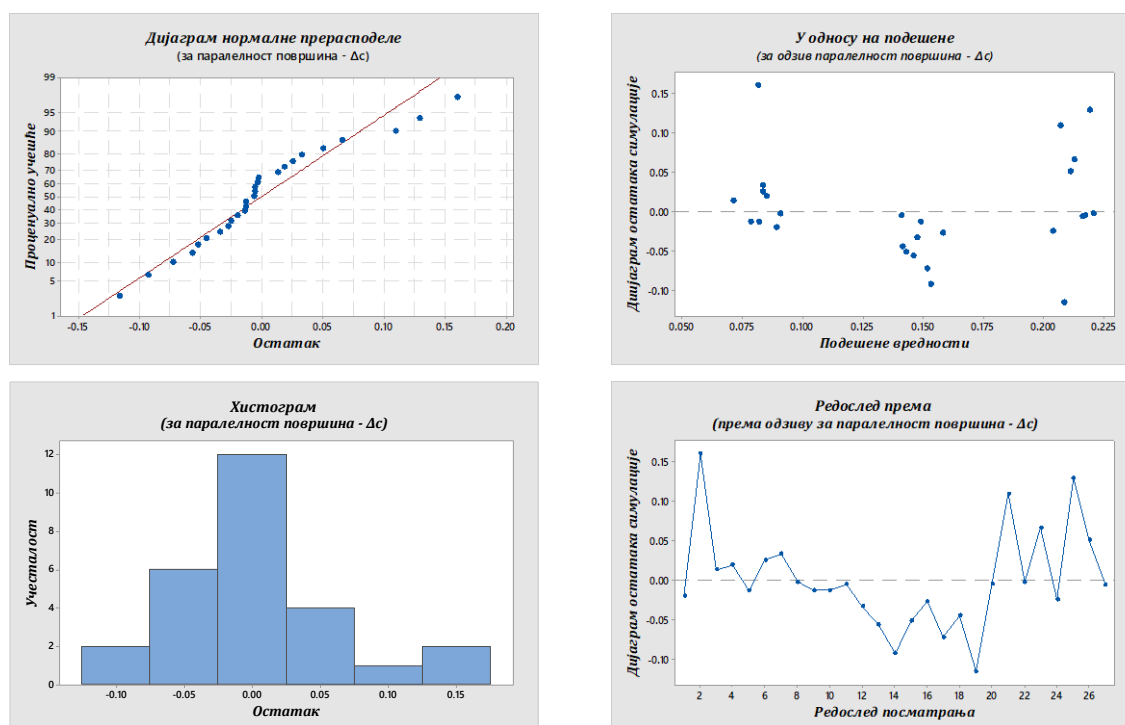
$$\Delta c\text{-паралелност површина} = 0,1477 - 0,0429A_{0,5} - 0,0445A_{1,0} + 0,0874A_{1,5} + 0,0078B_{6000} - 0,0153B_{12000} + 0,0075B_{24000} - 0,0031C_{600} + 0,0100C_{1200} - 0,0070C_{2400} - 0,0135D_1 + 0,0369D_2 - 0,0235D_3 - 0,0120E_1 + 0,0249E_2 - 0,0129E_3 \quad (6.12)$$

У табели 6.33 приказани су коефицијенти регресионе једначине. На слици 6.27 приказане су одговарајуће расподеле за одступање паралелности површина - Δc . Слика 6.28 приказује контурни приказ различитих предикционих параметара за

одступање паралелности површина - Δc , док је на слици 6.29 приказан површински приказ између два предикциона параметра и једног одзивног параметра.

Табела 6.33. Коefицијенти регресионе једначине за паралелност површина

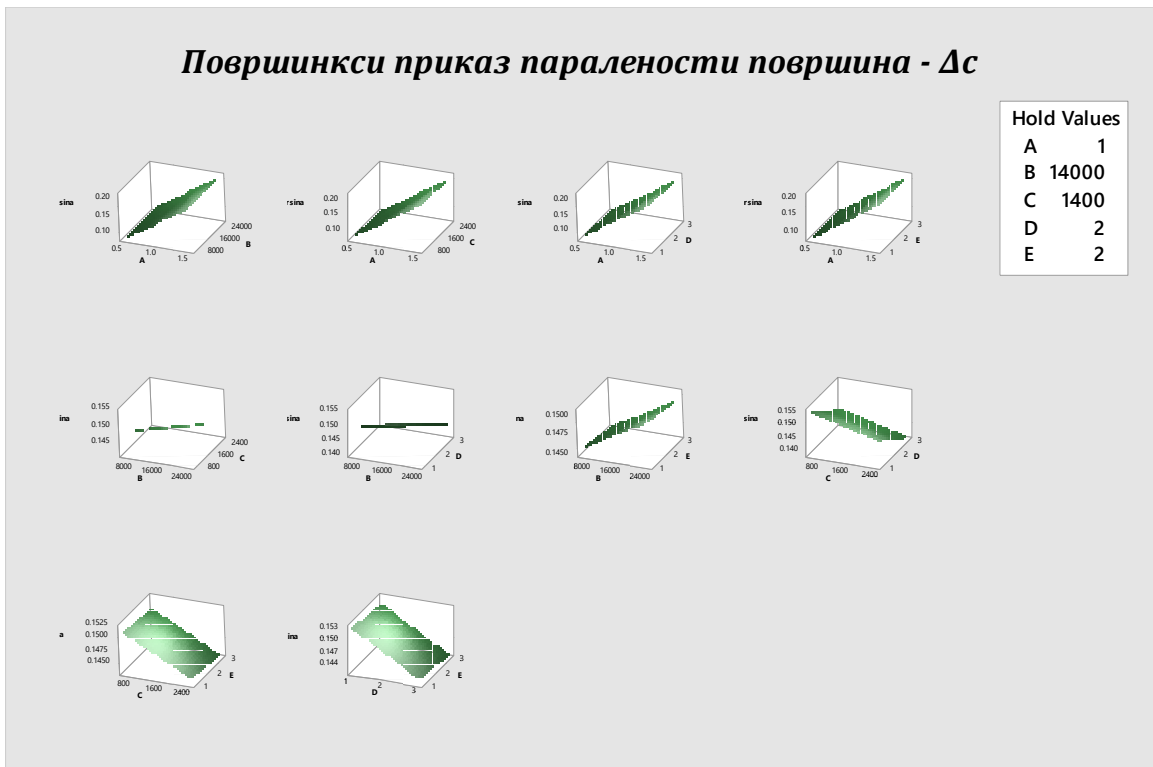
Фактори	Коеф.	SE Коеф.	T-Вредност	P-Вредност	VIF
Константе	0,0303	0,0685	0,44	0,663	
A	0,1303	0,0329	3,96	0,001	1,00
B	0,000000	0,000002	0,14	0,888	1,00
C	-0,000004	0,000018	-0,22	0,831	1,00
D	-0,0050	0,0165	-0,30	0,764	1,00
E	-0,0005	0,0165	-0,03	0,977	1,00



Слика 6.27. Одговарајуће расподеле за одступање паралелности површина



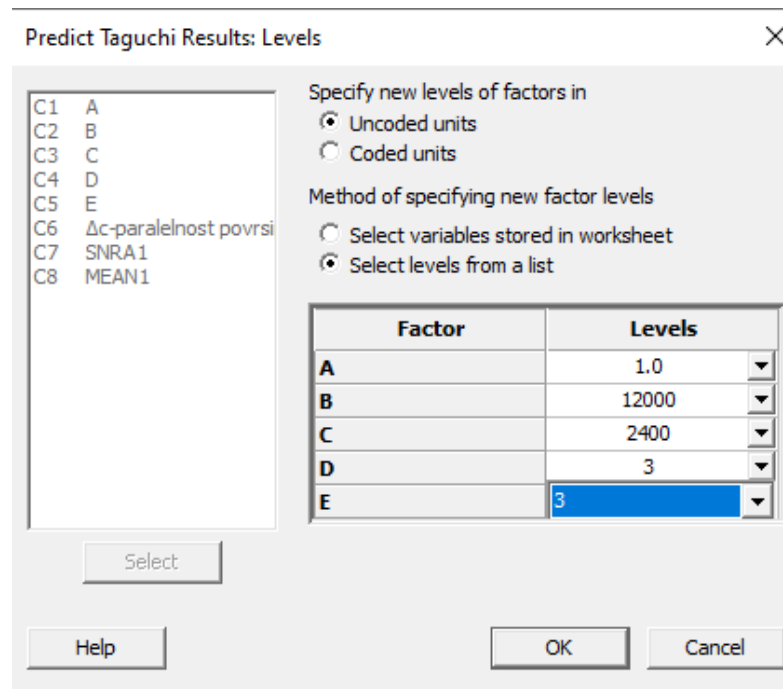
Слика 6.28. Контурни приказ различитих предикционих параметара за одступање паралелности површина - Δc



Слика 6.29. Површински приказ између два предикциона параметра и једног одзивног параметра параметара за одступање паралелности површина - Δc

6.1.5.3. Оптимизација добијених резултата за одступање паралелности површина

Након дефинисања оптималних улазних параметара, предвиђени су оптимални одзиви применом *Taguchi-јеве* и *ANOVA* методе. Предикција оптимума улазних параметара у циљу добијања најмањег одступања паралелности површина применом *Taguchi-јеве* методе је пронађена на нивоу: *A2-B2-C3-D3-E3*. На слици 6.30 приказани су *Taguchi-јеве* предикциони резултати за оптималне улазне параметре применом софтвера *MiniTab* (улазне факторе). Након проналажења оптималних улазних параметара и добијеног *S/N* одзив, применом једначине 6.3 добијена је зависност улазних фактора на одступање паралелности површине Δc . У табели 6.34 приказани су оптимални улазни параметри и сигнификантни параметри.



Слика 6.30. *Taguchi-јеве* предикциони резултати за оптималне улазне параметре применом софтвера *MiniTab*

Табела 6.34. Оптимални улазни параметри и сигнификантни параметри

Одзив	Оптимални улазни параметри	Сигнификантни параметри	Предикција оптималног одзива	
			<i>S/N</i> одзив	Вредност
Паралелности површине Δc	<i>A2-B2-C3-D3-E3</i>	<i>A-D</i>	22,6130	0,1345

6.1.6 Оптимизација параметара процеса обраде у функцији управности површина

Код анализе управности површина посматра се утицај дебљине зида, броја обртаја, помака, дубине обраде и стратегије обраде на управност површина - Δd . С обзиром да функција циља за управност површина треба да буде што мања, онда ће се за функцију циља изабрати "што мања вредност то боље". За овако постављену функцију циља S/N за сваки експеримент се рачуна уз помоћ обрасца:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6.13)$$

У табели 6.35 приказани су вредности S/N односа за одступање управности површина, на основу улазних вредности.

Табела 6.35. Вредност S/N односа за одступање управности површина

Редни број	A	B	C	D	E	Управност површина Δd	S/N однос
1	0,5	6000	600	1	1	0,084	21,5144
2	0,5	6000	1200	2	2	0,383	8,3360
3	0,5	6000	2400	3	3	0,122	18,2728
4	0,5	12000	600	2	3	0,116	18,7108
5	0,5	12000	1200	3	1	0,093	20,6772
6	0,5	12000	2400	1	2	0,102	19,8707
7	0,5	24000	600	3	2	0,134	17,4904
8	0,5	24000	1200	1	3	0,120	18,4526
9	0,5	24000	2400	2	1	0,100	20,0000
10	1,0	6000	600	2	2	0,125	18,0618
11	1,0	6000	1200	3	3	0,173	15,2391
12	1,0	6000	2400	1	1	0,117	18,6363
13	1,0	12000	600	3	1	0,094	20,5374
14	1,0	12000	1200	1	2	0,109	19,2515
15	1,0	12000	2400	2	3	0,151	16,4205
16	1,0	24000	600	1	3	0,120	18,4526
17	1,0	24000	1200	2	1	0,141	17,0465
18	1,0	24000	2400	3	2	0,106	19,4939
19	1,5	6000	600	3	3	0,233	12,6715
20	1,5	6000	1200	1	1	0,329	9,6561
21	1,5	6000	2400	2	2	0,472	6,5304
22	1,5	12000	600	1	2	0,334	9,5381
23	1,5	12000	1200	2	3	0,459	6,7637
24	1,5	12000	2400	3	1	0,273	11,2927
25	1,5	24000	600	2	1	0,322	9,8564
26	1,5	24000	1200	3	2	0,425	7,4424
27	1,5	24000	2400	1	3	0,340	9,3704

Средњи S/N одзив за сваки утицајни фактор је приказан у табели 6.36, а одзив средње управности површина за сваки утицајни фактор је приказан у табели 6.37.

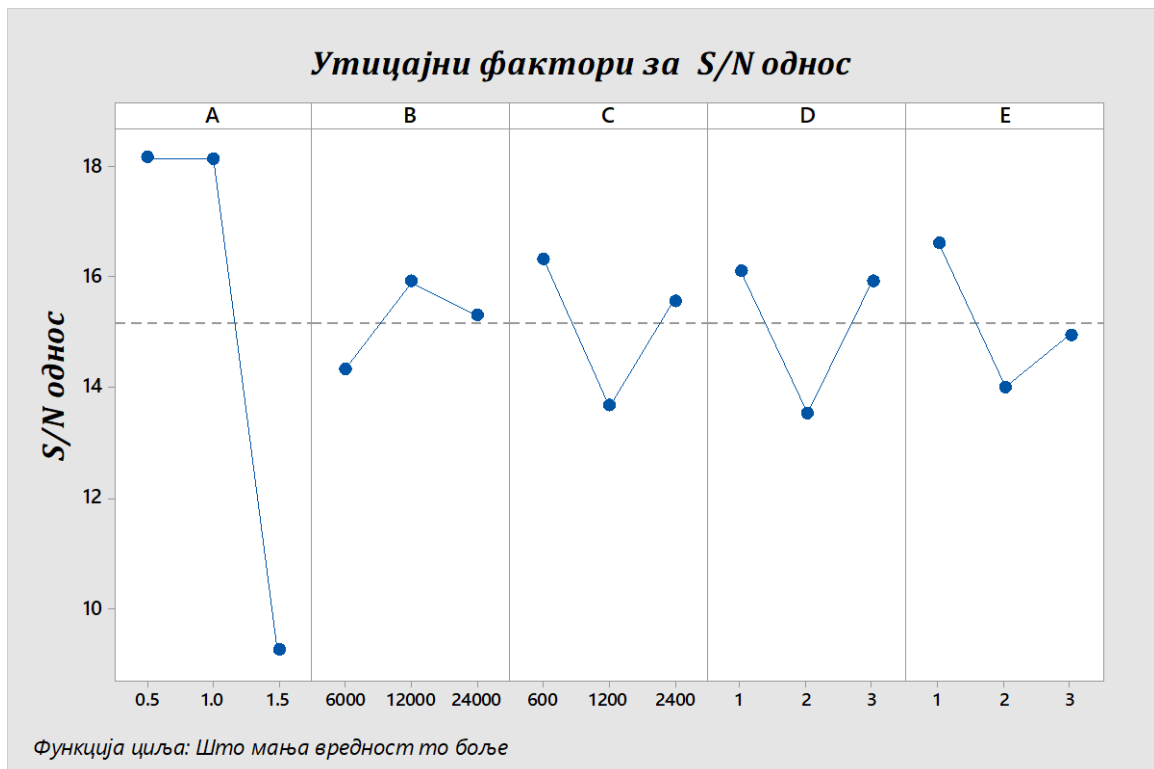
Табела 6.36. S/N одзив за управност површина за функцију циља мање је боље-

Ниво	A	B	C	D	E
1	18,147	14,324	16,315	16,083	16,580
2	18,127	15,896	13,652	13,525	14,002
3	9,236	15,289	15,543	15,902	14,928
Разлика	8,911	1,572	2,663	2,557	2,578
Ранг	1	5	2	4	3

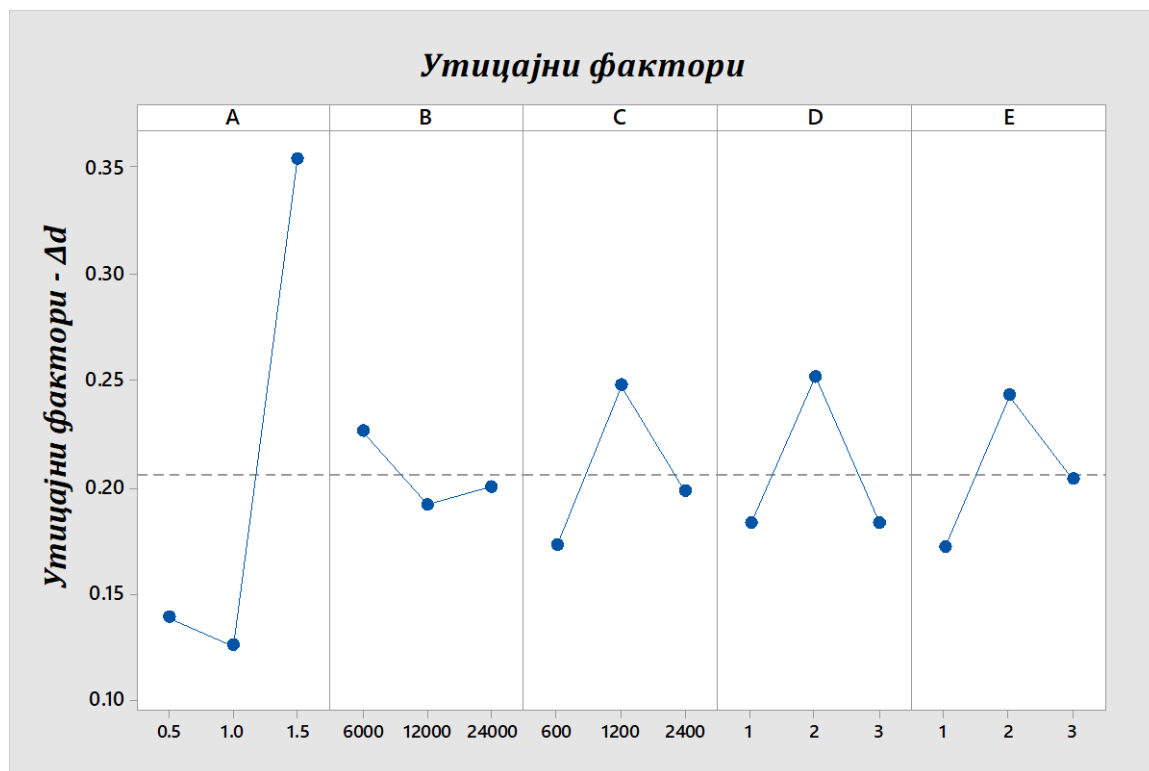
Табела 6.37. Одзив управности површина по утицајним факторима

Ниво	A	B	C	D	E
1	0.1391	0.2263	0.1733	0.1837	0.1723
2	0.1261	0.1921	0.2478	0.2519	0.2431
3	0.3538	0.2006	0.1979	0.1834	0.2036
Разлика	0.2277	0.0342	0.0745	0.0686	0.0707
Ранг	1	5	2	4	3

На слици 6.31 приказан је S/N одзив за управност површина по утицајним факторима, док је на слици 6.32 приказан одзив управности површина по утицајним факторима.



Слика 6.31. S/N однос за управност површина



Слика 6.32. Утицајни фактори на управност површина

Анализом резултата, који су приказани у табели 6.36, као и на основу слике 6.31, може се закључити да највећи утицај на управност површина имају дебљина зида, помак и стратегија обраде. Такође, најмањи утицај на одступање дебљине зида има број обртаја. На основу табеле 6.37 и слике 6.32, можемо одредити оптималне режиме обраде у оквиру понуђених нивоа фактора, а на основу функције циља “што мања вредност то је боље”.

6.1.6.1 Анализа варијансе (ANOVA) за управност површина

Резултати ANOVA анализе показују да је од пет улазних фактора, *F*-вредности улазних фактора мањи од критичне вредности *F_{cr}* (*F_{cr}* вредности на нивоу поверења од 95% једнака **3,35**) само за фактор везан за број обртаја, што имплицира да овај фактор није сигнификантни. За остале факторе, који се односе на дебљину зида, помак, дубину обраде и стратегије обраде добили смо *F*-вредности веће од критичне вредности. Резултати анализе варијансе за анализу управности површина су приказани у табели 6.38. Анализа је спроведена са нивоом поузданости од 95%.

На одступање управности површина, фактор дебљина зида утиче са 69,81 %, број обртаја утиче са 1,36 %, помак утиче са 6,151 %, дубина обраде утиче са 6,66 %, а стратегија обраде утиче са 5,36 %. На грешку експеримента отпада 10,66 % односно на утицај других фактора који се при овом експерименту нису разматрали.

Коефицијенти ANOVA регресионе једначине за одступање управности површина приказани су у табели 6.39, а регресиона једначина је дата у наставку.

Табела 6.38. Резултати ANOVA анализе за управност површина

Фактори	DF	Adj SS	Adj MS	F-Вредност	P-Вредност	Процентуално учешће % P
A	2	0,294249	0,147124	52,40	0,000	69,81
B	2	0,005721	0,002860	1,02	0,383	1,36
C	2	0,025926	0,012963	4,62	0,026	6,151
D	2	0,028085	0,014043	5,00	0,021	6,66
E	2	0,022607	0,011304	4,03	0,038	5,36
Грешка	16	0,044924	0,002808			10,66
Укупно	26	0,421512				

Табела 6.39. Коефицијенти ANOVA регресионе једначине за управност површина

Фактори	Коеф.	SE Коеф.	T-Вредност	P-Вредност	VIF
Константе	0,2063	0,0102	20,23	0,000	
A					
0.5	-0,0672	0,0144	-4,66	0,000	1,33
1.0	-0,0802	0,0144	-5,56	0,000	1,33
B					
6000	0,0200	0,0144	1,39	0,185	1,33
12000	-0,0142	0,0144	-0,99	0,339	1,33
C					
600	-0,0331	0,0144	-2,29	0,036	1,33
1200	0,0414	0,0144	2,87	0,011	1,33
D					
1	-0,0227	0,0144	-1,57	0,136	1,33
2	0,0456	0,0144	3,16	0,006	1,33
E					
1	-0,0340	0,0144	-2,36	0,031	1,33
2	0,0367	0,0144	2,55	0,022	1,33

6.1.6.2 Регресиона анализа за управност површина

Путем регресионе анализе добићемо једначину зависности улазних фактора, у овом експерименту дебљине зида, броја обртаја, помака, дубине обраде и стратегије обраде на излазну карактеристику, а то је у овом случају управност површина. Једначина је дата у наставку:

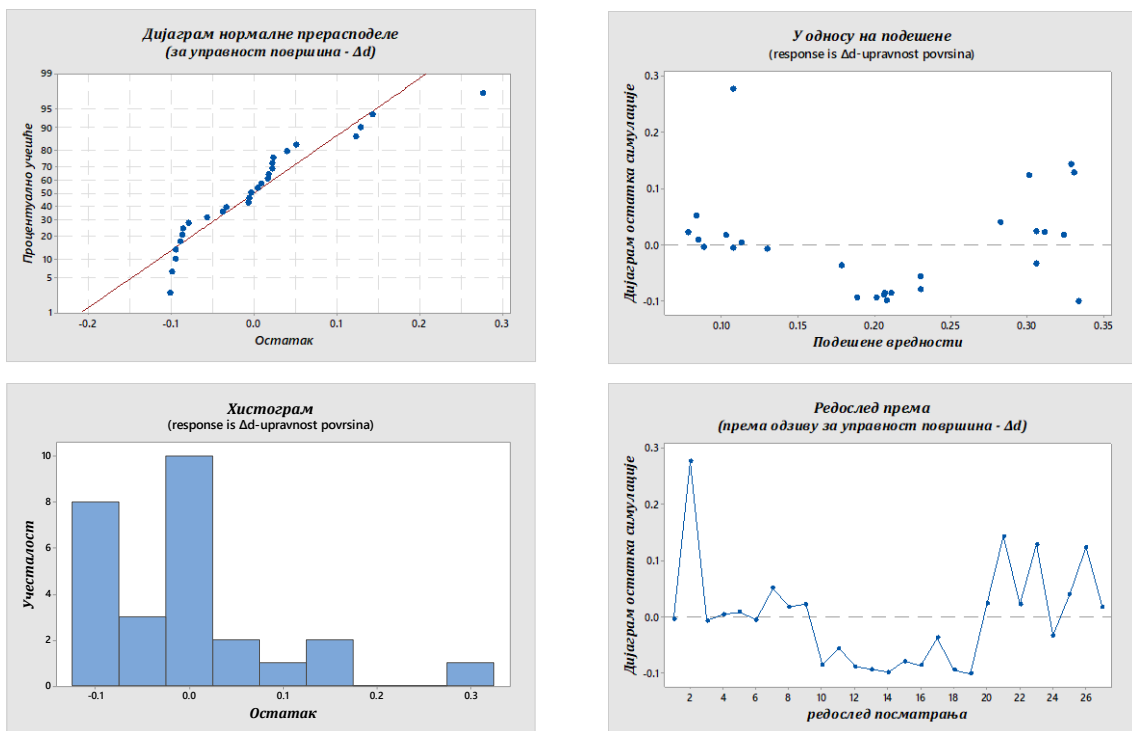
$$\Delta d\text{-управност површина} = 0,2063 - 0,0672A_{0,5} - 0,0802A_{1,0} + 0,1474A_{1,5} + 0,0200B_{6000} - 0,0142B_{12000} - 0,0058B_{24000} - 0,0331C_{600} + 0,0414C_{1200} - 0,0084C_{2400} - 0,0227D_{1+} + 0,0456D_{2-} - 0,0229D_{3-} - 0,0340E_{1+} + 0,0367E_{2-} - 0,0027E_{3-} \quad (6.14)$$

У табели 6.40 приказани су коефицијенти регресионе једначине. На слици 6.33 приказане су одговарајуће расподеле за одступање управности површина - Δd .

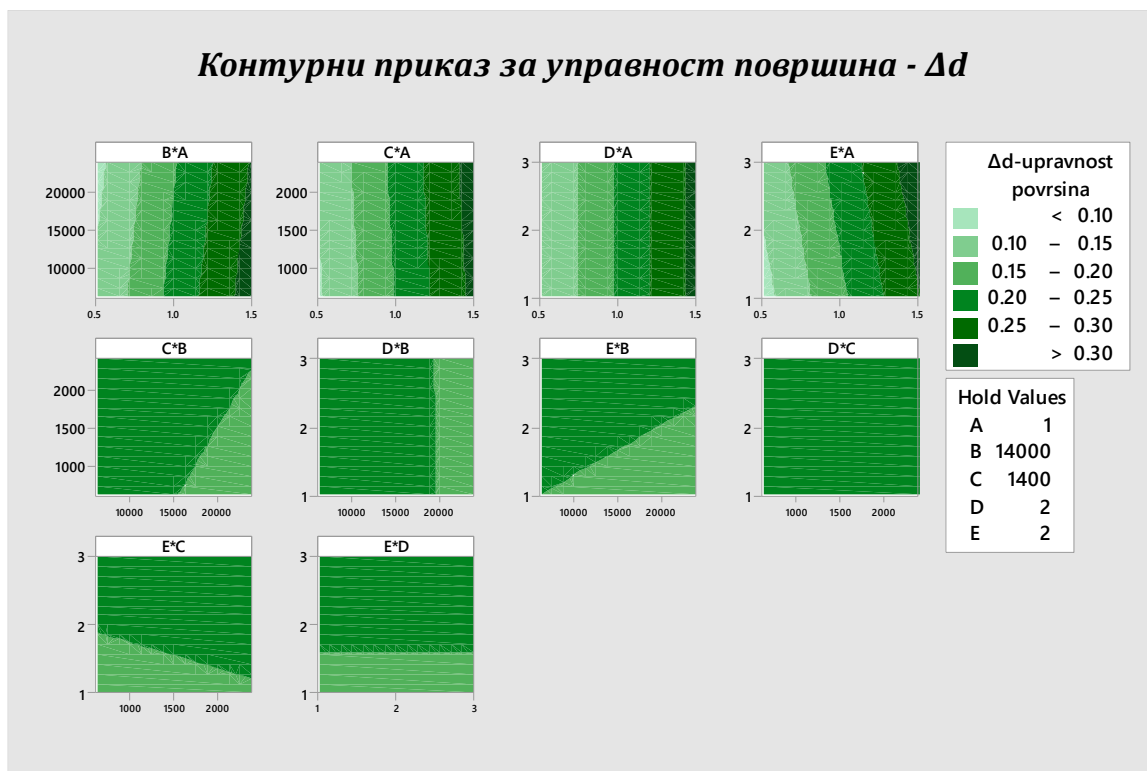
Слика 6.34 приказује контурни приказ различитих предикционих параметара за одступање управности површина - Δd , док је на слици 6.35 приказан површински приказ између два предикциона параметра и једног одзивног параметра.

Табела 6.40. Коефицијенти регресионе једначине за управност површина

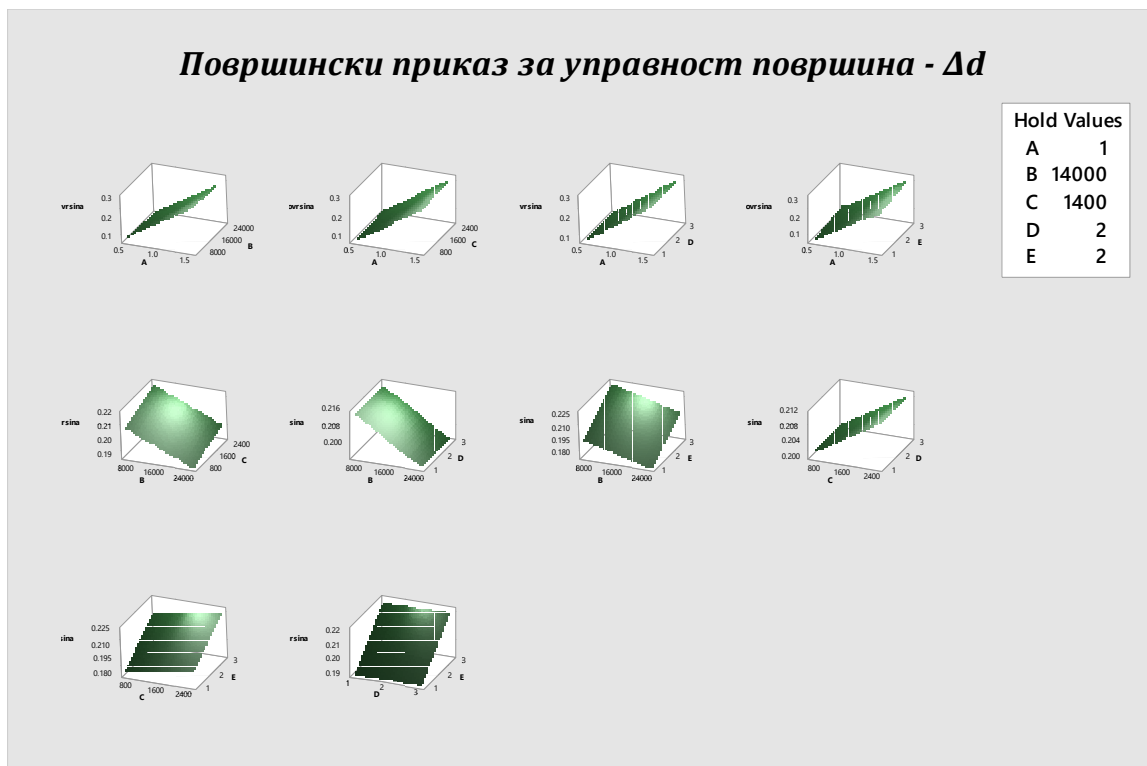
Фактори	Коеф.	SE Коеф.	T-Вредност	P-Вредност	VIF
Константе	-0,0317	0,0975	-0,33	0,748	
A	0,2147	0,0468	4,58	0,000	1,00
B	-0,000001	0,000003	-0,44	0,664	1,00
C	0,000006	0,000026	0,23	0,822	1,00
D	-0,0001	0,0234	-0,01	0,995	1,00
E	0,0156	0,0234	0,67	0,512	1,00



Слика 6.33. Одговарајуће расподеле за одступање управности површина



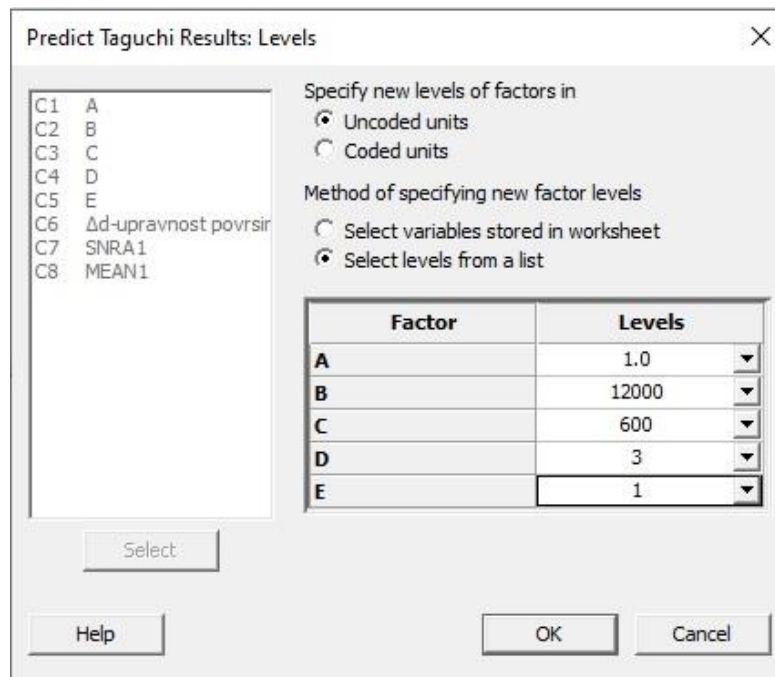
Слика 6.34. Контурни приказ различитих предикционих параметара за одступање управности површина - Δd



Слика 6.35. Површински приказ између два предикциона параметра и једног одзивног параметра параметара за одступање управности површина – Δd

6.1.6.3 Оптимизација добијених резултата за одступање управности површина

Након дефинисања оптималних улазних параметара, предвиђени су оптимални одзиви применом *Taguchi*-јеве и *ANOVA* методе. Предикција оптимума улазних параметара у циљу добијања најмањег одступања управности површина применом *Taguchi*-јеве методе је пронађена на нивоу: A2-B2-C1-D3-E1. На слици 6.36 приказани су *Taguchi*-јеве предикциони резултати за оптималне улазне параметре применом софтвера MiniTab. Након проналажења оптималних улазних параметара и добијеног *S/N* одзив, применом једначине 6.1 добијена је зависност улазних фактора на одступање управности површина Δd . У табели 6.41 приказани су оптимални режими обраде и сигнификантни фактори.



Слика 6.36. *Taguchi*-јеве предикциони резултати за оптималне улазних параметара применом софтвера MiniTab

Табела 6.41. Оптимални улазни параметри и сигнификантни параметри

Одзив	Оптимални улазни параметри	Сигнификантни параметри	Предикција оптималног одзива	
			<i>S/N</i> одзив	Вредност
Управност површина - Δd	A2-B2-C1-D3-E1	A-C-D-E	22,1600	0,0825

6.2. Вишекритеријумска оптимизација параметара технолошког процеса високобрзинске обраде

6.2.1 Дефинисање функција циља и одређивање тежинских коефицијената критеријума

Анализом различитих функција циља и критеријума који се разматрају у оптимизацији технолошких процеса високобрзинске обраде изабране су четири варијанте значајности функција циља, за које су потом дефинисани одговарајући тежински коефицијенти критеријума, према табели 6.42.

Као методологија за дефинисање тежинских коефицијената такође је изабрана АНР метода, која на једноставан начин кроз међусобно упоређивање критеријума на излазу даје поуздане податке, који се додатно проверавају степеном конзистентности.

Табела 6.42. Варијанте значајности функција циља при вишекритеријумској оптимизацији параметара високобрзинске обраде

Варијанта	Функција циља / Најзначајнији критеријуми оптимизације
1.	Једнака значајност критеријума
2.	Тачност обраде (тачност мера Δa , тачност облика и односа површина Δb , Δc и Δd)
3.	Производност (количина скинуте струготине у јединици времена MRR)
4.	Квалитет обраде (храпавост обрађене површине Ra)

Примена методологије одређивања тежинских коефицијената критеријума приказана је на примеру варијанте 2, где је као функција циља дефинисана тачност обраде а најзначајнији критеријуми оптимизације су тачност мера - одступање дебљине зида (Δa), тачност облика - одступање равности површина (Δb) и тачности положаја, тј. односа површина у смислу одступања од паралелности површина и (Δc) одступања управности површина (Δd).

Одговарајућа хијерархијска структура - матрица поређења критеријума по паровима (сваки са сваким), представљена је следећом матрицом одлучивања у табели 6.43.

Табела 6.43. Хијерархијска структура поређена критеријума по паровима за варијанту 2. функције циља

	MRR	Δa	Δb	Δc	Δd	Ra
MRR	1	1/5	1/3	1/3	1/3	1/2
Δa		1	2	2	2	3
Δb			1	1	1	2
Δc				1	1	2
Δd					1	2
Ra						1

За одређивање тежинских коефицијената у моделу – нормализованих сопствених вектора критеријума примењена је апроксимативна АНР метода. Резултати прва два корака су приказани у табели 6.44, а трећег и четвртог корака у табели 6.45. Колона W_j представља нормализовани сопствени вектор критеријума, односно тежинске коефицијенте критеријума за постављену функцију циља.

Табела 6.44. Кораци 1 и 2 апроксимативне АНР методологије одређивања тежинских коефицијената

	MRR	Δa	Δb	Δc	Δd	Ra
MRR	1,0000	0,2000	0,3333	0,3333	0,3333	0,5000
Δa	5,0000	1,0000	2,0000	2,0000	2,0000	3,0000
Δb	3,0000	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000	2,0000
Δc	3,0000	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000	2,0000
Δd	3,0000	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000	2,0000
Ra	2,0000	0,3333	0,5000	0,5000	0,5000	1,0000
Укупно	17,0000	3,0333	5,8333	5,8333	5,8333	10,5000

Табела 6.45 Кораци 3 и 4 апроксимативне АНР методологије одређивања тежинских коефицијената

	MRR	Δa	Δb	Δc	Δd	Ra	Укупно	W_j	λ_i
MRR	0,0588	0,0659	0,0571	0,0571	0,0571	0,0476	0,3438	0,0573	6,0134
Δa	0,2941	0,3297	0,3429	0,3429	0,3429	0,2857	1,9381	0,3230	6,0231
Δb	0,1765	0,1648	0,1714	0,1714	0,1714	0,1905	1,0461	0,1743	6,0211
Δc	0,1765	0,1648	0,1714	0,1714	0,1714	0,1905	1,0461	0,1743	6,0211
Δd	0,1765	0,1648	0,1714	0,1714	0,1714	0,1905	1,0461	0,1743	6,0211
Ra	0,1176	0,1099	0,0857	0,0857	0,0857	0,0952	0,5799	0,0966	6,0054
								$\Sigma=1,0000$	$\lambda_{\max}=6,0231$

У циљу одређивања доследности доносиоца одлуке, којим се дефинише ниво грешака при међусобном поређењу критеријума, извршен је прорачун коефицијента конзистентности. Прво је дефинисан индекс конзистентности CI према формули (6.15), а потом и степен или коефицијент конзистентности CR према (6.16), при чему је случајни индекс $RI=1,24$ преузет из табеле 5.12 на основу броја критеријума у модел ($n=6$). Вредност резултата $CR=0,0037 \leq 0,1$, што значи да је грешка доносиоца одлуке у процени упоређивања критеријума веома мала, на основу чега можемо закључити да је поређење критеријума извршено на задовољавајући начин.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{6,0231 - 6}{6 - 1} = 0,0046 \quad (6.15)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,0046}{1,24} = 0,0037 \quad (6.16)$$

Применом приказане методологије одређени су тежински коефицијенти критеријума за све четири варијанте значајности функције циља, а резултати су приказани у табели 6.46. На основу вредности израчунатих коефицијената конзистентности CR , може се закључити да је ниво грешака поређења критеријума за све варијанте много мањи од граничног нивоа $CR \leq 0,1$.

Табела 6.46. Тежински коефицијенти критеријума оптимизације за постављене функције циља

	Варијанте функције циља							
	Вар. 1	Ранг	Вар. 2	Ранг	Вар. 3	Ранг	Вар. 4	Ранг
MRR	0,16667	1-6	0,0573	6	0,43571	1	0,15913	2-3
Δa	0,16667	1-6	0,3230	1	0,15913	2-3	0,15913	2-3
Δb	0,16667	1-6	0,1743	2-4	0,08201	4-6	0,08201	4-6
Δc	0,16667	1-6	0,1743	2-4	0,08201	4-6	0,08201	4-6
Δd	0,16667	1-6	0,1743	2-4	0,08201	4-6	0,08201	4-6
Ra	0,16667	1-6	0,0966	5	0,15913	2-3	0,43571	1
Коефицијенти конзистентности CR	0		0,0037		0,0024		0,0024	

6.2.2 Примена метода вишекритеријумске оптимизације

У циљу одређивања оптималних параметара технолошког процеса високобрзинске обраде танкозидних делова коришћени су резултати реализованих експеримената, табела 4.14. Избор оптималног алтернативног нивоа параметара технолошког процеса и њихово рангирање реализовано је такође применом 14 метода вишекритеријумске оптимизације, односно одлучивања (ВКО): GRA, АHP, MOORA, TOPSIS, ROV, COPRAS, ARAS, WASPAS, VIKOR, OCRA, EDAS, MABAC, SAW i SPW.

У наставку у оквиру поглавља 6.2.3, 6.2.4, 6.2.5 и 6.2.6 су приказани резултати примене наведених метода за све четири варијанте функција циља.

6.2.3 Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 1. функције циља

6.2.3.1 Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације за 1. функцију циља

У табели 6.47. приказани су одговарајући резултујући коефицијенти примене појединих метода (срп. Вишекритеријумска оптимизација, ВКО) на основу чије максималне или минималне вредности је извршено рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса обраде за варијанту 1. функције циља, где сви критеријуми оптимизације имају једнаку значајност, односно тежинске коефицијенте.

Табела 6.47. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 1. функције циља

Бр. Екс.	Метода ВКО									
	GRA		AHP		MOORA		TOPSIS		ROV	
	GRG	Ранг	F_i	Ранг	Y_i	Ранг	$CCo(P_i)$	Ранг	U_i	Ранг
1	0,5998	3	0,0427	8	-0,0732	11	0,6138	14	0,3586	12
2	0,2506	24	0,0226	26	-0,1622	23	0,4603	23	0,2283	22
3	0,4496	15	0,0335	16	-0,0803	14	0,6208	12	0,3520	13
4	0,4657	13	0,0349	15	-0,0749	12	0,6272	10	0,3598	11
5	0,6311	2	0,0449	7	-0,0512	6	0,6471	8	0,3908	6
6	0,4590	14	0,0383	12	-0,0582	8	0,7033	5	0,3782	8
7	0,5065	12	0,0367	14	-0,0678	9	0,6269	11	0,3664	9
8	0,5089	11	0,0395	11	-0,0571	7	0,6734	6	0,3789	7
9	0,5835	5	0,0485	4	-0,0354	3	0,7473	2	0,4037	4
10	0,3384	22	0,0249	23	-0,1585	22	0,4540	24	0,2499	20
11	0,4013	17	0,0311	18	-0,1016	16	0,5798	16	0,3182	16
12	0,5819	6	0,0514	3	-0,0352	2	0,7363	3	0,4079	1
13	0,7720	1	0,0732	1	-0,0388	5	0,6528	7	0,4061	2
14	0,5430	8	0,0423	9	-0,0898	15	0,5919	15	0,3368	15
15	0,5639	7	0,0455	6	-0,0351	1	0,7485	1	0,4048	3
16	0,5346	9	0,0475	5	-0,0793	13	0,6140	13	0,3462	14
17	0,5949	4	0,0564	2	-0,0382	4	0,7247	4	0,4004	5
18	0,5302	10	0,0416	10	-0,0681	10	0,6381	9	0,3640	10
19	0,3846	18	0,0283	20	-0,1266	18	0,5330	19	0,2793	17
20	0,3275	23	0,0270	21	-0,1429	20	0,5164	20	0,2489	21
21	0,2109	26	0,0234	24	-0,2651	27	0,3120	27	0,0804	27
22	0,2020	27	0,0149	27	-0,2161	26	0,3304	26	0,1573	26
23	0,2426	25	0,0230	25	-0,2050	25	0,3849	25	0,1648	25
24	0,3725	19	0,0302	19	-0,1302	19	0,5343	18	0,2703	19
25	0,4132	16	0,0377	13	-0,1580	21	0,4959	21	0,2230	23
26	0,3443	21	0,0269	22	-0,1713	24	0,4712	22	0,2064	24
27	0,3453	20	0,0330	17	-0,1207	17	0,5695	17	0,2754	18

Табела 6.47. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 1. функције циља - наставак

Бр. Екс.	Метода ВКО									
	COPRAS		ARAS		WASPAS		VIKOR		OCRA	
	U_j	Ранг	$U_i \%$	Ранг	$U_j \%$	Ранг	Q_i	Ранг	P_i	Ранг
1	0,5548	10	58,4006	8	0,4547	7	0,5112	14	6,8269	11
2	0,3304	21	30,8640	26	0,2276	24	0,5702	17	4,0816	18
3	0,4911	14	45,8322	16	0,3711	15	0,3913	7	6,3940	16
4	0,5164	13	47,6719	15	0,3849	14	0,4006	8	6,5201	14
5	0,7411	2	61,4277	7	0,4884	5	0,4814	11	7,2845	6
6	0,5548	11	52,3314	12	0,4112	12	0,0453	2	6,6785	12
7	0,5962	8	50,2177	14	0,3940	13	0,5325	15	6,9324	10
8	0,6127	7	54,0181	11	0,4364	11	0,3149	6	7,1971	7
9	0,6698	5	66,3053	4	0,5215	4	0,0752	3	7,5972	4
10	0,3026	23	33,9989	23	0,2663	22	0,6488	21	4,5207	17
11	0,4250	16	42,5269	18	0,3242	17	0,5368	16	6,4146	15
12	0,7215	3	70,3069	3	0,5446	3	0,1145	4	7,8055	3
13	1,0000	1	100,000	1	0,6928	1	0,5027	13	7,8961	1
14	0,4607	15	57,7471	9	0,4390	10	0,4545	10	6,5357	13
15	0,6234	6	62,2086	6	0,4542	8	0,0320	1	7,5219	5
16	0,5198	12	64,9313	5	0,4634	6	0,4873	12	7,0677	9
17	0,7153	4	77,0563	2	0,5770	2	0,1500	5	7,8866	2
18	0,5689	9	56,8088	10	0,4427	9	0,4185	9	7,1191	8
19	0,3344	19	38,6124	20	0,2855	20	0,6892	22	3,5244	20
20	0,3255	22	36,9061	21	0,2711	21	0,6148	20	3,2608	22
21	0,3329	20	31,9484	24	0,1940	26	1,0000	27	0,0000	27
22	0,2258	27	20,3966	27	0,1630	27	0,8008	25	1,2919	26
23	0,2880	25	31,4548	25	0,2180	25	0,8424	26	1,5541	25
24	0,3392	18	41,2354	19	0,3011	19	0,5762	18	3,4461	21
25	0,2999	24	51,5201	13	0,3364	16	0,7823	24	3,1967	23
26	0,2684	26	36,7765	22	0,2563	23	0,7425	23	2,7610	24
27	0,4001	17	45,1103	17	0,3130	18	0,5794	19	3,7051	19

Табела 6.47. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 1. функције циља - наставак

Бр. Екс.	Метода ВКО							
	EDAS		MAVAC		SAW		SPW	
	S_i	Ранг	S_i	Ранг	S_i	Ранг	S_i	Ранг
1	0,7879	9	0,1287	12	0,5096	6	0,3998	10
2	0,4027	24	-0,1319	22	0,2463	25	0,2088	24
3	0,6873	15	0,1155	13	0,3983	16	0,3439	15
4	0,7234	13	0,1311	11	0,4111	14	0,3587	14
5	0,8643	6	0,1931	6	0,5347	5	0,4422	5
6	0,7972	7	0,1678	8	0,4465	12	0,3760	12
7	0,7757	11	0,1442	9	0,4235	13	0,3646	13
8	0,7890	8	0,1692	7	0,4509	11	0,4219	7
9	0,9393	3	0,2189	4	0,5547	4	0,4882	4
10	0,4568	22	-0,0887	20	0,2967	23	0,2360	21
11	0,6108	16	0,0478	16	0,3366	19	0,3118	16
12	0,9047	4	0,2272	1	0,5596	3	0,5296	3
13	0,9506	2	0,2237	2	0,7756	1	0,6100	1
14	0,7025	14	0,0851	15	0,4871	9	0,3909	11
15	0,9511	1	0,2211	3	0,4965	8	0,4120	9
16	0,7512	12	0,1039	14	0,4980	7	0,4288	6
17	0,8968	5	0,2123	5	0,5925	2	0,5614	2
18	0,7798	10	0,1394	10	0,4655	10	0,4199	8
19	0,5284	18	-0,0300	17	0,3357	20	0,2354	22
20	0,4726	21	-0,0908	21	0,3025	21	0,2397	20
21	0,2243	26	-0,4277	27	0,2438	26	0,1441	27
22	0,2175	27	-0,2740	26	0,1762	27	0,1497	26
23	0,3099	25	-0,2590	25	0,2531	24	0,1830	25
24	0,5115	19	-0,0479	19	0,3448	18	0,2574	19
25	0,4832	20	-0,1425	23	0,4072	15	0,2656	17
26	0,4260	23	-0,1757	24	0,2987	22	0,2140	23
27	0,5897	17	-0,0377	18	0,3606	17	0,2653	18

6.2.3.2 Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 1. функцију циља

На основу резултата из претходног поглавља које се односило на појединачно оцењивање и рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса обраде на бази четрнаест различитих метода, применом методологије интегралног оцењивања решења извршено је свеобухватно поређење и рангирање двадесет и седам нивоа параметара.

У циљу добијања свеобухватног коначног рангирања нивоа параметара технолошког процеса обраде посматраних танкозидних алуминијумских делова на бази резултата примене четрнаест вишекритеријумских метода тестирана је сагласност добијених вредности параметара корелације са постављеним граничним вредностима, на бази описане методологије у поглављу 5.3.2.

У табели 6.48 приказан је преглед рангова алтернативних нивоа, вредности стандардне девијације по нивоима (σ_i), док су у доњем делу табеле дате вредности максималне стандардне девијације (σ_{max}) и просечне стандардне девијације (σ_{sr}), *Kendal*-ов коефицијент корелације (W) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације (R).

У табели 6.49 дате су вредности *Spirman*-овог коефицијента корелације рангова алтернативних нивоа параметара свих примењених метода ВКО по паровима.

У посматраном случају након прве итерације констатовано је да се резултати добијени применом посматраних 14 метода не могу користити за интегрално рангирање алтернативних нивоа параметара јер нису задовољене граничне вредности првог задатог критеријума ($0,9 \leq R_i \leq 1$), односно постоји бар једна комбинација метода (овде и више) чији је *Spirman*-ов коефицијент корелације R_i мањи од граничне вредности 0,9. Сходно томе мора се приступити другој итерацији која је приказана у наставку са резултатима корелације.

Након анализе резултата у табели 6.49, дошло се до закључка да постоје две различите комбинације метода ВКО које задовољавају све постављене критеријуме, што је кроз примену друге итерације и доказано:

- ❖ **Друга итерација А**, обухвата интегралну примену следећих 8 метода ВКО: *MOORA*, *ROV*, *COPRAS*, *WASPAS*, *OCRA*, *EDAS*, *MABAC* и *SPW*. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара и фактора корелације дати су у табели 6.50, а вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације у табели 6.51.
- ❖ **Друга итерација Б**, обухвата интегралну примену 8 метода ВКО: *GRA*, *AHP*, *ARAS*, *WASPAS*, *OCRA*, *EDAS*, *SAW* и *SPW*. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара дати су у табели 6.52, а *Spirman*-ових коефицијената корелације у табели 6.53.

Табела 6.48. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара примењених на методе ВКО

Бр. експ.	GRA	AHP	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	ARAS	WASPAS	VIKOR	OCRA	EDAS	MABAC	SAW	SPW	σ – Стан. девијација
1	3	8	11	14	12	10	8	7	14	11	9	12	6	10	3,079
2	24	26	23	23	22	21	26	24	17	18	24	22	25	24	2,665
3	15	16	14	12	13	14	16	15	7	16	15	13	16	15	2,401
4	13	15	12	10	11	13	15	14	8	14	13	11	14	14	2,023
5	2	7	6	8	6	2	7	5	11	6	6	6	6	5	2,248
6	14	12	8	5	8	11	12	12	2	12	7	8	12	12	3,388
7	12	14	9	11	9	8	14	13	15	10	11	9	13	13	2,245
8	11	11	7	6	7	7	11	11	6	7	8	7	11	7	2,098
9	5	4	3	2	4	5	4	4	3	4	3	4	4	4	0,802
10	22	23	22	24	20	23	23	22	21	17	22	20	23	21	1,781
11	17	18	16	16	16	16	18	17	16	15	16	16	19	16	1,089
12	6	3	2	3	1	3	3	3	4	3	4	1	3	3	1,240
13	1	1	5	7	2	1	1	1	13	1	2	2	1	1	3,446
14	8	9	15	15	15	15	9	10	10	13	14	15	9	11	2,801
15	7	6	1	1	3	6	6	8	1	5	1	3	8	9	2,925
16	9	5	13	13	14	12	5	6	12	9	12	14	7	6	3,446
17	4	2	4	4	5	4	2	2	5	2	5	5	2	2	1,342
18	10	10	10	9	10	9	10	9	9	8	10	10	10	8	0,756
19	18	20	18	19	17	19	20	20	22	20	18	17	20	22	1,590
20	23	21	20	20	21	22	21	21	20	22	21	21	21	20	0,877
21	26	24	27	27	27	20	24	26	27	27	26	27	26	27	1,968
22	27	27	26	26	26	27	27	27	25	26	27	26	27	26	0,646
23	25	25	25	25	25	25	25	25	26	25	25	25	24	25	0,392
24	19	19	19	18	19	18	19	19	18	21	19	19	18	19	0,770
25	16	13	21	21	23	24	13	16	24	23	20	23	15	17	4,080
26	21	22	24	22	24	26	22	23	23	24	23	24	22	23	1,269
27	20	17	17	17	18	17	17	18	19	19	17	18	17	18	0,975
Максимална стандардна девијација σ_{max}=															4,080
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr}=															1,939
Kendal-ов коефицијент корелације W=															0,927
Просечан Spearman-ов коефицијент корелације R=															0,921

Табела 6.49. Вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације рангова примењених метода ВКО

	GRA	AHP	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	ARAS	WASPAS	VIKOR	OCRA	EADS	MABAC	SAW1	SPW1
GRA	1,000	0,9597	0,8974	0,8498	0,8895	0,9060	0,9780	0,9768	0,7485	0,9121	0,9280	0,8895	0,9780	0,9518
AHP		1,000	0,9011	0,8712	0,8803	0,8883	0,9908	0,9890	0,7637	0,9048	0,9304	0,8803	0,9908	0,9725
MOORA			1,000	0,9841	0,9902	0,9542	0,9121	0,9231	0,8968	0,9518	0,9518	0,9902	0,9121	0,9298
TOPSIS				1,000	0,9707	0,9188	0,8767	0,8883	0,9396	0,9151	0,9151	0,9707	0,8767	0,9035
ROV					1,000	0,9609	0,8974	0,9127	0,9997	0,9609	0,9609	1,0000	0,8974	0,9231
COPRAS						1,000	0,9072	0,9219	0,8162	0,9505	0,9609	0,9609	0,9072	0,9267
ARAS							1,000	0,9951	0,7637	0,9176	0,9505	0,8974	1,0000	0,9780
WASPAS								1,000	0,7918	0,9408	0,9176	0,9127	0,9951	0,9884
VIKOR									1,000	0,8455	0,9408	0,8871	0,7698	0,8120
OCRA										1,000	0,8455	0,9609	0,9176	0,9560
EADS											1,000	0,9805	0,9377	0,9426
MABAC												1,000	0,8974	0,9231
SAW1													1,000	0,9780
SPW1														1,000

Друга итерација А

Табела 6.50. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација А

Бр. Екс.	MOORA	ROV	COPRAS	WASPAS	OCRA	EDAS	MABAC	SPW	Сред. Вред. рангова	Ранг алтернативе	σ – Станд. девијација
1	11	12	10	7	11	9	12	10	10,25	10	1,6690
2	23	22	21	24	18	24	22	24	22,25	23	2,0529
3	14	13	14	15	16	15	13	15	14,38	15	1,0607
4	12	11	13	14	14	13	11	14	12,75	13	1,2817
5	6	6	2	5	6	6	6	5	5,25	6	1,3887
6	8	8	11	12	12	7	8	12	9,75	9	2,1876
7	9	9	8	13	10	11	9	13	10,25	10	1,9086
8	7	7	7	11	7	8	7	7	7,63	7	1,4079
9	3	4	5	4	4	3	4	4	3,88	4	0,6409
10	22	20	23	22	17	22	20	21	20,88	20	1,8851
11	16	16	16	17	15	16	16	16	16,00	16	0,5345
12	2	1	3	3	3	4	1	3	2,50	2	1,0690
13	5	2	1	1	1	2	2	1	1,88	1	1,3562
14	15	15	15	10	13	14	15	11	13,50	14	2,0000
15	1	3	6	8	5	1	3	9	4,50	5	3,0237
16	13	14	12	6	9	12	14	6	10,75	12	3,3274
17	4	5	4	2	2	5	5	2	3,63	3	1,4079
18	10	10	9	9	8	10	10	8	9,25	8	0,8864
19	18	17	19	20	20	18	17	22	18,88	18	1,7269
20	20	21	22	21	22	21	21	20	21,00	22	0,7559
21	27	27	20	26	27	26	27	27	25,88	26	2,4165
22	26	26	27	27	26	27	26	26	26,38	27	0,5175
23	25	25	25	25	25	25	25	25	25,00	25	0,0000
24	19	19	18	19	21	19	19	19	19,13	19	0,8345
25	21	23	24	16	23	20	23	17	20,88	20	2,9970
26	24	24	26	23	24	23	24	23	23,88	24	0,9910
27	17	18	17	18	19	17	18	18	17,75	17	0,7071
Максимална стандардна девијација σ_{\max} =											3,3274
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr} =											1,4828
Kendal-ов коефицијент корелације W=											0,9588
Просечан <i>Spirman</i> -ов коефицијент корелације R=											0,9556

Табела 6.51. Вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације рангова – друга итерација А

	MOORA	ROV	COPRAS	WASPAS	OCRA	EDAS	MABAC	SPW1
MOORA	1,0000	0,9902	0,9542	0,9231	0,9518	0,9896	0,9902	0,9298
ROV		1,0000	0,9609	0,9127	0,9609	0,9805	1,0000	0,9231
COPRAS			1,0000	0,9219	0,9505	0,9536	0,9609	0,9267
WASPAS				1,0000	0,9408	0,9451	0,9128	0,9884
OCRA					1,0000	0,9505	0,9609	0,9560
EDAS						1,0000	0,9805	0,9426
MABAC							1,0000	0,9231
SPW1								1,0000

Друга итерација Б

Табела 6.52. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација Б

Бр. Екс.	GRA	AHP	ARAS	WASPAS	OCRA	EDAS	SAW	SPW	Сред. Вред. рангова	Ранг алтернативе	σ – Станд. девијација
1	3	8	8	7	11	9	6	10	7,75	8	2,4928
2	24	26	26	24	18	24	25	24	23,88	24	2,5319
3	15	16	16	15	16	15	16	15	15,50	15	0,5345
4	13	15	15	14	14	13	14	14	14,00	14	0,7559
5	2	7	7	5	6	6	5	5	5,38	5	1,5980
6	14	12	12	12	12	7	12	12	11,63	12	1,9955
7	12	14	14	13	10	11	13	13	12,50	13	1,4142
8	11	11	11	11	7	8	11	7	9,63	10	1,9226
9	5	4	4	4	4	3	4	4	4,00	4	0,5345
10	22	23	23	22	17	22	23	21	21,63	22	1,9955
11	17	18	18	17	15	16	19	16	17,00	17	1,3093
12	6	3	3	3	3	4	3	3	3,50	3	1,0690
13	1	1	1	1	1	2	1	1	1,13	1	0,3536
14	8	9	9	10	13	14	9	11	10,38	11	2,1339
15	7	6	6	8	5	1	8	9	6,25	6	2,4928
16	9	5	5	6	9	12	7	6	7,38	7	2,4458
17	4	2	2	2	2	5	2	2	2,63	2	1,1877
18	10	10	10	9	8	10	10	8	9,38	9	0,9161
19	18	20	20	20	20	18	20	22	19,75	20	1,2817
20	23	21	21	21	22	21	21	20	21,25	21	0,8864
21	26	24	24	26	27	26	26	27	25,75	26	1,1650
22	27	27	27	27	26	27	27	26	26,75	27	0,4629
23	25	25	25	25	25	25	24	25	24,88	25	0,3536
24	19	19	19	19	21	19	18	19	19,13	19	0,8345
25	16	13	13	16	23	20	15	17	16,63	16	3,4200
26	21	22	22	23	24	23	22	23	22,50	23	0,9258
27	20	17	17	18	19	17	17	18	17,88	18	1,1260
Максимална стандардна девијација σ_{max}=											3,4200
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr}=											1,4126
Kendal-ов коефицијент корелације W=											0,9623
Просечан Spirtan-ов коефицијент корелације R=											0,9594

Табела 6.53. Вредности Spirtan-ових коефицијената колерације рангова- друга итерација Б

	GRA	AHP	ARAS	WASPAS	OCRA	EDAS	SAW	SPW
GRA	1,0000	0,9597	0,9780	0,9768	0,9121	0,9280	0,9780	0,9518
AHP		1,0000	0,9908	0,9890	0,9048	0,9304	0,9908	0,9725
ARAS			1,0000	0,9951	0,9176	0,9377	1,0000	0,9780
WASPAS				1,0000	0,9408	0,9451	0,9951	0,9884
OCRA					1,0000	0,9505	0,9176	0,9560
EDAS						1,0000	0,9377	0,9426
SAW							1,0000	0,9780
SPW								1,0000

На основу резултата који су приказани у табелама 6.50 и 6.51, може се закључити да је за комбинацију *VKO* метода *MOORA*, *ROV*, *COPRAS*, *WASPAS*, *OCRA*, *EDAS*, *MABAC* и *SPW*:

1. **Задовољен први критеријум** – *Spirman*-ов коефицијент корелација рангова је за све комбинације метода у оквиру граничне вредности $0,9 \leq R_i \leq 1$ ($R_{\min} = 0,9121$).
2. **Задовољен други критеријум** – *Kendal*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq W$ ($W = 0,9588$) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq R$ ($R = 0,9556$) су у оквиру граничних вредности.
3. **Задовољен и трећи критеријум**, просечна стандардна девијација је у оквиру граничне вредности $\sigma_{sr} \leq 1,5-2$ ($\sigma_{sr} = 1,4828$).

На основу добијених резултата који су приказани у табелама 6.52 и 6.53, може се закључити да је за комбинација *VKO* метода *GRA*, *AHP*, *ARAS*, *WASPAS*, *OCRA*, *EDAS*, *SAW* и *SPW*:

1. **Задовољен први критеријум** – *Spirman*-ов коефицијент корелација рангова је за све комбинације метода у оквиру граничне вредности $0,9 \leq R_i \leq 1$ ($R_{\min} = 0,9127$).
2. **Задовољен други критеријум** – *Kendal*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq W$ ($W = 0,9623$) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq R$ ($R = 0,9594$) су у оквиру граничних вредности и
3. **Задовољен и трећи критеријум**, просечна стандардна девијација је у оквиру граничне вредности $\sigma_{sr} \leq 1,5-2$ ($\sigma_{sr} = 1,4126$).

Анализом добијених резултата посматраних варијанти друге итерација А и Б, закључено је да је боља варијанта Б, због повољнијих резултата корелационих фактора. На основу тога оптимални ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса је дат у табели 6.52, а у табели 6.54 је издвојено 5 најбоље ранжираних нивоа параметара са вредностима параметара обраде А-Д и критеријума оптимизације *MRR*, Δa , Δb , Δc , Δd и *Ra*.

Табела 6.54. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 1. функције циља

Број Екс.	A	B	C	D	E	MRR	Δa	Δb	Δc	Δd	Ra	Ранг
13	1,0	12000	600	3	1	1281,690	0,0080	0,01150	0,0890	0,0940	0,1375	1
17	1,0	24000	1200	2	1	6825,000	0,0280	0,01550	0,0790	0,1405	0,1925	2
12	1,0	6000	2400	1	1	7194,940	0,0100	0,02050	0,1135	0,1170	0,5100	3
9	0,5	24000	2400	2	1	9626,320	0,0380	0,03975	0,0685	0,1000	0,2925	4
5	0,5	12000	1200	3	1	1967,178	0,0160	0,03475	0,0645	0,0925	0,3375	5

6.2.4 Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 2. функције циља

6.2.4.1 Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације за 2. функцију циља

У табели 6.55 дати су резултујући коефицијенти добијени применом појединих метода ВКО на основу којих је извршено рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса обраде за варијанту 2. функције циља – тачност обраде где су најзначајнији критеријуми оптимизације тачност мера, облика и односа површина (Δa , Δb , Δc и Δd).

Табела 6.55. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 2. функције циља

Бр. Екс.	Метода ВКО									
	GRA		AHP		MOORA		TOPSIS		ROV	
	GRG	Ранг	F_i	Ранг	Y_i	Ранг	$CCo(P_i)$	Ранг	U_i	Ранг
1	0,5893	4	0,0410	8	-0,1183	13	0,6157	16	0,3653	13
2	0,2465	24	0,0212	25	-0,1926	22	0,5649	22	0,2532	22
3	0,4466	15	0,0343	17	-0,1072	11	0,7325	10	0,3825	11
4	0,4622	13	0,0385	13	-0,0911	6	0,8060	5	0,4052	6
5	0,6218	2	0,0487	4	-0,0688	3	0,8330	3	0,4353	3
6	0,4480	14	0,0361	16	-0,0968	9	0,7723	6	0,3956	9
7	0,4938	12	0,0431	6	-0,0804	4	0,8293	4	0,4173	4
8	0,4995	11	0,0386	12	-0,0931	7	0,7541	7	0,3992	7
9	0,5607	6	0,0418	7	-0,1007	10	0,6591	12	0,3870	10
10	0,3335	20	0,0240	23	-0,2045	24	0,4301	25	0,2497	23
11	0,3929	17	0,0311	19	-0,1400	15	0,6115	18	0,3326	15
12	0,5550	7	0,0562	2	-0,0621	2	0,8782	1	0,4422	2
13	0,7599	1	0,0807	1	-0,0499	1	0,8624	2	0,4603	1
14	0,5264	9	0,0405	9	-0,1496	16	0,5147	24	0,3225	16
15	0,5808	5	0,0381	14	-0,0952	8	0,7416	9	0,3957	8
16	0,5319	8	0,0439	5	-0,1283	14	0,6025	19	0,3481	14
17	0,5893	3	0,0514	3	-0,0863	5	0,7471	8	0,4062	5
18	0,5197	10	0,0399	10	-0,1110	12	0,6618	11	0,3741	12
19	0,3811	18	0,0285	22	-0,1544	18	0,6220	15	0,3092	18
20	0,3137	23	0,0291	21	-0,1713	20	0,6120	17	0,2794	20
21	0,1795	27	0,0147	27	-0,3466	27	0,1215	27	0,0341	27
22	0,1987	26	0,0152	26	-0,2497	26	0,3861	26	0,1750	26
23	0,2363	25	0,0239	24	-0,2296	25	0,5153	23	0,1976	25
24	0,3494	19	0,0363	15	-0,1508	17	0,6534	13	0,3112	17
25	0,4072	16	0,0395	11	-0,1850	21	0,5836	20	0,2559	21
26	0,3304	21	0,0310	20	-0,1931	23	0,5760	21	0,2448	24
27	0,3181	22	0,0330	18	-0,1627	19	0,6223	14	0,2901	19

Табела 6.55. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 2. функције циља - наставак

Бр. Екс.	Метода ВКО									
	COPRAS		ARAS		WASPAS		VIKOR		OCRA	
	U_j	Ранг	U_i %	Ранг	U_j %	Ранг	Q_i	Ранг	P_i	Ранг
1	0,4326	13	50,7733	8	0,4462	7	0,3814	16	6,6677	14
2	0,2808	21	26,2409	25	0,2284	25	0,4185	20	4,7054	17
3	0,4638	11	42,4797	17	0,3912	15	0,2077	10	6,8304	13
4	0,5358	6	47,7144	13	0,4383	8	0,0882	4	7,1569	10
5	0,7151	3	60,3897	4	0,5545	3	0,0669	3	7,6804	5
6	0,4921	8	44,7742	16	0,4088	14	0,1540	6	7,1968	9
7	0,6199	4	53,3903	6	0,4804	5	0,0896	5	7,4284	7
8	0,5286	7	47,8926	12	0,4374	9	0,1882	7	7,4222	8
9	0,4831	10	51,7939	7	0,4591	6	0,3176	12	7,5358	6
10	0,2601	24	29,8063	23	0,2639	23	0,6896	26	4,6380	18
11	0,3700	15	38,5422	19	0,3309	18	0,3813	15	6,4940	15
12	0,7205	2	69,6623	2	0,6137	2	0,0213	1	8,4076	1
13	1,0000	1	100,000	1	0,8337	1	0,0426	2	8,3588	2
14	0,3497	16	50,2337	9	0,4201	12	0,5657	24	6,3066	16
15	0,4909	9	47,2470	14	0,4124	13	0,1923	8	8,0525	3
16	0,4042	14	54,3897	5	0,4341	10	0,4015	17	6,8792	12
17	0,5601	5	63,7039	3	0,5321	4	0,1992	9	7,9808	4
18	0,4582	12	49,4165	10	0,4316	11	0,3135	11	7,1091	11
19	0,3188	19	35,3726	22	0,3039	20	0,3673	13	3,5553	21
20	0,2962	20	36,1002	21	0,2976	22	0,4133	19	3,5193	22
21	0,1974	27	18,1967	27	0,1433	27	1,0000	27	0,0000	27
22	0,2079	26	18,7863	26	0,1707	26	0,5854	25	1,4264	26
23	0,2384	25	29,5752	24	0,2368	24	0,5426	23	2,2171	25
24	0,3281	17	45,0310	15	0,3623	17	0,3740	14	3,8062	20
25	0,2771	22	49,0101	11	0,3653	16	0,4838	22	3,3995	23
26	0,2621	23	38,4248	20	0,3006	21	0,4604	21	2,9836	24
27	0,3197	18	40,9285	18	0,3262	19	0,4024	18	4,0631	19

Табела 6.55. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 2. функције циља - наставак

Бр. Екс.	Метода ВКО							
	EDAS		MABAC		SAW		SPW	
	S_i	Ранг	S_i	Ранг	S_i	Ранг	S_i	Ранг
1	0,7218	12	0,1050	13	0,5010	6	0,3915	11
2	0,4111	24	-0,1192	22	0,2427	25	0,2142	24
3	0,6941	13	0,1395	11	0,4162	17	0,3661	14
4	0,7747	6	0,1848	6	0,4610	10	0,4156	8
5	0,8833	3	0,2451	3	0,5866	3	0,5225	3
6	0,7406	10	0,1657	9	0,4388	14	0,3787	13
7	0,8273	4	0,2091	4	0,5024	5	0,4584	5
8	0,7531	9	0,1728	7	0,4529	12	0,4219	6
9	0,7729	7	0,1483	10	0,4999	7	0,4184	7
10	0,4404	23	-0,1262	23	0,2949	23	0,2329	23
11	0,5936	16	0,0397	15	0,3430	21	0,3188	16
12	0,9036	2	0,2588	2	0,6271	2	0,6002	2
13	0,9843	1	0,2951	1	0,8722	1	0,7951	1
14	0,6328	15	0,0195	16	0,4779	8	0,3622	15
15	0,7637	8	0,1658	8	0,4374	15	0,3874	12
16	0,6761	14	0,0706	14	0,4688	9	0,3994	10
17	0,7947	5	0,1868	5	0,5534	4	0,5107	4
18	0,7221	11	0,1227	12	0,4571	11	0,4060	9
19	0,5293	19	-0,0072	18	0,3483	20	0,2594	20
20	0,5073	21	-0,0668	20	0,3380	22	0,2572	21
21	0,0686	27	-0,5575	27	0,1660	27	0,1205	27
22	0,2465	26	-0,2756	26	0,1848	26	0,1566	26
23	0,3569	25	-0,2305	25	0,2750	24	0,1985	25
24	0,5713	17	-0,0032	17	0,4247	16	0,2999	17
25	0,5159	20	-0,1138	21	0,4444	13	0,2862	18
26	0,4773	22	-0,1359	24	0,3545	19	0,2466	22
27	0,5503	18	-0,0454	19	0,3791	18	0,2734	19

6.2.4.2 Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 2. функцију циља

На основу резултата из претходног поглавља који се односе на појединачно оцењивање и рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса обраде на бази четрнаест различитих метода, применом методологије интегралног оцењивања решења извршено је свеобухватно поређење и рангирање двадесет и седам нивоа параметара према плану експеримента.

У циљу добијања свеобухватног коначног рангирања нивоа параметара технолошког процеса обраде посматраних танкозидних алуминијумских делова на бази резултата примене четрнаест вишекритеријумских метода тестирана је сагласност добијених вредности параметара корелације са постављеним граничним вредностима.

У табели 6.56 дат је преглед рангова алтернативних нивоа, вредности стандардне девијације по нивоима (σ_i), док су у доњем делу табеле дате вредности максималне стандардне девијације (σ_{max}) и просечне стандардне девијације (σ_{sr}), *Kendal*-ов коефицијент корелације (W) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације (R).

У табели 6.57 приказане су вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације рангова алтернативних нивоа параметара свих примењених метода *BKO* по паровима. У посматраном случају након прве итерације констатовано је да се резултати добијени применом посматраних 14 метода не могу користити за интегрално рангирање алтернативних нивоа параметара јер нису задовољене граничне вредности првог задатог критеријума ($0,9 \leq R_i \leq 1$), односно постоји бар једна комбинација метода (*овде и много више*) чији је *Spirman*-ов коефицијент корелације R_i мањи од граничне вредности 0,9.

Сходно томе да у оквиру прве итерације нису остварени задати критеријуми морало се приступити другој итерацији која је приказана у наставку са одговарајућим резултатима.

Након анализе резултата у табели 6.57, закључено је да постоји група метода *BKO* које задовољавају све постављене критеријуме, што је кроз примену друге итерације и доказано.

Друга итерација обухвата интегралну примену следећих 7 метода *BKO*: *MOORA*, *ROV*, *COPRAS*, *WASPAS*, *EDAS*, *MABAC* и *SPW*. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара дати су у табели 6.58, а вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације у табели 6.59.

Табела 6.56. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара примењених метода ВКО

Бр. Екс.	GRA	AHP	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	ARAS	WASPAS	VIKOR	OCRA	EDAS	MABAC	SAW	SPW	σ_i - Стан. девијација
1	4	8	13	16	13	13	8	7	16	14	12	13	6	11	3,762
2	24	25	22	22	22	21	25	25	20	17	24	22	25	24	2,335
3	15	17	11	10	11	11	17	15	10	13	13	11	17	14	2,636
4	13	13	6	5	6	6	13	8	4	10	6	6	10	8	3,134
5	2	4	3	3	3	3	4	3	3	5	3	3	3	3	0,699
6	14	16	9	6	9	8	16	14	6	9	10	9	14	13	3,474
7	12	6	4	4	4	4	6	5	5	7	4	4	5	5	2,134
8	11	12	7	7	7	7	12	9	7	8	9	7	12	6	2,205
9	6	7	10	12	10	10	7	6	12	6	7	10	7	7	2,205
10	20	23	24	25	23	24	23	23	26	18	23	23	23	23	1,940
11	17	19	15	18	15	15	19	18	15	15	16	15	21	16	1,978
12	7	2	2	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	1,460
13	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	0,426
14	9	9	16	24	16	16	9	12	24	16	15	16	8	15	5,048
15	5	14	8	9	8	9	14	13	8	3	8	8	15	12	3,546
16	8	5	14	19	14	14	5	10	17	12	14	14	9	10	4,154
17	3	3	5	8	5	5	3	4	9	4	5	5	4	4	1,762
18	10	10	12	11	12	12	10	11	11	11	11	12	11	9	0,917
19	18	22	18	15	18	19	22	20	13	21	19	18	20	20	2,486
20	23	21	20	17	20	20	21	22	19	22	21	20	22	21	1,499
21	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	0,000
22	26	26	26	26	26	26	26	26	25	26	26	26	26	26	0,267
23	25	24	25	23	25	25	24	24	23	25	25	25	24	25	0,756
24	19	15	17	13	17	17	15	17	14	20	17	17	16	17	1,829
25	16	11	21	20	21	22	11	16	22	23	20	21	13	18	4,136
26	21	20	23	21	24	23	20	21	21	24	22	24	19	22	1,626
27	22	18	19	14	19	18	18	19	18	19	18	19	18	19	1,651
Максимална стандардна девијација $\sigma_{max} =$													5,048		
Средња вредност стандардне девијације $\sigma_{st} =$													2,151		
Kendal-ов коефицијент корелације $W =$													0,905		
Просечан Spirtman-ов коефицијент корелације $R =$													0,898		

Табела 6.57. *Spirman*-ови коефицијенти корелације рангова примењених метода ВКО

	GRA	AHP	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	ARAS	WASPAS	VIKOR	OCRA	EDAS	MABAC	SAW	SPW
GRA	1,0000	0,9164	0,8565	0,6844	0,8571	0,7437	0,9164	0,9322	0,6996	0,8706	0,8883	0,8571	0,9182	0,9072
AHP		1,0000	0,8382	0,6984	0,8364	0,8309	1,0000	0,9634	0,6795	0,8028	0,8785	0,8364	0,9835	0,9298
MOORA			1,0000	0,9377	0,9994	0,9982	0,8382	0,9335	0,9469	0,9475	0,9902	0,9994	0,8663	0,9670
TOPSIS				1,0000	0,9353	0,9389	0,6984	0,8168	0,9841	0,8468	0,9176	0,9353	0,7405	0,8712
ROV					1,0000	0,9976	0,8364	0,9322	0,9438	0,9512	0,9896	1,0000	0,8639	0,9664
COPRAS						1,0000	0,8309	0,9280	0,9463	0,9487	0,9872	0,9976	0,8608	0,9634
ARAS							1,0000	0,9634	0,6795	0,8028	0,8785	0,8364	0,9835	0,9298
WASPAS								1,0000	0,8107	0,8840	0,9609	0,9322	0,9805	0,9835
VIKOR									1,0000	0,8654	0,9182	0,9438	0,7210	0,8718
OCRA										1,0000	0,9475	0,9512	0,8114	0,9237
EDAS											1,0000	0,9596	0,9066	0,9792
MABAC												1,0000	0,8639	0,9664
SAW													1,0000	0,9383
SPW														1,0000

Друга итерација

Табела 6.58. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација

Бр. Екс.	MOORA	ROV	COPRAS	WASPAS	EDAS	MAVAC	SPW	Сред. Вред. рангова	Ранг алтернативе	σ – Стандардна девијација
1	13	13	13	7	12	13	11	11,71	12	2,2147
2	22	22	21	25	24	22	24	22,86	23	1,4639
3	11	11	11	15	13	11	14	12,29	13	1,7043
4	6	6	6	8	6	6	8	6,57	6	0,9759
5	3	3	3	3	3	3	3	3,00	3	0,0000
6	9	9	8	14	10	9	13	10,29	10	2,2887
7	4	4	4	5	4	4	5	4,29	4	0,4880
8	7	7	7	9	9	7	6	7,43	7	1,1339
9	10	10	10	6	7	10	7	8,57	8	1,8127
10	24	23	24	23	23	23	23	23,29	24	0,4880
11	15	15	15	18	16	15	16	15,71	16	1,1127
12	2	2	2	2	2	2	2	2,00	2	0,0000
13	1	1	1	1	1	1	1	1,00	1	0,0000
14	16	16	16	12	15	16	15	15,14	15	1,4639
15	8	8	9	13	8	8	12	9,43	9	2,1492
16	14	14	14	10	14	14	10	12,86	14	1,9518
17	5	5	5	4	5	5	4	4,71	5	0,4880
18	12	12	12	11	11	12	9	11,29	11	1,1127
19	18	18	19	20	19	18	20	18,86	19	0,8997
20	20	20	20	22	21	20	21	20,57	21	0,7868
21	27	27	27	27	27	27	27	27,00	27	0,0000
22	26	26	26	26	26	26	26	26,00	26	0,0000
23	25	25	25	24	25	25	25	24,86	25	0,3780
24	17	17	17	17	17	17	17	17,00	17	0,0000
25	21	21	22	16	20	21	18	19,86	20	2,1157
26	23	24	23	21	22	24	22	22,71	22	1,1127
27	19	19	18	19	18	19	19	18,71	18	0,4880
Максимална стандардна девијација σ_{max}=										2,2887
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr}=										0,9863
Kendal-ов коефицијент корелације W=										0,9870
Просечан Spearman-ов коефицијент корелације R=										0,9763

Табела 6.59. Вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације рангова – друга итерација

	<i>MOORA</i>	<i>ROV</i>	<i>COPRAS</i>	<i>WASPAR</i>	<i>EDAS</i>	<i>MABAC</i>	<i>SPW</i>
<i>MOORA</i>	1,0000	0,9994	0,9982	0,9335	0,9902	0,9994	0,9670
<i>ROV</i>		1,0000	0,9976	0,9322	0,9596	1,0000	0,9664
<i>COPRAS</i>			1,0000	0,9280	0,9872	0,9976	0,9634
<i>WASPAS</i>				1,0000	0,9609	0,9322	0,9835
<i>EDAS</i>					1,0000	0,9896	0,9792
<i>MABAC</i>						1,0000	0,9664
<i>SPW</i>							1,0000

На основу добијених резултата који су приказани у табелама 6.58 и 6.59, донесен је закључак да је за комбинацију *BKO* метода *MOORA*, *ROV*, *COPRAS*, *WASPAS*, *EDAS*, *MABAC* и *SPW*:

1. **Задовољен први критеријум** – *Spirman* -ов коефицијент корелација рангова је за све комбинације метода у оквиру граничне вредности $0,9 \leq R_i \leq 1$ ($R_{\min}=0,9280$).
2. **Задовољен други критеријум** – Kendal-ов коефицијент корелације $0,9 \leq W$ ($W=0,9870$) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq R$ ($R=0,9763$) су у оквиру граничних вредности.
3. **Задовољен трећи критеријум**, просечна стандардна девијација је у оквиру граничне вредности $\sigma_{sr} \leq 1,5-2$ ($\sigma_{sr}=0,9863$).

С обзиром да су задовољени сви критеријуми за интегралну примену метода *BKO*, оптимални ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса је дат у табели 6.58, а у табели 6.60 је дат приказ 5 најбоље ранжираних нивоа параметара са вредностима параметара обраде *A-D* и критеријума оптимизације *MRR*, Δa , Δb , Δc , Δd и *Ra*.

Табела 6.60. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 2. функције циља

Бр. Екс.	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>MRR</i>	Δa	Δb	Δc	Δd	<i>Ra</i>	Ранг
13	1,0	12000	600	3	1	1281,690	0,0080	0,01150	0,0890	0,0940	0,1375	1
12	1,0	6000	2400	1	1	7194,940	0,0100	0,02050	0,1135	0,1170	0,5100	2
5	0,5	12000	1200	3	1	1967,178	0,0160	0,03475	0,0645	0,0925	0,3375	3
9	0,5	24000	600	3	2	1754,924	0,0120	0,04175	0,1160	0,1335	0,4100	4
17	1,0	24000	1200	2	1	6825,000	0,0280	0,01550	0,0790	0,1405	0,1925	5

6.2.5 Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 3. функције циља

6.2.5.1 Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације за 3. функцију циља

У табели 6.61 дати су одговарајући резултујући коефицијенти добијени применом појединих метода ВКО на основу којих је извршено рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса обраде за варијанту 3. функције циља – *производност*, где је најзначајнији критеријум оптимизације *количина скинуте струготине у јединици времена (MRR)*.

Табела 6.61. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 3. функције циља

Бр. Екс.	Метода ВКО									
	GRA		АНП		MOORA		TOPSIS		ROV	
	GRG	Ранг	F_i	Ранг	Y_i	Ранг	$CCo(P_i)$	Ранг	U_i	Ранг
1	0,5764	3	0,0323	16	-0,0360	17	0,3293	23	0,2413	16
2	0,2316	25	0,0323	17	-0,0374	19	0,4472	8	0,2309	19
3	0,3898	16	0,0306	21	-0,0212	12	0,3603	16	0,2623	12
4	0,4056	14	0,0317	19	-0,0176	10	0,3617	15	0,2683	10
5	0,5987	2	0,0337	14	-0,0178	11	0,3465	19	0,2688	9
6	0,4126	13	0,0451	8	0,0420	4	0,5925	5	0,3378	4
7	0,4446	12	0,0297	22	-0,0277	13	0,3374	21	0,2551	13
8	0,4508	11	0,0364	11	0,0044	7	0,4126	10	0,2916	7
9	0,5478	5	0,0532	3	0,0638	2	0,6424	2	0,3603	2
10	0,2827	23	0,0230	26	-0,0958	26	0,2392	26	0,1667	26
11	0,3517	17	0,0257	24	-0,0483	21	0,3112	25	0,2243	20
12	0,5381	6	0,0510	5	0,0465	3	0,5317	6	0,3450	3
13	0,7522	1	0,0539	2	-0,0115	8	0,3569	18	0,2770	8
14	0,5216	7	0,0351	12	-0,0325	15	0,3594	17	0,2436	15
15	0,4750	10	0,0632	1	0,1144	1	0,8358	1	0,4231	1
16	0,4937	8	0,0379	10	-0,0306	14	0,3464	20	0,2450	14
17	0,5595	4	0,0525	4	0,0385	5	0,5125	7	0,3313	5
18	0,4781	9	0,0345	13	-0,0175	9	0,3639	14	0,2635	11
19	0,3448	19	0,0239	25	-0,0634	24	0,3122	24	0,2028	23
20	0,3086	22	0,0314	20	-0,0348	16	0,3917	11	0,2325	18
21	0,2103	26	0,0456	7	-0,0576	23	0,5986	4	0,1909	24
22	0,1829	27	0,0161	27	-0,1191	27	0,2094	27	0,1285	27
23	0,2370	24	0,0336	15	-0,0556	22	0,4410	9	0,2039	22
24	0,3477	18	0,0322	18	-0,0365	18	0,3693	13	0,2341	17
25	0,4016	15	0,0407	9	-0,0445	20	0,3823	12	0,2171	21
26	0,3297	21	0,0275	23	-0,0703	25	0,3310	22	0,1861	25
27	0,3345	20	0,0474	6	0,0313	6	0,6367	3	0,3115	6

Табела 6.61. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 3. функције циља - наставак

Бр. Екс.	Метода ВКО									
	COPRAS		ARAS2		WASPAS		VIKOR		OCRA	
	U_j	Ранг	U_i %	Ранг	U_j %	Ранг	Q_i	Ранг	P_i	Ранг
1	0,4786	19	51,1608	16	0,3178	16	0,7653	22	3,9233	12
2	0,5260	14	51,1481	17	0,3006	21	0,5648	8	2,4153	22
3	0,5123	15	48,4040	21	0,3171	17	0,6418	11	3,6446	14
4	0,5299	13	50,1936	19	0,3282	15	0,6459	12	3,7772	13
5	0,6426	9	53,2646	14	0,3341	14	0,7317	18	4,3339	6
6	0,7384	6	71,2942	8	0,4425	6	0,3067	3	4,0542	11
7	0,5564	11	46,9321	22	0,2905	22	0,7642	21	4,1475	9
8	0,6372	10	57,4954	11	0,3769	8	0,5681	9	4,3114	7
9	0,8387	3	84,1570	3	0,5277	2	0,2387	2	4,7149	5
10	0,3419	26	36,3544	26	0,2303	25	0,8316	24	1,9776	24
11	0,4200	23	40,6486	24	0,2572	23	0,7696	23	3,6094	15
12	0,8320	4	80,6140	5	0,5145	4	0,3718	5	4,8477	2
13	0,9177	2	85,2771	2	0,4474	5	0,7480	20	4,7919	3
14	0,4814	18	55,4603	12	0,3470	12	0,6580	13	3,5684	16
15	1,0000	1	100,000	1	0,5693	1	0,0000	1	4,7259	4
16	0,4957	17	59,9038	10	0,3520	10	0,7300	17	4,1193	10
17	0,7951	5	82,9977	4	0,5170	3	0,4115	6	4,8665	1
18	0,5478	12	54,5216	13	0,3469	13	0,6704	14	4,1701	8
19	0,3526	24	37,7680	25	0,2251	26	0,8691	26	2,4285	21
20	0,4646	20	49,6901	20	0,3075	19	0,6800	15	2,5104	20
21	0,7290	7	72,0641	7	0,3477	11	0,5108	7	0,0000	27
22	0,2783	27	25,4879	27	0,1650	27	0,9429	27	0,7382	26
23	0,5006	16	53,0725	15	0,3031	20	0,6126	10	1,2713	25
24	0,4494	21	50,9218	18	0,3131	18	0,7152	16	2,5758	19
25	0,4311	22	64,2962	9	0,3665	9	0,7407	19	2,6001	18
26	0,3444	25	43,4779	23	0,2562	24	0,8583	25	2,2118	23
27	0,7059	8	74,9848	6	0,4359	7	0,3165	4	2,9813	17

Табела 6.61. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 3. функције циља - наставак

Бр. Екс.	Метода ВКО							
	EDAS		MABAC		SAW		SPW	
	S _i	Ранг	S _i	Ранг	S _i	Ранг	S _i	Ранг
1	0,4453	16	-0,0052	16	0,3613	15	0,2742	19
2	0,4340	18	-0,0261	19	0,3253	22	0,2759	18
3	0,4940	12	0,0368	12	0,3330	19	0,3013	14
4	0,5046	10	0,0488	10	0,3463	16	0,3101	13
5	0,5044	11	0,0497	9	0,3795	12	0,2887	15
6	0,7056	4	0,1878	4	0,4714	7	0,4136	5
7	0,4707	13	0,0225	13	0,3271	21	0,2540	21
8	0,5841	7	0,0954	7	0,3858	11	0,3680	7
9	0,7832	2	0,2328	2	0,5527	3	0,5028	3
10	0,2374	26	-0,1544	26	0,2490	26	0,2116	25
11	0,4058	21	-0,0392	20	0,2667	24	0,2478	23
12	0,7245	3	0,2023	3	0,5277	5	0,5013	4
13	0,5257	8	0,0661	8	0,5661	2	0,3286	9
14	0,4596	15	-0,0007	15	0,3763	13	0,3176	11
15	0,9478	1	0,3583	1	0,6323	1	0,5063	1
16	0,4668	14	0,0023	14	0,3860	10	0,3180	10
17	0,7010	5	0,1747	5	0,5298	4	0,5043	2
18	0,5100	9	0,0392	11	0,3650	14	0,3287	8
19	0,3402	24	-0,0822	23	0,2649	25	0,1854	26
20	0,4390	17	-0,0228	18	0,3278	20	0,2873	16
21	0,3489	23	-0,1060	24	0,4417	8	0,2537	22
22	0,1485	27	-0,2307	27	0,1721	27	0,1579	27
23	0,3616	22	-0,0799	22	0,3403	18	0,2659	20
24	0,4316	19	-0,0196	17	0,3442	17	0,2821	17
25	0,4070	20	-0,0535	21	0,4213	9	0,3116	12
26	0,3170	25	-0,1156	25	0,2911	23	0,2212	24
27	0,6602	6	0,1352	6	0,4798	6	0,3919	6

6.2.5.2. Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 3. функцију циља

На основу резултата из претходног поглавља који се односе на појединачно оцењивање и рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса обраде на бази четрнаест различитих метода, применом методологије интегралног оцењивања решења извршено је свеобухватно поређење и рангирање двадесет и седам нивоа параметара према плану експеримента.

У циљу добијања свеобухватног рангирања нивоа параметара технолошког процеса обраде посматраних танкозидних алуминијумских делова на бази резултата примене четрнаест вишекритеријумских метода тестирана је сагласност добијених вредности параметара корелације са постављеним граничним вредностима.

У табели 6.62 дат је преглед рангова алтернативних нивоа, вредности стандардне девијације по нивоима (σ_i), док су у доњем делу табеле дате вредности максималне стандардне девијације (σ_{max}) и просечне стандардне девијације (σ_{sr}), *Kendal*-ов коефицијент корелације (W) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације (R).

У табели 6.63 приказане су вредности *Spirman*-ов коефицијената корелације рангова алтернативних нивоа параметара свих примењених метода *BKO* по паровима.

У посматраном случају након прве итерације је констатовано да се резултати добијени применом посматраних 14 метода не могу користити за интегрално рангирање алтернативних нивоа параметара јер нису задовољене граничне вредности првог задатог критеријума ($0,9 \leq R_i \leq 1$), односно постоји бар једна комбинација метода (овде и више) чији је *Spirman*-ов коефицијент корелације R_i мањи од граничне вредности 0,9.

Како у оквиру прве итерације нису остварени задати критеријуми приступило се другој итерацији која је приказана у наставку са одговарајућим резултатима.

Након анализе резултата у табели 6.63, дошло се до закључка да постоје две комбинације метода *BKO* које задовољавају све постављене критеријуме, што је кроз примену друге итерације и доказано:

- ❖ **Друга итерација А**, обухвата интегралну примену следећих 5 метода *BKO*: *MOORA*, *ROV*, *EDAS*, *MABAC* и *SPW*. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара дати су у табели 6.64, а вредности *Spirman*-ов коефицијената корелације у табели 6.65.
- ❖ **Друга итерација Б**, обухвата интегралну примену следеће 4 методе *BKO*: *AHP*, *ARAS*, *WASPAS*, и *SAW*. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара дати су у табели 6.66, а *Spirman*-ових коефицијената корелације у табели 6.67.

Табела 6.62. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара примењених метода ВКО

Бр. Екс.	GRA	AHP	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	ARAS	WASPAS	VIKOR	OCRA	EDAS	MABAC	SAW	SPW	σ - Станд. девијација
1	3	16	17	23	16	19	16	16	22	12	16	16	15	19	4,721
2	25	17	19	8	19	14	17	21	8	22	18	19	22	18	4,877
3	16	21	12	16	12	15	21	17	11	14	12	12	19	14	3,371
4	14	19	10	15	10	13	19	15	12	13	10	10	16	13	3,082
5	2	14	11	19	9	9	14	14	18	6	11	9	12	15	4,551
6	13	8	4	5	4	6	8	6	3	11	4	4	7	5	2,894
7	12	22	13	21	13	11	22	22	21	9	13	13	21	21	5,014
8	11	11	7	10	7	10	11	8	9	7	7	7	11	7	1,805
9	5	3	2	2	2	3	3	2	2	5	2	2	3	3	1,051
10	23	26	26	26	26	26	26	25	24	24	26	26	26	25	1,008
11	17	24	21	25	20	23	24	23	23	15	21	20	24	23	2,872
12	6	5	3	6	3	4	5	4	5	2	3	3	5	4	1,231
13	1	2	8	18	8	2	2	5	20	3	8	8	2	9	5,908
14	7	12	15	17	15	18	12	12	13	16	15	15	13	11	2,818
15	10	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	2,476
16	8	10	14	20	14	17	10	10	17	10	14	14	10	10	3,539
17	4	4	5	7	5	5	4	3	6	1	5	5	4	2	1,541
18	9	13	9	14	11	12	13	13	14	8	9	11	14	8	2,301
19	19	25	24	24	23	24	25	26	26	21	24	23	25	26	1,979
20	22	20	16	11	18	20	20	19	15	20	17	18	20	16	2,828
21	26	7	23	4	24	7	7	11	7	27	23	24	8	22	8,939
22	27	27	27	27	27	27	27	27	27	26	27	27	27	27	0,267
23	24	15	22	9	22	16	15	20	10	25	22	22	18	20	4,957
24	18	18	18	13	17	21	18	18	16	19	19	17	17	17	1,785
25	15	9	20	12	21	22	9	9	19	18	20	21	9	12	5,229
26	21	23	25	22	25	25	23	24	25	23	25	25	23	24	1,311
27	20	6	6	3	6	8	6	7	4	17	6	6	6	6	4,781
Максимална стандардна девијација σ_{max}=													8,939		
Средња вредност стандардне девијације σ_{SI}=													3,227		
Kendal-ов коефицијент корелације W=													0,786		
Просечан Spearman-ов коефицијент корелације R=													0,770		

Табела 6.63. Вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације рангова између примењених метода ВКО

	<i>GRA</i>	<i>AHP</i>	<i>MOORA</i>	<i>TOPSIS</i>	<i>ROV</i>	<i>COPRAS</i>	<i>ARAS</i>	<i>WASPAS</i>	<i>VIKOR</i>	<i>OCRA</i>	<i>EDAS</i>	<i>MABAC</i>	<i>SAW</i>	<i>SPW</i>
<i>GRA</i>	1,0000	0,5543	0,6862	0,0739	0,7118	0,5427	0,5543	0,6343	0,1752	0,8993	0,6935	0,7118	0,6245	0,6368
<i>AHP</i>		1,0000	0,7473	0,7643	0,7295	0,8419	1,0000	0,9634	0,7375	0,6148	0,7503	0,7295	0,9823	0,8529
<i>MOORA</i>			1,0000	0,6361	0,9945	0,8590	0,7473	0,8492	0,7320	0,8669	0,9988	0,9945	0,7961	0,9316
<i>TOPSIS</i>				1,0000	0,6013	0,7320	0,7643	0,7369	0,9457	0,2784	0,6319	0,6013	0,7186	0,7131
<i>ROV</i>					1,0000	0,8516	0,7295	0,8327	0,7082	0,8803	0,9945	1,0000	0,7839	0,9115
<i>COPRAS</i>						1,0000	0,8419	0,8370	0,7778	0,7167	0,8639	0,8516	0,8486	0,7808
<i>ARAS</i>							1,0000	0,9634	0,7375	0,6148	0,7503	0,7295	0,9823	0,8529
<i>WASPAS</i>								1,0000	0,7527	0,7204	0,8492	0,8327	0,9829	0,9328
<i>VIKOR</i>									1,0000	0,3834	0,7326	0,7082	0,7057	0,7723
<i>OCRA</i>										1,0000	0,8700	0,8803	0,6795	0,7790
<i>EDAS</i>											1,0000	0,9945	0,7961	0,9292
<i>MABAC</i>												1,0000	0,7839	0,9115
<i>SAW</i>													1,0000	0,8724
<i>SPW</i>														1,0000

Друга итерација А

Табела 6.64. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација А

Бр. Екс.	MOORA	ROV	EDAS	MABAC	SPW	Сред. Вред. рангова	Ранг алтернативе	σ – Стандардна девијација
1	17	16	16	16	19	16,80	16	1,3038
2	19	19	18	19	18	18,60	19	0,5477
3	12	12	12	12	14	12,40	12	0,8944
4	10	10	10	10	13	10,60	10	1,3416
5	11	9	11	9	15	11,00	11	2,4495
6	4	4	4	4	5	4,20	4	0,4472
7	13	13	13	13	21	14,60	15	3,5777
8	7	7	7	7	7	7,00	7	0,0000
9	2	2	2	2	3	2,20	2	0,4472
10	26	26	26	26	25	25,80	26	0,4472
11	21	20	21	20	23	21,00	21	1,2247
12	3	3	3	3	4	3,20	3	0,4472
13	8	8	8	8	9	8,20	8	0,4472
14	15	15	15	15	11	14,20	14	1,7889
15	1	1	1	1	1	1,00	1	0,0000
16	14	14	14	14	10	13,20	13	1,7889
17	5	5	5	5	2	4,40	5	1,3416
18	9	11	9	11	8	9,60	9	1,3416
19	24	23	24	23	26	24,00	24	1,2247
20	16	18	17	18	16	17,00	17	1,0000
21	23	24	23	24	22	23,20	23	0,8367
22	27	27	27	27	27	27,00	27	0,0000
23	22	22	22	22	20	21,60	22	0,8944
24	18	17	19	17	17	17,60	18	0,8944
25	20	21	20	21	12	18,80	20	3,8341
26	25	25	25	25	24	24,80	25	0,4472
27	6	6	6	6	6	6,00	6	0,0000
Максимална стандардна девијација σ_{max}=								3,8341
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr}=								1,0729
Kendal-ов коефицијент корелације W=								0,9728
Просечан Spigman-ов коефицијент корелације R=								0,9708

Табела 6.65. Вредности Spigman-ових коефицијената корелације рангова – друга итерација А

	MOORA	ROV	EDAS	MABAC	SPW
MOORA	1,0000	0,9945	0,9988	0,9945	0,9316
ROV		1,0000	0,9945	1,0000	0,9115
EDAS			1,0000	0,9945	0,9292
MABAC				1,0000	0,9115
SPW					1,0000

Друга итерација Б

Табела 6.66. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација Б

Бр. Екс.	AHP	ARAS	WASPAS	SAW	Сред. Вред. рангова	Ранг алтернатив	σ – Станд.ардна девијација
1	16	16	16	15	15,75	15	0,5000
2	17	17	21	22	19,25	19	2,6300
3	21	21	17	19	19,50	20	1,9149
4	19	19	15	16	17,25	17	2,0616
5	14	14	14	12	13,50	14	1,0000
6	8	8	6	7	7,25	7	0,9574
7	22	22	22	21	21,75	22	0,5000
8	11	11	8	11	10,25	11	1,5000
9	3	3	2	3	2,75	2	0,5000
10	26	26	25	26	25,75	26	0,5000
11	24	24	23	24	23,75	24	0,5000
12	5	5	4	5	4,75	5	0,5000
13	2	2	5	2	2,75	2	1,5000
14	12	12	12	13	12,25	12	0,5000
15	1	1	1	1	1,00	1	0,0000
16	10	10	10	10	10,00	10	0,0000
17	4	4	3	4	3,75	4	0,5000
18	13	13	13	14	13,25	13	0,5000
19	25	25	26	25	25,25	25	0,5000
20	20	20	19	20	19,75	21	0,5000
21	7	7	11	8	8,25	8	1,8930
22	27	27	27	27	27,00	27	0,0000
23	15	15	20	18	17,00	16	2,4495
24	18	18	18	17	17,75	18	0,5000
25	9	9	9	9	9,00	9	0,0000
26	23	23	24	23	23,25	23	0,5000
27	6	6	7	6	6,25	6	0,5000
Максимална стандардна девијација σ_{max}=							2,6300
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr}=							0,8484
Kendal-ов коефицијент корелације W=							0,9843
Просечан Spigman-ов коефицијент корелације R=							0,9831

Табела 6.67. Вредности Spigman-ових коефицијената корелације рангова – друга итерација Б

	AHP	ARAS	WASPAS	SAW
AHP	1,0000	0,9634	0,9634	0,9823
ARAS		1,0000	0,9634	0,9823
WASPAS			1,0000	0,9829
SAW				1,0000

На основу добијених резултата који су приказани у табелама 6.64 и 6.65, може се закључити да је за комбинација *BKO* метода *MOORA*, *ROV*, *EDAS*, *MABAC* и *SPW*:

1. **Задовољен први критеријум** – *Spirman* -ов коефицијент корелација рангова је за све комбинације метода у оквиру граничне вредности $0,9 \leq R_i \leq 1$ ($R_{\min}=0,9115$).
2. **Задовољен други критеријум** – *Kendal*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq W$ ($W=0,9728$ и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq R$ ($R=0,9708$) су у оквиру граничних вредности.
3. **Задовољен трећи критеријум**, просечна стандардна девијација је у оквиру граничне вредности $\sigma_{sr} \leq 1,5-2$ ($\sigma_{sr}=1,0729$).

На основу добијених резултата који су приказани у табелама 6.66 и 6.67, може се закључити да је за комбинацију *BKO* метода *AHP*, *ARAS*, *WASPAS* и *SAW*:

1. **Задовољен први критеријум** – *Spirman* -ов коефицијент корелација рангова је за све комбинације метода у оквиру граничне вредности $0,9 \leq R_i \leq 1$ ($R_{\min}=0,9634$).
2. **Задовољен други критеријум** – *Kendal*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq W$ ($W=0,9843$) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq R$ ($R=0,9831$) су у оквиру граничних вредности.
3. **Задовољен трећи критеријум**, просечна стандардна девијација је у оквиру граничне вредности $\sigma_{sr} \leq 1,5-2$ ($\sigma_{sr}=0,9831$).

Анализом добијених резултата посматраних варијанти друге итерације А и Б, закључено је да је варијанта Б боља због повољнијих резултата корелационих фактора а варијанта А због већег броја комбинације метода *BKO*. Како обе варијанте задовољавају све постављене критеријуме корелације изабрана је варијанта А као меродавна, због већег броја метода које су у корелацији.

На основу тога оптимални ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса је дат у табели 6.64, а у табели 6.68 је издвојено 5 најбољих нивоа параметара са вредностима параметара обраде А-D и критеријума оптимизације *MRR*, Δa , Δb , Δc , Δd и *Ra*.

Табела 6.68. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 3. функције циља

Бр. Екс.	А	В	С	Д	Е	MRR	Δa	Δb	Δc	Δd	Ra	Ранг
15	1,0	12000	2400	2	3	14980,790	0,0260	0,03650	0,0905	0,1510	1,0050	1
9	0,5	24000	2400	2	1	9626,320	0,0380	0,03975	0,0685	0,1000	0,2925	2
12	1,0	6000	2400	1	1	7194,940	0,0100	0,02050	0,1135	0,1170	0,5100	3
6	0,5	12000	2400	1	2	8951,117	0,0220	0,06475	0,1085	0,1015	0,8600	4
17	1,0	24000	1200	2	1	6825,000	0,0280	0,01550	0,0790	0,1405	0,1925	5

6.2.6 Вишекритеријумска оптимизација за варијанту 4. функције циља

6.2.6.1 Резултати примене метода вишекритеријумске оптимизације за 4. функцију циља

У табели 6.69 дати су одговарајући резултујући коефицијенти примене појединих метода ВКО на основу којих је извршено рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса обраде за варијанту 4. функције циља – квалитет обраде где је најзначајнији критеријум оптимизације хрпавост обрађене површине (R_a).

Табела 6.69. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 4. функције циља

Бр. Екс.	Метода ВКО									
	GRA		AHP		MOORA		TOPSIS		ROV	
	GRG	Ранг	F_i	Ранг	Y_i	Ранг	$CCo(P_i)$	Ранг	U_i	Ранг
1	0,5733	3	0,0435	7	-0,0721	10	0,7276	12	0,3612	10
2	0,2301	25	0,0211	25	-0,1873	23	0,4005	24	0,2213	23
3	0,3983	15	0,0269	21	-0,1135	21	0,5957	21	0,3186	19
4	0,4144	13	0,0286	20	-0,1080	18	0,5966	20	0,3269	17
5	0,6045	2	0,0413	8	-0,0573	5	0,7346	10	0,3851	5
6	0,4136	14	0,0320	19	-0,0922	14	0,6227	19	0,3444	12
7	0,4544	12	0,0357	15	-0,0703	9	0,7161	16	0,3682	7
8	0,4560	11	0,0368	12	-0,0631	6	0,7504	5	0,3751	6
9	0,5388	6	0,0476	5	-0,0378	3	0,8177	1	0,4027	3
10	0,2841	23	0,0184	26	-0,2303	26	0,2736	26	0,1765	26
11	0,3631	17	0,0269	22	-0,1114	20	0,6569	17	0,3139	20
12	0,5427	4	0,0445	6	-0,0491	4	0,7584	3	0,3957	4
13	0,7245	1	0,0797	1	-0,0317	1	0,7572	4	0,4153	1
14	0,5308	7	0,0322	18	-0,1144	22	0,6358	18	0,3111	21
15	0,5130	8	0,0377	10	-0,0809	11	0,5908	22	0,3579	11
16	0,4779	10	0,0532	4	-0,0680	7	0,7430	8	0,3632	9
17	0,5398	5	0,0593	2	-0,0325	2	0,8169	2	0,4095	2
18	0,4794	9	0,0402	9	-0,0684	8	0,7419	9	0,3662	8
19	0,3437	19	0,0362	13	-0,0926	15	0,7198	14	0,3310	14
20	0,3137	22	0,0327	17	-0,0993	17	0,7299	11	0,3195	18
21	0,2002	26	0,0220	24	-0,3020	27	0,2152	27	0,0726	27
22	0,1898	27	0,0144	27	-0,2194	25	0,4101	23	0,1770	25
23	0,2354	24	0,0224	23	-0,2062	24	0,3926	25	0,1935	24
24	0,3550	18	0,0345	16	-0,0953	16	0,7204	13	0,3279	16
25	0,3752	16	0,0592	3	-0,0865	13	0,7499	6	0,3296	15
26	0,3294	21	0,0373	11	-0,1081	19	0,7176	15	0,3042	22
27	0,3351	20	0,0360	14	-0,0857	12	0,7492	7	0,3368	13

Табела 6.69. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 4. функције циља - наставак

Бр. Екс.	Метода ВКО									
	COPRAS		ARAS2		WASPAS		VIKOR		OCRA	
	U_j	Ранг	U_i %	Ранг	U_j %	Ранг	Q_i	Ранг	P_i	Ранг
1	0,4782	10	54,5375	7	0,4319	7	0,1714	11	7,4032	9
2	0,2559	24	26,5187	25	0,2011	24	0,5589	23	3,7630	23
3	0,3265	22	33,7863	21	0,2799	21	0,2563	21	5,9579	17
4	0,3366	18	35,9240	20	0,2954	20	0,2483	19	6,0653	16
5	0,5748	3	51,8736	8	0,4254	8	0,1414	7	7,6378	6
6	0,3822	14	40,1667	19	0,3188	19	0,2286	16	6,3071	13
7	0,4883	8	44,8153	15	0,3636	11	0,1696	10	7,3056	10
8	0,4884	7	46,1390	12	0,3850	10	0,1095	5	7,4997	8
9	0,5614	4	59,7181	5	0,4831	5	0,0183	1	8,1093	3
10	0,1940	26	23,0728	26	0,1837	25	0,6986	26	2,8777	24
11	0,3323	20	33,7148	22	0,2722	22	0,2313	18	6,4255	12
12	0,5272	5	55,7887	6	0,4484	6	0,0401	3	7,8046	4
13	1,0000	1	100,000	1	0,7339	1	0,1087	4	8,4982	1
14	0,3297	21	40,3530	18	0,3199	18	0,2218	15	6,2789	15
15	0,4278	11	47,2522	10	0,3428	14	0,2574	22	6,6871	11
16	0,4971	6	66,7120	4	0,4991	4	0,1577	9	7,7300	5
17	0,6574	2	74,3760	2	0,5862	2	0,0260	2	8,4621	2
18	0,4806	9	50,4806	9	0,4082	9	0,1428	8	7,5394	7
19	0,3806	15	45,4894	13	0,3438	13	0,2298	17	5,8934	19
20	0,3558	17	40,9948	17	0,3223	17	0,1948	13	5,7238	21
21	0,2653	23	27,5683	24	0,1735	26	1,0000	27	0,0000	27
22	0,1894	27	18,0770	27	0,1499	27	0,5733	24	2,3877	26
23	0,2413	25	28,1136	23	0,2054	23	0,6052	25	2,5838	25
24	0,3645	16	43,3107	16	0,3388	16	0,1967	14	5,7389	20
25	0,3960	12	74,3006	3	0,5259	3	0,1931	12	6,2811	14
26	0,3341	19	46,7837	11	0,3484	12	0,2544	20	5,6464	22
27	0,3952	13	45,1361	14	0,3417	15	0,1210	6	5,9483	18

Табела 6.69. Резултујући коефицијенти примене метода ВКО и ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса за варијанту 4. функције циља - наставак

Бр. Екс.	Метода ВКО							
	EDAS		МАВАС		SAW		SPW	
	S_i	Ранг	S_i	Ранг	S_i	Ранг	S_i	Ранг
1	0,7805	7	0,1115	10	0,4716	6	0,3921	9
2	0,3660	23	-0,1684	23	0,2212	24	0,1810	23
3	0,5463	22	0,0262	19	0,3002	21	0,2595	22
4	0,5824	19	0,0429	17	0,3188	20	0,2719	20
5	0,8123	4	0,1593	5	0,4559	8	0,3949	7
6	0,6500	16	0,0779	12	0,3504	18	0,2872	19
7	0,7471	11	0,1254	7	0,3875	13	0,3397	11
8	0,7409	12	0,1392	6	0,3934	11	0,3766	10
9	0,9002	3	0,1945	3	0,5050	5	0,4611	3
10	0,2784	25	-0,2579	26	0,2067	26	0,1607	25
11	0,5535	21	0,0168	20	0,2802	22	0,2641	21
12	0,8038	5	0,1804	4	0,4694	7	0,4273	6
13	0,9598	1	0,2195	1	0,8190	1	0,6487	1
14	0,5633	20	0,0112	21	0,3513	17	0,2885	18
15	0,7573	9	0,1049	11	0,3935	10	0,2921	17
16	0,7970	6	0,1155	9	0,5377	4	0,4604	4
17	0,9018	2	0,2080	2	0,6014	3	0,5710	2
18	0,7625	8	0,1215	8	0,4240	9	0,3924	8
19	0,6788	14	0,0510	14	0,3869	14	0,3007	16
20	0,6356	18	0,0281	18	0,3434	19	0,3012	15
21	0,1969	27	-0,4658	27	0,2208	25	0,1262	27
22	0,2569	26	-0,2569	25	0,1573	27	0,1425	26
23	0,3435	24	-0,2239	24	0,2366	23	0,1741	24
24	0,6461	17	0,0449	16	0,3696	16	0,3080	14
25	0,7559	10	0,0482	15	0,6056	2	0,4461	5
26	0,6618	15	-0,0026	22	0,3886	12	0,3082	12
27	0,6952	13	0,0627	13	0,3753	15	0,3080	13

6.2.6.2 Интегрално вишекритеријумско рангирање алтернативних нивоа за 4. функцију циља

На основу резултата из претходног поглавља који се односе на појединачно оцењивање и рангирање алтернативних нивоа параметара технолошког процеса обраде на бази четрнаест различитих метода, применом методологије интегралног оцењивања решења извршено је свеобухватно поређење и рангирање двадесет и седам нивоа параметара према плану експеримента.

У циљу добијања свеобухватног коначног рангирања нивоа параметара технолошког процеса обраде посматраних танкозидних алуминијумских делова на бази резултата примене четрнаест вишекритеријумских метода тестирана је сагласност добијених вредности параметара корелације са постављеним граничним вредностима.

У табели 6.70 дат је преглед рангова алтернативних нивоа, вредности стандардне девијације по нивоима (σ_i), док су у доњем делу табеле дате вредности максималне стандардне девијације (σ_{max}) и просечне стандардне девијације (σ_{sr}), *Kendal*-ов коефицијент корелације (W) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације (R).

У табели 6.71 приказане су вредности *Spirman*-овог коефицијента корелације између рангова алтернативних нивоа параметара свих примењених метода *BKO* по паровима. У посматраном случају након прве итерације је констатовано да се резултати добијени применом посматраних 14 метода не могу користити за интегрално рангирање алтернативних нивоа параметара јер нису задовољене граничне вредности првог задатог критеријума ($0,9 \leq R_i \leq 1$), односно постоји бар једна комбинација метода (овде и много више) чији је *Spirman*-ов коефицијент корелације R_i мањи од граничне вредности 0,9.

Како у оквиру прве итерације нису остварени задати критеријуми мора се приступити другој итерацији која је приказана у наставку са одговарајућим резултатима.

Након анализе резултата у табели 6.71, дошло се до закључка да постоје две комбинације метода *BKO* које задовољавају све постављене критеријуме, што је кроз примену друге итерације и доказано:

- ❖ **Друга итерација А**, обухвата интегралну примену 7 *BKO* метода *BKO*: *AHP*, *COPRAS*, *ARAS*, *WASPAS*, *EDAS*, *SAW* и *SPW*. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара дати су у табели 6.72, а вредности *Spirman*-ових коефицијената корелације у табели 6.73.
- ❖ **Друга итерација Б**, обухвата интегралну примену 6 *BKO* метода: *MOORA*, *ROV*, *COPRAS*, *OCRA*, *EDAS*, и *MABAC*. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара дати су у табели 6.74, а *Spirman*-ових коефицијената корелације у табели 6.75.

Табела 6.70. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара примењених метода ВКО

Бр. Екс.	GRA	AHP	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	ARAS	WASPAS	VIKOR	OCRA	EDAS	MABAC	SAW	SPW	σ_i - Станд. девијација
1	3	7	10	12	10	10	7	7	11	9	7	10	6	9	2,377
2	25	25	23	24	23	24	25	24	23	23	23	23	24	23	0,825
3	15	21	21	21	19	22	21	21	21	17	22	19	21	22	2,045
4	13	20	18	20	17	18	20	20	19	16	19	17	20	20	2,061
5	2	8	5	10	5	3	8	8	7	6	4	5	8	7	2,248
6	14	19	14	19	12	14	19	19	16	13	16	12	18	19	2,801
7	12	15	9	16	7	8	15	11	10	10	11	7	13	11	2,895
8	11	12	6	5	6	7	12	10	5	8	12	6	11	10	2,763
9	6	5	3	1	3	4	5	5	1	3	3	3	5	3	1,505
10	23	26	26	26	26	26	26	25	26	24	25	26	26	25	0,938
11	17	22	20	17	20	20	22	22	18	12	21	20	22	21	2,793
12	4	6	4	3	4	5	6	6	3	4	5	4	7	6	1,251
13	1	1	1	4	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1,089
14	7	18	22	18	21	21	18	18	15	15	20	21	17	18	3,786
15	8	10	11	22	11	11	10	14	22	11	9	11	10	17	4,517
16	10	4	7	8	9	6	4	4	9	5	6	9	4	4	2,274
17	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	0,825
18	9	9	8	9	8	9	9	9	8	7	8	8	9	8	0,646
19	19	13	15	14	14	15	13	13	17	19	14	14	14	16	2,038
20	22	17	17	11	18	17	17	17	13	21	18	18	19	15	2,825
21	26	24	27	27	27	23	24	26	27	27	27	27	25	27	1,414
22	27	27	25	23	25	27	27	27	24	26	26	25	27	26	1,292
23	24	23	24	25	24	25	23	23	25	25	24	24	23	24	0,784
24	18	16	16	13	16	16	16	16	14	20	17	16	16	14	1,710
25	16	3	13	6	15	12	3	3	12	14	10	15	2	5	5,280
26	21	11	19	15	22	19	11	12	20	22	15	22	12	12	4,483
27	20	14	12	7	13	13	14	15	6	18	13	13	15	13	3,604
Максимална стандардна девијација σ_{max} =													5,280		
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr} =													2,262		
Кендал-ов коефицијент корелације W =													0,899		
Просечан <i>Spirman</i> -ов коефицијент корелације R =													0,891		

Табела 6.71 Вредности Spigman-ових коефицијената корелације рангова између примењених метода ВКО

	GRA	AHP	MOORA	TOPSIS	ROV	COPRAS	ARAS	WASPAS	VIKOR	OCRA	EDAS	MABAC	SAW1	SPW1
GRA	1,0000	0,7692	0,8278	0,6410	0,8498	0,8370	0,7692	0,7735	0,7405	0,9249	0,8455	0,8498	0,7930	0,7564
AHP		1,0000	0,8938	0,8632	0,8431	0,9042	1,0000	0,9866	0,8114	0,8205	0,9560	0,8431	0,9939	0,9634
MOORA			1,0000	0,8742	0,9896	0,9890	0,8938	0,9133	0,9182	0,9249	0,8701	0,9896	0,8980	0,9249
TOPSIS				1,0000	0,8297	0,8529	0,8632	0,8877	0,9554	0,7735	0,8516	0,8297	0,8474	0,9304
ROV					1,0000	0,9774	0,8431	0,8700	0,9035	0,9328	0,9438	1,0000	0,8535	0,8785
COPRAS						1,0000	0,9042	0,9200	0,9011	0,9206	0,9695	0,9774	0,9084	0,9255
ARAS							1,0000	0,9866	0,8114	0,8205	0,9560	0,8431	0,9939	0,9634
WASPAS								1,0000	0,8535	0,8419	0,9573	0,8700	0,9896	0,9847
VIKOR									1,0000	0,8474	0,8681	0,9035	0,8107	0,9072
OCRA										1,0000	0,9035	0,9328	0,8400	0,8462
EDAS											1,0000	0,9438	0,9573	0,9524
MABAC												1,0000	0,8535	0,8785
SAW1													1,0000	0,9634
SPW1														1,0000

Друга итерација А

Табела 6.72. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација А

Бр. Екс.	AHP	COPRAS	ARAS	WASPAS	EDAS	SAW	SPW	Средња Вредност рангова	Ранг алтернативе	σ - Стандардна девијација
1	7	10	7	7	7	6	9	7,57	8	1,3973
2	25	24	25	24	23	24	23	24,00	24	0,8165
3	21	22	21	21	22	21	22	21,43	21	0,5345
4	20	18	20	20	19	20	20	19,57	20	0,7868
5	8	3	8	8	4	8	7	6,57	7	2,1492
6	19	14	19	19	16	18	19	17,71	18	1,9760
7	15	8	15	11	11	13	11	12,00	12	2,5166
8	12	7	12	10	12	11	10	10,57	10	1,8127
9	5	4	5	5	3	5	3	4,29	3	0,9512
10	26	26	26	25	25	26	25	25,57	26	0,5345
11	22	20	22	22	21	22	21	21,43	21	0,7868
12	6	5	6	6	5	7	6	5,86	6	0,6901
13	1	1	1	1	1	1	1	1,00	1	0,0000
14	18	21	18	18	20	17	18	18,57	19	1,3973
15	10	11	10	14	9	10	17	11,57	11	2,8785
16	4	6	4	4	6	4	4	4,57	4	0,9759
17	2	2	2	2	2	3	2	2,14	2	0,3780
18	9	9	9	9	8	9	8	8,71	9	0,4880
19	13	15	13	13	14	14	16	14,00	15	1,1547
20	17	17	17	17	18	19	15	17,14	17	1,2150
21	24	23	24	26	27	25	27	25,14	25	1,5736
22	27	27	27	27	26	27	26	26,71	27	0,4880
23	23	25	23	23	24	23	24	23,57	23	0,7868
24	16	16	16	16	17	16	14	15,86	16	0,8997
25	3	12	3	3	10	2	5	5,43	5	3,9521
26	11	19	11	12	15	12	12	13,14	13	2,9114
27	14	13	14	15	13	15	13	13,86	14	0,8997
Максимална стандардна девијација $\sigma_{\max} =$										3,9521
Средња вредност стандардне девијације $\sigma_{sr} =$										1,2945
Kendal-ов коефицијент корелације W =										0,9647
Просечан Spigman-ов коефицијент корелације R =										0,9620

Табела 6.73. Вредности Spigman-ових коефицијената корелације рангова - друга итерација А

	AHP	COPRAS	ARAS	WASPAS	EDAS	SAW	SPW
AHP	1,0000	0,9042	1,0000	0,9866	0,9560	0,9939	0,9634
COPRAS		1,0000	0,9042	0,9200	0,9695	0,9084	0,9255
ARAS			1,0000	0,9866	0,9560	0,9939	0,9634
WASPAS				1,0000	0,9573	0,9896	0,9847
EDAS					1,0000	0,9573	0,9524
SAW						1,0000	0,9634
SPW							1,0000

Друга итерација Б

Табела 6.74. Резултати поређења рангова алтернативних нивоа параметара – друга итерација Б

Бр. Екс.	MOORA	ROV	COPRAS	OCRA	EDAS	MABAC	Средња Вредност рангова	Ранг алтернативе	σ – Стандардна девијација
1	10	10	10	9	7	10	9,33	10	1,2111
2	23	23	24	23	23	23	23,17	23	0,4082
3	21	19	22	17	22	19	20,00	21	2,0000
4	18	17	18	16	19	17	17,50	17	1,0488
5	5	5	3	6	4	5	4,67	5	1,0328
6	14	12	14	13	16	12	13,50	13	1,5166
7	9	7	8	10	11	7	8,67	9	1,6330
8	6	6	7	8	12	6	7,50	7	2,3452
9	3	3	4	3	3	3	3,17	3	0,4082
10	26	26	26	24	25	26	25,50	25	0,8367
11	20	20	20	12	21	20	18,83	19	3,3714
12	4	4	5	4	5	4	4,33	4	0,5164
13	1	1	1	1	1	1	1,00	1	0,0000
14	22	21	21	15	20	21	20,00	21	2,5298
15	11	11	11	11	9	11	10,67	11	0,8165
16	7	9	6	5	6	9	7,00	6	1,6733
17	2	2	2	2	2	2	2,00	2	0,0000
18	8	8	9	7	8	8	8,00	8	0,6325
19	15	14	15	19	14	14	15,17	15	1,9408
20	17	18	17	21	18	18	18,17	18	1,4720
21	27	27	23	27	27	27	26,33	27	1,6330
22	25	25	27	26	26	25	25,67	26	0,8165
23	24	24	25	25	24	24	24,33	24	0,5164
24	16	16	16	20	17	16	16,83	16	1,6021
25	13	15	12	14	10	15	13,17	12	1,9408
26	19	22	19	22	15	22	19,83	20	2,7869
27	12	13	13	18	13	13	13,67	14	2,1602
Максимална стандардна девијација σ_{max} =									3,3714
Средња вредност стандардне девијације σ_{sr} =									1,3648
Kendal-ов коефицијент корелације W=									0,9647
Просечан Spirtan-ов коефицијент корелације R=									0,9620

Табела 6.75. Вредности Spirtan-ових коефицијената корелације рангова - друга итерација Б

	MOORA	ROV	COPRAS	OCRA	EDAS	MABAC
MOORA	1.0000	0.9896	0.9890	0.9249	0.9701	0.9896
ROV		1.0000	0.9774	0.9328	0.9438	1.0000
COPRAS			1.0000	0.9206	0.9695	0.9774
OCRA				1.0000	0.9035	0.9328
EDAS					1.0000	0.9438
MABAC						1.0000

На основу добијених резултата који су приказани у табелама 6.72 и 6.73, може се закључити да је за комбинацију *BKO* метода: *AHP*, *COPRAS*, *ARAS*, *WASPAS*, *EDAS*, *SAW* и *SPW*:

1. **Задовољен први критеријум** – *Spirman*-ов коефицијент корелација рангова је за све комбинације метода у оквиру граничне вредности $0,9 \leq R_i \leq 1$ ($R_{\min} = 0,9042$).
2. **Задовољен други критеријум** – *Kendal*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq W$ ($W = 0,9647$) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq R$ ($R = 0,9620$) су у оквиру граничних вредности.
3. **Задовољен трећи критеријум**, просечна стандардна девијација је у оквиру граничне вредности $\sigma_{sr} \leq 1,5-2$ ($\sigma_{sr} = 1,2945$)

На основу добијених резултата који су приказани у табелама 6.74 и 6.75, може се закључити да је за комбинацију *BKO* метода: *MOORA*, *ROV*, *COPRAS*, *OCRA*, *EDAS* и *MAVAC*:

1. **Задовољен први критеријум** – *Spirman*-ов коефицијент корелација рангова је за све комбинације метода у оквиру граничне вредности $0,9 \leq R_i \leq 1$ ($R_{\min} = 0,9035$).
2. **Задовољен други критеријум** – *Kendal*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq W$ ($W = 0,9647$) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације $0,9 \leq R$ ($R = 0,9620$) су у оквиру граничних вредности.
3. **Задовољен трећи критеријум**, просечна стандардна девијација је у оквиру граничне вредности $\sigma_{sr} \leq 1,5-2$ ($\sigma_{sr} = 1,3648$)

Анализом добијених резултата посматраних варијанти друге итерације А и Б, закључак је да је боља варијанта А, због повољнијих резултата корелационих фактора и већег броја комбинације метода *BKO*, па је сходно томе она усвојена као меродавна.

На основу тога оптимални ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса је дат у табели 6.72, а у табели 6.76 је издвојено 5 најбољих нивоа параметара са вредностима параметара обраде А-Д и критеријума оптимизације *MRR*, Δa , Δb , Δc , Δd и *Ra*.

Табела 6.76. Оптимални алтернативни нивои параметара технолошког процеса обраде за варијанту 4. функције циља

Бр. Екс.	А	В	С	Д	Е	MRR	Δa	Δb	Δc	Δd	Ra	Ранг
13	1,0	12000	600	3	1	1281,690	0,0080	0,01150	0,0890	0,0940	0,1375	1
17	1,0	24000	1200	2	1	6825,000	0,0280	0,01550	0,0790	0,1405	0,1925	2
9	0,5	24000	2400	2	1	9626,320	0,0380	0,03975	0,0685	0,1000	0,2925	3
16	1,0	24000	600	1	3	2919,786	0,0420	0,01650	0,1305	0,1195	0,1850	4
25	1,5	24000	600	2	1	3751,740	0,0100	0,27100	0,3480	0,3215	0,1500	5

7. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Тржиште специјализованих производа аутомобилске, ваздухопловне и војне индустрије, све више захтева употребу материјала високих механичких и технолошких карактеристика, где легуре алуминијума заузимају значајно место, односно структуре од танких зидова.

Детаљном анализом литературних информација дошло се закључка да је област машинске обраде танкозидних структура од легура алуминијума у последње време предмет истраживања многих истраживача широм света. Идентификовано је да не постоји универзални модел или јединствени приступ за оптимизацију технолошких процеса њихове обраде. Реализована истраживања су оријентисана на поједине улазно/излазне параметре технолошких процеса обраде танкозидних делова, при чему су примењиване разне технике, као што су методе инжењерског експеримента, методе математичког моделирања, симулационе методе, предикциони модели, дијаграми стабилности, методе коначних елемената и др.

У конкретним производним условима уобичајена је пракса да пројектанти технолошких процеса или оператери на машинама бирају вредности параметара обраде на основу универзалних препорука из стручне литературе, препорука произвођача алата и машина, стеченог знања или претходног искуства. Иако је то субјективан начин, а изабране вредности параметара технолошких процеса често нису ни приближно оптималне, овај приступ даје релативно прихватљиве резултате са аспекта појединих техничких и економских критеријума у појединачној производњи. Међутим, потребно је истаћи да често неадекватан избор елемената технолошког процеса утиче на смањење тачности и квалитета обраде, повећање трошкова и времена обраде, смањење продуктивности и степена искоришћења производних капацитета и др. Производна предузећа која желе да буду конкурентна на глобалном тржишту морају побољшати ефикасност технолошког процеса. Да би се то остварило потребно је да се елементи и параметри технолошког процеса бирају на квалитетнији, систематичнији и интелигентнији начин, односно да се примењује оптимизација технолошких процеса обраде и врши оптимално управљање овим процесима.

Према томе, намеће се закључак да је било оправдано вршити истраживања у области оптимизације технолошких процеса обраде танкозидних алуминијумских структура са коначним циљем унапређења технолошке припреме производње, као интегралне функције у оквиру производног система. У циљу развоја технолошке припреме производње било је неопходно применити савремене методе и технике, како би производња постала агилна и конкурентна.

Полазећи од проблема истраживања посматране дисертације, реализована су истраживања која су подељена у три основне целине, чији су основни закључци представљени у наставку.

У оквиру **прве целине** дата су *уводна разматрања, теоријске основе, преглед владајућих ставова и актуелног стања у области истраживања.*

Одличне механичке и технолошке карактеристике танкозидних алуминијумских структура утицали су на њихову значајну примену у конструкцији делова и производа у војној, аутомобилској и другим гранама индустрије. У циљу унапређења њихове производње анализирани су и описани основни проблеми који се јављају при њиховој обради, које је потребно решити кроз оптимизацију технолошких процеса, на основу чега је дефинисан предмет и циљ посматраног истраживања.

У складу са предметом и циљем истраживања постављена је основна хипотеза дисертације која тврди да промена улазних параметара (режима обраде, стратегија обраде и дебљине зида) утиче на производност, тачност и квалитет обраде танкозидних алуминијумских структура. На основу ове хипотезе постављене су остале хипотезе којима се тврди да је на бази планираних експеримената могуће утврдити утицај улазних параметара на излазне перформансе технолошког процеса, односно критеријуме оптимизације, развити одговарајуће математичке моделе ових критеријума и извршити вишекритеријумски избор квалитетних параметара обраде, на основу чега је могуће поставити подлоге за управљање технолошким процесима обраде танкозидних структура од легуре алуминијума.

У циљу бољег разумевања проблематике представљене су основне конструкционе карактеристике различитих облика танкозидних структура, као и њихова подела. Након тога приказане су основне технолошке карактеристике обраде танкозидних делова.

У оквиру прегледа актуелног стања у области обраде танкозидних делова разматрана су литературна истраживања у свету која су оријентисана на оптимизацију њихове конструкције и технолошких процеса обраде. Основне оптимизације конструкције су усмерене на смањење масе, деформација и вибрација, као и повећање носивости и чврстоће. Значајан акценат је дат на оптимизацију технолошких процеса обраде у циљу смањења времена и трошкова обраде, односно остварења тачности мера, толеранција облика и положаја, као и повећања квалитета обраде. Као закључак овог поглавља систематизовани су утицајни параметри технолошког процеса обраде на карактеристике танкозидних структура, који су подељени у четири групе: параметри обрадног процеса, параметри обрадног система - машине, параметри обратка и параметри захвата обраде (режими и стратегије обраде).

У оквиру **друге целине** приказана је *поставка и опис методологије истраживања*, која је имала за циљ давање одговора на основни предмет

истраживања „Како на бази постављених критеријума оптимизације применом одговарајућих метода пронаћи најбоље решење технолошког процеса обраде танкозидне алуминијумске структуре као објекта оптимизације, за одређене производне услове“.

Основне етапе методологије су приказане помоћу одговарајућег алгорита, где су на улазу дефинисани оптимизациони задаци за два различита типа обрадних система, односно процеса, *средњебрзинску* и *високобрзинску* обраду.

- Основни оптимизациони задатак за средњебрзинску обраду се односио на дефинисање утицаја дебљине зида (a), величине помака (f) и стратегије путање алата (TPS), на време обраде (T), одступање мере дебљине зида (Δa), одступање управности површина (Δb), одступање од равности површина (Δc) и храпавост обрађених површина (R_a).
- Основни оптимизациони задатак за високобрзинску обраду се односио на дефинисање утицаја дебљине зида (a), броја обртаја (n), величине помака (f), дубине обраде (δ) и стратегије путање алата (TPS), на време обраде (T)/количину скинуте струготине у јединици времена (MRR), одступање мере дебљине зида (Δa), одступање од равности површина (Δb), одступање од паралелности површина (Δc), одступање управности површина (Δd) и храпавост обрађених површина (R_a).

Сходно томе дефинисане су карактеристике материјала, припремка и обратка, потом машина и алата, као и одговарајућих улазних параметара и њихових нивоа. С обзиром да су се експериментална истраживања одвијала независно за средњебрзинску и високобрзинску обраду креирани су различити планови експеримената, у првом случају Централни композитни план са 33 експеримента, а у другом случају *Taguchi*-ев план L27, са 27 експеримената.

Реализација постављених планова експеримената – варијанти технолошког процеса обраде танкозидних делова и мерење времена, тачности дебљине зида, толеранција облика и положаја, као и квалитета обраде је извршено у више различитих институција, с обзиром на захтеве и могућности обрадних и мерних система. Ови резултати су представљали основу за оптимизацију технолошких процеса обраде танкозидних линијских структура, која је реализована у оквиру следеће целине дисертације.

Трећа, фундаментална целина се односи на резултате дисертације остварене кроз примену више метода, које су имале за циљ оптимизацију параметара технолошког процеса обраде танкозидних линијских структура од легуре алуминијума. Ови резултати су приказани одвојено за средњебрзинску и високобрзинску обраду, кроз поглавља 5 и 6.

У оквиру поглавља 5.1 примењена је методологија одзивне површине и анализе варијансе (ANOVA) за оптимизацију параметара средњебрзинске обраде. На почетку је извршена анализа резултата мерења са контролом граничних

вредности, на основу чега је из даље анализе елиминисана друга стратегија путање алата 2 (*Zig-Zag*), као неадекватна. Након тога применом методологија одзивне површине добијени су емпиријски модели за време обраде, одступање дебљине зида, одступање управности, одступање равности и храпавост обрађене површине у зависности од улазних параметара, дебљине зида и помака за прву и трећу стратегију путање алата. На бази емпиријских модела добијени су 3D површински дијаграми одзивних површина, чијом анализом су дефинисани одговарајући закључци међусобног утицаја параметара, који су на излазу показали предност стратегије путање алата 1 (*Parallel Spiral*) у односу на стратегију 3 (*True Spiral*) у погледу времена обраде, одступања дебљине зида, одступања управности и одступања равности. Стратегија путање алата 3, има предност у односу на стратегију обраде 1 само код критеријума храпавости обрађене површине.

Главни циљ оптимизације који се даље разматрао је био избор оптималне вредности помака који генерише најмање одступање мере дебљине зида. На излазу су добијене оптималне вредности помака за различите дебљине зида од 0,5 до 1,5 mm, применом корака од 0,1 mm. Резултати показују да осим за максималну дебљину зида од 1,5 mm, вредност помака треба да буде на максималној вредности $f = 350 \text{ mm/min}$. Потом је извршена верификација оптимизационих резултата на два узорка, са дебљином зида од $a = 0,7 \text{ mm}$ и $a = 1,2 \text{ mm}$, која су показала максимално одступање од 10% за измерене и предвиђене вредности, што је у великој мери потврдило квалитет добијених резултата, узимајући у обзир сложеност процеса израде танкозидних делова, услова при обради, крутости машине алатке, појаве вибрација итд.

У оквиру поглавља 5.2 примењена је фази логика као метода вештачке интелигенције у оптимизацији квалитета обраде посматраних танкозидних делова при средњебрзинској обради. Применом ове методе рачунарске интелигенције, креиран је интелигентни модел за предвиђање и анализу храпавости обрађене површине. Основни разлози оправданости примене фази логике у посматраним истраживањима су се односили на релативно мали број експерименталних тачака и потенцијалну могућност проширења модела на више излазних променљивих.

Дизајн система фази логике је подељен у три основне фазе. Прва фаза се односила на дефинисање фази променљивих, друга фаза на формирање свих скупова фази подскупова променљивих са одговарајућим функцијама припадности, док је трећа фаза представљала формирање фази правила. Као фази логички алат за прорачун коришћен је MATLAB. Анализа добијених резултата је извршена применом *Mamdani* фази система резоновања, на основу којих је закључено да просечно одступање експерименталних резултата и фази вредности за храпавост обрађене површине износи 12,3 %, што се може прихватити као задовољавајуће за овај тип истраживања. Доказано је да су одабрани типови механизма за закључавање функције припадности (*gaussmf*) као и метода MIN-MAX

и центра гравитације били добар избор. Поред тога, резултати који су добијени применом фази логике потврђени су применом ANOVA анализе, којом је добијено да највећи примат заузима стратегија обраде са 98,9 %, затим дебљина зида 0,68% и на крају помак са 0,42% удела. Најбоља храпавост обрађене површине остварена је када је дебљина зида износила 1,35 mm, док је најнеповољнија храпавост остварена при дебљини зида од 0,5 mm. Вредност помака има такође утицај на храпавост обрађене површине, и он се огледа на следећи начин: најбоља храпавост се постиже при помаку од 350 mm/min, док је најнеповољнија храпавост при помаку од 150 mm/min и 250 mm/min. Стратегија обраде, као трећи фактор даје најбоље резултате у погледу храпавости обрађене површине када се користи стратегија обраде PATH 3 (True Spiral), односно стратегија обраде PATH 1 (Parallel Spiral), док је најнеповољнија стратегија обраде PATH 2 (Zig-Zag), што је потврђено анализом фази модела

Може се закључити да се фази логика, као метода рачунарске интелигенције може успешно применити на овакав тип истраживања. Допринос овог дела истраживања није само у поређењу добијених експерименталних података за храпавост обрађене површине применом фази логике, већ и при анализи који улазни параметар поседује највећи утицај на квалитет обраде.

У оквиру поглавља 5.3 и 6.2 извршена је вишекритеријумска оптимизација параметара технолошког процеса средњебрзинске и високобрзинске обраде, применом метода вишекритеријумског одлучивања (енгл. *Multi-Criteria Decision Making-MCDM*). На почетку је представљен проблем вишекритеријумског одлучивања, као и основне методе које су коришћене у раду: GRA (енгл. *Grey Relational Analysis*), АHP (енгл. *Analytic Hierarchy Process*), MOORA (енгл. *Multi-Objective Optimization Method by Ratio Analysis*), TOPSIS (енгл. *Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution*), ROV (енгл. *Range Of Value*), COPRAS (енгл. *COmplex PROportional Assessment of alternatives*), ARAS (енгл. *Additive Ratio ASsessment*), WASPAS (енгл. *Weighted Aggregates Sum Product ASsessment*), VIKOR (срп. *оптимизација и КОмпромисно Решење*), OCRA (енгл. *Operational Competitiveness Rating Analysis*), EDAS (енгл. *Evaluation based on Distance from Average Solution*), MABAC (енгл. *Multi-Attributive Border Approximation area Comparison*), SAW (енгл. *Simple Additive Weighting*) и SPW (енгл. *Simple Product Weighting*). Након тога је представљен модел интегралног вишекритеријумског вредновања, односно рангирања алтернативних решења, којим је дефинисана методологија избора оптималног решења примене великог броја метода, кроз корелациону анализу.

За решавање проблема одређивања оптималних параметара технолошког процеса обраде изабране су четири варијанте функција циља:

1. Једнака значајност критеријума (где сви критеријуми имају једнак тежински коефицијент),
2. Тачност обраде (где су најзначајнији критеријуми тачност мера, толеранције облика и толеранције положаја),

3. Производност (где је најзначајнији критеријум време обраде, односно количина скинуте струготине) и
4. Квалитет обраде (где је најзначајнији критеријум храпавост обрађене површине).

За сваку од наведених функција циља дефинисани су тежински коефицијенти критеријума оптимизације применом АХП методе и проверена доследност доносиоца одлуке прорачуном коефицијената конзистенције.

У циљу одређивања оптималних параметара технолошког процеса средњебрзинске и високобрзинске обраде танкозидних делова коришћени су резултати реализованих експеримената. Избор оптималног алтернативног нивоа параметара технолошког процеса и њихово рангирање за све 4 функције циља реализовано је применом наведених 14 MCDM метода. На бази ових резултата применом методологије интегралног оцењивања/рангирања, која је обухватала одређене итерације у оквиру којих су одређиване вредности *Spirman*-ових коефицијената међусобне корелације (R_i), укупан Kendal-ов коефицијент корелације (W) и просечан *Spirman*-ов коефицијент корелације (R) свих 14 метода, као и стандардне девијације по нивоима (σ_i), односно вредности максималне и просечне стандардне девијације (σ_{max} и σ_{sr}), добијен је оптималан ранг параметара технолошког процеса обраде и рангови осталих алтернатива ових параметара за сваку од постављених функција циља.

На основу анализе резултата, оптимални ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса средњебрзинске обраде за све 4 функције циља је експеримент под редним бројем 3, са вредностима улазних параметара (a , s и стратегија обраде) и критеријума оптимизације (T , Δa , Δb , Δc и Ra).

Бр. екс.	a (mm)	s (m/min)	Страт. обраде	T (min)	Δa (mm)	Δb (mm)	Δc (mm)	Ra (μm)
3	0,65	321	TPS 1	24,85	0,006	0,041	0,036	0,55

Анализа резултата је показала да је оптимални ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса високобрзинске обраде за 1, 2 и 4 функцију циља експеримент под редним бројем 13, са вредностима улазних параметара (дебљине зида-А, броја обртаја-В, помака-С, дубине обраде-Д и стратегије путање алата-Е) и излазних параметара - критеријума оптимизације (T , Δa , Δb , Δc , Δd и Ra).

Број Екс.	A	B	C	D	E	MRR (mm^3/min)	Δa (mm)	Δb (mm)	Δc (mm)	Δd (mm)	Ra (μm)
13	1,0	12000	600	3	1	1281,69	0,0080	0,01150	0,0890	0,0940	0,1375

Такође, на основу анализе резултата, оптимални ранг алтернативних нивоа параметара технолошког процеса високобрзинске обраде за 3 функцију циља је експеримент под редним бројем 15, са вредностима улазних параметара (дебљине

зида-А, броја обртаја-В, помака-С, дубине обраде-Д и стратегије путање алата-Е) и излазних параметара -критеријума оптимизације (T , Δa , Δb , Δc , Δd и Ra).

Број Екс.	A	B	C	D	E	MRR (mm^3/min)	Δa (mm)	Δb (mm)	Δc (mm)	Δd (mm)	Ra (μm)
15	1,0	12000	2400	2	3	14980,79	0,0260	0,03650	0,0905	0,1510	1,0050

У оквиру под поглавља 6.1, на основу добијених резултата експеримената извршена је ANOVA анализа, регресиона анализа и на крају оптимизација параметара процеса високобрзинске обраде танкозидних линијски делова. Реализована је једнокритеријумска оптимизација критеријума количине уклоњеног материјала (MRR), одступања дебљине зида, равности површина, паралелности површина, управности површина и храпавости обрађених површина у зависности од улазних фактора, дебљине зида, броја обртаја, помака, дубине обраде и стратегија обраде-путање алата. Анализом резултата закључено је да:

- Највећи утицај на количину уклоњеног материјала имају помак и дубина обраде, а најмањи утицај имају дебљина зида и број обртаја.
- Највећи утицај на одступање дебљине зида имају број обртаја и дубина обраде, а најмањи утицај има дебљина зида.
- Највећи утицај на равност површина има дебљина зида, а најмањи утицај има помак.
- Највећи утицај на паралелност површина имају дебљина зида и дубина обраде, а најмањи утицај има помак.
- Највећи утицај на управност површина имају дебљина зида, стратегија обраде и помак, а најмањи утицај има број обртаја.
- Највећи утицај на храпавост обрађене површине имају стратегија обраде, дубина обраде и број обртаја, а најмањи утицај има дебљина зида.

Добијени резултати потврдили су постављене хипотезе истраживања. Представљена методологија даје поуздане податке о параметрима технолошког процеса обраде, који се могу користити за развој базе знања у оквиру технолошке припреме производње танкозидних делова од лаких легура алуминијума. Доказано је да оптимизација параметара технолошког процеса обраде, утиче на побољшање производње танкозидних компоненти, првенствено у погледу производности, тачности и квалитета обраде.

Допринос овог истраживања је усмерен на стварање основних и напредних знања у области оптимизације елемената технолошког процеса обраде танкозидних структура од легуре алуминијума с обзиром на дефинисане критеријуме производности, тачности и квалитета обраде. Поред тога допринос је и у јачању општих и примењених знања везаних за пројектовање и оптимизацију технолошких процеса у индустријским условима.

Практична примена резултата истраживања је оријентисана ка аутомобилској, војној и ваздухопловној индустрији, алатничарству, енергетици, прецизној механици и другим областима где се примењују танкозидне компоненте од алуминијумских легура. Такође, методологија истраживања се може уз одговарајуће модификације применити и на друге врсте материјала и производа.

У оквиру дисертације разматрани су поједини проблеми који се јављају при обради танкозидних структура, који се односе на нетачност димензија, толеранција облика и положаја површина, квалитет обраде површина и производност, док би се наредна истраживања могла проширити и на испитивање деформација танкозидних структура, појаву вибрација током обраде и заосталих напони у материјалу након обраде, енергетску ефикасност процеса обраде и др. Поред тога код технолошких процеса машинске обраде значајно би било разматрати и друге критеријуме оптимизације, као што су хабање и постојаност алата, температура обраде, силе и отпори обраде, односно трошкови обраде, као показатељ економичности процеса производње.

У раду су примењене поједине једнокритеријумске и вишекритеријумске методе оптимизације параметара технолошког процеса обраде танкозидних структура, којима су добијени одређени резултати. Ови резултати би се могли проверити или унапредити применом и неких других метода оптимизације као што су методе коначних елемената, вештачке неуронске мреже, генетски алгоритми, биолошки инспирисане мета хеуристичке методе или алгоритми итд.

Истраживања би се могла применити и на друге врсте танкозидних структура, као што су вишеугаони праволинијски облици, криволинијски облици, као и неки други сложени танкозидни геометријски облици попут крила турбина итд.,

Један од основних праваца развоја технолошке припреме производње и производних система из металопрерађивачке индустрије се односи на развој и примену интегрисаних CAPP система, односно интегрисаних CAD/CAPP/CAM/CNC/CAx система, што би могао бити складан наставак посматраних истраживања из дисертације.

Савремена индустрија се заснива на рачунарски интегрисаној производњи, односно примени концепта Индустрије 4.0, који се базира на интелигентном повезивању области машинства, електронике и софтвера, што доприноси развоју нових технологија и пословних модела. Индустрија 4.0 обухвата бројне технологије укључене у хоризонталну и вертикалну интеграцију, које се континуално развијају и проширују њен значај. Неке од основних технологија које су обухваћене овом концепцијом у производњи су Кибернетско-физички системи, Индустријски интернет ствари, Велики подаци, Производња у облаку, Проширена и виртуелна стварност, М2М комуникација; Дигитални близанац, Паметно одржавање, Машинско учење, Реконфигурабилна, повезана и паметна фабрика итд., чија примена такође може бити један од праваца будућих истраживања.

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Algeo, M.E., Feng, S.C., Ray, S.R.: *A state-of-the Art Survey on Product Design and Process Planning Integration Mechanism*, NIST Interagency Report 5548, National Institute of Standards and Technology, 1994.
- [2] Тодић, В., Пенезић Н., Лукић Д., Милошевић М.: *Технолошка логистика и предузетништво*, *Факултет техничких наука*, Нови Сад, ISBN 978-86-7892-368-5, 2011.
- [3] Тодић, В., Станић, Ј.: *Основе оптимизације технолошких процеса израде и конструкције проиувода*, *Факултет техничких наука*, Нови Сад, ISBN 86-85211-71-9, 2006,
- [4] Тодић В.: *Пројектовање технолошких процеса*, *Факултет техничких наука*, Нови Сад, ISBN 86-80249-93-9, 2004.
- [5] Denkena, B., Shpitalni, M., Kowalski, P., Molcho, G., Zipori, Y.: *Knowledge Management in Process Planning*, , *Annals of the CIRP*, Vol. 56, No. 1, pp. 175–180, ISSN 0007-8506, 2007.
- [6] Depinice, P., Amara, H., Hacoet, J. Y.: *May Human Intervention Improve the CAPP System Abilities?*, *International Journal of Production Engineering and Computers*, Vol. 4, No. 4, pp. 29-39, ISSN 1450-5096, 2002.
- [7] Marri, H.B., Gunasekaran, A., Bulent, K.: *Implementation of Computer - Integrated Manufacturing in Small and Medium Enterprises*, *Industrial and Commercial Training*, Vol. 35, No. 4, pp. 151-157, ISSN 0019-7858, 2003.
- [8] ElMaraghy A.H.: *Evolution and Feature Perspectives of CAPP*, *Annals of CIRP*, Vol. 42, No. 2, pp. 739-751, ISSN 0007-8506, 1993.
- [9] Eversheim, W., Schneewind, J.: *Computer-Aided Process Planning – State of the Art and Future Development*, *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 10, No. 1/2, pp. 65-70, ISSN 0736-5845, 1993.
- [10] Kuric, I., Matuszek, J., Debnar, R.: *Computer Aided Process Planning in Machinery Industry*, *Politechnika Lodzka, Bielsko-Biata*, ISBN 83-87087-00-9, 1999.
- [11] Marri, H.B., Gunasekaran, A., Grieve, R.J.: *Computer-Aided Process Planning: A State of the Art*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 14, No. 4, pp. 261–268. ISSN 0268-3768, 1998.
- [12] Teti, R., Kumara, S.R.T.: *Intelligent Computing Methods for Manufacturing Systems*, *Annals of CIRP*, Vol. 46, No. 2, ISSN 0007-8506, 1997.
- [13] Xu, X., Wang, L., Newman, S.T.: *Computer-Aided Process Planning - A Critical Review of Recent Developments and Future Trends*, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Taylor & Francis, Vol. 24, No. 1-3, pp. 1-31, ISSN 0951-192X, 2011.
- [14] Xu, X., W., He, Q.: *Striving for Total Integration CAD, CAPP, CAM and CNC*, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 20, No. 2, pp. 101-109, ISSN 0736-5845, 2004.

-
- [15] Xu, X.: *Integrating Advanced Computer-Aided Design, Manufacturing, and Numerical Control - Principles and Implementation*, Information Science Reference, New York, ISBN 978-1-59904-714-0, 2009.
- [16] Yusof, Y., Latif, K.: Survey on computer-aided process planning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 75, Issue 1, pp. 77–89, 2014.
- [17] Ridwan, F.: Development of a surface roughness predictive model for STEP-compliant machining optimization, *Int. J. Computer Aided Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 3, pp. 206-228, 2012.
- [18] Hirsch, J., Al-Samman, T.: Superior light metals by texture engineering: Optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications. *Acta Materialia*, Vol. 61, No. 3, pp. 818-843, 2013 DOI:10.1016/j.actamat.2012.10.044.
- [19] Scippa, A., Grossi, N., Campatelli, G.: FEM based cutting velocity selection for thin walled part machining. *Procedia CIRP*, Vol. 14, pp. 287–292, 2014. DOI:10.1016/j.procir.2014.03.023.
- [20] Huang, X., Sun, J., Li, J.: Effect of initial residual stress and machining-induced residual stress on the deformation of aluminium alloy plate. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 61, No. 2, pp. 131-137, 2015. DOI:10.5545/sv-jme.2014.1897.
- [21] Zhou, X., Zhang, D., Luo, M., Wu, B. (2014). Toolpath dependent chatter suppression in multi-axis milling of hollow fan blades with ball-end cutter. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 72, No. 4, pp.: 643-651, 2014. DOI:10.1007/s00170-014-5698-6.
- [22] Popma, M.G.R., High speed milling literature survey (OPM-660), internal report, University of Twente, Enschede, 2000.
- [23] Izamshah, R., Mo, J.P.T., Ding, S.: Hybrid deflection prediction on machining thin-wall monolithic aerospace components. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 226, no. 4, p. 592-605, 2011. DOI:10.1177/0954405411425443.
- [24] Лукић, Д.: Развој општег модела технолошке припреме производње, Докторска дисертација, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2012.
- [25] Бабић, Б.: Пројектовање технолошких процеса, Машински факултет, Београд, 1999.
- [26] Боројевић, С.: Развој система за симултано пројектовање производа и технолошких процеса, Докторска теза, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2015.
- [27] Милошевић, М.: Колаборативни систем за пројектовање технолошких процеса израде производа базиран на интернет технологијама, Докторска теза, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2012.
- [28] Popma, M.: Computer aided process planning for high-speed milling of thin walled parts, *PhD. Thesis*, University of Twente, Netherlands, 2010.
-

-
- [29] Martin, P.: *Some aspects of Integrated Production and Manufacturing*, in Bramley, A., Brissaud, D., Coutellier, D., McMahon, C. (Ed.): *Advanced in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, pp. 215-226, Springer, Netherlands, 2005.
- [30] Нешић, Н.: *Развој система за технолошко препознавање и пројектовање технолошких процеса за делове који се израђују на обрадним центрима*, Магистарска теза, Машински факултет, Београд, 2007.
- [31] Zhang, W.J., Xie, S.Q.: *Agent Technology for Collaborative Process Planning: A Review*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 32, No. 3-4, pp. 315-325, ISSN 0268-3768, 2007.
- [32] Fowler, J.: *STEP for Data Management Exchange and Sharing*, Technology Appraisals Ltd., Twickenham, UK, ISBN 1 -871802-36-9, 1995.
- [33] Suh, S. H., Cheon, S. U.: *A Framework for Intelligent CNC and Data Model*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, , Vol. 19, No 10, pp. 727-735, ISSN 0268-3768, 2002.
- [34] Suh, S. H., Lee, B. E., Chung, D. H., Cheon, S. U.: *Architecture and Implementation of a Shop-floor Programming System for STEP-compliant CNC*, Computer-Aided Design, Vol. 35, No. 12, pp. 1069-1083, ISSN 0010-4485, 2003.
- [35] Amaitik, S.M., Kilic, S.E.: *An Intelligent Process Planning System For Prismatic Parts Using STEP Features*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 31, No. 9-10, pp. 978-993, ISSN 0268-3768, 2007.
- [36] Chang, P.T., Chang, C.H.: *An Integrated Artificial Intelligent Computer-aided Process Planning System*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 13, No. 6, pp. 483-497, ISSN 0951-192X, 2000.
- [37] Yifei, T., Dongbo, L., Changbo, L., Minjian, Y.: *A Feature-extraction-based Process Planning System*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 38, No. 1-2, pp. 1192-1200, ISSN 0268-3768, 2008.
- [38] Rameshbabu, V., Shunmugam, M.S.: *Hybrid Feature Recognition Method For Setup Planning From STEP AP 203*, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 25, No. 2, pp. 393-408, ISSN 0736-5845, 2009.
- [39] Zhao, Y.F., Habeeb, S., Xu, X.: *Research Into Integrated Design and Manufacturing Based on STEP*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 44, No. 5-6, pp. 606-624, ISSN 0268-3768, 2009.
- [40] Nassehi, A., Newman, S.T., Allen, R.D.: *The Application of Multi-agent Systems for STEP-NC Computer Aided Process Planning of Prismatic Components*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46 , No. 5, pp. 559-574, ISSN 0890-6955, 2006.
- [41] Nassehi, A., Liu, R., Newman, S.T.: *A New Software Platform to Support Feature-Based Process Planning for Interoperable STEP-NC Manufacture*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 20, No. 7, pp. 669-683, ISSN 0951-192X, 2007.
- [42] Chung, D.H., Suh,S.H.: *ISO 14649-based Nonlinear Process Planning Implementation for Complex Machining*, Computer-Aided Design, Vol. 40, No. 5, pp. 521-536, ISSN 0010-4485, 2008.
-

-
- [43] Lukic, D., Zivanovic, S., Vukman, J., Misosevic, M., Borojevic, S., Antic, A.: *The possibilities for application of STEP-NC in actual production conditions*, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 32, pp. 3317–3328, 2018, DOI.org/10.1007/s12206-018-0634-6
- [44] Montgomery, D.C.: *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [45] Мадих М.: Математичко моделирање и оптимизација процеса ласерског сечења применом метода вештачке интелигенције, *Докторска теза*, Машински факултет Нуш, 2013.
- [46] Ukrainczyk M.: Design of Experimental in Industry, *Croatian journal of food technology, biotechnology and nutrition*, Vol. 5, No. 3-4, pp. 96-105, ISSN 1847-7461, 2010.
- [47] Pandey, A.K., Dubey, A.K.: Taguchi based fuzzy logic optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of duralumin sheet, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 50, No.3, pp. 328–335, 2012.
- [48] Маринковић, В.: Рационализација експерименталних истраживања применом теорије вишефакторног експеримента, *ИМК-14 - Истраживање и развој*, Бр. 13, Изд. 1/2, стр. 23–36, Вол.13, Бр.1-2, 2007.
- [49] Brook, R. J., & Arnold, G. C.: *Applied regression analysis and experimental design*. CRC Press, 2018. DOI.org/10.1201/9781315137674
- [50] Јурковић, М.: *Математичко Моделирање Инжењерских Процеса и Система*, Машински факултет Бихаћ, 1999.
- [51] Лазаревић, А.: *Моделирање корелација између параметара процеса резања плазмом и анализа топлотног биланса методама вештачке интелигенције*, докторска теза, Машински факултет Ниш, 2010.
- [52] Merchant, M.E.: Interpretative look on 20th century research on modeling of machining, *Machining Science and Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 157–163, 1998.
- [53] Маринковић, В., Радовановић, М.: Приручник за Лабораторијске Вежбе из Обраде Материјала Резањем, Машински факултет Ниш, 1994.
- [54] Liao, T.W., Chen, L.J.: Manufacturing process modeling and optimization based on multi-layer perceptron network, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 120, No. 1, pp. 109 – 119, 1998.
- [55] Feng, C.-X.J., Yu, Z.G., Kingi, U, Pervaiz Baig, M.: Threefold vs. fivefold cross validation in onehidden-layer and two-hidden-layer predictive neural network modeling of machining surface roughness data, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 24, No. 2, pp. 93–107, 2005.
- [56] Coit, D.W., Jackson, B.T., Smith, A.E.: Static neural network process models: considerations and case studies, *International Journal of Production Research*, Vol. 36, No. 11, pp. 2953–2967, 1998.
- [57] Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T., Yamane, Y.: *Metal Machining: Theory and Applications*, Arnold, 2000.
- [58] Koren, Y.: Adaptive control systems for machining, *Manufacturing Review*, Vol. 2, No. 1, pp. 6 – 15, 1989.
-

-
- [59] Kovačević, M., Madić, M., Radovanović, M.: Software prototype for validation of machining optimization solutions obtained with meta-heuristic algorithms, *Expert Systems with Applications*, Vol. 40, No. 17, pp. 6985–6996, 2013.
- [60] Badowski, E.: *Improved machining stability of thin-walled aluminum parts through eddy current damping*, Master thesis, McMaster University, Ontario, Canada, 2015.
- [61] Michalik, P., Zajac, J., Hatala, M., Mital, D., Fecova, V.: Monitoring surface roughness of thin-walled components from steel C45 machining down and up milling, *Measurement*, Vol.58, pp. 416-428, 2014.
- [62] Li, Z. L., Tuysuz, O., Zhu, L. M., Altintas, Y.: Surface form error prediction in five-axis flank milling of thin-walled parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.128, pp. 21-32, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.01.005>
- [63] <https://www.mmsonline.com/articles/getting-an-edge-on-chatter-control> dostupno: 16.08.2020.
- [64] Sandvik Coromant: Solutions for cost effective and high-quality machining of aluminium wing rib, dostupno na linku: <https://www.sandvik.coromant.com/eng/industriesolutions/aerospace/aluminium/pages/wing-rib.aspx> 16.08.2020
- [65] Fitzgerald, R.W.: *Mechanics of materials*, 2nd edition, Addison-Wesley Publishing Company Inc., Massachusetts, USA, 1982.
- [66] Yang, G.: *Elastic and plastic mechanics*, People Education Published Inc., PRC, 1980.
- [67] Sandvik Coromant: Shoulder milling of thin deflecting walls, dostupno na linku: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/pages/shoulder-milling.aspx> 16.08.2020
- [68] Kennedy, B.: Wall Smart Cutting Tool Engineering Magazine, Vol. 59, 2007, dostupno na linku: https://www.ctemag.com/sites/www.ctemag.com/files/archive_pdf/0702-ThinWallmilling.pdf 16.08.2020.
- [69] Zhang, D., Gao, K., Zhou, T.: Discussion on NC machining process of thin walled parts technical measures, *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications, Switzerland, Vol.701-702, pp.864-868, 2015. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.701-702.864.
- [70] Bing, D., Guang-bin, Y., Yan-qi, G., Jun-peng, S., Yan-qi, G., Xue-mei, W., Yu-xin, L.: Machining Surface Quality Analysis of Aluminum Alloy Thin-Walled Parts in Aerospace, *International Journal of Security and Its Applications*, Vol.9, No.11, pp. 201-208, 2015.
- [71] Bolar, G.: *Numerical and Experimental Studies on Thin-Wall Machining of Aerospace Grade Aluminum Alloy*, докторска теза, Indian Institute of Technology Guwahati, 2017.
- [72] Wojciechowski, S.: The estimation of cutting forces and specific force coefficients during finishing ball end milling of inclined surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 89, pp. 110-123, 2015
-

-
- [73] Gao, Y.Y., Ma, J.W., Jia, Z.Y., Wang, F.J., Si, L.K., Song, D.N.: Tool path planning and machining deformation compensation in high-speed milling for difficult-to-machine material thin-walled parts with curved surface, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 84, Issue 9, pp. 1757–1767, 2016.
- [74] Yan, Q.: *Optimized Process Planning of Five-axis Machining for Thin-walled Workpieces*, PhD. Thesis, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, 2019.
- [75] Wang, J., Ibaraki, S., Matsubara, A.: A cutting sequence optimization algorithm to reduce the workpiece deformation in thin-wall machining, *Precision Engineering*, Vol. 50, pp.506-514, 2017.
- [76] Ratchev S, Liu S, Huang W, Becker AA. An advanced FEA based force induced error compensation strategy in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No.5, pp.542-551, 2006. DOI.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.06.003
- [77] Smith S, Dvorak D. Tool path strategies for high speed milling aluminum workpieces with thin webs. *Mechatronics*, Vol. 8, No, 4, pp. 291–300, 1998, DOI.org/10.1016/S0957-4158(97)00058-5.
- [78] Koike, Y., Matsubara, A., Nishiwaki, S., Izui, K., Yamaji, I.: Cutting Path Design to Minimize Workpiece Displacement at Cutting Point: Milling of Thin-Walled Parts, *International Journal of Automation Technology*, Vol.6, No. 5, pp. 638-647, 2012. DOI: 10.20965/ijat.2012.p0638
- [79] Koike Y, Matsubara A, Yamaji I. Design method of material removal process for minimizing workpiece displacement at cutting point., *CIRP Annals*, Vol.62, No.1, pp.419-422, 2013 DOI.org/10.1016/j.cirp.2013.03.144
- [80] Rai JK, Xirouchakis P. Finite element method based machining simulation environment for analyzing part errors induced during milling of thin-walled components, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.48, No.6, pp.629-643, 2008. DOI.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.11.004
- [81] Kolluru K, Axinte D, Becker A. A solution for minimising vibrations in milling of thin walled casings by applying dampers to workpiece surface, *CIRP Annals*, Vol. 62, No.1, pp.415-418, 2013. DOI.org/10.1016/j.cirp.2013.03.136
- [82] Liu S, Zheng L, Zhang ZH, Wen DH. Optimal fixture design in peripheral milling of thin-walled workpiece, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.28, pp.653-658, 2006. DOI 10.1007/s00170-004-2425-8
- [83] Budak E, Comak A, Ozturk E. Stability and high performance machining conditions in simultaneous milling, *CIRP Annals*, Vol. 62, No. 1, pp.403-406, 2013. DOI.org/10.1016/j.cirp.2013.03.141
- [84] Agarwal, A., Desai, K.A.: Predictive framework for cutting force induced cylindricity error estimation in end milling of thin-walled components, *Precision Engineering*, Vol.66, pp.209-219, 2020. DOI.org/10.1016/j.precisioneng.2020.07.007
-

-
- [85] Del Sol, I., Rivero, A., Lopez de Lacalle, L.N., Gamez, A.J.: Thin-Wall Machining of Light Alloys: A Review of Models and Industrial Approaches, *Materials (Basel)*. Vol. 1, No.12, pp.1-28, 2019. DOI.org/10.3390/ma12122012
- [86] Biermann, D., Kersting, P., Surmann, T.: A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades, *CIRP Annals*, Vol. 59, No. 1, pp.125-128, 2010. DOI.org/10.1016/j.cirp.2010.03.057
- [87] Zhang, Z., Li, H., Liu, X., Zhang, W., Meng, G.: Chatter mitigation for the milling of thin-walled workpiece. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.138, pp. 262-271, 2018, DOI.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.02.014
- [88] Qu, S.; Zhao, J.; Wang, T.: Three-dimensional stability prediction and chatter analysis in milling of thin-walled plate, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, pp. 2291–2300, 2016. DOI.org/10.1007/s00170-016-8357-2
- [89] Campa, F.J.; López de Lacalle, L.N.; Celaya, A.: Chatter avoidance in the milling of thin floors with bull-nose end mills: Model and stability diagrams, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 51, No. pp. 43–53, 2011. DOI.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.09.008
- [90] Ratchev, S.; Liu, S.; Huang, W.; Becker, A.A.: A flexible force model for end milling of low-rigidity parts. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.153–154, pp. 134–138, 2004, DOI.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.300
- [91] Zhang, J., Lin, B., Fei, J., Huang, T., Xiao, J., Zhang, X., Ji, C.: Modeling and experimental validation for surface error caused by axial cutting force in end-milling process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 99, pp.327-335, 2018. DOI.org/10.1007/s00170-018-2468-x
- [92] Tian, W., Ren, J., Zhou, J., Wang, D.: Dynamic modal prediction and experimental study of thin-walled workpiece removal based on perturbation method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 94, pp.2099-2113, 2018. DOI.org/10.1007/s00170-017-0955-0
- [93] Tian, W., Ren, J., Wang, D., Zhang, B.: Optimization of non-uniform allowance process of thin-walled parts based on eigenvalue sensitivity, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 96, pp. 2101–2116, 2018. DOI.org/10.1007/s00170-018-1740-4
- [94] Elbestawi, M.A., Sagherian, R.: Dynamic modeling for the prediction of surface errors in the milling of thin-walled sections, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.25, pp. 215–228, 1991. DOI.org/10.1016/0924-0136(91)90090-2
- [95] Cheng, Y., Zuo, D., Wu, M., Feng, X., Zhang, Y.: Study on simulation of machining deformation and experiments for thin-walled parts of titanium alloy. *International Journal of Control and Automation*, Vol.8, No.1, pp. 401-410, 2015.
- [96] Li, M., Huang, J., Ding, W., Liu, X., Li, L. Dynamic response analysis of a ball-end milling cutter and optimization of the machining parameters for a ruled surface. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 233, No. 2, pp. 588–599, 2019. DOI.org/10.1177/0954405417737577
-

-
- [97] Del Sol, I., Rivero, A., Gamez, A.J.: Effects of Machining Parameters on the Quality in Machining of Aluminium Alloys Thin Plates. *Metals*, Vol. 9, No.9, pp. 1-11, 2019 DOI.org/10.3390/met9090927
- [98] Yan, Q., Luo, M., Tang, K. Multi-axis variable depth-of-cut machining of thin-walled workpieces based on the workpiece deflection constraint. *Computer Aided Design*, Vol.100, pp. 14–29, 2018. DOI.org/10.1016/j.cad.2018.02.007
- [99] Aijun, T.; Zhanqiang, L. Deformations of thin-walled plate due to static end milling force. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.206, No. 1-3, pp. 345–351, 2008. DOI.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.089
- [100] Wan, M., Zhang, W.H.: Calculations of chip thickness and cutting forces in flexible end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 29, pp. 637–647, 2006, DOI.org/10.1007/s00170-005-2572-6
- [101] Jiang, X.; Lu, W.; Zhang, Z. An approach for improving the machining efficiency and quality of aerospace curved thin-walled parts during five-axis NC machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.97, pp. 2477–2488, 2018. DOI.org/10.1007/s00170-018-2129-0
- [102] Li, X., Zhao, W., Li, L., He, N., Chi, S.: Modeling and application of process damping in milling of thin-walled workpiece made of titanium alloy. *Shock and Vibration*, vol. 2015, pp. 1-12, 2015, DOI.org/10.1155/2015/431476
- [103] Jiang, X., Zhu, Y., Zhang, Z., Guo, M., Ding, Z.: Investigation of residual impact stress and its effects on the precision during milling of the thin-walled part. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.97, No.1-4, pp. 877-892, 2018. DOI.org/10.1007/s00170-018-1941-x
- [104] Tang, A., Liu, Z.: Three-dimensional stability lobe and maximum material removal rate in end milling of thin-walled plate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 43, pp. 33–39, 2009, DOI org/10.1007/s00170-008-1695-y
- [105] Denkena, B., Schmidt, C.: Experimental investigation and simulation of machining thin-walled workpieces. *Production Engineering, Research and Development*, Vol. 1, No. 4, pp.343–350, 2007. DOI:10.1007/s11740-007-0017-9.
- [106] Budak, E., Altintas, Y.: Modeling and avoidance of static form errors in peripheral milling of plates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, No. 3, pp. 459–476, 1995. DOI:10.1016/0890-6955(94)P2628-S.
- [107] Arnaud, L., Gonzalo, O., Seguy, S., Jauregi, H., Peigné, G.: Simulation of low rigidity part machining applied to thin-walled structure, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.54, No.5, pp. 479-488, 2011.
- [108] Rusinek, R., Zaleski, K.: Dynamics of thin-walled element milling expressed by recurrence analysis. *Meccanica*, Vol. 51, No. 6, pp. 1275–1286, 2016. DOI:10.1007/s11012-015-0293-y.
- [109] Jiang, X., Kong, X., Zhang, Z., Wu, Z., Ding, Z., & Guo, M.: Modeling the effects of Undeformed Chip Volume (UCV) on residual stresses during the milling of curved thin-
-

- walled parts. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.167, 105162, 2020. DOI.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105162
- [110] Chatelain, J.F., Lalonde, J.F., Tahan, A. S.: Effect of residual stresses embedded within workpieces on the distortion of parts after machining, *International Journal of Mechanics*, Vol. 6, No. 1, pp. 43-51, 2012.
- [111] Wang, L.; Huang, H.; West, R.W.; Li, H.; Du, J. A model of deformation of thin-wall surface parts during milling machining process. *Journal of Central South University*, Vol. 25, pp. 1107–1115, 2018. DOI.org/10.1007/s11771-018-3810-z
- [112] Wu, Q.; Li, D.-P. Analysis and X-ray measurements of cutting residual stresses in 7075 aluminum alloy in high speed machining. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.15, pp. 1499–1506, 2014. DOI.org/10.1007/s12541-014-0497-4
- [113] Fei, J.; Lin, B.; Yan, S.; Zhang, X.; Lan, J.; Dai, S. Chatter prediction for milling of flexible pocket-structure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, pp. 2721–2730, 2017. DOI.org/10.1007/s00170-016-9760-4
- [114] Wang, H.; Huang, L.; Yao, C.; Kou, M.; Wang, W.; Huang, B.; Zheng, W. Integrated analysis method of thin-walled turbine blade precise machining. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 16, pp. 1011–1019, 2015. DOI.org/10.1007/s12541-015-0131-0
- [115] Wu, Q.; Li, D.-P.; Ren, L.; Mo, S. Detecting milling deformation in 7075 aluminum alloy thin-walled plates using finite difference method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 85, pp. 1291–1302, 2016. DOI.org/10.1007/s00170-015-8012-3
- [116] Ma, J.W.; Liu, Z.; Jia, Z.Y.; Song, D.N.; Gao, Y.Y.; Si, L.K. Stability recognition for high-speed milling of TC4 thin-walled parts with curved surface. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 91, pp.1–11, 2017. DOI.org/10.1007/s00170-016-9905-5
- [117] Yang, Y.; Zhang, W.-H.; Ma, Y.-C.; Wan, M.; Dang, X.-B. An efficient decomposition-condensation method for chatter prediction in milling large-scale thin-walled structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 121, pp. 58–76, 2019. DOI.org/10.1016/j.ymssp.2018.11.013
- [118] Han, D.; Li, P.; An, S.; Shi, P. Multi-frequency weak signal detection based on wavelet transform and parameter compensation band-pass multi-stable stochastic resonance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 70–71, pp. 995–1010, 2016. DOI.org/10.1016/j.ymssp.2015.09.003
- [119] Kang, Y.-G.; Wang, Z.-Q. Two efficient iterative algorithms for error prediction in peripheral milling of thin-walled workpieces considering the in-cutting chip. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 73, pp. 55–61, 2013. DOI.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.06.001
- [120] Ratchev, S.; Liu, S.; Becker, A.A.A. Error compensation strategy in milling flexible thin-wall parts. *Journal Materials Processing Technology*, Vol. 162–163, pp. 673–681, 2005. DOI.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.192

-
- [121] Zhang, X.; Yu, T.; Wang, W.; Ehmann, K.F. Three-dimensional process stability prediction of thin-walled workpiece in milling operation. *Machining Science and Technology*, Vol. 20, pp. 406–424, 2016. DOI:10.1080/10910344.2016.1191027
- [122] Yan, R.; Gong, Y.; Peng, F.; Tang, X.; Li, H.; Li, B. Three degrees of freedom stability analysis in the milling with bull-nosed end mills. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, pp. 71–85, 2016. DOI.org/10.1007/s00170-015-8144-5
- [123] Jin, X.; Sun, Y.; Guo, Q.; Guo, D. 3D stability lobe considering the helix angle effect in thin-wall milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 82, pp. 2123–2136, 2016. DOI.org/10.1007/s00170-015-7570-8
- [124] Li, Z.; Sun, Y.; Guo, D. Chatter prediction utilizing stability lobes with process damping in finish milling of titanium alloy thin-walled workpiece. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, pp. 2663–2674, 2017. DOI.org/10.1007/s00170-016-9834-3
- [125] Campa, F.J.; López de Lacalle, L.N.; Lamikiz, A.; Sánchez, J.A. Selection of cutting conditions for a stable milling of flexible parts with bull-nose end mills. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, pp. 279–282, 2007. DOI.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.023
- [126] Bolsunovskiy, S.; Vermel, V.; Gubanov, G.; Kacharava, I.; Kudryashov, A. Thin-Walled Part Machining Process Parameters Optimization based on Finite-Element Modeling of Workpiece Vibrations. *Procedia CIRP*, Vol.8, pp. 276–280, 2013. DOI.org/10.1016/j.procir.2013.06.102
- [127] Bravo, U.; Altuzarra, O.; López de Lacalle, L.N.; Sánchez, J.A.A.; Campa, F.J.J. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.45, No. 15, pp.1669–1680, 2005. DOI.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.03.004
- [128] Olvera, D.; Urbikain, G.; Elías-Zuñiga, A.; López de Lacalle, L. Improving Stability Prediction in Peripheral Milling of Al7075T6. *Applied Science*, Vol. 8, No.8, pp.1316–1327, 2018. DOI.org/10.3390/app8081316
- [129] Germashev, A.; Logominov, V.; Anpilogov, D.; Vnukov, Y.; Khristal, V. Optimal cutting condition determination for milling thin-walled details. *Advances in Manufacturing*, Vol. 6, pp. 280–290, 2018. DOI.org/10.1007/s40436-018-0224-y
- [130] Urbikain Pelayo, G.; López De La Calle, L. Stability charts with large curve-flute end-mills for thin-walled workpieces. *Machining Science and Technology*, Vol. 22, No. 4, pp.585–603, 2018, DOI.org/10.1080/10910344.2017.1382513
- [131] Yuan, H., Wan, M., Yang, Y., Yang Y., Zhang, W.H.: Mitigation of chatter in thin-wall milling by using double-side support device. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 115, pp. 213–232, 2021. DOI.org/10.1007/s00170-021-06929-3
- [132] Ge, W., Guanxian, L., Wencheng, P., Izamshah, R., Xu, W., Songlin, D.: A state-of-art review on chatter and geometric errors in thin-wall machining processes, *Journal of*
-

- Manufacturing Processes*, Vol. 68, Part A, pp. 454-480, 2021. DOI.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.055
- [133] Fei, J.; Lin, B.; Xiao, J.; Ding, M.; Yan, S.; Zhang, X.; Zhang, J. Investigation of moving fixture on deformation suppression during milling process of thin-walled structures. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 32, pp. 403–411, 2018. DOI.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.011
- [134] Wang, L.; Si, H. Machining deformation prediction of thin-walled workpieces in five-axis flank milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 97, pp. 4179–4193, 2018. DOI.org/10.1007/s00170-018-2248-7
- [135] Tian, W.; Ren, J.; Wang, D.; Zhang, B. Optimization of non-uniform allowance process of thin-walled parts based on eigenvalue sensitivity. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 96, pp. 2101–2116, 2018. DOI.org/10.1007/s00170-018-1740-4
- [136] Wang, X., Song, Q., Gupta, M.K., Liu, Z.: Active vibration control of thin-walled milling based on ANFIS parameter optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 114, pp. 563–577, 2021. DOI.org/10.1007/s00170-021-06900-2
- [137] Yang, Y.; Zhang, W.H.; Ma, Y.C.; Wan, M. Chatter prediction for the peripheral milling of thin-walled workpieces with curved surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 109, pp. 36–48, 2016. DOI.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.07.002
- [138] Budak, E.; Tunç, L.T.; Alan, S.; Özgüven, H.N. Prediction of workpiece dynamics and its effects on chatter stability in milling. *CIRP Annals*, Vol. 61, No. 1, pp. 339–342, 2012. DOI.org/10.1016/j.cirp.2012.03.144
- [139] Ahmadi, K. Finite strip modeling of the varying dynamics of thin-walled pocket structures during machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, pp. 2691–2699, 2017. DOI.org/10.1007/s00170-016-8931-7
- [140] Ning, H.; Zhigang, W.; Chengyu, J.; Bing, Z. Finite element method analysis and control stratagem for machining deformation of thin-walled components. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139, No.1-3, pp.332–336, 2003. DOI.org/10.1016/S0924-0136(03)00550-8
- [141] Liu, S.M.; Shao, X.D.; Ge, X.B.; Wang, D. Simulation of the deformation caused by the machining cutting force on thin-walled deep cavity parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 92, pp. 3503–3517, 2017. DOI.org/10.1007/s00170-017-0383-1
- [142] Jiang, X., Kong, X., Zhang, Z., Wu, Z., Ding, Z., Guo, M.: Modeling the effects of Undeformed Chip Volume (UCV) on residual stresses during the milling of curved thin-walled parts. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.167, 105162, 2020, DOI.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105162
- [143] Su, J., Cai, Y., Jiang, X., Qiang, Y., Wang, Y., Liu, X.: Modeling of stiffness characteristic on evaluating clamping scheme of milling of thin-walled parts. *The International*

-
- Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 113, pp.1861–1872, 2021, DOI.org/10.1007/s00170-021-06740-0
- [144] Kanchana, J., Prabhu Raja, V., Prakash, R. and Radhakrishnan, P.: Dynamics of high-speed machining of aerospace structures using finite-element analysis, *Defence Science Journal*, Vol. 52. No. 4, pp. 403-408, 2002. DOI.org/10.14429/dsj.52.2197
- [145] Jiang, X.; Li, B.; Yang, J.; Zuo, X.Y.; Li, K. An approach for analyzing and controlling residual stress generation during high-speed circular milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, pp. 1439–1448, 2013. DOI.org/10.1007/s00170-012-4421-8
- [146] Jiang, X.; Li, B.; Yang, J.; Zuo, X.Y. Effects of tool diameters on the residual stress and distortion induced by milling of thin-walled part *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 68, pp. 175–186, 2013. DOI.org/10.1007/s00170-012-4717-8
- [147] Li, B.; Jiang, X.; Yang, J.; Liang, S.Y. Effects of depth of cut on the redistribution of residual stress and distortion during the milling of thin-walled part. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 216, pp. 223–233, 2015. DOI.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.016
- [148] Jiang, X.; Wang, Y.; Ding, Z.; Li, H. An approach to predict the distortion of thin-walled parts affected by residual stress during the milling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 93, pp. 4203–4216, 2017. DOI.org/10.1007/s00170-017-0811-2
- [149] Bolar, G., Joshi, S. N.: Experimental Study on Surface Integrity, Dimensional Accuracy, and Micro-Hardness in Thin-Wall Machining of Aluminum Alloy. *International Journal of Materials Forming and Machining Processes*, Vol. 5, No.2, pp. 13-31, 2018. doi:10.4018/IJMFMP.2018070102
- [150] Izamshah, R. A. J. A., Zulhairi, M., Kasim, M. S., Hadzley, M., Amran, M., Amri, M.: Cutter path strategies for shoulder milling of thin deflecting walls. In *Advanced Materials Research, Trans Tech Publications Ltd*, Vol. 903, pp. 175-180, 2014, DOI.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.903.175
- [151] Bolar, G., Mekonen, M., Das, A., Joshi, S. N.: Experimental Investigation on Surface Quality and Dimensional Accuracy during Curvilinear Thin-Wall Machining, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No.2, pp.6461-6469, 2018. DOI.org/10.1016/j.matpr.2017.12.259
- [152] Han, Z.; Jin, H.; Fu, Y.; Fu, H. Cutting deflection control of the blade based on real-time feedrate scheduling in open modular architecture CNC system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 90, pp. 2567–2579, 2017. DOI.org/10.1007/s00170-016-9444-0
- [153] Cica, D., Borojevic, S., Jotic, G., Sredanovic, B., Tesic, S.: Multiple performance characteristics optimization in end milling of thin-walled parts using desirability function. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 44, No.1, pp. 84-94, 2019,
-

-
- [154] Liu, Z., Kang, R., Liu, H., Dong, Z., Bao, Y., Gao, S., Zhu, X.: FEM-based optimization approach to machining strategy for thin-walled parts made of hard and brittle materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.110, No.5, pp. 1399-1413, 2020. DOI.org/10.1007/s00170-020-05975-7.
- [155] Wang, D., Löser, M., Ihlenfeldt, S., Wang, X., & Liu, Z.: Milling stability analysis with considering process damping and mode shapes of in-process thin-walled workpiece. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.159, pp. 382-397, 2019. DOI.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.06.005
- [156] Dang, X. B., Wan, M., Yang, Y., & Zhang, W. H.: Efficient prediction of varying dynamic characteristics in thin-wall milling using freedom and mode reduction methods. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.150, pp. 202-216, 2019. DOI.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.10.009
- [157] Agarwal, A., Desai, K. A.: Rigidity Regulation Approach for Geometric Tolerance Optimization in End Milling of Thin-Walled Components. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.143, No.11, 111006, 2021.
- [158] Bolar G., Joshi S.N.: Numerical Modeling and Experimental Validation of Machining of Low-Rigidity Thin-Wall Parts. In: Pande S., Dixit U. (eds) *Precision Product-Process Design and Optimization. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering*. Springer, Singapore. DOI.org/10.1007/978-981-10-8767-7_4
- [159] Bolar G., Joshi S.N.: Three-dimensional numerical modeling, simulation and experimental validation of milling of a thin-wall component, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 231, NO. 5, pp. 792-804, 2017. DOI.org/10.1177/0954405416685387
- [160] Masoudi, S.; Amini, S.; Saeidi, E.; Eslami-Chalander, H. Effect of machining-induced residual stress on the distortion of thin-walled parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, pp. 597–608, 2014. DOI.org/10.1007/s00170-014-6281-x
- [161] Dun, Y., Zhu, L., Wang, S.: Investigation on milling force of thin-walled workpiece considering dynamic characteristics of workpiece. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 33, pp.4061–4079, 2019. DOI.org/10.1007/s12206-019-0802-3
- [162] Zhang, L., Gao, W., Zhang, D., Tian, Y.: Prediction of Dynamic Milling Stability considering Time Variation of Deflection and Dynamic Characteristics in Thin-Walled Component Milling Process, *Shock and Vibration*, Vol. 2016, 14 pages, 2016. DOI.org/10.1155/2016/3984186
- [163] Wan, M., Dang, X. B., Zhang, W. H., Yang, Y.: Optimization and improvement of stable processing condition by attaching additional masses for milling of thin-walled workpiece. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 103, pp. 196-215, 2018. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.10.008
- [164] Ślusarczyk, L.: Analysis of deformations of thin-wall parts in machining, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2015*, edited by Ryszard S. Romaniuk, Vol. 9662, pp. 96624L - 96624L-8, 2015. DOI.org/10.1117/12.2205850
-

-
- [165] Sridhar, G., Ramesh, B.P.: Effect of a milling cutter diameter on distortion due to the machining of thin wall thin floor components, *Advances in Production Engineering & Management*, Vol. 10, No. 3, pp. 140–152, 2015. DOI.org/10.14743/apem2015.3.198
- [166] Bi, Y.B., Cheng, Q.L., Dong, H.Y., Ke, Y.L.: Machining distortion prediction of aerospace monolithic components, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, Vol. 10, No. 5, pp. 661-668, 2009. DOI.org/10.1631/jzus.A0820392
- [167] Belgasim, O., El-Axir, M.H.: Modeling of residual stresses induced in machining aluminum magnesium alloy (Al-3Mg), In: *Proceedings of the World Congress on Engineering*, Vol. 2, pp. 1268-1273, 2010.
- [168] Chatelain, J.F., Lalonde, J.F., Tahan, A. S.: Effect of residual stresses embedded within workpieces on the distortion of parts after machining, *International Journal of Mechanics*, Vol. 6, No. 1, pp. 43-51, 2012.
- [169] Bolar, G., Joshi, S. N.: 3D finite element modeling of thin-wall machining of aluminum 7075-T6 alloy, *5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12th–14th, 2014, IIT Guwahati, Assam, India*, pp. 135.1-135.6, 2014.
- [170] Huang, Y.A., Zhang, X., Xiong, Y.: Finite Element Analysis of Machining Thin-Wall Parts: Error Prediction and Stability Analysis, poglavlje u knjizi: *"Finite Element Analysis - Applications in Mechanical Engineering"*, book edited by Farzad Ebrahimi, pp. 327 – 354, ISBN 978-953-51-0717-0, 2012.
- [171] Adetoro, O. B., Wen, P. H., Sim, W. M.: A new damping modelling approach and its application in thin wall machining, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 51, pp. 453–466, 2010.
- [172] Izamshah, R.R.A., Mo, J.P.T., Ding, S.: Finite Element Analysis of Machining Thin-Wall Parts, *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications, Switzerland, Vol. 458, pp. 283-288, 2011.
- [173] Izamshah, R.A. Hybrid Deflection Prediction for Machining Thin-Wall Titanium Alloy Aerospace Component; *PhD. Thesis*, School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering RMIT University, 2011.
- [174] Sonawane, H.A.; Joshi, S.S. Modeling of machined surface quality in high-speed ball-end milling of Inconel-718 thin cantilevers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.78, pp. 1751–1768, 2015. DOI.org/10.1007/s00170-014-6759-6
- [175] Qu, S.; Zhao, J.; Wang, T. Experimental study and machining parameter optimization in milling thin-walled plates based on NSGA-II. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, pp. 2399–2409, 2017. DOI.org/10.1007/s00170-016-9265-1
- [176] de Oliveira, E.L.; de Souza, A.F.; Diniz, A.E. Evaluating the influences of the cutting parameters on the surface roughness and form errors in 4-axis milling of thin-walled free-form parts of AISI H13 steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol.40, 334, 2018. DOI.org/10.1007/s40430-018-1250-1
-

-
- [177] Borojevic, S.; Lukic, D.; Milošević, M.; Vukman, J.; Kramar, D. Optimization of process parameters for machining of Al 7075 thin—Walled structures. *Adv. Prod. Manag.*, Vol.13, pp. 125–135, 2018. DOI.org/10.14743/apem2018.2.278
- [178] Bolar, G.; Das, A.; Joshi, S.N. Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components. *Measurement*, Vol. 121, pp.190–204, 2018. DOI.org/10.1016/j.measurement.2018.02.015
- [179] Del Sol, I.; Rivero, A.; Salguero, J.; Fernández-Vidal, S.R.; Marcos, M. Tool-path effect on the geometric deviations in the machining of UNS A92024 aeronautic skins. *Procedia Manufacturing*, Vol. 13, pp.639–646, 2017. DOI.org/10.1016/j.promfg.2017.09.134
- [180] Sapthagiri S., Rao K J.: Optimization of Machining Parameters with Minimum Distortion of a Thin Wall and Thin Floor Avionic Component, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, ISSN 2250-2459, Volume 6, Issue 7, pp.154 – 159, 2016.
- [181] Das, A., Salunkhe, B., Bolar, G., Joshi, S. N.: A comparative study on performance of approaches for machining of thin-wall components. In *6th international & 27th all India manufacturing technology, design and research conference (AIMTDR-2016)*, pp. 16-18, 2016.
- [182] Pandian, P., Prabhu, R., Sakthimurugan, K.: Surface error compensation in HSM of thin wall structures. *International Journal of Engineering Science Invention*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-11, 2013.
- [183] Liu, J.: Fixture design for thin-walled parts, Master's Thesis, University of Manitoba, Winnipeg, Canada, (1993).
- [184] Novak-Marcincin, J., Janak, M., Novakova-Marcincinova, L., Fecova, V.: Possibility of a quick check on milling strategy suitability. *Tehnički vjesnik/Technical Gazette*, vol. 19, no. 4, pp. 959-964, 2012.
- [185] Msaddek, E.B., Bouaziz, Z., Desein, G., Baili, M.: Optimization of pocket machining strategy in HSM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 62, No. 1, pp.69-81, 2012. DOI:10.1007/s00170-011-3801-9.
- [186] Baranek, I., Buransky, I., Peterka, J.: Influence of material removal way on thin-walled part quality by milling. *MM Science Journal*, pp. 414-417, 2013. DOI:10.17973/MMSJ.2013_06_201306.
- [187] Ratchev, S., Nikov, S., Moualek, I.: Material removal simulation of peripheral milling of thin wall low-rigidity structures using FEA, *Advances in Engineering Software*, Vol. 35, No. 8-9, pp. 481–491, 2004.
- [188] Gao, Y.Y., Ma, J.W., Jia, Z.Y., Wang, F.J., Si, L.K., Song, D.N.: Tool path planning and machining deformation compensation in high-speed milling for difficult-to-machine material thin-walled parts with curved surface, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 84, Issue 9, pp. 1757–1767, 2016.
- [189] Gang, L.: Study on deformation of titanium thin-walled part in milling process, *Journal of materials processing technology*, Vol. 209, pp. 2788–2793, 2009.
-

-
- [190] Cheng, Y., Zuo, D., Wu, M., Feng, X., Zhang, Y.: Study on Simulation of Machining Deformation and Experiments for Thin-walled Parts of Titanium Alloy, *International Journal of Control and Automation*, Vol. 8, No. 1, pp. 401- 410, 2015.
- [191] Qasim, M., He, L., X., H.: Deflection Prediction of Aluminum Alloy 7075 of a thin Walled Component and Optimization of Parameters, 2nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology (ICRSET'2014), March 21-22, Dubai, UAE, pp. 103 – 107, 2014.
- [192] Shamsuddin, K.A., Ab-Kadir, A. R., Osman, M.H.: A Comparison of Milling Cutting Path Strategies for ThinWalled Aluminium Alloys Fabrication, *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, Vol. 2, No.3, pp. 01-08, 2013
- [193] Sun, C., Dominguez-Caballero, J., Ward, R., Ayvar-Soberanis, S., Curtis, D.: Machining Cycle Time Prediction: Data-driven Modelling of Machine Tool Feedrate Behavior with Neural Networks. arXiv preprint arXiv:2106.09719, 2021.
- [194] Pandian, P., Prabhu, R., Sakthimurugan, K.: Surface error compensation in HSM of thin wall structures, *International Journal of Engineering Science Invention*, Vol. 2, No. 2, pp.1-11. 2013.
- [195] Lukic D, Cep R, Vukman J, Antic A, Djurdjev M, Milosevic M. Multi-Criteria Selection of the Optimal Parameters for High-Speed Machining of Aluminum Alloy Al7075 Thin-Walled Parts. *Metals*. 2020; Vol.10, No.12, 1570. DOI.org/10.3390/met10121570
- [196] Medić, M.: *Matematičko modeliranje i optimizacija procesa laserskog sečenja primenom metoda veštačke inteligencije*, doktorska teza, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet Niš, Niš, 2013.
- [197] Czitrom, V.: One factor at a time versus designed experiments, *The American Statistician*, Vol. 53, No. 2, pp. 126-131, 1999.
- [198] Marinković, V.: Racionalizacija eksperimentalnih istraživanja primenom teorije višefaktornog eksperimenta, *IMK-14 - Istraživanje i razvoj*, Vol. 13, No. 1/2, pp. 23–36, 2007.
- [199] Marinković, V.: Application of some non-linear mathematical models to the theory of experimental design, *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 103–117, 1994.
- [200] Montgomery, D.C.: *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, Inc., Vol.18, 2013.
- [201] Dean, A., Voss, D., Draguljić, D.: *Design and analysis of experiments* (Vol. 2). New York: Springer, 2017.
- [202] Dean, A., Voss, D., Draguljić, D.: Response surface methodology. In *Design and analysis of experiments*, pp. 565-614, 2017.
- [203] Deresse, N. C., Deshpande, V., Taifa, I. W.: Experimental investigation of the effects of process parameters on material removal rate using Taguchi method in external cylindrical grinding operation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 23, No.2, 405-420, 2020.
-

-
- [204] Taguchi, G., Chowdhury, S., Wu, Y.: Taguchi's Quality Engineering Handbook, John Wiley & Sons, Inc. 2005.
- [205] Athreya, S., Venkatesh, Y.D.: Application Of Taguchi Method For Optimization Of Process Parameters In Improving The Surface Roughness Of Lathe Facing Operation, *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, Vol. 1, No. 3, pp. 13-19, November 2012.
- [206] Rathi, M. G., Jakhade, N. A.: An optimization of forging process parameters by using Taguchi Method: An industrial case study. *International Journal of Scientific and Research Publications*, Vol.4, No.6, 2014.
- [207] Madić, M., Radovanović, M.: Application of the Taguchi method for optimization of laser cutting: a review, *Nonconventional Technologies Review*, Vol. 17, No. 4, pp. 50–57, 2013.
- [208] Madić, M., Slatineanu, L., Radovanović, M.: Surface roughness optimization in CO2 laser cutting by using Taguchi method, , *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, Vol. 75, No. 1, pp. 97–106, 2013.
- [209] Pejić, V.: *Modelovanje i optimizacija procesa glodanja vretenastim glodalima*, doktorska teza, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2016.
- [210] Marinković, V., Madić, M.: Optimization of surface roughness in turning alloy steel by using Taguchi method, *Scientific Research and Essays*, Vol. 6, No. 16, pp. 3474–3484, 2011.
- [211] Vukman, J., Lukić, D., Milošević, M., Borojević, S., Antić, A., Đurđev, M.: Fundamentals of the optimization of machining process planning for the thin-walled aluminium parts. *Journal of Production Engineering*, Vol.19, No.2, pp. 53-56. 2016.
- [212] [R216.32-10025-AK32A H10F \(coromant.com\)](#)
- [213] [ALU-pow \(140513 \) \(yg-1.pl\)](#)
- [214] Sousa, M. R. S., Lora-García, J., López-Pérez, M. F., Santafé-Moros, A., Gozávez-Zafrilla, J. M.: (). Operating conditions optimization via the Taguchi method to remove colloidal substances from recycled paper and cardboard production waste water. *Membranes*, Vol.10, No.8, 170, 2020, doi.org/10.3390/membranes10080170
- [215] Mohsin, I., He, K., Li, Z., Zhang, F., Du, R.: Optimization of the polishing efficiency and torque by using Taguchi Method and ANOVA in robotic polishing. *Applied Sciences*, Vol.10, No.3, 824, 2020, doi.org/10.3390/app10030824
- [216] Myers, R. H., Montgomery, D. C., Anderson-Cook, C. M.: *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons, 2016,
- [217] Bogdanovic, M. A: *Dobijanje, karakterizacija i optimizacija HIPOLIPEMIJSKIH ekstrakata matičnjaka (Melissa officinalis) i grčkog semena (Trigonella foenum-graecum) natkritičnim ugljenik (iv)-oksidom*, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, doktorska disertacija, 2016.
- [218] Box, K.G., Wilson, G. E. P. : On the experimental attainment of optimum conditions, *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol.13, pp.1–45, 1951.
-

-
- [219] Said, K.A.M., Amin, M.A.M.: Overview on the response surface methodology (RSM) in extraction processes. *Journal of Applied Science & Process Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 8-17, 2015.
- [220] Kovac, P., Rodic, D., Pucovsky, V., Savkovic, B., Gostimirovic, M.: Application of fuzzy logic and regression analysis for modeling surface roughness in face milling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 24, pp. 755–762, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10845-012-0623-z>
- [221] Fang, N., Pai, P. S., Edwards, N.: Neural network modeling and prediction of surface roughness in machining aluminum alloys. *Journal of Computer and Communications*, Vol.4, No.5, pp.1–9, 2016.
- [222] Kovac, P., Rodic, D., Pucovski, V., Mankova, I., Savkovic, B., Gostimirovic, M.: A review of artificial intelligence approaches applied in intelligent processes. *Journal of Production Engineering*, Vol.15, No.1, pp.1–4, 2012.
- [223] Kovac, P., Rodic, D., Savkovic, B., Pucovski, V., Gostimirovic, M.: Modeliranje habanja alata radi izbegavanja rizika od loma primenom fazi logike, *Integritet i vek konstrukcija*, Vol. 15, Br.2, str.103-109, 2015.
- [224] Vukman, J., Lukic, D., Borojevic, S., Rodic, D., Milosevic, M.: Application of Fuzzy Logic in the Analysis of Surface Roughness of Thin-Walled Aluminum Parts, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 21, pp.91-102, 2020, <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00229-3>.
- [225] Mamdani, E. H., & Assilian, S.: An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man–Machine Studies*, Vol. 7, No. 1, pp. 1–13, 1975.
- [226] Sugeno, M., & Kang, G.: Structure identification of fuzzy model. *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.28, No.1, pp.15–33, 1988.
- [227] Tsukamoto, Y.:An approach to fuzzy reasoning method. In M. M. Gupta, R. K. Ragade, & R. R. Yager (Eds.), *Advances in fuzzy set theory and applications*, pp. 137–149. Amsterdam: Elsevier. (1979).
- [228] Tamiloli, N., Venkatesan, J., Vinay, G., Sai, P., Irfan, S. M., Sampathkumar, T., Jayabalakrishnan, D.: Comparison of Sugeno-type and Mamdani-type fuzzy inference systems for end milling process. In *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2395, No. 1, pp. 040012, October 2021, AIP Publishing LLC. DOI.org/10.1063/5.0068445
- [229] Subramaniam, P. R., Venugopal, C.:Comparison of Mamdani and Sugeno Inference Methods in Calorie Burn Calculation for Activity Using Treadmill. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, Vol.17, No.4, pp.1703-1709, 2020. DOI.org/10.1166/jctn.2020.8428
- [230] Rodić, D.: Optimizacija procesa elektroerozivne obrade savremenih inženjerskih materijala, Univerzitet u Novom Sadu, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, doktorska disertacija*, 2019.
- [231] Nukman, Y., Hassan, M., & Harizam, M.: Optimization of prediction error in CO₂ laser cutting process by Taguchi artificial neural network hybrid with genetic
-

- algorithm. *Applied Mathematics & Information Sciences*, Vol.7, No.1, pp.363–370, 2013.
- [232] Ren, Q., Balazinski, M., Jemielniak, K., Baron, L., & Achiche, S.: Experimental and fuzzy modelling analysis on dynamic cutting force in micro milling. *Soft Computing*, Vol.17, No. 9, pp.1687–1697, 2013.
- [233] Triantaphyllou, E.: Multi-Criteria Decision Making: A Comparative Study. Dordrecht, *The Netherlands: Kluwer Academic Publishers (now Springer)*. 2000. ISBN 978-0-7923-6607-2.
- [234] Lukic, D., Milosevic, M., Antic, A., Borojevic, S., Ficko, M.: Multi-criteria selection of manufacturing processes in the conceptual process planning, *Advances in Production Engineering & Management*. 2017, Vol.12, No.2, pp. 151–162. <https://doi.org/10.14743/apem2017.2.247>
- [235] Lukić, D., Todić, V., Milošević, M., Jovičić, G., Vukman, J.: Primena višekriterijumskog odlučivanja u izboru obradnog sistema, *37. Jupitet Konferencija*, Београд, стр.3.87-3.92, 2011.
- [236] Madic, M., Nedic, B., Radovanovic, M.: Poslovno i Inženjersko Odlučivanje Primenom Metoda Višekriterijumskog Odlučivanja; Fakultet Inzenjerskih Nauka, Univerzitet u Kragujevcu: Kragujevac, Serbia, 2015.
- [237] Hwang, C.L., Yoon, K.: Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications; Springer: Berlin, Germany, 1981.
- [238] Köksalan, M., Wallenius, J., Zionts, S.: Multiple Criteria Decision Making: From Early History to the 21st Century. Singapore: *World Scientific*. 2011, ISBN 9789814335591.
- [239] Malczewski, J.: GIS and Multicriteria Decision Analysis, John Wiley & Sons, Inc. 1999.
- [240] Triantaphyllou, E., Lootsma, F. A., Pardalos, P. M., Mann, S. H.: On the evaluation and application of different scales for quantifying pairwise comparisons in fuzzy sets, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, Vol. 3, No. 3, pp. 133-155, 1994.
- [241] Tzeng, G.H., Huang, J.J.: Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications; *CRC Press: Boca Raton, FL, USA*, 2011.
- [242] Vinogradova, I.: Multi-attribute decision-making methods as a part of mathematical optimization. *Mathematics*, Vol.7, No.10, 915, 2019. DOI.org/10.3390/math7100915
- [243] Мадих, М., Недић, Б., Радовановић, М.: Пословно и инжењерско одлучивање применом метода виšekriterijumskog одлучивања, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, 2015.
- [244] Zavadskas, E.K., Turskis, Z., Kildiene, S.: State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and Economic Development of Economy*, Vol. 20, No.1, pp. 165–179, 2014. DOI.org/10.3846/20294913.2014.892037
- [245] Ishizaka, A., Nemery, P.: Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software, *John Willey & Sons*, 2013. ISBN:9781118644898, DOI:10.1002/9781118644898

-
- [246] Marinković, G., Ninkov, T., Trifković, M., Nestorović, Ž.: Pejičić, G. On the land consolidation projects and cadastral municipalities ranking, *Tehnički vjesnik*, Vol. 23, No. 4, pp. 1147-1153, 2016. <https://doi.org/10.17559/TV-20140316225250>
- [247] Jahan, A., Edwards, K.L., Bahraminasab, M.: Multi-criteria Decision Analysis for Supporting the Selection of Engineering Materials in Product Design, *Butterworth-Heinemann*, 2016, ISBN 978-0-08-100536-1, <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03347-3>
- [248] Deng, J.L.: Control problems of grey systems. *Systems & Control Letters*, Vol.1, No.5, pp. 288–294, 1982, DOI.org/10.1016/S0167-6911(82)80025-X
- [249] Saaty, T.L.: The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1990
- [250] Brauers, W.K.: Optimization Methods for a Stakeholder Society, a Revolution in Economic Thinking by Multi-Objective Optimization; Springer US: New York, NY, USA, 2004.
- [251] Yakowitz, D.S., Lane, L.J., Szidarovszky, F.: Multi-attribute decision making: Dominance with respect to an importance order of the attributes. *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 54, No. 2-3, pp. 167–181, 1993. DOI.org/10.1016/0096-3003(93)90057-L
- [252] Zavadskas, E.K., Kaklauskas, A., Sarka, V.: The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects. *Technological and Economic Development of Economy*, Vol.1, No.3, pp. 131–139, 1994.
- [253] Zavadskas, E.K., Turskis, Z.: A new Additive Ratio Assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making. *Technological and Economic Development of Economy*, Vol.16, No.2, pp. 159–172, 2010. DOI.org/10.3846/tede.2010.10
- [254] Zavadskas, E.K., Turskis, J., Antucheviciene, A., Zakarevicius, A.: Optimization of weighted aggregated sum product assessment. *Elektron. Elektrotech.* 2012, Vol. 122, No. 6, pp. 3–6, DOI.org/10.5755/j01.eee.122.6.1810
- [255] Opricovic, S., Tzeng, G.H.: Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *European Journal of Operational Research*, Vol. 178, pp. 514–529, 2007. DOI.org/10.1016/j.ejor.2006.01.020
- [256] Parkan, C., Wu, M.L.: On the equivalence of operational performance measurement and multi-attribute decision making, *International Journal of Production Research*. Vol. 35, pp. 2963–2988, 1997, DOI.org/10.1080/002075497194246
- [257] Keshavarz-Ghorabae, M., Zavadskas, E.K., Olfat, L., Turskis, Z.: Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS). *Informatica*, Vol. 26, No. 3, pp. 435–451, 2015. DOI.org/10.15388/Informatica.2015.57
- [258] Keshavarz-Ghorabae, M.; Amiri, M., Zavadskas, E.K., Turskis, Z., Antucheviciene, J.: A Dynamic Fuzzy Approach Based on the EDAS Method for Multi-Criteria Subcontractor Evaluation, *Information*, Vol. 9, No. 3, 68, 2018. DOI.org/10.3390/info9030068
-

-
- [259] Pamucar, D., Cirovic, G.: The selection of transport and handling resources in logistics centers using Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (MABAC). *Expert Systems with Applications*, Vol.42, No. 6, pp. 3016–3028, 2015. DOI.org/10.1016/j.eswa.2014.11.057
- [260] MacCrimmon, K.R.: Decision Making Among Multiple-Attribute Alternatives: A Survey and Consolidated Approach; The Rand Corporation: Santa Monica, CA, USA, 1968; Available online: https://www.rand.org/pubs/research_memoranda/RM4823.html (accessed on 25 June 2020).
- [261] Opricovic, S., Tzeng, G.H.: Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156, 445–455, 2004. DOI.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1
- [262] Tripathy, S., Tripathy, D.K.: Multi-attribute optimization of machining process parameters in powder mixed electro-discharge machining using TOPSIS and grey relational analysis. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol.19, No.1, pp. 62–70, 2016. DOI.org/10.1016/j.jestch.2015.07.010
- [263] Moradian, M., Modanloo, V., Aghaiee, S.: Comparative analysis of multi criteria decision making techniques for material selection of brake booster valve body. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Vol. 6, No.5, pp. 526–534. 2019.
- [264] King, S.D., Rosopa, P.J., Minium, E.W.: Statistical Reasoning in the Behavioral Sciences, 7th ed.; Willey; USA John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2018.
- [265] Howell, D.: Statistical Methods for Psychology; Wadsworth, Cengage Learning: Boston, MA, USA, 2013.

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
<i>Оптимизација технолошког процеса обраде танкозидних алуминијумских структура</i>
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
а) <i>Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Република Србија</i> б) <i>Универзитет у Бањој Луци, Машински факултет, Република Српска, Босна и Херцеговина</i> в) <i>Унимет д.о.о, Каћ</i> г) <i>Фрезал д.о.о, Рума</i>
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
<i>Иновативна научна и уметничка истраживања из домена делатности ФТН-а</i>
1. Опис података
1.1 Врста студије <i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i> <u>Докторска дисертација</u>
1.2 Врсте података а) квантитативни б) квалитативни
1.3. Начин прикупљања података а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту _____ ђ) снимци, фотографије: навести врсту _____ е) текст, навести врсту <u>Литературни извори</u> ж) мапа, навести врсту _____ з) остало: описати <u>Експериментална испитивања</u>

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

- a) Excel фајл, датотека **.xlsx**
- b) SPSS фајл, датотека _____
- c) PDF фајл, датотека **.pdf**
- d) Текст фајл, датотека **.docx**
- e) JPG фајл, датотека **.jpg; .png**
- f) Остало, датотека _____

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

- a) број варијабли **девет**
- б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) **велики број**

1.3.3. Поновљена мерења

- a) да
- б) **не**

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- a) временски размак између поновљених мера је _____
- б) варијабле које се више пута мере односе се на _____
- в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

- a) **Да**
- б) **Не**

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип **Експериментална испитивања (Централни композитни план и Тагучијев план)**

б) корелационо истраживање, навести тип _____

ц) анализа текста, навести тип **Прикупљање података анализом доступне литературе**

д) остало, навести шта _____

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

- Координатна мерна машина Mitutoyo Strato – APEX 9166
- Уређај за мерење храпавости Mitutoyo SJ-301
- Координатна мерна машина Zeiss Contura G2
- Сензора за мерењем на додир Zeiss Vast XXT
- Уређај за мерење храпавости INNOVATEST

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да **Не**

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) Колики је број недостајућих података? _____

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Квалитет података је контролисан анализом и поређењем резултата измерених при експерименталном испитивању

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Валидација података је реализована од стране комисије, за оцену и одбрану докторске дисертације

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у **Репозиторијуму докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду**.

3.1.2. URL адреса <https://cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf>

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

- a) Да
- б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____
- в) Не

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? _____

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? _____

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да **Не**

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? **Да** Не

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да **Не**

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да **Не**

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да **Не**

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

а) Подаци нису у отвореном приступу

б) Подаци су анонимизирани

ц) Остало, навести шта

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

а) **јавно доступни**

б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области

ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Јован Вукман yuki_boske@yahoo.com

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Јован Вукман yuki_boske@yahoo.com

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Јован Вукман yuki_boske@yahoo.com