

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ**

Марко Д. Ристић

**МЕТОДОЛОГИЈА ПРОДУЖЕТКА
РАДНОГ ВЕКА ДЕЛОВА
ВЕНТИЛАЦИОНИХ МЛИНОВА**

Докторска дисертација

Београд, 2017.

**UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**

Марко Д. Ристић

**METHODOLOGY OF INCREASING
REAMENING WORKING LIFE PARTS
OF VENTILATION MILLS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2017.

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ И ЧЛАНОВИМА КОМИСИЈЕ ЗА ОДБРАНУ

Ментор: **Редовни професор др Радица Прокић-Цветковић**
Универзитет у Београду Машински факултет

Чланови Комисије: **Редовни професор др Александар Седмак**
Универзитет у Београду Машински факултет

Редовни професор др Оливера Поповић
Машински факултет Универзитет у Београду,

Редовни професор др Вукић Лазић
Универзитет у Крагујевцу Факултет Инжењерских наука

Научни Саветник др Мирко Козић
Војнотехнички Институт

Датум одбране: _____ 2017.

Предговор

Ова дисертација је резултат вишегодишњег истраживања перформанси и решавања проблема за продужење рада вентилационог млина термоелектране Костолац Б. Истраживања су спроведена у Институту Гоша у Београду и Смедеревској Паланци, Машинском факултету Универзитета у Београду, MESSER TECHNOGAS-у, Термоелектрани Костолац Б, а део истраживања у Војнотехничком институту у Београду.

Хтео бих да се захвалим свом ментору и председнику комисије проф. др Радици Прокић Цветковић за подршку и помоћ у изради докторске дисертације, као и за све смернице и залагање током овог истраживања. Велику захвалност дугујем и осталим члановима комисије за подршку и помоћ, а посебно др Мирку Козићу научном саветнику Војнотехничког института у Београду, без чије велике помоћи и залагања никада не бих успео да у овој мери уврстим нумеричке симулације у свој рад и схватим суштину и значај нумеричких симулација испред, или у спреси, са експерименталним истраживањима.

Ова дисертација је део истраживања у оквиру пројекта технолошког развоја TP34028 и овиме бих желео да се захвалим пројектном тиму на свеобухватној подршци приликом израде дисертације.

Желео бих да захвалим и својој породици на помоћи и моралној подршци током целог тока мојих студија, која ми је пружила кључну подршку да истрајем у свом циљу.

Нарочито имам потребу да издвојим др Бориса Катавића који је пружио безрезервну подршку и помоћ мом раду, допринео иницијалној идеји и теми мога рада и водио ме кроз свет металургије, наношења антихабајућих превлака, испитивања и праћења рада великих система. Био ми је на располагању у сваком моменту и за све евентуалне препреке на које сам наилазио. Захвалност му дугујем јер је и поред стручне подршке био моја морална подршка и није ми дозволио да посустанем ни у тренуцима у којима ни сам нисам веровао да ћу успети да завршим започето. Част ми је радити са таквим сарадником, а испред свега, са тако великим човеком. Велико хвала!

Београд: _____ 2017.

Марко Д. Ристић

Методологија продужетка радног века делова вентилационих млинова

РЕЗИМЕ

Последњих година спроводе се значајна истраживања, која се односе на продужење животног века радних делова термоенергетских постројења. Опрема у термоелектранама је изложена дуготрајном дејству високих температура и притисака, хабању и цикличном оптерећењу. У наведеним условима експлоатације различити узроци могу довести до оштећења, појединих компонената као што је хабање радних делова вентилационог млина. Последице су смањење производног капацитета и вентилационог дејства млина у односу на пројектовану вредност, као и чести застоји због замене делова, што значајно утиче на продуктивност, економичност и енергетску ефикасност термоелектране.

Уколико се констатује оштећење компоненте, које може довести до поремећаја у раду постројења, у пракси постоје три могућности: да се она остави у погону уз редовну и чешћу контролу, да се изврши ревитализација компоненте или да се замени потпуно новом компонентом. Одлука се доноси на основу техничких, технолошких и економских критеријума у зависности од могућности набавке новог дела, цене замене или ревитализације, могућности заустављања постројења и аспеката сигурности и заштите околине.

У овире ове докторске тезе пажња је усмерена на анализу радних услова и израду процедуре за продужење радног века делова вентилационог млина у Термоелектрани Костолац Б, поступцима наваривања и метализације. Тачније, предмет ових истраживања ће бити да се на основу техничко – технолошке анализе рада и стања компоненти вентилационог млина, које су доминантно изложене абразивном и ерозивном хабању, изврши избор радног дела, у овом случају усисних плоча, као и карактеризација основног материјала.

Први део дисертације је усмерен и на примену савремених метода нумеричке симулације вишефазног струјања у вентилационом млину у циљу детаљније анализе услова хабања (проблема) везаних за појаву абразије и ерозије изабране компоненте. На овај начин, применом софтверског пакета

ANSYSFLUENT 12, добиће се детаљнији приказ мултифазног струјања и брзине мешавине која омогућује да се на основу интензитета и смера брзине, прецизније одреде критичне зоне у којима ће се појавити оштећења елемената вентилационог млина. Ове зоне се по правилу налазе у оним деловима млина, у којима је због смера и брзине струјања као и удела чврстих честица смеше (угаљ, минералне материје, песак) највеће хабање истих.

У другом делу дисертације пажња је усмерена на дефинисање технологија наношења антихабајућих превлака (слојева), што би обухватило: аналитичку оцену заварљивости основног метала радног дела, предвиђања могућих ефеката топлотних циклуса наношења антихабајућих превлака на микроструктуру материјала и особине слоја, избор и дефинисање поступка наношења антихабајућих превлака, избор додатних и потрошних материјала, као и дефинисање врсте и обима контроле нанесеног слоја. Након моделских испитивања и избора технологија наношења превлака, а у циљу верификације добијених резултата и повећања радног века одабране компоненте вентилационог млина, извршиће се функционални експерименти на прототипу радних компоненти са антихабајућим превлакама (слојевима).

Истраживања у овој дисертацији ће омогућити како освајање технологија наношења антихабајућих слојева на радне делове вентилационих млинова у ТЕ Костолац Б, тако и продужење њиховог радног века. Истраживања која ће обухватити ова докторска теза су део истраживања у оквиру пројекта из области технолошког развоја: Истраживање могућности оптимизације рада и ревитализације хабајућих делова вентилационог млина термоелектране Дрмно - Костолац", евиденциони број ТР - 19205А и Истраживање и оптимизација технолошких и функционалних перформанси вентилационог млина термоелектране Костолац Б, евиденциони број: ТР – 34028, који се финансирају од стране МПНТР РС и партиципаната ПД ТЕ-КО Костолац и MESSER TECHNOGAS AD.

Кључне речи: Хабање, абразија, ерозија, продужетак радног века, вентилациони млин, нумеричка симулација, превлаке отпорне на хабање,

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Технологија материјала – машински материјали,
заваривање и сродни поступци

UDK 669.13:620.178.16
620.193.1
621.791.92/.793

Methodology of increasing reamening working life parts of ventilation mills

ABSTRACT

In recent years implemented significant research, concerning the extension of the life of the working parts of a thermal energy plant. Equipment in thermal power plants exposed to long-term effect of high temperatures and pressure, abrasion and load cycle counting. In these circumstances the exploitation of different causes can lead to damages, the individual components such as the wear and tear of working parts of an air mill. The consequences of the reduction in production capacity and air operations of the mill compared to the projected value, as well as frequent delays due to the replacement of parts, which significantly affects the productivity, profitability and energy efficiency of thermal power plants.

If is detected damage to components, which can lead to disturbances in the plant, in practice there are three possibilities: that it be left in the drive with a regular and frequent control, to carry out a revitalization component or to replace entirely new component. The decision is made on the basis of technical, technological and economic criteria, depending on the possibilities for acquiring new works, replacement rates or revitalization, the possibilities of stopping the plant and aspects of safety and environmental protection.

As part of this doctoral thes is in focus on the analysis of working conditions and create procedures for the extension of the service life of parts of the ventilation mill in thermal power plant Kostolac B, surfacing and metallization processes. More specifically, the subject of this research will be that based on the technical - technological analysis of the work and the state of the components of the ventilation mills, which are predominantly exposed to abrasive and erosive wear, make the selection of the working part, in this case the suction plate and the characterization of the base material.

The first part of the dissertation will focus on the use of modern methods of numerical simulation of multiphase flow in ventilation mill for the purpose of detailed analysis of problems related to the occurrence of abrasion and erosion of the selected component. In this way, using the software package ANSYS FLUENT 12, will get a

more detailed view of multiphase flow and speed of the mixture that enables that based on the intensity and direction of speed, precisely identify critical areas in which will appear the breakdown of the ventilation mill. These zones are typically located in those parts of the mill, which is due to the direction of flow velocity and content of solid particles mixtures (coal, minerals, sand) maximum wear them.

In the second part of the thesis attention will be focused on defining the technologies of application of hard anti-wear coating, which would include: an analytical assessment of weldability of base metal working part, prediction of possible effects of thermal cycles to application of hard coatings on the microstructure and properties of the material layers, selection and defining the process to apply hard coatings, choice of consumables, as well as defining the type and extent of control applied layer. After model testing and selection of coating technology, in order to verify the results obtained and increasing service life of selected components of the ventilation mill shall be functional experiment described in the parts of the anti-wear coatings (layers).

The research in this thesis will allow conquering the technology application of hard anti-wear layers of the working parts of ventilation mills in TE Kostolac B, and the extension of their working life. Research that will cover this doctoral thesis are part of research projects in the field of technological development that: Possibility of optimization work and revitalization of wearing parts of the ventilation mill thermal power plant Drmno -Kostolac "record number TR - 19205, and Research and optimization of technological and functional performance of the ventilation mill power plant Kostolac B, register number: TR - 34028, which are financed by the participants MPNTR RS and PD TE-KO Kostolac and Messer Tehnogas AD.

Key words: Wear, abrasion, erosion, extending remain working life, ventilation mill, numerical simulation, coating resistance to wear

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific subdiscipline: Material technology – mechanical materials, welding and related processes.

UDC 669.13:620.178.16
620.193.1
621.791.92/.793

САДРЖАЈ

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА	1
1.1. Увод	1
1.1.1. Идентификација потребе за наношењем антихабајућих слојева.....	5
1.1.2. Основни параметри о раду термоенергетског постројења термоелектране Костолац Б.....	17
1.1.3. Вентилациони млинови	20
1.1.4. Поступак експерименталних испитивања	25
1.1.4.1. Избор додатног материјала.....	27
1.1.4.2. Поступци наношења антихабајућих превлака	28
1.1.4.3. Плазма поступак	30
1.1.4.4. Детонациони (HVOF) поступак	31
1.1.4.5. Топла метализација са накнадним утапањем.....	33
1.2. Предмет и циљ истраживања	34
1.2.1. Полазне хипотезе.....	40
1.2.2. Методе истраживања	41
1.2.3. Значај истраживања	42
1.3. Научни допринос докторске дисертације.....	43
1.4. Организација истраживања	45
1.5. План истраживања	46
2. ПРЕГЛЕД КОРИШЋЕНЕ ЛИТЕРАТУРЕ	47
2.1. Основе анализе рада и оштећења радних делова у термоенергетским и другим постројењима	47
2.2. Поступци наношења антихабајућих превлака и додатни материјали отпорни на хабање	49
2.3. Примена нумеричке симулације за анализу рада комплексних постројења	52
2.4. Експериментална испитивања превлака отпорних на хабање	55
2.5. Повећање експлоатационог века делова изложених хабању у термоенергетским и другим комплексним постројењима	57

3. НУМЕРИЧКА СИМУЛАЦИЈА	58
3.1. Детаљан опис и тематика у области нумеричке симулације вишефазног струјања у систему вентилациони млин – канал аеросмеше.....	58
3.2. Модели генерисања струјања у софтверу ANSYS FLUENT 12.1	61
3.3. Нумеричка симулација струјања у систему вентилациони млин - канал аеросмеше	64
3.4. Избор мултифазног модела	65
3.4.1. Модел мешавине	66
3.4.1.1. Једначина одржања масе	67
3.4.1.2. Једначина промене количине кретања	67
3.4.1.3. Једначина одржања енергије	68
3.4.1.4. Релативна брзина (брзина клизања) секундарне фазе.....	68
3.4.1.5. Једначина запреминске концентрације за секундарне фазе	69
3.4.1.6. Грануларне особине секундарне фазе	70
3.4.2. Ојлеров модел	70
3.4.2.1. Запреминска концентрација	70
3.4.2.2. Једначина континуитета.....	70
3.4.2.3. Једначина промене количине кретања	71
3.4.2.4. Сила узгона.....	72
3.4.2.5. Сила од придружених маса.....	72
3.4.2.6. Коефицијенти међуфазне размене	73
3.4.2.7. Притисак у чврстој фази	75
3.4.2.8. Смицајни напони у чврстој фази.....	76
3.4.2.9. Једначина одржања енергије	77
3.4.2.10. Турбулентни модели	78
3.4.2.11. $k-\epsilon$ турбулентни модел мешавине	78
3.4.2.12. $k-\epsilon$ турбулентни модел дисперзне фазе	79
3.4.2.13. $k-\epsilon$ турбулентни модел за сваку од фаза.....	81
3.4.2.14. Турбулентни модел Рејнолдсових напона	82
3.5. Резултати нумеричке симулације моделом мешавине у Ојлер-Ојлер приступу.....	84

3.5.1. Запремински и масени протоци фаза и њихове запреминске концентрације	84
3.5.2. Ограничења нумеричке симулације	86
3.5.3. Поступак нумеричког моделирања.....	87
3.5.3.1. Генерисање геометрије	88
3.5.3.2. Генерисање мреже	90
3.5.3.3. Дефинисање општег модела струјања	92
3.5.3.4. Дефинисање мултифазног модела, фаза и њихових интеракција.....	95
3.5.3.5. Дефинисање вискозног модела и модела турбуленције	96
3.5.3.6. Дефинисање граничних услова	96
3.5.3.7. Избор реда тачности нумеричке дискретизације	97
3.5.3.8. Иницијализација струјног поља	98
3.5.3.9. Праћење конвергенције решења	98
3.5.4. Струјне слике.....	99
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА.....	112
4.1. Особине материјала усисних плоча	112
4.1.1. Хемијски састав и механичке особине основног материјала.....	113
4.1.2. Анализа заварљивости	114
4.1.3. Аналитичка оцена заварљивости	115
4.2. Израда узорака за моделна испитивања	127
4.2.1. Плазма поступак (РТА) са додатним материјалом А (Ni-Cr-Bo-Si / 60% WC):.....	128
4.2.2. Хладна метализација суперсоничним поступком (HVOF) са додатним материјалом Б (FeCrCBNiSi)	129
4.2.3. Топла метализација са накнадним утапањем са додатним материјалом В (NiCrBSiFe/ 35% WC)	131
4.2.4. Ручно електролучно заваривање са додатним материјалом Г (Fe- Cr- C- Si)	132
4.2.5. Ручно електролучно наваривање са додатним материјалом Д (Fe- Cr- C- Ti)	133
4.2.6. МИГ/МАГ наваривање (самозаштитна жица) са додатним материјалом Ђ (Fe-Cr-W-B-Nb-Mo-C)	135

4.3. Методе испитивања моделних узорака.....	136
4.3.1. Визуелно испитивање	136
4.3.2. Испитивање течним пенетрантима.....	137
4.3.3. Испитивање хемијског састава	138
4.3.4. Структурно - механичка испитивања.....	138
4.3.4.1. Мерење тврдоће	138
4.3.4.2. Структурна испитивања.....	139
4.4. Резултати испитивања	141
4.4.1. Визуелно испитивање	141
4.4.2. Испитивање течним пенетрантима.....	143
4.4.3. Тврдоћа и макроструктура	145
4.4.3.1. Узорак са антихабајућом превлаком (слојем) од додатног материјала А (Ni-Cr-Bo-Si / 60% WC)	146
4.4.3.2. Узорак са антихабајућим слојем од додатног материјала Б (FeCrCBNiSi).....	147
4.4.3.3. Узорак са антихабајућим слојем од додатног материјала В (NiCrBSiFe/ 35% WC).....	148
4.4.3.4. Узорак са антихабајућим слојем од додатног материјала Г (Fe- Cr- C- Si).....	149
4.4.3.5. Узорак са антихабајућим слојем од додатног материјала Д (Fe- Cr- C- Ti)	151
4.4.3.6. Узорак са антихабајућим слојем од додатног материјала Ђ (Fe-Cr- W-B-Nb-Mo-C).....	152
4.4.4. Микроструктурна и хемијска анализа.....	153
4.4.4.1. Испитивање узорка са антихабајућим слојем од материјала А (NiFeCrBSi/WC).....	153
4.4.4.2. Испитивање узорка са антихабајућим слојем од материјала Б (FeCrCBNiSi).....	156
4.4.4.3. Испитивање узорка са антихабајућим слојем од материјала В (NiWCrCoSiC).....	160
4.4.4.4. Испитивање узорка са антихабајућим слојем од материјала Г (Fe- Cr-C- Si)	164
4.4.4.5. Испитивање узорка са антихабајућим слојем од материјала Д (Fe- Cr-C- Ti).....	167

4.4.4.6. Испитивање узорка са антихабајућим слојем од материјала Ђ	171
(Fe-Cr-W-B-Nb-Mo-C)	171
5. ФУНКЦИОНАЛНА ИСПИТИВАЊА	174
5.1. Припреме за наношење антихабајућих превлака на усисне плоче	174
5.2. Термографска испитивања	175
5.3. Селекција (избор) поступака наношења антихабајућих превлака	178
5.4. Наношење антихабајућих превлака на усисне плоче вентилационог млина	181
5.4.1. Наношење антихабајућих превлака поступцима наваривања	181
5.4.1.1. Наношење антихабајућег слоја са додатним материјалом Г (Fe- Cr- C- Si) - ручно електролучно заваривање обложеном електродом (111) ..	182
5.4.1.2. Наношење антихабајућег слоја са додатним материјалом Ђ (Fe-Cr- W-B-Nb-Mo-C) - Електролучно заваривање самозаштитном пуњеном жицом (114)	184
5.4.2. Наношење антихабајућих превлака поступцима метализације	185
5.4.2.1. Наношење антихабајућег слоја са додатним материјалом А (Ni-Cr- Во-Si / 60% WC) - плазма поступак	185
5.4.2.2. Наношење антихабајућег слоја са додатним материјалом Б (FeCrCBNiSi) - HVOF поступак	187
5.5. Уградња усисних плоча у вентилациони млин	189
5.6. Анализа губитка масе усисних плоча	191
5.7. Анализа губитка геометрије усисних плоча вентилационог млина	195
5.7.1. Анализа усисних плоча са нанесеним антихабајућим материјалом А (Ni-Cr-Во-Si / 60% WC)	196
5.7.2. Анализа усисних плоча са нанесеним антихабајућим материјалом Б (FeCrCBNiSi)	197
5.7.3. Анализа усисних плоча са нанесеним антихабајућим материјалом Г (Fe- Cr-C- Si)	199
5.7.4. Анализа усисних плоча са нанесеним антихабајућим материјалом Ђ (Fe-Cr-W-B-Nb-Mo-C)	201
5.8. Анализа промене очекиваног века трајања усисних плоча	202
5.8.1. Процена века трајања усисних плоча	202
5.8.2. Прорачун века трајања усисних плоча од основног материјала	203

5.8.3. Анализа промене очекиваног века трајања усисних плоча у зависности од карактеристика материјала антихабајућег слоја у односу на основни материјал GS-36Mn5	205
6. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА	210
6.1. Анализа резултата нумеричке симулације	212
6.2. Анализа резултата експерименталних испитивања	216
6.3. Анализа резултата функционалних испитивања	219
7. ЗАКЉУЧАК	222
7.1. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА	222
7.2. ДОПРИНОС НАУЧНОЈ МИСЛИ И ИНЖЕЊЕРСКОЈ ПРАКСИ	223
7.3. ПРЕПОРУКЕ ЗА БУДУЋИ РАД	225
8. ЛИТЕРАТУРА	226
ПРИЛОЗИ:	233
9. БИОГРАФИЈА	234

УПОТРЕБЉАВАНЕ ОЗНАКЕ

E	ручноелектролучно заваривање
МИГ/МАГ	електролучно заваривање топљивом електродном жицом у заштити гаса
ТИГ	електролучно заваривање нетопљивом електродом у заштити инертног гаса
Г	гасно заваривање
ЗУТ	зона утицаја топлоте
ИР	изотермални дијаграми
КХ	дијаграми континуираног хлађења
КХЗ	заваривачки дијаграми континуираног хлађења
I_{α}	интензитет хабања
γ	угао судара
H_d	сушење са директним удувавањем
D	пречник радног кола
w	број обртаја радног кола
Q	укупна тежина
РТА	плазма заваривање
HVOF	хладна метализација суперсоничним поступком
β	основни параметар који директно утиче на интеракцију између фаза
α	запреминска концентрација фазе,
ρ	густина фазе,
индекс d	распршена или секундарна фаза,

индекс c	примарна или носећа фаза.
γ	однос густина фаза
κ	коэффициент
$\frac{L}{d_d}$	процена релативног растојања честица секундарне фазе
\vec{v}_m	средња брзина мешавине
ρ_m	густина мешавине
α_k	запреминска концентрација фазе k
n	број фаза,
\vec{F}	сума запреминских сила осим гравитације, $\vec{F}_{lift,q}$
μ_m	вискозност мешавине
$\vec{v}_{dr,k}$	брзина релативна брзина фазе k
k_{eff}	ефективна проводљивост
\vec{v}_{pq}	брзина клизања
c_k	масена концентрација масе
τ_p	време релаксације честице
d_p	пречник честице секундарне фазе p
\vec{a}	убрзање честице секундарне фазе
$\mu_{s,col}$	смичућа вискозност чврстих честица
α_q	запреминска концентрација фазе q
ВОФ	модел запремине флуида
$\tilde{\tau}_q$	тензор напона за фазу q

\bar{R}_{pq}	сила интеракције између фаза
K_{pq}	коэффициент међуфазне размене количине кретања
$\bar{F}_{lift,q}$	сила узгона
p_s	притисак чврсте фазе s
$K_{ls}=K_{sl}$	коэффициент размене количине кретања између фаза
K_{pq}	општи коэффициент размене количине
f	функција отпора
τ_p	карактеристично време честице
Re	Рејнолдсов број
μ_{rp}	динамичка вискозност мешавине
C_D	коэффициент отпора
a_1, a_2, a_3	константне
d_s	пречник честице фазе s
p_s	притисак у чврстој фази
e_{ss}	коэффициент враћања при судару чврстих честица
$g_{0,ss}$	функција радијалне расподеле
Θ_s	грануларна температура
g_0	функција радијалне расподеле
$\mu_{s,col}$	вискозност услед translације
h_q	специфична енталпија фазе q
\bar{q}_q	топлотни флуks
S_q	обухвата изворе енталпије

Q_{pq}	интензитет размене топлоте између фаза
h_{pq}	коэффициент прелаза топлоте између фаза
N_{u_p}	Nuselt-ов број
Pr	Прантлов број
Π_{k_q} и Π_{ε_q}	утицај дисперзне (распршене) фазе
\bar{U}_q	брзина сразмерна запреминској концентрацији фазе
θ	угао између средње брзине честице и средње релативне брзине
D_p и D_q	коэффициенти дифузије
σ_{pq}	Прантлов број дисперзије
$\bar{\alpha}_c$	запреминска концентрација непрекидне фазе
K_{dc}	коэффициент отпора
$\Pi_{R,ij}$	интеракција турбуленције између континуалне и дисперзне фазе
C_1 и C_2	непознати коэффициенти,
$a_{dc,i}$ и $b_{dc,j}$	релативне брзине,
$R_{dc,ij}$	непозната корелација између брзине флуида
F_D	сила отпора
u	брзина непрекидне фазе,
u_p	брзина делића дискретне фазе,
μ и ρ	молекуларна вискозност и густина непрекидне фазе
ρ_p и d_p	означавају густину и пречник делића дискретне фазе
C_D	коэффициент отпора
u_p, v_p и w_p	пројекције брзине делића на осе

n	Росин-Рамлерова параметар распрострања
e_n	коэффициент враћања
L_e	дужинска скала вртлога
T_{vap}	температура испаравања
m_p	маса честице
c_p	топлотни капацитет честице
A_p	површина омотача честице
T_∞	локална температура непрекидне фазе
h	коэффициент конвективног преношења топлоте
ε_p	емисивност честице
σ	Štefan-Bolcmanova константа
θ_R	температура зрачења
$f_{w,0}$	масени удео материјала
f_{comb}	сагорљиви део честице
\dot{m}_p	масени проток делића дискретне фазе
Δt	временски корак
\bar{m}_p	средња маса делића
ΔT_p	промена температуре делића
\dot{V}_{sr}	средња вредност убрзања
\dot{m}_{sr}	средња количина угља
W_p	садржај влаге у угљеном праху
\dot{m}_{pesak}	средња количина песка
α	запреминска концентрација

\bar{A}	вектор површине усмерен изван запремине V,
Γ_ϕ	коэффициент дифузије за величину \dot{Q} ,
$\nabla\phi$	градијент величине \dot{Q} ,
S_ϕ	извори величине \dot{Q} (по јединици запремине)
N_{fac}	број страница елемента (у овом случају 3),
ϕ_f	вредност величине \dot{Q} која се преноси кроз страницу f
$\rho_f \bar{v}_f \cdot \bar{A}_f$	масени флукс кроз страницу f
\bar{A}_f	вектор у правцу нормале на страницу f
$(\nabla\phi)_n$	пројекција градијента величине \dot{Q} у правцу нормале на страницу
V	запремина елемента
ВМ-КА	вентилациони млин канал аеросмеше
$t_{8/5}$	зависност времена хлађења од 800 до 500 °C
d	пречник електроде
I	јачина струје наношења превлаке
U	напон наношења превлаке
vz	брзина депоновања додатног материјала
vz max	максимална брзина депоновања додатног материјала
Ez	количина унете енергије
Tp	температура предгревања
Tm	температура међупролаза
EDS	енергетско-дисперзиони систем
SEM	скенирајући електронски микроскоп

HV	тврдоћа по Викерсу
N_s	снага судара честица угља са уисном плочом
K_e	коэффицијент ерозивног хабања
V	масени проток угља
D_1	спољашњи пречник ударног кола
ω	угаона брзина обртања радног кола
m	маса честице угља
F_t	средња вредност силе трења
N_t	снага која се утроши на трење
k_a	коэффицијент абразионог хабања
N_u	укупна снага трошења на процес млевења угља
K_h	коэффицијент укупног хабања
\dot{M}_m	маса материјала која се у јединици времена одстрани хабањем
M_u	укупна маса плоче пре процеса хабања
k	степен похабаности
τ	радни век уисних плоча
Q_{0sr}	средње вредности масе плоча пре експлоатације
Q_{1sr}	средње вредности масе плоча после експлоатације
$(Q_{2sr}, Q_{3sr}, R_{sr}, R_{1sr})$	апсолутни и релативни губитак масе сведен на основну масу плоче
M_{sr}	брзина хабања
X_{Zmax} и Y_{Zmax}	димензија похабаности уисних плоча
k_r	коэффицијент радног века

Q_0	основна тежина усисне плоче (сваки сет усисних плоча се састоји од 5 комада и овде је њихова просечна тежина)
Q_1	тежина усисне плоче пре експлоатације (нанесен антихабајући слој)
Q_2	тежина усисне плоче после експлоатације;
Q_3	апсолутни губитак тежине усисне плоче;
R	процентуални губитак тежине;
R_1	процентуални губитак у односу на основну масу усисних плоча.
m	брзина хабања
T_m	продужење радног века, срачунатог као разлика трајања радног века плоча са антихабајућим слојем у односу на основне усисне плоче од констркционог челика, сведена на килограм утрошеног додатног материјала плоча (h/kg)

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

1.1. Увод

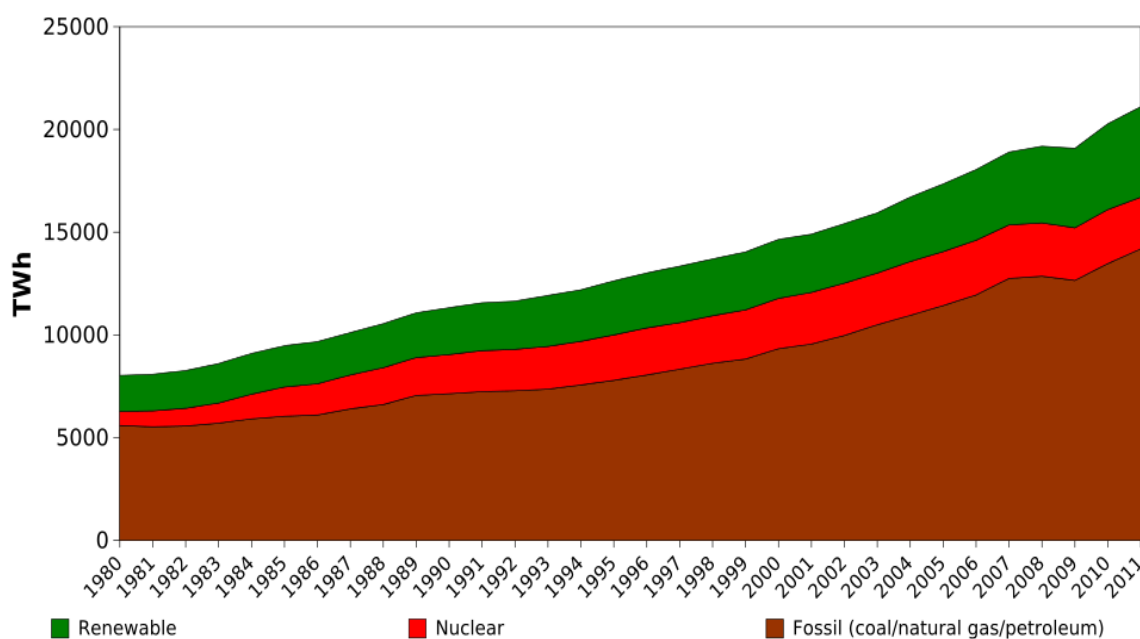
Светске потребе за електричном енергијом су у сталном порасту, имајући у виду стални пораст броја становника и раст привреде. Највећи светски потрошачи електричне енергије су Кина, САД, Русија, Индија, Јапан, Немачка, итд. [1]. Економски неразвијене земље имају најмање потребе за електричном енергијом, насупротив најразвијенијим светским економијама, што наводи на закључак да је стопа раста потрошње електричне енергије у функцији економског развоја земље, као и да привредни раст земље захтева повећање потреба за електричном енергијом [1,6]. Поред тога што Србија бележи мали привредни раст и има индустрију у реструктурирању и изградњи, сваке године бележи раст производње електричне енергије, са већ постојећим капацитетима без изградње нових производних погона [1].

У укупној светској производњи електричне енергије, најзаступљенија је енергија добијена сагоревањем фосилних горива [1,2]. Према подацима Међународне Агенције за Енергетику (ИЕА), удео фосилних горива у производњи електричне енергије износи са 70%, са тенденцијом раста (Слика 1.1.). Процењује се да ће и у наредних 20 година, светске потребе за енергијом бити обезбеђиване највећим делом из експлоатације фосилних горива, и да се тежиште производње електричне енергије пребацује са коришћења нуклеарне енергије, на производњу електричне енергије из фосилних и обновљивим извора енергије, нарочито након акцидента у Јапану 2011 [1]. Како су, према садашњим сазнањима, светске резерве нафте и природног гаса, неупоредиво мање од резерви угља, за које се процењује да ће бити у експлоатацији још најмање 20 година, постаје веома актуелан на глобалном нивоу развој нових и унапређење постојећих технологија коришћења чврстих фосилних горива [1,2].

Нема сумње да је енергетика била и остала област од посебног значаја за читаву економију и друштво. Уколико се енергетика учини стабилним, модерним и квалитетно организованим сектором, извесно је да ће то значити добробит за читаву привреду земље. И обрнуто, уколико се енергетици не посвећује довољно пажње са становишта стратешког планирања, извесне су лоша позиција и слабе перспективе привреде у целини [2]. Највероватнији сценарио глобалног развоја претпоставља економију засновану на ефикасном коришћењу релативно „чисте” и из различитих

извора доступне енергије. Енергетика ће, према свим сценаријима развоја, још релативно дуги период имати задатак да економији и друштву обезбеди значајне количине енергије и енергената, али са тенденцијом смањивања енергетског интензитета, односно потрошње по јединици новчаног производа [1-11] .

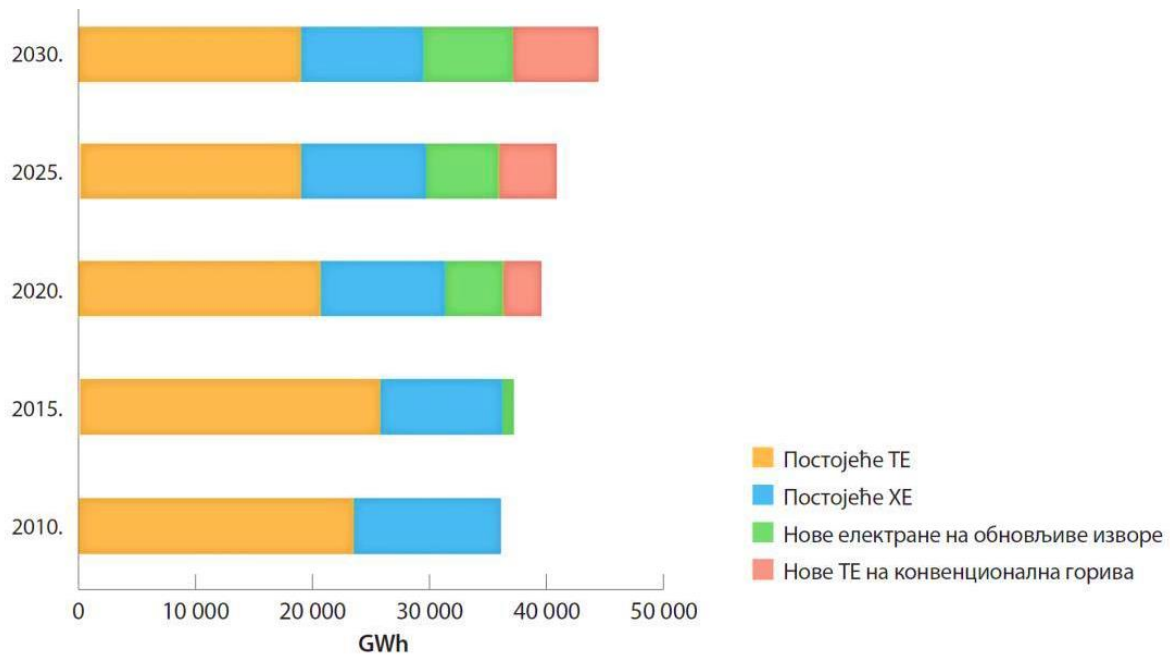
У Републици Србији доминантан вид производње електричне енергије се остварује експлоатацијом лигнита. Истраживања везана за проналажење економичнијег и ефикаснијег коришћења лигнита, могу да имају позитиван ефекат како на локалном, тако и на глобалном плану, имајући у виду да 40% укупних светских резерви угља чини лигнит [1,6].



Слика 1.1. Годишња производња електричне енергије у свету (према врсти примарне енергије) [2]

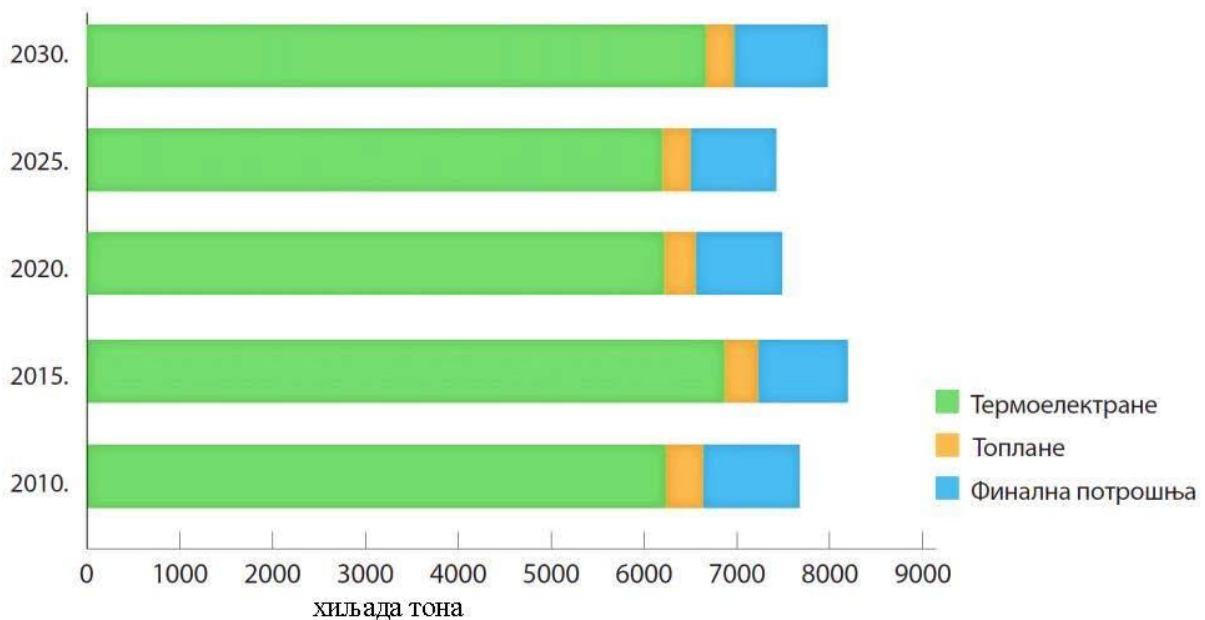
Најзначајнија лежишта угља у Републици Србији су лежишта лигнита (меки мрки угаљ). Геолошке резерве лигнита у односу на геолошке резерве свих врста угља у Републици Србији чине 97%. Експлоатабилне резерве угља са високим степеном истражености, које се по рентабилности деле на класу билансних резерви угља рентабилних за експлоатацију и класу ванбилансних резерви угља које у овом тренутку нису рентабилне за експлоатацију [1,2].

На слици 1.2. дата је пројекција производње електричне енергије из нових и постојећих објеката.



Слика 1.2. Пројекција производње електричне енергије у Србији [1]

С обзиром на предвиђену изградњу нових термоенергетских блокова, у циљу повећања флексибилности електроенергетског система увешће се ефикасне мере за управљање потрошњом, како би се смањила неравномерност дијаграма потрошње и повећало учешће базне енергије у профилу потрошње [1,2].



Слика 1.3. Пројекција примарне потрошње угља [1]

Утврђене и потенцијалне резерве лигнита у Колубарском, Костолачком и осталим басенима су таквог реда величина, да могу у потпуности и дугорочно да

задовоље растуће потребе за сигурним снабдевањем постојећих ревитализованих и нових термоелектрана. На слици 1.3. приказана је потребна количина угља за ту сврху, као и за коришћење у финалној потрошњи и за производњу топлотне енергије [2].

За одржавање рада постојећих и предвиђених, нових термокапацитета потребно је отварање нових површинских копова. Пројекти које је неопходно реализовати да би се обезбедио несметан рад постојећих термоенергетских блокова су у Колубарском басену везани за инвестиције у постојеће копове [2,11].

Ефикасан рад термоелектрана је основа економичности производње електричне енергије на бази сагоревања лигнита. Вентилациони млин као такав је један од основних уређаја у термоелектранама, који својим радом знатно утиче на ниво енергетске ефикасности. Опрема у термоелектранама може бити деценијама у експлоатацији без замене њихових делова. Међутим, поједине металне компоненте су изложене дуготрајном дејству високих температура и притисака, абразији и цикличном оптерећењу [1-11]. У наведеним условима експлоатације различити узроци могу довести до оштећења делова вентилационог млина, лошег млевења угља, заустављања и ремонт истог [9].

Мултидисциплинарна истраживањима у овој области имају за циљ оптимизацију рада вентилационог млина, која се постиже корелацијом технолошког процеса, одржавање радних делова и модернизација истог, користећи при томе најсавременије методе и технике.

Истраживања у оквиру ове дисертације су Мултидисциплинарна и одвијала су се на вентилационом млину Термоелектране Дрмно Костолац, лабораторијама Института Гоша, Технолошког факултета и Машинског факултета у Београду. Истраживања у оквиру ове дисертације изведена су у више међусобно повезаних фаза, чије поједине активности су се одвијале симултано или сукцесивно.

Истраживање могућности оптимизације рада и оптимизације радних делова вентилационог млина термоелектране представља комплексну област, која отвара могућности за опсервацију проблема са различитих аспеката. С обзиром да је основни циљ ове дисертације да доведе до оптимизације рада постројења у оквиру стратегије одрживог развоја, технолошке фазе дисертације формулисане су најпре са аспекта технолошке и економске валоризације [2]. Технолошком анализом широке палете додатних материјала и технологија наношења антихабајућих превлака извршиће се

избор најоптималнијих материјала и технологија, који ће бити употребљени у истраживањима планираним овом дисертацијом.

Предмет истраживања докторске дисертације је веома актуелан, мултидисциплинаран и комплексан, задире у више сфера научне и стручне делатности везаних за решавање проблема у области енергетике и налази се у центру интересовања великог броја истраживача. Све већа потражња за енергијом и стално подизање капацитета производних система електрана погоршава услове рада делова овог система и доводи до скраћења њиховог радног века [9,11]. Сваки, па и најмањи допринос оптимизацији односно продужетку радног века радних делова термоенергетских постројења доводи до подизања поузданости термоенергетских система, великих уштеда, повећања безбедности и очувању животне средине. У доступној литератури, имајући у виду претходно наведено, се не може наћи овакав мултидисциплинарни приступ решавању проблема са различитих аспеката.

У дисертацији је интересовање усмерено на примену најновијих материјала и технологија наношења антихабајућих слојева, који омогућавају продужење и оптимизацију радног века делова вентилационог млина и доприносе повећању поузданости функционисања термоенергетског система. Поред тога, приказана је и употреба нумеричке симулације у анализи мултифазног струјања мешавине (гас, угаљ и минералне материје) и услова рада (хабање и ударна оптерећења) виталних компоненти система вентилациони млин – канал аеросмеше (ВМ-КА). Корелацијом резултата из ових области могуће је дефинисати најоптималније техно – економско решење овог проблема.

1.1.1. Идентификација потребе за наношењем антихабајућих слојева

У свету се последњих година све више изводе значајна истраживања, која се односе на продужење животног века радних делова термоенергетских постројења [9,5]. Комплексност проблема оптимизације рада различитих термоенергетских постројења и система, намеће потребу примене мултидисциплинарних истраживања. Међутим, свака оптимизација енергетског постројења, као што је у овом случају вентилациони млин, представља јединствени прилаз проблема ефикасности рада постројења, и као таква носи много нових захтева и решења. Распоживи подаци показују да у свету, а поготову у нашој земљи, није изведен овакав приступ проблему

оптимизације рада постројења као што је вентилациони млин, као и последицама које из тога произилазе.

Решавање проблема продужења животног века радних делова наметнуло је потребу интензивних истраживања на освајању и верификацији техно – економске ефикасности нових и усавршавању постојећих технологија наношења антихабајућих превлака. Међутим, у до сада објављеним радовима из области наношења превлака, нису увек дати детаљни квантитативни подаци о технологији као и правцима даљих истраживања, а све у циљу заштите од конкуренције [5,6]. Са друге стране широка је палета додатних материјала, као параметара процеса који нису у потпуности истражени, тако да би резултати истраживања ове докторске дисертације омогућили развијање методологије и приступа решавању оваквих проблема [5,6]. Резултати дају значајни допринос у освајању поступака продужења животног века радних компоненти и оптимизацији рада постројења у области енергетике, као и проширивању знања и бољем разумевању процеса и феномена истих. Активности обухваћене овом дисертацијом, без обзира на њихов велики техно – економски значај, нису била обухваћена досадашњим истраживањима и ово би било једно од првих озбиљнијих и систематски спроведених истраживања.

Својства површинских слојева различитих машинских делова и алата веома често одређују њихову вредност јер она пресудно утичу на трајност у експлоатацији а тиме и на економичност примене [5,12]. Из тог разлога посвећује се све већа пажња заштити површина тих делова различитим технологијама заштите. У индустријски развијеним земљама, последњих година заштита површина се означава као кључна технологија, јер од њене примене увелико зависи квалитет производа односно машине. Развој технологија заштите површина је веома интензиван и повезан је са развојем технике на многим основним подручјима науке и технологије [6-12]. Због брзог развоја, повећава се јаз између научног истраживања и развоја у односу на примену у индустрији, посебно у малим предузећима, у којима не постоје развојни сектори, није могуће пратити тако интензиван развој. Свесни те чињенице, индустријски развијене земље Европске уније организовано подупиру пренос знања на подручју примене нових технологија заштите (заштитних слојева) [1-6]. У тим се земљама, уз помоћ влада, спроводе се програми допунског образовања и истраживања, а један од тих је и заштита делова машина наношењем антихабајућих (заштитних) слојева и других начина продужења радног века истих.

Поузданост и одговарајући радни век термоенергетских компоненти се обезбеђује применом савремених технологија и метода контроле при њиховој изради. Избором одговарајућег материјала, непосредно се утиче на ефикасност рада постројења као и на радни век истог [10].

Екстремни радни услови (хабање и циклична оптерећења) су само нека од искушења у којима функционишу данашњи термоенергетских системи. Услед неадекватне експлоатације, на коју значајно утичу улазни параметри (све лошији квалитет угља и све већи захтеви за енергијом) снижава се радни век машина. Тенденције развоја нових машина данас, базиране су на високој продуктивности, условљавајући тако значајан пораст: оптерећења, брзина и радних температура [6]. Као последице тога јављају се проблеми са повећаним хабањем, корозијом, неуравнотеженошћу, вибрацијама и коначно ломом.

У циљу заштите материјала од хабања данас се примењују различите методе. Битан фактор на издржљивост и радни век свих машина и материјала је процес хабања, као неизбежан процес разарања и одношења материјала који проузрокује велике штете, и велике губитке у индустријским постројењима [5-9]. Данас постоји широка палета савремених поступака заштите материјала, наношењем различитих типова антихабајућих превлака. Предузећа тиме постижу огромне уштеде које су употребљене за њен развој и модернизацију.

Тенденција развоја термоенергетских постројења креће се у правцу усвајања нових рационалних радних елемената и делова, праве се комбинације пасивних и активних радних елемената различитог облика и геометрије, као и оптимизација геометријских и енергетских параметара и развоја нових техничких решења. Сегменти развоја неког постројења се више не посматрају одвојено или појединачно већ комплексно у концепту развоја и унапређења комплетних постројења [2-10].

Животни век радних делова термоенергетских постројења је битан фактор у производњи електричне енергије. Током година чињени су значајни напори за повећање отпорности на хабање и радног века коришћењем различитих технолошких поступака [5]. У правцу примене квалитетнијих материјала као и адекватне термичке обраде, и у смеру примене различитих поступака модификације и пресвлачења површина у циљу повећања трајности. Површински слојеви се разликују од третираног основног материјала у погледу хемијског састава, микроструктуре, кристалне решетке и осталих физичких и хемијских карактеристика које резултирају различитим својствима у експлоатацији.

Потреба за наношењем превлака може се јавити и код израде нових компоненти, као што је случај код уклањања и поправке површинских и мањих грешака код одливака [5-12].

Карактеристичне компоненте које морају да буду под надзором и које могу да изазову поремећај у раду вентилационог млина су пре свега радно коло, носне и обложне плоче. Ове компоненте су услед дуготрајног рада изложене оштећењима изазваним хабањем, а највише дејством абразије, чији интензитет нагло расте на повишеним температурама [1010].

Повећање радног века делова наношењем антихабајућих слојева (превлака) је веома комплексан процес. Потребно је сагледати утицај више параметра, од стања саме компоненте до расположиве опреме за наношење антихабајућих слојева. Поред тога, неопходна је и техно-економска анализа примене одговарајућих технологија. Новије тенденције у индустрији су израда делова: где је то могуће, од стандардних конструкционих челика и наношење одговарајућих превлака на радне површине у циљу повећања радног века [5-9] .

Одлука о погодности и могућности наношења заштитног слоја (превлаке) на неку компоненту условљена је следећим факторима [11-14]:

- полазним испитивањима којима се констатује ниво оптерећења и оштећења као и дефинисање величине и положаја истих;
- одређивањем узрока који је довео до оштећења;
- предвиђањем могућег радног века;
- проценом времена потребног за поступак наношење превлаке;
- економским разматрањима заснованим на потреби заустављања постројења, могућности замене новим делом и разматрања могућности преправке са становишта оспособљености службе одржавања и изводљивости поступка;
- разматрањем могућности пројектовања технологије наношења превлака са или без предгревања и термичке обраде након завршетка;
- избором оптималне процедуре узимајући у обзир локалне услове;
- дефинисањем технологије наношења, избором додатног материјала, извођењем наношења заштитних слојева и испитивањем квалитета изведених радова;
- дефинисањем контролних периода.

Хабање, односно непожељно и прогресивно одстрањивање материјала са површина елемената и делова машина који су у међусобном деловању и релативном кретању, последица је истовременог деловања више процеса као што су механички, термички, хемијски и електрохемијски процеси. Основни механизми који доводе до хабања и који дефинишу већину основних врста хабања су: адхезија, абразија, замор материјала и хемијски процеси на површинама [12-15]. У највећем броју случајева хабање површина је последица комбинованог деловања различитих механизма [12]. При анализи процеса хабања процењују се пре свега они фактори који су у постојећим радним условима доминантни, а то су: врста и карактеристике основног и спрегнутог материјала, квалитет и карактеристике контактних површина радних делова, карактеристике раздвајајуће материје уколико она постоји, радни услови (оптерећење, брзине, температуре итд.), карактеристике продуката хабања и др. [4-8, 16].

У случају вентилационог млина претпоставља се присуство абразивног и ерозионог хабања при повишеним температурама. На слици 1.4. од а) до в), приказан је изглед оштећених радних елемената вентилационог млина. На основу расположивих података абразионо хабање обухвата приближно половину свих врста хабања, односно преко 50% свих оштећења услед хабања је изазвано абразијом [13-15]. Експериментална истраживања указују на линеарну зависност отпорности на абразионо хабање и механичких особина материјала. Тачније, на основу механичких особина, пре свега тврдоће, може се предвидети понашање метала у условима хабања. Дубина продирања честица абразива високе тврдоће обрнуто је сразмерна тврдоћи површинских слојева [11,12]. Међутим, тврдоћа није једина карактеристика који утиче на отпорност на абразивно хабање и хабање уопште. Параметри који поред тврдоће утичу на отпорност на абразионо хабање су и структура, односно облик, величина и расподела микроконституената у нанесеном слоју. Микроструктурне компоненте, сразмерно својој тврдоћи, релативном уделу и расподели, утичу на ниво отпорности на хабање [17]. Досадашњи резултати су показали да је чисто мартензитна структура са мањом тврдоћом отпорнија на абразивно хабање од мартензитно – карбидне структуре [17-19].

Испитивања су показала да и смањење удела мартензитна у корист повећања заосталог аустенита у мартензитно – карбидној структури, повећава отпорност на хабање исте без обзира на пад тврдоће [18]. Ово указује да аустенитно – карбидна структура има знатно већу отпорност на хабање и поред веће тврдоће мартензитно – карбидне структуре [19-22]. Већа кохезиона чврстоћа аустенитно карбидних фаза је

последица мање разлике њихових параметара решетке. Наведено својство утиче да абразивне честице лакше чупају карбиде из мартензитне него из аустенитне матрице [23].



а)



б)



в)

Слика 1.4. Изглед похабаних радних делова вентилационог млина

На основу досадашњих истраживања може се констатовати да на интензитет абразивног хабања утичу следећи фактори: природа и карактеристике абразива, агресивност радне средине, радна брзина и оптерећење, као и карактеристике материјала радних делова, односно њихових контактних површина [21]. Поред тога, интензитет абразивног хабања расте са повећањем температуре изнад неке критичне

вредности [24]. На основу претходно наведених параметара врши се избор додатних материјала за израду антихабајућих слојева различитим поступцима.

Избор додатног материјала за наношење превлака је комплекснији у односу на избор материјала за заваривање или неки други поступак спајања материјала. Ово је, пре свега, последица тежње да у случају избора додатног материјала за заваривање, метал шава буде што сличнији, по својим својствима основном металу. Насупрот томе, код избора додатних материјала за наношење превлака, основни циљ је да се добије нанети слој који ће имати потребну отпорност према присутној доминантној врсти хабања.

Класичне процедуре наношења превлака, у које свакако спада наваривање аустенитно-манганским електродама, развијене су на основу тумачења различитих параметара наваривања, између осталог и утицаја предгревања и термичке обраде после наваривања, на понашање материјала који се заварује. У литератури, поготову светској, присутан је велики број података, који је заснован на практичним искуствима. У овим случајевима, дефинисане су препоруке или спецификације, које се између осталог односе и на термичку обраду пре и после наваривања, као и на међупролазну температуру [14-19]. Поред тога, у спецификацијама су дате и температуре и времена потребна за термичку обраду после наваривања у циљу уклањања заосталих напона, отпуштања микроструктуре у зони утицаја топлоте и металу навара. У домаћој литератури, у много мањем обиму, могу да се нађу подаци о конвенционалним поступцима наваривања [8,10,17]. Међутим, и поред присутних података, мора се увек имати у виду да је наношење превлака јединствени процес с обзиром на различитост услова експлоатације и технологија које су прилагођене конкретном делу.

Додатни материјали за наношење превлака се производе у свим облицима и шире од тога, у облицима обложених електрода, пуњених жица, шипки и трака, синтерованих шипки и металних прахова, пуних жица, шипки и трака и ливених шипки. Наведени облици и технологија израде додатних материјала условљена је најчешће комплексношћу легирања [22].

У области отпорности на абразију, развијене су или су у развоју технологије наношења антихабајућих превлака, које користе додатне материјале комплексно легиране са Cr, Mo, Nb, W, V, Ti, B, Co и другим елементима [7]. У изради неких додатних материјала користе се и нано технологије. Код извесног броја додатних материјала није познат потпун хемијски састав са циљем заштите од конкуренције.

Поред тога, за разлику од класичних технологија, при примени неких додатних материјала се не користи термичка обрада пре и после наношења. Ово свакако, поред цене наношења утиче и на могућност извођења самог процеса, које је често ограничено извођењем термичке обраде пре и после наношења [7-18,20-24]. Практичне предности се огледају у већој оперативности и једноставнијем извођењу процеса са мањим обимом испитивања у току наношења наваривањем. Међутим, пре примене ових материјала у експлоатационим условима, ипак је потребно извршити пробна наваривања у циљу провере препорука.

Једна група додатних материјала за превлаке отпорне на абразију су легуре на бази Fe и Ni, које садрже следеће елементе: C% 0.2 – 7.5; Cr% 5 – 40; Ni% \leq 4 или без Ni; Mn% \leq 4 или без Mn; Mo% \leq 9 или без Mo; W% \leq 9 или без W; V% \leq 10 или без V; Nb% \leq 10 или без Nb и други. Друга група додатних материјала су такозвани тврди метали, односно композити са матрицом на основи Fe и Ni и честицама WC различитог облика и величине [21].

За услове интензивног хабања, поред класичних метода: ручно електролучно заваривање (E), електролучно заваривање топљивом електродном жицом у заштити гаса (МИГ/МАГ), Електролучно заваривање нетопљивом електродом у заштити инертног гаса (ТИГ) и Гасно заваривање (Г), примењује се и плазма поступак наношења композита у облику праха, који се у стубу плазме топи на основном материјалу, стварајући металуршку везу са њом. Мали степен мешања (\leq 10%) омогућава да нанети слој постигне задовољавајућу отпорност на хабање у једном пролазу. У неким случајевима на овај начин би се постигла већа економичност у поређењу са ручним електролучним поступком, где је потребно и до три пролаза у циљу уклањања лошег утицаја мешања [17-21]. Додатни материјал је композит са металном матрицом на бази никла (састава NiBSi и NiCrBSi), сферичног или игличастог облика и различитим запреминским уделом и величином карбида W, типа еутектичког (W_2C -WC) или макрокристалног (WC) [21]. Испитивања на абразију показују знатно већи индекс код композита са макрокристалима карбида него код еутектичког. Међутим, у присуству удара при експлоатацији, карбиди сферичног облика показују већу трајност. И поред више цене у односу на класичне поступке и додатне материјале, овај поступак ће налазити све већу примену, првенствено због дужег радног века делова [17,21].

Код система и постројења где се траже што мањи отпори трења најчешће се на основни материјал од кога су направљене компоненте, наносе слојеви од: хрома

манганског челика, хромних челика, хром- никл челика, молибдена, белог метала који се користи за лежишта, легуре калаја, керамике.

Такође, при изради слојева отпорних на корозију неопходно је да буду отпорни на оксидацију под утицајем ваздуха и воде и отпорни на различите хемикалије. За отпорност на оксидацију се користе: цинк, алуминијум, бакар, кадмијум, калај, хром, никл, злато, сребро и платина. За отпорност на хемикалије користе се: хром-никл челици, керамика, олово, пластичне масе и егзотермне смеше.

На основу приказаних расположивих резултата у задњих неколико година све интензивније се у свету ради на освајању и провери нових технологија наношења превлака. Очекује се да ће наредне године донети нове технологије, не само са техничко – технолошког аспекта већ и са економског [4-9].

Расположиви подаци показују да, у нашој земљи оптимизација наношењем антихабајућих превлака тек у последњих неколико година у појединим областима (грађевинарство, рударство) налази своју примену као и настојања да се изведу детаљнија научна истраживања у овој области [4,5].

Избор технологије наношења антихабајућих превлака подразумева претходно познавање облика и димензија радног комада, хемијског састава и структурно – механичких особина материјала, поступка наваривања и особина додатног материјала. У односу на заваривање, наношење превлака се изводи под условима који омогућавају постизање што мањег степена мешања са циљем да се у што већој мери очувају особине метала навара, које се углавном, значајно разликују од основног материјала.

Основни принципи наношења превлака су директна последица разумевања металуршких феномена и понашања микроструктуре у нанесеном слоју, посебно у зони под утицајем топлоте (ЗУТ), и претходних десетак година су предмет истраживања у свету а задњих неколико година и код нас [22-24].

Проучавање основних принципа различитих начина наношења металних слојева отпорних на хабање заснива се на анализи једноставног наношења антихабајућег слоја, неким од поступака наношења на основни метал [20-22]. Топлота нанесеног слоја узрокује појаву температурног градијента у основном материјалу. При хлађењу се формирају квази равнотежне структуре, које могу да се предвиде применом изотермалних (ИР) дијаграма, или прецизније, дијаграмима континуираног хлађења (КХ) и заваривачким дијаграмима континуираног хлађења (КХЗ) за основни материјал. Слика расподеле температуре у навареном споју може се добити решавањем једначина топлотног биланса. На тај начин се може добити термална

историја сваке тачке у зони утицаја топлоте (ЗУТ) основног материјала као и у нанетом металу. Решавање парцијалних диференцијалних једначина преноса топлоте у навареном споју може бити изражено аналитичким решењима Розенталових и Рикалинових једначина преноса топлоте. Ова решења могу се знатно прецизније добити нумеричким прорачунима било методом коначних елемената или коначних разлика [21-24].

Међутим, комплекснија слика стања метала се јавља у реалним условима наношења антихабајућих слојева са два или више пролаза. У том случају, следећи нанесени слојеви стварају нова термална поља која утичу како на дати нанесени слој, тако и на претходне [22]. На основу овако добијених података може се предвидети температурна историја нанесеног слоја, односно могуће је анализирати и претпоставити ефекте на микроструктуру а тиме и на својства [21-24]. Овај начин анализе топлотног биланса споја омогућава да се уместо унете енергије извора топлоте анализира унос топлоте по јединици дужине нанесеног слоја, који директно утиче на дубину пенетрације изотерми у току наношења слоја. Избором одговарајућих параметара наношења антихабајућих слојева, код сваког нанесеног слоја омогућава се контролисано загревање ЗУТ-а и метала сваког нанесеног слоја, чиме се омогућава контролисана термичка обрада [8-11]. Ако параметрима наношења антихабајућих превлака није омогућен претходни услов, потребно је брушење претходних слојева и поновно контролисано наваривање.

Претходно приказане теоријске основе, омогућиле су развој практично применљивих поступака и технологија наношења антихабајућих слојева уз контролисани унос топлоте, брзине загревања и поступка наношења, које су са своје стране омогућиле добијање нанетих слојева одговарајућих особина, као што је отпорност на хабање.

За процес припреме угља најважније су његове генетске, петролошке, минералне и неке механичке особине. То су, пре свега, садржај воде и минералних материја у радном гориву, мељивост угља, абразивност, као и његов сортиман. Оне поред правилног избора типа млина и његовог капацитета млевења, битно утичу на процес млевења и сушења као и на процес хабања његових радних елемената [4, 8].

Минералне материје представљају баласт у гориву, јер њихово присуство смањује садржај сагоривих састојака горива, смањујући тако и његову топлотну моћ, због чега се повећавају трошкови његове прераде. Приликом припреме угља за сагоревање у лету, оне отежавају процес млевења, интензивирају процес хабања

радних елемената постројења и погоршавају услове паљења угљевог праха у ложишту. После сагоревања, пепео настао од минералних материја може да изазове зашљакавање грејних површина, као и шљаковање угља у слоју на решетки за догоревање [2-5]. Честице летећег пепела ношене димним гасовима абразивно делују на материјал грејних површина, смањујући век њиховог трајања. Поред тога, минералне материје повећавају трошкове одржавања и скраћују век трајања постројења у целини [5].

Код домаћих угљева, садржај минералних материја у радном гориву мења се у широким границама. За лигните од 7-20 %, за мрке угљеве од 7-37 %, а за камене, у зависности од порекла, од 7-39 % [5]. Пошто се у термоелектрани Костолац Б користи као радно гориво лигнит са великим процентом минералних материја, нама су интересантне његове карактеристике.

С обзиром на период у коме су доспеле у гориво минералне материје се могу поделити па примарне, секундарне и терцијерне.

Примарне минералне материје потичу из праматерије од које је гориво настало. То су углавном соли алкалних и земноалкалних метала - калијума, калцијума, натријума и магнезијума. Ове материје су прилично равномерно распоређене у гориву и не могу се процесима оплемењавања из њега одстранити, због чега се често називају и везане минералне материје [5].

Секундарне су доспеле у гориво у периоду трансформације праматерије и током тектонских поремећаја слојева у којима се налазило гориво.

Терцијалне минералне материје су у гориво доспеле током његове експлоатације и транспорта. То су најчешће грубе механичке нечистоће које се процесима оплемењивања могу одстранити [4,5].

Испитивањима је утврђено да се у гориву око 95 % минералних материја састоји од силиката (у основи од алуминосиликата - глина и шкриљци), сулфида (преовлађује сулфид гвожђа - пирит), као и карбоната калцијума, магнезијума и донекле гвожђа [4].

У процесу сагоревања, минералне материје из горива трпе низ сложених трансформација, разлажу се и делимично оксидишу стварају пепео, који се квалитативно и квантитативно разликује од почетне материје. Пепео представља збир оксида настао од минералних материја [5].

Абразивност угља, поред физичких својстава, зависи од његове тврдоће и чврстоће, састава минералних материја, димензија и облика честица угља (округле,

коцкасте, оштрих ивица), присуства различитих примеса које повећавају или смањују његову абразивност (пирита, песка, глине) итд. Она интензивира процесе хабања, како радних елемената млина, тако и осталих уређаја и опреме у склопу постројења за припрему угљеног праха [5].

У оквиру постројења за припрему угљеног праха одвија се низ процеса који се не могу посматрати независно један од другог. То су млевење угља у ударном колу млина, затим млевење угљеног праха иза ударног кола, сушење угља у млину и млинском тракту као и хабање радних елемената вентилаторског млина и његовог кућишта [5].

Приликом процеса млевења угља потребно је утрошити одговарајућу енергију како би се савладале кохезионе силе унутар честице, између њених кристала, као и кохезионе силе унутар самих кристала које су веће. Разликује се неколико основних начина дејства силе на честицу која се меље: гњечење, сечење, удар и трење [5].

Енергија која се у млиновима користи за ситњене угљене масе доводи се истовремено на неколико начина. У вентилационим млиновима, који се користе за млевење угља, доминантан механизам млевења је удар и трење.

Деструкција комада угља, на почетку процеса млевења, врши се прво на њиховим најслабијим местима, због чега су самлевене честице чвршће и то је један од главних разлога због кога се fine честице теже мељу [5].

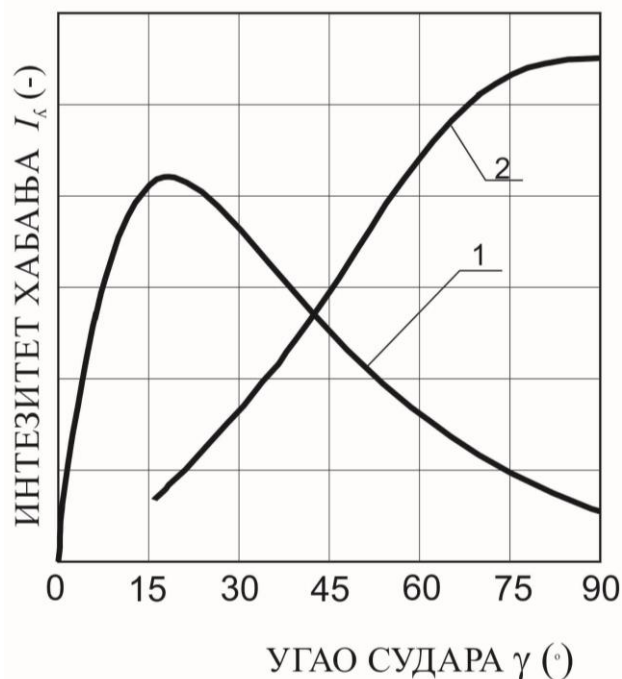
При млевењу угља у вентилационим млиновима долази до интензивног хабања првенствено ударних плоча радног кола и препрека у заколу, а затим других делова млина као што су његово кућиште, основни диск ударног кола, усисне плоче и тд. Процес хабања зависи од већег броја фактора, који се односе на: квалитет радног горива (угља), на геометрију млина и материјал од кога су израђени његови витални делови које није могуће у потпуности обухватити и утврдити њихову међусобну зависност [5].

Ерозивно хабање, у овом случају усисних плоча вентилационог млина, настаје сударом честица сировог угља на чеоне површине усисне плоче на одређеном растојању. Ово растојање је релативно мало због већег броја усисних плоча и велике обимне брзине којом честице угља ударају у усисне плоче. Код похабаних усисних плоча јасно је изражена површина на којој се дешавају судари и обрнуто је сразмерна повећању обимне брзине.

Интезитет хабања услед ерозије зависи од: угла под којим се честице угљене мешавине сударају са чеоним површинама усисних плоча, кинетичке енергије судара и својстава самог материјала слика 1.5.

За жилаве материјале је највеће ерозивно хабање када је угао судара око 20° , док је за крте материјале ово хабање највеће ако честице ударају о плочу под правим углом [4,12].

Смањење хабања усисних плоча насталог ерозијом може се, код вентилационих млинова, остварити смањењем брзине кретања честица, избором адекватних материјала од којих се израђују радни делови млина, наношењем антихабајућих слојева на радне делове. При томе се мора водити рачуна о углу судара честица и радних површина, као и одстрањивањем чврстих честица из радног флуида што повољно утиче на абразивно хабање. Са повећањем пречника радног кола вентилационог млина смањује се поред ерозивног и учешће абразивног хабања радних делова млина [2,4].



Слика 1.5. Интезитет ерозивног хабања, 1- жилави материјали, 2- крти материјали [4]

1.1.2. Основни параметри о раду термоенергетског постројења термоелектране Костолац Б

Као што је већ речено, опрема термоенергетских постројења може бити деценијама у експлоатацији без замене основних агрегата и њихових делова. На слици

1.6 приказан је изглед вентилационог млина [2-6,12]. Међутим, њихове поједине металне компоненте су изложене дуготрајном дејству високих температура и притисака, абразији и цикличном оптерећењу. У наведеним условима експлоатације, различити узроци могу довести до оштећења као што су: хабање, пузање материјала, нискоциклични термални замор, појава кртости, омекшавање и сферодизација. Ломови металних делова могу проузроковати знатна оштећења и застој у раду енергетских постројења [8-10]. Поједине компоненте у термоенергетским системима су више изложене оштећењима у односу на друге, што захтева континуирану контролу и испитивања при одржавању. Уколико се констатује оштећење компоненте које може довести до поремећаја у раду постројења, у пракси постоје три могућности: да се компонента остави у погону уз редовну и чешћу контролу, да се изврши пресвлачење постојеће компоненте одговарајућом превлаком и врати у експлоатацију или да се замени потпуно новом компонентом [5]. Одлука се доноси на основу техничких, технолошких и економских критеријума у зависности од могућности набавке новог дела, цене замене, наношења антихабајућих превлака на већ постојеће делове, наношења превлака одговарајућих особина на делове који су урађени од јефтинијих материјала, могућности заустављања постројења и аспеката сигурности и заштите околине [4-7].



а)



б)

Слика 1.6. Изглед кућишта вентилационог млина [5]

Потреба за већим топлотним капацитетом термоенергетских постројења, нарочито оних који се користе у Термоелектрани Костолац Б, да би се обезбедила одговарајућа енергетска моћ потребно је да дође до сагоревања угља у праху. Да би угљени прах могао да сагори потребно је са се образује одговарајућа смеша горива (угља) и ваздуха. Да би дошло до формирања ове смеше неопходно је направити угљену прашину, а за то су потребни вентилациони млинови [2,4].

Вентилациони млин (слика 1.6.) је једно од основних постројења у термоенергетском систему који својим радом знатно утиче на ниво енергетске ефикасности. Радни делови овог уређаја у току експлоатације доминантно су изложени интензивном абразивном хабању и ударним оптерећењима при повишеној температури, која могу довести до оштећења и ломова хомогених материјала, а тиме и до скраћења њиховог радног века [4-8]. Последице су смањење производног капацитета и вентилационог дејства млина у односу на пројектовану вредност, као и чести застоји због замене делова, што значајно утиче на продуктивност, економичност и енергетску ефикасност енергетског система. Због хабања радних делова долази до погоршања заптивености млина, што узрокује поремећај процеса усисавања и смањење ефикасности рада млина [10].

Оптимизација процеса рада постројења, у овом случају вентилационог млина, се постиже неизбежном корелацијом технолошког процеса и стања радних делова. Одступања од захтеваних параметара рада може увелико бити и последица оштећења радних делова, на шта указује величина интервала вентилационог дејства млина. Нумеричка симулација вишефазног струјања, на основу расположивих параметара, може указати на начин оштећења компоненти система и олакшати уклањање узрока. Оптимизација ових компоненти наношењем антихабајућих превлака, све више се примењује на енергетским постројењима [4-11]. Обзиром да значај оптимизације наношењем антихабајућих превлака у одржавању термоенергетских постројења постаје све већи, освајају се поред поступака и нови додатни материјали, који својим структурно-механичким својствима омогућавају дужи радни век делова изложених хабању. Коначни циљ савремених технологија наношења превлака је да животни век неке компоненте, односно одговарајућег материјала од којег је израђена, буде бар једнак или дужи од предвиђеног, односно да се реално могу дефинисати периоди редовне контроле [7].

1.1.3. Вентилациони млинови

Вентилациони млинови, као постројења за припрему угљеног праха, посебно су конструисани за млевење угљева са високим садржајем влаге и примењују се од средине тридесетих година прошлог века. По конструкцији, ови млинови су веома слични радијалним вентилаторима али са знатно ојачаним елементима који учествују у процесу млевења [1-5]. Примењују се за млевење свих врста угљева и производе се у две основне варијанте: млинови за суве и млинови за влажне угљеве. Основна разлика између ових типова млинова је у облику кућишта, конструкције сепаратора угљеног праха и каналима за довод угља и одвод аеросмеше. Вентилаторски млинови који су погодни за млевење влажних угљева, као што су лигнити и мрколигнитски угљеви, најчешће се користе у домаћим термоенергетским постројењима [1-3]. Ови млинови поред припреме угљеног праха, имају велико вентилационо дејство и могућност рада са загрејаним флуидима, односно способност интензивног сушења угљеног праха. Сушење се, по правилу, врши мешавином врелих продуката сагоревања који се одузимају са врха ложишта и загрејаног ваздуха, чиме се спречава могућност појаве експлозије у млинском тракту чак и при високим температурама аеросмеше, које се захтевају при дубоком сушењу угљеног праха [5-7].

Од свих развијених система вентилационих млинова за припрему угљеног праха, као најефикаснији се издвојио индивидуални систем са сушењем у самом млину и директним удубавањем сушеног праха и гасовитих продуката сушења у ложиште парног котла [13-17].

У систему за припрему угљеног праха у процесу сушења, у зависности од карактеристика коришћеног угља, најчешће се примењују врели гасовити продукти сагоревања одузети са краја котловског ложишта. Ово одузимање се врши кроз рециркулациони вод, у који се, на одређеној висини, убацује угаљ, тако да се извешан проценат влаге одстрани још у овом делу [4,7]. Угаљ затим пада у млин, меље се и истовремено суши, а након пролаза кроз млински сепаратор, у коме се издвајају крупније честице угља које се поново враћају у млин, заједно са гасовитим продуктима сушења удубава у ложиште. Температура рециркулисаних гасова се, по потреби, може регулисати топлим или хладним ваздухом, као и хладним гасовима рециркулисаним са краја парног котла. Основни недостатак овог система је тај што се млинским сушењем у затвореном систему (процесу) не повећава топлотна моћ горива. Међутим,

ендотермни процес сушења се на овај начин пребацује из ложишта у млин, тако да се олакшава паљење и сагоревање угљеног праха [6-8].

Област примене млинског сушења са директним удувавањем односи се на висококалоричне лигните ($H_d > 10000 \text{ kJ/kg}$) и делом на нормалне лигните ($H_d = 6000 \div 10000 \text{ kJ/kg}$). Лигнити са доњом топлотном моћи око 6000 kJ/kg , повећаног садржаја влаге и лигнити са већом доњом топлотном моћи, који имају велики проценат волатила са високом температуром њиховог испаравања, без обзира да ли у баласту преовлађује влага или минералне материје, не могу успешно да сагоревају по описаном систему [4-8]. Због оваквих карактеристика они имају успорено паљење, услед чега је и процес сагоревања нестабилан. Да би се омогућило несметано сагоревање оваквих угљева, струја аеросмеше се раздваја на два дела и удувава непосредно у ложиште, али на различитим висинама. Тачније, мешавина угљеног праха и отпарака после млина не удувава се директно у ложиште, већ се посредством раздвајача аеросмеше (жалузине или центрифугални сепаратор) дели на две струје. Центрифугалним дејством раздвајача из заједничке струје се издвајају честице угља веће масе, које се са једним делом отпарака одводе у доњи део ложишта, у тзв. примарну или основну зону преко примарних (основних, главних) горионика [4,18].

У вентилационом млину се целокупна маса угља, укључујући и недовољно самлевени угаљ који се из сепаратора враћа на поновно мљење, као и честице метала које настају хабањем радних елемената млина, сударају са ударним лопатицама и усисним плочама и клизе по њима, чиме се у знатној мери повећава њихово хабање и специфична потрошња електричне енергије за мљење угља [4]. Осим тога, у рециркулисаним продуктима сагоревања се налазе честице пепела, које су по својим својствима абразивније од сировог угља, односно минералних материја које се налазе у њему [4,8-10].

У Термоелектрани Костолац Б, припрема угљеног праха се врши у млинском постројењу које се састоји од система млинова и пратећих система и елемената слика 1.7. (шематски приказ). Основно гориво је лигнит са површинског копа "Дрмно" са карактеристикама датим у Табели 1.1. Систем млинова обухвата 8 вентилационих млинова (по једном блоку) типа ЕВТ Н 270.45 са номиналним капацитетом од 76 t/h угља [7].

Табела 1.1. Основне карактеристике лигнита [5].

Основне карактеристике лигнита са копа "Дрмно"	Гарантована вредност	Граничне вредности
Доња топлотна моћ, kJ/kg	7330	6500 - 8370
Садржај влаге, %	43.9	43 - 44
Садржај пепела, %	22.2	18.4 – 25.8
Садржај сумпора, %	1.2	1.1 – 1.2

Техничке карактеристике вентилационог млина су:

- пречник радног кола: $D=3600$ mm;
- број обртаја кола у интервалу од 420 – 500 o/min., просечни број обртаја $w = 480$ o/min.

Обложне плоче:

- материјал - S235JRG2;
- димензије - 1055 x 120 x 30 mm; унутрашњи део кућишта је обложен овим плочама.

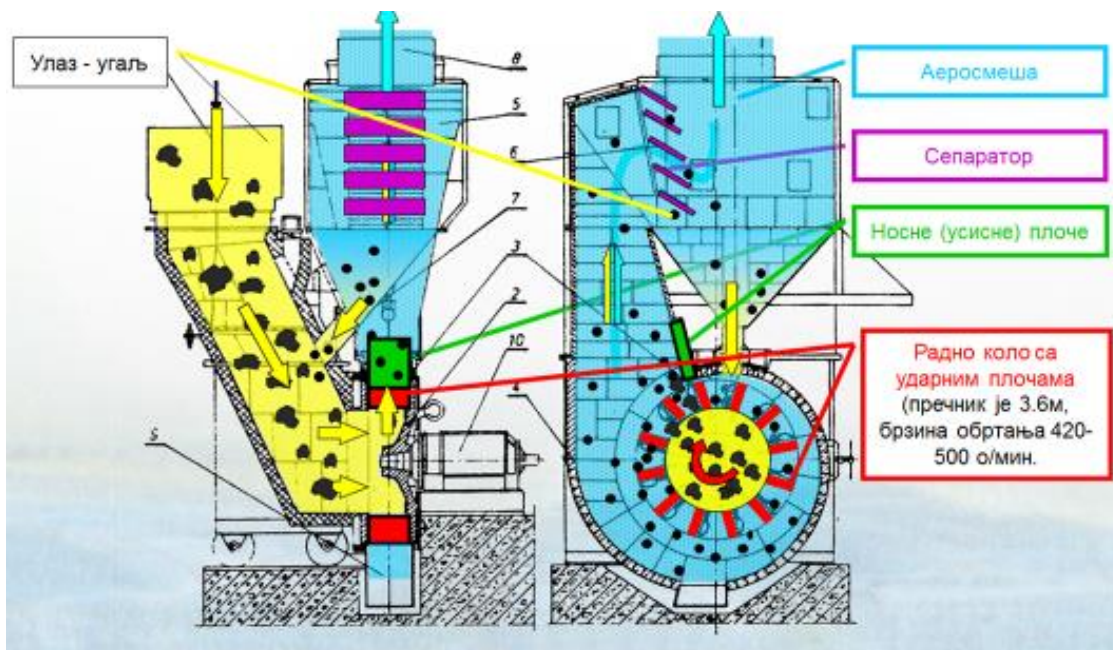
Ударне плоче:

- димензије - 1109 x 260 x 60 mm (задња плоча)- материјал - GS-36Mn5 (DIN);
- 1109 x 373 x 90 mm (предња плоча) -материјал - S235JRG2;

У радно коло млина уграђује се 12 комплекта ударних плоча (12 x 2 ком.) = 24 комада плоча то јест 12 комада предњих плоча и 12 комада задњих плоча. Тежина једног комплекта (2 x 1) је $Q = 380$ kg. Укупна тежина $Q = 4560$ kg

Усисне (носне) плоче:

- материјал - GS-36Mn5 (DIN);
- димензије- 345 x 385 x 30 mm;
- 35 комада усисних плоча у сету
- Укупна тежина је $Q = 945$ kg.



Слика 1.7. Шематски приказ изгледа млина са каналом аеросмеше [5].

Сваки млин је директно повезан са гориоником који се састоји од четири нивоа и то два главна доња - који раде као горионици основне мешавине угљеног праха и два горња тзв. горионици за отпарке. У пројектној верзији свака веза између млинова и горионика била је подељена на два канала пречника по 1396mm и у сваки од њих био је уграђен центрифугални раздвајач. Пречник канала до горионика за отпарке био је 1026mm. Пројектом је предвиђено да расподела угљеног праха износи 70% на главне, а 30% на горионике за отпарке, а гасне мешавине у односу 50:50% [4-8].



а)



б)

Слика 1.8. а) и б) Делови вентилационог млина у ремонту



а)



б)



в)



г)

Слика 1.9. Вентилациони млин у ремонту: а) усисне плоче, б) обложне плоче и в) доњи део кућишта вентилационог млина, г) радно коло вентилационог млина

Реконструкцијом вентилационог млина повећан је капацитет за (80 – 85 t/h) и вентилационо дејство млина (160.000 – 215.000 m³/h) али се погоршала расподела угљеног праха (55 – 65% на главним горионицима и 35 – 45% на отпарцима) и гасне смеше (38 – 50% на главним горионицима и 50 – 62% на отпарцима). Истовремено, финоћа мљења је углавном остала непромењена [8].

Реконструкцијом је постигнута повољнија расподела угљеног праха (82% на главним горионицима и 18% на отпарцима) и гасне смеше (82% на главним горионицима и 18% на отпарцима) у систему са жалузинама, него у систему са центрифугалним раздвајачем (62/38% за угљени прах и 45/55% за гасну смешу).

Финоћа млевења угљеног праха је слична код оба система. Вентилационо дејство млинова је на нивоу од 200.000 m³/h. Испитивања су указала на квалитетније сагоревање и већу ефикасност котла при раду већег броја млинова са уграђеним жалузинама у каналима аеросмеше [5].

Међутим, како су рециркулисане честице обогаћене абразивним минералним материјама, које имају и већу густину од угљене масе, знатно се повећава хабање радних елемената млина, чиме се скраћује њихов радни век, односно период између два ремонта. На сликама 1.8. и 1.9. приказани су делови вентилационог млина у ремонту и изглед похабаних делова [5].

1.1.4. Поступак експерименталних испитивања

У оквиру ове дисертације су приказани резултати моделних испитивања узорка са антихабајућим превлакама, помоћу којих ће се одредити оптимална технологија наношења антихабајућих превлака. Моделна испитивања обухватају:

- Процену заварљивости челика GS-36Mn5,
- Избор додатног материјала и поступка наношења,
- Израда пробних узорка,
- Визуелно испитивање,
- Испитивање течним пенетрантима,
- Испитивање хемијског састава
- Структурно - механичка испитивања
 - Мерење тврдоће по попречном пресеку узорка,
 - Микроструктурна испитивања (оптичка микроскопија)
 - Микроструктурна испитивања (SEM и оптичка микроскопија)
 - EDS (енерго- дисперзиона анализа) хемијска анализа

Избор технологије наношења антихабајућих превлака (у овом случају наваривања и метализације) подразумева претходно познавање облика и димензија радног комада, хемијског састава и структурно – механичких особина материјала, поступка наношења и особина додатног материјала. У односу на заваривање, поступак наваривања односно метализације се изводи под условима који омогућавају постизање што мањег степена мешања са циљем да се у што већој мери очувају особине метала нанесеног слоја, које се углавном значајно разликују од основног материјала. Основни

принципи наношења превлака су, као и код заваривања, директна последица разумевања металуршких феномена и понашања микроструктуре у нанетом споју, посебно у зони под утицајем топлоте.

Проучавање основних принципа различитих начина наношења металних слојева отпорних на хабање заснива се на анализи једноставног наношења слоја, неким од поступака електролучног заваривања, метализације или других поступака депозиције на основни метал. Топлота нанесеног слоја узрокује појаву температурног градијента у основном материјалу. При хлађењу се формирају квазиравнотежне структуре, које могу да се предвиде применом изотермалних (IR) дијаграма, или прецизније, дијаграмима континуираног хлађења (KH) и заваривачким дијаграмима континуираног хлађења (KNZ) за основни материјал. Слика расподеле температуре у нанесеном споју може се добити решавањем једначина топлотног биланса. На тај начин се може добити термална историја сваке тачке у зони утицаја топлоте (ЗУТ) основног материјала као и у нанетом металу. Решавање парцијалних диференцијалних једначина преноса топлоте у навареном споју може бити изражено аналитичким решењима Розенталових и Рикалинових једначина преноса топлоте. Ова решења могу се знатно прецизније добити нумеричким прорачунима било методом коначних елемената или коначних разлика.

Међутим, комплекснија слика стања метала се јавља у реалним условима наношења превлака са два или више пролаза. У том случају, следећи нанесени слојеви стварају нова термална поља која утичу како на дати нанети слој, тако и на претходне. На основу овако добијених података може се предвидети температурна историја нанесеног слоја, односно могуће је анализирати и претпоставити ефекте на микроструктуру а тиме и на својства. Овај начин анализе топлотног биланса споја омогућава да се уместо унете енергије извора топлоте анализира унос топлоте по јединици дужине нанесеног слоја, који директно утиче на дубину пенетрације изотерми у току наношења. Избором одговарајућих параметара наношења сваког слоја омогућава се контролисано загревање ЗУТ-а и метала сваког слоја, који се наноси чиме се омогућава контролисана термичка обрада.

Претходно приказане теоријске основе, омогућиле су развој практично применљивих поступака и технологија наношења превлака уз контролисани унос топлоте, брзине загревања и начина наношења (наваривање, метализација), које су са своје стране омогућиле добијање слојева одговарајућих особина, као што је отпорност на хабање.

1.1.4.1. Избор додатног материјала

На основу захтеваних карактеристика и изабраног поступка, ради се одабир додатних материјала. При избору морају се уважавати следећи критеријуми :

- могућност обраде;
- потребан квалитет завршне обраде;
- отпорност на трошење;
- допуштена дебљина нанесеног слоја;
- порозност слоја;
- везивна чврстоћа;
- намена слоја;
- карактеристике основног материјала;
- облик и величина радног предмета и
- трошкови.

Код слојева добијених наношењем антихабајућих превлакама, измерена тврдоћа зависи од степена позорности и дебљине слоја. Тврдоћа слоја разликује се од тврдоће појединих честица у слоју [19]. Честице су веће тврдоће па се слојеви у многим случајевима понашају боље него што се од њих очекује с обзиром на измерену тврдоћу. Код танких слојева, на резултате мерења тврдоће утиче и тврдоћа основе на коју је нанет слој. Ради поузданости резултата, нанети слој треба да је десет пута дебљи од дубине отиска добијеног при испитивању тврдоће [20]. Затезна чврстоћа слоја представља једно од најважнијих својстава, због њене непосредне везе са постојаношћу у експлоатационим условима [19,20]. Због присуства пора и оксида као и због релативно слабе везе честица у слоју, затезна чврстоћа слоја је далеко нижа од затезне чврстоће материјала пре метализације [20,21]. Затезна чврстоћа непосредно зависи од чврстоће веза између честица слоја и заосталих унутрашњих напона. Унутрашњи напони зависе од величине скупљања слојева приликом хлађења, односно од скупљања самих честица и количине топлоте унесене у слој. Како се напони услед скупљања појединих слојева сабирају то ће напони у дебљим слојевима бити већи. Да би обезбедили што већу затезну чврстоћу слоја неопходно је одабрати материјал за наношење који се мало скупља при хлађењу, уносити што мање топлоте у слој и тежити доњим граничним вредностима дебљине слоја [22].

Слојевитост може и негативно да утиче на механичка својства и напоне у слоју. Слојевитост настаје када се слојеви наносе један преко другог са великим временским размацама [21]. Тада је могуће да се у већ нанесеним слојевима кондензује влага из ваздуха, или се на површини нахвата прашина. Влага и прашина тешко се уклањају из порозног слоја и неповољно утичу на везивање честица које се наносе преко њих. Зато треба избегавати прекиде рада приликом метализације, осим када су неопходни ради хлађења основе [23, 24].

Порозност омогућава мању или већу пропустност слоја која код заштите метала од корозије смањује заштитну моћ. Повећањем дебљине слоја, пропустност опада, коју је могуће смањити или потпуно уклонити попуњавањем пора уљем, бојом или специјалним материјалима за попуњавање [19-22]. За смањење напона неопходно је ограничење дебљине слоја. Међутим, како је у многим случајевима потребно наносити дебеле слојеве, неопходно је појачати везу између слоја и основе. Ово се постиже на више начина, најчешће храпављењем основе абразивом или наношењем везивних слојева. Код метализације, веза између слоја и основе заснива на адхезији, која се повећава наношењем везивног слоја. За то се најчешће користи смеша никла и алуминијума, при чему настаје микрозаваривање на 50% - 70% површине додира. Постоје и материјали који у себи садрже један део егзотермних смеша што обезбеђује боље везивање честица и слојева међу собом [23].

1.1.4.2. Поступци наношења антихабајућих превлака

Одређивање и избор поступака за наношење антихабајућих превлака урађена је на основу расположивих технологија, обучених заваривача и оператера. Приликом избора водило се рачуна о могућности наношења антихабајућих превлака на саме радне делове на вентилационом млину. Одабрано је 5 различитих поступака:

- РТА-плазма заваривање (15) (plasma transfer arc welding)
- HVOF – Хладна мет. суперсоничним поступком (High-Velocity Oxy Fuel)
- Топла метализација са накнадним утапањем
- Ручно електролучно заваривање (111) (Manual Metal Arc Welding)
- МИГ/МАГ (114) самозаштитна жица (Flux-cored arc welding (FCAW or FCA))

Поступци наношења антихабајућих превлака односно у овом случају наваривања и метализације су процеси наношења површинског слоја на метални део да би се повећала његова отпорност према хабању. Процес наваривања је практично исти као заваривање, с тим да је намена другачија. Наваривање може да се примени на нове делове, или на већ похабане делове у циљу враћања у употребљиво стање.

Основна разлика заваривања у односу на процесе метализације је топлеење површине основног метала и његово мешање са додатним материјалом. Удели основног и додатног материјала дефинисани су степеном мешања који представља количник удела масе основног метала и укупне масе нанесеног слоја. Степен мешања по правилу треба да буде што мањи, јер је утицај основног метала на тражена својства навареног слоја (првенствено тврдоћу) неповољан. Ова појава се зове још и разблаживање и представља озбиљан проблем у примени наваривања. Да би се овај проблем решио често се користи наваривање у више пролаза, од којих тек у покриваном слоју нема утицаја основног метала.

Други важан проблем при наношењу антихабајућих превлака је термички утицај на основни метал, посебно уколико додатни материјал има различит коефицијент термичког ширења. Да би термички напони и деформације у основном металу били што мањи треба водити рачуна о редоследу полагања слојева.

Метализација представља поступак наношења распршеног материјала у облику ситних честица на површину основног метала, чиме се добија танак, веома отпоран површински слој. За разлику од наваривања, у случају метализације основни метал се не топи, па не постоје проблеми његовог мешања са додатним материјалом. Осим тога, неки поступци метализације могу да користе додатни материјал у облика праха, код кога је лакше подесити састав превлаке.

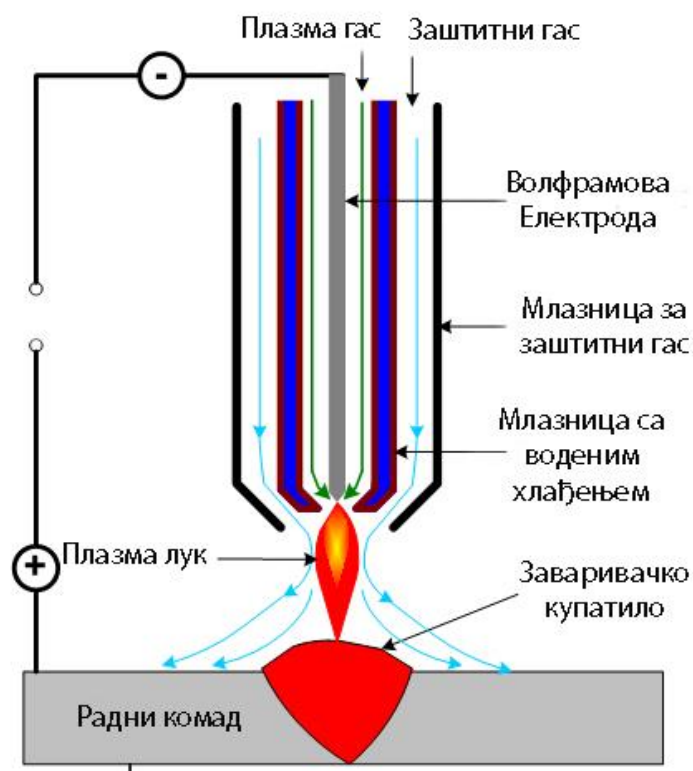
При избору поступка наношења антихабајућих превлака треба да се води рачуна о величини, облику и маси комада на који се наноси слој, основном материјалу, легури која се наноси и посебним захтевима нанесеног слоја. Особине и квалитет нанесеног слоја зависе највише од легуре која се користи. Остали утицајни фактори су састав основног метала и примењен поступак. Удео основног метала у антихабајућем слоју се мења у зависности од процеса и броја слојева. Како удео основног метала расте, тако се отпорност на хабање смањује. Понекад се, у циљу одржавања састава, наноси међуслој између основног метала и легуре за наваривање. За наваривање се највише користе Е (111) и МАГ(135) поступци.

Поред стандардних поступака заваривања који се користите за потребе ових моделних испитивања коришћени су поступци метализације који се по први пут примењују за наношење ових антихабајућих превлака за потребе продужетка радног века и повећања отпорности на хабање. У следећим поглављима су приказани механизми рада неких поступака метализације, који су коришћени за потребе ових моделних испитивања односно за израду узорака за моделна испитивања. Приказани су само неки од процеса наношења превлака односно само поступци метализације који су нови на нашем тржишту. Неки од ових поступака су по први пут коришћени у истраживаче сврхе, поступак HVOF је одмах након монтаже у просторијама Messer Tehnogasa коришћен за израду узорака за моделна испитивања.

1.1.4.3. Плазма поступак

Плазма спреј процес или плазма поступак, је један од најефикаснијих метода, с обзиром на брзину наношења материјала. Микроструктура и остале карактеристике превлаке добијене плазма поступком зависе од карактеристика плазма лука, радних параметара, енергије плазма лука, врсте гаса и протока, растојања плазма уређаја од површине, врсте материјал који се наноси, брзине депоновања материјала итд. [7,8, 25,26].

Због високе температуре у плазма луку, плазма поступком могу се наносити сви материјали који се производе у праху, а не мењају особине при високим температурама топљења. Плазма поступком наносе се метали, керамика, кермети, карбиди метала и други тешко топљиви материјали. Побуђивање гаса (азот, аргон или хелијум) и његово превођење у стање плазме врши се јонизацијом гаса уз помоћ високонапонског електричног лука који се успоставља између аноде и катоде. Кроз електрични лук пропушта се инертни гас (азот, аргон или хелијум), где долази до његове дисоцијације (разлагања молекула гаса на атоме) и јонизације (образовање наелектрисаних јона из неутралних атома), те тако настаје плазма гас. Гас даље пролази кроз млазницу (дизну) где се враћа у првобитно стање и при томе се ослобађа велика количина топлоте при чему се достиже температура до 3000 °C [3,25,26]. Упрошћена шема плазма поступка је приказана на слици 1.10. Уређајем за дозирање, прах се под одређеним притиском доводи у плазма млаз. Честице се топе и наносе на припремљену површину. Основни материјал се загрева од 60 - 200°C, тако да плазма поступак припада хладним поступцима.



Слика 1.10. Шема горионика за метализацију плазма поступком [26]

Дебљина слоја која се наноси плазма поступком износи од 0.13 - 1.38 mm. Гранулација праха за наношење износи од 10 - 44 μm у зависности од намене праха.

Порозност слоја износи од 0 - 10%. Подешавање уређаја врши се преко командног уређаја тако да се могу унапред подешавати сви параметри за метализацију и тиме избећи грешке оператера. Код овог поступка, потребна је додатна заштита због велике буке и јаке светлости [26].

1.1.4.4. Детонациони (HVOF) поступак

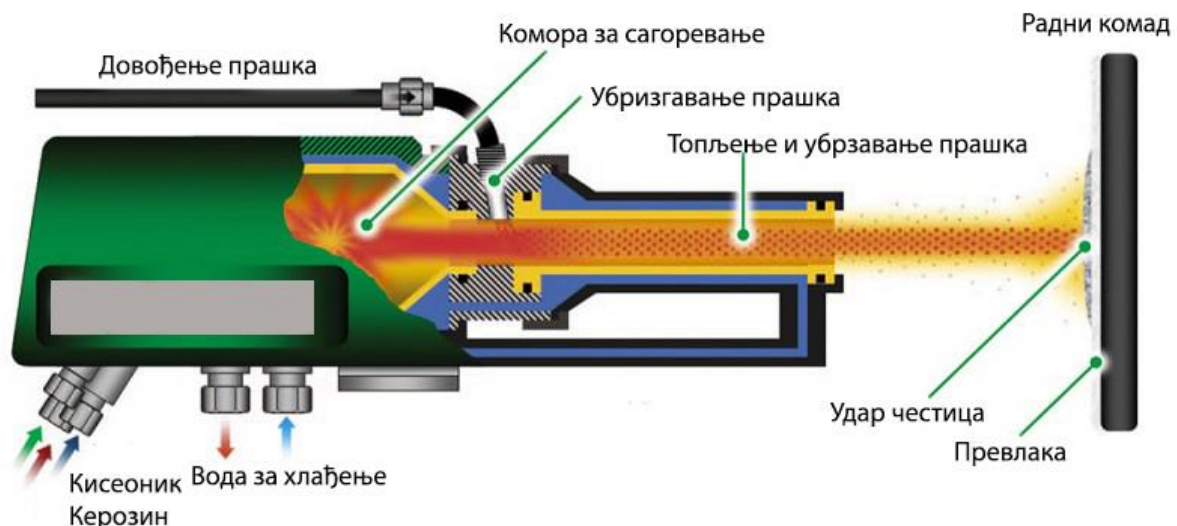
Поступак метализације који се карактерише великим брзинама сагоревања гасова у присуству кисеоника (HVOF) или детонациони поступак је заснован на комбинацији термичке и кинетичке енергије транспортних процеса, тј.топљењу и убрзању честица праха, ка жељеној површини. Честице праха изабраног материјала уводе се аксијално у топлу струју гаса, затим у уређај за метализацију, где се топе, и односе до радне површине на којој се врши њихово очвршћавање и стапање са основним материјалом. Угљоводоници (пропан, пропилен, ацетилен) или чисти водоник се користе као гориви гасови, тако да температура поступка зависи од избора

горивог гаса [1]. У самом уређају се постижу веома високи притисци и температуре које износе неколико хиљада степени целзијуса. Код овог поступка доминира механичко везивање материјала који се наноси и основног материјала [8, 17].

Гориви гас се пали варницом. У неке уређаје те врсте додатно се уводи азот. Струја азота има за циљ да пренесе капљице од изласка из уређаја до површине која се металзира. Метализирани слој нанет детонационим поступком има велику густину, односно малу порозност. На тај начин се детонационим поступком добијају слојеви тврдоће и чврстоће знатно веће од основног материјала [8, 17].

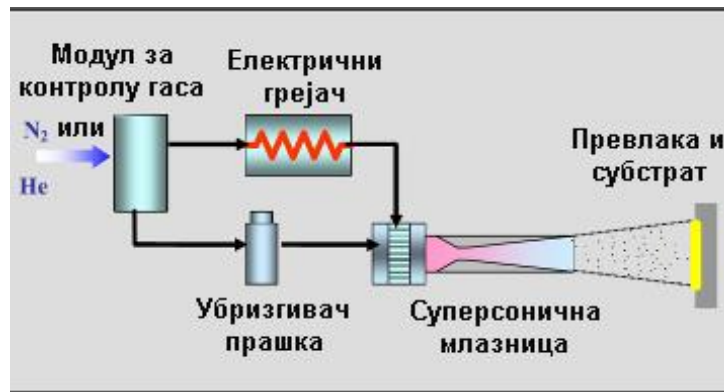
Уређај за детонациони поступак металзације (слика 1.11.) се састоји од три зоне:

- зона мешања,
- зона сагоревања и
- зоне разбризгавања



Слика 1.11. Метализација детонационим (HVOF) поступком [25]

Током рада неопходно је хлађење уређаја водом или ваздухом. Један од најсавременијих поступака наношења превлака различитих материјала је Суперсонични поступак депозиције честица (СПД – Хладна мет. суперсоничним поступком) приказан на слици 1.12.

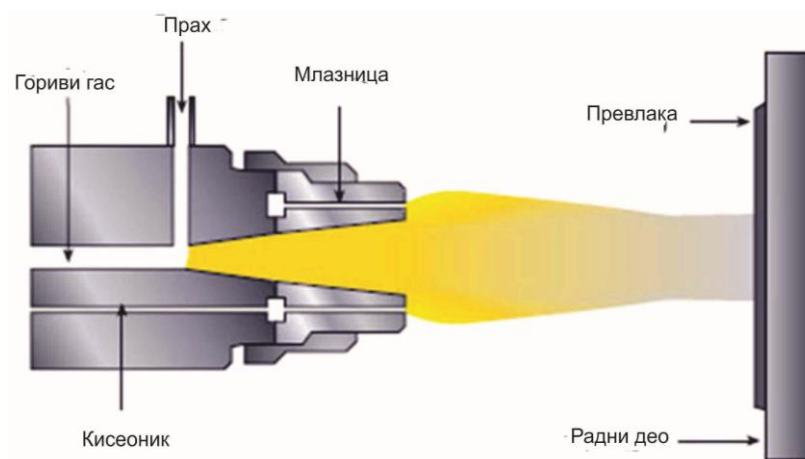


Слика 1.12. Шема уређаја за хладну метализацију суперсоничним поступком [25]

Предности овог поступка су следеће: честице су у чврстом стању, ниска заостала напрезања, минимални пораст зрна, слаба оксидација честица, велика брзина депозиције искоришћења, могућност доношења превлака од различитих материјала и субстрата [8,17,25].

1.1.4.5. Топла метализација са накнадним утапањем

Овим поступком наносе се метали, керамике, кермети, карбиди метала и пластичне масе. Додатни материјали се производе у облику праха или гранула (код пластичних маса. Честице праха су веома фине (5 - 125 μ m) и лоптастог облика што обезбеђује равномерно протикање праха и фино доношење. Прах се у струју горивог гаса доводи принудно или са уређајем за дозирање и допремање (слика 1.13.). Прах улази у струју гаса у чијем се пламену топи и ношен пламеном гаса преноси до површине на коју се наноси слој.



Слика 1.13. Поступак гасне метализације са прахом [25]

Делићи праха приликом пролаза кроз пламен прелазе у растопљено стање. При удару у основни материјал долази до егзотермне реакције и тачкастог усидравања комбинованих са делимичним микроставаривањем. Веза са основом заснива се на физичко хемијском поступку са егзотермном реакцијом. Брзина праха кроз гас је од 30 - 250 m/s. Проток праха и брзина депоновања је од 1 - 9 kg/h. Слојеви нанесени овим поступком су хетерогени и микропорозни. Порозност нанесених слојева је од 3 - 15%. Дебљина слоја који се наноси је од 0.25 - 12 mm у зависности од намене нанесеног слоја. Топлота се добија сагоревањем горивих гасова. Овај поступак припада хладним поступцима јер се основни материјал не загрева више од 200 °C. [23,25,26]

1.2. Предмет и циљ истраживања

Истраживање могућности оптимизације рада хабајућих делова вентилационог млина термоелектране представља комплексну област, која отвара могућности за опсервацију проблема са различитих аспеката. Основни циљ ове дисертације да се прикаже нови приступ решавању комплексних проблема које би довеле до оптимизације рада истог у оквиру стратегије одрживог развоја. Технолошке фазе решавања формулисане су најпре са аспекта технолошке и економске валоризације.

Мултидисциплинарна истраживања у оквиру ове дисертације омогућила су освајање и примену методе симулације вишефазног струјања и оптимизације рада вентилационог млина као и технологија наношења антихабајућих превлака, које би се у будућности могле примењивати у раду и продужетку радног века млина, а што би имало значајне економске ефекте на рад целокупног термоенергетског постројења.

На овај начин је продужен период између редовних и неопходних комплетних ремонта постројења као и смањење могућности евентуалних ванредних застоја, чиме се остварује повећање продуктивности и економичности рада вентилационих млинова, односно термоенергетских постројења у Србији.

Са аспекта методологије научно-истраживачког рада, истраживања су донела новине у домаћу праксу мултидисциплинарног научног рада у којем још увек нема радова који се баве питањем комплексних методолошких проблема.

Опрема у термоелектранама је изложена дуготрајном дејству високих температура и притисака, хабању и цикличном оптерећењу. У наведеним условима експлоатације различити узроци могу довести до оштећења, појединих компонената

као што је пример хабање радних делова вентилационог млина. Последице су смањење производног капацитета и вентилационог дејства млина у односу на пројектовану вредност, као и чести застоји због замене делова, што значајно утиче на продуктивност, економичност и енергетску ефикасност термоелектране.

Примарни циљ овог рада је усмерен на анализу радних услова и израду процедуре за продужење радног века делова вентилационог млина у Термоелектрани Костолац Б, поступцима наношења антихабајућих превлака (наваривањем и метализацијом). Тиме би се повећала ефикасност рада вентилационог млина у склопу термоенергетског постројења. Као веома важан алат у анализи услова рада вентилационог млина користила би се нумеричка симулација вишефазног струјања у циљу добијања детаљног приказа расподеле брзине и смера струјања мешавине.

Тачније, предмет овог истраживања ће бити да се на основу техничко – технолошке анализе рада и стања компоненти вентилационог млина, које су доминантно изложене абразивном и ерозивном хабању, изврши избор радног дела, у овом случају усисних плоча, као и карактеризација основног материјала.

Избор технологије наношења антихабајућих превлака подразумева претходно познавање облика и димензија радног дела, хемијског састава и структурно – механичких особина материјала, поступка наношења и особина додатног материјала. Основни принципи наношења антихабајућих превлака су директна последица разумевања металуршких феномена и микроструктуре при наношењу антихабајућих слојева.

На овај начин, продужио би се период између редовних и неопходних комплетних ремонта постројења као и смањење евентуалних ванредних застоја, чиме би се остварило повећање продуктивности и економичности рада вентилационих млинова, односно термоенергетских постројења.

Са аспекта методологије научно-истраживачког рада ова истраживања би донела новине у домаћу праксу мултидисциплинарног научног истраживања у којем још увек нема довољно радова који се баве питањем комплексних методолошких проблема повезивања више научних и стручних дисциплина.

Предметна истраживања у оквиру ове дисертације су базирана на следећим претпоставкама:

- Присуство различитих фаза (рецикулационих гасова, угљеног праха, песка и осталог), са различитим механичким и хемијским особинама и различитим

гранулацијама ствара вишефазно струјање које доводи до низа интерактивних утицаја са виталним деловима ротационог и статичког дела вентилационог млина, до њиховог хабања и потпуног оштећења.

- Избор мултифазног модела симулације струјања (генерисање геометрије, мреже, избор модела струјања на основу Стоксовог броја, дефинисање фаза и удела честица чврсте и гасовите фазе, постављање почетних услова, симулација и праћење конвергенције решења) је темељ на којем се даље развија комплетна методологија истраживања и од којег зависи квалитет добијених резултата.
- Антихабајуће превлаке високе тврдоће и одговарајуће микроструктуре у анализираним условима експлоатације и присуства доминантних врста хабања (абразија и ерозија) омогућиће повећање животног века радних делова вентилационих млинова.

Истраживања у оквиру овог рада су примарно усмерена на анализу услова рада и дефинисање метода и процедура за продужење радног века усисних плоча вентилационог млина. Продужење радног века поменутих плоча проистекло би из корелације резултата нумеричке симулације вишефазног струјања у вентилационом млину, посебно вектора брзина код усисних плоча, експерименталних испитивања која укључују моделна испитивања пробних узорака са антихабајућим превлакама као и функционалних испитивања усисних плоча са нанесеним антихабајућим превлакама. Рад се састоји од седам поглавља:

У поглављу 1 дат је кратак приказ проблема рада термоенергетских постројења, са посебним освртом на предмет овог рада а то су вентилациони млинови за млевење угља. Приказани су услови рада у вентилационом млину, а са посебним освртом на карактеристичне проблеме у његовом раду. Приказана је потреба за наношењем антихабајућих превлака и текуће стање истраживања, такође су анализиране познате методе наношења антихабајућих превлака.

У поглављу 2 дат је приказ коришћене литературе, са кратким освртом на актуелна истраживања у последњим годинама из ове области. У овом поглављу набројани су

најзначајнији закључци и препоруке изведене по питању продужетка радног века термоенергетских постројења. Кроз коришћењу литературу у поглављу 2 истакнута је важност нумеричких и експерименталних метода у погледу анализе рада и функционалности комплексних постројења. Такође су приказане савремене нумеричке методе које се користе за анализу услова рада елемената конструкција. Приказан је и преглед широке палете додатних материјала и одговарајућих поступака за наношење антихабајућих превлака, анализирани су њихове могућности, предности и ограничења као и упоређења са расположивим експерименталним резултатима.

У поглављу 3 дат је приказ примене савремених метода нумеричке симулације вишефазног струјања у вентилационом млину у циљу детаљније анализе проблема хабања везаних за појаву абразије и ерозије изабране компоненте (Усисних плоча). Применом софтверског пакета ANSYS FLUENT 12, добијена је потпунија слика расподеле брзина и притисака вишефазног струјања (ваздух, угљена мешавина, песак и друге примесе, односно чврста и гасовита фаза) унутар млина, предвиђени ефекти струјања ових фаза на радне делове, односно прецизније одређене критичне зоне у којима ће се појавити оштећења елемената вентилационог млина. Ови резултати су упоређени са расположивим подацима о хабању радних делова из праксе.

У овом раду је коришћен одговарајући модел мултифазног струјања (на основу Стоксовог броја и специфицирања броја фаза присутних у струјању) који након детаљне анализе постојећих услова струјања омогућава да се тачно специфицира број фаза, да се одреди просторна расподела фаза у нумеричком простору и да се на основу тога израчуна Стоксов број. Овај број је важан за струјања у случајевима када се могу занемарити инерцијалне, а морају узети у обзир вискозне силе и силе гравитације да би се постигла динамичка сличност струјању у реалном систему.

Дефинисање секундарних, чврстих фаза је активност која зависи од изабраног модела вишефазног струјања, а за најсложенији Ојлеров модел ту спадају величина честица секундарних фаза, грануларна вискозност и фриксиона вискозност, грануларна проводљивост итд. Интеракцијом између фаза обухваћене су силе и размена топлоте између примарне и секундарних фаза. У зависности од њиховог међудејства могуће је укључити силу отпора, силу узгона и силу од придружених маса.

Избор турбулентног модела разматра најоптималније моделе. Користи се к-ε турбулентни модел или модел Рејнолдсових напона, а у оквиру ових један од вишефазних модела који ће бити изабран на основу величине турбулентног трансфера

између фаза. Укључивање запреминских сила је неопходно у нумеричкој симулацији вишефазног струјања. Утицај гравитације на кретање секундарних фаза биће укључен у нумеричку симулацију, како би се обезбедила потпуна сличност симулације са реалним струјањем.

На основу анализе резултата симулације вишефазних струјања у вентилационом млину, примењене су одговарајуће мере које су везане за реконструкцију млина и ревитализацију радних делова изложених хабању.

У поглављу 4 су дати основни принципи различитих начина наношења антихабајућих металних превлака (слојева) засновани на анализи једноставног наношења тврдог слоја, неким од поступака наваривања и метализације, на основни метал.

У циљу продужења животног века усисних плоча примењене су аналитичке и експерименталне методе истраживања услова и понашања основног материјала при депозицији антихабајућих превлака а у циљу постизања што мањег степена мешања и очувања у што већој мери особина антихабајуће превлаке, чија се својства значајно разликују од основног материјала. Основни принципи депозиције антихабајућих превлака су директна последица разумевања металуршких феномена и понашања микроструктуре у нанесеном слоју, посебно у зони под утицајем топлоте (ЗУТ).

Проучавање основних принципа различитих начина наношења превлака (слојева) отпорних на хабање заснива се на анализи једноставног наношења слоја, неким од поступака наваривања и метализације, на основни метал. Пажња је усмерена на дефинисање технологија наношења антихабајућих превлака, што би обухватило: аналитичку оцену заварљивости основног метала радног дела, предвиђања могућих ефеката топлотних циклуса наношења антихабајућих превлака на микроструктуру материјала и особине слоја, које могу да се предвиде применом изотермалних (ИР) дијаграма, или прецизније, дијаграмима континуираног хлађења (КХ) и заваривачких дијаграма континуираног хлађења (КХЗ) за основни материјал.

Урађен је избор и дефинисање поступка наношења антихабајућих превлака, избор додатних и потрошних материјала, као и дефинисање врсте и обима контроле нанесеног слоја.

У овој фази истраживања извршена су експериментална испитивања хемијског састава и структурно – механичка својства одређеног броја узорака са тврдим превлакама, које ће се нанети различитим поступцима и додатним материјалима по

дефинисаним условима. Анализа хемијског састава извршена је спектрофотометријским и спектрометријским методама. Структурна стања ће се испитати светлосном и електронском микроскопијом. Стања узорака након наношења превлака испитаће се НДТ методама а механичка својства стандардним методама. Извршена је селекција додатних материјала и избор одговарајућих параметара наношења превлака.

У поглављу 5 разматра се примена резултата моделских испитивања и избор одговарајућих технологија наношења превлака, а у циљу верификације добијених резултата и повећања радног века одабране компоненте вентилационог млина, извршени су функционални експерименти на прототиповима делова са антихабајућим превлакама (слојевима).

За наношење антихабајућих превлака изабране су уисне плоче које се налазе на излазу из вентилационог млина у канал аеросмеше, и које одговарајућим зазором са радним деловима млина регулишу проток мешавине (гас, угљена прашина и минералне материје) ка каналу аеросмеше и горионицима. За потребе овог истраживања извршен је избор четири различита додатна материјала и технологија наношења.

Након испитивања у експлоатацији анализирани су резултати испитивања уисних плоча са антихабајућим превлакама и подређени су са резултатима пре уграђивања у кућиште вентилационог млина. После одговарајућег периода експлоатације, плоче су демонтиране и урађена је визуелно–квантитативна анализа. Посебна пажња је била усмерена на геометријска одступања плоча након експлоатације у односу на оригиналне, које нису биле у експлоатацији. Мерење губитка масе и промена облика и димензија су изведени према захтевима техничке документације за одређивање степена хабања уисних плоча одржавања Термоелектране Костолац Б. На основу добијених резултата изведена је анализа промене очекиваног века трајања уисних плоча у зависности од карактеристика материјала навареног и метализираног слоја у односу на основни материјал GS-G36Mn5.

У поглављу 6 је приказана детаљна анализа резултата и направљена је детаљнија веза између поглавља нумеричке симулације, експерименталних и функционалних испитивања.

Закључне напомене са истакнутим битним резултатима истраживања из овог рада дате су у *Поглављу 7*.

Један од примарних циљева ових истраживања је примена и усавршавање савремених метода нумеричке симулације у анализи и оптимизацији рада комплексних постројења, и њиховој евентуалној реконструкцији. Расположиви подаци показују да у свету а поготову у нашој земљи, до сада није изведен овакав приступ анализи услова рада постројења као што је вентилациони млин, као и начину решавања проблема хабања радних делова овог постројења у експлоатацији, а не лабораторијског модела.

Оригинални приступ у истраживању, омогућио је да се разматрани проблем осветли са више аспеката. Проблематика наношења антихабајућих превлака и примене нових додатних материјала и технологија, као и дефинисање процедура истих, захтева специфичан приступ с обзиром на услове експлоатације млина.

Резултати истраживања у оквиру докторске дисертације, који су засновани на испитивањима широке палете додатних материјала, технологија и параметара процеса, дали су значајни допринос у освајању мултидисциплинарног приступа оптимизацији рада постројења, бољем разумевању процеса и феномена, примени нумеричких метода и депозицији антихабајућих превлака на радним деловима. Поред тога, овај приступ решавању проблема повећања животног века радних делова вентилационих млинова у Термоелектрани Костолац Б је значајан и са аспекта његове примене у другим термоенергетским системима, који користе вентилационе млинове.

1.2.1. Полазне хипотезе

Предметна истраживања у оквиру ове дисертације су базирана на следећим претпоставкама:

- Присуство различитих фаза (рециркулационих гасова, угљеног праха, песка и осталог), са различитим механичким и хемијским особинама и различитим гранулацијама ствара вишефазно струјање које доводи до низа интерактивних утицаја са виталним деловима ротационог и статичког дела вентилационог млина, до њиховог хабања и потпуног оштећења.

- Избор мултифазног модела симулације струјања (генерисање геометрије, мреже, избор модела струјања на основу Стоксовог броја, дефинисање фаза и удела честица чврсте и гасовите фазе, постављање почетних услова, симулација и праћење конвергенције решења) је темељ на којем се даље развија комплетна методологија истраживања и од којег зависи квалитет добијених резултата.
- Антихабајуће превлаке високе тврдоће и одговарајуће микроструктуре у анализираним условима експлоатације и присуства доминантних врста хабања (абразија и ерозија) омогућиће повећање животног века радних делова вентилационих млинова.

1.2.2. Методе истраживања

У циљу продужења животног века усисних плоча примењене су аналитичке и експерименталне методе истраживања услова и понашања основног материјала при депозицији антихабајућих превлака а у циљу постизања што мањег степена мешања и очувања у што већој мери особина антихабајуће превлаке, чија се својстава значајно разликују од основног материјала. Основни принципи наношења антихабајућих превлака су директна последица разумевања металуршких феномена и понашања микроструктуре у нанесеном слоју, посебно у зони под утицајем топлоте (ЗУТ).

У овом раду су коришћени одговарајући модели мултифазног струјања (на основу Стоксовог броја и специфицирања броја фаза присутних у струјању) који након детаљне анализе постојећих услова струјања треба да омогуће: да се тачно специфицира број фаза, да се одреди просторна расподела фаза у нумеричком простору и да се на основу тога израчуна Стоксов број. Овај број је важан за струјања у случајевима када се могу занемарити инерцијалне, а морају узети у обзир вискозне силе и силе гравитације да би се постигла динамичка сличност струјању у реалном систему.

Дефинисање секундарних, чврстих фаза је активност која зависи од изабраног модела вишефазног струјања, а за најсложенији Ојлеров модел ту спадају величина честица секундарних фаза, грануларна вискозност и фрикциона вискозност, грануларна проводљивост итд. Интеракцијом између фаза обухваћене су силе и размена топлоте између примарне и секундарних фаза. У зависности од њиховог међудејства могуће је укључити силу отпора, силу узгона и силу од придружених маса.

Избор турбулентног модела размотриће најоптималније моделе. Планира се да се користи к- ϵ турбулентни модел или модел Рејнолдсових напона, а у оквиру ових један од вишефазних модела који ће бити изабран на основу величине турбулентног трансфера између фаза. Укључивање запреминских сила је неопходно у нумеричкој симулацији вишефазног струјања. Утицај гравитације на кретање секундарних фаза биће укључен у нумеричку симулацију, како би се обезбедила потпуна сличност симулације са реалним струјањем.

Проучавање основних принципа различитих начина наношења антихабајућих металних превлака (слојева) отпорних на хабање заснива се на анализи једноставног наношења тврдог слоја, неким од поступака наваривања и метализације, на основни метал. Топлота нанесеног слоја узрокује појаву температурног градијента у основном материјалу. При хлађењу се формирају квази равнотежне структуре, које могу да се предвиде применом изотермалних (ИР) дијаграма, или прецизније, дијаграмима континуираног хлађења (КХ) и заваривачких дијаграма континуираног хлађења (КХЗ) за основни материјал.

У овој фази истраживања извршена су експериментална испитивања хемијског састава и структурно – механичка својства одређеног броја узорака са тврдим превлакама, које ће се нанети различитим поступцима и додатним материјалима по дефинисаним условима. Анализа хемијског састава урађена је спектрофотометријским и спектрометријским методама. Структурна стања ће се испитати светлосном и електронском микроскопијом. Стања узорака након наношења превлака испитаће се НДТ методама а механичка својства стандардним методама.

Истраживања која ће се извести у овој дисертацији треба да пруже основ за дефинисање новог приступа у изучавању утицаја услова експлоатације и могућег продужења радног века делова у вентилационом млину у условима интензивног хабања, које може бити константно и/или променљивог спектра оптерећења (удара).

1.2.3. Значај истраживања

У свету се све више, у циљу оптимизације рада различитих постројења, користе методе нумеричке симулације, а на основу њих могу да се дефинишу одговарајуће мере које би биле везане за евентуалну реконструкцију и/или ремонт. Расположиви подаци показују да у свету, а поготову у нашој земљи, до сада није изведен овакав

приступ проблему анализе услова рада постројења као што је вентилациони млин, као и начина решавања проблема хабања неких радних делова овог постројења.

На основу анализе резултата симулације вишефазних струјања у вентилационом млину, предложиле би се одговарајуће мере које би биле везане за реконструкцију млина и ревитализацију неких радних делова изложених хабању. На основу анализе доступне литературе, у нашој земљи и шире, до сада није извршена симулација струјања у комплексним постројењима овога типа, која представљају индустријска постројења у експлоатацији, а не лабораторијске моделе.

Оригинални приступ у истраживању, омогућио је да се разматрани проблем осветли са више аспеката. Проблематика наношења антихабајућих превлака и примена нових додатних материјала као и дефинисање процедура истих, захтева специфичан приступ с обзиром на услове експлоатације млина. Широка је палета додатних материјала, као и параметара процеса који нису у потпуности истражени, тако да ће резултати истраживања у оквиру докторске дисертације дати значајни допринос у освајању мултидисциплинарног приступа истраживању оптимизације рада постројења, бољем разумевању процеса и феномена, примени нумеричких метода и депозиције антихабајућих превлака на радним деловима. Нови приступ решавању проблема повећања животног века радних делова вентилационих млинова у Термоелектрани Костолац Б је значајан и са аспекта његове примене у другим термоенергетским системима који користе вентилационе млинове.

1.3. Научни допринос докторске дисертације

Главни научни допринос у оквиру предложене теме усмерен је на успостављање нових приступа у анализи радних услова и решавања проблема радног века делова, који су изложени интензивном хабању (усисних плоча) у вентилационом млину. Овај оригиналан приступ могао би се применити и на сличним уређајима у разним гранама индустрије.

Мултидисциплинарним истраживањима у оквиру ове докторске тезе омогућила би се примена метода симулације вишефазног струјања и оптимизације рада вентилационог млина као и технологија ревитализације радних делова наношењем антихабајућих превлака, које би могле да се примене у раду и ремонту млина, а што би имало значајне економске ефекте на рад целокупног термоенергетског постројења.

Резултати ових истраживања су омогућили да се, с једне стране прорачунске и експерименталне методе искористе у циљу повећања радног века сложених делова у термоенергетским постројењима која су изложена хабању, као и да се открију и анализирају критичне зоне на деловима постројења и редукују на минимум веома скупа експериментална истраживања, са друге стране. Кроз сопствена истраживања у оквиру ове дисертације очекују се следећи доприноси:

- Успостављање новог приступа и развој нових метода за продужење радног века усисних плоча вентилационог млина, које би се могле применити и на друге компоненте у вентилационом млину као и у другим гранама индустрије, а веома су значајне са аспекта ефикасности и економичности рада ових постројења.
- Комплетно дефинисање струјних параметара у вентилационом млину, одређивање расподеле брзина и притисака вишефазног струјања (рециркулациони гасови, угљени прах, песак и друге примесе, односно чврста и гасовита фаза) унутар комплексног система као што је вентилациони млин са реалном геометријом и предвиђање ефеката струјања на радне делове, односно на материјал ових делова вентилационог млина,
- Употреба нових технологија и нових материјала за наношење антихабајућих превлака комплексно легираних са Cr, Mo, Nb, W, V, Ti, B, Co и другим елементима,
- Дефинисање технологије наношења антихабајућих превлака, предлог додатних и потрошних материјала са најприхватљивим особинама заварљивости, као и дефинисање врсте и обима контроле нанесеног слоја.
- Верификација резултата истраживања испитивањем реалних делова (усисне плоче) у току експлоатације,
- Успостављање поузданих процедура за дијагностику и ревитализацију делова који су изложени хабању, кроз корелацију резултата нумеричке симулације мултифазног струјања, моделних испитивања и функционалних испитивања.

1.4. Организација истраживања

Сврха утврђивања организације истраживања је да прецизно дефинише начин како ће бити обављене активности у оквиру овог истраживања, ко и где ће да обави поједине активности, која овлашћења и одговорности имају појединци који учествују у истраживању. Организациона структура је изабрана тако да одговара величини и техничко-технолошкој сложености истраживања. Пошто од правилног избора организационог облика зависи успех истраживања, то се овом задатку приступило веома озбиљно и савесно.

Кандидат је заједно са ментором и руководиоцем пројекта овог истраживања конципирао тему ове дисертације и њену садржину. Овај пројекат се ради у два циклуса 2009-2010 и 2011-2016, дугогодишњим прикупљањем и проучавањем литературе из области истраживања примене антихабајућих превлака, производа и процеса. Дугогодишњим радом и знањем, стеченим у вишегодишњем раду на термоенергетским постројењима, кандидат је заједно са руководиоцем пројекта дошао на идеју да се корелација резултата нумеричке симулације и технологија наношења антихабајућих превлака може успешно применити у продужетку радног века термоенергетских постројења, конструкција и техничких система уопште. Наведеној идеји је претходило дугогодишње прикупљање и анализа литературе и научних информација из ове области.

Кандидат је конципирао истраживања могућности примене антихабајућих превлака на термоенергетским постројењима, у оквиру којих су осмишљене и изведене планиране активности: избор постројења за експериментална истраживања, односно једног његовог радног дела, избор метода испитивања, избор и пројектовање испитно-мерне опреме потребне за извођење експеримента. Експериментална истраживања су изведена у сарадњи са екипом стручњака експерименталних лабораторија, Института Гоша, Рударско–Геолошког Факултета у Београду, Messer Tehnogasai Термоелектране Костолац Б где је изведен део експеримената. Његов задатак је, осим руковођења испитивањима, обрада и анализа добијених резултата, одабир начина њиховог презентовања, писање завршног елабората о целокупним резултатима спроведеног истраживања, издвајање кључних резултата истраживања који су презентовани у оквиру ове докторске дисертације и извођење закључака који побијају или доказују постављену хипотезу. Он руководи радом целе екипе за испитивање.

Пројектни истраживачки тим укључује истраживаче свих научних и истраживачких звања као и стручњаке из различитих области, који су неопходни у припреми и извођењу планираних испитивања у лабораторији и у експлоатационим условима. Екипа за испитивање се формира према врсти испитивања која се захтева. Због сложености и обима истраживања у оквиру дисертације, формирано је више тимова и ангажована је бројна опрема, што је од кандидата захтевало изузетне напоре у смислу координације и синхронизације рада.

Детаљно је припремљен и „Програм испитивања и гантограм” који је обухватио укупни обим активности, а за сваку лабораторију је израђен детаљан план и програм истраживања, према општим и специфичним захтевима пројекта. Имајући у виду да се ради о веома различитим лабораторијама са различитим технолошким и кадровским капацитетима, кандидат је уложио додатне напоре, да се сви ресурси максимално рационално и ефикасно искористе.

1.5. План истраживања

Фазе рада су следеће:

- Преглед доступне литературе из области функционисања и оптимизације рада вентилационих млинова у свету.
- Проучавање метода наношења антихабајућих превлака у циљу повећања отпорности на хабање (абразија и ерозија), а на основу расположивих литературних података;
- Проучавање савремених метода нумеричке симулације вишефазних струјања;
- Анализа услова рада вентилационог млина, са посебним освртом на функцију усисних плоча;
- Анализа струјања у вентилационом млину и дефинисање најважнијих параметара (гранични услови, параметри смеше, интеракције присутних фаза, турбулентни модели итд) за адекватну нумеричку симулацију;
- Дефинисање и анализа материјала усисних плоча вентилационог млина као и облика и димензија узорака за моделна испитивања;
- Аналитичка оцена заварљивости испитиваних челика, предвиђања могућих ефеката топлотних циклуса приликом наношења антихабајућих превлака на микроструктуру и особине нанесених слојева;
- Нумеричка симулација вишефазног струјања у вентилационом млину са каналом аеросмеше, генерисање геометрије која представља нумерички домен, избор

мультифазног модела (на основу Стоксовог броја) и специфицирање броја присутних фаза, дефинисање удела и карактеристика секундарних (чврстих) фаза аеросмеше, као и интеракције између различитих фаза, избор модела турбуленције. Постављање граничних услова за улаз у млин, излазне канале, површину обртног ударног кола и непокретне зидове канала. Прорачун струјања и праћење конвергенције решења и анализа добијених резултата;

- Дефинисање технологија наношења антихабајућих превлака, избор поступака наношења превлака за сваку предложену технологију, избор додатних и потрошних материјала, као и врсте и обим контроле истих;
- Израда и испитивање узорака за моделна испитивања (сечење и машинска припрема узорака за наношење антихабајућих превлака, наношење антихабајућих превлака на пробне узорак по претходно дефинисаним технологијама, испитивања методама без разарања, испитивања механичких и структурних особина);
- Верификација резултата испитивања кроз функционална испитивања прототипа изабране компоненте млина (усисне плоче), која обухватају: дефинисање технологије наношења антихабајућих превлака, извођење наношења антихабајућих превлака, контрола и праћење компоненте у експлоатационим условима и анализа резултата.
- Закључак

2. ПРЕГЛЕД КОРИШЋЕНЕ ЛИТЕРАТУРЕ

2.1. Основе анализе рада и оштећења радних делова у термоенергетским и другим постројењима

Вентилаторски млинови као постројења за припрему угљеног праха, посебно конструисани за млевење угљева са високим садржајем влаге, примењују се од средине тридесетих година прошлог века. У Србији и бившој СФРЈ су почели да се користе педесетих година прошлог века у припреми угљеног праха, млевењем првенствено лигнита, за енергетске и веће индустријске котлове [1-3]. По конструкцији ови млинови су веома слични радијалним вентилаторима али са знатно ојачаним елементима који учествују у процесу млевења [3].

Ова опрема може бити дуго у експлоатацији без замене основних агрегата и њихових делова. Међутим, њихове поједине металне компоненте су изложене

дуготрајном дејству високих температура и притисака, абразији и цикличном оптерећењу [2, 4-8]. У наведеним условима експлоатације различити узроци могу довести до оштећења као што су: хабање, пузање материјала, нискоциклични термални замор, појава кртости, омекшавање и сферодизација. Ломови металних делова могу проузроковати знатна оштећења и застој у раду енергетских постројења [4,8-11]. Поједине компоненте у термоенергетским системима су више изложене оштећењима у односу на друге, што захтева континуирану контролу и испитивања при одржавању [4,12,13]. Уколико се констатује оштећење компоненте које може довести до поремећаја у раду постројења, у пракси постоје три могућности: да се компонента остави у погону уз редовну и чешћу контролу, да се изврши ревитализација компоненте или да се замени потпуно новом компонентом. [14-16].

Оптимизација процеса рада постројења, у овом случају вентилационог млина, се постиже неизбежном корелацијом технолошког процеса и стања радних делова [16-18]. Одступање од захтеваних параметара рада може увелико бити и последица оштећења радних делова, на шта указује величина интервала вентилационог дејства млина. Досадашња истраживања рада вентилационих млинова су се углавном сводила на експерименталне резултате у лабораторијском условима и на резултате реконструкција термоенергетских постројења.

Интензивна рецикулација охлађеног транспортованог флуида који је обogaћен минералним материјама веће густине између сепаратора и улаза у млинско ударно коло осетно смањује вентилационо дејство млина и повећава потрошњу енергије за млевење угља. Поред тога, убрзава се и хабање ударних плоча (тела) и тиме скраћује радни век ударног кола. Обзиром да се угаљ у радно коло вентилаторског млина уводи у малом делу његовог обима, односно на делу који обухвата две до три ударне плоче које се налазе у најнижој тачки спирале кућишта, у зони излаза аеросмеше из ударног кола, што смањује његово време задржавања у млину, повећава се количина рециркулисаних честица угља из сепаратора и не остварује равномерно мешање угља са врелим гасовима рециркулисаних са врха ложишта. Последице ових појава су погоршање финоће млевења угљеног праха и услова сушења [11-21].

Карактеристика угља али и сам тип вентилационог млина је веома важан за рад и оптерећење самог млина, ради оптимизације његовог рада, смањења хабања његових компонената и продужетка радног века. Ломови оваквог типа примећени су и на другим деловима млина у току регуларног радног времена вентилационог млина од

1658h. Узрок ових отказа је неодговарајући материјал и превелика концентracија напона на појединим деловима радног кола [4, 20].

Процес хабања, односно непожељног и прогресивног одстрањивања материјала са површина елемената и делова машина који су у међусобном деловању и релативном кретању, последица је истовременог деловања више процеса као што су механички, термички, хемијски и електрохемијски процеси [7-12]. Основни механизми који доводе до хабања и који дефинишу већину основних врста хабања су: адхезија, абразија, замор материјала и хемијски процеси на површинама [4]. У највећем броју случајева, хабање површина је последица комбинованог деловања различитих механизма.

При анализи процеса хабања процењују се пре свега они фактори који су у постојећим радним условима доминантни, а то су: врста и карактеристике основног и спрегнутог материјала, квалитет и карактеристике контактних површина радних делова, карактеристике раздвајајуће материје уколико она постоји, радни услови (оптерећење, брзине, температуре итд.), карактеристике продуката хабања и др [22].

У случају вентилационог млина претпоставља се присуство абразивног и ерозионог хабања при повишеним температурама. На основу прегледа литературе абразивно хабање обухвата приближно половину свих врста хабања, односно преко 50 % свих оштећења услед хабања је изазвано абразијом [4, 11-13].

Експериментална истраживања указују на линеарну зависност отпорности на абразионо хабање и механичких особина материјала. Тачније, на основу механичких особина, пре свега тврдоће, може се предвидети понашање метала у условима хабања. Дубина продирања честица абразива високе тврдоће обрнуто је сразмерна тврдоћи површинских слојева [19]. Међутим, тврдоћа није једина карактеристика који утиче на отпорност на абразионо хабање и хабање уопште. Параметри који поред тврдоће утичу на отпорност на абразионо хабање су и структура, односно облик, величина и расподела микроконституената у антихабајућем слоју [16-18].

2.2. Поступци наношења антихабајућих превлака и додатни материјали отпорни на хабање

Абразија и ерозија представљају један од главних механизма хабања материјала и опреме у индустријским постројењима: металној, рударској индустрији а посебно у енергетици [4, 19]. Наношење антихабајућих превлака које имају антихабајућа својства се доста користи у овим индустријама, и све више се разликује и

при изради нових делова и компонената где се делови израђују од класичних конструкционих челика а њихове површине се превлаче овим антихабајућим превлакама [19-26].

Класичне процедуре наношења антихабајућих превлака, у које свакако спада наношења аустенитних и манганских материјала, развијене су на основу тумачења различитих параметара наношења антихабајућих превлака, између осталог и утицаја предгревања и евентуалне термичке обраде после, на понашање материјала који се наноси [24-28]. У литератури, поготову светској, присутан је велики број података, који је заснован на практичним искуствима. У овим случајевима дефинисане су препоруке или спецификације, које се између осталог односе и на термичку обраду пре и после наношења, као и на међупролазну температуру [29-32]. Поред тога, у спецификацијама су дате и температуре и времена потребна за термичку обраду после наношења у циљу уклањања заосталих напона, отпуштања микроструктуре у зони утицаја топлоте и нанесеном металу. У домаћој литератури, у много мањем обиму, могу да се нађу подаци о конвенционалним поступцима наношења антихабајућих превлака [4,31-35]. Међутим, и поред присутних података, мора се увек имати у виду да је наношење антихабајућих превлака на делове јединствени процес с обзиром на различитост услова експлоатације и технологија које су прилагођене конкретном делу [32].

Избор додатног материјала за наношење антихабајућих превлака је комплекснији у односу на избор материјала за спајање заваривањем. У случају спајања заваривањем примењени додатни материјал треба да омогући да метал шава буде што сличнији по својим својствима основном металу. Насупрот томе, својства додатног материјала за израду антихабајућих превлака, које морају да имају потребну отпорност према присутној доминантној врсти хабања, се у потпуности разликују од својстава основног материјала [34-39].

Поред наваривања за наношење антихабајућих превлака све више се користе и различити поступци метализације. Ови поступци за разлику од наваривања, омогућавају релативно брзо наношење материјала високих перформанси на делове различитих величина и геометрије у дебелинама од неколико делова милиметра до 25 mm [37-45]. Предности метализације се огледају у томе што њена примена захтева минимум припреме основног материјала, могућност извођења на терену, као и релативно ниске радне температуре површина основног материјала, што омогућава (у

поређењу са техникама као што је наваривање), одсуство структурних трансформација у основном материјалу [45].

Микроструктурне компоненте сразмерно својој тврдоћи, релативном уделу, облику и расподели утичу на ниво отпорности на хабање. Досадашњи резултати су показали да је чисто мартензитна структура са мањом тврдоћом отпорнија на абразивно хабање од мартензитно – карбидне структуре [41-48]. Испитивања су показала да и смањење удела мартензита у корист повећања заосталог аустенита у мартензитно – карбидној структури, повећава отпорност на хабање исте без обзира на пад тврдоће. Ово указује да аустенитно – карбидна структура има знатно већу отпорност на хабање и поред веће тврдоће мартензитно – карбидне структуре [49]. Већа кохезиона чврстоћа аустенитно карбидних фаза је последица мање разлике њихових параметара решетке. Наведено својство утиче да абразивне честице лакше чупају карбиде из мартензитне него из аустенитне матрице [24-29, 33-41].

На основу расположивих истраживања може се констатовати да на интензитет абразивног хабања утичу следећи фактори: природа и карактеристике абразива, агресивност радне средине, радна брзина и оптерећење, као и карактеристике материјала радних делова, односно њихових контактних површина. Поред тога, интензитет абразивног хабања расте са повећањем температуре изнад неке критичне вредности. На основу претходно наведених параметара врши се избор додатних материјала за ревитализацију делова наваривањем [4, 7, 8, 50].

Последњих година, у области отпорности на абразију, развијене су или су у развоју технологије наношења антихабајућих превлака, које користе додатне материјале комплексно легиране са: Cr, Mo, Nb, W, V, Ti, B, Co и другим елементима. У изради неких додатних материјала користе се и нано технологије. Код извесног броја додатних материјала није познат потпун хемијски састав са циљем заштите од конкуренције. Поред тога, за разлику од класичних технологија, при примени неких додатних материјала се не користи термичка обрада пре и после наваривања. Ово свакако, поред цене наваривања утиче и на могућност извођења наваривања, које је често ограничено извођењем термичке обраде пре и после наваривања [49-53]. Практичне предности се огледају у већој оперативности и једноставнијем извођењу процеса са мањим обимом испитивања у току ревитализације наваривањем. Међутим, пре примене ових материјала у експлоатационим условима, ипак је потребно извршити пробна наваривања у циљу провере препорука [54-60].

Једна група додатних материјала за наваривање слојева отпорних на абразију су легуре на основи Fe и Ni, које садрже следеће елементе: C% 0.2 – 7.5; Cr% 5 – 40; Ni% ≤ 4 или без Ni; Mn% ≤ 4 или без Mn; Mo% ≤ 9 или без Mo; W% ≤ 9 или без W; V% ≤ 10 или без V; Nb% ≤ 10 или без Nb и други. Друга група додатних материјала су такозвани тврди метали, односно композити са матрицом на основи Fe и Ni и честицама WC различитог облика и величине [37-42].

Наношење превлака може се изводити гасним, плазма, суперсоничним и гасно-детонационим поступцима са врло малим степеном мешања уз постизање задовољавајуће отпорности на хабање у једном пролазу. Плазма поступком наносе се метали, керамика, композити, карбиди метала и други тешко топљиви материјали. Мали степен мешања ($\leq 10\%$) омогућава да нанесени слој постигне задовољавајућу отпорност на хабање у једном пролазу [39-44]. У неким случајевима на овај начин би се постигла већа економичност у поређењу са ручним електролучним поступком где је потребно и до три пролаза у циљу уклањања лошег утицаја мешања. Додатни материјал је композит са металном матрицом на основи никла (састава NiBSi и NiCrBSi) сферичног или игличастог облика и различитим запреминским уделом и величином карбида W, типа еутектичког (W_2C -WC) или макрокристалног (WC) [44-47]. Испитивања на абразију показују знатно већи индекс код композита са макрокристалима карбида него код еутектичког. Међутим, у присуству удара при експлоатацији, карбиди сферичног облика показују већу трајност. И поред више цене у односу на класичне поступке и додатне материјале, овај поступак ће налазити све већу примену, првенствено због дужег радног века делова [4, 8,12, 37-41].

2.3. Примена нумеричке симулације за анализу рада комплексних постројења

Постоји веома обимна литература која описује резултате примене нумеричких метода у симулацији струјања у различитим индустријским постројењима. У оквиру овог прегледа биће дат кратак приказ изабраних, доступних радова који се односе на примену нумеричких метода симулације струјања у постројењима за припрему угља, у млиновима термоелектрана, као и у другим индустријским постројењима. [7, 8, 61-64].

Модерни термоенергетски системи представљају комплексна постројења у којима се одвијају разноврсни, сложени и међусобно зависни процеси. Карактер вишефазног струјања у вентилационом млину, у којем учествују компоненте ваздуха,

угљене прашине, песка и осталог, је у директној вези са ефикасношћу рада вентилационог млина, као и са процесом хабања виталних делова постројења. Промена квалитета и параметара струјања аеросмеше директно утиче на промене у ложишту, односно у котловском постројењу. Осим на ефикасност рада, ове промене директно се одражавају и на емисију гасова који су продукти сагоревања. Због тога је веома важно да се детаљно проучи струјање и да се изврши његова оптимизација. Постоје различите експерименталне методе испитивања струјања [8, 64-67].

Нумеричке симулације се користе у свим гранама науке и технике за симулацију струјања у области механике флуида, аеродинамике, хидродинамике, термотехнике, сагоревања, вишефазних струјања, у фармацији, хемијској индустрији, термоенергетици, спорту итд. Њихова примена представља веома значајну алтернативу лабораторијским испитивањима, а посебно је актуелна када су неопходна сложена испитивања на комплексним постројењима термоелектрана [7, 8, 64-69].

У досадашњим модернизацијама и реконструкцијама вентилационог млина и каналима аеросмеше ТЕ није коришћена нумеричка симулација струјања, иако се ова метода показала као веома корисна и у свету веома често примењивана. У доступној литератури могу се наћи подаци да је група стручњака из Института Винча и Машинског факултета у Београду извршила нумеричко моделирање и симулацију процеса у ложишту за сагоревање угљеног праха енергетског котла А2 у ТЕНТ-у (ТЕ Никола Тесла). Симулација је изведена на основу 3Д математичког модела процеса, а као радни параметри су изабрани финоћа млевења угљеног праха и квалитет угља [70-75].

Приликом нумеричке анализе користе се временски зависне Navje-Stokes једначина и једначине енергија које су решаване са циљем да се истраже карактеристике флуида за пренос топлоте у специјалним каналима. Три различита типа канала, дводимензионалних геометрија, (синусног облика, троугласте и у облику лука) су разматрани. Сви канали су јединственог облика и имају исте геометријске димензије. Периодични гранични услови користе се у временском развоју протока у каналима. Претпоставља се да је струјање стационарно до критичног Рејнолдсовг броја, који зависи од геометријске конфигурације. За вредности изнад критичног броја Рејнолдса, једино могуће је осцилаторно струјање смеше. Као резултат ове нумеричке симулације добијени су резултати који показују да долази до повећаног мешања између основног и струјања течности у непосредној близини зида, чиме се повећава и

пренос топлоте. За исте геометријске димензије, проток постаје нестабилан на релативно нижим Рејнолдс бројевима у каналу лучног облика [75-77].

У основи динамичке симулације бирају се параметри који описују тродимензионално струјање које има исти Рејнолдсов, Стоксов и Фраудов број као и реално струјање у млиновима. Претпостављено је да све честице угљеног праха имају сферни облик. За одређивање струјних карактеристика гасне компоненте и чврсте фазе коришћен је Ојлер Лагранжов приступ, који узима у обзир ефекте турбуленције и градијента притиска [75].

Правилно регулисање расподеле угља се сматра од суштинског значаја за добијање адекватне концентрације угљеног праха у зони у којој се уводи плазма. Овај услов се може ефикасно постићи увођењем фиксних скретача, жалузина испред отвора канала горионика. У раду се приказује нумеричка симулација двофазног струјања смеше ваздух-угљени прах у каналу за мешање (каналу аеросмеше), користећи софтверски пакет FLUENT 6.3. Нумерички експерименти раде се на основу претпоставке монодисперзне чврсте фазе са честицама у распону од 45 μm до 1200 μm [64-69]. Добијени резултати показују да величина честица угља значајно утиче на дистрибуцију ове чврсте фазе. Фине честице, скоро у потпуности следе струјне линије континуиране фазе, веће честице, које се одбијају од жалузина скрећу у горионик, у зони термичке плазме [64-75]. Нумеричка симулација је показала да се увођењем жалузина тешко постиже жељена концентрација мешавине и фазе у зони горионика. Уградња стационарних жалузина испред отвора горионика показала се као веома ефикасан начин да се у секундарној фази сепарације, спречи застој у отвору за ваздух и на утицај на ток континуиране фазе [64-69, 75-78].

CFD анализа је коришћена приликом истраживања која су спроведена ради оптимизације парног котла јединице 2 у ТЕ "Ptolemais", Птолемаиду, Грчка, која има проблем са веома нестабилним сагоревањем и велику осцилацију притисака мешавине. [75-79]. Експериментални систем је развијен на основу нумеричких симулација и користи се за откривање осцилација притиска и утврђивање нестабилног рада котла. Добијени сигнали пизео-електричних мерења, дуж горионика парног котла и њихова обрада је допринела да се открије порекло нестабилног рада котла. Тиме се овај приступ се показао као веома важан алат за успостављање правилног рада [78-82].

Дистрибуција концентрације угљеног праха у канале горионика, посебно тамо где су смештени плазма горионици је била кључна за имплементацију плазма система за течно гориво, као подршка котловима који раде са угљеним прахом [4, 75].

Примена CFD анализе за могућност повећања концентрације честица угљеног праха у пределу канала доњег горионика котла ТЕ Никола Тесла - А1 помоћу регулације затварача (клапни), поред нумеричке симулације урађена су и експериментална испитивања. Урађено је испитивање и дистрибуције двофазне мешавине гаса и димних честица у канале горионика са инсталираним системом ролетни у котлу ТЕ Никола Тесла - А1. Урађена су експериментална истраживања за верификацију предложеног математичког модела за анализирано двофазно струјање. Добијени резултати за поље фазне брзине гаса, концентрације честица угљеног праха, и поље брзина јасно показују зависност између положаја ролетне и масеног протока честице угља и дистрибуцију концентрације на излазном пресеку канала горионика [81-84].

Примена CFD нумеричке симулације, је коришћена у фази пројектовања млина за угаљ и депо фабрике цемента која се налази на јадранској обали. Анализа температурне дистрибуције је урађена са циљем да се дозира правилна струја ваздуха, да не дође до повећања температуре и до samozапљивања. Анализирањем струје ваздуха за расхлађивање кроз млин за угаљ урађено је са циљем, да се нађу прави услови за природну вентилацију и да се избегне претерана температура у згради. Резултати нумеричке симулације су показали да се оба циља могу постићи са природном вентилацијом [83-86].

2.4. Експериментална испитивања превлака отпорних на хабање

Анализом литературе може видети да употреба превлака (материјала) захтева добро познавање њихових својства, која се испитивањима могу нумерички изразити и стандардизовани [7-9]. Постоји велики број метода за испитивање које се могу наћи у стандардима и радовима, а које се употребљавају за мерење механичких својства материјала. Зависно од својстава која се желе испитивати, ради се и одабир методе испитивања. Једна од подела испитивања је:

- Испитивања механичких својства: чврстоћа, жилавост, статичка и динамичка издржљивост.
- Испитивања технолошких својстава: заварљивост, ливење, машинска обрада итд.

- Испитивања методама разарања, узорак се разара и није више употребљив. У ову групу спадају поступци испитивања за одређивање механичких својстава и технолошких својстава.
- Испитивања методама без разарања, узорак се не разара те се ови поступци могу применити на деловима који ће се и даље употребљавати. Најчешће методе испитивања без разарања су: радиографија, ултразвучна, магнетска и пенетрирајућа метода, различите оптичке методе итд.

Експериментално испитивање превлака у оквиру ове дисертације има за циљ да верификује резултате нумеричких метода за анализу рада вентилационих млинова. Веома је важно да се пре nanoшења антихабајућих превлака на радне делове, ураде и одређена експериментална истраживања шире палете антихабајућих материјала [7-9]. Приликом испитивања потребно је обратити пажњу на праћење дефинисаних препорука или спецификација, које се између осталог односе на технологију nanoшења и на термичку обраду пре и после nanoшења антихабајућих превлака.

У домаћој литератури, у много мањем обиму, могу да се нађу подаци о поступцима nanoшења антихабајућих превлака и других заштитних слојева [7-9]. Међутим, и поред присутних података, мора се увек имати у виду да је nanoшење антихабајућих превлака јединствен процес с обзиром на различитост услова експлоатације и технологија које су прилагођене конкретном делу.

Процес оптимизације радних делова у индустрији мора да у буде у корелацији експлоатационим условима. Пре примене превлака у експлоатационим условима потребно их је тестирати не би ли се одабрале адекватне, која задовољавају радне услове [11-17]. Један од начина је коришћење моделних испитивања које могу да обухватају: триболошка, механичко-структурна испитивања и друга са којима ће се добити адекватне смернице које ће помоћи одабиру додатног материјала. Један део радова који се могу наћи се бави проблематиком ревитализације грађевинских и рударских машина, али то су углавном стручни радови где је приказан след операција приликом ревитализације. У оквиру тих радова се углавном користе препоруке произвођача за те одабране материјале и ретко се врше додатна тестирања [7,19].

Примена антихабајућих превлака је нашла велику примену за поправку зуба на багерима. Овакав приступ испитивања је приказан приликом наваривања зуба утоварне кашике, будући да су наведене кашике израђене ливењем од условно заварљивог челика потребно је одабрати посебну технологију nanoшења антихабајуће

превлаке. У том циљу су изведена моделна испитивања [24-27]. Резултати моделних испитивања, омогућили су да се изабере најповољнија технологија наваривања и она "пренесе" на реалне делове. На моделима су изведена бројна наваривања у једном и више пролаза (слојева), без предгревања и са предгревањем [24,25]. Из тако наварених модела-узорака, сечењем су припремљени металографски узорци, односно блокови за триболошка испитивања. На урађеним узорцима је мерена тврдоћа и оцењивана микроструктура карактеристичних зона навара. Ова испитивања су показала, да мерењем ширине трага хабања, може да се закључи знатно већу отпорност на хабање имају наварени слојеви (посебно они остварени без предгревања) у односу на основни материјал, што указује на сложен поступак избора технологије наваривања и додатних материјала предвиђених за реалне технолошке услове рада зуба кашика утоваривача, који се могу применити и на друга индустријска постројења [7, 19, 20-25]. Примена моделних испитивања се користи приликом санација објеката, израде нових објеката и најбољи је начин да се изврши анализа и одабир материјала и поступка.

2.5. Повећање експлоатационог века делова изложених хабању у термоенергетским и другим комплексним постројењима

Повећање експлоатационог века неког комплексног постројења представља јединствен процес и не постоји стандардна процедура за примену најоптималније технологије за продужетак радног века компоненената [7, 20-26].

Оптимизација процеса рада постројења, у овом случају вентилационог млина се постиже неизбежном корелацијом технолошког процеса и стања радних делова. Одступање од захтеваних параметара рада може увелико бити и последица оштећења радних делова, на шта указује величина интервала вентилационог дејства млина [9-11].

Задњих неколико година све интензивније се у свету ради на освајању и провери нових технологија наношења антихабајућих превлака ради повећања радног века делова машина изложених веома интензивним условима рада. Очекује се да ће наредне године донети нове технологије, не само са техничко – технолошког аспекта већ и са економског.

Расположиви подаци показују да у нашој земљи наношење антихабајућих превлака тек у последњих неколико година у појединим областима (грађевинарство,

рударство) налази своју примену као и настојања да се изведу детаљнија научна истраживања у овој области [27-34].

Избор оптималне технологије наношења антихабајућих превлака на зубе утоварних кашика утоваривача, рокопача и багера, који раде у условима интензивног абразивног хабања је најчешћи пример примене ових технологија. Будући да су радни делови тих машина израђени најчешће ливењем од условно заварљивог челика, то је потребно одабрати посебну технологију наваривања [20-26, 35-39]. Након моделских испитивања која обухватају структурно-механичка испитивања, помоћу којих се врши избор најоптималније технологије спроведено је да се та технологија пренесе на реалне делове. Пре експлоатације, уграђени су наизменично, делови пресвучени превлакама и оригинални делови. После одређеног времена рада у истим радним условима, анализиран је степен похабаности оригиналних и делова са превлакама. На овај начин било је могуће да се установи најповољнија технологија, узимајући у обзир не само техничке већ и економске факторе [6, 8, 27, 28]. Досадашња испитивања су показала да век трајања делова са превлакама вишеструко надмашује век нових делова. Осим тога, на овај начин постижу се велике материјалне уштеде, повећава продуктивност, смањује време застоја машина и асортиман и количина неопходних резервних делова [8, 24-28].

3. НУМЕРИЧКА СИМУЛАЦИЈА

3.1. Детаљан опис и тематика у области нумеричке симулације вишефазног струјања у систему вентилациони млин – канал аеросмеше

У оквиру ове дисертације активности, везане за истраживања у области симулације вишефазног струјања, одвијале су се у више фаза.

Пре свега, изведена је анализа проблема присутних у раду система вентилациони млин - канал аеросмеше, везаних за појаву хабања виталних делова (у овом случају усисних плоча) и припрема за нумеричку симулацију. Детаљна анализа струјања које настаје услед ротације радног кола млина је основа за све друге активности односно за избор одговарајуће антихабајуће превлаке. Присуство гасовитих и чврстих фаза, са различитим гранулацијама, механичким и хемијским особинама ствара вишефазно струјање, које доводи до низа интерактивних утицаја са виталним деловима вентилационог млина, до њиховог хабања и потпуног оштећења [5-8].

Поред анализе струјања у самом млину и струјање у каналу аеросмеше је веома сложено и представља важан фактор у процесу хабања осталих, виталних делова млина. Правилно усмеравање струјања може у извесној мери да смањи дејство хабања које је видљиво у свим сегментима унутрашњости млина [5].

Дефинисање најважнијих параметара (гранични услови, параметри смеше, интеракције присутних фаза, турбулентни модели итд.) за адекватну нумеричку симулацију је први важан корак на основу кога се дефинишу модел симулације, параметри нумеричке мреже, критеријум конвергенције итд. Ово је темељ на којем се даље развија комплетна методологија истраживања и од којег зависи квалитет добијених резултата.

Нумеричка симулација је изведена на систему вентилациони млин – канал аеросмеше са центрифугалним сепаратором у ТЕ Костолац Б. На основу пројектне документације генерисана је геометрија која представља нумерички домен који обухвата млин и канал аеросмеше до улаза у горионике. Сложености овог проблема доприноси неопходност верног репродуковања реалног простора струјања у нумерички домен са свим детаљима који описују компоненте млина и који утичу на промене вишефазног струјања [8]. Термоелектрана Костолац Б изграђена је у периоду 1984-1991 и не постоји документација о пројектованом и реализованом стању у дигиталном облику, као ни подаци о изведеним модернизацијама и реконструкцијама. Било је неопходно извршити дигитализацију постојећег стања у форми која се може адекватним софтвером унети у изабрани модел нумеричке симулације.

У оквиру хардверских ограничења генерисана је оптимална мрежа са аспекта прилагођавања густине мреже променама геометрије и променљивих величина вишефазног струјног поља (брзина, притисак, температура, запремински удео компонената). Параметри нумеричке мреже знатно утичу на резултат симулације. Резултати истраживања у свету показују да је осим густине мреже, веома битан и утицај облика ћелија мреже.

Следећа активност је била избор мултифазног модела (на основу Стоксовог броја) и специфицирање броја фаза присутних у струјању. Ово се темељи на претходним активностима, које након детаљне анализе постојећих услова струјања су омогућиле: да се тачно специфицира број фаза, да се одреди просторна расподела фаза у нумеричком простору и да се на основу тога израчуна Стоксов број. Овај број је важан за струјања у случајевима када се могу занемарити инерцијалне, а морају узети у обзир вискозне силе и силе гравитације да би се постигла динамичка сличност

струјања. За нумеричке симулације струјања, какве постоје у систему вентилациони млин канал аеросмеше, неопходно је, узимајући у обзир добијени Стоксов број и критеријуме везане за његову величину, да се изврши избор мултифазног модела симулације струјања.

Дефинисање секундарних, чврстих фаза је активност која је зависила од изабраног модела вишефазног струјања. У случају најсложенијег Ојлеровог модел узимају се у обзир величина честица секундарних фаза, грануларна и фриксиона вискозност а могуће је укључити силу отпора, силу узгона и силу од придружених маса.

Избор турбулентног модела размотрио је најоптималније моделе. Коришћен је $k-\epsilon$ турбулентни модел или модел Рејнолдсових напона, а у оквиру ових, један од вишефазних модела који ће бити изабран на основу величине турбулентног трансфера између фаза. Укључивање запреминских сила било је неопходно у нумеричкој симулацији вишефазног струјања. Утицај гравитације на кретање секундарних фаза укључен је у нумеричку симулацију, како би се обезбедила потпуна сличност симулације са реалним струјањем [5-9].

Гранични услови се специфицирају за мешавину и сваку од појединих фаза, а дефинишу се на улазу у млин и на излазима из канала аеросмеше. Њима су обухваћене брзине или масени протоци као и запремински удели секундарних фаза на улазу, као и притисци на излазу. Дефинисани су почетни услови у целом нумеричком домену за све струјне величине и све секундарне фазе. Пратила се конвергенција решења преко грешака десних страна у једначинама које описују струјање. Након тога извршена је анализа добијених резултата. Урађен је детаљан приказ и анализа поља вектора брзина и поља притиска, а приказана је и нумеричка визуализација струјања.

Струјна слика вишефазног струјања омогућила је предлог модификације која ће довести до оптимизације струјања и продужетка радног века радних делова. Модификација геометрије и генерисање нове мреже биће изведено након унетих измена. Предложене модификације, односно њихова ефикасност је проверена кроз поновљену симулацију [8].

Струјања која се јављају у природи и техници скоро увек представљају мешавине различитих фаза (чврсте, течне и гасовите). Иако су физичке фазе материје гасовито, течне и чврсто стање, сам концепт фаза у системима мултифазних струјања може се схватити у ширем смислу као мешавина тих фаза која није понекад најјасније дефинисана. Мултифазно струјање се може дефинисати као препознатљива класа

материјала која има како одређена инерцијална својства, тако и интеракцију са носећим струјањем [11-15]. Делови чврсте фазе од истог материјала, али различитих величина, особина (тврдоће, чврстоће, абразивности) могу се третирати као различите фазе, јер сваки скуп делића исте величине и особина имаће слично динамичко понашање у односу на струјно поље [11,12].

3.2. Модели генерисања струјања у софтверу ANSYS FLUENT 12.1

Мултифазно струјање се може, са аспекта режима струјања поделити у четири категорије:

- Струјања у којима су фазе гас-течност или течност-течност. Ова струјања обухватају дискретне гасовите или течне мехурове у непрекидном течном флуиду, затим кретање дискретних капљица у непрекидној гасној средини, као и струјање у слојевима где су две течности које се не мешају раздвојене јасно дефинисаном површином. Када се у гасу налази мала количина течности, као што је случај са маглом и облацима, такве мешавине се називају аеросоли [5-9].
- Струјања у којима су фазе гас-чврста честица. Овоме припада кретање дискретних чврстих честица у непрекидној гасној средини, затим пнеуматски транспорт где се у зависности од Рејнолдсовог броја, оптерећења честице и њених особина, јављају различити типови струјања као што су хомогено струјање и струјање са великим мехуровима. Овај тип обухвата и струјање у флуидизованом слоју где се у вертикални цилиндар у коме су чврсте честице, уводи гас који односи те честице, а у зависности од протока гаса стварају се гасни мехурови који се пењу кроз слој појачавајући мешање у њему. У зависности од величине честица, њихово кретање може бити брауновско или небрауновско. Код веома малих честица услед термичких ефеката долази до брауновског кретања, док је за веће честице доминантан утицај хидро и аеродинамичких сила, које узрокују небрауновско кретање [5-10].
- Струјања у којима су фазе течност-чврсте честице. Ова струјања обухватају транспорт чврстих честица у течностима, при чему се њихов карактер мења у зависности од особина чврстих честица у односу на особине течности. Овде припада хидротранспорт са густо расподељеним чврстим честицама у

непрекидном течном флуиду, и седиментација где се у почетку налази мешавина униформно распршених честица, да би током времена на дну стварао талог, на врху јасна раздвојна површина, а у средини зона постепеног таложења [5-10, 64-67].

- Струјања са три фазе која представљају комбинације горе наведених [7].

Примери за ове режиме струјања су:

- струјања са мехуровима обухватају кавитацију, испариваче, флотацију, абсорбере, обогаћивање угљен диоксидом
- струјања са капљицама се јављају у коморама сагоревања, криогеним пумпама, сушарама, испаривачима, при хлађењу гасом
- струјања у слојевима или са слободном површином појављују се при кључању и кондензацији у нуклеарним реакторима, претакању течности у танкерима
- пнеуматски транспорт обухвата транспортовање цемента, житарица, металног праха
- флуидизовани слој у коме се одвија сагоревање у реакторима
- струјања засићена честицама јављају се код циклонских сепаратора, сакупљача прашине
- хидротранспорт обухвата обраду руда, биомедицинске и физичко-хемијске системе
- седиментација се јавља при обради руда
- струјања при којима се јављају велики мехурови у цевима и резервоарима

Софтвер ANSYS FLUENT 12.1 користи два прилаза за нумерички прорачун вишефазних струјања. Први је познат као Ојлер-Лагранж, а други као Ојлер-Ојлер приступ. [5] Код првог се носећа (примарна) фаза сматра непрекидном средином, чије струјање се одређује решавањем временских Навије-Стоксових једначина, док се понашање распршене (секундарне) фазе, добија праћењем великог број честица те фазе кроз израчунато струјно поље носећег флуида [5-7]. Путање честица се израчунавају у задатим интервалима у току прорачуна струјања примарне фазе. Распршена и носећа фаза могу размењивати масу, количину кретања и енергију. Основна претпоставка у овом моделу је да запремински удео распршене секундарне фазе буде испод 10%, иако маса распршене фазе може бити чак и већа од масе примарне фазе [64-67].

У приступу Ојлер-Ојлер, различите фазе математички су моделиране као непрекидне средине које се међусобно допуњавају, пошто запремина једне фазе не

може садржати другу фазу, а то омогућује увођење појма запреминских удела фаза. Претпоставља се да су ови запремински удели фазе непрекидне функције простора и времена и да је њихов збир једнак јединици [5,63-67]. На сваку од фаза примењују се једначине одржања које дају систем једначина који има сличну структуру за све фазе. Ови системи се затварају конститутивним релацијама које се добијају емпиријски, а у случају грануларних струјања применом кинетичке теорије.

У приступу Ојлер-Ојлер постоје три модела вишефазних струјања:

- модел запремине флуида (ВОФ),
- модел мешавине и
- Ојлеров модел.

ВОФ модел се користи код струјања у слојевима, струјања са слободном површином, пуњењу и истакању флуида из резервоара, кретању великих мехурова у течности као и стационарном или нестационарном одређивању границе између течности и гаса. [5-8]

Модел мешавине је упрошћени мултифазни модел који се може користити за струјања у којима се фазе крећу различитим брзинама, али се претпоставља постојање локалне равнотеже на малим дужинским скалама. Такође, спрезање између фаза треба да буде јако. Овај модел може да обухвати n -фаза, решавајући једначине континуитета, промене количине кретања и енергије за мешавину, једначине запреминске концентрације за све секундарне фазе и алгебарске једначине за релативне брзине. Модел омогућава учешће грануларне секундарне фазе и израчунава све особине ових фаза [74]. Модел мешавине представља добру замену за пун Ојлеров вишефазни модел у неким случајевима, као што је широка расподела чврсте фазе, или када су закони интеракције између фаза непознати. Овакав модел, мада једноставнији, може у тим случајевима да релевантна решења, решавајући при томе мањи број променљивих [8].

Ојлеров модел (пун Ојлер) је најсложенији од свих модела мултифазног струјања у софтверу ANSYS FLUENT 12.1. У том моделу решавају се додатне једначине континуитета и промене количине кретања за сваку фазу посебно. Фазе могу бити течности, гасови и чврсте честице у било којој комбинацији [5-10]. Овде се Ојлеров метод одређивању струјног поља користи не само за примарну, већ и за секундарне фазе, за разлику од Ојлер-Лагранжовог приступа где се за примарну фазу

користи Ојлеров метод, а за секундарну фазу Лагранжов метод [5]. Спрезање између фаза обухваћено је преко притиска и коефицијената међуфазне размене, а начин на који се они добијају зависи од типова фаза које учествују у струјању. Тако се за струјања са чврстим делићима, притисак и коефицијент међуфазне размене добијају применом кинетичке теорије. У Ојлеровом моделу број секундарних фаза теоријски је ограничен на 20, а практично ограничење условљено је расположивом меморијом и понашањем конвергенције решења [5-8].

3.3. Нумеричка симулација струјања у систему вентилациони млин - канал аеросмеше

Термоелектране представљају комплексна постројења у којима се одвијају разноврсни, сложени и међусобно зависни процеси. Карактер вишефазног струјања у вентилационом млину ТЕ Костолац Б, у којем учествују компоненте ваздуха, угљене прашине, песка и осталог, је у директној вези са ефикасношћу рада вентилационог млина, као и са процесом хабања виталних делова постројења. Промена квалитета и параметара струјања аеросмеше директно утиче на промене у ложишту, односно у котловском постројењу. Осим на ефикасност рада, ове промене директно се одражавају и на емисију гасова који су продукти сагоревања. Због тога је веома важно да се детаљно проучи струјање и да се изврши његова оптимизација [7,8]. Постоје различите експерименталне методе испитивања струјања. Специфични услова мерења веома често узрокују отказ мерне опреме, па се све више уводе бесконтактне методе мерења, или мерења на моделима вентилационих млинова у лабораторијским условима. Нумеричке симулације струјања су најекономичнији, најбржи и веома поуздан метод сагледавања комплексне проблематике вишефазног струјања и оптимизације радних делова вентилационог млина. Оне нуде потпуну слику струјања на основу чега се може изабрати најбоље решење које ће довести до жељене оптимизације [5].

У циљу оптимизације рада млина, извршена је анализа постојећег стања и нумеричка симулација вишефазног струјања. Резултати нумеричке симулације указали су на критичне тачке које су у највећој мери изложене хабању. На основу извршене симулације предложене су мере везане за хабање радних делова млина и модификацију површина радних делова изложених хабању. Модификација изабраног дела (усисних (носних) плоча извршена је на основу резултата моделских експерименталних испитивања и дефинисаних технологија наношења антихабајућих превлака [74].

3.4. Избор мултифазног модела

Почетни корак у решавању неког проблема мултифазног струјања софтвером ANSYS FLUENT, састоји се у избору одговарајућег модела. За нека мултифазна струјања више модела могу дати релевантне резултате, па избор зависи од расположивих рачунарских ресурса [5-8]. Међутим генерално, Ојлер-Лагранж приступ не користи се за мултифазна струјања у којима је запреминска концентрација распршене фазе већа од 10%. У тим случајевима мора се користити Ојлер-Ојлер приступ са моделом запремине флуида, мешавине или Ојлеровим моделом. Код неких струјања као што су она у слојевима или код истакања и пуњења резервоара, избор модела запремине флуида се одмах намеће као природан. Међутим за друге врсте струјања избор модела није тако очигледан, па се користе неки параметри од чијих вредности зависи избор [5]. Основни параметар који директно утиче на интеракцију између фаза је оптерећење честица и дефинисан је као:

$$\beta = \frac{\alpha_d \rho_d}{\alpha_c \rho_c} \quad (3.1)$$

где је:

α - запреминска концентрација фазе,

ρ - густина фазе,

индекс d - распршена или секундарна фаза,

индекс c - примарна или носећа фаза.

Такође се дефинише однос густина фаза као:

$$\gamma = \frac{\rho_d}{\rho_c} \quad (3.2)$$

Ови параметри се користе за процену средњег растојања између честица распршене фазе, од чије вредности зависи на који начин ће та фаза бити третирана [5-8]. Процена релативног растојања честица секундарне фазе дата је изразом:

$$\frac{L}{d_d} = \left(\frac{\pi}{6} \frac{1 + \kappa}{\kappa} \right)^{1/3} \quad (3.3)$$

где је:

$$\kappa = \frac{\beta}{\gamma} \quad (3.4)$$

У анализи, коефицијент κ приближно има вредност $7.8 \cdot 10^{-5}$, тако да релативно растојање између чврстих честица (угљена прашина и песак) износи око $18.8 \mu\text{m}$, па се честице могу посматрати као изоловане. Ово са друге стране значи да је оптерећење дисперзних (секундарних) фаза веома ниско [5-8].

Зависно од оптерећења честица, степен интеракције између фаза дели се у три групе. Прва се односи на веома мала оптерећења честица, где је интеракција између фаза само у једном смеру, односно примарна или носећа фаза има утицај на честице распршене фазе преко силе отпора и турбуленције, док честице секундарне фазе немају практично никакав утицај на носећу фазу [8]. У овом случају тачне резултате дају Ојлер-Лагранж и Ојлер-Ојлер приступ са моделом мешавине и Ојлеровим моделом.

У другој групи су средња оптерећења, где је интеракција обострана, односно носећа фаза има утицај на честице распршене фазе преко силе отпора и турбуленције, док честице секундарне фазе утичу на примарну фазу углавном преко смањења средње вредности количине кретања. У овом случају применљиви су Ојлер-Лагранж и Ојлер-Ојлер приступ са моделом мешавине и Ојлеровим моделом, али се избор модела који највише одговара врши на основу Стоксовог броја, који се дефинише као однос времена одговора честице и времена одговора система. За вредности Стоксовог броја које су знатно мање од 1, честице ће блиско пратити кретање носеће фазе, и може се применити ма који од три претходно споменута модела. Ако су вредности Стоксовог броја веће од 1, распршене честице се крећу независно од струјања примарне фазе, па су применљиви само Ојлер-Лагранж приступ и Ојлеров модел у Ојлер-Ојлер приступу [5-7]. За вредности Стоксовог броја око 1, поново су применљива три раније споменута модела.

На основу оптерећења честица и запреминске концентрације секундарних фаза у анализи у вентилационом млину и деловима који воде ка ложиштима, могу се користити модел мешавине и Ојлеров модел из Ојлер-Ојлер приступа. Зато ће бити укратко изложене једначине одржања, као и једначине интеракције између фаза за ова два модела [5-8].

3.4.1. Модел мешавине

Модел мешавине дозвољава да се фазе међусобно допуњују, односно

запреминске концентрације α_p и α_q у контролној запремини (елементу запреминске мреже), могу имати било коју вредност између 0 и 1, зависно од дела запремине који заузимају фазе p и q . Овај модел дозвољава да се фазе крећу различитим брзинама, користећи концепт брзина клизања, а у случају да се узме иста брзина фаза, модел се своди на хомогено мултифазно струјање [5].

3.4.1.1. Једначина одржања масе

Основне једначине одржања постављају се за мешавину, па једначина континуитета има облик:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_m + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (3.5)$$

где је \vec{v}_m средња брзина мешавине:

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (3.6)$$

а ρ_m густина мешавине:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3.7)$$

док је α_k запреминска концентрација фазе k .

3.4.1.2. Једначина промене количине кретања

Једначина промене количине кретања за мешавину добија се сабирањем једначина промене количине кретања за све фазе и има следећи облик [5-8]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,r} \vec{v}_{dr,r} \right) \quad (3.8)$$

где је:

n - број фаза,

\vec{F} - запреминска сила која не обухвата силу земљине теже издвојену у засебан члан,

μ_m - вискозност мешавине.

Вискозност мешавине је:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (3.9)$$

док је $\vec{v}_{dr,k}$ релативна брзина фазе k у односу на брзину мешавине:

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (3.10)$$

3.4.1.3. Једначина одржања енергије

Једначина одржања енергије за мешавину добија се сабирањем једначина одржања енергије за све фазе, и може се изразити као [5-8] :

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (3.11)$$

где је k_{eff} ефективна проводљивост. Први члан на десној страни ове једначине представља трансфер енергије провођењем, док S_E укључује све друге запреминске изворе топлоте.

3.4.1.4. Релативна брзина (брзина клизања) секундарне фазе

Релативна, односно брзина клизања, дефинише се као брзина секундарне фазе p у односу на примарну фазу q [5]:

$$\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p - \vec{v}_q \quad (3.12)$$

С обзиром да је масена концентрација ма које фазе (k) дефинисана као:

$$c_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \quad (3.13)$$

то су релативна брзина секундарне фазе p у односу на мешавину и брзина клизања те фазе повезане следећим изразом:

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{pq} - \sum_{k=1}^n c_k \vec{v}_{qk} \quad (3.14)$$

Софтверски пакет ANSYS FLUENT за израчунавање брзине клизања користи се алгебарским формулацијама, у којима је основна претпоставка да се локална равнотежа између фаза мора постићи на малим дужинским скалама [5]. Најчешће се користи израз из 3.15 у којој је ова брзина одређена као:

$$\vec{v}_{pq} = \frac{\tau_p}{f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} \vec{a} \quad (3.15)$$

где је τ_p време релаксације честице дато изразом:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \cdot \mu_q} \quad (3.16)$$

d_p - пречник честице секундарне фазе p ,

\vec{a} - убрзање честице секундарне фазе.

Стандардна функција отпора узима се из [2], и има облик:

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0,15 \text{Re}^{0,687} \dots \text{Re} \leq 1000 \\ 0,0183 \text{Re} \dots \text{Re} \geq 1000 \end{cases} \quad (3.17)$$

Убрзање се изражава као:

$$\vec{a} = \vec{g} - (\vec{v}_m \cdot \nabla) \vec{v}_m - \frac{\partial \vec{v}_m}{\partial t} \quad (3.18)$$

У најједноставнијем алгебарском моделу убрзање честице дато је само убрзањем земљине теже и центрифугалним силама, док се време релаксације честице модификује тако да обухвати присуство других честица [5-7].

3.4.1.5. Једначина запреминске концентрације за секундарне фазе

Из једначине континуитета за секундарну (распршену) фазу p , може се добити једначина запреминске концентрације за ову фазу у облику:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (3.19)$$

3.4.1.6. Грануларне особине секундарне фазе

Концентрација чврстих честица је важан елемент у одређивању ефективне вискозности мешавине и у том случају се користи грануларна вискозност. Ова вискозност се јавља услед размене количине кретања чврстих честица при трансляцији и судару [5-8]. Смичућа вискозност чврстих честица добија се као збир вискозности услед судара $\mu_{s,col}$ и оне услед трансляције $\mu_{s,kin}$ [4]:

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} \quad (3.20)$$

3.4.2. Ојлеров модел

3.4.2.1. Запреминска концентрација

И у овом моделу фазе се међусобно допуњују, а закони одржања масе и количине кретања су испуњени за сваку од фаза. Ако је α_q запреминска концентрација фазе q , запремина ове фазе [5-10]:

V_q дефинисана је као:

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (3.21)$$

где важи да је: $\sum_{q=1}^1 \alpha_q = 1$

Такозвана ефективна густина фазе q је:

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q \quad (3.22)$$

где ρ_q означава физичку густину фазе q .

3.4.2.2. Једначина континуитета

Једначина континуитета за фазу q има облик:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (3.23)$$

где је \vec{v}_q брзина фазе q , а \dot{m}_{pq} карактерише пренос масе од фазе p на фазу q , док \dot{m}_{qp} карактерише пренос масе од фазе q на фазу p , и у општем случају ове величине као и механизми услед којих се јављају, су различити [5-8]. Члан S_q представља извор масе за фазу q . Решење ове једначине за сваку од секундарних фаза заједно са условом да је збир запреминских концентрација свих фаза једнак јединици, омогућује одређивање запреминске концентрације примарне фазе. Овакав поступак је стандардан за мултифазна струјања у којима имамо различите флуиде или флуид и чврсте честице (грануле) [5].

3.4.2.3. Једначина промене количине кретања

За фазу q ова једначина у општем облику дата је као:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \tilde{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q}) \\ + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) \end{aligned} \quad (3.24)$$

где је $\tilde{\tau}_q$ тензор напона за фазу q , дат као:

$$\tilde{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \vec{I} \quad (3.25)$$

Сила \vec{F}_q обухвата све запреминске силе осим гравитације, $\vec{F}_{lift,q}$ представља силу узгона, \vec{F}_{vm} силу од придружених маса, а \vec{R}_{pq} је сила интеракције између фаза, која зависи од трења, притиска, кохезије и других ефеката, и за њу важи [5-7]:

$$\vec{R}_{pq} = -\vec{R}_{qp} \quad \text{и} \quad \vec{R}_{qq} = 0. \quad (3.26)$$

У софтверу ANSYS FLUENT за силу интеракције између фаза користи се израз следећег облика:

$$\sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \quad (3.27)$$

где је K_{pq} - коефицијент међуфазне размене количине кретања.

Сада ће бити мало детаљније размотрене сила узгона и сила од придружених маса.

3.4.2.4. Сила узгона

Сила узгона која делује на секундарну фазу може се израчунати у коришћеном софтверу. Ова сила јавља се углавном због градијента брзине у струјном пољу примарне (носеће) фазе и она ће бити значајнија само за веће честице, а занемарује се за веома мале честице или оне које су на врло малом растојању, као што је на пример флуидизовани слој [5-10]. Сила узгона која делује на секундарну фазу p у носећој (примарној) фази q , дата је у [5] као:

$$\vec{F}_{lift} = -0,5\rho_q\alpha_p(\vec{v}_q - \vec{v}_p) \times (\nabla \times \vec{v}_q) \quad (3.28)$$

Ова сила биће додата на десној страни једначине промене количине кретања за обе фазе, односно важиће [5-8]:

$$\vec{F}_{lift,q} = -\vec{F}_{lift,p} \quad (3.29)$$

3.4.2.5. Сила од придружених маса

Овај ефекат се јавља када секундарна фаза p убрзава релативно у односу на примарну фазу q и дат је у [5] као:

$$\vec{F}_{vm} = 0,5\alpha_p\rho_q\left(\frac{d_q\vec{v}_q}{dt} - \frac{d_p\vec{v}_p}{dt}\right) \quad (3.30)$$

где оператор $\frac{d_q}{dt}$ представља материјални извод фазе и има облик:

$$\frac{d_q(\phi)}{dt} = \frac{\partial(\phi)}{\partial t} + (\vec{v}_q \cdot \nabla)\phi \quad (3.31)$$

Сада једначина промене количине кретања, која се користи у софтверу за случај да су и примарна и секундарне фазе флуиди, постаје:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q\rho_q\vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q\rho_q\vec{v}_q\vec{v}_q) = & -\alpha_q\nabla p + \nabla \cdot \tilde{\tau}_q + \alpha_q\rho_q\vec{g} + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q}) \\ & + \sum_{p=1}^n K_{pq}(\vec{v}_p - \vec{v}_q) + \dot{m}_{pq}\vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp}\vec{v}_{qp} \end{aligned} \quad (3.32)$$

На основу, у софтверу се користи модел грануларног струјања за описивање струјања мешавине флуида и чврстих честица. Овај модел је добијен коришћењем аналогije између хаотичног кретања честица које се јавља услед њихових судара, и кретања молекула гаса, при чему се сматра да су честице чврсте фазе нееластичне. Као и у случају гаса, интензитет флукуација брзина честица, одређује напоне, вискозност и притисак чврсте фазе [5-8]. Кинетичка енергија повезана са флукуацијама брзине честица представљена је "псевдотермалном" или грануларном температуром која је пропорционална средњој квадратној брзини неуређеног кретања чврстих честица [5-10].

Једначина промене количине кретања за s -ту чврсту фазу има облик:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \tilde{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + (\vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{vm,s}) + \sum_{p=1}^N K_{ls}(\vec{v}_l - \vec{v}_s) + \dot{m}_{ls} \vec{v}_{ls} - \dot{m}_{sl} \vec{v}_{sl} \quad (3.33)$$

где је p_s притисак чврсте фазе s , $K_{ls}=K_{sl}$ је коефицијент размене количине кретања између фазе која представља флуид или чврсту фазу l и чврсте фазе s .

3.4.2.6. Коефицијенти међуфазне размене

За струјања у којима су фазе флуиди, претпоставља се да свака секундарна фаза формира капљице или мехурове. Од овога директно зависи како се сваки флуид повезује са одређеном фазом, односно у струјањима у којима су неједнаке количине два флуида, онај кога има у већој количини треба да се моделира као примарна, односно носећа фаза, пошто је вероватније да ће онај који се налази у мањој количини, да формира капљице или мехурове. У овом случају општи облик за коефицијент размене количине кретања биће [5-8]:

$$K_{pq} = \frac{\alpha_q \alpha_p \rho_p f}{\tau_p} \quad (3.34)$$

где је f функција отпора, а τ_p карактеристично време честице, које је раније објашњено.

Готово све дефиниције функције отпора f укључују коефицијент отпора CD који се изражава у зависности од релативног Рејнолдсовог броја Re . Разлика у коефицијентима размене се јавља због различите зависности коефицијента отпора од релативног Рејнолдсовог броја. Model Schiller-а и Naumann-а [2] је стандардни модел у

софтверу, ако су фазе флуиди и за који су функција отпора и коефицијент отпора дати као [5-8]:

$$f = \frac{C_D R_e}{24} \quad (3.35)$$

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0,15R_e^{0,687})/R_e \cdots R_e \leq 1000 \\ 0,44 \cdots \cdots \cdots R_e \geq 1000 \end{cases} \quad (3.36)$$

Релативни Рејнолдсов број за примарну фазу q и секундарну фазу p добија се из:

$$R_e = \frac{\rho_q |\vec{v}_p - \vec{v}_q| d_p}{\mu_q} \quad (3.36)$$

Релативни Рејнолдсов број за секундарне фазе p и r добија се из сличног израза:

$$R_e = \frac{\rho_{rp} |\vec{v}_r - \vec{v}_p| d_{rp}}{\mu_{rp}} \quad (3.37)$$

где је:

$$\mu_{rp} = \alpha_p \mu_p + \alpha_r \mu_r \quad (3.38)$$

динамичка вискозност мешавине фаза p и r . У случају да су све фазе флуиди, најкомплетнији је модел Morsi-ја и Alexander-а где су функција отпора и коефицијент отпора дати као [5,9]:

$$f = \frac{C_D R_e}{24} \quad (3.39)$$

$$C_D = \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{R_e} + \frac{\alpha_3}{R_e^2} \quad (3.40)$$

при чему су вредности коефицијента α_1 , α_2 и α_3 константне у одређеном интервалу Рејнолдсовог броја, али се мењају од интервала до интервала [5-7].

За вишефазна струјања у којима је бар једна фаза чврста, коефицијент размене има облик:

$$K_{sl} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{\tau_s} \quad (3.41)$$

где је f функција отпора која се дефинише у зависности од модела, а τ_s је време релаксације чврсте честице дисперзне фазе дато као [5-8]:

$$\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu_l} \quad (3.42)$$

где је d_s пречник честице фазе.

У моделу Syamlal-О'Brien-а [10], који се користи за симулацију струјања у флуидизованом слоју, функција отпора и коефицијент отпора су дати као [5]:

$$f = \frac{C_D R_{es} \alpha_l}{24v_{r,s}^2} \quad (3.43)$$

$$C_D = \left(0,63 + \frac{4,8}{\sqrt{R_{es}/v_{r,s}}} \right)^2 \quad (3.44)$$

где је релативни Рејнолдсов број:

$$R_{es} = \frac{\rho_l |\vec{v}_s - \vec{v}_l| d_s}{\mu_l} \quad (3.45)$$

а индекс l односи се на флуидну фазу, док се s односи на чврсту фазу.

3.4.2.7. Притисак у чврстој фази

Када секундарна фаза представља чврсте честице, притисак у тој фази се израчунава независно од притиска у носећој (флуидној фази) и користи се за одређивање члана који обухвата градијент притиска чврсте фазе у једначини промене количине кретања за чврсту фазу. За чврсте честице користи се Максвелова расподела брзина, и уводи се појам грануларне температуре [5-8]. Притисак у чврстој фази има два члана, где први обухвата кинетичку енергију, а други се јавља услед међусобних судара чврстих честица:

$$p_s = \alpha_s \rho_s \Theta_s + 2\rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{o,ss} \Theta_s \quad (3.46)$$

где је:

e_{ss} коефицијент враћања при судару чврстих честица, и у софтверу се користи вредност 0.9,

$g_{0,ss}$ је функција радијалне расподеле,

Θ_s је грануларна температура.

Функција радијалне расподеле g_0 , је фактор корекције којим се модификује вероватноћа судара чврстих честица у случајевима када се повећава број честица чврсте фазе. Ова функција се може интерпретирати као бездименионо растојање између сферних честица чврсте фазе, тј [5-8]:

$$g_0 = \frac{s + d_p}{s} \quad (3.47)$$

где је s растојање између чврстих честица. Како за разређене растворе чврсте фазе $s \rightarrow \infty$, то је $g_0 \rightarrow \infty$, а за компактну чврсту фазу и $g_0 \rightarrow \infty$. У литератури не постоји јединствена формулација за функцију радијалне $s \rightarrow 0$ расподеле, па се у софтверу за једну чврсту фазу користи израз [74]:

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,\max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (3.48)$$

док се за више чврстих фаза најчешће користи:

$$g_{0,mm} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,\max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} + \frac{1}{2} d_m \sum_{k=1}^N \frac{\alpha_k}{d_k} \quad (3.49)$$

и где је:

$$\alpha_s = \sum_{k=1}^N \alpha_k \quad (3.50)$$

а k се односи само на чврсте фазе.

3.4.2.8. Смицајни напони у чврстој фази

Слично као код модела мешавине и у моделу Ојлера се смичућа вискозност чврстих честица добија се као збир вискозности услед судара $\mu_{s,col}$ [5] и оне услед

транслације $\mu_{s,kin}$ [64-67], а додаје се компонента трења која обухвата виско-пластични прелаз који се јавља у случају да чврста фаза достигне максималну запреминску концентрацију:

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr}. \quad (3.51)$$

Вискозност услед судара моделирана је у [3] као:

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\Theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.52)$$

док је она услед транслације:

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_s d_s \rho_s \sqrt{\Theta_{ss} \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss}) (3e_{ss} - 1) \alpha_s g_{0,ss} \right] \quad (3.53)$$

3.4.2.9. Једначина одржања енергије

За описивање закона одржања енергије у Ојлеровом моделу, за сваку фазу се постављају једначине промене специфичне енталпије, у облику:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q h_q) = -\alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{\tau}_q \cdot \vec{v}_q) - (\nabla \cdot \vec{\tau}_q) \cdot \vec{v}_q - \nabla \cdot \vec{q}_q + S_q + \\ \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}) \end{aligned} \quad (3.54)$$

где је h_q специфична енталпија фазе q , \vec{q}_q топлотни флуks, S_q обухвата изворе енталпије (радијација, хемијске реакције итд), Q_{pq} је интензитет размене топлоте између фазе p и фазе q , док h_{pq} представља међуфазну енталпију (нпр. енталпија паре на температури капљица, у случају испаравања) [5]. Заједно, други и трећи члан на десној страни једначине представљају функцију дисипације, односно рад тангенцијалних сила који се претвара у топлоту. За размену топлоте морају важити услови локалне равнотеже:

$$Q_{pq} = -Q_{qp} \text{ i } Q_{qq} = 0. \quad (3.55)$$

Претпоставља се да је размена енергије између фаза функција разлике температура тих фаза [5-7].

$$Q_{pq} = h_{pq} (T_p - T_q), \quad (3.56)$$

где је h_{pq} коефицијент прелаза топлоте између фазе p и фазе q . Овај коефицијент се изражава у зависности од Nusselt-овог броја фазе p као [5-8]:

$$h_{pq} = \frac{6k_q \alpha_p \alpha_q N_{u_p}}{d_p^2} \quad (3.57)$$

Овде је k_q термичка проводљивост фазе q , а Nusselt-ов број у случају да су обе фазе флуиди, има облик дат у [3.58],

$$N_{u_p} = 2,0 + 0,6R_{e_p}^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3.58)$$

где је Re_p релативни Рејнолдсов број у коме је за референтну дужину узет пречник делића флуида p , док је Pr Прантлов број фазе q , дат као [5]:

$$Pr = \frac{c_{p_q} \mu_q}{k_q} \quad (3.59)$$

3.4.2.10. Турбулентни модели

За описивање ефеката турбулентних флукуација брзине и скаларних величина користе се различити модели, који морају да затворе систем парцијалних једначина. У поређењу са једнофазним струјањима, моделирање турбуленције у вишефазним струјањима је знатно компликованије, јер се у једначинама промене количине кретања јавља велики број чланова који се моделирају. У софтверу FLUENT уграђени су k - ϵ модел и модел Рејнолдсових напона. За модел k - ϵ постоје три опције: турбулентни модел мешавине, дисперзни турбулентни модел и модел турбуленције за сваку фазу. Код турбулентног модела Рејнолдсових напона постоје две опције: турбулентни модел мешавине и дисперзни турбулентни модел [5-10].

3.4.2.11. k - ϵ турбулентни модел мешавине

Ово је стандардни модел, и представља уопштавање k - ϵ модела за једнофазно струјање. Применљив је у случајевима када су фазе јасно раздвојене, за струјање у слојевима и када је однос густина фаза близак 1. У свим овим случајевима, коришћење особина мешавине и брзине мешавине је довољно да потпуно обухвати важна својства турбуленције у вишефазном струјању. Кинетичка енергија турбуленције k и

дисипација турбуленције ε у овом моделу дати су у облику две парцијалне диференцијалне једначине које описују транспорт ових величина [5, 64-67]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m k) &= \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \varepsilon) &= \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon) \end{aligned} \quad (3.60)$$

при чему се густина и брзина мешавине израчунавају из:

$$\rho_m = \sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i \quad (3.61)$$

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i \vec{v}_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i} \quad (3.62)$$

Турбулентна вискозност дата је као:

$$\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.63)$$

а генерисање кинетичке енергије турбуленције одређује се из:

$$G_{k,m} = \mu_{t,m} \left(\frac{\partial v_{m,r}}{\partial x_j} + \frac{\partial v_{m,j}}{\partial x_r} \right) \frac{\partial v_{m,r}}{\partial x_j} \quad (3.64)$$

3.4.2.12. к- ε турбулентни модел дисперзне фазе

Ово је модел који одговара вишефазним струјањима у којима је запреминска концентрација секундарне фазе мала. У том случају се судари између честица могу занемарити, а турбуленција примарне (носеће) фазе има највећи утицај на хаотично кретање секундарне фазе, тако да се флукуације величина секундарне фазе могу изразити у зависности од главних карактеристика примарне фазе. Модел је применљив када постоји једна примарна непрекидна фаза, а остатак су распршене секундарне фазе мале запреминске концентрације [5-10].

За непрекидну (носећу) фазу кинетичка енергија и дисипација турбуленције биће:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q k_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{U}_q k_q) &= \nabla \cdot \left(\alpha_q \frac{\mu_{t,q}}{\sigma_k} \nabla k_q \right) + \alpha_q G_{k,q} - \alpha_q \rho_q \varepsilon_q + \alpha_q \rho_q \Pi_{k,q} \\
\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \varepsilon_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{U}_q \varepsilon_q) &= \nabla \cdot \left(\alpha_q \frac{\mu_{t,q}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_q \right) + \alpha_q G_{\varepsilon,q} + \\
\alpha_q \frac{\varepsilon_q}{k_q} (C_{1\varepsilon} G_{k,q} - C_{2\varepsilon} \rho_q \varepsilon_q) &+ \alpha_q \rho_q \Pi_{\varepsilon,q}
\end{aligned} \tag{3.65}$$

Овде $\Pi_{k,q}$ и $\Pi_{\varepsilon,q}$ представљају утицај дисперзне (распршене) фазе на непрекидну фазу q , \vec{U}_q је брзина узета сразмерно запреминској концентрацији фазе, док је турбулентна вискозност дата као:

$$\mu_{t,q} = \rho_q C_\mu \frac{k_q^2}{\varepsilon_q} \tag{3.66}$$

Временске и дужинске скале које карактеришу кретање користе се за одређивање коефицијената дисперзије, корелационих функција и кинетичке енергије турбуленције за сваку од дисперзних фаза. Карактеристично време одговора честице дисперзне фазе p дефинисано је као [5, 64]:

$$\tau_{F,pq} = \alpha_p \rho_q K_{pq}^{-1} \left(\frac{\rho_p}{\rho_q} + C_V \right) \tag{3.67}$$

Лагранжова интегрална временска скала израчуната дуж путање честице, дефинисана је у [3.67] као:

$$\tau_{t,pq} = \frac{\tau_{t,q}}{\sqrt{1 + C_\beta \xi^2}} \tag{3.68}$$

где је: $\xi = \frac{|\vec{v}_{pq}| \tau_{t,q}}{L_{t,q}}$ и $C_\beta = 1,8 - 1,35 \cdot \cos^2 \Theta$,

где је:

θ - угао између средње брзине честице и средње релативне брзине.

Члан за турбулентни отпор у вишефазном струјању, овде се за дисперзну фазу p и носећу фазу q , моделира у облику:

$$K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) = K_{pq} (\vec{U}_p - \vec{U}_q) - K_{pq} \vec{v}_{dr} \tag{3.69}$$

где је релативна брзина честице распршене фазе у односу на брзину мешавине дата као:

$$\vec{v}_{dr} = - \left(\frac{D_p}{\sigma_{pq} \alpha_p} \nabla \alpha_p - \frac{D_q}{\sigma_{pq} \alpha_q} \nabla \alpha_q \right). \quad (3.70)$$

Овде D_p и D_q означавају коефицијенте дифузије, док је σ_{pq} Прантлов број дисперзије.

3.4.2.13. k - ε турбулентни модел за сваку од фаза

Најопштији k - ε модел турбуленције за вишефазно струјање решава за сваку фазу скуп транспортних једначина кинетичке енергије и дисипације турбуленције, и користи се у случајевима када је размена турбулентне енергије између фаза интензивна, односно када постоји утицај турбулентног поља сваке од фаза на све остале фазе [5-8].

Једначине за кинетичку енергију и дисипацију турбуленције имају облик:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q k_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{U}_q k_q) = \nabla \cdot \left(\alpha_q \frac{\mu_{t,q}}{\sigma_k} \nabla k_q \right) + \alpha_q G_{k,q} - \alpha_q \rho_q \varepsilon_q + \\ \sum_{l=1}^N K_{lq} (C_{lq} k_l - C_{ql} k_q) - \sum_{l=1}^N K_{lq} (\vec{U}_l - \vec{U}_q) \cdot \frac{\mu_{t,l}}{\alpha_l \sigma_l} \nabla \alpha_l + \sum_{l=1}^N K_{lq} (\vec{U}_l - \vec{U}_q) \cdot \frac{\mu_{t,q}}{\alpha_q \sigma_q} \nabla \alpha_q \end{aligned} \quad (3.71)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \varepsilon_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{U}_q \varepsilon_q) = \nabla \cdot \left(\alpha_q \frac{\mu_{t,q}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_q \right) + \frac{\varepsilon_q}{k_q} \left[\alpha_q C_{1\varepsilon} G_{k,q} - C_{2\varepsilon} \alpha_q \rho_q \varepsilon_q + \right. \\ \left. C_{3\varepsilon} \left(\sum_{l=1}^N K_{lq} (C_{lq} k_l - C_{ql} k_q) - \sum_{l=1}^N K_{lq} (\vec{U}_l - \vec{U}_q) \cdot \frac{\mu_{t,l}}{\alpha_l \sigma_l} \nabla \alpha_l + \sum_{l=1}^N K_{lq} (\vec{U}_l - \vec{U}_q) \cdot \frac{\mu_{t,q}}{\alpha_q \sigma_q} \nabla \alpha_q \right) \right] \end{aligned} \quad (3.72)$$

Размена количине кретања између фаза дата је са:

$$\sum_{l=1}^N K_{lq} (\vec{v}_l - \vec{v}_q) = \sum_{l=1}^N K_{lq} (\vec{U}_l - \vec{U}_q) - \sum_{l=1}^N K_{lq} \vec{v}_{dr,lq} \quad (3.73)$$

где се индекс l односи на дисперзну фазу, а индекс q на носећу фазу, где су брзине \vec{U}_l и \vec{U}_q узете са вредностима сразмерним запреминским концентрацијама, док је $\vec{v}_{dr,lq}$ релативна брзина дисперзне фазе l у односу на примарну фазу q . Ова брзина се јавља због турбулентних флукуација у запреминским флукуацијама, а када се помножи са коефицијентом размене K_{lq} , служи за корекцију размене количине кретања у турбулентним струјањима [5-10].

3.4.2.14. Турбулентни модел Рејнолдсових напона

За сложена мултифазна струјања у којима k - ϵ турбулентни модел не даје задовољавајуће резултате, користи се модел Рејнолдсових напона. У овом моделу једначине континуитета и промене количине кретања за примарну фазу c имају облик [5]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\alpha}_c \rho_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c \tilde{U}_c) = 0 \quad (3.74)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\alpha}_c \rho_c \tilde{U}_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c \tilde{U}_c \otimes \tilde{U}_c) = -\bar{\alpha}_c \nabla \tilde{p} + \nabla \cdot \tilde{\tau}_c^t + \bar{F}_{Dc} \quad (3.75)$$

Због једноставности у једначини промене количине кретања изостављен је члан који обухвата ламинарне напоне, као и чланови који обухватају запреминске силе. Коефицијент $\bar{\alpha}_c$ представља запреминску концентрацију непрекидне (примарне или носеће) фазе усредњену по времену, док је усредњавање по фази за ма коју променљиву Φ дефинисано као [5-8]:

$$\tilde{\Phi}_c = \frac{\overline{\alpha_c \Phi_c}}{\bar{\alpha}_c} \quad (3.76)$$

Израз за силу отпора између непрекидне и дисперзне фазе биће:

$$\bar{F}_{Dc} = K_{dc} \left[(\tilde{U}_d - \tilde{U}_c) - \left(\frac{\overline{\alpha_d u'_d}}{\bar{\alpha}_d} - \frac{\overline{\alpha_c u'_c}}{\bar{\alpha}_c} \right) \right] \quad (3.77)$$

где је K_{dc} коефицијент отпора. Члан за турбулентни напон који се појављује у једначини промене количине кретања, моделира се за сваку од фаза [5-8]:

$$\tilde{\tau}_k^t = -\bar{\alpha}_k \rho_k \tilde{R}_{k,ij} \quad (3.78)$$

где је индекс k замењен са c за непрекидну фазу или са d за дисперзну фазу. У овом моделу додатне једначине које затварају систем су транспортне једначине за Рејнолдсове напоне R_{ij} . У FLUENT-у се користе две методе за моделирање турбуленције: дисперзни модел и модел мешавине [5-8].

Дисперзни модел се користи за мале запреминске концентрације секундарне фазе, односно у струјањима у којима је доминантна турбуленција примарне фазе. У том случају решавају се само транспортне једначине Рејнолдсових напона само за примарну фазу, тако да је индекс c изостављен [5-8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\alpha} \rho \tilde{R}_{ij}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\bar{\alpha} \tilde{U}_k \tilde{R}_{ij}) = -\bar{\alpha} \rho \left(\tilde{R}_{ik} \frac{\partial \tilde{U}_j}{\partial x_k} + \tilde{R}_{jk} \frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\bar{\alpha} \mu \frac{\partial}{\partial x_k} \tilde{R}_{ij} \right] - \\ \frac{\partial}{\partial x_k} (\bar{\alpha} \rho \overline{u'_i u'_j u'_k}) + \bar{\alpha} \rho \left(\frac{u'_i}{\partial x_j} + \frac{u'_j}{\partial x_i} \right) - \bar{\alpha} \rho \tilde{\varepsilon}_{ij} + \Pi_{R,ij} \end{aligned} \quad (3.79)$$

Члан $\Pi_{R,ij}$ обухвата интеракцију турбуленције између континуалне и дисперзне фазе, а дат је са:

$$\Pi_{R,ij} = K_{dc} C_{1,dc} (R_{dc,ij} - R_{c,ij}) + K_{dc} C_{2,dc} a_{dc,i} b_{dc,j} \quad (3.80)$$

где су C_1 и C_2 непознати коефицијенти, $a_{dc,i}$ и $b_{dc,j}$ су релативне брзине, док је $R_{dc,ij}$ непозната корелација између брзине флуида (примарна фаза) и брзине честица дисперзне фазе. Овај члан се упрошћава, ако се претпостави да је [5-8]:

$$\Pi_{R,ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \Pi_k \quad (3.81)$$

где је δ_{ij} Кронекеров симбол, а Π_k је дефинисан у [3.82] као:

$$\Pi_k = K_{dc} (\tilde{k}_{dc} - 2\tilde{k}_c + \vec{V}_{rel} \cdot \vec{V}_{dr}). \quad (3.82)$$

Овде \tilde{k}_c представља кинетичку енергију турбуленције непрекидне фазе, \vec{V}_{rel} и \vec{V}_{dr} се односе на релативну брзину дисперзне фазе у односу на непрекидну, односно релативну брзину дисперзне фазе у односу на брзину мешавине. Систем ће бити потпуно затворен тек када се укључи и транспортна једначина за $\tilde{\varepsilon}$, односно дисипација кинетичке енергије турбуленције [5-10].

У моделу мешавине основна претпоставка је да су све фазе у истом пољу турбуленције, тако да отпада члан Π_R у транспортним једначинама за Рејнолдсове напоне. Све једначине имају сличну форму, једино што се особине и брзине фаза замењују са особинама мешавине и брзином мешавине [5]. Тако је густина мешавине дата као:

$$\rho_m = \sum_{i=1}^N \bar{\alpha}_i \rho_i \quad (3.83)$$

док је брзина мешавине дата са:

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{\alpha}_i \rho_i \tilde{U}_i}{\sum_{i=1}^N \bar{\alpha}_i \rho_i} \quad (3.84)$$

Где N представља број фаза.

3.5. Резултати нумеричке симулације моделом мешавине у Ојлер-Ојлер приступу

3.5.1. Запремински и масени протоци фаза и њихове запреминске концентрације

Улазни подаци за нумеричку симулацију вишефазног струјања у млину са центрифугалним сепаратором, дефинисани су на основу мерења која је извршила Лабораторија за термотехнику и енергетику, Института Винча. Мерења су извршена на котлу Б2, на млиновима 23 и 25, и одговарајући параметри су рачунати као средња вредност убрзања за оба млина.

За вентилацију млина добија се:

$$\dot{V}_{sr} = \frac{\dot{V}_{23} + \dot{V}_{25}}{2} \quad (3.85)$$

$$\dot{V}_{sr} = \frac{308822 + 288258}{2} = 298540 \quad m^3/h$$

Односно:

$$\dot{V}_{sr} = 82,93 \quad m^3/s.$$

Количина угља у којој су садржани песак и влага биће (мерења су извршена преко дозатора и мерењем на улазу у горионике):

$$\dot{m}_{sr} = \frac{\dot{m}'_{23} + \dot{m}''_{23}}{2} + \frac{\dot{m}'_{25} + \dot{m}''_{25}}{2} = \frac{62220 + 64460}{2} + \frac{56750 + 57420}{2} = 60212 \text{ kg/h} \quad (3.86)$$

или

$$\dot{m}_{sr} = 16,72 \quad kg/s.$$

Садржај воде у сировом угљу је:

$$W_r = \frac{40,19 + 40,75}{2} = 40,47 \quad \% , \quad (3.87)$$

а садржај влаге у угљеном праху је:

$$W_p = 5,68 \quad \% \quad (3.88)$$

тако да ће садржај влаге на улазу бити:

$$W_{ulaz} = W_r - W_p = 40,47 - 5,68 = 34,79 \quad \% \quad (3.89)$$

док је масени проток:

$$\dot{m}_{voda} = W_{ulaz} \cdot \dot{m}_{sr} = 0,3479 \cdot 16,72 = 5,82 \quad kg/s. \quad (3.90)$$

Минералних материја, тј. песка има приближно 21.63 %, па је количина песка која у јединици времена уђе у млин:

$$\dot{m}_{pesak} = 0,2163 \cdot \dot{m}_{sr} = 0,2163 \cdot 16,72 = 3,62 \quad kg/s. \quad (3.91)$$

На основу горњих вредности добија се количина угља која у јединици времена улази у млин. Ова количина обухвата како угљени прах, тако и крупне комаде угља, и једнака је:

$$\dot{m}_{ugalj} = \dot{m}_{sr} - \dot{m}_{voda} - \dot{m}_{pesak} = 16,72 - 5,82 - 3,62 = 7,28 \quad kg/s. \quad (3.92)$$

Међутим, ка горионицима одлази угљени прах, али не и крупни комади угља којих има 18,68 %, па ће у аеросмеши угљени прах бити процентуално заступљен са $100 - 18,68 = 81,32 \%$. Масени проток угљеног праха на улазу је:

$$\dot{m}_{ug.prah} = 0,8132 \cdot \dot{m}_{ugalj} = 0,8132 \cdot 7,28 = 5,92 \quad kg/s. \quad (3.93)$$

За густине секундарних фаза узете су следеће вредности:

- угљени прах $\rho_{ug.prah} = 1200 \quad kg/m^3$

- вода $\rho_{voda} = 1000 \quad kg/m^3$

- песок $\rho_{pesak} = 2320 \quad kg/m^3$

тако да ће запремински протоци одговарајућих секундарних фаза на улазу у млин, бити:

$$\dot{V}_{ug.prah} = \frac{\dot{m}_{ug.prah}}{\rho_{ug.prah}} = \frac{5,92}{1200} = 0,0049 \quad m^3/s \quad (3.94)$$

$$\dot{V}_{pesak} = \frac{\dot{m}_{pesak}}{\rho_{pesak}} = \frac{3,62}{2320} = 0,00156 \quad m^3/s \quad (V_{pesak}) \quad (3.95)$$

$$\dot{V}_{voda} = \frac{\dot{m}_{voda}}{\rho_{voda}} = \frac{5,82}{1000} = 0,0058 \text{ m}^3/s \text{ (3.136)}$$

док су њихове запреминске концентрације на улазу у млин:

$$\alpha_{ug.prah} = \frac{\dot{V}_{ug.prah}}{\dot{V}_{sr}} = \frac{0,0049}{82,93} = 5,91 \cdot 10^{-5} \quad (3.96)$$

$$\alpha_{pesak} = \frac{\dot{V}_{pesak}}{\dot{V}_{sr}} = \frac{0,0016}{82,93} = 1,93 \cdot 10^{-5} \quad (3.97)$$

$$\alpha_{vode} = \frac{\dot{V}_{vode}}{\dot{V}_{sr}} = \frac{0,0058}{82,93} = 6,99 \cdot 10^{-5} \quad (3.98)$$

Запреминска концентрација рециркулационих гасова, односно носеће или примарне фазе је:

$$\alpha_{rec.gas} = 1 - \alpha_{ug.prah} - \alpha_{pesak} - \alpha_{vode} = 1 - 5,91 \cdot 10^{-5} - 1,93 \cdot 10^{-5} - 6,99 \cdot 10^{-5} = 0,99985 \quad (3.99)$$

На основу вредности запреминских концентрација секундарних фаза, боље рећи угљеног праха и песка, види се да је у питању мултифазно струјање врло разређене мешавине. Што се тиче воде, односно влаге у угљу, она врло брзо испари и заједно са рециркулационим гасовима даје смешу идеалних гасова, која постаје примарна или носећа фаза [5-8].

3.5.2. Ограничења нумеричке симулације

Свака нумеричка симулација има одређена ограничења, која треба имати у виду при моделирању реалне појаве, као и при анализи добијених резултата. Први тип ограничења везан је за софтвер који се користи, односно за сложеност физичких модела за које се могу добити релевантни резултати. То се највише односи на моделе турбуленције, моделе вишефазног струјања и моделе сагоревања. У овом случају разматрају се појаве које се јављају у вентилационом млину и каналима аеросмеше до горионика, које обухватају млевење угља у млину и струјање мешавине гасова са угљеним прахом и песком. Међутим, софтвер ANSYS FLUENT 12 који је коришћен за нумеричку симулацију, припада области нумеричке динамике флуида (ЦФД), и не обухвата процес млевења. Зато је узето да кроз улаз вентилационог млина поред мешавине гасова истовремено улази већ самлевени угаљ и песак, а затим се егзактно

симулира струјање аеросмеше у млину и систему канала до горионика [5-10].

У разматраној анализи присутна су истовремено два елемента, која потенцирају ово ограничење. Прво, ради се о вишефазном струјању, где је могуће користити неколико модела различите сложености, а такође и у оквиру сваког од њих могу се применити различити турбулентни модели. Други елемент је врло сложена геометрија која обухвата радно коло млина, кућиште млина, као и сложена геометрија скретача ваздуха ка горионцима. Такође, овако сложена геометрија изазива нагле промене у струјном пољу, које ће бити обухваћене нумеричком симулацијом, само ако је број запреминских елемената довољан и ако су они гушће постављени тамо где су градијенти величина струјног поља већи [5].

Имајући ово у виду, прво је генерисана мрежа са 3 396 141 запреминским елементом, али је са овом мрежом било могуће добити решење само за једнофазно струјање. Следећа мрежа имала је око 3 165 064 запреминска елемента, и резултати су добијени за двофазно струјање, које је обухватило рециркулационе гасове и угљени прах. Да би се укључила влага и песак мрежа је морала бити смањена на 2 996 772 запреминска елемента, односно са повећањем броја фаза морао је да се смањује број запреминских елемената мреже, при чему се водило рачуна да то смањење у највећој могућој мери буде тамо где је промена величина струјног поља најмања. Цео прорачун је морао да се одвија у RAM-у јер су тестирања показала да је у случају комуникације са диском једна итерација трајала око 15 минута. Како је за конвергенцију решења било потребно неколико хиљада итерација, то би укупно време прорачуна трајало месецима, односно било неприхватљиво дуго. Због тога је направљен компромис између броја запреминских елемената и броја фаза, тако да је угљени прах третиран као монодисперзан. Како софтвер дозвољава да се честице од истог материјала, али различите величине, третирају као различите фазе, то постоји могућност да се разматра струјање угљеног праха са честицама у три различите величине, али без воде и песка [5-7].

Међутим, како је у овом случају било важније сагледати карактеристике струјања песка као изразито абразивног материјала, угљени прах је био третиран као монодисперзан.

3.5.3. Поступак нумеричког моделирања

Цео поступак нумеричког моделирања вишефазног струјања у вентилационом млину и каналима до уласка у горионике, састоји се од два дела [5-8]. Први део се обавља у посебном софтверском пакету намењеном за припрему геометрије у форми која је потребна софтверу за нумеричку симулацију, а садржи:

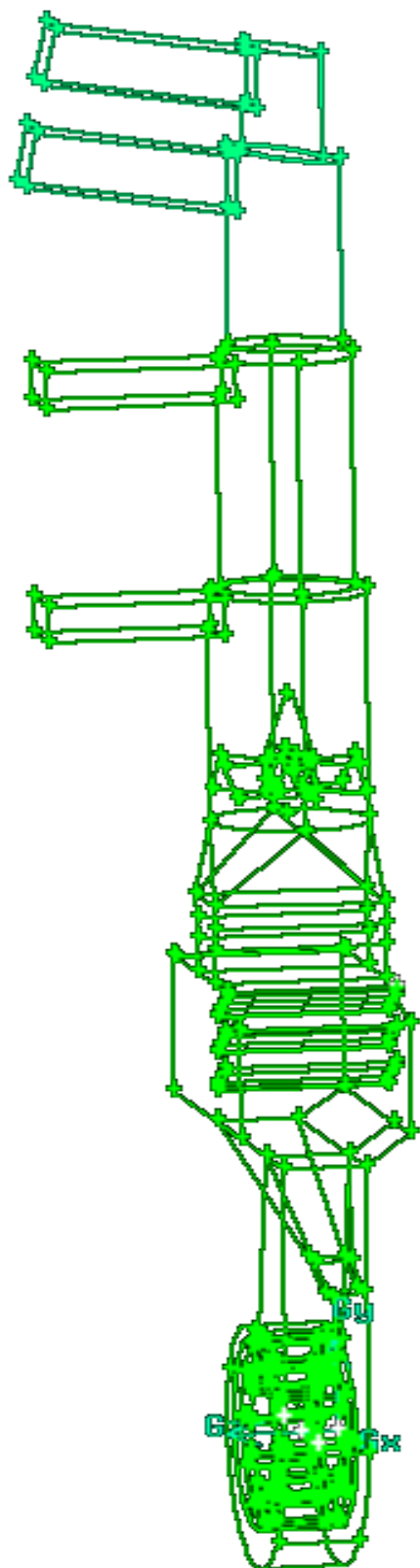
- генерисање геометрије,
- генерисање мреже.

Други део везан је непосредно за солвер, у коме се бирају различити модели и дефинишу параметри, а састоји се од следећих корака:

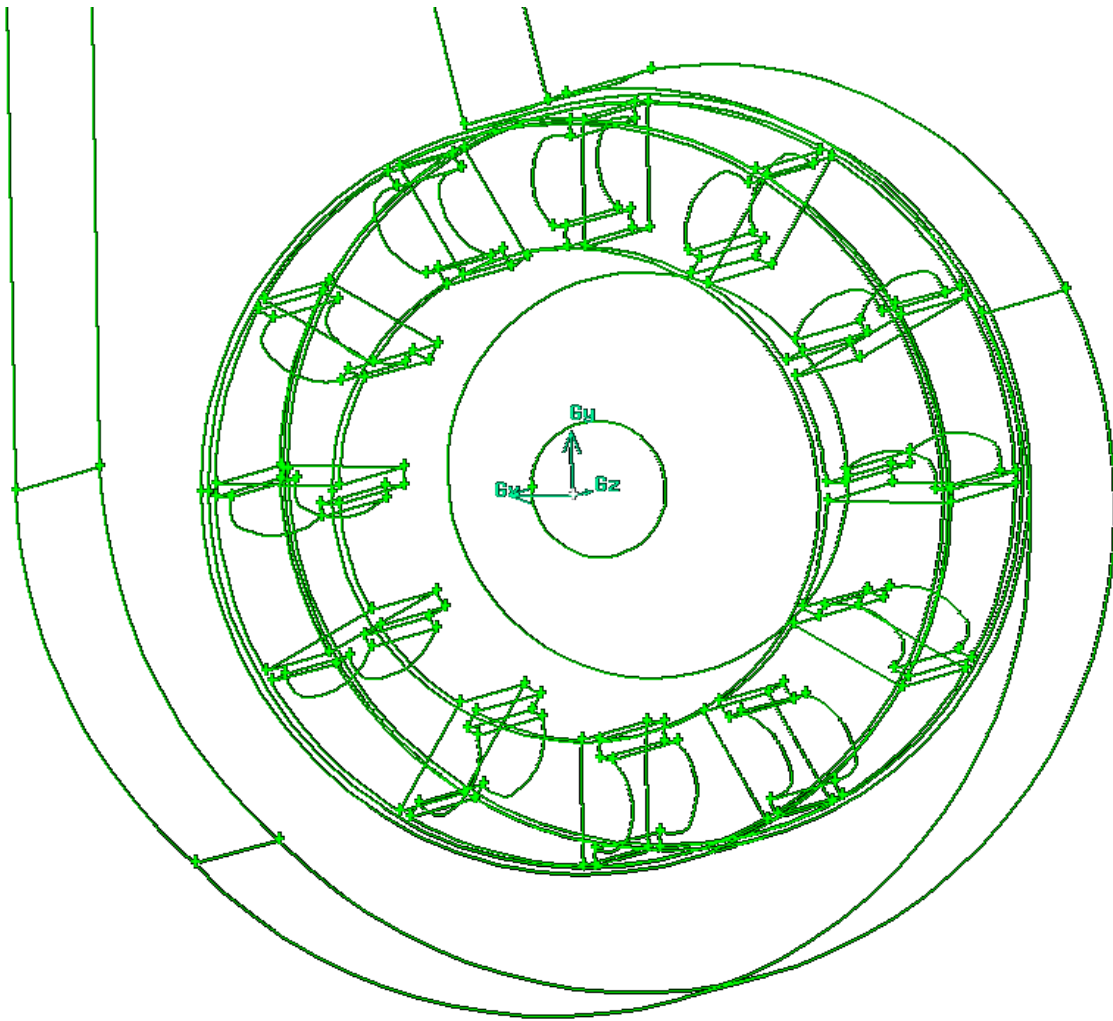
- дефинисање општег модела струјања,
- дефинисање мултифазног модела, фаза и њихових интеракција,
- дефинисање вискозног модела и модела турбуленције,
- дефинисање граничних услова,
- избор реда тачности нумеричке дискретизације,
- иницијализација струјног поља,
- праћење конвергенције решења,
- постпроцесирање и анализа добијених резултата.

3.5.3.1. Генерисање геометрије

Модел је веран оригиналној конструкцији, осим најситнијих детаља који су изостављени јер би мрежа у таквом моделу имала превелик број елемената. На следећим сликама приказан је модел геометрије са појединим детаљима.



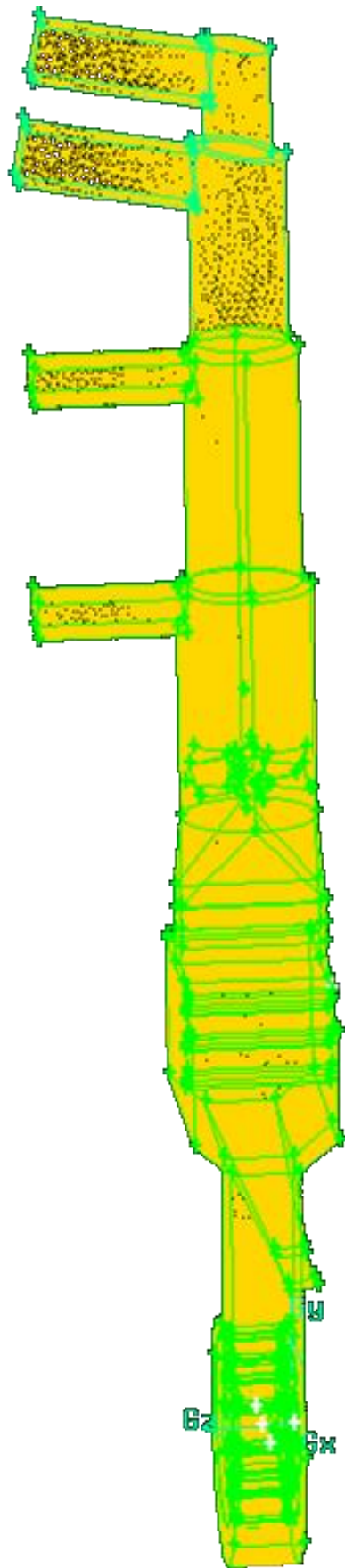
Слика 3.1. Геометријски модел вентилационог млина са каналима до улаза у горионике



Слика 3.2. Радно коло вентилационог млина са 12 комплета ударних плоча

3.5.3.2. Генерисање мреже

Већ је речено да су генерисане три неструктурисане мреже састављене од тетраедара, а нумеричка симулација је рађена са мрежом од 2 996 772 запреминска елемента, и 706 444 површинска елемента. У принципу, код сложенијих струјања треба користити структурисане мреже састављене од паралелопипеда, али за овако сложена геометрију са доста ситних детаља, једино могуће решење била је неструктурисана мрежа. На слици 3.3 до приказана је ова мрежа.



Слика 3.3. Запреминска мрежа у вентилационом млину и каналима до улаза у
горионике

3.5.3.3. Дефинисање општег модела струјања

Код општег модела струјања прво се дефинише да ли је струјање дводимензијско, осносиметрично или тродимензионално, као и да ли је стационарно или нестационарно.

Затим се бира тип солвера, између сегрегованог и спрегнутог. Код оба типа солвера примењује се метод коначних запремина на сваки елемент мреже, односно врши се интеграција једначина одржања масе, количине кретања и енергије, као и допунских једначина које се односе на турбуленцију и запреминске концентрације секундарних фаза. На тај начин се добијају алгебарске једначине за дискретне вредности зависних променљивих (брзина, притисак, температура итд.) [5-8].

Дискретизација основних једначина одржања биће илустрована на примеру једначине одржања у стационарном струјању, која описује транспорт скаларне величине ϕ . У интегралном облику за произвољну запремину V , ова једначина биће:

$$\oint \rho \vec{\phi} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_{\phi} dV \quad (3.100)$$

где је:

ρ - густина флуида,

\vec{v} - вектор брзине,

\vec{A} - вектор површине усмерен изван запремине V ,

Γ_{ϕ} - коефицијент дифузије за величину ϕ ,

$\nabla \phi$ - градијент величине ϕ ,

S_{ϕ} - извори величине ϕ (по јединици запремине).

Горња једначина се примењује за сваку контролну запремину, односно ћелију у мрежи која потпуно испуњава нумерички домен. На слици 3.4 приказана је ћелија - троугаони елемент, која представља пример контролне запремине за дводимензионо струјање. Дискретизација горње интегралне једначине за дату ћелију даје:

$$\sum_f^{N_{fac}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{fac}} \Gamma_{\phi} (\nabla \phi)_n \cdot \vec{A}_f + S_{\phi} V \quad (3.101)$$

где је:

N_{fac} - број страница елемента (у овом случају 3),

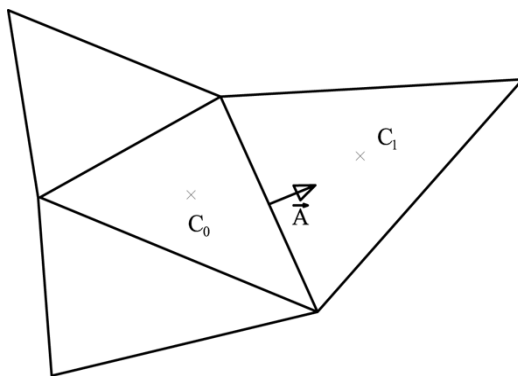
ϕ_f - вредност величине ϕ која се преноси кроз страницу f ,

$\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ - масени флуks кроз страницу f ,

\vec{A}_f - вектор у правцу нормале на страницу f , бројно једнак њеној површини,

$(\nabla \phi)_n$ - пројекција градијента величине ϕ у правцу нормале на страницу,

V - запремина елемента.



Слика 3.4. Контролна запремина за дводимензионо струјање [7]

Једначине које се решавају у коришћеном софтверу имају исти облик као што је горе дат и примењују се на тродимензионална струјања у нумеричком домену састављеном од произвољних полиедара (тетраедри, призме итд) [5-8].

Вредности скаларне величине ϕ смештају се у тежиштима ћелија (тачка c_0 и c_1) док су вредности ϕ_f за конвективни члан потребне на страницама, па је потребно извршити интерполацију користећи вредности у тежиштима. Ово се врши узимањем вредности у ћелијама које се налазе уз струју, у односу на нормалну брзину \vec{v}_n , која представља компоненту брзине струјања у правцу нормале на страницу. На овај начин се ради за конвективни члан, док се за члан који обухвата дифузију користе централне разлике, односно вредности у ћелијама и уз и низ струју [5-8].

Следећа два корака су различита код наведених солвера, а састоје се у линеаризацији дискретизованих једначина, и решавању резултујућег система линеарних једначина, да би се добиле кориговане вредности зависних променљивих.

Дискретизована транспортна једначина садржи непознату вредност скаларне променљив ϕ у тежишту ћелије, као и у тежиштима суседних ћелија [5-8]. Ова једначина у општем случају је нелинеарна по променљивој ϕ , па се врши линеаризација која даје:

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (3.102)$$

где се индекс P односи на ћелију c_0 , а индекс n_b на суседне ћелије. Број суседних ћелија зависи од топологије мреже, али је у општем случају једнак броју страница ћелије c_0 .

Сличне једначине могу да се напишу за сваку ћелију у мрежи, па се добија систем алгебарских једначина, са матрицом у којој је највећи број коефицијената једнак нули (ретка матрица), јер су вредности сваког елемента повезане само са вредностима елемената у непосредној околини, што горња једначина и показује. Овај систем линеарних једначина решава се Гаус-Сајделовим итеративним поступком [5-8]. При решавању овог система потребно је контролисати промену величине ϕ . Ово се ради користећи факторе релаксације који редукују промену величине ϕ у свакој итерацији, односно биће:

$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta \phi \quad (3.103)$$

где је:

ϕ - нова вредност,

ϕ_{old} - стара вредност,

$\Delta \phi$ - израчуната промена,

α - фактор релаксације који је увек мањи од 1.

У сегрегованом солверу, једначине добијене нумеричком дискретизацијом парцијалних диференцијалних једначина, решавају се једна за другом. За вишефазна струјања мора се користити сегреговани солвер.

Код разматраног мултифазног струјања, на кретање чврстих честица секундарних фаза, односно угљеног праха и песка, значајан утицај има сила гравитације, па је она укључена преко члана за запреминске силе у једначини промене количине кретања.

3.5.3.4. Дефинисање мултифазног модела, фаза и њихових интеракција

У Ојлер-Ојлер приступу нумеричке симулације вишефазних струјања, прво се дефинише мултифазни модел и број фаза. Од три расположива модела (модел запремине флуида, модел мешавине и Ојлеров модел) за мултифазно струјање које се анализира, применљиви су и модел мешавине и Ојлеров модел. Међутим, Ојлеров модел као најсложенији, има велики број спрегнутих транспортних парцијалних диференцијалних једначина, што поставља изузетно велике рачунарске захтеве са аспекта величине РАМ - а и брзине процесора. Зато се, као најбољи приступ сматра онај у коме се користи најједноставнији модел који даје релевантне резултате [5].

За примарну (континуалну или носећу) фазу узети су рециркулациони гасови, док су секундарне фазе угљени прах, песак и влага. Угљени прах се разматра као монодисперзна грануларна секундарна фаза чије су све честице истог пречника који износи 150 μm . Песак се такође разматра као грануларна секундарна фаза, чије су све честице истог пречника који износи 300 μm . За грануларну вискозност угљеног праха и песка користе се изрази (3.55) и (3.56), док се грануларна температура израчунава на основу формуле (3.57) [5-7].

Интеракција између појединих фаза обухвата отпор, коефицијент враћања за сударе честица, силу узгона и силу од придружених маса.

Сила отпора је најзначајнија, и мора се узети у обзир преко избора функција отпора које се користе при израчунавању коефицијената размене количине кретања. У симулацији је коришћен израз дат у (3.11), с обзиром да се ради о веома разређеној мешавини у којој су запреминске концентрације чврстих фаза знатно мање од запреминске концентрације примарне фазе [5-8].

Код грануларних секундарних фаза, морају се дефинисати коефицијенти враћања за сударе између честица како различитих фаза, тако и за сударе између честица исте фазе. За овај коефицијент узета је стандардна вредност једнака 0,9.

Ефекти силе узгона на честице секундарних фаза се такође јављају највише због градијента брзине у струјном пољу примарне фазе. У највећем броју случајева сила узгона је знатно мања од силе отпора, и може се занемарити. То посебно важи за случајеве када је пречник честица знатно мањи од њиховог растојања. Како је овај услов испуњен у разматраном струјању, то сила отпора није узета у обзир [64-67].

Сила од придружених маса присутна је када честице секундарне фазе имају

убрзање у односу на примарну фазу, и мора се узети у обзир уколико је густина секундарне фазе знатно мања од густине примарне фазе. Како то није случај у разматраном струјању, то сила од придружених маса није узета у обзир [5].

3.5.3.5. Дефинисање вискозног модела и модела турбуленције

С обзиром на изражену турбуленцију у разматраном струјању, бира се модел турбулентног струјања. Код избора турбулентног модела на располагању су две опције. Прва је $k-\varepsilon$ модел, а друга модел Рејнолдсових напона. Модел Рејнолдсових напона често даје нестабилан прорачун и захтева врло правилну мрежу, а поврх свега уводи већи број транспортних једначина за турбуленцију, те је изабран $k-\varepsilon$ модел. У овом моделу постоје три могућности за моделирање турбуленције. Прва могућност је модел мешавине који представља стандардан модел за вишефазно струјање у коришћеном софтверу. Друга могућност је модел дисперзне фазе, који се најчешће примењује када постоји једна примарна непрекидна фаза, а остало је ретка мешавина распршених секундарних фаза. Трећа могућност је турбулентни модел за сваку од фаза у струјањима у којима је размена турбулентне енергије између фаза изражена [5].

За разматрано струјање прве две опције довољно добро описују турбуленцију, па је у нумеричкој симулацији коришћен модел мешавине.

3.5.3.6. Дефинисање граничних услова

Код свих математичких модела који описују најразличитије тоplotно-струјне појаве полази се од основних физичких закона одржања масе, количине кретања и енергије, односно исте једначине у диференцијалном или интегралном облику. Оно што издваја различита решења, је пре свега различита геометрија. У случају исте геометрије, решења ће се мењати у зависности од почетних услова и граничних услова. Почетни услови су од значаја код појава које се мењају са временом, а с обзиром да разматрамо стационарну појаву, струјно поље ће зависити само од граничних услова [5-8].

Дефинисање граничних услова значи да се фиксирају вредности одговарајућих променљивих струјног поља на свим површинама које припадају разматраној геометрији, а које обухватају улазе, излазе, покретне и непокретне зидове [5-8].

У FLUENT-у се гранични услови за вишефазна струјања мало разликују од

оних за једнофазна струјања, при чему неки важе за све фазе, односно њихову мешавину, а неки морају да се дефинишу за сваку фазу посебно. Који гранични услови ће бити примењени на мешавину, а који на појединачне фазе зависи и од избора мултифазног модела.

У сегрегваном солверу, који је једина опција за мултифазна струјања у коришћеном софтверу, на улазима не може да се дефинише масени проток, већ само брзина, при чему је узето да нема клизања између примарне и секундарних фаза, односно да су брзине једнаке [5-8].

Осим у специфичним случајевима, на свим излазима се по правилу дефинише вредност статичког притиска, што је и учињено у разматраној симулацији на свим излазима ка горионицима [5-8].

На зидовима се дефинишу брзина и термални гранични услови. За брзину је узето да нема клизања, односно да је релативна брзина између зида и флуидног делића који је у контакту са њим, једнака нули. Услов да нема клизања односи се и на радно коло млина, које ротира са 495 о/мин. Ротација кола обухваћена је једном од опција у софтверу, која омогућује увођење више покретних и непокретних система (МРФ), при чему се сваки од покретних делова везује за посебан координатни систем. За термалне граничне услове на зидовима дефинисани су адијабатски услови, с обзиром да је у [15] показано да су укупни губици топлоте кроз зидове реда величине 6%, односно да је претпоставка да нема размене топлоте између аеросмеше и околине кроз зидове канала, довољно тачна [5].

3.5.3.7. Избор реда тачности нумеричке дискретизације

Ред тачности нумеричке дискретизације може се бирати за конвективне чланове, док се за вискозне чланове аутоматски примењује нумеричка дискретизација другог реда тачности. Код сегрегваног солвера, за конвективне чланове стандардно се примењује нумеричка дискретизација првог реда тачности [5].

Када се правац вектора брзине поклапа са једним од правца простирања ћелија мреже, као што је то у случају ламинарног струјања у цеви где је мрежа састављена од паралелопипеда (структурисана мрежа), нумеричка дискретизација првог реда је потпуно прихватљива. Међутим када су вектори брзине искошени у односу на странице мреже, нумеричка дискретизација првог реда тачности примењена на конвективне чланове, повећава грешку нумеричке дискретизације. Ова грешка се

назива и нумеричка дифузија или нумеричка вискозност, а представљена је чланом сличног облика као што је члан који обухвата стварну вискозност. Код троугаоних мрежа у 2Д или мрежа састављених од тетраедара у 3Д (неструктурисане мреже), вектори брзине су увек закошени у односу на странице ћелија, па се у општем случају тачнији резултати добијају користећи нумеричку дискретизацију другог реда тачности. Треба имати у виду да је код нумеричке дискретизације првог реда тачности члан са нумеричком вискозношћу већи од одговарајућег у дискретизацији другог реда тачности, дајући стабилнији прорачун што нарочито долази до изражаја на почетку нумеричке симулације. Зато се у принципу почиње са нумеричким шемама првог реда тачности, да би се касније прешло на шеме другог реда тачности. Међутим, уколико се нумеричке симулације сложених струјања као што су мултифазна, раде на неструктурисаним мрежама због сложености геометрије, могу се појавити, а најчешће се и јављају проблеми са конвергенцијом решења, па се уместо шема другог реда тачности, морају користити шеме првог реда тачности [5-10].

3.5.3.8. Иницијализација струјног поља

На почетку сваке CFD симулације, да би започео итеративни процес решавања, морају се дефинисати почетне вредности зависних променљивих у свим ћелијама мреже. При томе треба водити рачуна да се ове вредности сувише не разликују од крајњег решења, јер ће у супротном потребан број итерација за конвергенцију решења бити знатно већи, а може се десити да решење дивергира. Поступак иницијализације струјног поља се примењује како за најједноставнија, тако и за најсложенија струјања. Међутим, код сложених струјања као што су мултифазна, прорачун почиње са две фазе, због стабилности и брже конвергенције, а касније се уводе једна по једна фаза. У тим случајевима, након почетне иницијализације која обухвата све ћелије мреже, и након одређеног броја итерација, вредности запреминских концентрација појединих фаза се уводе у поједине делове струјног поља и додељују свим елементима у тим деловима [5-8].

3.5.3.9. Праћење конвергенције решења

За време процеса решавања, може се пратити конвергенција решења, а први показатељ су остаци који се израчунавају након сваке итерације. На рачунару са бесконачном тачношћу, ови остаци теже нули кад решење конвергира. На стварном

рачунару који ради у обичној прецизности, ови остаци могу да се смање за шест редова величине, а уобичајено се узима да је за конвергенцију довољно да се они смање за три реда величине. Након дискретизације, као што је већ показано, једначине одржања могу бити написане у облику (102) [5].

Остатак у том случају је дефинисан као:

$$R^\phi = \sum_{cellsP} \left| \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p \right| \quad (3.104)$$

где се сабирање врши по свим ћелијама мреже, и за сваку ћелију P се користе вредности променљиве у суседним ћелијама. Овај остатак показује колико се разликује од нуле цео израз када се у дискретизованој једначини сви чланови пребаце на једну страну. Ово се назива некалирани остатак, и често је тешко проценити конвергенцију на основу његове вредности. Зато се уводи скалирани остатак који је много бољи показатељ конвергенције решења за већину проблема, а дефинише се као:

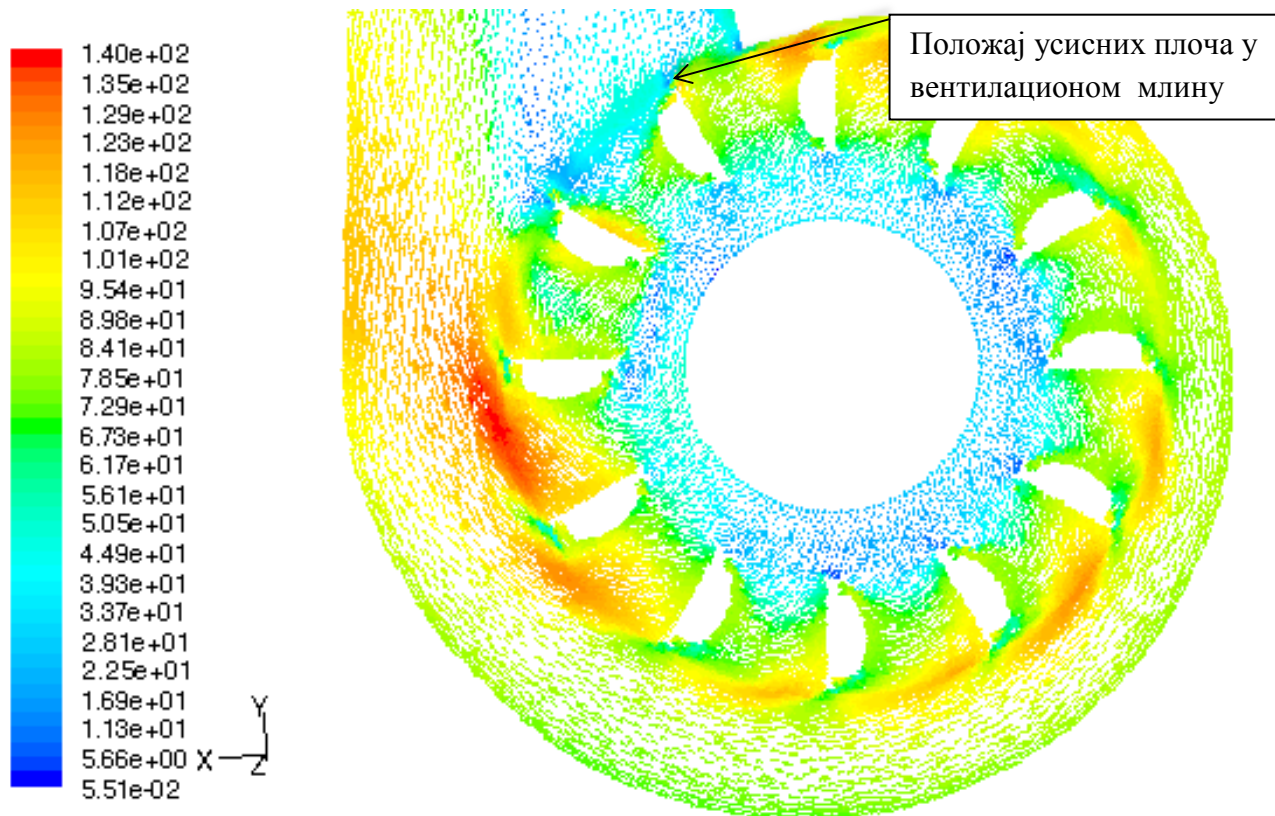
$$R^\phi = \frac{\sum_{cellsP} \left| \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p \right|}{\sum_{cellsP} |a_p \phi_p|} \quad (3.105)$$

3.5.4. Струјне слике

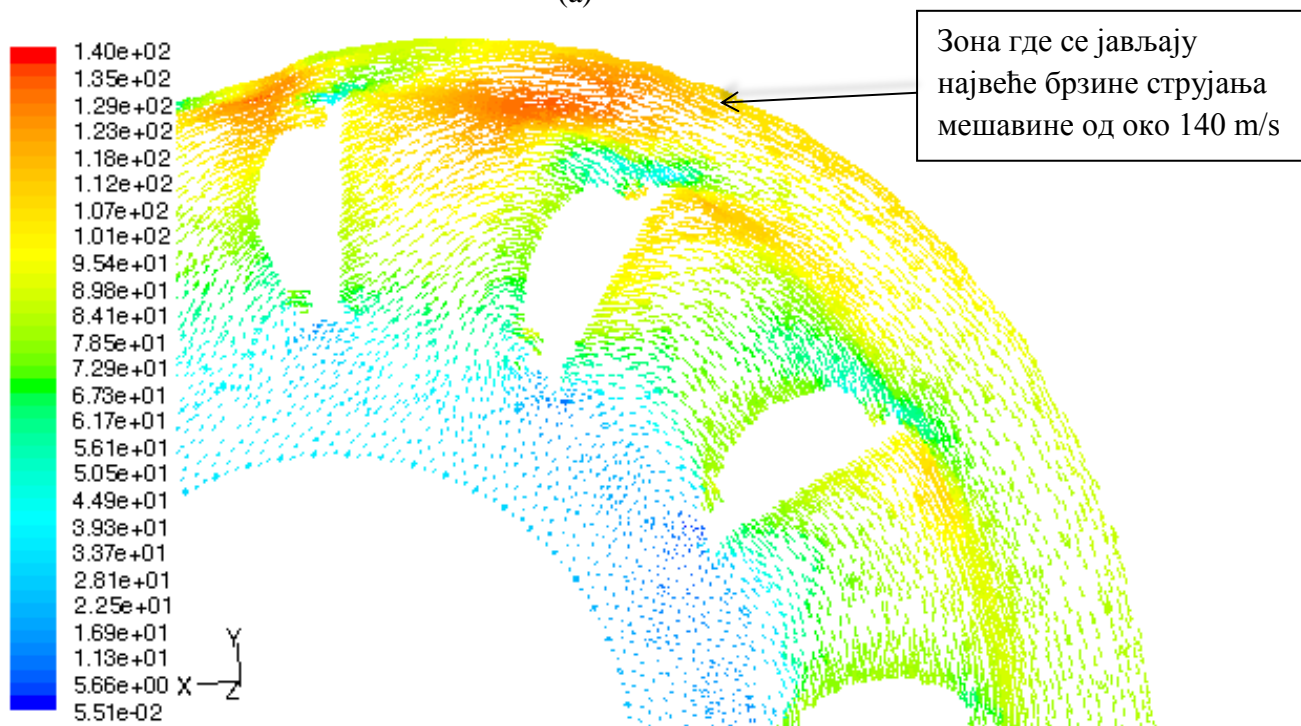
Нумеричка симулација је изведена за комплетан систем вентилациони млин-канал аеросмеше, али за потребе ове дисертације приказани су само резултати струјања мешавине примарне фазе са угљем и песком, као монодисперзним грануларним секундарним фазама, пречника честица од 150 μm , односно 300 μm .

Вектори брзине, запреминске концентрације грануларних фаза, турбуленција и путање флуидних делића у млину и на излазу из млина у зони усисних плоча ка каналима аеросмеше приказани су на сликама од 3.5. до 3.12.

Вектори апсолутне брзине мешавине приказани на слици 3.5. указују на појаву турбуленције на излазу из вентилационог млина у канал аеросмеше услед враћања дела мешавине из канала у млин. У тој зони су и највеће брзине струјања и износе око 140 m/s.



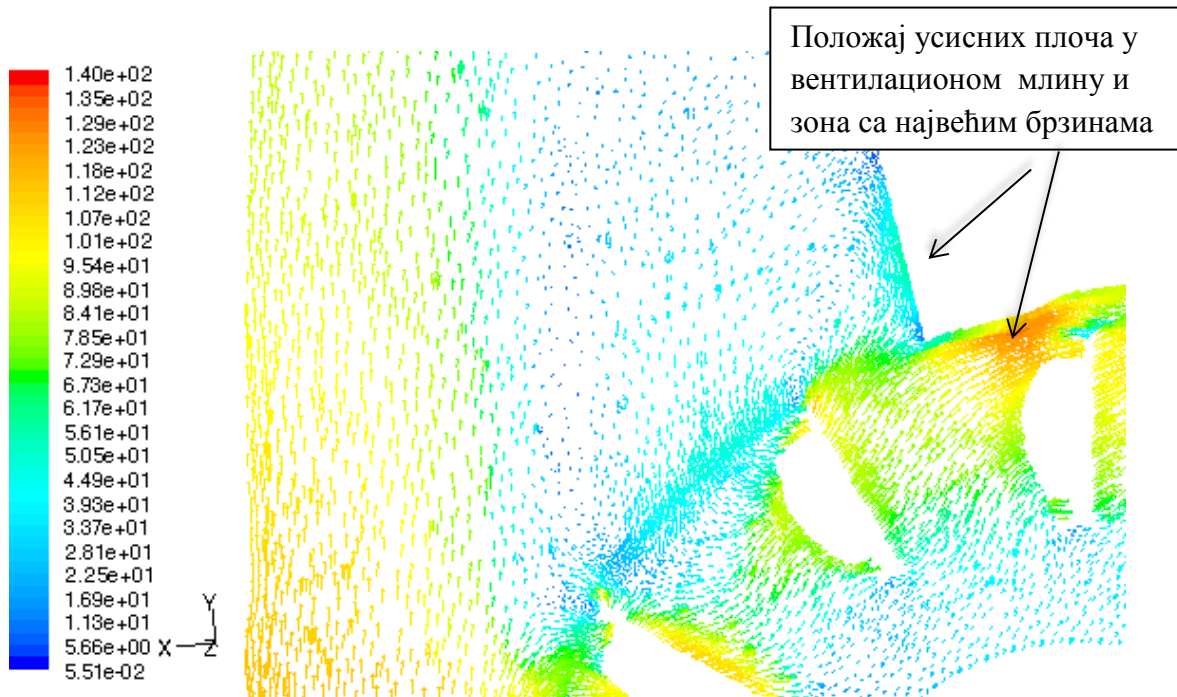
(а)



(б)

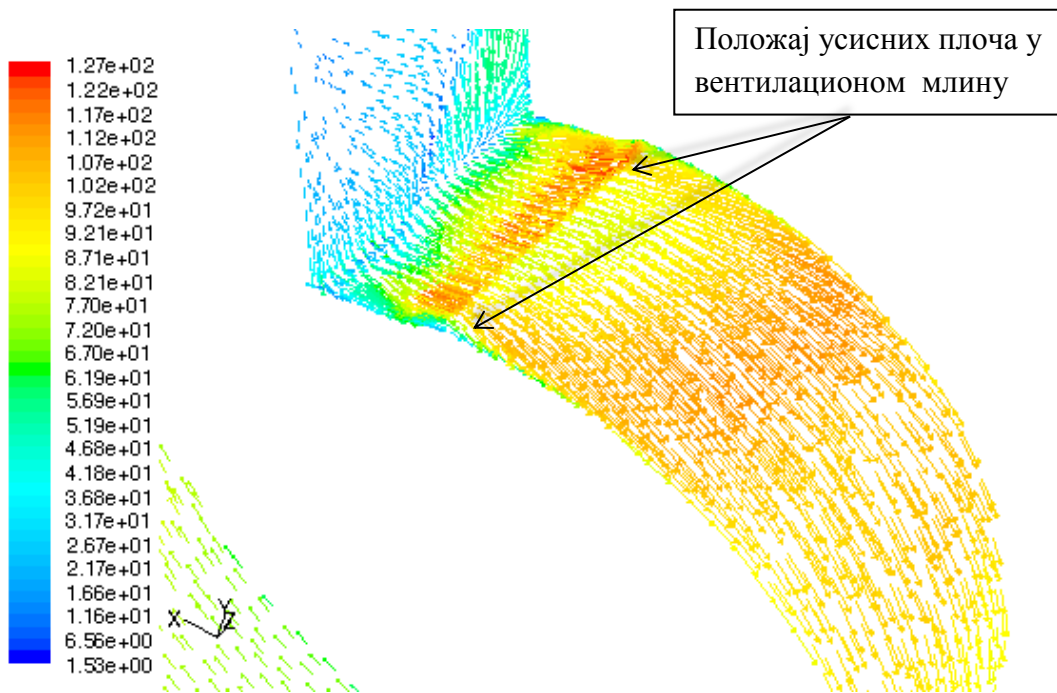
Слика 3.5. Вектори апсолутне брзине мешавине у млину а) и детаљ зоне са највећим брзинама струјања (зона око усисних плоча) б) [7]

На слици 3.6. приказани су вектори апсолутне брзине мешавине на почетку канала аеросмеше. Очигледно је да се услед вентилационог дејства млина део аеросмеше из канала враћа у млин, што изазива јако вртложење.

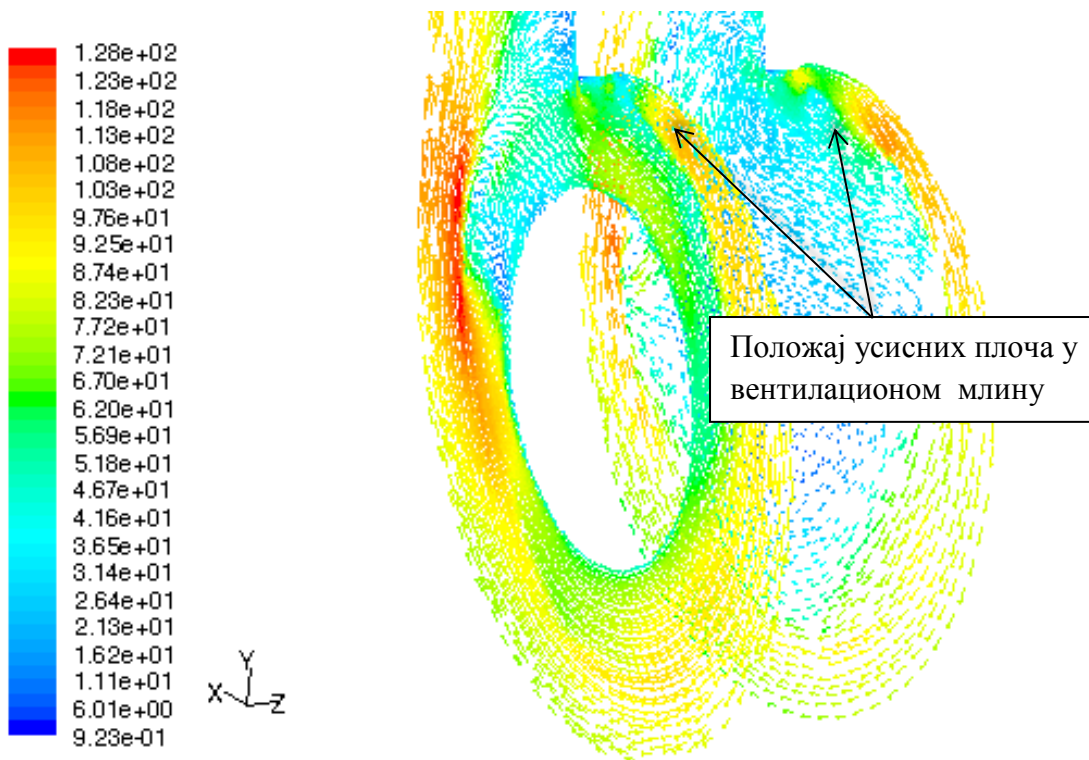


Слика 3.6. Вектори апсолутне брзине мешавине на изласку из млина и почетку канала аеросмеше [7]

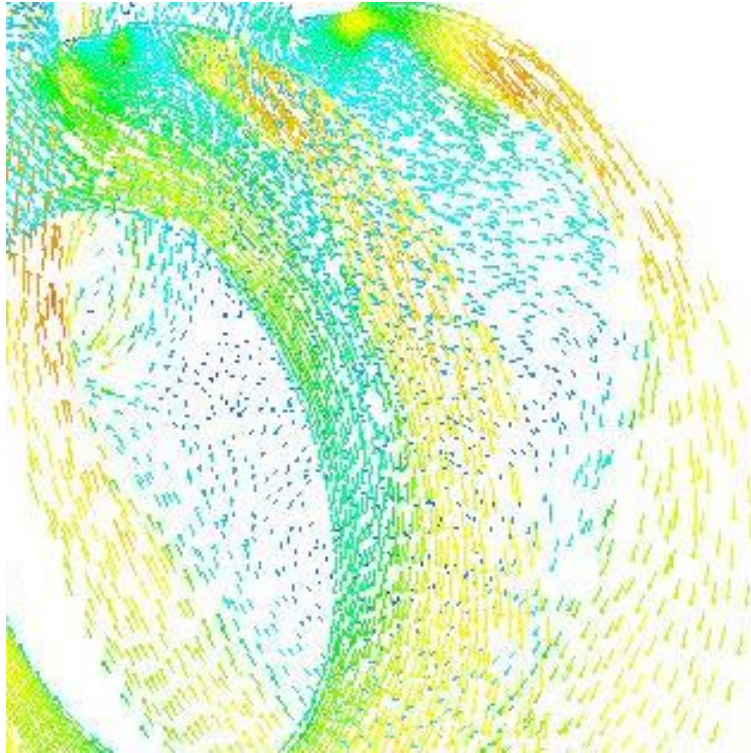
Посебна пажња је била усмерена на анализу расподеле брзине и смера кретања честица песка због њиховог интензивног хабајућег дејства (ерозија и абразија). Слика 3.7. а), б) и в) приказује векторе апсолутне брзине честица песка уз зидове млина, односно у тежиштима ћелија које се налазе уз сам зид у зони која обухвата излазни део вентилационог млина и положај сета усисних плоча. На основу скале са леве стране струјне слике види се да је интензитет брзине у распону од око 80 m/s до 127 m/s.



a)



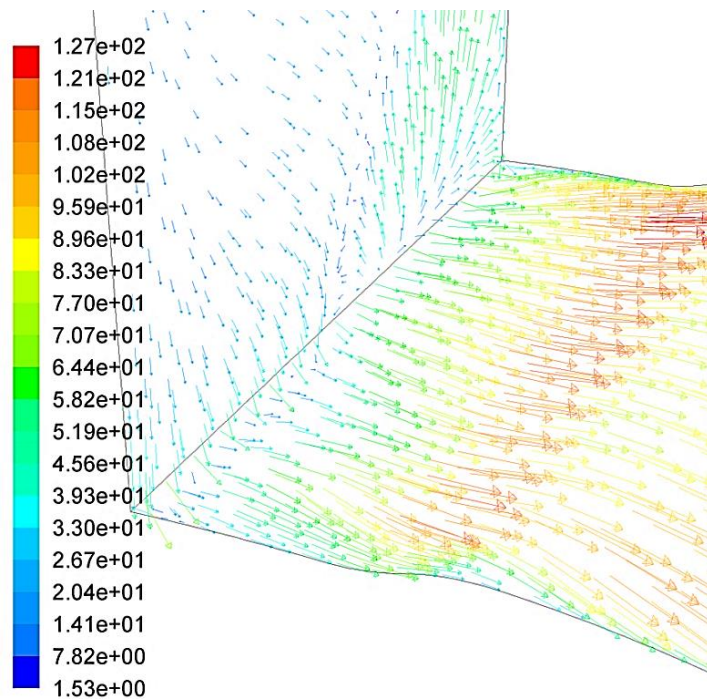
b)



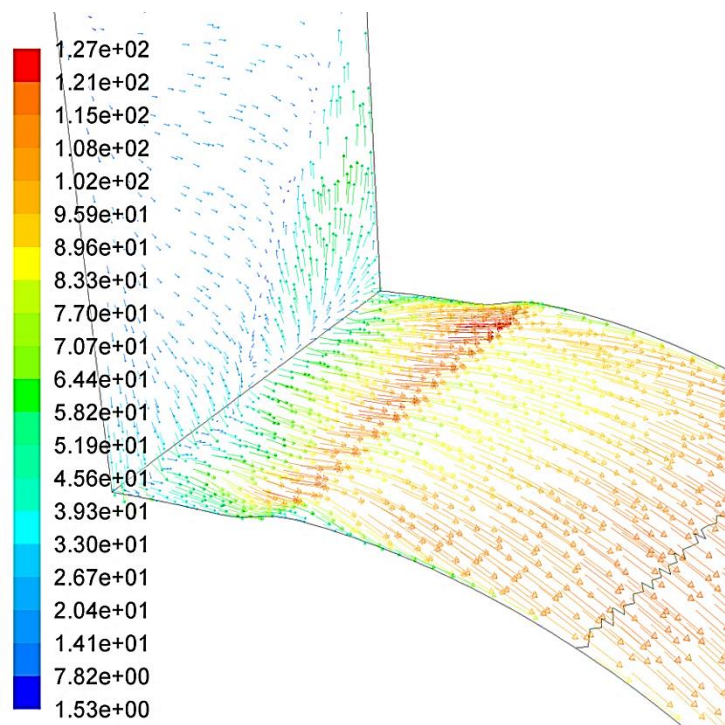
в)

Слика 3.7. Вектори апсолутне брзине струјања честица песка на излазу из вентилационог млина у зони усисних плоча а) и на зидовима млина б) и в)

На сликама 3.8. а) и б) приказани су детаљи са векторима апсолутних брзина струјања честица песка у зони усисних плоча. На основу подеоне скале (лево) може се видети да се интензитет брзине креће од 80 m/s до 127 m/s.



а)

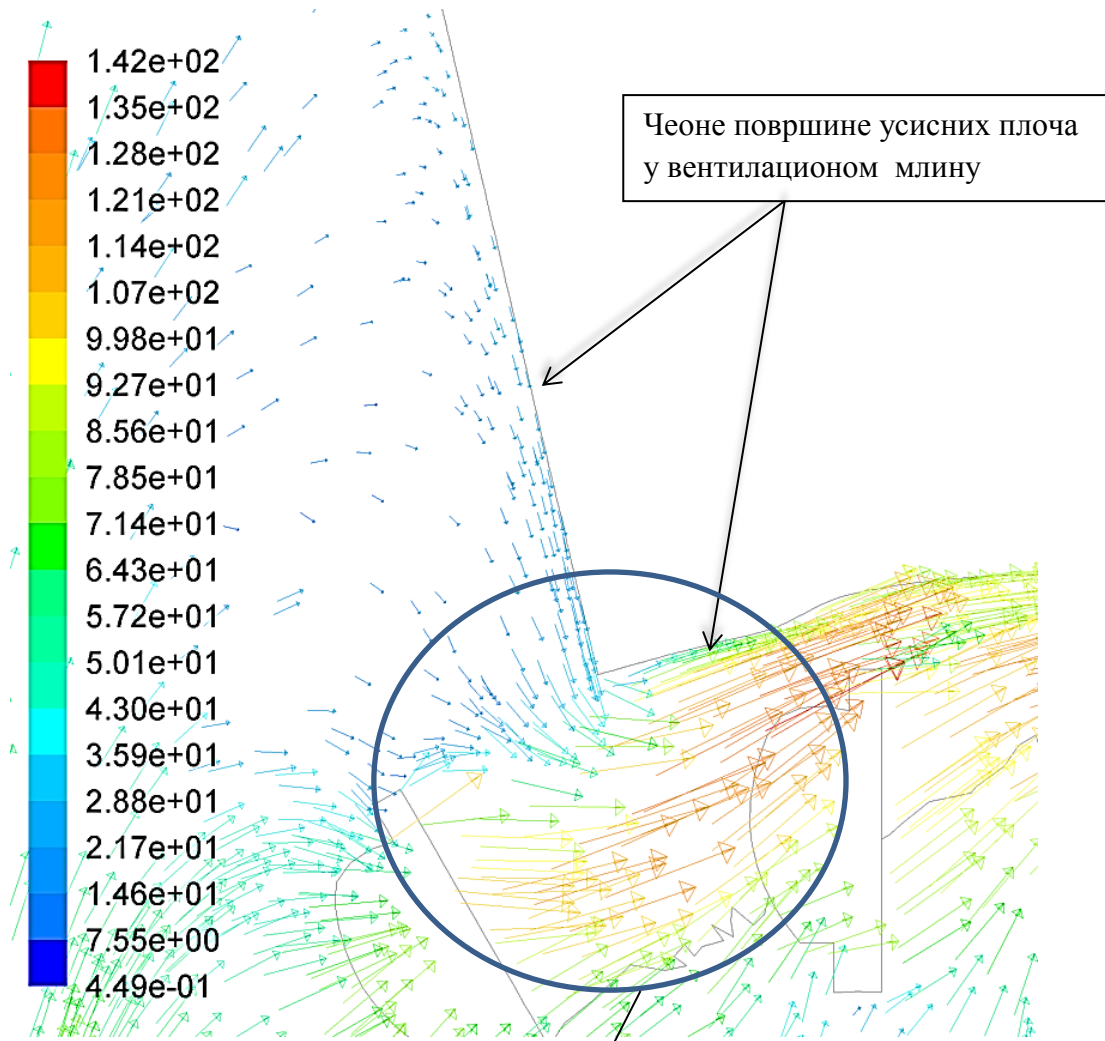


б)

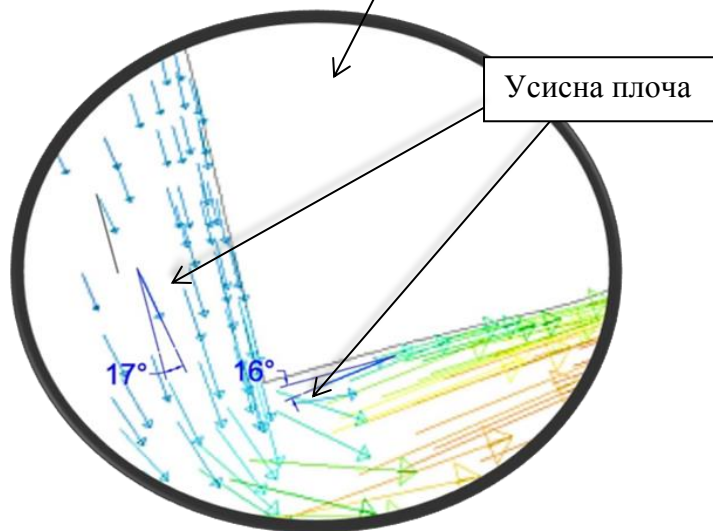
Слика 3.8. Увеличан детаљ са векторима апсолутних брзине струјања на зидовима млина у зони усисних плоча а) и б)

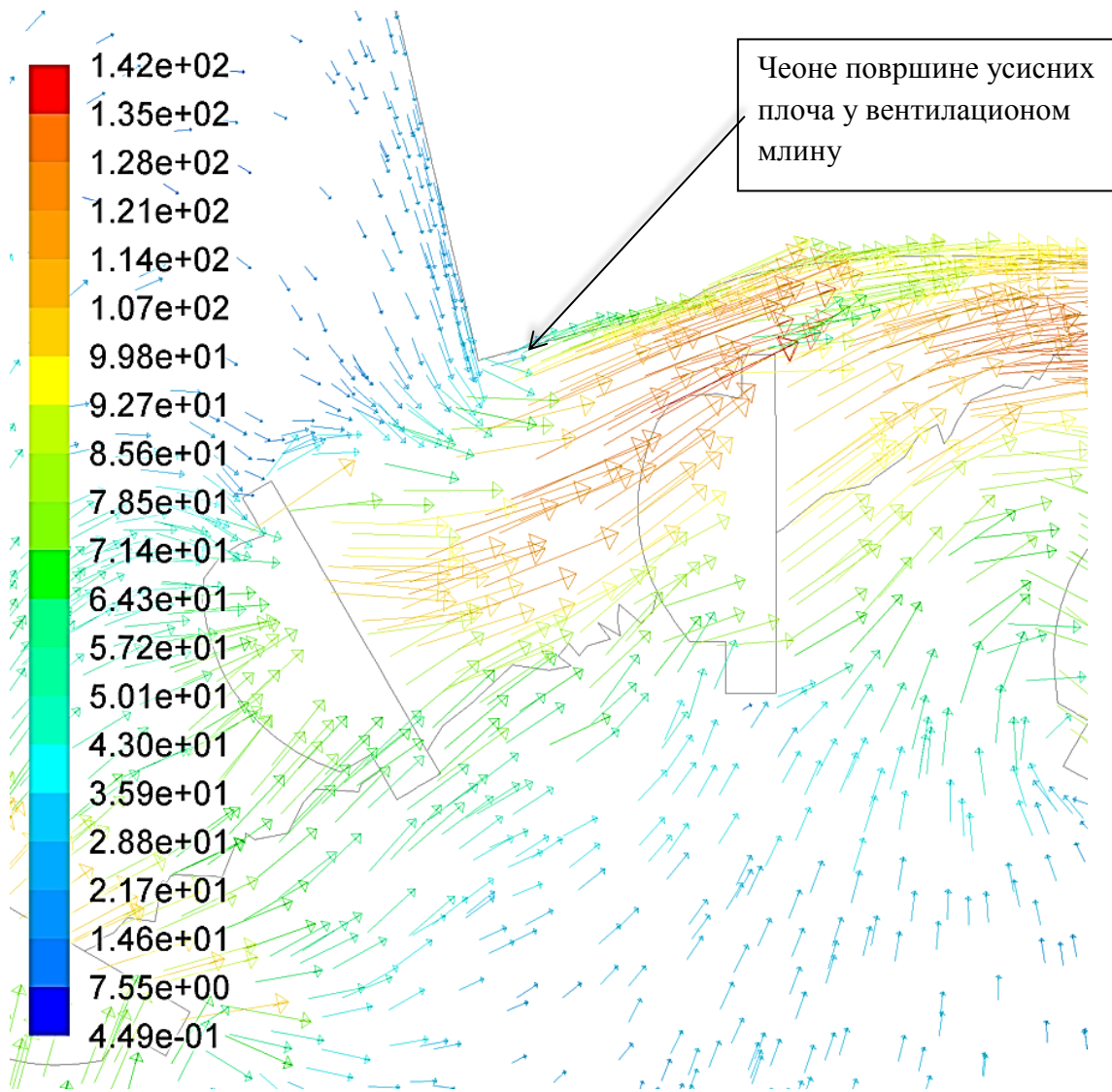
Анализа струјних слика мешавине и песка (вектори брзине мешавине и песка) показује да је у овом случају доминантно ерозивно хабање усисних плоча Тачније, мултифазно струјање загрејаних рецикулационих гасова, честица угља и песка у зони изласка из вентилационог млина, указује да је њихово дејство усмерено под малим нападним углом на чеоне површине усисних плоча са максималном брзином од око 127 m/s. Ово је у складу са тврдњом да је за материјале мање тврдоће (од 360 – 420 HV за челични лив GS-36Mn5) и при већим брзинама струјања честица, најинтензивније ерозивно хабање при нападним угловима од 15° до 30°. [3] .

Струјне слике детаља зоне усисних плоча од 3.9. а), б), в), г) и д) које приказују векторе апсолутне брзине честица мешавине потврђују претходна запажања.

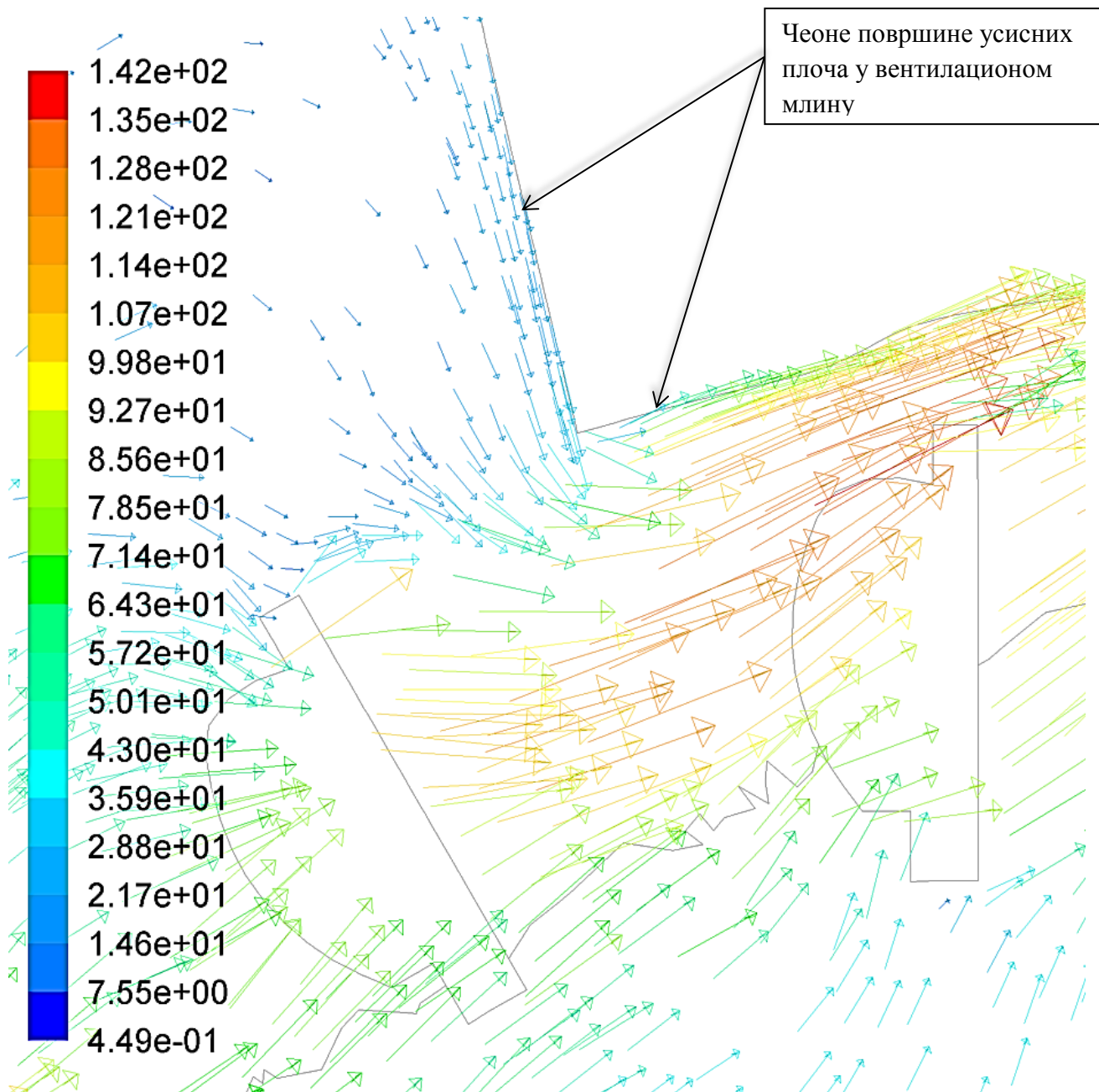


(a)

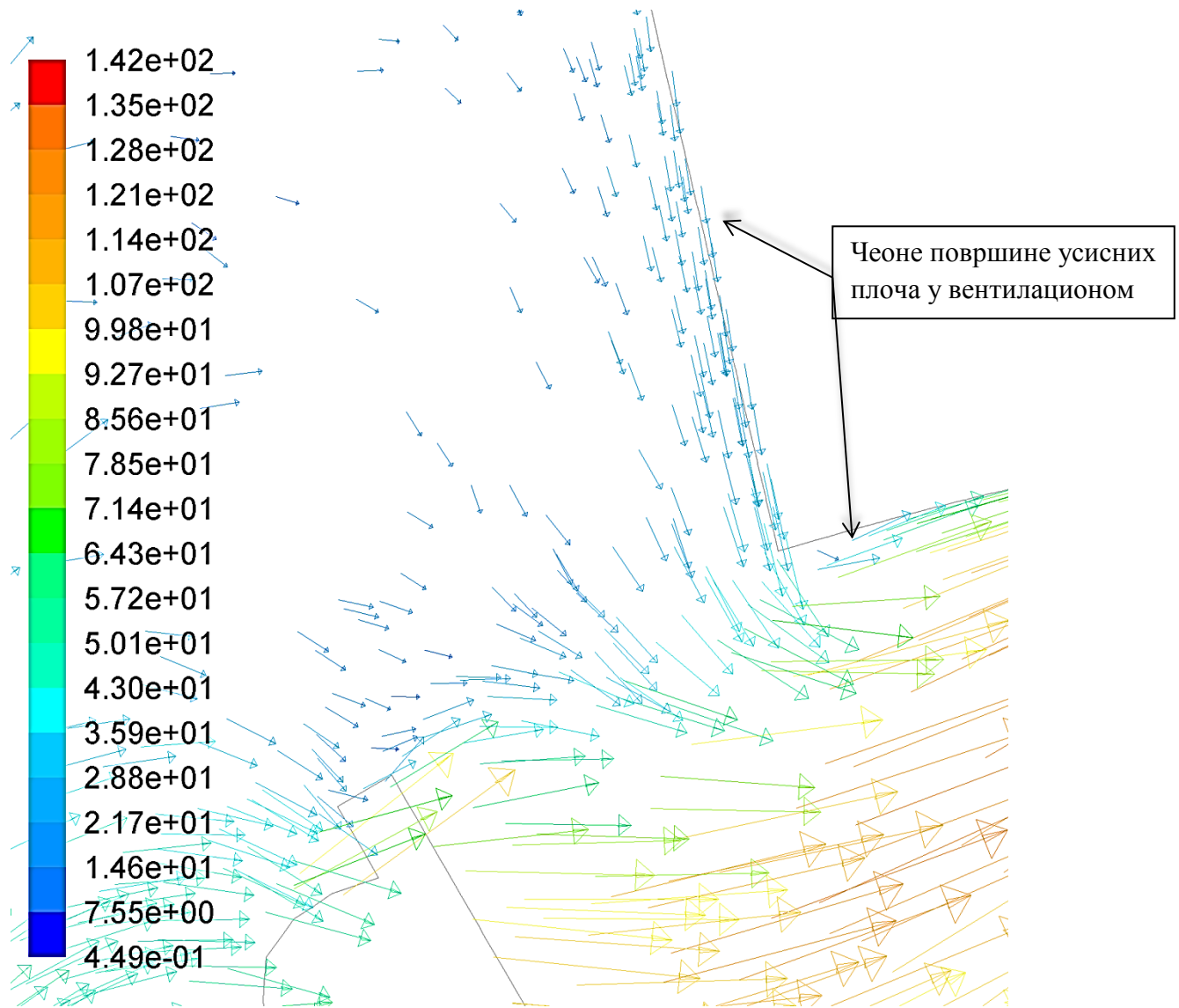




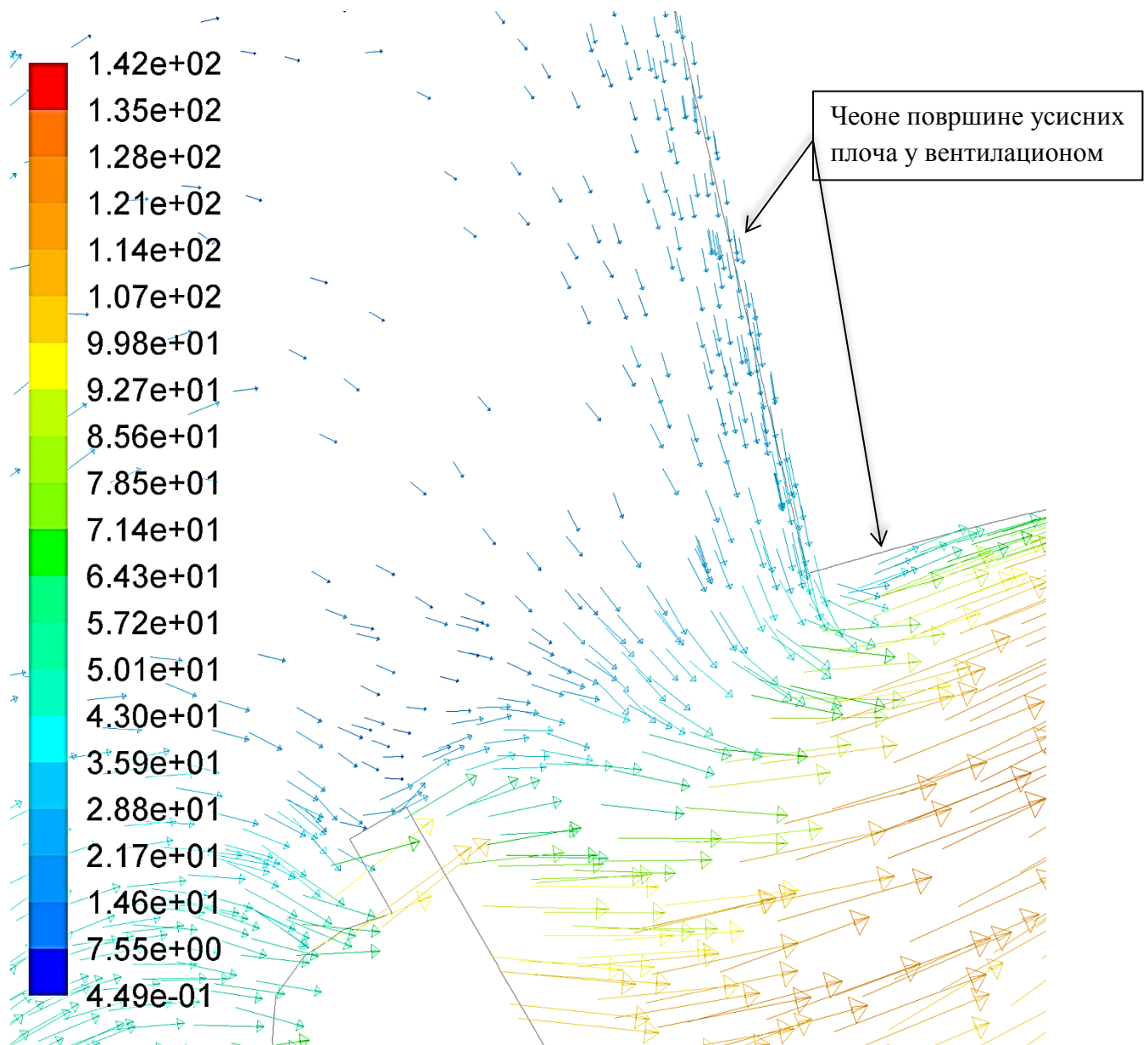
(6)



(B)



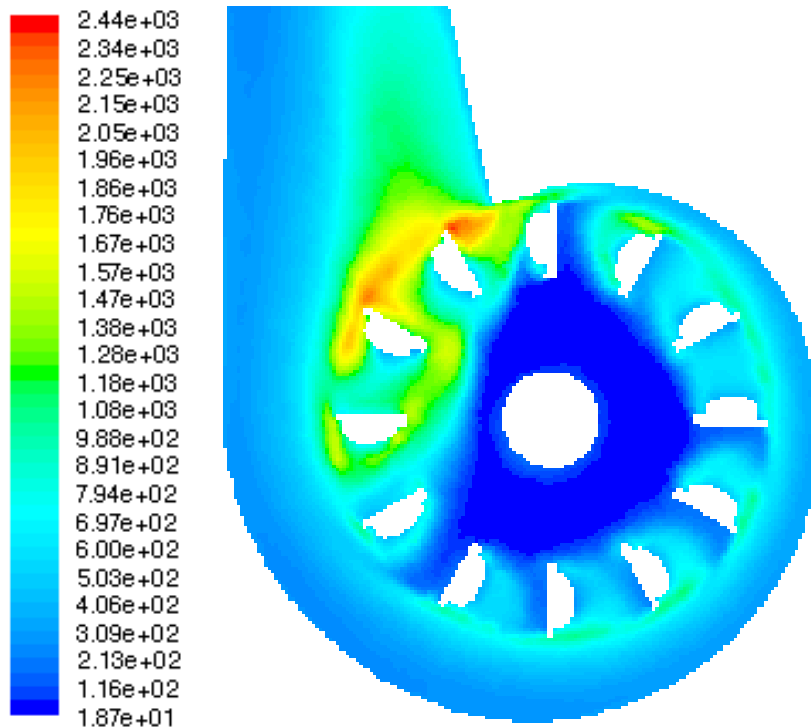
(г)



(д)

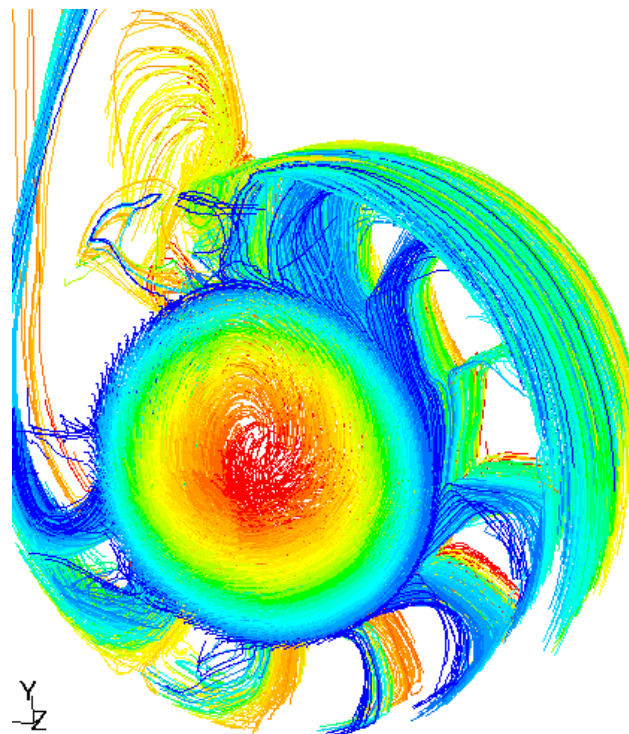
Слика 3.9. Увеличан детаљ са векторима апсолутних брзине струјања у зони усисних плоча а), б), в), г) и д)

Као што је већ речено највећа турбуленција јавља се при преласку из млина у канал аеросмеше као последица вентилационог дејства млина. Интензитет турбуленције приказана је на слици 3.10. Када се ова струјна слика упореди са сликом 3.9., на којој су приказани вектори апсолутне брзине аеросмеше у овом делу, постаје очигледно зашто је турбуленција у овој зони најизраженија.



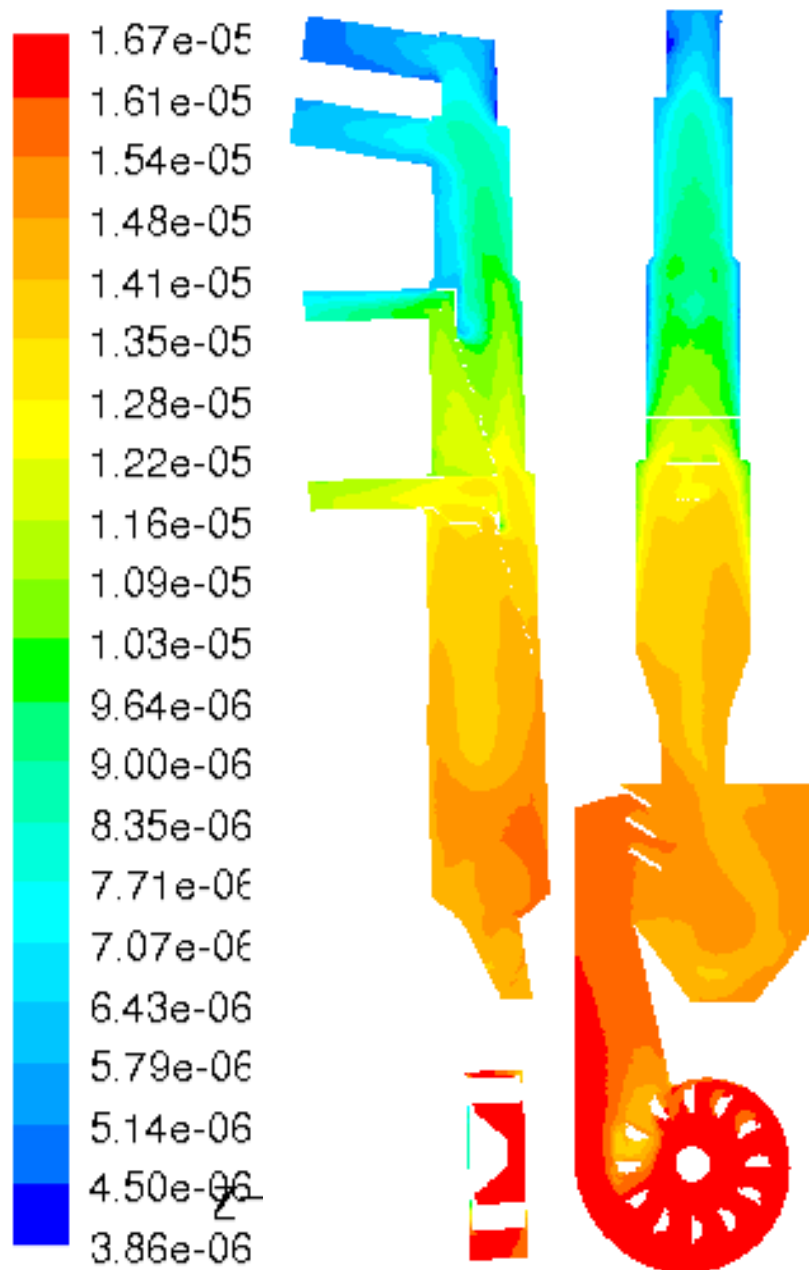
Слика 3.10. Турбуленција у млину

На слици 3.11. приказане су путање флуидних делића мешавине у вентилационом млину, с тим што су поједини детаљи посебно издвојени да би се боље уочиле те путање.



Слика 3.11. Путање флуидних делића мешавине

Запреминска концентрација песка у млину и каналу аеросмеше је дата на слици 3.12., у равни паралелној оси ротације ударног кола и равни нормалној на осу ротације.



Слика 3.12. Запреминска концентрација песка

Највећа концентрација песка је у млину (1.16×10^{-5} до 1.41×10^{-5}), а од клапни навише нагло опада, да би код горњег отпарка била скоро за ред величине мања у односу на ону код улаз у млин.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

У оквиру овог поглавља приказани су резултати испитивања хемијског састава, структурно – механичких особина и процена заварљивости материјала усисних плоча вентилационог млина. Поред тога, дати су услови израде, израда и резултати недеструктивних и структурно – механичких испитивања моделних узорака са антихабајућим слојевима.

Експериментална истраживања су реализована у лабораторијама Института Гоша, Messer Tehnogasa - Castolin Eutectic, Рударско Геолошког факултета у Београду, Војнотехничког института у Београду и у Термоелектрани Костолац Б, Костолац.

4.1. Особине материјала усисних плоча

У оквиру ове дисертације урађена је аналитичка процена заварљивости и предвиђања ефеката термичких циклуса наваривања на микроструктуру и особине ЗУТ-а нисколегираног челика GS-36Mn5 (DIN) (SEW 835) (ČL 3134 ознака по старом JUS-у), од којег су израђене носне (усисне) плоче (слика 4.1.). Овај материјал захтева знатно сложеније услове заваривања (односно наношења слојева - превлака) у односу на угљенични челик S235JRG2 (узорци за моделна испитивања), који припада лако заварљивим материјалима са ($C < 0.25\%$). Обложне плоче вентилационог млина су такође израђене од наведеног челика. Прорачуни заварљивости челика GS-36Mn5 су изведени на основу хемијског састава испитиваног материјала (табела 4.1.), који је одређен спектрофотометријском методом. Аналитичка процена заварљивости, осетљивости на појаву прлина, трансформационо понашање и температуре предгревања, одређене су на основу наведеног хемијског састава за две одабране дебљине челика $s=20\text{mm}$ и $s=40\text{mm}$. Целокупна анализа обављена је на основу аналитичких метода заснованих на нумеричким једначинама приказаним у табели 4.3. и једначина од 4.1. до 4.10. Прорачун се заснива на променљивим параметрима (I , U , v , T_p) и константним параметрима (δ и η).



Слика 4.1. Изглед усисних плоча

4.1.1. Хемијски састав и механичке особине основног материјала

Анализа хемијског састава узорка челика GS-36Mn5 (Č3134) одређена је спектрофотометријском методом и дата је у табели 4.1. Испитивање затезањем на собној температури извршено је на хидрауличној кидалици за испитивање материјала затезањем и притискањем, произвођача A.J.AMSLER SCHAFFHAUSEN, коришћењем кратких пропорционалних епрувета DIN 50125.

Макротврдоћа HV30 је мерена на уређају за испитивање тврдоће метала по Brinell-у и Vickers-у, произвођача WEB WERKSTOFFPRUFMACHINEN-LEIPZIG. Tip: HP 250 на узорцима исеченим из усисних плоча. Величина механичких особина је дата у табели 4.2. Хемијски састав и механичке особине челика одговарају захтевима стандарда SEW 835, односно EN 10028-2.

Табела 4.1. Хемијски састав GS-36Mn5 (Č 3134), (mas.%).

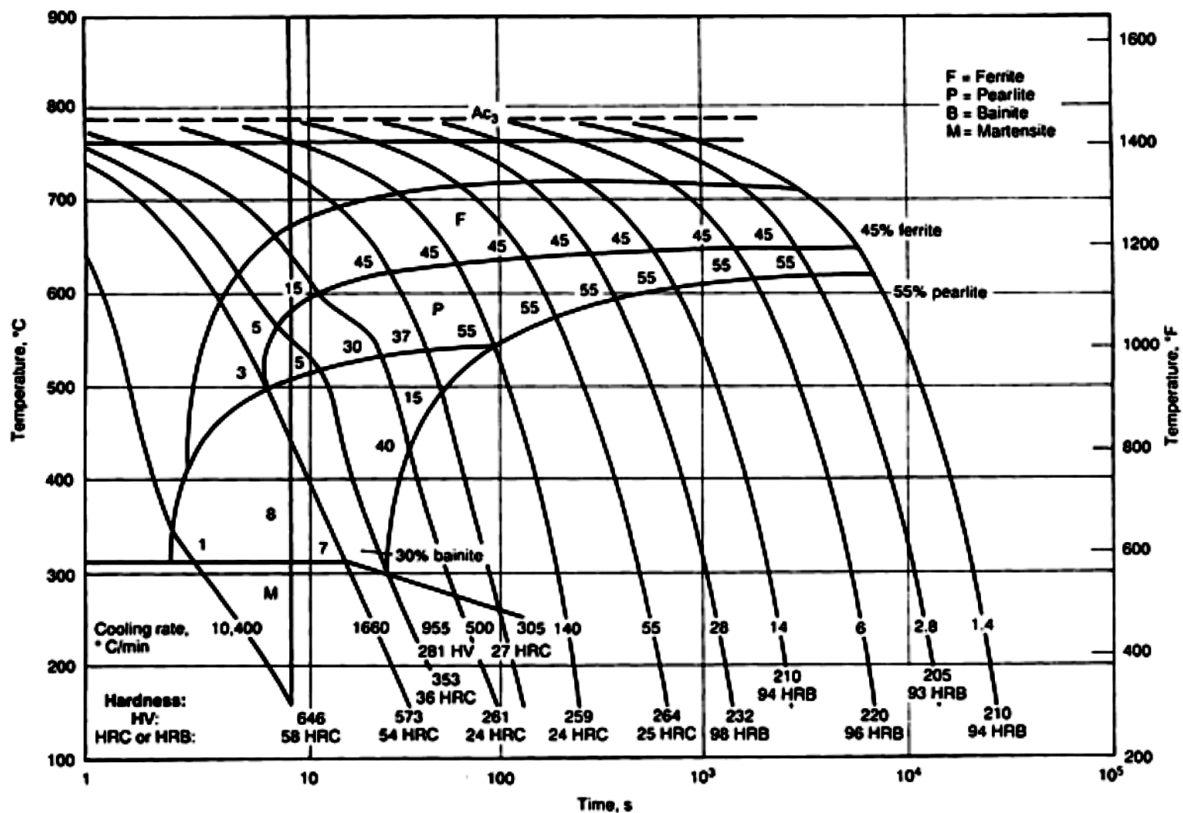
Врста анализе	C	Si	Mn	S _{max}	P _{max}
SRPS EN	0,32-0.40	0,25-0.50	1,20- 1.50	0,04	0,04
испитивани челик	0.48	0, 54	1,83	0,02	0,02

Табела 4.2. Механичке особине челика GS-36Mn5 (Č 3134)

Врста анализе	R _{p0.2} , МПа	R _m , МПа	A ₅ , %	HV
SRPS EN	min. 390	780-930	min. 7	340-430
испитивани челик	439	840	10.1	360-420

4.1.2. Анализа заварљивости

Дијаграм континуираног хлађења (КН) за челика (GS-36Mn5) приказан је на слици 4.2. На основу овог дијаграма може се закључити да се при већим брзинама хлађења, у структури јавља мартензит, односно беинит, а при спором хлађењу ($t_{8/5} > 50s$) се формира ферит и перлит. У случају заваривања или наваривања, при чему се остварују и веће брзине хлађења, код овог челика се може јавити мартензитно - беинитна микроструктура и при хлађењу на ваздуху, што указује на склоност ка појави кртих структура и прслина у ЗУТ-у.



Слика 4.2. Дијаграм континуираног хлађења челика (GS-36Mn5)

4.1.3. Аналитичка оцена заварљивости

Резултати примене параметарских једначина су приказани у табели 4.3., где су приказани резултати аналитичке процене заварљивости челика (GS-36Mn5) на основу добијене хемијске анализе челика (табела 4.3.).

Параметарске једначине чији су резултати приказани у табели 4.3.

$$C_{EKV}(PW) = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15 \quad (4.1)$$

$$C_{EKV}(\text{Japan}) = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 \quad (4.2)$$

$$C_{EKV}(\text{BWRA}) = C + Mn/20 + Ni/15 + (Cr+Mo+V)/10 \quad (4.3)$$

$$P_{CM}(\text{Tekken}) = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/15 + 5B \quad (4.4)$$

$$P_W = P_{CM} + H/60 + K/400000 \quad H=5; \quad K = 69 s \quad (4.5)$$

Јапански сајт, стандарди ASTM A 1005/A-00 i ASME B16.49-2000

$$C_{En} = C + f(C) (Si/24 + Mn/6 + Cu/15 + Ni/20 + (Cr+Mo+Nb+V)/5)$$

$$f(C) = 0,75 + 0,25 \tanh(20(C-0,12)) \quad (4.6)$$

$$HCS = 10C(100(S+P) + 4Si + Ni)/(3Mn + Cr + Mo + V) \quad (4.7)$$

$$DG = Cr + 3,3Mo + 8,1V + 10C - 2 \quad (4.8)$$

$$P_{Sr} = Cr + Cu + 2Mo + 10V + 7Nb - 5Ti - 2 \quad (4.9)$$

$$HV = 90 + 1050C + 47Si + 75Mn + 30Ni + 31Cr \quad (4.10)$$

Табела 4.3. Резултати аналитичке процене заварљивости челика (GS-36Mn5)

ПОКАЗАТЕЉ	ОЗНАКА	Израчуната вредност	КОМЕНТАР
Еквивалент угљеника по PW ¹	C _{EKV}	0,785	Условно заварљив
Еквивалент угљеника – јапанска ²	C _{EKV}	0,8075	Условно заварљив
Еквивалент угљеника по BWRA ³	C _{EKV}	0,5715	Условно заварљив
Параметар прслина према Текену ⁴	P _{CM}	0,590	Склон прслинама
Параметар за хладне прслине ⁵	P _{W20}	0,6759	Склон прслинама
	P _{W40}	0,6794	
C _{En} ⁶	C _{En}	0,814	Склон прслинама
Тврдоћа ЗУТ-а - хладне прслине ¹⁰	HV	756,63	Склон прслинама
Индекс за топле прслине ⁷	HCS	5,386	Склон прслинама
Параметар прслина услед жарења - Накамуру ⁸	DG	2,8	Склон прслинама
Индекс прслина услед жарења - Ito ⁹	P _{Sr}	-2	Склон прслинама

У табели 4.4. приказани су резултати аналитичке процене температуре предгревања а такође у табели 4.5. температуре фазних трансформација челика (GS-36Mn5) према хемијској анализи челика (табела 4.1.). Индексима су означене примењене једначине.

Табела 4.4. Температура предгревања челика (GS-36Mn5)

ПОКАЗАТЕЉ	ОЗНАКА	Израчуната вредност
Температура предгревања, Јапански сајт ³	T(°C, стварни)	243,7/219,4/170,6

^{4.3.} Јапански сајт: у-groove Restraint Test/Reparature Welding/Normal Welding

$$\text{Јапански сајт } T_{MS}(^{\circ}\text{C}) = 521 - 353\text{C} - 22\text{Si} - 24,3\text{Mn} - 7,7\text{Cu} - 17,3\text{Ni} - 17,7\text{Cr} - 25,8\text{Mo} \quad (4.11)$$

$$\text{Јапански сајт } T(\text{Ac}_3, ^{\circ}\text{C}) = 937,2 - 436,5\text{C} + 56\text{Si} - 19,7\text{Mn} - 16,3\text{Cu} - 26,6\text{Ni} - 4,9\text{Cr} + 38,1\text{Mo} + 124,8\text{V} + 136,3\text{Ti} - 19,1\text{Nb} + 198,4\text{Al} + 3315\text{B} \quad (4.12)$$

$$\text{Јапански сајт } T(\text{Ac}_1, ^{\circ}\text{C}) = 750,8 - 26,6\text{C} + 17,6\text{Si} - 11,6\text{Mn} - 22,9\text{Cu} - 23\text{Ni} + 24,1\text{Cr} + 22,5\text{Mo} - 39,7\text{V} - 5,7\text{Ti} + 232,4\text{Nb} - 169,4\text{Al} - 894,7\text{B} \quad (4.13)$$

Приказани резултати указују да је челик (GS-36Mn5) заварљив применом конвенционалних поступака заваривања али уз примену одговарајућих мера предострожности. То значи да је у току заваривања или у нашем случају наношења антихабајућих превлака потребно водити рачуна о температури предгревања, брзини загревања, хлађења и температури међупролаза, односно о термичком циклусу заваривања (наваривања). Поред тога, резултати параметарских једначина појаве прслина услед жарења по Накамуру и Итоу указују да је овај челик склон појави ових прслина. Температура предгревања је одређена параметарским једначинама датим у табели 4.4. Добијене температуре предгревања су у интервалу од 219–250 °C. Према емпиријској једначини мартензит у челичном ливу (GS-36Mn5) може да се формира почев од 295,2 °C.

Генерално речено, челик (GS-36Mn5) припада групи условно заварљивих челика, који могу успешно да се заварују уз примену посебних додатних материјала, предгревања и других мера предострожности.

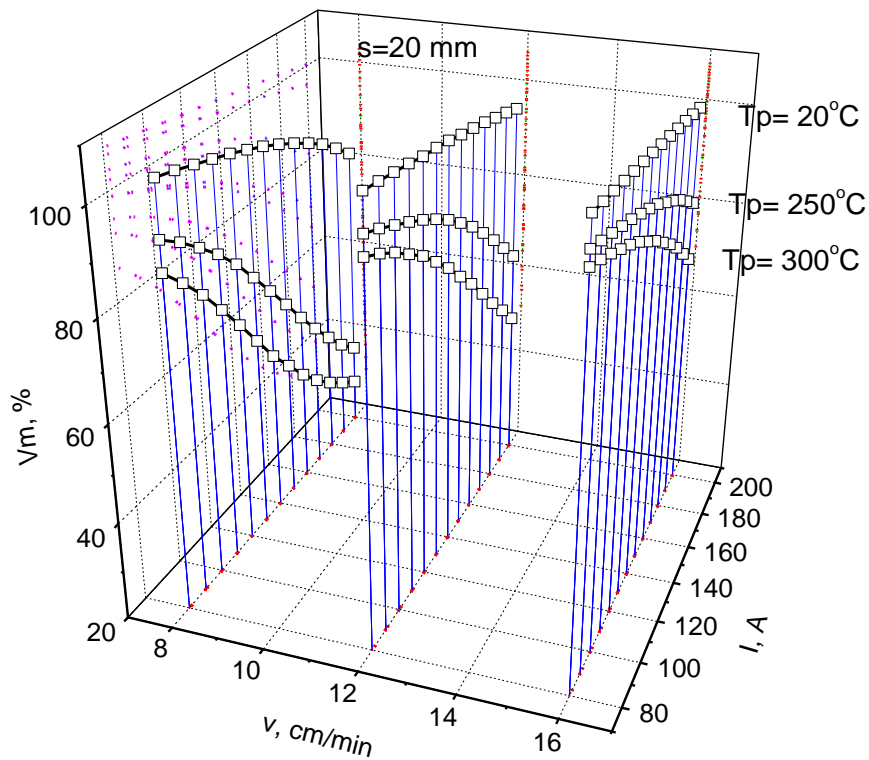
Табела 4.5. Температуре фазних трансформација челика (GS-36Mn5)

ПОКАЗАТЕЉ	ОЗНАКА	Израчуната вредност
Темп. почетка март. трансф., Јапански сајт ²	T_{MS} (°C, стварно)	295,2
Темп. Ас3 тачке, Јапански сајт ⁵	T (Ас3, °C, стварно)	722,3
Темп. Ас1 тачке, Јапански сајт ⁶	T (Ас1, °C, стварно)	726,3

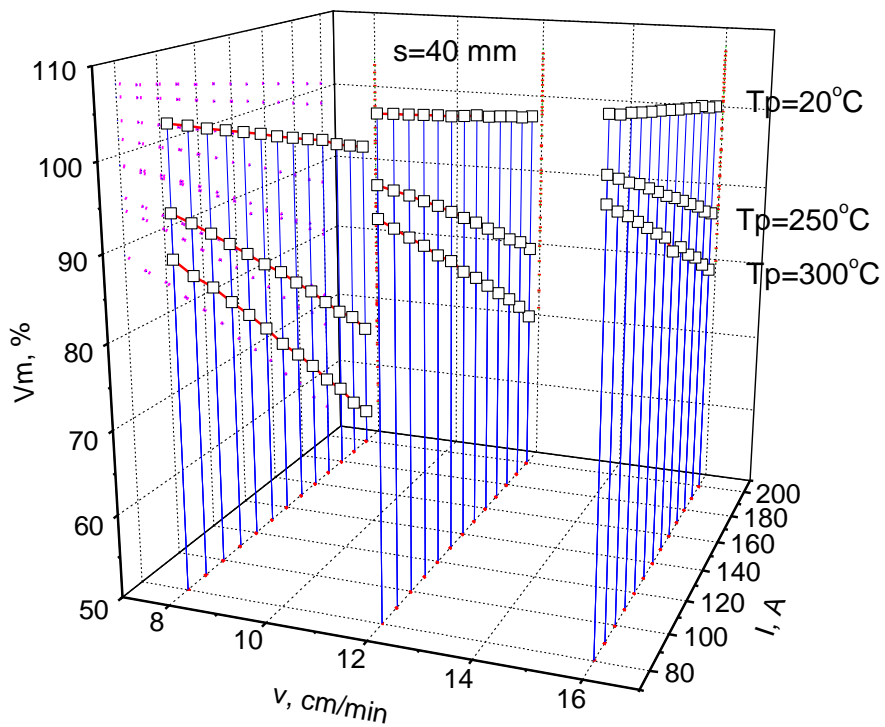
У циљу спречавања појаве хладних прелина у завареном споју и добијања споја са захтеваним механичким особинама било је потребно одредити такав температурски циклус нашошења, који би обезбедио одређену брзину хлађења споја у температурском интервалу трансформације аустенита и оптимално задржавање изнад A_{C3} температуре. Допуштена максимална брзина хлађења, односно време хлађења $t_{8/5}$, зависи од хемијског састава челика, димензија завареног споја и садржаја водоника у металу шава [27,28].

На сликама од 4.3. до 4.8. приказана је зависност предложених параметара заваривања (I, A; U, V; v, cm/min.; T_P , °C, E_P , kJ/mm) и параметара као што су: $t_{8/5}$ - време хлађења (s); HV5 – тврдоћа и V_M – удео мартензита (%) у ЗУТ-у, при дебљинама материјала од 20mm и 40mm и коефицијенту искоришћења лука за Е поступак од 0.8. Предложене температуре предгревања су $T_P = 250$ °C, 300 °C и без предгревања ($T_P = 20$ °C).

У наведеним условима заваривања на сликама од 4.3. до 4.8., најмањи удео мартензита (V_M), односно тврдоћа (HV), постиже се при најмањој брзини заваривања (8 cm/min.) и највишој температури предгревања (300°C). Међутим, под овим условима заваривања тврдоћа у ЗУТ-у је већа од 350 HV.



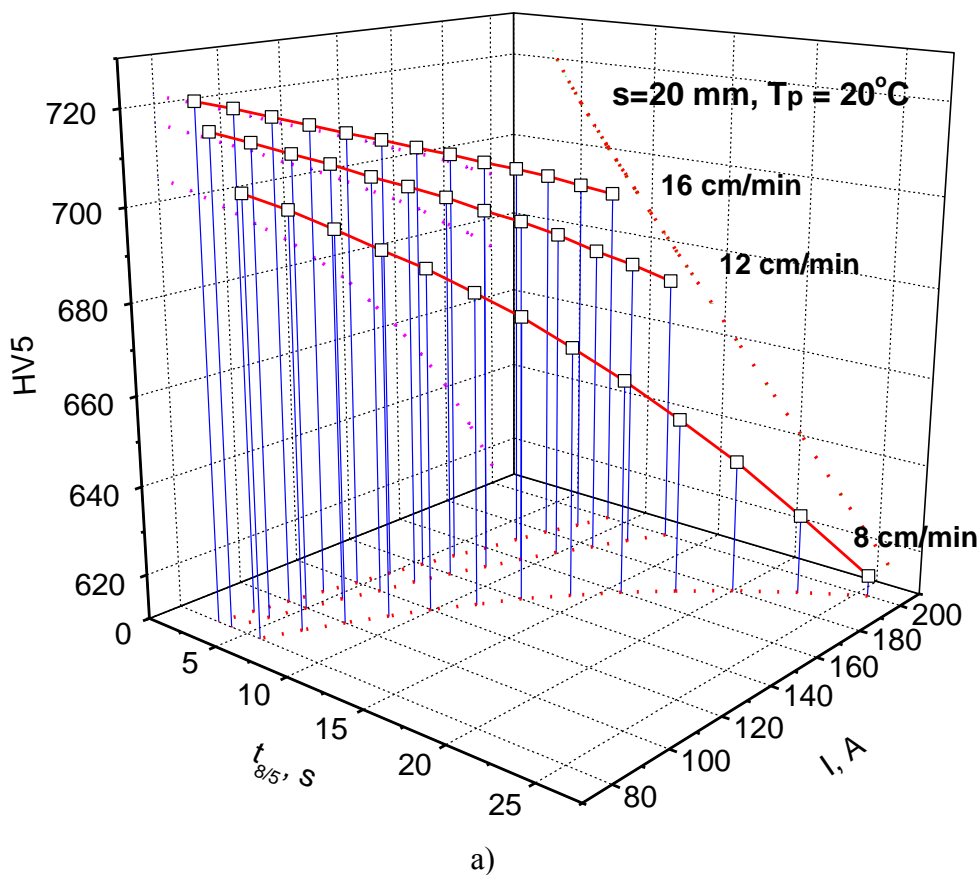
а)

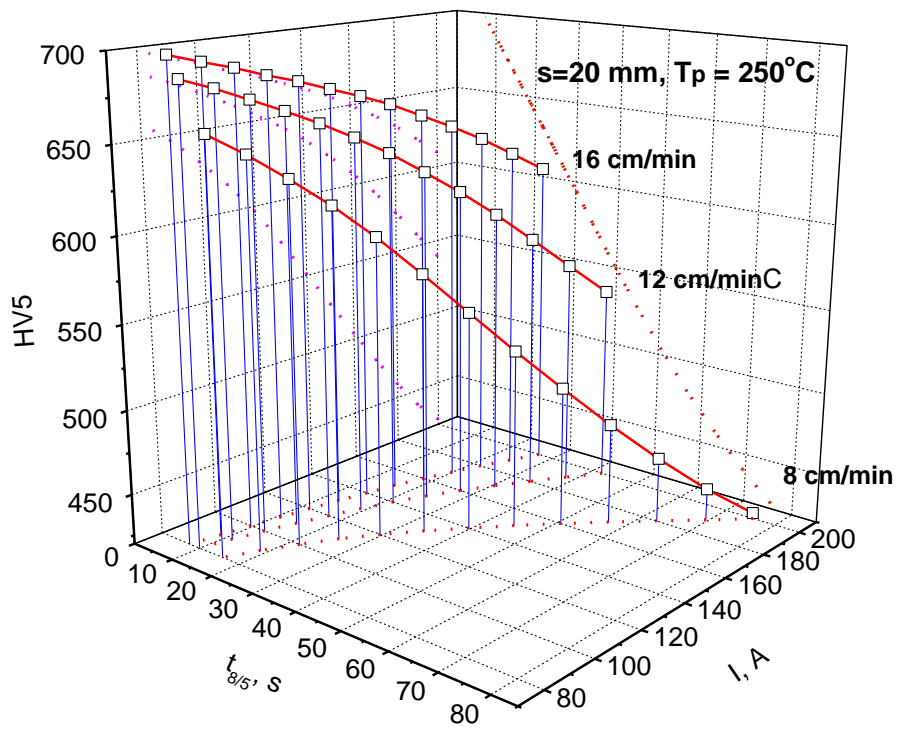


б)

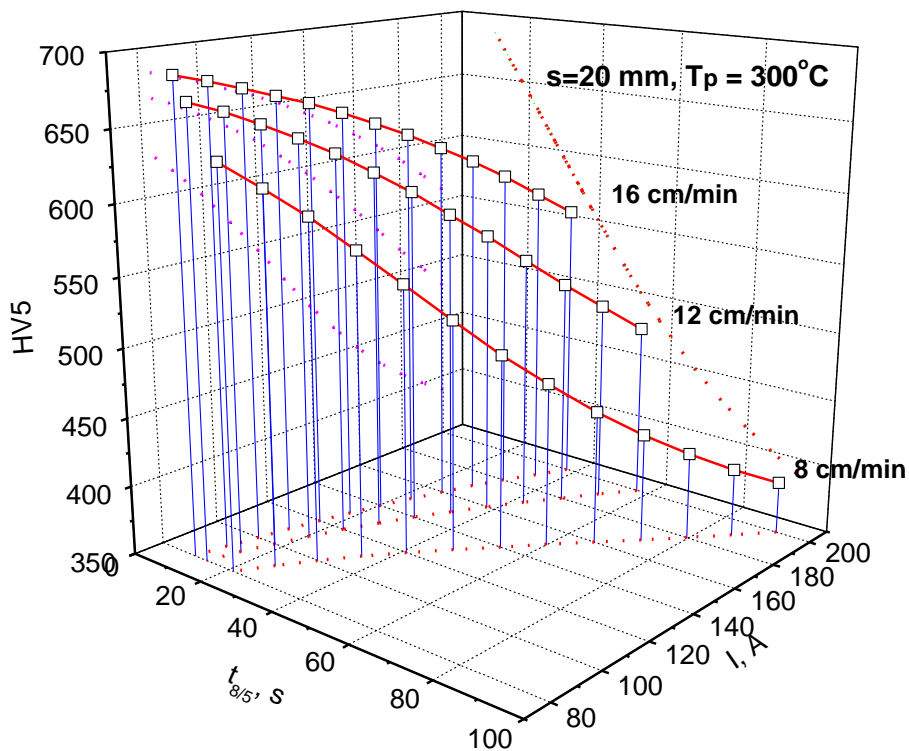
Слика 4.3. а) и б) Зависност удела мартензита V_M од струје заваривања I и брзине заваривања v при температурама предгревања $T_P = 250^\circ\text{C}$, 300°C и без предгревања $T_P = 20^\circ\text{C}$ за материјал дебљине $s = 20\text{ mm}$ а) и 40 mm б).

Удео мартензита опада са повећањем температуре предгревања а расте са повећањем брзине заваривања. Са повећањем удела мартензита се повећава опасност од настајања хладних прелина. Избор температуре предгревања је један од доминантних фактора који утиче на удео мартензита што се може закључити анализом карактера приказаних зависности. Наиме, уколико се процес заваривања изводи без предгревања, удео мартензита при различитим брзинама заваривања се креће од 80-100% [27,28]. При већим брзинама заваривања, и већим дебљинама материјала, удео мартензита се повећава на приближно 100%, без обзира на избор јачине струје заваривања, дакле у структури ће бити присутан скоро стопроцентни мартензит, при свим јачинама струје заваривања. При осталим константним параметрима се примећује да са порастом јачине струје опада удео мартензита, што нарочито долази до изражаја при нижим вредностима брзине заваривања и вишим вредностима температуре предгревања (при брзини од 8cm/min, извршеном предгревању на 300⁰С и јачини струје у интервалу од 160-200А, удео мартензита опада на приближно 30% за дебљину 20mm, и 50% за дебљину од 40mm).



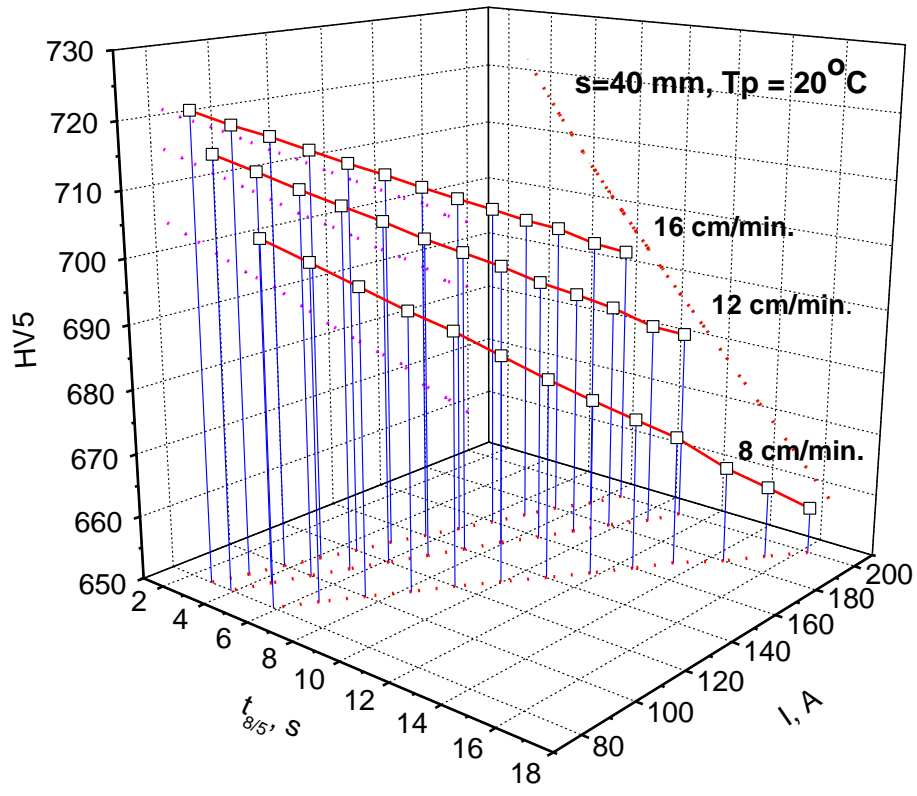


б)

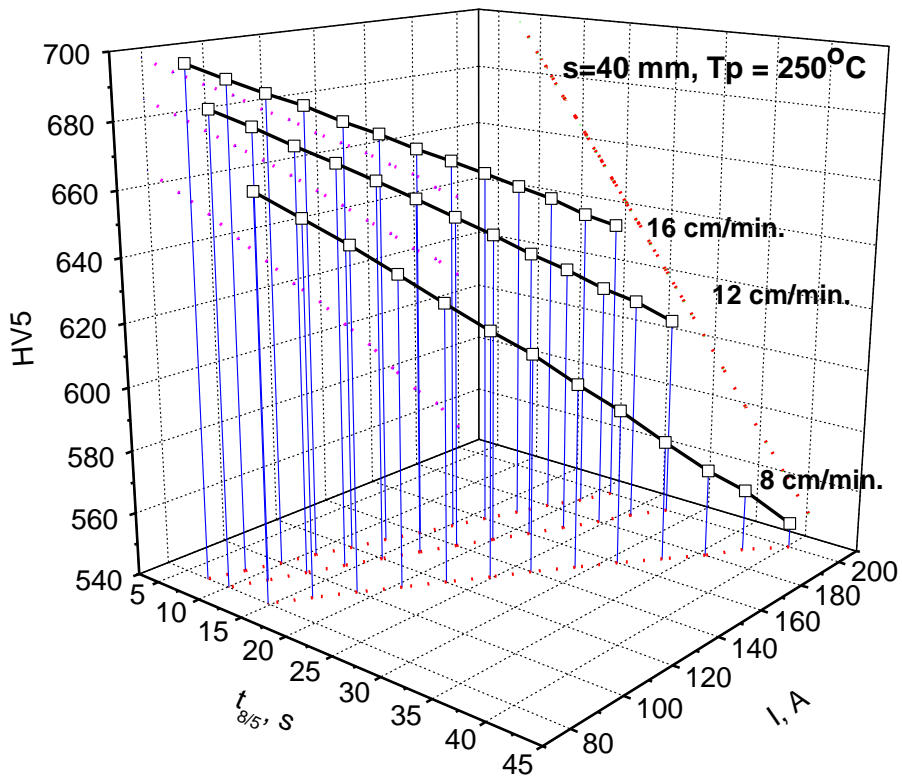


в)

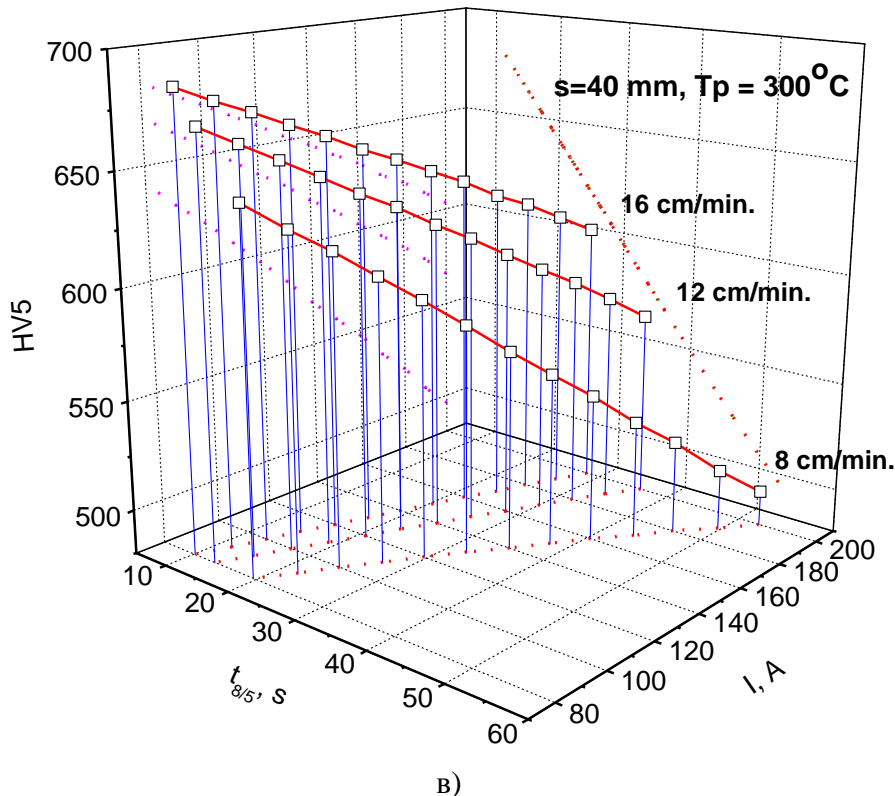
Слика 4.4. Зависност тврдоће (HV5) и времена хлађења ($t_{8/5}$) у ЗУТ-у од струје (I) и брзине заваривања (v) за материјал дебљине $s = 20$ mm, без предгревања $T_p = 20^\circ\text{C}$ а); и са температуром предгревања $T_p = 250^\circ\text{C}$ б) и $T_p = 300^\circ\text{C}$ в).



a)

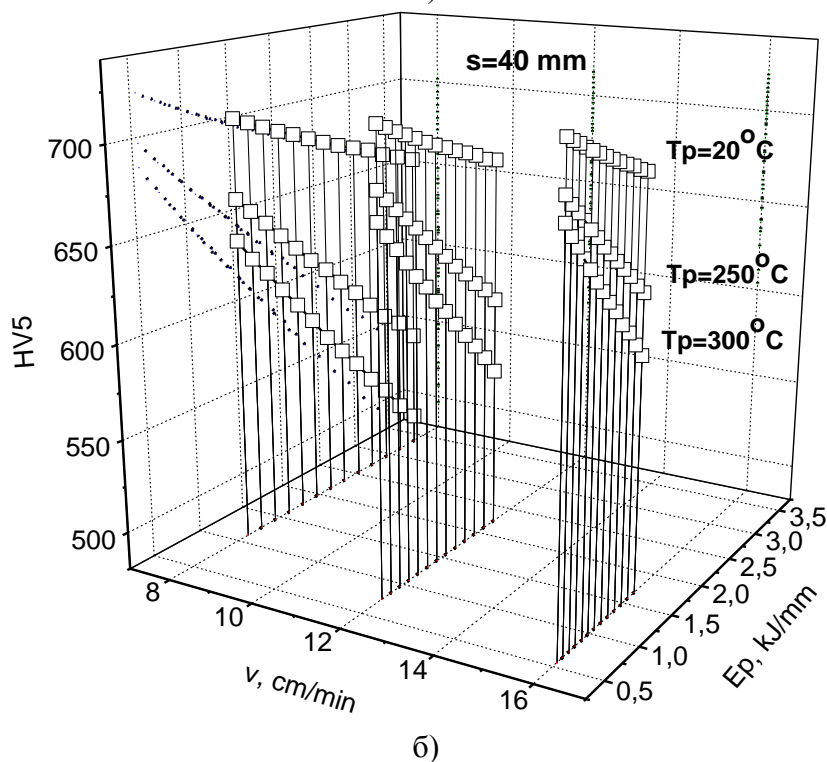
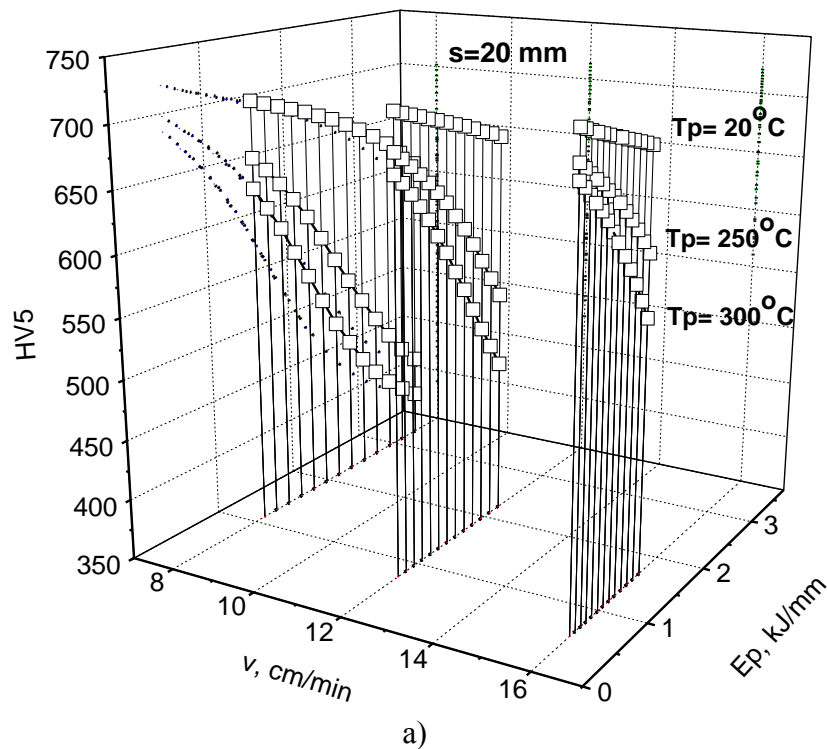


b)



Слика 4.5. Зависност тврдоће (HV5) и времена хлађења ($t_{8/5}$) у ЗУТ-у од струје (I) и брзине заваривања (v) за материјал дебљине $s = 40$ mm, без предгревања $T_p = 20^\circ\text{C}$ а); и са температуром предгревања $T_p = 250^\circ\text{C}$ (б) и $T_p = 300^\circ\text{C}$ в).

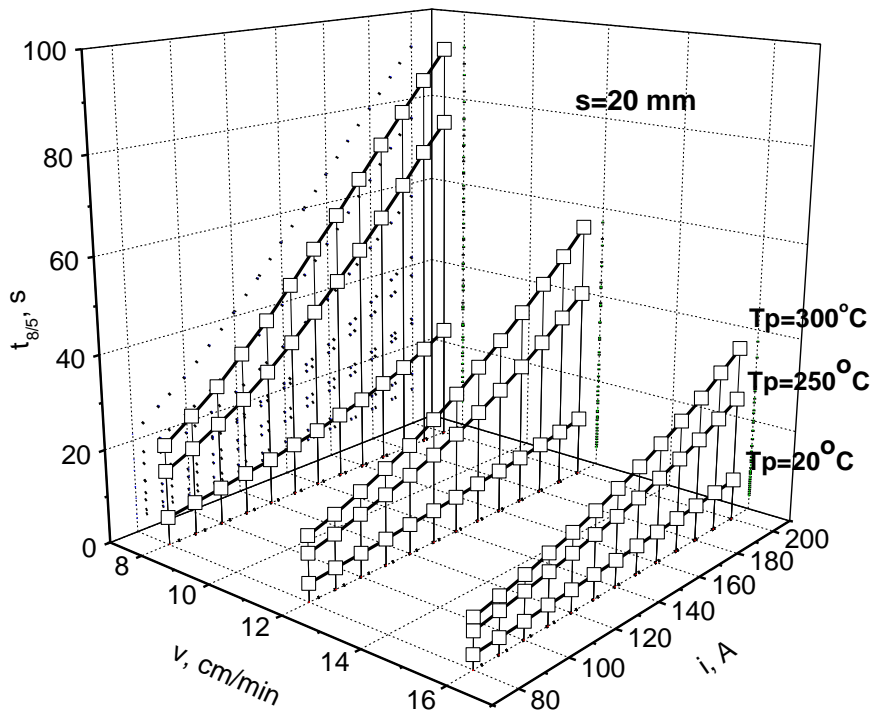
На сликама 4.4. и 4.5. приказана је зависност тврдоће зоне утицаја топлоте (ЗУТ) завареног споја (HV5) од времена хлађења и јачине струје заваривања, при различитим брзинама заваривања и различитим температурама предгревања, за дебљине 20mm и 40mm сукцесивно [27,28]. Прихватљиве вредности тврдоће ($<350\text{HV}$) није могуће добити без предгревања при разматраним режимима заваривања. Генерално се може закључити да тврдоћа расте са повећањем дебљине и порастом брзине заваривања, док опада са повећањем времена $t_{8/5}$ и порастом јачине струје заваривања.



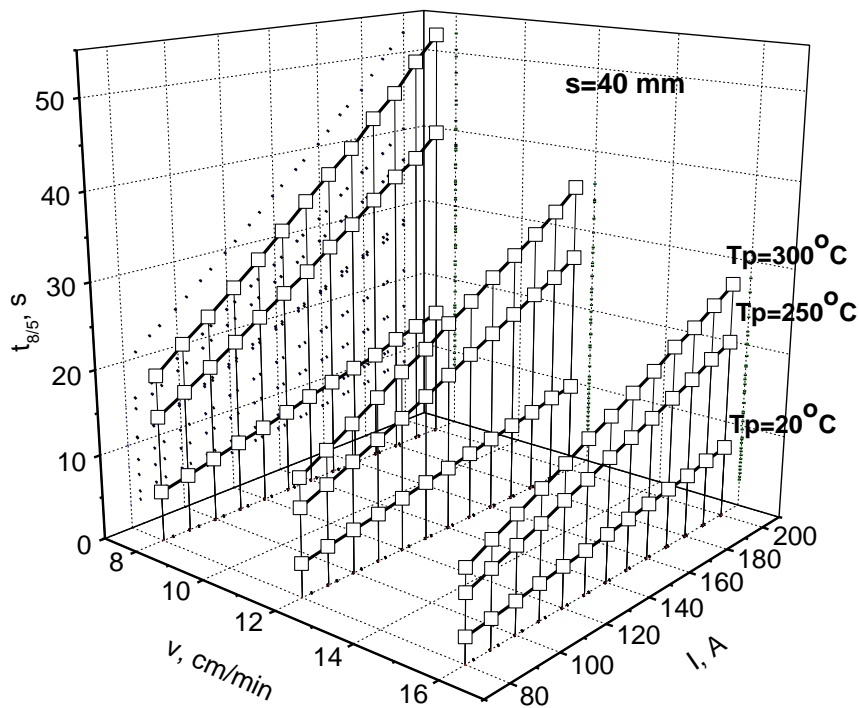
Слика 4.6. Зависност тврдоће (HV5) ЗУТ-а од погонске (линијске) енергије (E_p) и брзине заваривања (v), за материјал дебљине $s = 20$ mm а) и $s = 40$ mm б), без предгревања $T_p = 20^\circ\text{C}$ и са температуром предгревања $T_p = 250^\circ\text{C}$ и 300°C .

На слици 4.6. је приказана зависност тврдоће ЗУТ-а од унете погонске (линијске) енергије и брзине заваривања (наваривања), за различите дебљине материјала и различите температуре предгревања. Са повећањем брзине заваривања

расте тврдоћа, при осталим константним параметрима заваривања, док се повећањем унете линијске енергије, у разматраном опсегу, постиже смањење тврдоће [27,28].



а)

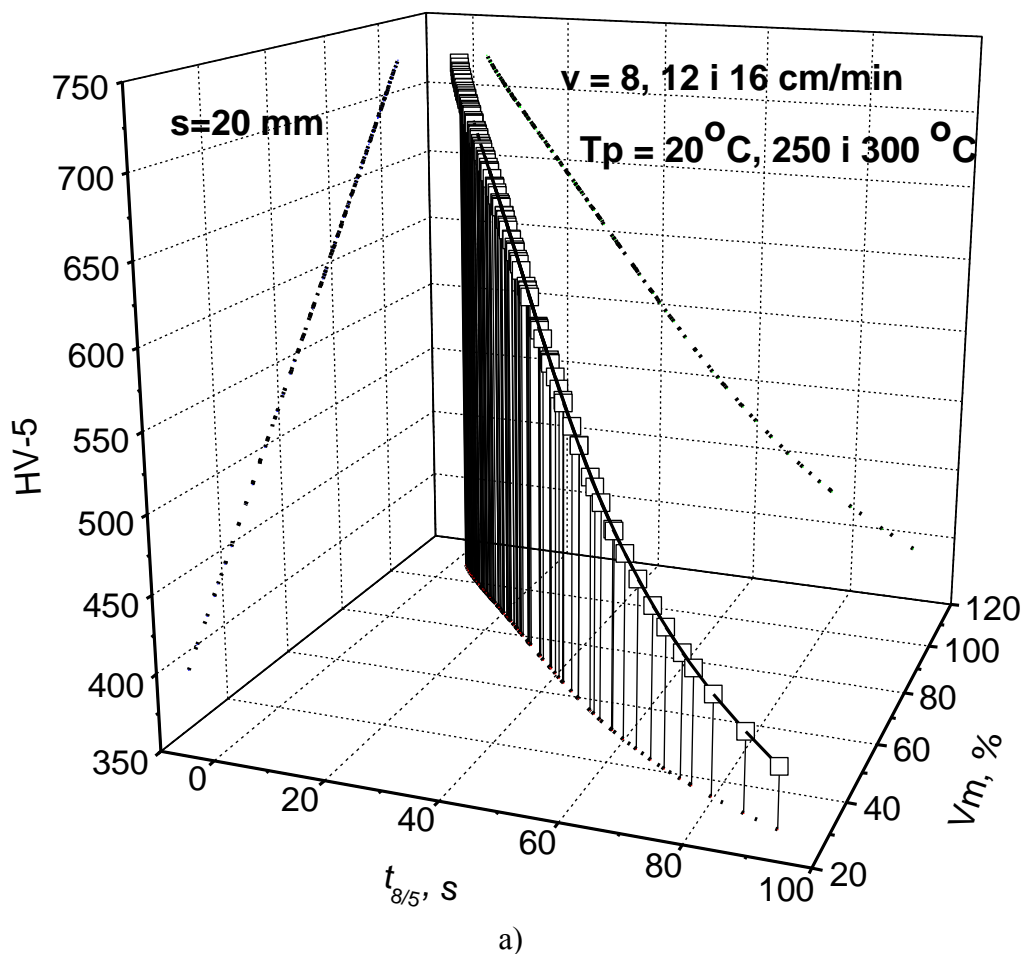


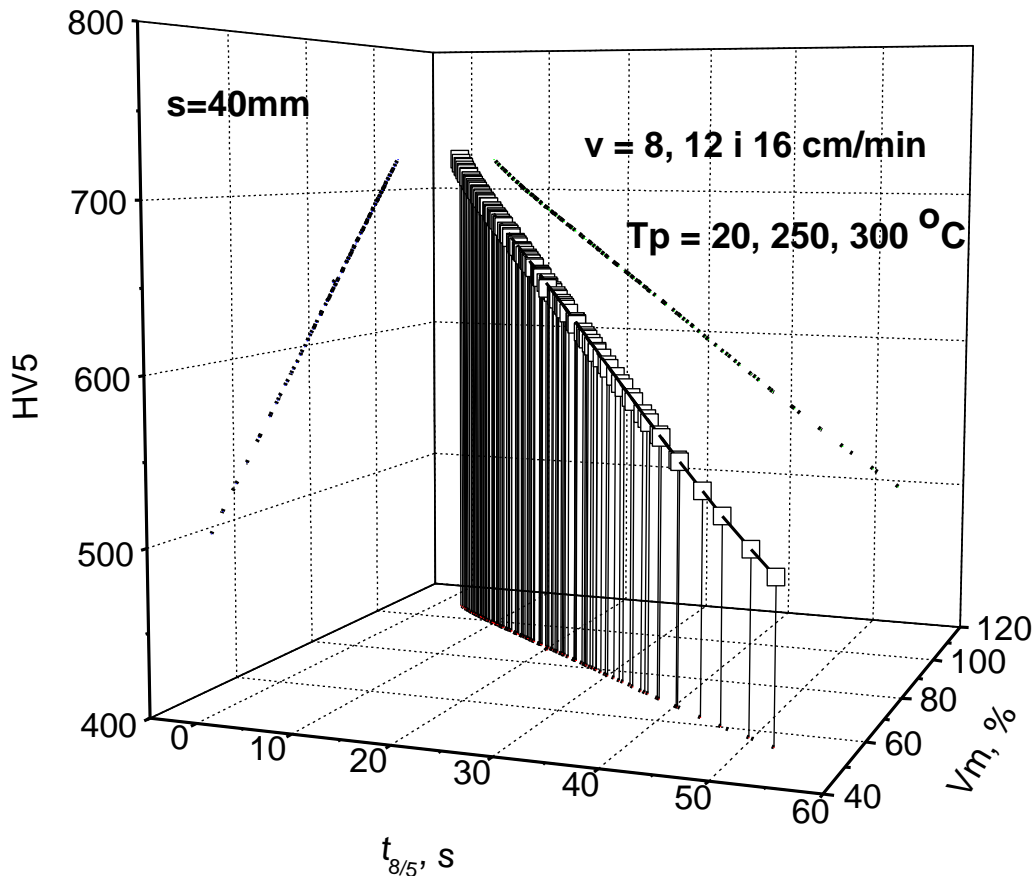
б)

Слика 4.7. Зависност времена хлађења ($t_{8/5}$) ЗУТ-а од брзине заваривања (v) и струје заваривања (I), за материјал дебљине $s = 20$ mm а) и $s = 40$ mm б), без предгревања $T_p = 20^\circ\text{C}$ и са температуром предгревања $T_p = 250^\circ\text{C}$ и 300°C .

На слици 4.7. је приказана зависност времена хлађења ЗУТ-а од јачине струје и брзине заваривања, при различитим режимима предгревања за дебљине материјала 20mm и 40mm. Са повећањем јачине струје заваривања, порастом температуре предгревања и смањењем брзине заваривања расте и време хлађења $t_{8/5}$, док се са повећањем дебљине материјала време хлађења $t_{8/5}$ смањује. При томе се може закључити да се највећи градијенти промене времена хлађења постижу при највећим температурама предгревања [27,28].

На слици 4.8. приказана је међузависност тврдоће, времена хлађења и удела мартензита за наведене услове наваривања ($I = 80\text{--}200\text{ A}$; $U = 23\text{--}28\text{V}$; $v = 8, 12\text{ и }16\text{ cm/min}$; $\eta = 0.8$) челика GS-36Mn5 (ČL 3134) дебљине $s = 20\text{ mm}$ и $s = 40\text{ mm}$ [27,28]. Очигледно је да се тврдоћа челика испод 350 HV може постићи под овим условима наваривања али и при температурама предгревања које су веће од 300°C , што представља одступање од температуре предгревања добијене аналитичким прорачуном (табела 4.3).





б)

Слика 4.8. Међузависност тврдоће HV5, времена хлађења $t_{8/5}$ и удела мартензита V_M при наведеним условима заваривања за материјал дебљине $s = 20 \text{ mm}$ а) и $s = 40 \text{ mm}$ б).

Аналитичка процена заварљивости челика (GS-36Mn5) указала је на следеће:

- Добијени резултати указују да челик GS-36Mn5 припада групи условно заварљивих челика, који могу успешно да се заварују уз примену посебних додатних материјала, предгревања и других мера предострожности. У случају наваривања поред контролисаног термичког циклуса потребно је и наваривање међуслоја. На основу ових предвиђања изведена су моделна експериментална наваривања различитим технолошким процедурама [27,28].
- У циљу спречавања појаве хладних прслина у завареном споју и добијања споја са захтеваним механичким особинама било је потребно одредити такав температурни циклус заваривања, који би обезбедио одређену брзину хлађења споја у температурском интервалу трансформације аустенита и оптимално задржавање изнад A_{c3} температуре. Допуштена максимална брзина хлађења,

односно време хлађења $t_{8/5}$, зависи од хемијског састава челика, димензија завареног споја и садржаја водоника у металу шава [27,28].

- Очигледно је да се тврдоћа челичног лива испод 350 HV не може постићи под овим условима наваривања, већ би то било могуће уколико се предгревање изврши на температурама изнад 300⁰С, што представља одступање од температуре предгревања добијене аналитичким прорачуном [27,28]. Разлози овог одступања могу бити услед коришћене недовољно прецизне апроксимације, којом се аналитички процењује температура предгревања, и тек би праву слику о сагласности аналитичког и практичног поступка избора температуре предгревања за GS-36Mn5 могао да пружи експеримент, што може послужити као тема будућих истраживања [27,28].
- На основу анализа приказаних резултата, може се извести закључак да јачина струје заваривања треба да буде у опсегу од 160-200А, јер се тада постижу најмање вредности удела мартензита, тврдоће у ЗУТ-у, и најдуже време хлађења, односно постоји најмања опасност од настајања хладних прелина.

4.2. Израда узорака за моделна испитивања

Пре него што се приступило наношењу антихабајућих превлака на усисне плоче, и функционалним испитивањима истих, извршено је моделно испитивање изабраних технологија наношења додатних материјала и поступка наношења.

Наношење антихабајућих превлака изабраним технологијама изведено је на узорцима од угљеничног челика S235JRG2 димензија 200 x 250 x 15 mm, који су претходно механички припремљени.

Израда моделних узорака са антихабајућим превлакама изведена је на опреми и са додатним материјалима, које је обезбедио, Messer Tehnogas - Castolin Eutectic. У табели 4.6. дат је преглед поступака и додатних материјала који су примењени при изради пробних узорака. Наношење антихабајућих превлака је изведено по технолошким листама са дефинисаним параметрима (струја, напон, брзина наношења, линијска енергија, температура предгревања и међупролаза, број и начин наношења слојева). После наношења превлака изведена су испитивања без разарања (визуелна и пенетранска контрола), према стандарду EN ISO 15614-7. Поред тога, изведена су и структурно – механичка испитивања.

Табела 4.6. Изабрани додатни материјали и поступци наношења превлака на пробне узорке

Ознака додатних материјала	Номинални хемијски састав додатних материјала	Поступак наношења
А, прах	Ni-Cr-Bo-Si / 60% WC	РТА-плазма (15)
Б , прах	FeCrCBNiSi	HVOF – Хладна мет. суперсоничним поступком
В, прах	NiCrBSiFe/ 35% WC	Топла метализација са накнадним утапањем
Г, електрода	Fe- Cr-C- Si	Ручно електролучно заваривање (111)
Д, електрода	Fe- Cr-C- Ti	Ручно електролучно заваривање (111)
Ђ, жица	Fe-Cr-W-B-Nb-Mo-C	МИГ/МАГ (114) самозаштитна жица

4.2.1. Плазма поступак (РТА) са додатним материјалом А (Ni-Cr-Bo-Si / 60% WC):

Наношење антихабајуће превлаке на узорке, претходно припремљене механичком обрадом, извршено је плазма поступком (Plasma Arc Transfer Welding) по условима датим у табели 4.7.

Табела 4.7. Услови наношења превлаке А

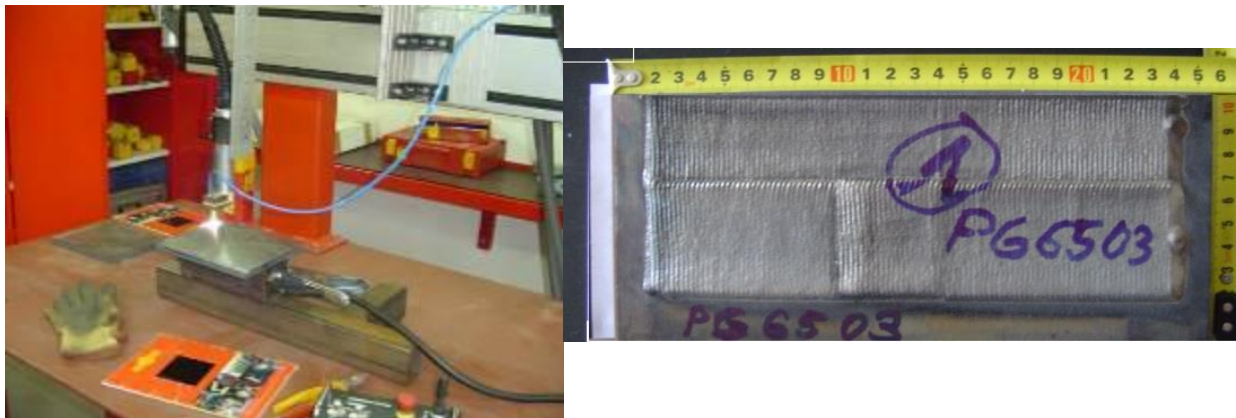
Додатни материјал	d	I	U	v_z	$v_{z\text{msx}}$	E_z	T_p	T_m
	mm	A	V	cm/ min	mm/ min	kJ/mm	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
А	прах	50-60	25-28	45	140	1.53 – 1.62	/	200

d – пречник електроде, I – јачина струје заваривања, U- напон заваривања, v_z – брзина депоновања додатног материјала, $v_{z\text{msx}}$ – максимална брзина депоновања додатног материјала, E_z – количина унете енергије, T_p – Температура предгревања;
 T_m – Температура међупролаза

Пре наношења антихабајућег слоја извршено је подешавање пламена и протока гасова и праха, као и брзине аксијалног кретања носача уређаја. Додатни материјал А је номиналног хемијског састава Ni-Cr-Bo-Si/ 60% WC. Наношење превлаке изведено је њихањем, брзина кретања млазнице у правцу x-осе је max. 0.85 mm/s, док је брзина кретања млазнице у правцу y-осе: max. 15 mm/s. Као заштитни гас је коришћен Ar + 5% H₂: са протоком од 15 l/min, док је као плазма гас коришћен аргон чистоће 12-15

prpm са протоком 2.6-2.8 l/min. Растојање млазнице од основног материјала је износило 7 mm. Остали параметри наношења су дати у табели 4.7.

Превлака се наноси њихањем у правцу у-осе након чега се врши претапање превлаке због уклањања грешака насталих због заосталих напрезања. Наношење додатног материјала је урађено у једном пролазу ширине 30 mm а дебљине слоја ~ 4 mm. Поступак наношења је приказан на слици 4.9. а) док је на слици 4.9. б) приказан узорак након наношења превлаке.



а) б)
Слика 4.9. а) Плазма поступак (приликом наношења); б) пробни узорак са антихабајућом превлаком А

4.2.2. Хладна метализација суперсоничним поступком (HVOF) са додатним материјал Б (FeCrCBNiSi)

Наношење антихабајућих превлака је изведено на једном од новијих HVOF система “СЈК5” (CastoJet Kerosene 5) који представља модификовану верзију система “ЈР 5000” из 2009. год., по условима датим у табели 8. Овај уређај представља трећу генерација HVOF система, који користи као погонско гориво смешу керозина и кисеоника. При депозицији честице материјала постижу брзину до 800 m/s са брзином продуката сагоревања на излазу из млазнице већом од 1000 m/s. На слици 4.10. а) је приказан изглед СЈК 5 система. Изузетно велике брзине стујања гаса имају за последицу генерисање буке до 133 dB. То је посебно изражено код овог HVOF система чији су радни притисци у комори за сагоревање високи (око 10 бара) и који као гориво користе смешу керозина и кисеоника. Због овако високог нивоа буке, процес HVOF метализације се спроводи у специјалној комори која снижава ниво буке на ~90 dB. У таквој комори је уграђен усисни систем великог капацитета, који има два основна

здатка: а) да усисава већину продуката сагоревања у току процеса метализације; б) да притисак ваздуха у комори одржава једнак приближно атмосферском притиску. Један од првих узорка урађених на овој машини је за потребе овог експеримента.

Пре депозиције материјала извршено је подешавање брзине аксијалног кретања носача уређаја и струјања праха програмирањем кретања робота са пиштољем за метализацију. Додатни материјал Б је номиналног хемијског састава FeCrCBNiSi. Наношење превлаке изведено је њихајућим кретањем Као носиви гас је коришћен O₂ са протоком 845 l/min и N₂ са протоком 9.9 l/min, док је као горива течност коришћен керозин са протоком 380 ml/min. Растојање млазнице од основног материјала је износило 7 mm. Остали параметри наношења су дати у табели 4.8.

Табела 4.8. Услови наношења превлаке Б

Додатни материјал	d	I	U	v _z	Број навара	E _z	T _p	T _{mX}
	mm	A	V	cm/ min	/	kJ/mm	°C	°C
Б	прах	/	/	70	30	/	/	/

d – пречник електроде, I – јачина струје заваривања, U – напон заваривања, v_z – брзина заваривања, E_z – количина унете енергије, T_p – Температура предгревања;
T_m – Температура међупролаза



а)



б)

Слика 4.10. а) Уређај за хладну метализацију суперсоничним поступком HVOF; б) Изглед узорка са антихабајућом превлаком Б

Превлака дебљине је $\sim 0.3-0.5$ mm се наноси наизменичним њихањем у правцу у-осе и х-осе са 30 пролаза. Поступак наношења приказан је на слици 4.10. а) док је на слици 4.10. б) приказан узорак након наношења превлаке.

4.2.3. Топла метализација са накнадним утапањем са додатним материјал В (NiCrBSiFe/ 35%WC)

Наношење антихабајуће превлаке на узорке, претходно припремљене механичком обрадом, извршено је топлом метализацијом са накнадним утапањем по условима датим у табели 4.9.

Пре наношења потребно је извршити подешавање пламена и контролу протока гасова и припрему праха. Додатни материјал В је номиналног хемијског састава NiCrBSiFe/ 35%WC. Наношење превлаке се изводи уношењем прашкастог додатног материјала у окси-ацетиленски пламен и депоновањем на узорак. Растојање млазнице од основног материјала је износило 20-30 mm. Након наношења додатног материјала изводи се утапање. Остали параметри наношења су дати у табели 4.9.

Табела 4.9. Услови наношења превлаке В

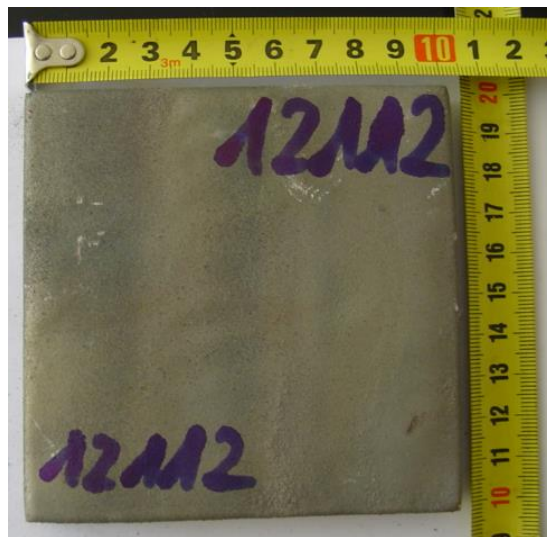
Додатни материјал	d	I	U	v_z	$v_{z\text{ msx}}$	E_z	T_p	T_m
	mm	A	V	g/min	cm/ min	kJ/mm	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
В	прах	/	/	40	/	/	80-100	200

d – пречник електроде, I – јачина струје заваривања, U – напон заваривања, v_z – брзина депоновања додатног материјала, $v_{z\text{ msx}}$ – максимална брзина депоновања додатног материјала, E_z – количина унете енергије, T_p – Температура предгревања;
 T_m – Температура међупролаза

Превлака се наноси у три пролаза на температури до 300°C . Међусобни угао пролаза пиштоља је 90° . Утапање се изводи на температурама од $T=1020-1050$ $^{\circ}\text{C}$ у времену од 4min. Дебљина антихабајућег слоја износи $\sim 1.5-2.0$ mm. Поступак наношења је приказан на слици 4.11. а) док је на слици 4.11. б) приказан узорак након наношења превлаке.



а)



б)

Слика 4.11. а) Наношење антихабајуће превлаке топлом металizacionијом са накнадним утапањем; б) изглед узорка са антихабајућом превлаком В

4.2.4. Ручно електролучно заваривање са додатним материјалом Г (Fe- Cr-C- Si)

Наношење антихабајуће превлаке на узорке који су претходно припремљене механичком обрадом, извршено је ручним електролучним заваривањем по условима датим у табели 4.10. Наношење превлаке је изведено на уређају W210GE Castolin Eutectic.

Коришћени додатни материјал Г је номиналног хемијског састава Fe- Cr-C- Si. Додатни материјал је у облику електроде димензија $\varnothing 3.2 \times 350$ mm са базном облогом, која је сушена на температури од 250 °C/ 2h. Остали параметри наваривања су дати у табели 4.10.

Табела 4.10. Услови наношења превлаке Г

Додатни материјал	d	I	U	v_z	Број слојева	E_z	T_p	T_m
	mm	A	V	cm/min	/	kJ/mm	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
Г	$\varnothing 3.2$	151	25-27	10 – 12	1	1.73 – 1.92	150 -160	200 -220

d – пречник електроде, I – јачина струје заваривања, U – напон заваривања, v_z – брзина заваривања, E_z – количина унете енергије, T_p – Температура предгревања;

T_m – Температура међупролаза



Слика 4.12. Узорак са нанесеним антихабајућим материјалом Г

Превлака (наварени слој) дебљине ~ 3.1 mm је нанесена у једном пролазу. Након наваривања узорак остављен је да се хлади на ваздуху до собне температуре. На слици 4.12. је приказан узорак након наваривања.

4.2.5. Ручно електролучно наваривање са додатним материјалом Д (Fe- Cr-C- Ti)

Наношење превлаке је урађено у просторијама на уређају W210GE Castolin Eutectic на узорке који су претходно припремљени механичком обрадом. Наношење превлаке је урађено према параметрима који су дати у табели 4.11.

Уређај са којим је изведено наваривање, начелно се користи за све типове електрода до 5 mm дебљине. Карактеристике уређаја су max јачина струје 210A, напон празног хода је 80V, интермитенце 60% на 190 A. Уређај има могућност рада на терену јер је могуће његово прикључивање на генератор, и добро подноси падове напона. Лако је преносив тежине је 8.5 kg.

Коришћени додатни материјал је Д номиналног хемијског састава Fe- Cr-C- Ti. Додатни материјал је у облику електроде димензија $\varnothing 4.0 \times 350 \text{ mm}$ са базном облогом, која је сушена на температури од $250^\circ\text{C}/2\text{h}$. Остали параметри наваривања су дати у табели 4.11.

Табела 4.11. Услови наносења превлаке Д

Додатни материјал	d	I	U	v_z	Број слојева	E_z	T_p	T_m
	mm	A	V	cm/min	/	kJ/mm	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$
Д	$\varnothing 4.0$	160	50-51	10 – 12	1	3.5 - 4.8	160 - 180	200 - 220

d – пречник електроде, I – јачина струје заваривања, U – напон заваривања, v_z – брзина

заваривања, E_z – количина унете енергије, T_p – Температура предгревања;

T_m – Температура међупролаза



Слика 4.13. Узорак са нанесеним антихабајућим материјалом Д

Превлака (наварени слој) је нанесен у једном пролазу дебљина слоја $\sim 2.5 \text{ mm}$. Након наваривања узорак је остављен да се хлади на ваздуху до собне температуре. На слици 4.13. је приказан узорак након наваривања.

4.2.6. МИГ/МАГ наваривање (самозаштитна жица) са додатним материјалом Ђ (Fe-Cr-W-B-Nb-Mo-C)

Наношење антихабајуће превлаке је изведено на узорцима који су претходно припремљени механичком обрадом, на уређају DERBY 285 Castolin Eutectic. Наношење превлаке је урађено према условима који су дати у табели 4.12.

Уређај за заваривање DERBY 285 Castolin Eutectic који се користи начелно за све типове жице различитих дебљина, има следеће карактеристике: максимална јачина струје 3 x 230V/400V, интермитенца 60% на 215 А. Уређај има могућност рада на терену јер је могуће његово прикључивање на генератор, јер добро подноси падове напона. Принцип инверзије поларитета омогућава употребу Castolin пуњене жице без употребе заштитних гасова. Изузетно је лаган и компактан. DERBY 285 се може употребљавати и за заваривање у заштити гаса. Коришћен је стандардни програм Castolina за самозаштитну жицу бр 23.

Табела 4.12. Услови наношења превлаке Ђ

Додатни материјал	d	I	U	v_z	Q _{гас.}	Број слојева	E_z	T_p	T_m
	mm	A	V	cm/min	l/min	/	kJ/mm	⁰ C	⁰ C
Ђ	∅ 2.8	250	/	3.5	/	1	/	200	

d – пречник електроде (жице), I – јачина струје заваривања, U- напон заваривања, v_z - брзина заваривања, Q_{гас.} – проток гаса, E_z - количина унете енергије, T_p – Температура предгревања; T_m – Температура међупролаза



Слика 4.14. Узорак са додатним материјалом Ђ (самозаштитна жица)

Коришћен је додатни материјал је Ћ (комерцијална ознака Castolina) номиналног хемијског састава Fe-Cr-W-B-Nb-Mo-C. Додатни материјал је у облику жице пречника \varnothing 2.8 mm. Остали параметри наваривања антихабајућег слоја су дати у табели 4.12.

Антихабајући слој је нанесен у два навара. Дебљина антихабајућег (навареног) слоја износи \sim (3.5 – 4.0 mm). Ширине гусеница су $b=35-40\text{mm}$. Након наваривања узорак је остављен је да се хлади на ваздуху до собне температуре. На слици 4.14. приказан је узорак након наваривања.

4.3. Методе испитивања моделних узорака

Квалитет нанесене антихабајуће превлаке зависи од квалитета везе превлаке и основе (адхезије) и квалитета нанесеног материјала. На свим моделним узорцима изведена су лабораторијска испитивања, а визуелна испитивања у току и након наношења антихабајућих слојева.

Контрола квалитета антихабајућег слоја обухвата следеће методе:

- Визуелно испитивање,
- Испитивање течним пенетрантима,
- Испитивање хемијског састава
- Структурно - механичка испитивања
 - Мерење тврдоће по попречном пресеку узорка,
 - Микроструктурна испитивања (оптичка микроскопија)
 - Микроструктурна испитивања (SEM и оптичка микроскопија)
 - EDS (енерго- дисперзиона анализа) хемијска анализа

4.3.1. Визуелно испитивање

На свим моделним узорцима изведена је контрола квалитета антихабајућих превлака визуелним испитивањем по SRPS EN ISO 17637:2012.

Потребни услови и параметри визуелног испитивања узорака:

Осветљење - дневна светлост од минимум 1200 лукса или вештачко осветљење са најмање 800 лукса;

Очистити узорак од свих бризготина;

Метода испитивања-голим оком уз помоћ лупе са увећањем 10x;

Удаљеност ока-200mm;

Угао посматрања $30^{\circ} \div 90^{\circ}$;

Мерење надвишења антихабајућих превлака уз помоћ мерила завареног споја са нонијусом и помичним мерилом за мерење надвишења;

За класификацију грешака употребљава се критеријум по стандарду SRPS EN ISO5817.

4.3.2. Испитивање течним пенетрантима

На свим моделним узорцима изведена је контрола квалитета антихабајућих превлака течним пенетрантима по SRPS EN 571-1:2005 и по EN ISO 23277 (SRPS EN 1289) IBR–испитивање пенетрантима заварених спојева-нивои прихватљивости. Коришћен је видљиви (тип II) обојени пенетрант црвени, ради контраста с подлогом осетљивост је нивоа 1 (ниска).

Испитивање пенетрантима захтева следећих пет главних корака:

1. Припрема површине
2. Наношење пенетранта
3. Уклањање вишка пенетранта
4. Развијање
5. Преглед (испитивање)

Све површине које се испитују морају бити претходно директно очишћене и комплетно осушене. Пре него што буду предмет испитивања пенетрантима све прслине на површини су очишћене од уља, воде или другог садржаја да би могле бити откривене.

Након што је радни комад очишћен, пенетрант је примењен у погодном облику тако да формира слој пенетранта преко површине. Овај филм је остао на површини довољно дуго да дозволи максималну пенетрацију у било којим површинским отворима који су присутни. Вишак пенетранта је уклоњен са површине.

Уклањање вишка пенетранта је одређено врстом употребљеног пенетранта у овом случају употребом солвента/спреја. Једнолико-равномерно уклањање вишка површинских пенетраната је неопходно за ефикасно (ефективно) испитивање, али прекомерно уклањање мора бити избегнуто.

Радни комад је осушен одмах након наношења развијача. Развијач формира танак слој преко површине на коју је нанет. Развијач делује као упијајући папир, помаже природном цурењу пенетранта из површинских отвора и ширењу на рубу тако да повећава вредност и видљивост индикације пенетраната.

Након што је довољно развијена, површина се визуално испитује индикацијама пенетраната развијеног из површинских отвора. Ово испитивање је урађено у прикладном окружењу за испитивање. Испитивање видљивим, обојеним пенетрантима се изводи под јаком белом светлошћу. Осим стварних грешака, мора се водити рачуна и о лажним индикацијама као што су:

- Заостале капи пенетранта,
- Индикације услед дизајна или геометрије објекта који се испитује,
- Запрљаност стола за испитивање,
- Запрљаност руку испитивача,
- Запрљаност површине која се испитује (заостала струготина од обраде резањем).

4.3.3. Испитивање хемијског састава

Површинска и тачкаста квалитативна и квантитативна хемијска анализа (EDS) изведена је на Scanning електронском микроскопу SEM JEOL JSM–6610LV са енергетско-дисперзивним системом (EDS). Напон убрзања електрона је износио 20 kV. С обзиром на добру проводљивост, узорци нису били напарени златом, графитом или било којим другим проводним материјалом. Филамент је био израђен од волфрама. EDS је био калибрисан применом екстерног кобалт-стандарда пре извођења ЕМРА анализа. Наведена анализа изведена је на 10 – 20 мерних места по узорку.

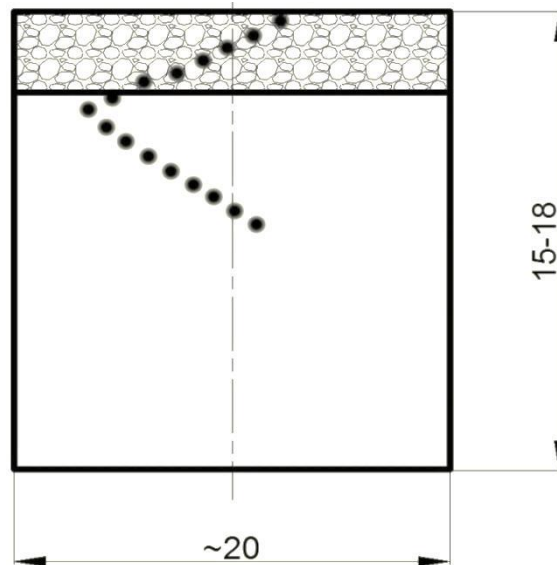
4.3.4. Структурно - механичка испитивања

4.3.4.1. Мерење тврдоће

Макротврдоћа HV30 на површини превлаке и микротврдоћа HV по попречном пресеку узорака мерена је на уређају за мерење тврдоће метала Uhm blue steel, односно на апарату за испитивање тврдоће по Brinell-у и Vickers-у произвођача: Werkstoffprufmaschinen-leipzig тип: hpo 250 у механичко металграфској лабораторији

Института Гоша на узорцима за структурна испитивања (макроструктурна испитивања).

Микротврдоћа је мерена по шеми датој на слици 4.15. са кораком од 0.5 до 1 mm у смеру од површине навара преко зоне утицаја топлоте до основног материјала.



Слика 4.15. Шема мерења микротврдоће на металографском узорку

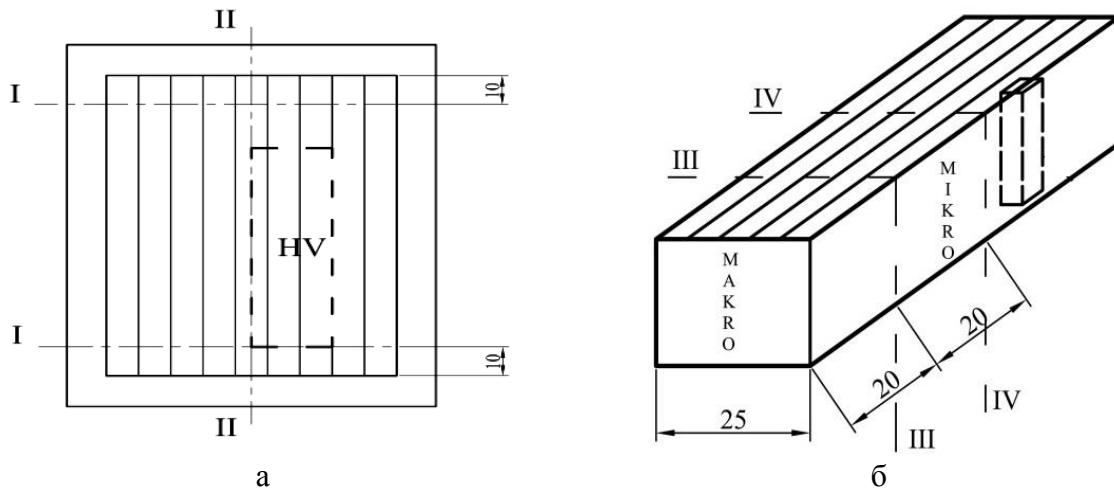
4.3.4.2. Структурна испитивања

Структурна испитивања моделних узорака (узорака са антихабајућим слојевима) изведена су следећим методама:

- Светлосна микроскопија;
- Електронска микроскопија (СЕМ).

Сва испитивања су извршена на скенирајућем електронском микроскопу (SEM) JEOL JSM-6610LV са енергетско-дисперзивним системом (EDS). Филамент је био израђен од волфрама. EDS је био калибрисан применом екстерног кобалт-стандарда пре извођења ЕМРА анализа. У оквиру ове дисертације биће приказано само по неколико снимака структуре додатних материјала.

Сечење и израда узорака за испитивања структуре и тврдоће изведена су воденим млазом по дефинисаном плану сечења моделних узорака. На слици 4.16 а) и б) приказана је шема исецања епрувета за испитивање тврдоће (а) и структуре, макро и микро узорка (б).



Слика 4.16. План сечења епрувета за испитивање а) тврдоће, б) структуре

Припрема и сечење узорка изведено је:

- Финим брушењем до 0.1 mm, сваку горњу површину свих пробних узорка (антихабајући слој) припремити на 5-6 места за мерење макротврдоће. На брушеној површини је измерена и тврдоћа помоћу HV30 (5 отисака);
- Узроци за моделна испитивања су пресечени на средини по линији сечења II-II (слика 4.16. а).
- Након тога из једне половине су сечени узорци за макро и микроструктуру.
- Код свих исечених проба за израду узорка коришћен је део пробе (епрувета) који је шрафиран а други део пробе је сачуван за додатна испитивања.
- Код свих проба са превлакама из исеченог дела пробе (епрувете) исечен је узорак за макроструктуру и микроструктуру 15-18 x 20 mm x 20 mm . Исецање ових узорка урађено је од средине (површина сечења) ка необрађеним крајевима пробе;

Узорци за испитивање структуре брушени су на брусној хартији крупноће 100, 280, 400 и 600, полирани дијамантском пастом финоће 6µm, а затим полирани дијамантском пастом финоће 3 и 1 µm на филцу 40-7618 и 40-7658. Откривање структуре извршено је хемијским нагризањем у раствору састава 3% Nital (макроструктура) и 60 cm³ HCl + 20 cm³ HNO₃ + 40 cm³ глицерин (микроструктура) за оптичку микроскопију и SEM анализу.

Идентификација присутних фаза је извршена применом *point EMPA analysis*. Због репродуктивности резултата EMPA анализе су извршене на најмање два

различита места. Резултати су сложени на начин да је прво дата слика структуре узорка, а онда табеле са вредностима у масеним процентима. Затим је дат средњи хемијски састав, а потом мерења при већим увећањима, а на крају MAPPING. Време мерења или *acquisition time* код средњег састава је износило око 100 s, а у свим другим случајевима 30 s. Калибрација је извршена применом екстерног кобалт стандарда.

Дебљина узорка је мерена помоћу скенирајућег електронског микроскопа где је густина превлаке код свих узорка прорачуната веома грубо на основу процената присутни микро конституената и основе.

4.4. Резултати испитивања

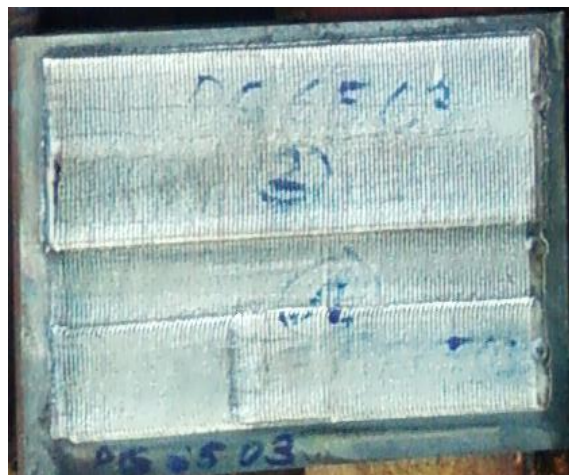
4.4.1. Визуелно испитивање

На узорцима са антихабајућим превлакама извршена је визуелна контрола по SRPS EN ISO 17637. Изглед узорка за визуелни преглед је приказан на сликама 4.17 до 4.19.

Извршен је преглед нанесених антихабајућих слојева ради откривања површинских неправилности (прслине, површинска порозност, утонулост...), као и преглед основног материјала у близини нанесених превлака ради откривања евентуалних оштећења (само код узорка где је то било могуће детектовати).

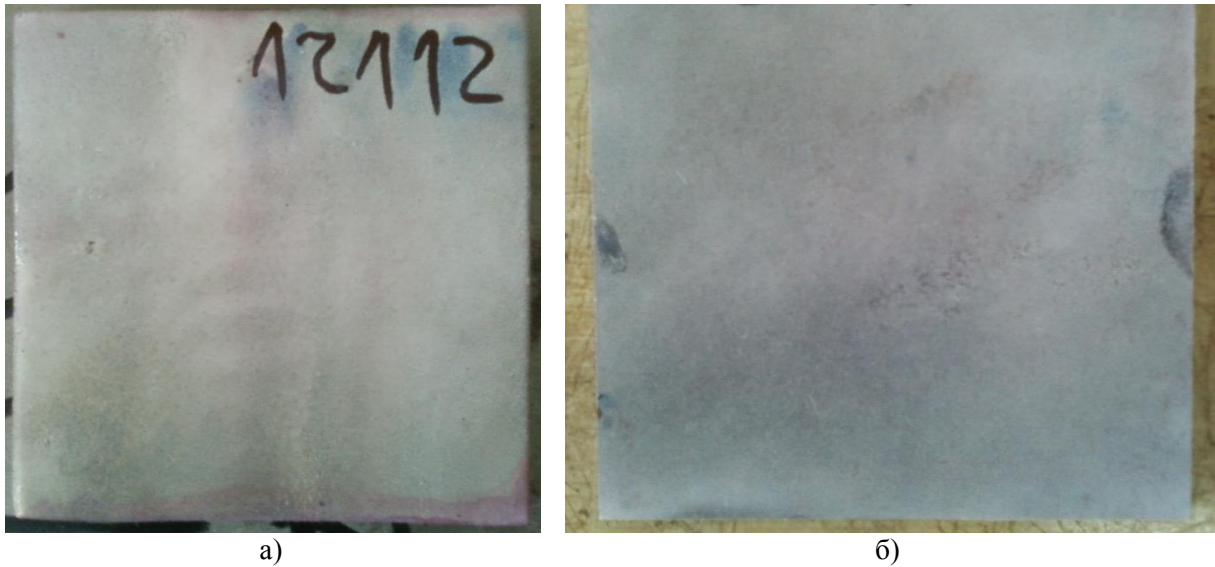


а)

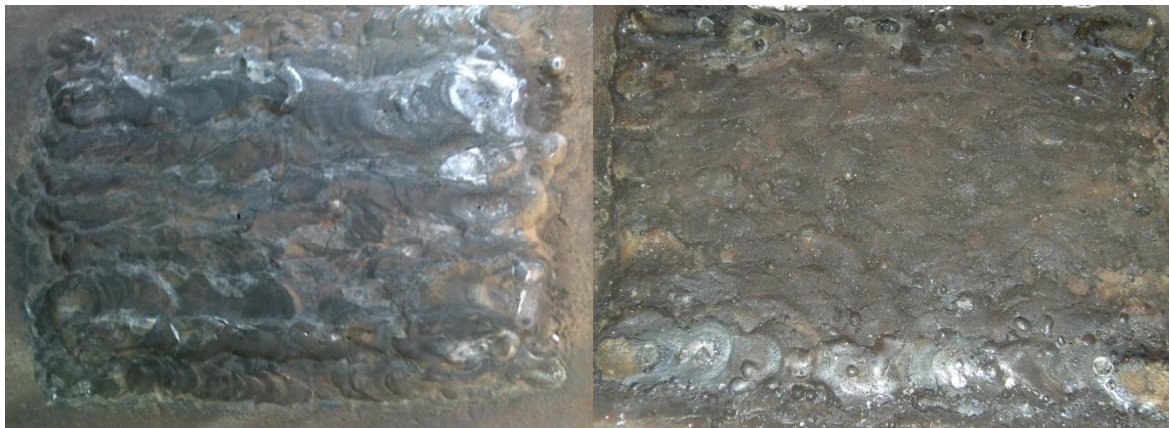


б)

Слика 4.17. Изглед узорка за моделна испитивања са нанесеним антихабајућим превлакама, а) Г и б) А



Слика 4.18. Изглед узорака за моделна испитивања са нанесеним антихабајућим превлакама, а) В и б) Б



Слика 4.19. Изглед узорака за моделна испитивања са нанесеним антихабајућим превлакама, а) Ђ и б) Д

Прелиминарни визуелни преглед површина узорака са антихабајућим слојем је показао следеће. На узорку за моделна испитивања који је изведен ручним електролучним поступком наваривања са додатним материјалом Г очигледно је присуство изражених површинских прслина. Попречне и подужне прслине равномерно су распоређене по целој површини у облику мреже. Навари су равномерно распоређени по целом узорку, без видљивих заједа и утонућа слика 4.17. а).

На површини узорка А који је урађен са ПТА-плазма наваривањем, уочене су попречне прслине дужине од 20 до 90 mm са извесним гранањем. Уздужне прслине се примећују у много мањем обиму, и концентрисане су углавном на крајевима узорка. Генерални изглед навареног антихабајућег слоја карактерише хомогена површина без видљивих удубљења, заједа и порозности, слика 4.17. б).

Узорке који су урађени HVOF – хладна метализација суперсоничним поступком (High-Velocity Oxy Fuel) и топлом метализацијом са накнадним утапањем (са додатни материјалима Б и В) карактерише хомогена површина нанесеног антихабајућег слоја и без дефеката слике 4.18. а) и б).

На узорку Ђ који је израђен, МИГ/МАГ (114) поступком самозаштитном жицом, уочава се нехомоген завршни слој слика 4.19. а). Поред тога, на површини узорка уочене су попречне и подужне прслине дужине од 20 до 30 mm и заједно чине мрежу прслина на површини.

Узорак израђен ручним електролучним поступком наваривања са додатним материјалом Д има изражене површинске прслине по целој површини. Попречне и подужне прслине су распоређене по целој површини и чине мрежу. Навари су равномерно распоређени по целом узорку, без видљивих заједа, утонућа и порозности што је приказано на слици 4.19. б).

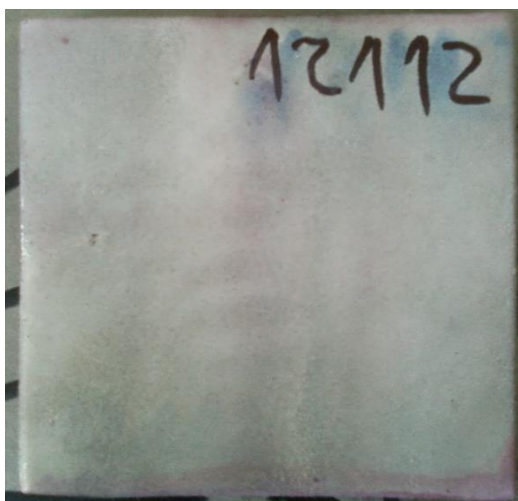
4.4.2. Испитивање течним пенетрантима

На узорцима са антихабајућим превлакама извршено је испитивање течним пенетрантима по SRPS EN 571-1:2005 и по EN ISO 23277 (SRPS EN 1289). Изглед испитаних узорка је приказан на сликама 4.20. до 4.22.

Испитивање течним пенетрантима је урађено након визуелног испитивања. Извршен је преглед нанесених антихабајућих слојева ради откривања површинских неправилности а највише због детектовања присуства површинских прслина.



а) б)
Слика 4.20. Узорци испитани течним пенетрантима
а) додатни материјал Г, б) додатни материјал А



а)

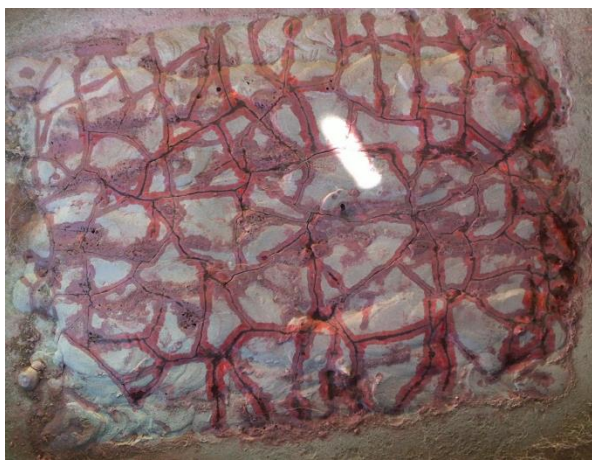


б)

Слика 4.21. Узорци испитани течним пенетрантима:
а) додатни материјал В, б) додатни материјал Б



а)



б)

Слика 4.22. Узорци испитани течним пенетрантима
а) додатни материјал Ђ и б) додатни материјал Д

Испитивање површина узорака течним пенетрантима је показано следеће: на узорку који је израђен ручним електролучним поступком наваривања са додатним материјалом Г уочене су попречне и уздужне прслине у облику мреже, равномерно распоређене по целој површини (слике 4.20. а).

На узорку који је израђен РТА-плазма наваривањем (додатани материјал А) уочене су углавном попречне прслине дужине од 30 до 100 mm, са мањим присуством уздужних прслина, које су концентрисане углавном на крајевима узорка (слика 4.20 б).

На површини узорака који су израђени HVOF – хладна мететализација суперсоничним поступком и топлом метализацијом са накнадним утапањем (са додатним материјалима Б и В), приказаних на слици 4.18. а) и б) нису примећене грешке типа прслина, порозности или неких других недозвољених грешака.

Узорак који је израђен МИГ/МАГ (114) поступком са самозаштитном жицом (додатни материјал Ђ) карактерише присуство попречних и подужних прлина дужине од 20 до 30 mm, које су углавном распоређене у облику мреже (слика 4.22. а).

На слици 4.19. б) је приказан узорак који је израђен ручним електролучним поступком наваривања са додатним материјалом Д. На површини узорка уочена је равномерно распоређена густа мрежа уздужних и попречних прлина

4.4.3. Тврдоћа и макроструктура

На узорцима са антихабајућим превлакама израђеним и припремљеним по наведеним условима (поглавља 4.3.4.1.) извршена су мерења тврдоће по приказаној шеми (слика 4.15.). у табели 4.13. дате су величине тврдоће на површини превлака и интервал између максималне и минималне микротврдоће по попречном пресеку превлака.

Табела 4.13. Тврдоће антихабајућих превлака

Додатни материјали	Ном. Хем. састав	Број слојева	Средња површинска тврдоћа превлаке HV30	Тврдоћа превлаке, HV5
А, прах	Ni-Cr-Bo-Si / 60% WC	1	652	532-739
Б, прах	FeCrNiCSiBMn	1	698	549-698
В, прах	NiWCrCoCSi	1	687	600-792
Г, електрода	Fe- Cr-C- Si	1	652	644-701
Д, електрода	Fe- Cr-C- Ti	1	852	701-874
Ђ, жица	Fe-Cr-W-B-Nb-Mo-C	1	937	980-1115

На основу добијених резултата израђени су дијаграми расподеле тврдоће по попречном пресеку превлаке, зоне утицаја топлоте и основног материјала.

Појединачне вредности тврдоће HV30 и HV5 у табели 4.13. су средње вредности од 3 до 5 мерења. Код узорка са антихабајућом превлаком од материјала ознаке Ђ и површинске тврдоће су више него код осталих узорка од цца 20 – 40%.

Измерене тврдоће узорка се разликују, без обзира на то што неки од антихабајућих материјала имају сличан хемијски састав. Један од главних разлога за то је да су пре свега коришћени различити поступци наношења превлака (различите температуре наношења, параметри наношења, облик у коме је основни материјал (електрода, жица или прах) брзина хлађења итд. Детаљнија анализа ових феномена

биће приказана у анализи резултата где ће се сви остали резултати анализирати када се сагледају структуре а пре свега оријентација формираних карбида и њихов распоред, хомогеност и други параметри.

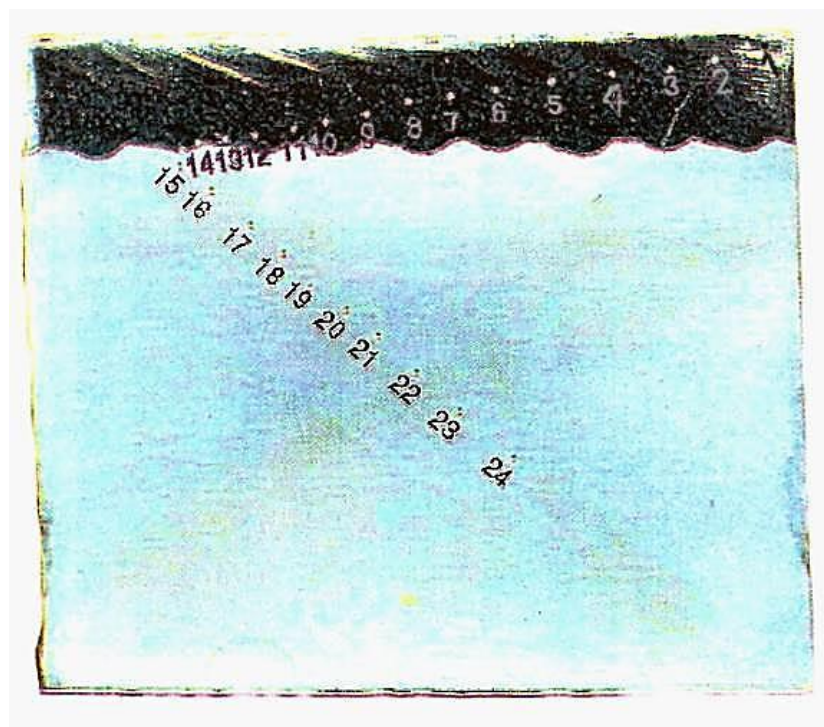
Изглед макроструктуре и расподеле тврдоће по попречном пресеку узорака са антихабајућим слојевима израђених различитим технологијама (поступци, додатни материјали, услови наношења и.т.д.) приказан је на сл. 4.23. до 4.28.

Макроструктурна испитивања су извршена на попречном пресеку узорака са антихабајућим слојевима, у циљу утврђивања степена макрохомогености структуре тј. присуства сегрегација (величина, морфологија и расподела), као и других грешака у нанесеном антихабајућем слоју.

4.4.3.1. Узорак са антихабајућом превлаком (слојем) од додатног материјала А (Ni-Cr-Bo-Si / 60% WC)

Изглед макроструктуре антихабајућег слоја (дебљине од ~ 4 mm) овог узорка (сл. 4.23. а)) указује на релативно хомогену структуру по целом пресеку.

На десној половини узорка уочена је прслина која се простире по целој дебљини слоја од линије стапања до површине слоја. Степен мешања основног и додатног материјала од ~11% указује на релативно уску зону утицаја топлоте.



а)



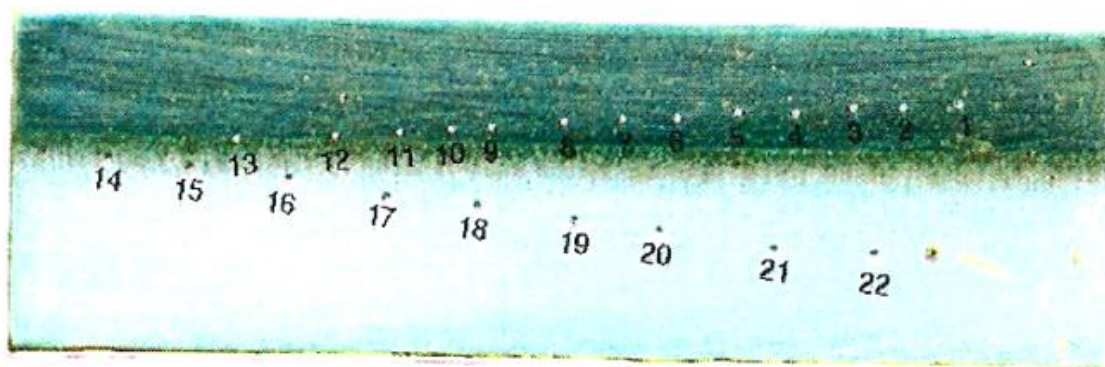
б)

Слика 4.23. Макроструктура (а) и расподела тврдоће (б) (532-739 HV5) по попречном пресеку узорка са антихабајућом превлаком од додатног материјала А, нанесеног у једном слоју

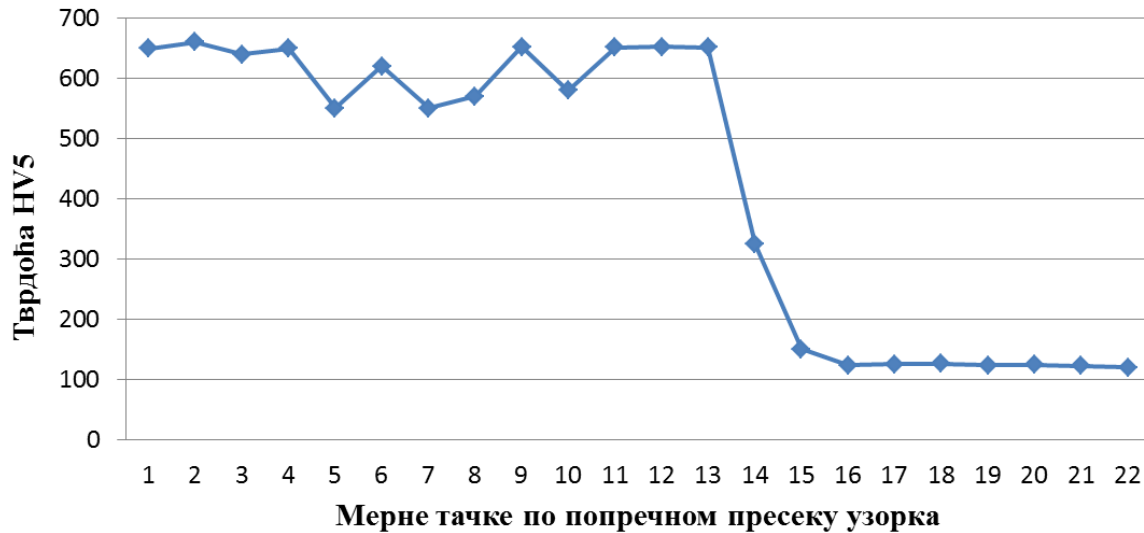
Резултати приказани на сл. 4.23. б) указују на релативно хомогену расподелу тврдоће по попречном пресеку антихабајућег слоја са наглим падом у зони утицаја топлоте.

4.4.3.2. Узорак са антихабајућим слојем од додатног материјала Б (FeCrCBNiSi)

Изглед макроструктуре антихабајућег слоја (дебљине од $\sim 0.3 - 0.5$ mm) овог узорка (сл. 4.24. а)) указује на хомогену структуру по целом пресеку, без присуства прслина. Степен мешања основног и додатног материјала од $\sim 13\%$ указује на релативно уску зону утицаја топлоте.



а)



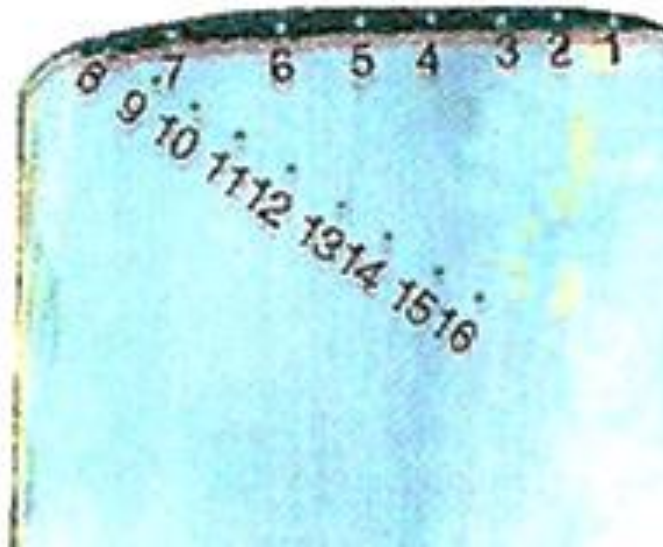
б)

Слика 4.24. Макроструктура а) и расподела тврдоће б) (549-644 HV5) по попречном пресеку узорка са антихабајућом превлаком од додатног материјала Б, нанесеног у једном слоју

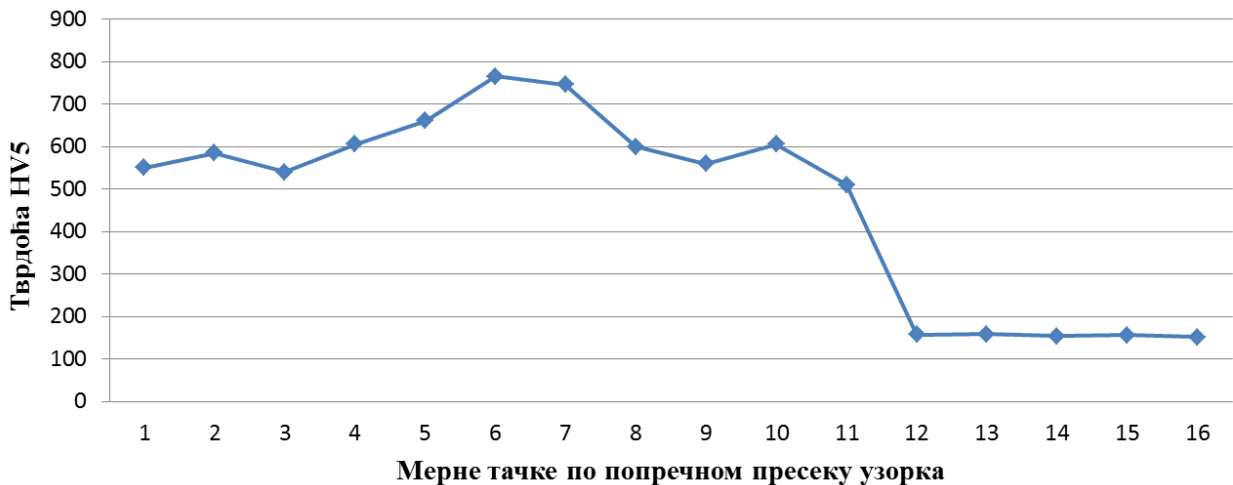
Резултати приказани на сл. 4.24. б) указују на релативно хомогену расподелу тврдоће по попречном пресеку антихабајућег слоја са наглим падом у зони утицаја топлоте.

4.4.3.3. Узорак са антихабајућим слојем од додатног материјала В (NiCrBSiFe/35%WC)

Изглед макроструктуре антихабајућег слоја (дебљине од ~ 1.5 mm) овог узорка (сл. 4.25. а)) указује на релативно хомогену структуру по целом пресеку, без присуства прслина. Степен мешања основног и додатног материјала од ~9% је најмањи у односу на узорке израђене осталим поступцима.



а)



б)

Слика 4.25. Макроструктура а) и расподела тврдоће б) (600-750 HV5) по попречном пресеку узорка са антихабајућом превлаком од додатног материјала В, нанесеног у једном слоју

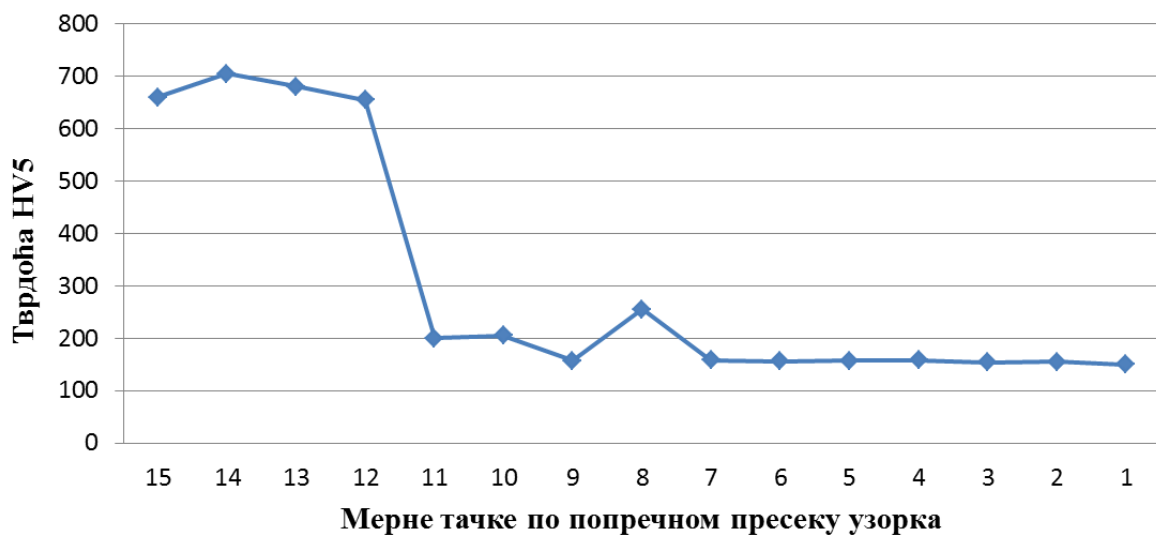
Резултати приказани на сл. 4.25. б) указују на изразито нехомогену расподелу тврдоће по попречном пресеку антихабајућег слоја са благим падом у зони утицаја топлоте.

4.4.3.4. Узорак са антихабајућим слојем од додатног материјала Г (Fe- Cr-C- Si)

Изглед макроструктуре антихабајућег слоја (дебљине од ~ 3 mm) овог узорка (сл. 4.26 а)) указује на релативно хомогену структуру по целом пресеку са великим степеном мешања од ~28%. На десној половини узорка уочена је прслина која се простире по целој дебљини слоја од линије стапања до површине слоја.



a)



б)

Слика 4.26. Макроструктура а) и расподела тврдоће б) (644-701 HV5) по попречном пресеку узорка са антихабајућом превлаком од додатног материјала Г, нанесеног у једном слоју

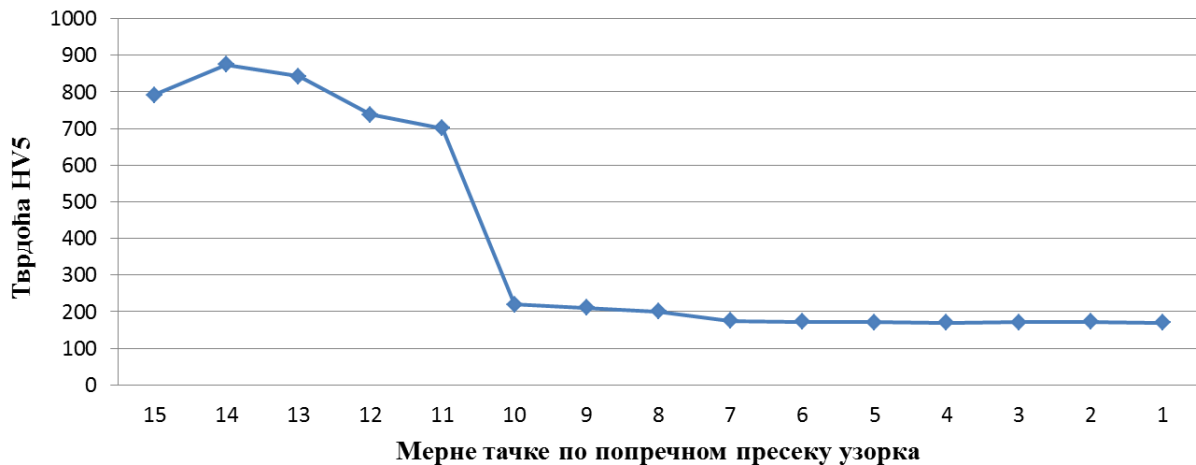
Резултати приказани на сл. 4.26. б) указују на релативно хомогену расподелу тврдоће по попречном пресеку антихабајућег слоја са наглим падом у зони утицаја топлоте.

4.4.3.5. Узорак са антихабајућим слојем од додатног материјала Д (Fe- Cr-C- Ti)

Изглед макроструктуре антихабајућег слоја (дебљине од $\sim 2.5\text{mm}$) овог узорка (сл. 4.27. а)) указује на релативно хомогену структуру по целом пресеку са великим степеном мешања од $\sim 27\%$. На средини узорка уочена је прелина која се простире по целој дебљини слоја од линије стапањања до површине слоја.



а)



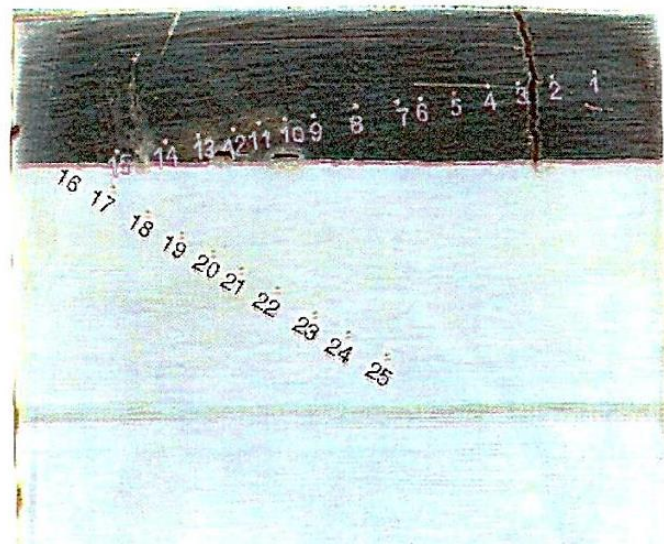
б)

Слика 4.27. Макроструктура а) и расподела тврдоће б) (701-874 HV5) по попречном пресеку узорка са антихабајућом превлаком од додатног материјала Д, нанесеног у једном слоју

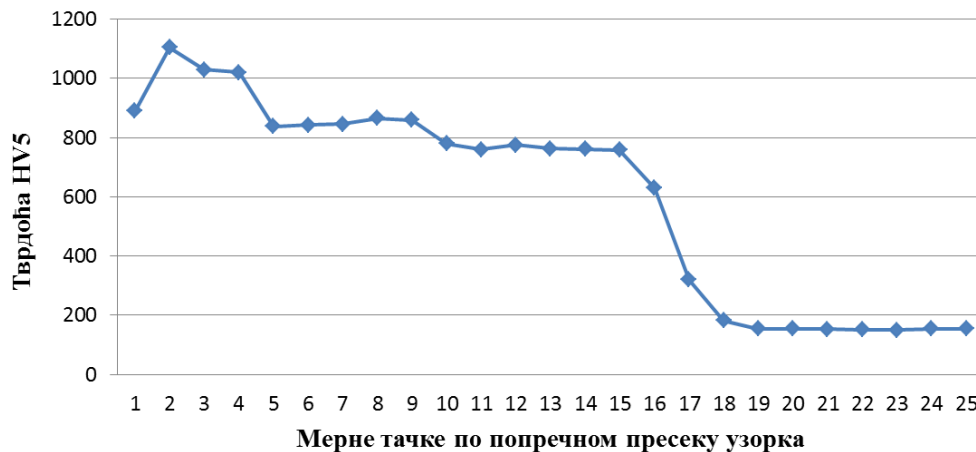
Резултати приказани на сл. 4.2. б) указују на релативно хомогену расподелу тврдоће по попречном пресеку антихабајућег слоја са блажим падом у зони утицаја топлоте.

4.4.3.6. Узорак са антихабајућим слојем од додатног материјала Ђ (Fe-Cr-W-B-Nb-Mo-C)

Изглед макроструктуре антихабајућег слоја (дебљине од ~ 3-4mm) овог узорка (сл. 4.28. а)) указује на релативно хомогену структуру по целом пресеку са великим степеном мешања од ~25%. На десној половини узорка уочена је прслина која се простире по целој дебљини слоја од линије стапања до површине слоја. Поред те прслине уочена је једна прслина на левој страни узорка која почиње од површине слоја и завршава се после неких 2mm.



а)



б)

Слика 4.28. Макроструктура а) и расподела тврдоће б) (980-1115 HV5) по попречном пресеку узорка са антихабајућом превлаком од додатног материјала Ђ, нанесеном у једном слоју

Резултати приказани на сл. 4.28. б) указују на мање хомогену расподелу тврдоће у првој половини у односу на другу половину попречног пресека антихабајућег слоја, са благим падом у зони утицаја топлоте.

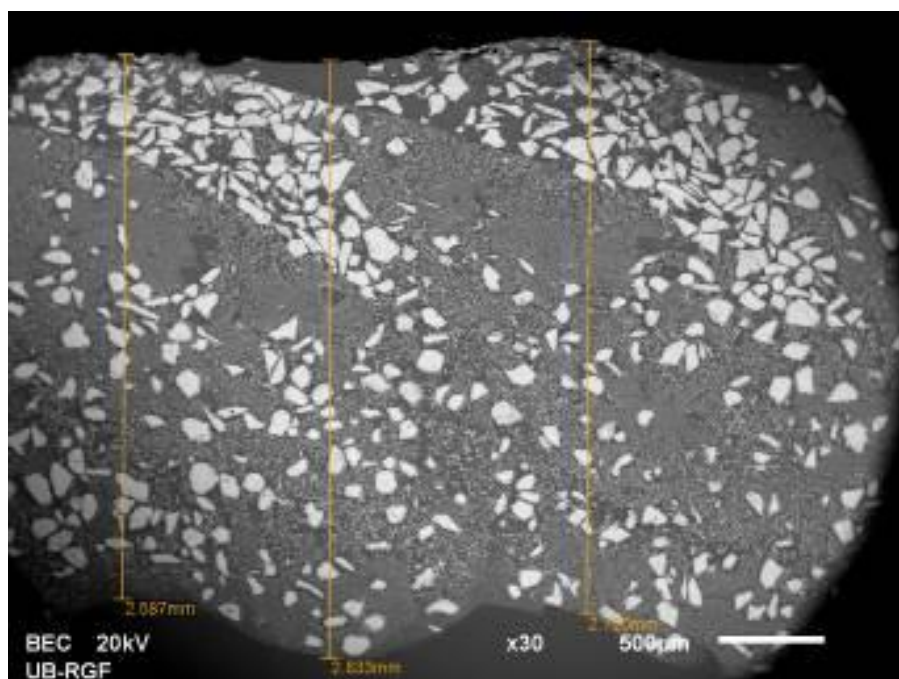
4.4.4. Микроструктурна и хемијска анализа

У поглављима од 4.4.4.1. до 4.4.4.6. приказана је микроструктура и површинска и тачкаста хемијска анализа микроконституената (карбидних фаза и матрице) антихабајућих слојева моделних узорака.

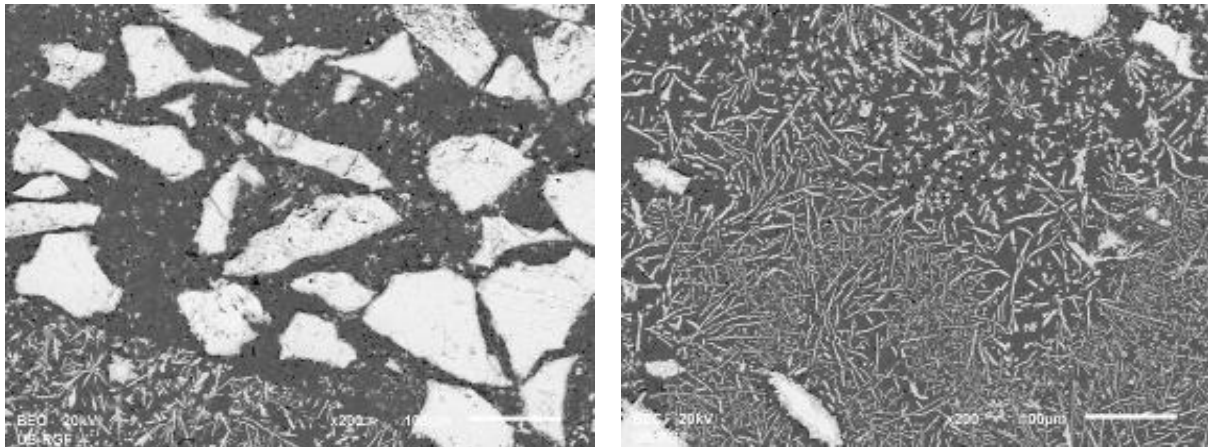
Структурна испитивања имају за циљ да обезбеде подршку осталим методама испитивања. Ово испитивање има за циљ да помогне да се одреде додатни материјали који имају повећану отпорности према хабању и тиме продужни радни век делова вентилационог млина (усисне плоче). Приказани резултати у оквиру овог поглавља дају информације о квалитативној идентификацији фаза, као и квантитативној хемијској анализи фаза по дебљини антихабајућег слоја.

4.4.4.1. Испитивање узорка са антихабајућим слојем од материјала А (NiFeCrBSi/WC)

На сл. 4.29. приказана је микроструктура узорка са антихабајућим слојем дебљине ~ 2.7 mm од материјала А (NiFeCrBSi/WC).

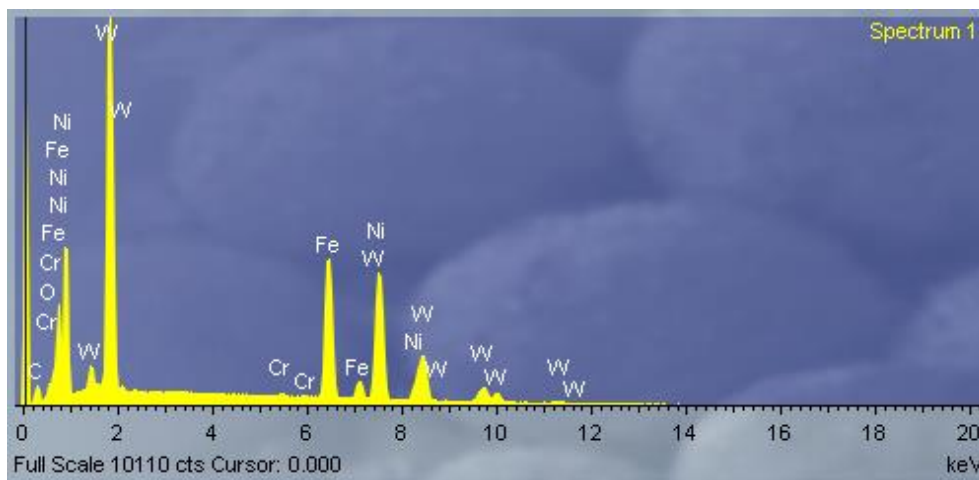


a)



б) в)
Слика 4.29. а) Микроструктура попречног пресека антихабајућег слоја од материјала А, б) Површинска зона, в) Средишња зона

У површинској зони (4.29. б) присутан је знатно већи удео крупнијих WC (~30 – 120 μm) полигоналног облика. Насупрот томе, у средишњем делу слоја запажа се знатно већи удео ситнијих карбида игличастог облика (4.29. в). Поред тога, очигледна је нехомогенија расподела карбида у површинској зони него у осталом делу узорка (сл.4.29. а).



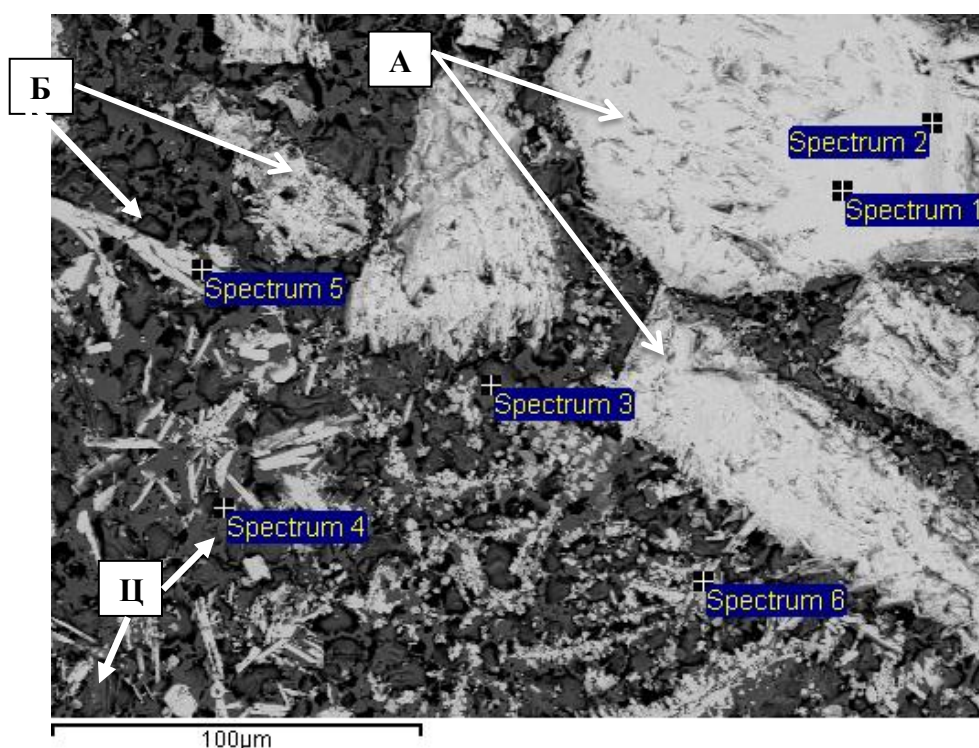
Слика 4.30. EDS анализа хемијског састава антихабајућег слоја од материјала А

На сл. 4.30. приказана је површинска EDS анализа хемијског састава антихабајућег слоја (сл.4.29. а) а у Таб. 4.14. дата је квантитативна анализа са прегледом средњих концентрација елемената присутних у наведеном слоју.

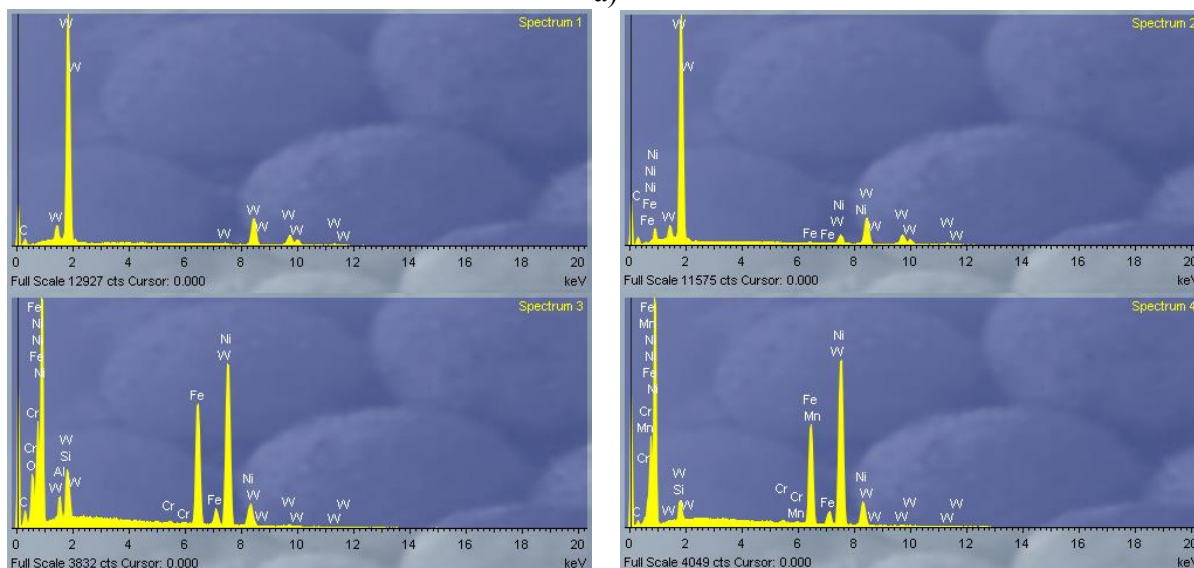
Табела 4.14. EDS анализа хемијског састава антихабајућег слоја од материјала А

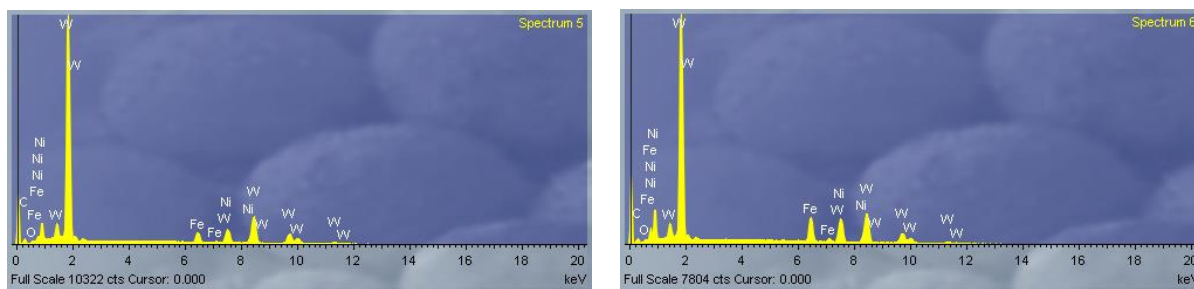
Хем. Састав, мас %	C	B	Cr	Fe	Ni	W	Укупно
Spectrum 1	5.85	1.91	0.31	22.07	30.14	39.73	100.00

На основу резултата EDS анализе антихабајућег слоја очигледно је присуство највеће концентрације W (39.73%), Ni (30.14%) и Fe (22.07%) а у знатно мањој мери C (5.85%) и B (1.91%). На сл.4.31 а) и б) приказана је микроструктура и EDS анализа присутних фаза у антихабајућем слоју. Поред тога, у Таб.4.15. дата је квантитативна анализа присутних фаза: WC и матрице (чврстог раствора на основи Ni и Fe).



а)





б)

Слика 4.31. а) SEM антихабајућег слоја од материјала А и б) EDS анализе хемијског састава WC – фазе (Spectrum 1,2,5 и 6)) и матрице (Spectrum 3 и 4)

Табела 4.15. EDS анализа хемијског састав WC – фазе (Spectrum 1,2,5 и 6) и матрице (Spectrum 3 и 4)

Хем. Састав, мас %	C	B	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	W	Укупно
Spectrum 1	7.73	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	91.90	100.00
Spectrum 2	8.51	1.00	0.18	0.00	0.14	0.00	0.61	6.57	82.99	100.00
Spectrum 3	7.04	6.70	1.85	1.80	0.32	0.17	23.76	52.98	5.38	100.00
Spectrum 4	3.65	0.53	0.00	1.61	0.37	0.35	23.93	67.98	1.58	100.00
Spectrum 5	4.94	1.04	0.13	0.00	0.35	0.00	5.60	9.63	78.30	100.00
Spectrum 6	3.98	1.38	0.12	0.00	0.31	0.00	10.82	14.78	68.60	100.00

На основу резултата EDS анализе (сл.4.31. и Таб.4.15.) очигледно је да су фазе полигоналног облика означене са А (Spectrum 1 и 2) и игличасте фазе означене са Ц (Spectrum 5 и 6) WC – фазе. Мања концентрација W и већа концентрација Ni и Fe у карбидима игличасте морфологије последица је веће запремине интеракције упадног млаза електрона са атомима антихабајућег слоја при EDS анализи, него што је димензија ових карбида. У том случају EDS анализа обухвата једним делом и анализу матрице.

Насупрот томе фаза означена са Б је матрица, односно чврсти раствор на бази Ni и Fe (Spectrum 3 и 4). Поред тога, у матрици су растворени и карбидотворни елементи W, B и Si.

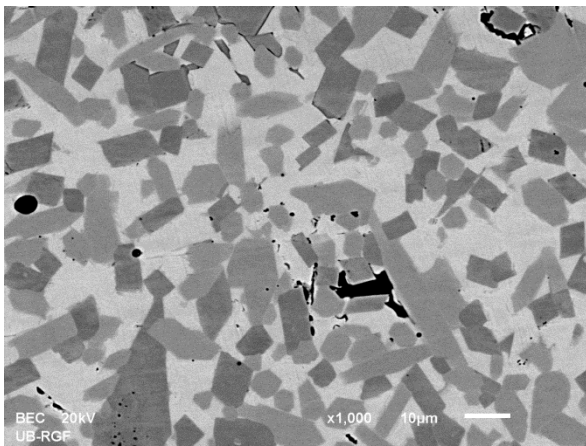
4.4.4.2. Испитивање узорка са антихабајућим слојем од материјала Б

(FeCrCBNiSi)

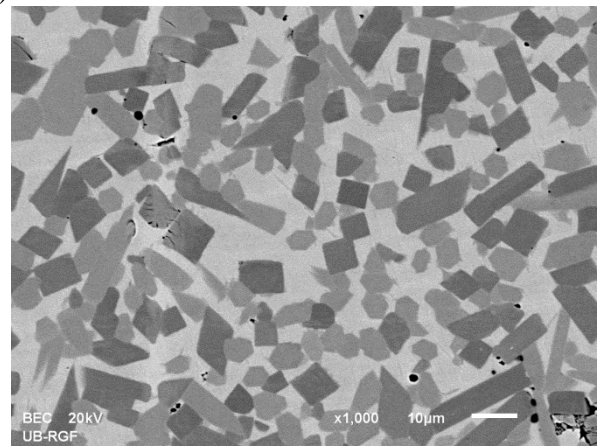
На сл. 4.32. приказана је микроструктура узорка са антихабајућим слојем дебљине ~ 1.1 mm од материјала Б (FeCrCBNiSi).



a)



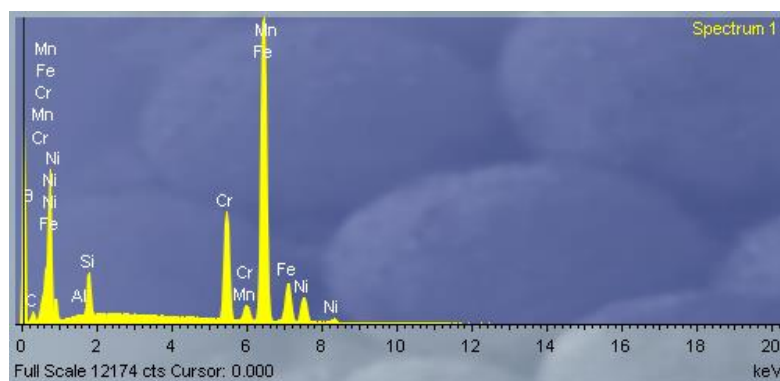
б)



в)

Слика 4.32. а) Микроструктура попречног пресека антихабајућег слоја од материјала Б, б) Површинска зона, в) Средишња зона

У целом попречном пресеку узорка (сл.4.32. б и 4.32. в) доминантан је удео Cr – карбида (светлија фаза на слици 4.32. б) и Cr –борида (тамнија фаза на слици 4.32. б) димензија ($\sim 12 \pm 4.0 \mu\text{m}$) полигоналног и издуженог облика. По целом попречном пресеку узорка (сл.4.32. а), очигледна је хомогена расподела карбида и борида.



Слика 4.33. EDS анализа хемијског састава антихабајућег слоја од материјала Б

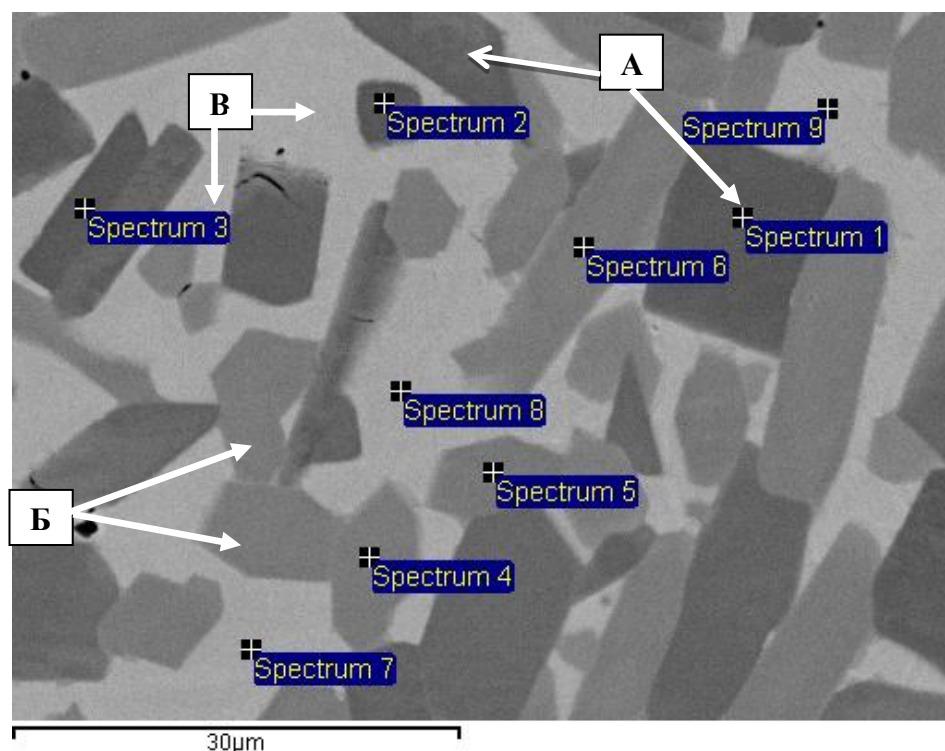
На сл. 4.33. приказана је површинска EDS анализа хемијског састава антихабајућег слоја (сл.4.32. а) а у Таб. 4.16. дата је квантитативна анализа са прегледом средњих концентрација елемената присутних у наведеном слоју.

Табела 4.16. EDS анализа хемијског састава антихабајућег слоја од материјала Б

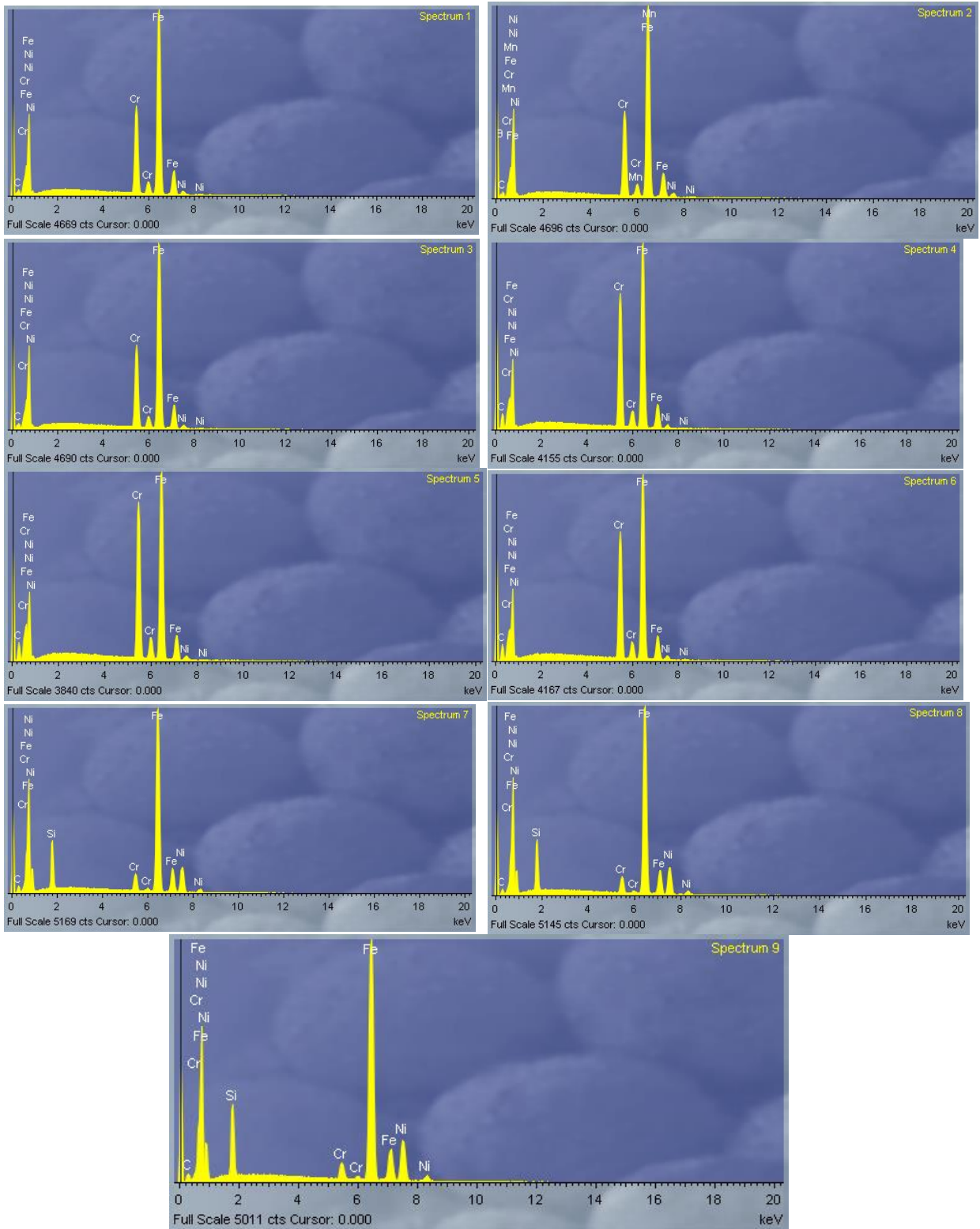
Хем. Састав, мас %	B	C	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Укупно
Spectrum 1	2.82	5.25	0.11	2.94	14.30	0.24	65.54	8.81	100.00

На основу резултата EDS анализе антихабајућег слоја очигледно је присуство највеће концентрације Fe (65.54%), Cr (14.30%) и Ni (8.81%) а у знатно мањој мери C (5.25%), Si (2.94%) и B (2.92%).

На сл.4.34 а) и б) приказана је микроструктура и EDS анализа присутних фаза у антихабајућем слоју. Поред тога, у Таб. 4.17. дата је квантитативна анализа присутних фаза: Cr -карбида (светлија фаза на слици 4.34. а) и Cr –борида (тамнија фаза на сл. 4.34.а) и матрице (чврстог раствора на основи Ni и Fe са мањим процентом раствореног Si).



a)



б)

Слика 4.34. а) SEM антихабајућег слоја од материјала Б, б) EDS анализе хемијског састава борида - (Spectrum 1, 2 и 3), карбида -(Spectrum 4, 5 и 6) и матрице (Spectrum 7, 8 и 9)

Табела 4.17. EDS хемијски састав узорка (слика 4.36.) са антихабајућим слојем Б - анализа масеног удела

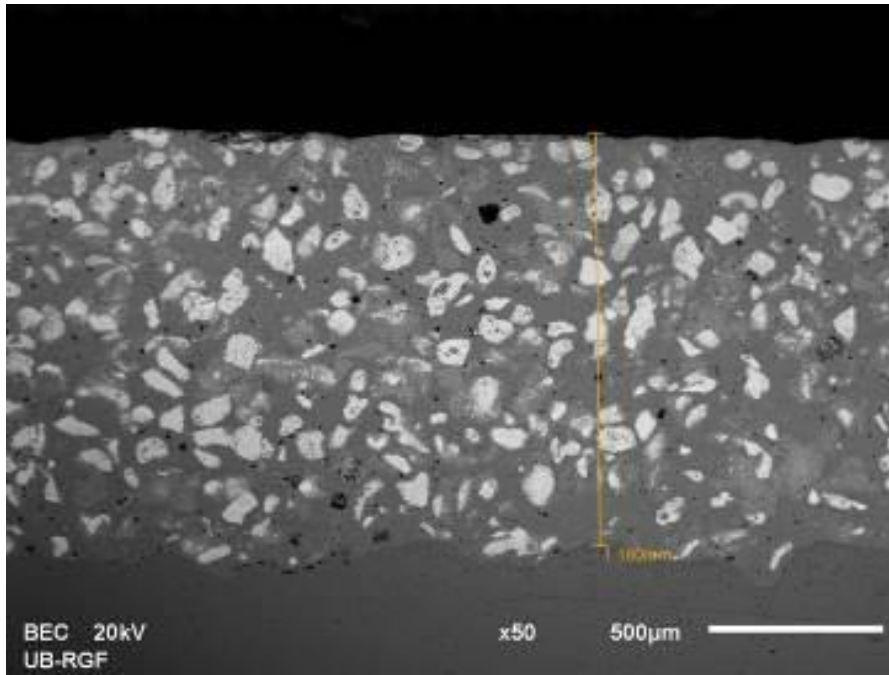
Хем. Састав,мас %	В	С	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Укупно
Spectrum 1	7.80	4.70	0.15	19.02	0.42	65.71	2.21	100.00
Spectrum 2	12.28	5.68	0.00	16.95	0.25	62.62	2.22	100.00
Spectrum 3	10.36	5.35	0.00	17.07	0.46	64.83	1.93	100.00
Spectrum 4	0.00	9.39	0.00	27.16	0.00	61.79	1.65	100.00
Spectrum 5	0.00	9.53	0.00	29.79	0.56	58.46	1.66	100.00
Spectrum 6	0.00	9.64	0.00	26.33	0.41	61.53	2.10	100.00
Spectrum 7	0.00	5.92	6.11	3.79	0.00	68.33	15.85	100.00
Spectrum 8	0.00	4.53	6.27	3.54	0.00	69.12	16.53	100.00
Spectrum 9	0.00	4.97	6.70	2.75	0.23	66.77	18.58	100.00

На основу резултата EDS анализе (сл.4.34. и Таб.4.17.) очигледно је да су фазе полигоналног облика означене са А (Spectrum 1, 2 и 3) Cr – бориди док су фазе означене са Б (Spectrum 4,5 и 6) Cr –карбиди такође полигоналног облика. Мања концентрација Cr је примећена у боридима за разлику од карбида. Присуство железа (Fe) и никла (Ni) у карбидима и боридима последица је веће запремине интеракције упадног млаза електрона са атомима антихабајућег слоја при EDS анализи, него што је димензија ових карбида. У том случају EDS анализа обухвата једним делом и анализу матрице. Насупрот томе фаза означена са В је матрица, односно чврсти раствор на бази Fe и Ni (Spectrum 7, 8 и 9). Поред тога, у матрици су растворени и карбидотворни елементи Cr и Si.

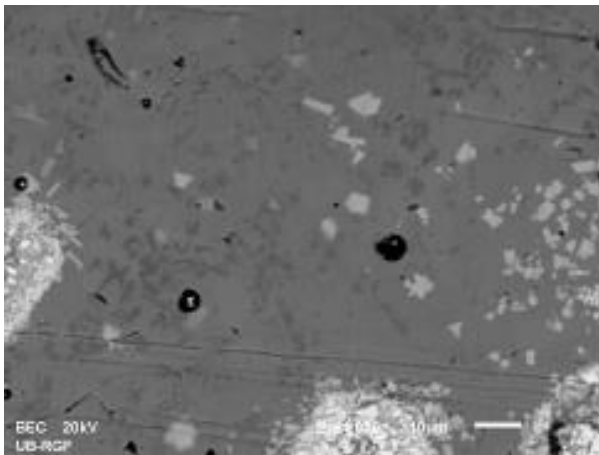
4.4.4.3. Испитивање узорка са антихабајућим слојем од материјала В (NiWCrCoSiC)

На сл. 4.35. приказана је микроструктура узорка са антихабајућим слојем дебљине ~ 1.2 mm од материјала В (NiWCrCoSiC).

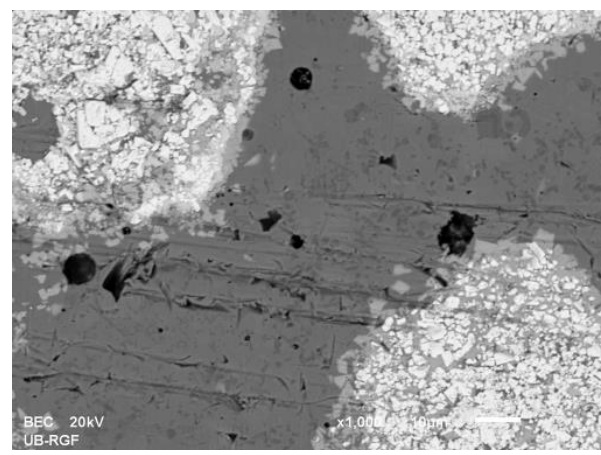
Анализа микроструктуре узорка (4.35. а), указала је на релативно равномерну расподелу WC (~20 – 90 μm) углавном полигоналног облика по целом попречном пресеку. Изглед тих карбида је приказан на сликама (4.35. б) и в)). Тамносиве фазе на слици (4.35. а) представљају Cr – карбиде (~2 – 10 μm) и њихова концентрација је већа у површинској зони. Поред тога, очигледна је нехомогенија расподела WC карбида у површинској зони него у осталом делу узорка (сл. 4.35. а).



а)

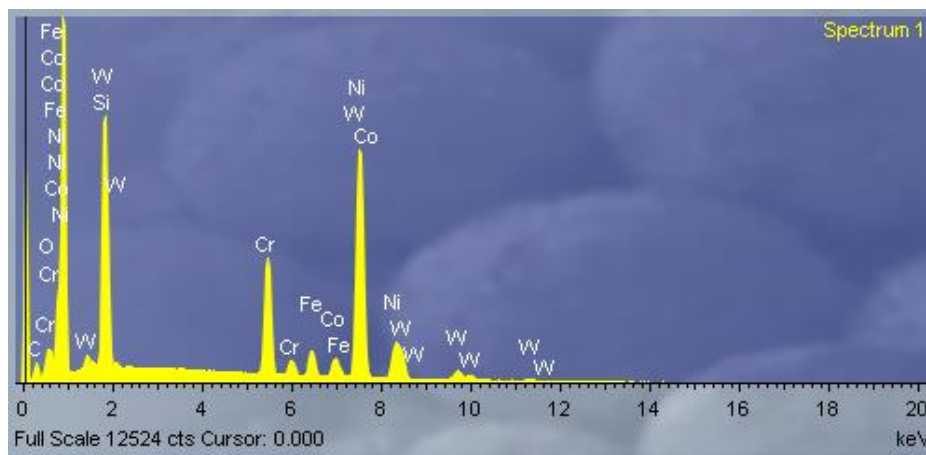


б)



в)

Слика 4.35. а) Микроструктура попречног пресека антихабајућег слоја од материјала В, б) Површинска зона, в) Средишња зона



Слика 4.36. а) ЕДС анализа хемијског састава антихабајућег слоја од материјала В

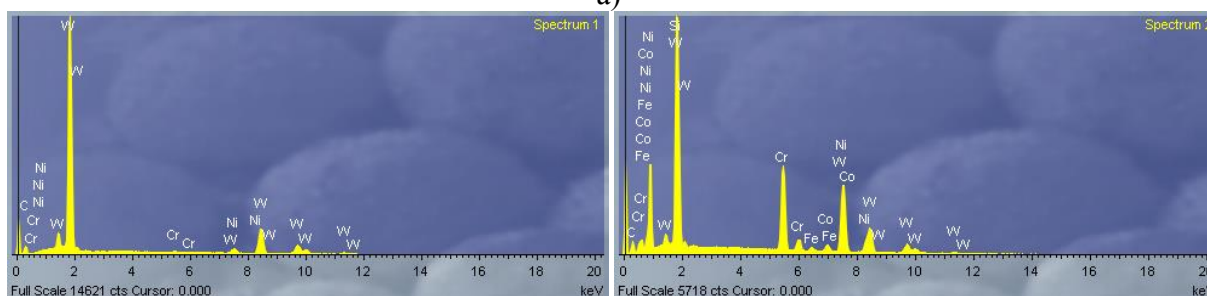
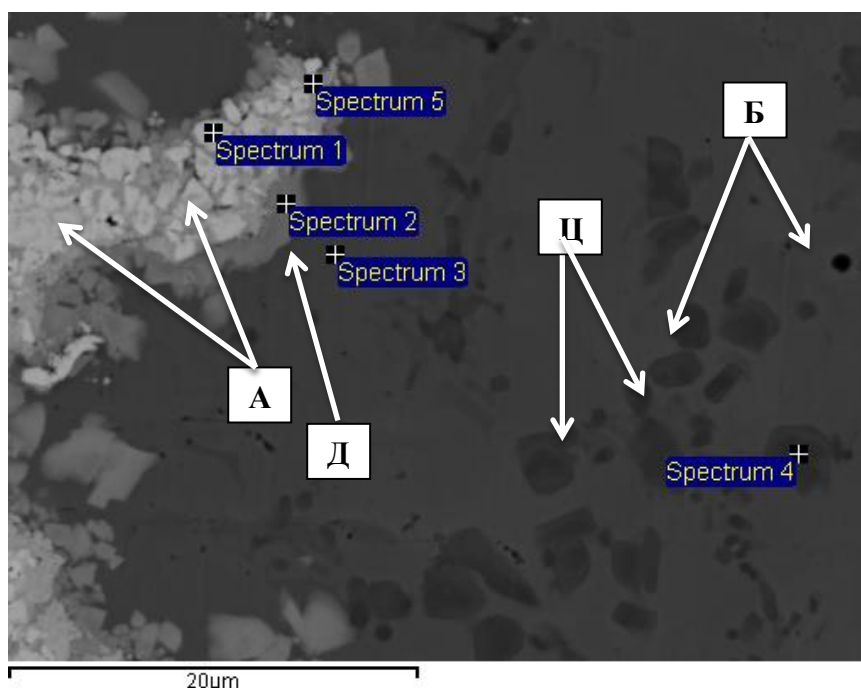
На сл. 4.36. приказана је површинска EDS анализа хемијског састава антихабајућег слоја (сл.4.35. а) а у Таб. 4.18. дата је квантитативна анализа са прегледом средњих концентрација елемената присутних у наведеном слоју.

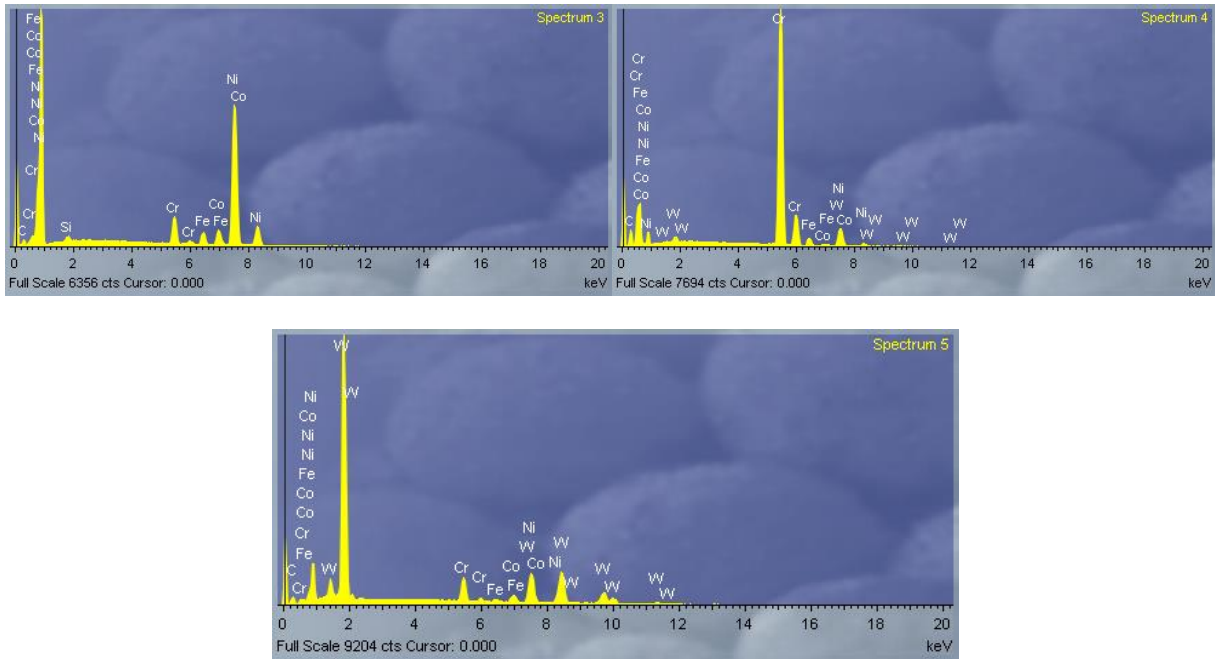
Табела 4.18. . EDS анализа хемијског састава антихабајућег слоја од материјала В

Хем. Састав, мас %	C	Si	Cr	Fe	Co	Ni	W	Total
Spectrum 1	5.6	2.6	12.5	3.5	3.5	50.8	21.4	100.0

На основу резултата EDS анализе антихабајућег слоја очигледно је присуство највеће концентрације Ni (50.8%), W (21.4%), и Cr (12.5%) а у знатно мањој мери C (5.6%), Fe (3.5%) и Co (3.5%).

На сл. 4.37. а) и б) приказана је микроструктура и EDS анализа присутних фаза у антихабајућем слоју. Поред тога, у Таб.4.19. дата је квантитативна анализа присутних фаза: WC , Cr –карбида, контактне или прелазне зоне и матрице (чврстог раствора на основи Ni, Fe и Co).





б)

Слика 4.37. а) SEM антихабајућег слоја од материјала В, б) EDS анализа хемијског састава WC – фазе (1 и 5), Cr –карбида (Spectrum 4), контактне или прелазне зоне (Spectrum 2) и матрице (Spectrum 3)

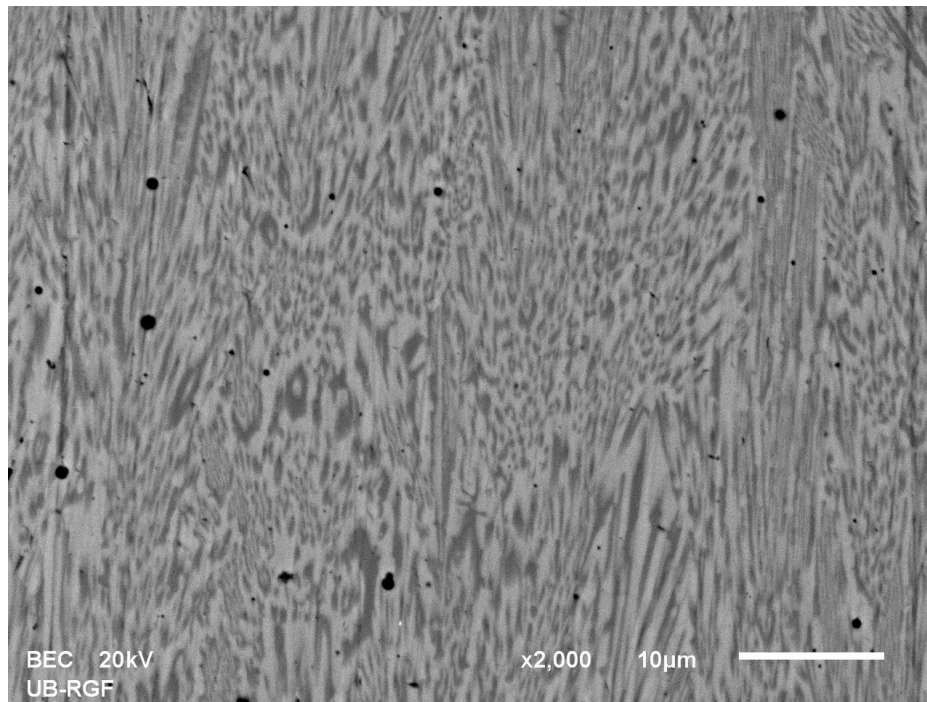
Табела 4.19. EDS хемијски састав узорка (слика 4.37) са антихабајућим слојем В - анализа масеног удела

Хем. Састав, мас %	C	Si	Cr	Fe	Co	Ni	W	Total
Spectrum 1	11.0	0.0	0.5	0.2	0.3	3.4	84.5	100.0
Spectrum 2	7.2	5.1	18.4	1.0	2.2	28.8	37.3	100.0
Spectrum 3	5.9	0.4	6.4	3.7	6.3	76.0	1.3	100.0
Spectrum 4	11.9	0.0	71.5	3.6	0.9	12.1	0.0	100.0
Spectrum 5	5.9	0.0	7.1	1.1	3.4	16.9	65.7	100.0

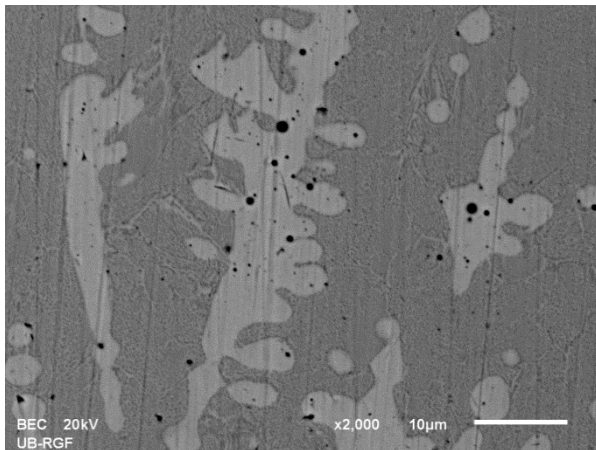
На основу резултата EDS анализе (сл.4.37. и Таб.4.19.) очигледно је да су светло сиве фазе полигоналног облика означене са А (Spectrum 1 и 5) WC – фазе. Тамне фазе означене са Ц (Spectrum 4) су Cr –карбида. Сива фаза означена са Д (Spectrum 2) је контактна зона WC - матрица. Мања концентрација W и већа концентрација Ni, Fe и Cr посебно у Spectrum 5 у WC карбидима последица је веће запремине интеракције упадног млаза електрона са атомима антихабајућег слоја при EDS анализи, него што је димензија ових карбида. У том случају EDS анализа обухвата једним делом и анализу матрице и делом Cr –карбида. Насупрот томе фаза означена са Б је матрица, односно чврсти раствор на бази Ni, Co и Fe (Spectrum 3). Поред тога, у матрици су растворени и карбидотворни елементи W, Cr и Si.

4.4.4.4. Испитивање узорка са антихабајућим слојем од материјала Г (Fe- Cr-C- Si)

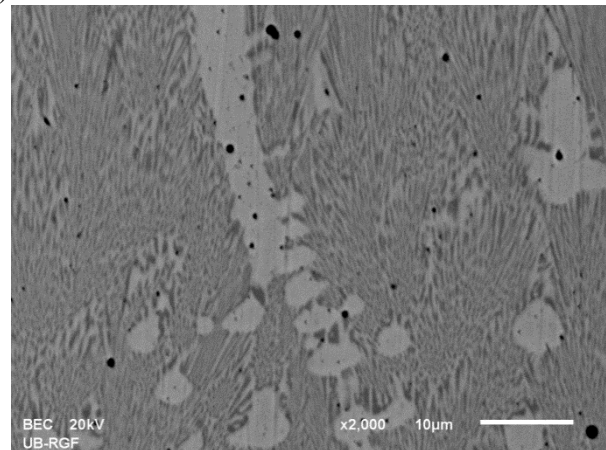
На сл. 4.38. приказана је микроструктура узорка са антихабајућим слојем дебљине ~ 3.1 mm од материјала Г ((Fe- Cr-C- Si)).



а)



б)



в)

Слика 4.38. а) Микроструктура попречног пресека антихабајућег слоја од материјала Г
б) Површинска зона; в) Средишња зона

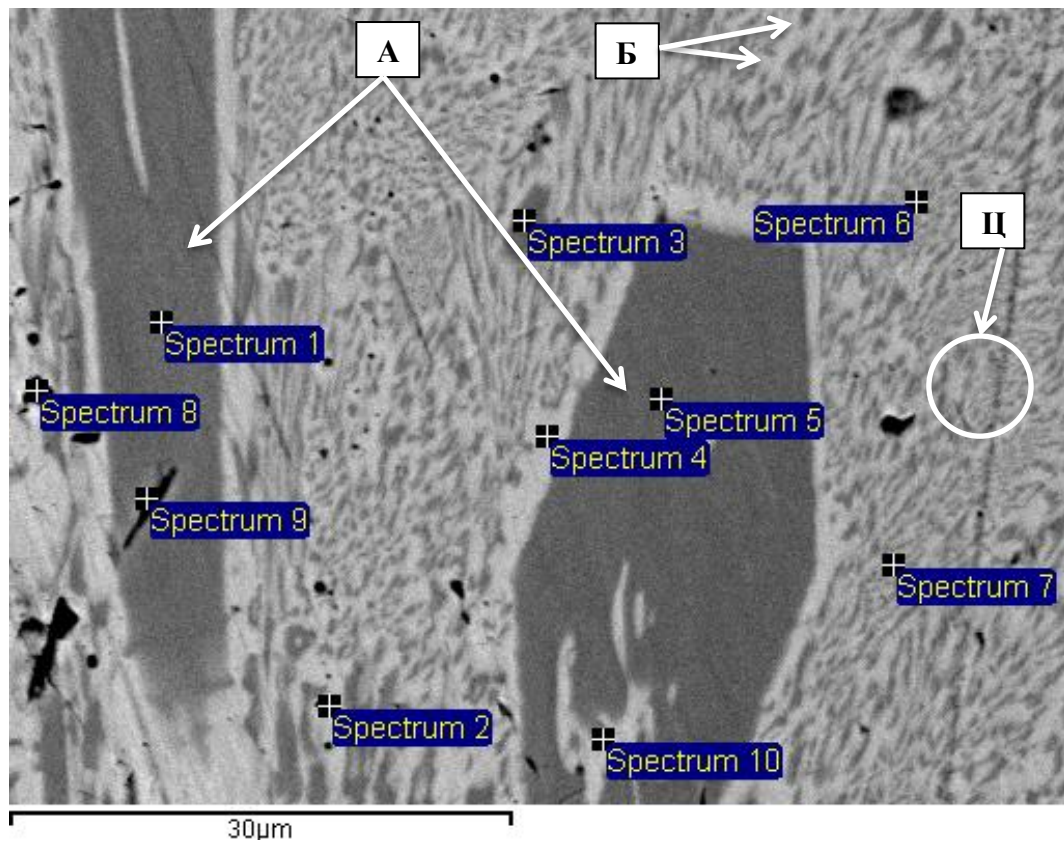
Анализом попречног пресека узорка (4.38. а), уочена је дендритна структура приближно еутектичке високо легиране легуре на бази железа (ливено гвожђе) са доминантним садржајем релативно равномерно распоређених Cr - карбида издуженог (оштроуглог) облика. Изглед те структуре је приказан је и на сликама (4.38. б) и в)).

У Таб. 4.20. дата је квантитативна хемијска анализа са средњим концентрацијама елемената присутних у фазама површинског слоја.

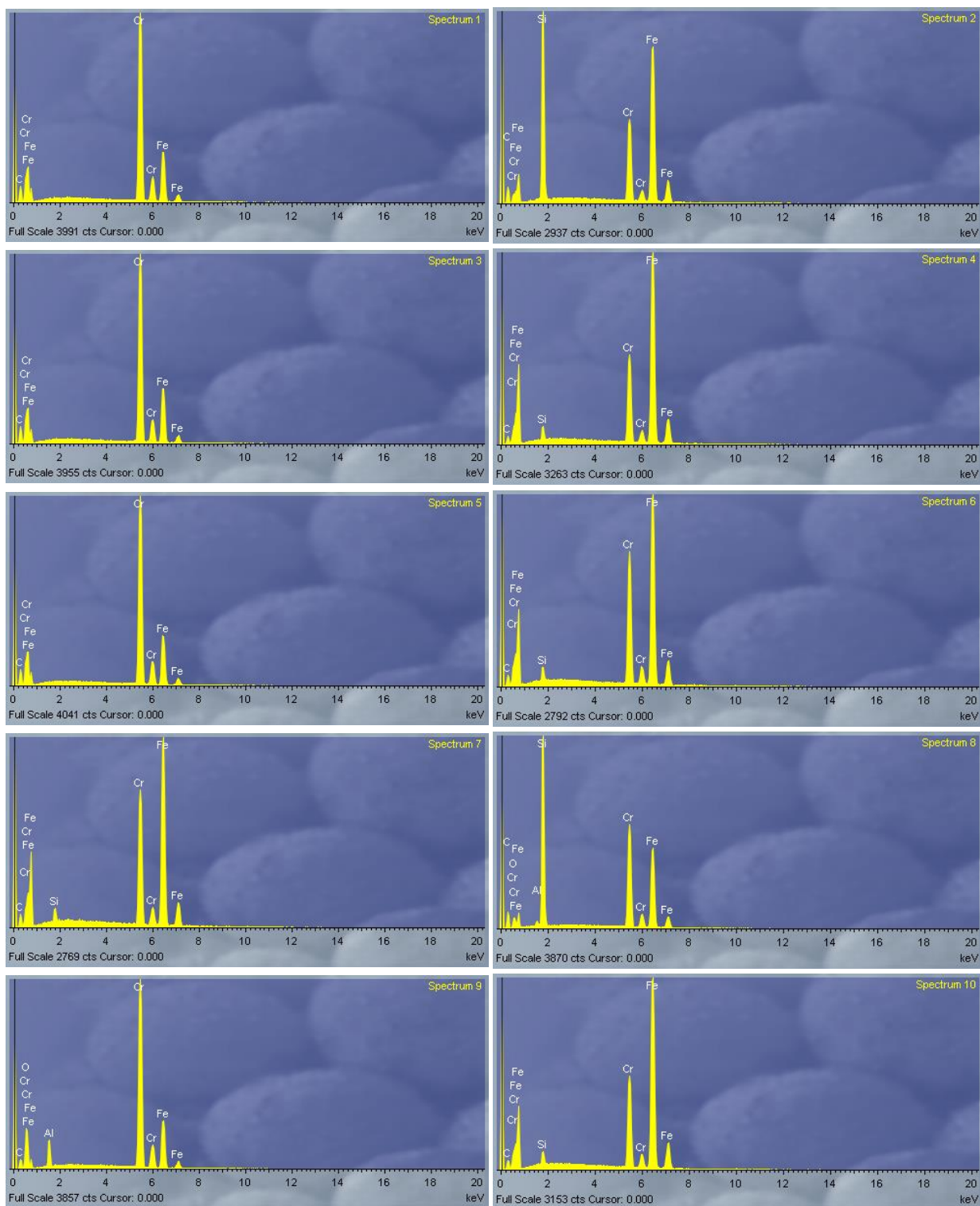
Табела 4.20. . EDS анализа хемијског састава фаза површинског дела антихабајућег слоја од материјала Г

Хем. Састав фаза, %	C	Fe	Mn	Ni	Cr
Матрица	6.56	64.29	0.50	0.21	26.97
Карбиди	11.87	26.40	0.52	0.25	61.46

На сл.4.39. а) и б) приказана је микроструктура и EDS анализа присутних фаза у антихабајућем слоју. Поред тога, у Таб.4.20 дата је квантитативна анализа присутних фаза: примарних Cr –карбида и матрице (ламеларна еутектичка мешавина аустенита - γ + Cr –карбиди игличастог облика).



а)



б)

Слика 4.39. а) SEM антихабајућег слоја од материјала Г,
 б) EDS анализе хемијског састава Cr – карбида (Spectrum 1, 3, 5 и 9) и матрице
 (Spectrum 2, 4, 6, 7, 8 и 10)

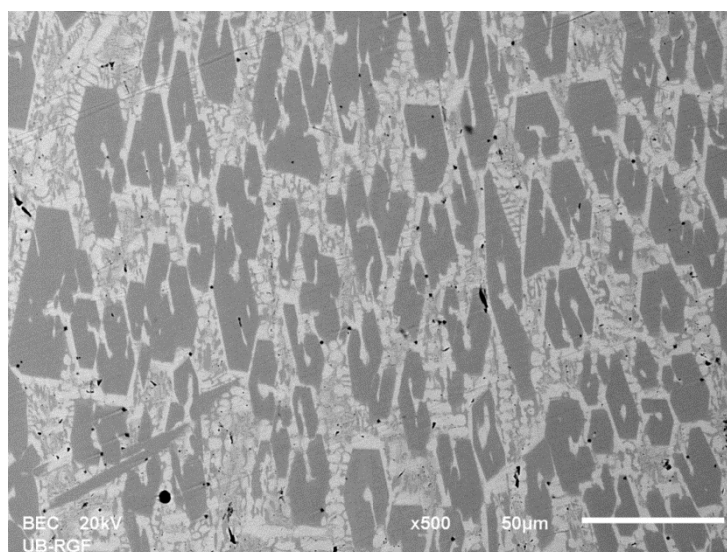
Табела 4.20. EDS анализа хемијског састав Cr – карбида (Spectrum 1, 3, 5 и 9) и матрице (Spectrum 2, 4, 6, 7, 8 и 10)

Хем. састав, %	C	Mn	Al	Si	Cr	Fe	Total
Spectrum 1	11.87	0.00	0.14	0.13	61.46	26.40	100.00
Spectrum 2	12.37	0.62	0.00	16.66	17.49	52.87	100.00
Spectrum 3	12.30	0.00	0.15	0.07	59.15	28.33	100.00
Spectrum 4	5.20	0.57	0.00	1.59	20.09	72.54	100.00
Spectrum 5	12.01	0.00	0.00	0.00	61.76	26.23	100.00
Spectrum 6	6.65	0.71	0.00	1.38	26.97	64.29	100.00
Spectrum 7	7.33	0.00	0.00	1.34	28.14	63.20	100.00
Spectrum 8	15.96	2.46	0.43	19.69	28.00	33.46	100.00
Spectrum 9	7.18	6.72	3.76	0.16	58.10	24.09	100.00
Spectrum 10	6.55	0.43	0.00	1.48	20.95	70.60	100.00

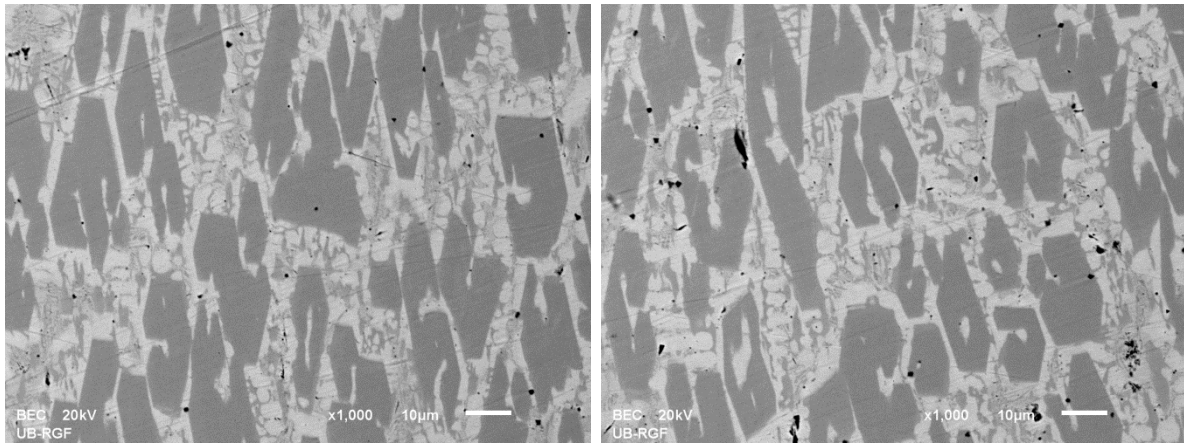
На основу резултата EDS анализе (сл.4.39. и Таб.4.20.) уочавају се доминантни крупни примарни карбиди издуженог облика (оштроугли) означени са А (Spectrum 1, 3, 5 и 9) који су идентификовани као $(Cr,Fe)_7C_3$. Ови карбиди показују стубичаст раст и хексагонални попречни пресек. Карбиди хрома у еутектикуму су игличастог облика. Насупрот томе фазе означене са Б и Ц (Spectrum 2, 4, 6, 7, 8 и 10) су матрица (еутектички раствор) која се састоји од мешавине аустенита (γ) и ситних Cr-карбида игличастог облика.

4.4.4.5. Испитивање узорка са антихабајућим слојем од материјала Д (Fe- Cr-C- Ti)

На сл. 4.40. приказана је микроструктура узорка са антихабајућим слојем дебљине ~ 3.1 mm од материјала Д (Fe- Cr-C- Ti).



а)



б)

в)

Слика 4.40. а) Микроструктура попречног пресека антихабајућег слоја од материјала Д;
 б) Површинска зона; в) Средишња зона

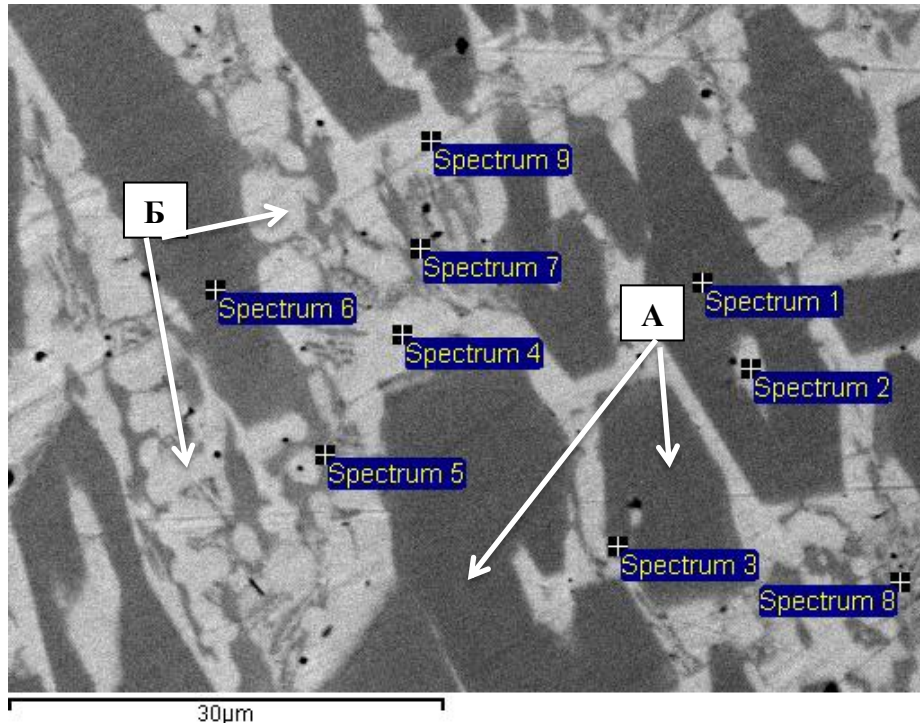
Анализом попречног пресека узорка (4.40.а), уочена је ламеларна структура еутектичке мешавине аустенита (γ) и Cr –карбида игличастог облика), са доминантним садржајем релативно равномерно распоређених примарних крупних Cr -карбида штапићастог и полигоналног (издуженог) облика. Изглед те структуре приказан је и на сликама (4.40.б) и в).

У Таб.4.21 дата је квантитативна хемијска анализа средњих концентрација елемената у присутним фазама површинског дела слоја (сл.4.40.б).

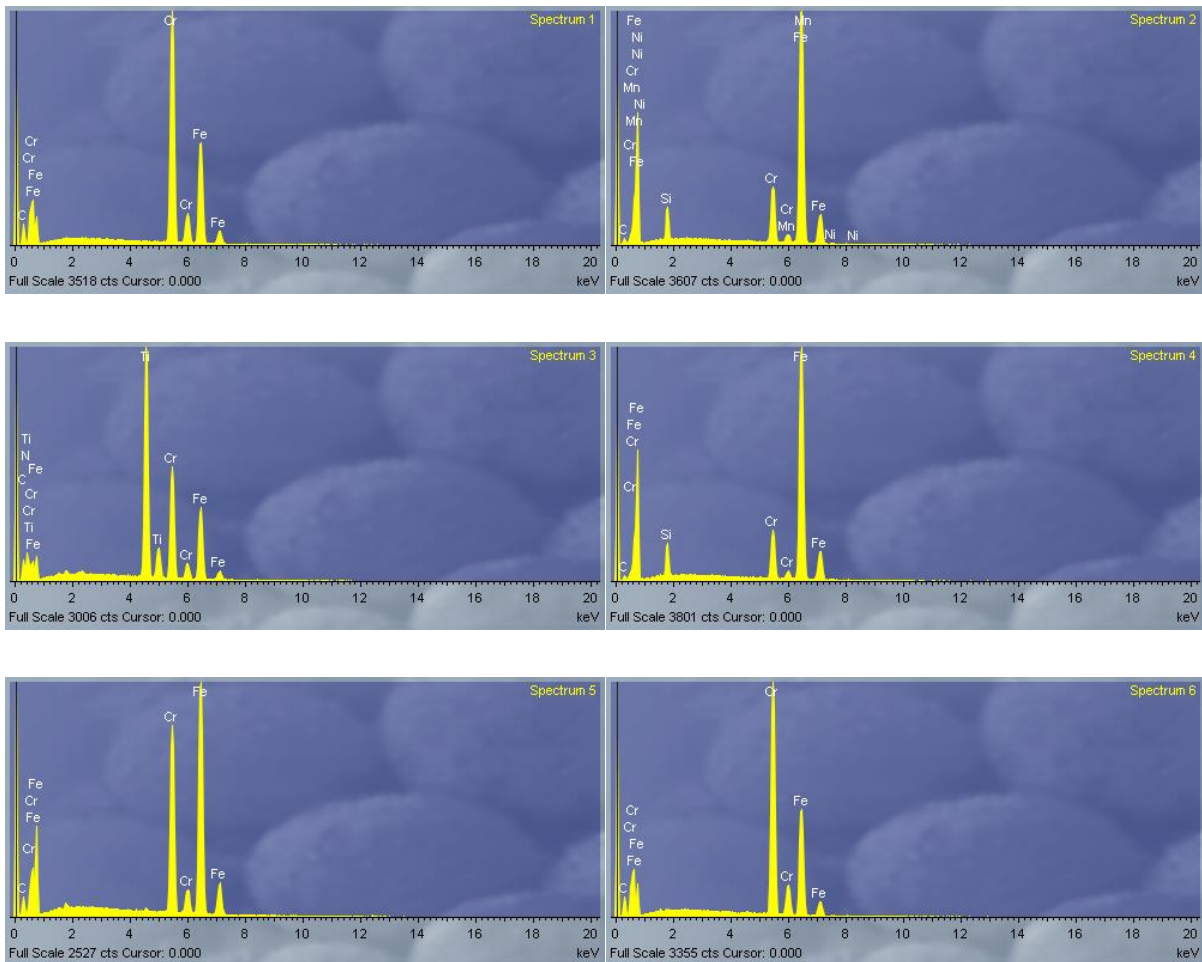
Табела 4.21. EDS анализа хемијског састава фаза површинског дела антихабајућег слоја од материјала Д

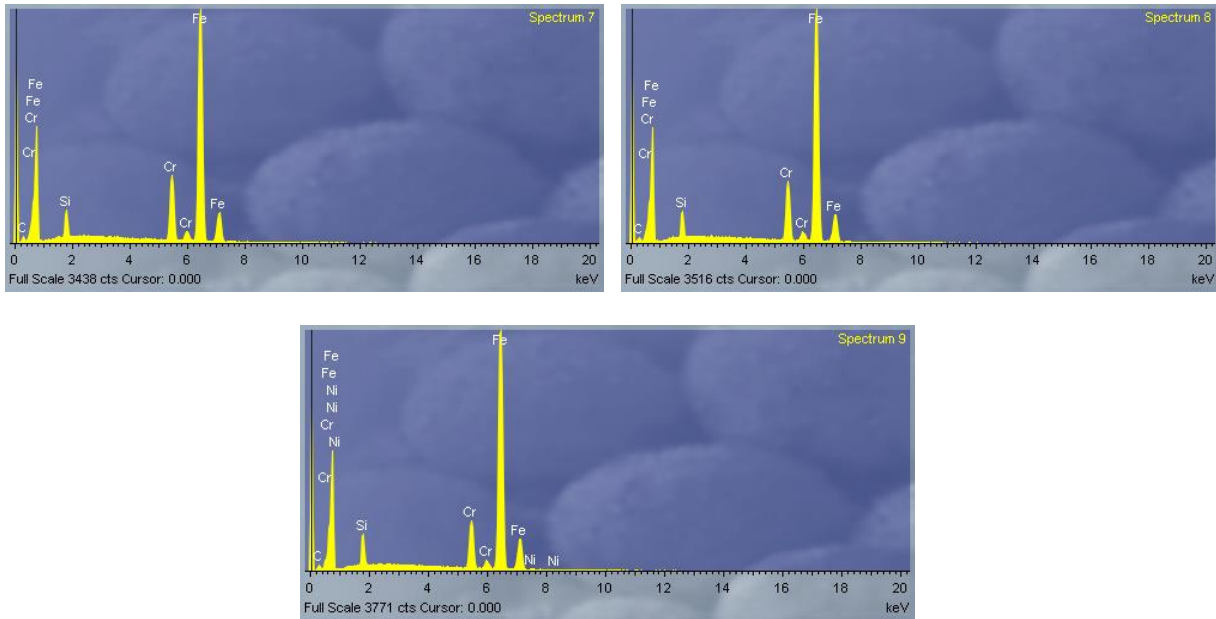
Хем. Састав фаза, %	C	Fe	Mn	Ni	Cr
Матрица	3.84	81.94	0.50	0.21	9.99
Карбиди	10.11	37.02	0.52	0.25	52.25

На сл.4.41а) и б) приказана је микроструктура и EDS анализа присутних фаза у антихабајућем слоју. Поред тога, у Таб.4.22 дата је квантитативна анализа присутних фаза: Cr –карбида и матрице (ламеларна еутектичка мешавина аустенита - γ + Cr –карбида игличастог облика).



a)





б)

Слика 4.41. а) SEM антихабајућег слоја од материјала Д;
 б) EDS анализе хемијског састава Cr – карбида (Spectrum 1, 3, и 6) и матрице (Spectrum 2, 4, 5, 7, 8 и 9)

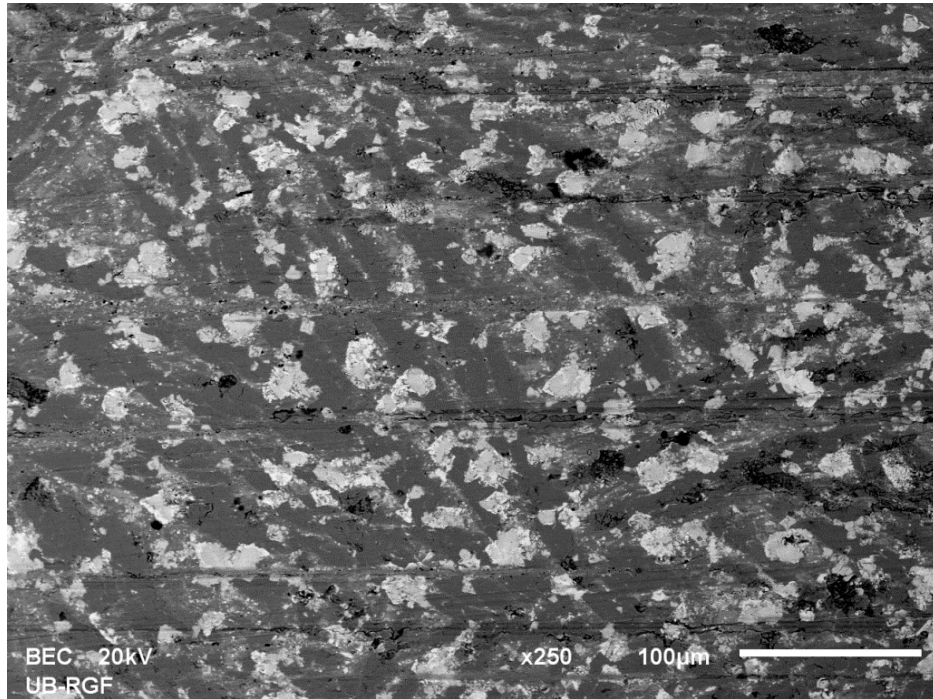
Табела 4.22. EDS анализа хемијског састав Cr – карбида (Spectrum 1, 3, и 6) и матрице (Spectrum 2, 4, 5, 7, 8 и 9)

Хем. Састав фаза, мас%	C	Ni	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Total
Spectrum 1	10.11	0.00	0.08	0.08	52.25	0.46	37.02	100.00
Spectrum 2	3.88	0.73	3.61	0.13	11.52	0.56	79.57	100.00
Spectrum 3	7.67	0.15	0.37	0.18	50.56	0.27	45.27	100.00
Spectrum 4	3.84	0.21	3.67	0.00	9.99	0.35	81.94	100.00
Spectrum 5	7.53	0.00	0.28	0.20	30.11	0.35	61.53	100.00
Spectrum 6	10.32	0.25	0.00	0.14	50.37	0.52	38.41	100.00
Spectrum 7	3.84	0.46	3.00	0.00	13.12	0.57	79.01	100.00
Spectrum 8	3.35	0.54	2.96	0.00	12.21	0.53	80.40	100.00
Spectrum 9	3.41	0.68	3.43	0.00	9.83	0.50	82.14	100.00

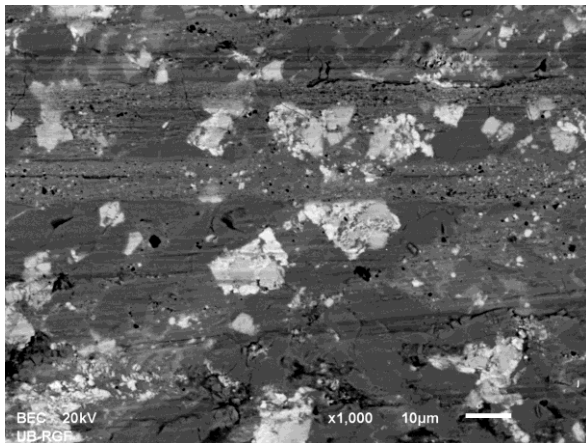
На основу резултата EDS анализе (сл.4.41. и Таб.4.22.) уочени су доминантни крупни примарни карбиди штапићастог и полигоналног облика означени са А (Spectrum 1, 3, и 6) идентификовани су као $(Cr,Fe)_7C_3$. Ови карбиди показују стубичаст раст и хексагонални попречни пресек. Карбиди хрома у еутектикуму су игличастог облика. Насупрот томе фаза означена са Б (Spectrum 2, 4, 5, 7, 8 и 9) су матрица (еутектички раствор) која се састоји од мешавине аустенита (γ) и ситних Cr-карбида игличастог облика.

4.4.4.6. Испитивање узорка са антихабајућим слојем од материјала Ђ (Fe-Cr-W-B-Nb-Mo-C)

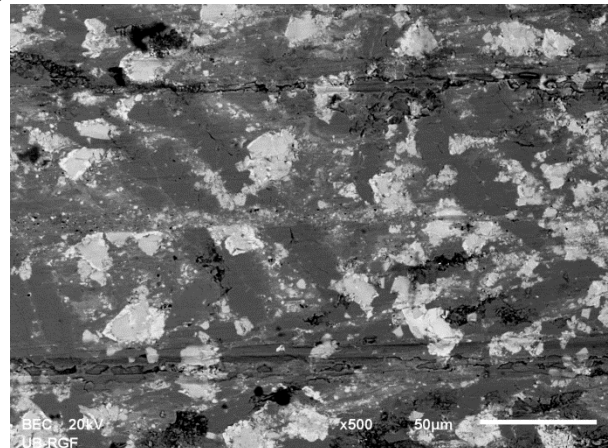
На сл. 4.42. приказана је микроструктура узорка са антихабајућим слојем дебљине ~ 3.1 mm од материјала Ђ ((Fe-Cr-W-B-Nb-Mo-C)).



а)



б)



в)

Слика 4.42. а) Микроструктура попречног пресека антихабајућег слоја од материјала Ђ; б) Површинска зона; в) Средишња зона

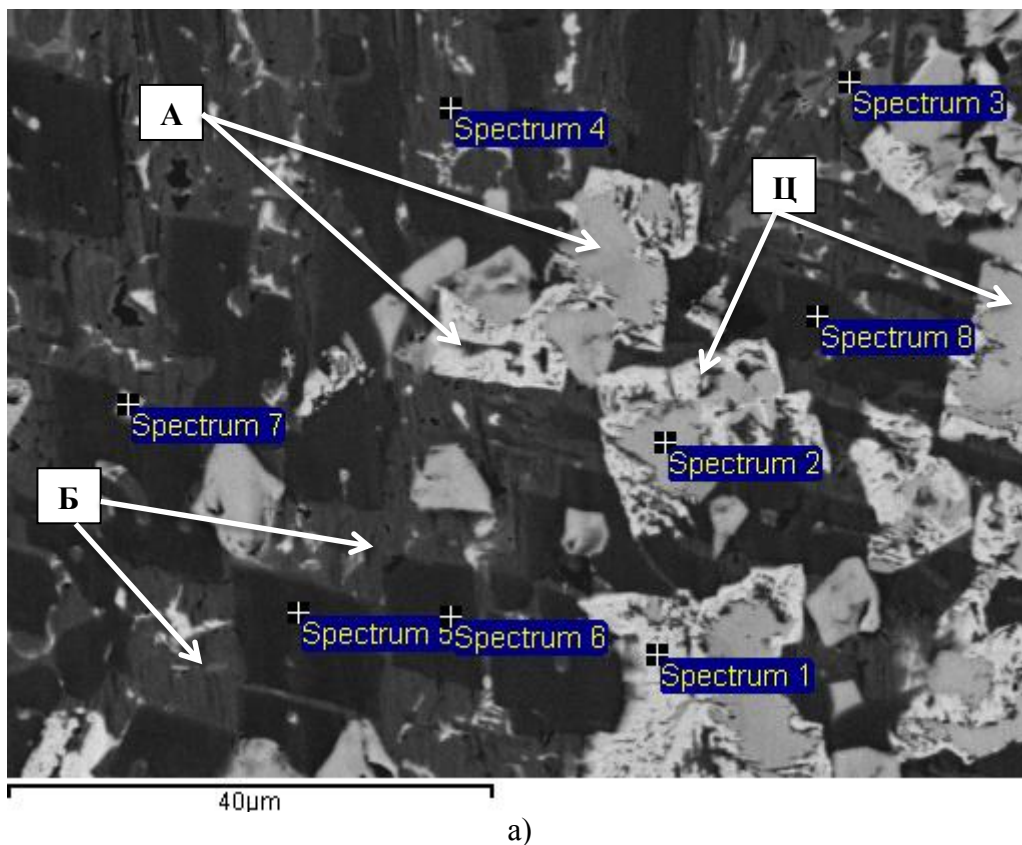
Анализом попречног пресека узорка (4.42. а), уочена је релативно равномерна расподела полигоналних и сферичних карбида димензија ($20 \pm 8 \mu\text{m}$) у мартензитно – беинитној матрици, са израженијом равномерношћу расподеле карбида у средишњој зони (4.42. б) у односу на површинску (4.42. в).

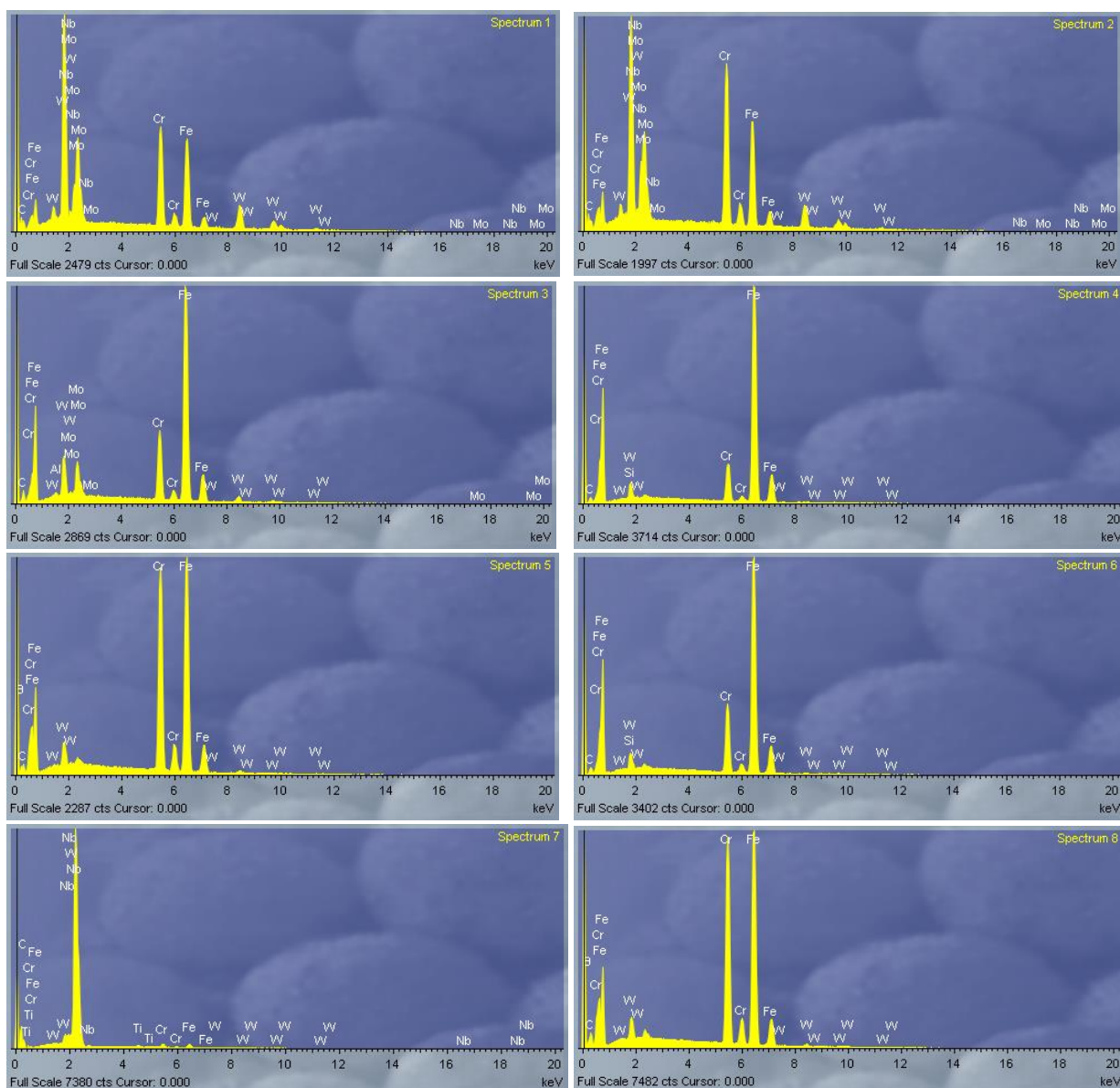
У Таб.4.23. дата је квантитативна хемијска анализа средњих концентрација елемената у присутним фазама површинског дела слоја (сл.4.40 (б)). Очигледно је да је у овим фазама присутна већа концентрација W, Cr, Nb, Мо і С.

Табела 4.23. EDS анализа хемијског састава фаза површинског дела антихабајућег слоја од материјала Ђ

Хем. Састав фаза, %	C	Fe	Cr	Nb	Mo	W
Матрица	5.90	64.08	13.15	0.67	7.56	8.20
Карбиди 1	4.35	22.88	18.25	7.55	16.26	30.55
Карбиди 2	3.31	58.11	34.04		1.04	3.50

На сл.4.43. а) и б) приказана је микроструктура и EDS анализа присутних фаза у антихабајућем слоју. Поред тога, у Таб.4.24. дата је квантитативна анализа присутних фаза: примарних специјалних карбида W, Cr, Мо, Nb; Cr –карбида и матрице FeCrWМо (мартензитно-беинитна структура).





б)

Слика 4.43. а) SEM антихабајућег слоја од материјала Ћ;
 б) EDS анализе хемијског састава специјалних карбида (Spectrum 1, 2 и 7); Cr – карбида (Spectrum 5 и 8) и матрице (Spectrum 3, 4 и 6)

Табела 4.23. EDS анализа хемијског састав специјалних карбида (Spectrum 1, 2 и 7); Cr – карбида (Spectrum 5, 6 и 8) и матрице (Spectrum 3 и 4)

Хем. Састав фаза %	C	B	Si	Ti	Cr	Fe	Nb	Mo	W	Total
Spectrum 1	4.35	0.16	0.00	0.00	18.25	22.88	7.55	16.26	30.55	100.00
Spectrum 2	4.74	0.00	0.00	0.13	24.47	22.72	9.15	12.80	25.99	100.00
Spectrum 3	5.90	0.43	0.00	0.00	13.15	64.08	0.67	7.56	8.20	100.00
Spectrum 4	3.47	0.00	1.47	0.00	8.73	83.81	0.00	1.07	1.45	100.00
Spectrum 5	3.31	0.00	0.00	0.00	34.04	58.11	0.00	1.04	3.50	100.00
Spectrum 6	4.09	0.00	1.18	0.00	14.56	77.14	0.00	0.82	2.20	100.00
Spectrum 7	20.04	0.00	0.00	0.63	1.30	1.80	72.83	0.78	2.61	100.00
Spectrum 8	6.40	0.13	0.00	0.00	32.97	55.16	0.00	1.49	3.86	100.00

На основу резултата EDS анализе (сл.4.43. и Таб.4.23.) уочени су доминантни крупни примарни специјални карбиди типа WC, MoC, NbC, као и комплексни карбиди $Fe_3(W, Mo, Nb, Cr)_3C$ полигоналног облика означени са А и Ц као и Cr-карбиди (Spectrum 5, 6 и 8) полигоналног облика. Карактеристично је присуство специјалног Nb-карбида (Spectrum 7). Насупрот томе, фаза означена са Б (Spectrum 3 и 4) је матрица доминантно мартензитне структуре.

5. ФУНКЦИОНАЛНА ИСПИТИВАЊА

5.1. Припреме за наношење антихабајућих превлака на усисне плоче

Процес оптимизације рада терменергетског постројења, у овом случају вентилационог млина, се постиже неизбежном корелацијом технолошког процеса и стања радних делова. Због све већих захтева у производњи електричне енергије услови рада постројења су све неповољнији, што доводи до одступања од оптималних параметара рада и оштећења радних делова. Нумеричка симулација вишефазног струјања у систему вентилациони млин – канал аеросмеше, која је приказана у 3. поглављу, указала је на услове експлоатације, могуће начине оштећења и продужења радног века компоненти система.

У овом поглављу приказане су дефинисане (изабране) технологије наношења антихабајућих превлака (слојева) на радне делове вентилационог млина. Изведена је антихабајућа заштита и монтажа пробних делова (сет усисних плоча са антихабајућим превлакама). Дефинисање технологија антихабајуће заштите изведено је на основу резултата: испитивања без разарања (визуелна и пенетрантска), структурних (СЕМ, ЕДС, ОМ) и механичких (тврдоћа) узорака моделних испитивања као и на основу резултата нумеричке симулације струјања у вентилационом млину на и око постојећих усисних плоча.

Антихабајуће превлаке, које су нанесене дефинисаним технологијама наваривања и метализације на чеоне површине усисних плоча, омогућиле су повећање радног века ових делова. На тај начин смањен је број интервентних поправки и повећан временски период између неопходних комплетних ремонта постројења, што у крајњем случају утиче на повећање енергетске ефикасности термоенергетских агрегата.

У оквиру овог поглавља дисертације су приказани и резултати функционалних испитивања хабања усисних плоча без и са нанесеним антихабајућим слојем на радним површинама, њихови масени и геометријски губици. На основу измерених параметара хабања урађена је и аналитичка процена радног века усисних плоча са и без нанесених антихабајућих превлака.

Наношења антихабајућих слојева на радне површине усисних плоча изведена су у погону Messer Tehnogasa – Београд на опреми и са додатним и помоћним материјалима, које су обезбедили партиципанти на пројекту TP34028, Термоелектрана Костолац Б - Костолац и Messer Tehnogas – Београд.

Поред нумеричке симулације и моделних испитивања урађена су и остала мерења (термографска испитивања, анализа оштећених усисних плоча - мерење њихове геометрије и масене губитке, брзине струјања, однос честица песка и осталих минералних материја у мешавини.и.т.д.). Ова испитивања су показала да су усисне плоче један од најоптерећенијих радних делова у вентилационом млину, изложене доминантом ерозивном хабању на повишеној температури која варира до 235 °С. Овакви услови рада доводе до њиховог оштећења, а тиме и до смањења капацитета вентилационог млина, смањења његовог радног века, а као крајњу последицу и смањење продуктивности овог система.

5.2. Термографска испитивања

Области у којима се примењује термографија чине отворену палету могућности, које се сваким даном проширују. Ово кратко представљање области примене термографије има за циљ да сагледа значај и улогу коју има ова метода у различитим савременим областима људских делатности као што су: научна истраживања, енергетика, електроника, рачунарска опрема, телекомуникације, испитивања у индустријским постројењима, производња метала, хартије, лекова и слично, мониторинг индустријских постројења и праћење индустријских процеса, нафтна индустрија, индустрија производње гасова, зградарство, испитивање дефеката и уопште стања грађевинских објеката, испитивање енергетске ефикасности, топлификација, заштита културне баштине, медицина, ветеринарство, екологија и друго. Посебно, као специјалне области треба напоменути примене у војне сврхе, јер је

термографија почела да се развија пре свега као војна технологија, а тек онда је нашла примену у цивилном сегменту.

За потребе ове дисертације урађена су и експериментална мерења која се односе на мониторинг температурне расподеле на спољашњој страни кућишта вентилационог млина и на мерење температуре на улазу у млин. Ова експериментална мерења нису приказана у посебном поглављу, већ имају за циљ да се детаљније сагледају радни услови делова вентилационог млина, који су допринели избору адекватног антихабајућег слоја (материјала).

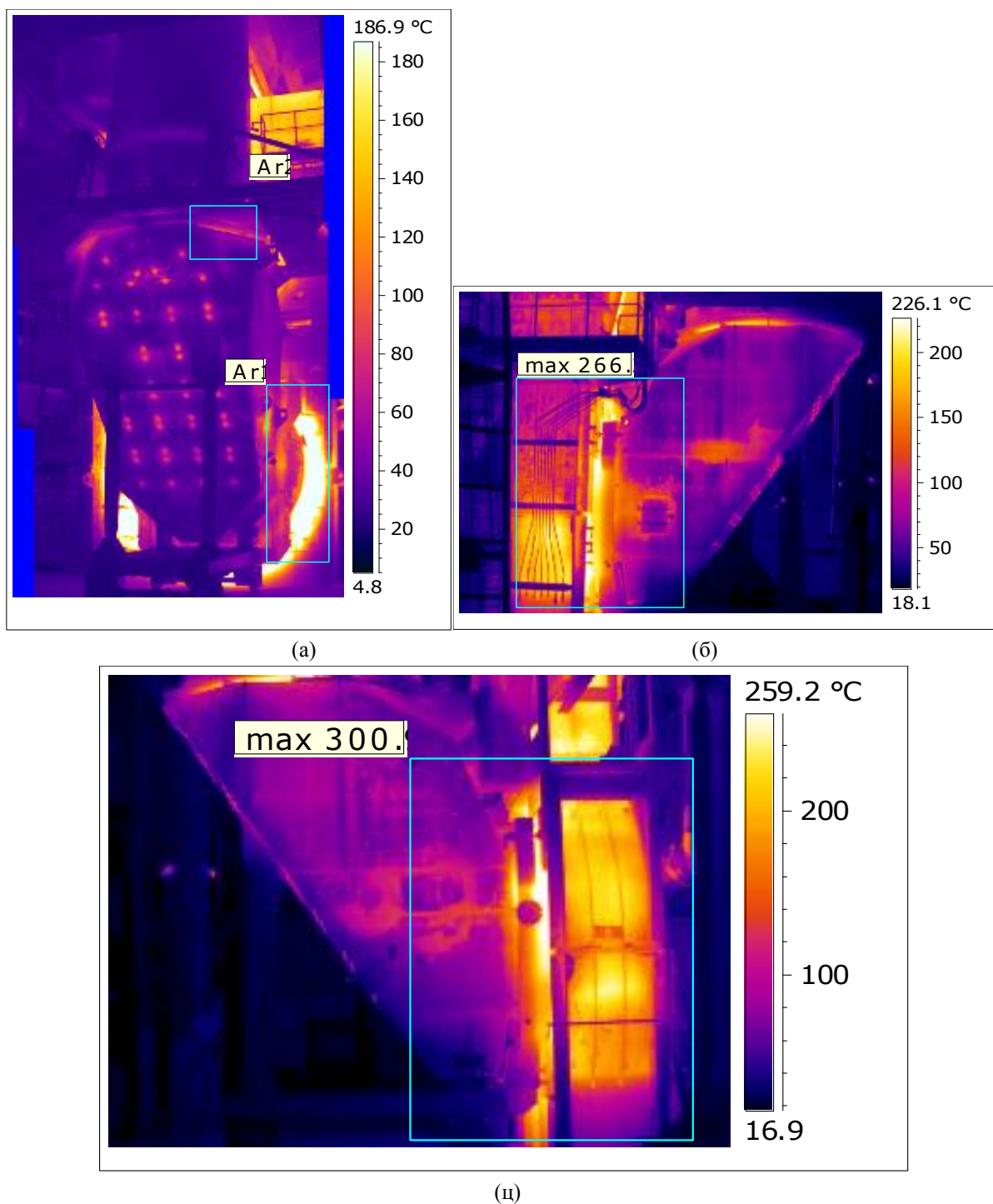
Снимање термографском камером ТС 335 је изведено на млину Термоелектарне Костолац Б.

На термографским снимцима приказана је скала са измереним температурама, али је истовремено извршен и избор зона у којима су забележене максималне температуре. Измерене температуре зависе од неколико параметара: радне температуре мултифазне смеше у вентилационом млину, стања изолације вентилационог млина и спољашње температуре. Анализа термограма и резултата датих у табели 5.1 указује на температурну нехомогеност и присуство оштећења на систему вентилациони млин – канал аеросмеше, као последица дотрајалости и оштећења изолације.

Табела 5.1. Термографска мерења на вентилационим млиновима у Термоелектрани Костолац Б

Вентилациони млинови			
	Предња зона, °C	десно, °C	Лево, °C
Блок 1			
Млин 5	375.4	349.9	227.2
Блок 2			
Млин 6	300.9	240.1	302.6

Термограми вентилационог млина су приказани на слици 5.1., а у табели 5.2. су дати резултати измерене температуре по одабраним зонама.



Слика 5.1. Термографски снимци вентилационог млина 5, а) предња зона, б) кота “1 и 0”, лева страна, ц) кота “0”, лева страна.

Мерења су показала да на мерном месту кота 0 канал 1, у мерној зони Ar2, максимална измерена температура износи 375.4 °C. Друга максимална температура је измерена на коти 0 канал 1 бочно у мерној зони Ar2 и њена максимална вредност износи 309.9 °C.

Табела 5.2. Резултати мерења температуре

Мерна зона	кота 0 канал 1
Ar1 Мах. Температуре	262.8 °C
Ar2 Мах. Температуре	375.4 °C
Средња темп. Предња зона	319.4 °C
Мерна зона	кота 0 канал 1 бочно
Ar1 Мах. Температуре	266.2 °C
Ar2 Мах. Температуре	300.9 °C
Средња темп. бочно зона, лево	283.6 °C

Термографска мерења су показала да радни делови вентилационих млинова раде на повишеној температури која је прихватљива али је један од значајних елемената при избору и дефинисању технологија наношења антихабајућих превлака и из тог разлога је треба узети у разматрање.

5.3. Селекција (избор) поступака наношења антихабајућих превлака

Приликом млевења угља долази до хабања радних делова млина, због чега они морају да се после одређеног времена мењају. Експлоатациони радни век ових делова утиче значајно на трошкове експлоатације угља и производњу електричне енергије.

Анализом својстава антихабајућих превлака (слојева) моделних узорак захтеваних карактеристика и радних услова у вентилационом млину, извршен је избор поступка наношења антихабајућих превлака, додатних материјала и технологија наношења на усисне плоче. Наведени елементи који се налазе на излазу из вентилационог млина, изложени су неповољном утицају радног флуида, приближно као и ударне плоче, с тим што ови елементи не врше ротационо кретање, већ су стабилни, и не трпе додатна напрезања услед динамичких оптерећења изазваних ротацијом.

На основу резултата нумеричке симулације струјања око усисних плоча, који су представљени у поглављу 3 и моделних испитивања која су дата у оквиру поглавља 4, извршен је избор технологија наношења антихабајућих превлака. Двадесет усисних плоча са антихабајућим слојевима, од четири различита материјала (додатни материјали) израђених са четири различите технологије (поступци и услови) су уграђене у један вентилациони млин и испитане у експлоатационим условима.

Изабране су две групе поступака за наношење антихабајућих превлака а то су: наваривање и метализација. Приликом избор поступка водило се рачуна о мобилности опреме, брзине наношења слојева и доступној палети додатних материјала.

Поред мерења губитка масе и промене геометрије, изведена је и анализа просечног степена похабаности и процена радног века усисних плоча.

Усисне плоче су израђене од челичног лива GS 36Mn5 према DIN 17204. Добијени резултати указују да челични лив GS-36Mn5 припада групи условно заварљивих челика, који се могу успешно заваривати (наварити) уз примену посебних додатних материјала, предгревања и других мера предострожности. У случају наваривања поред контролисаног термичког циклуса потребно је и наваривање међуслоја. Да би се спречила појава прслина добијање навареног слоја захтеваних својстава (антихабајућа својства), било је потребно одредити такав температурни циклус наваривања, који би обезбедио одређену брзину хлађења споја у температурском интервалу трансформације аустенита и оптимално задржавање изнад A_{c3} температуре. Допуштена максимална брзина хлађења, односно време хлађења $t_{8/5}$, зависи од хемијског састава челика, димензија завареног споја и садржаја водоника у металу шава. На основу анализа приказаних резултата, може се извести закључак да јачина струје заваривања треба да буде у опсегу од 160-200А, јер се тада постижу најмање вредности удела мартензита, тврдоће у ЗУТ-у, и најдуже време хлађења, односно постоји најмања опасност од настајања хладних прслина (поглавље 4).

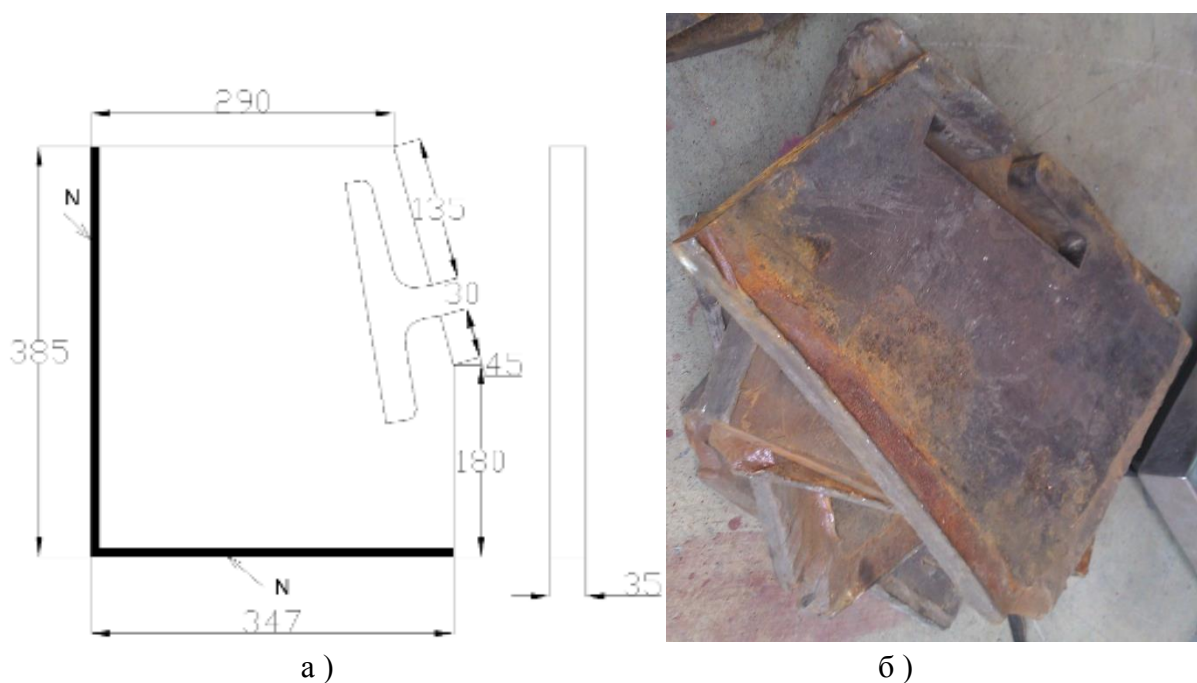
Нумеричка симулација нам је показала смер и нападни угао струјања којим мешавина (честице угља, песак и остале минералне материје) делују на чеоне површине усисних лоча. Нападни угао мешавине је у највећем броју случајева мањи од 20° што је сугерисало примену додатних материјала са већом тврдоћом, односно већом отпорношћу на ерозивно хабање.

У табели 5.3. приказани су додатни материјали, дебљине антихабајућих слојева и поступци наношења истих.

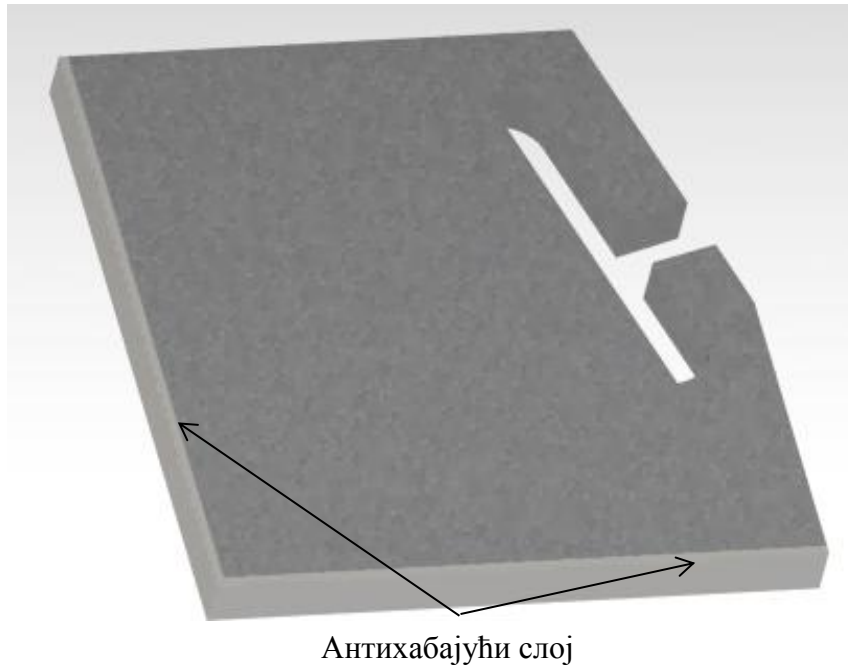
Табела 5.3. Додатни материјали, дебљине и поступци наношења антихабајућих слојева

Додатни материјали	Номинални хемијски састав	Дебљина антихабајућег слоја у mm	Поступак
А, прах	NiCrBSi/WC	3-4	Плазма поступак (ПТА)
Б, прах	FeCrCBNiSi	0.3-0.5	Метализација великим брзинама у струји продуката сагоревања (HVOF)
Г, електрода	Fe- Cr-C- Si	≈ 5	Ручно-електролучно заваривање обложеном електродом (111)
Ђ, жица	Fe-Cr-Nb-Wo-Mo-C	≈ 5	Електролучно заваривање самозаштитном пуњеном жицом (114)

Шематски приказ димензија усисне плоче и изглед усисне плоче пре наношења антихабајућих превлака је дат на слици 5.3. а) и б), док је на слици 5.4. приказан модел усисне плоче са означеним површинама на које се наноси антихабајућа превлака.



Слика 5.3. Шематски приказ димензија усисне плоче (а), изглед усисне плоче (б)



Слика 5.4. Модел уисне плоче са површинама на које је нанесен антихабајући слој

5.4. Наношење антихабајућих превлака на уисне плоче вентилационог млина

У оквиру овог поглавља приказани су начини модификације радних површина уисних плоча наношењем антихабајућих слојева на њих. Дефинисање технологије наношења (поступак, додатни материјали и параметри) изведено је на основу резултата експерименталних испитивања (испитивања без разарања, структурних, механичких) узорак као и испитивања и анализе рада вентилационог млина (мерења похабаности радних делова, нумеричке симулације, термовизијског снимања). Сви ови резултати су приказани у претходним поглављима.

Цео сет уисних плоча у вентилационом млину садржи укупно 35 уисних плоча. За потребе ове дисертације је урађено 20 уисних плоча у односу на цео сет од 35 плоча. На тај начин у вентилационом млину су биле у исто време у експлоатацији плоче са и без антихабајућег слоја.

5.4.1. Наношење антихабајућих превлака поступцима наваривања

Поступци наваривања који су коришћени приликом наношења антихабајућих превлака су: ручно-електролучно заваривање обложеном електродом (111) и електролучно заваривање самозаштитном пуњеном жицом (114). Ови поступци су

коришћени за наношења површинских слојева на металне делове да би се повећала њихова отпорност на абразију, ерозију, удар или генерално неки други облика хабања.

Избор додатног материјала за наваривање је комплекснији у односу на избор материјала за заваривање. Ово је пре свега последица тежње да у случају избора додатног материјала за заваривање метал шава буде што сличнији по својим својствима основном металу. Насупрот томе, код избора додатних материјала за наваривање основни циљ је да се добије наварени слој који ће имати потребну отпорност према присутној доминантној врсти хабања. Да би се постигао овај ефекат користи се међуслој (пуфер слој) који ће смањити степен мешања основног и додатног материјала и омогућити да антихабајући додатни материјал задржи своја прописана својства. У овом случају за међуслој је коришћен додатни материјал на аустенитној основи.

5.4.1.1. Наношење антихабајућег слоја са додатним материјалом Г (Fe- Cr-C- Si) - ручно електролучно заваривање обложеном електродом (111)

Прва група од 5 уписних плоча је израђена поступком ручно-електролучно наваривања обложеном електродом (111) са додатним материјалом Г. Додатни материјал је у облику електроде димензија $\varnothing 4.0 \times 350$ mm. Овај додатни материјал је легура на бази железа Fe-Cr-C-Si. Дебљина нанесеног слоја износи у просеку 4-5mm. Изглед плоча је приказан на сликама 5.5. Да би се постигао што мањи степен мешања коришћен је међуслој (пуфер слој) са додатним материјалом (додатни материјал за заваривање нерђајућих челика) на бази аустенита 18/8/6 је урађен МИГ/МАГ поступком са жицом пречника $\varnothing 1$ mm.

Пре наношења превлака, урађена је припрема површина брушењем. Облога електроде Г је рутилна и изведено је сушење на $150^{\circ}\text{C}/ 2\text{h}$. Предгревање уписних плоча изведено је на 220°C за 22min. Међуслој је урађен МАГ поступком са заштитним гасом 97.5% Ar и 2.5 % CO₂ са протоком од 15 l/min. Просечно време наваривање пуфер слоја (једног пролаза) је 12min. Наваривање међуслоја је изведено Хипер MIG 2500 уређајем. Остали параметри који су коришћени приликом наношења превлака на прву групу уписних плоча приказани су у Таб. 5.4:

Табела 5.4. Параметри наваривања са додатним материјалом Г

Дод. мат.	d	Поступак наваривања	Јачина струје I	Напон U	Положај навара	Број навара	τ_z	τ_u	T_p	T_m
	mm		A	V			/	min		
18/8/6	\varnothing 1.0	МАГ	190-200	25-26	Чеоне површине	1	90	195	210 - 230	170-210
Г	\varnothing 4.0	РЕЛ	165	25-26	Чеоне површине	1	85			

τ_z - Време наношења слојева; τ_u – Укупно време наношења; T_p – Температура предгревања; T_m – Температура међупролаза;

Антихабајући слој се наноси подужним наварима ширине 10mm на чеоне површине усисних плоча. Прво се наноси међуслој (пуфер слој) МАГ поступком са додатним материјалом 18/8/6, а други антихабајући слој је наварен РЕЛ поступком. Дебљина навареног слоја је $\delta_x \approx 4 - 5\text{mm}$. Изглед наварене плоче приказан је на слици 5.9.



Слика 5.5. Изглед наварених усисних плоча са додатним материјалом Г

5.4.1.2. Наношење антихабајућег слоја са додатним материјалом Ђ (Fe-Cr-W-B-Nb-Mo-C) - Електролучно заваривање самозащитном пуњеном жицом (114)

Друга група од 5 уисних плоча је израђена поступком - електролучно наваривање самозащитном пуњеном жицом (114) са додатним материјалом Ђ облику жице $\varnothing 1.6$ mm. Ово је легура на бази железа Fe-Cr-W-B-Nb-C. Дебљина нанесеног слоја је од 4 - 5mm. Изглед плоча је приказан на слици 5.6. Да би се постигао што мањи степен мешања коришћен је међуслој са додатним материјалом на бази аустенита 18/8/6 нанесен МАГ поступком са жицом пречника $\varnothing 1$ mm.

Наваривање антихабајућег и међуслоја је изведено Хупер MIG 2500 уређајем. Пре наношења превлака, урађена је припрема површина брушењем. Урађено је предгревање уисних плоча на 220-280 °C за 18min. Међуслој је урађен МАГ поступком са заштитним гасом 97.5% Ar и 2.5 % CO₂ са протоком од 15 l/min. Просечно време наваривање пуфер слоја (једног пролаза) је 13min. Брзина наваривања је износила $v_z=3$ cm/min. Остали параметри који су коришћени приликом наношења превлака на другу групу уисних плоча приказани су у Таб.5.5:

Табела 5.5. Параметри наваривања са додатним материјалом Ђ

Дод. мат.	d	Поступак наваривања	Јачина струје I	Напон U	Положај навара	Број навара	τ_z	τ_u	T_p	T_m
	mm		A	V			min	min	°C	°C
18/8/6	$\varnothing 1.0$	МАГ	200-220	25-26	Чеоне површине	1	88	195	220	175
Ђ	$\varnothing 1.6$	114	110-120	20-22	Чеоне површине	1	78		-280	-250

τ_z - Време наваривања слојева; τ_u – Укупно време наваривања; T_p – Температура предгревања; T_m – Температура међупролаза;

Подужним наварима ширине 10mm се прекривају чеоне површине уисних плоча. Прво се наноси међуслој МАГ поступком са додатним материјалом 18/8/6 а други слој је наварен РЕЛ поступком са додатним материјалом који има антихабајућа својства. Дебљина навареног слоја је $\delta_x \approx 5$ mm. Изглед наварене плоче приказан је на слици 5.6.



Слика 5.6. Изглед усисне плоче након наваривања са додатним материјалом Ђ

5.4.2. Наношење антихабајућих превлака поступцима метализације

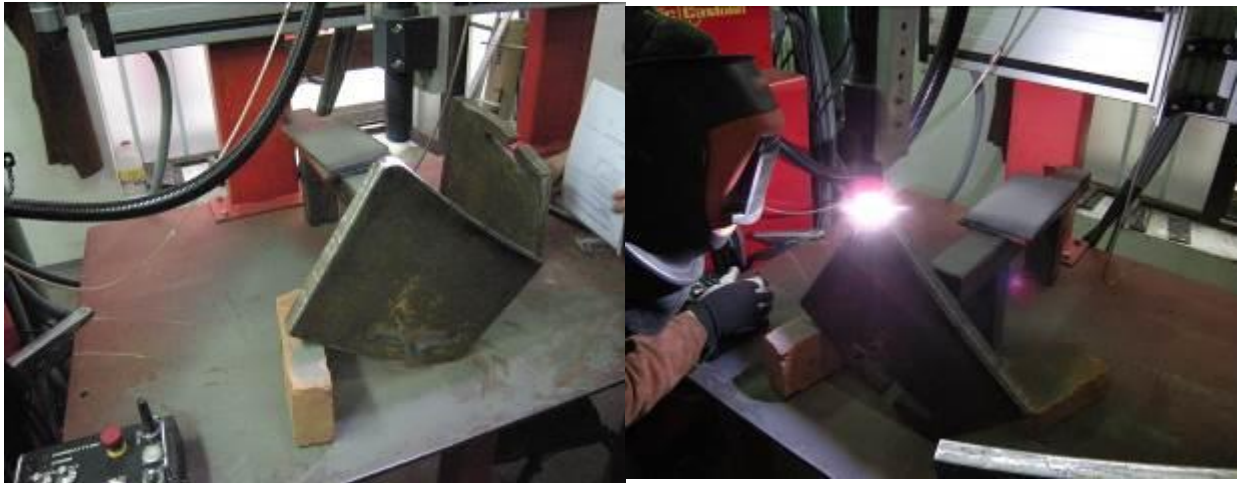
За наношење антихабајућих превлака поступком метализације изабрана су два поступка: плазма поступак (РТА) и HVOF (метализација великим брзинама у струји продуката сагоревања), представљају поступке наношења распршеног материјала у облику ситних честица на површину основног метала, чиме се добија танак и веома отпоран површински слој.

Насупрот наваривању, при наношењу превлака (слојева) метализацијом основни метал се не топи, што елиминише проблем његовог мешања са додатним материјалом. Поред тога, при метализацији су коришћени додатни материјали су у облику праха, што омогућава прецизније подешавање састава превлаке. Поступци метализација се све више користе, како у производњи готових делова, тако и за поправку делимично истрошених делова.

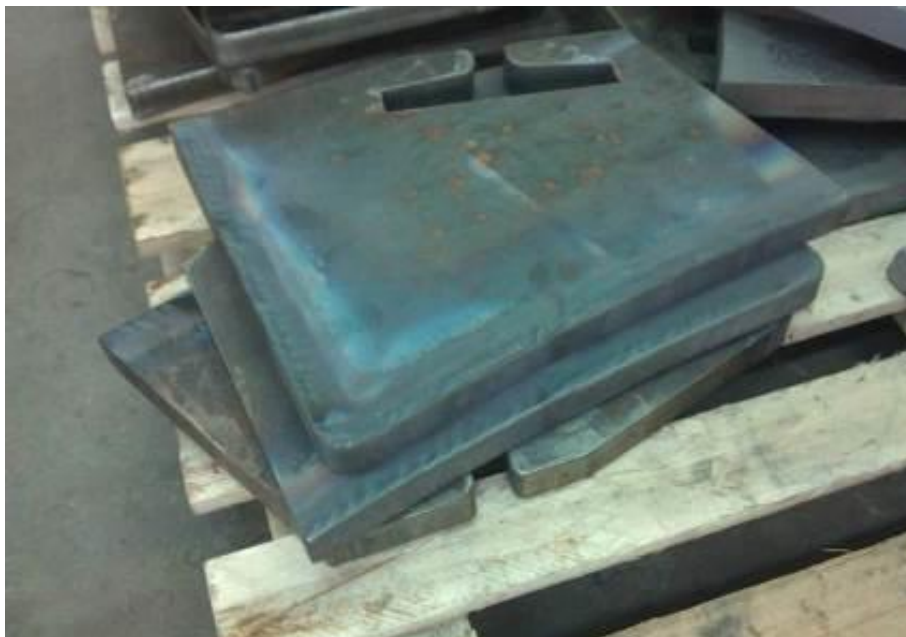
5.4.2.1. Наношење антихабајућег слоја са додатним материјалом А (Ni-Cr-Bo-Si / 60% WC) - плазма поступак

Трећа група од 5 усисних плоча је израђена плазма поступком метализације са додатним материјалом А у облику праха, легура на бази никла Ni-Cr-Bo-Si/60%WC.

Дебљина нанесеног слоја је 3-4mm. Изглед усисних плоча током наношења је приказан на сликама 5.7 а) и б).



а) б)
Слика 5.7. Усисне плоче приликом метализације плазма поступком



Слика 5.8. Изглед усисних плоче након метализације плазма поступком

Наношење антихабајућег слоја је урађено директно на површине усисних плоча на постојећи међуслој. Пре наношења превлака, урађена је припрема површина брушењем. Урађено је предгревање усисних плоча на $220-280^{\circ}\text{C}$ за 22 min. Међуслој је урађен МАГ поступком са заштитним гасом 97.5% Ar и 2.5 % CO_2 са протоком од 15 l/min. Просечно време наваривање пуфер слоја (једног пролаза) је 13min. Брзина заваривања је износила $v_z=3$ cm/min. Остали параметри који су коришћени приликом наношења превлака на трећу групу усисних плоча приказани су у таб.5.6.:

Табела 5.6. Параметри наваривања са додатним материјалом А

Дод. мат.	Дим. Дод. Мат.	Поступак наваривања	Јачина струје I	Напон U	Положај навара	Број навара	τ_z	τ_u	T_p	T_m
			A	V			min	min	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
A	прах	15	50-60	25-28	Чеоње површине	1	78	195	220 - 280	175 - 250

τ_z - Време наваривања слојева; τ_u – Укупно време наваривања; T_p – Температура предгревања; T_m – Температура међупролаза;

Наношење превлаке је изведено њихањем у једном слоју, а затим претапањем превлаке у циљу уклањања насталих грешака. Дебљина слоја је ~ 4 mm осим на врху где је 6-7 mm. Изглед усисне плоче након нанесене антихабајуће превлаке је приказан на слици 5.8.

5.4.2.2. Наношење антихабајућег слоја са додатним материјалом Б (FeCrCBNiSi) - HVOF поступком

Четврта група од 5 усисних плоча је израђена поступком хладне метализације HVOF (метализација великим брзинама у струји продуката сагоревања) са додатним материјалом Б у прашкастом стању, легура на бази FeCrCBNiSi. Дебљина нанесеног слоја је 0.3-0.5mm. Изглед плоча и поступак металације је приказан на сликама 5.9. а) и б).

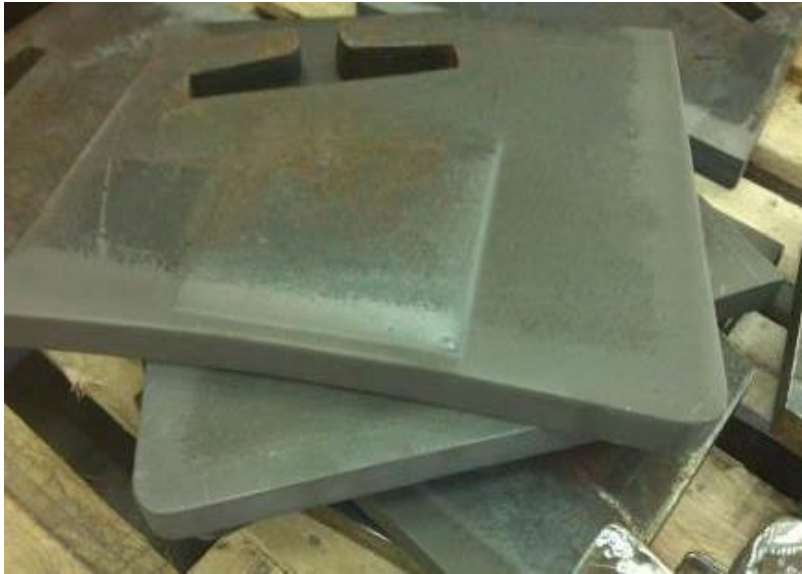


а)



б)

Слика 5.9. Усисне плоче приликом металације- металација великим брзинама у струји продуката сагоревања - HVOF поступком



Слика 5.10. Изглед усисних плоче након HVOF метализације

Наношење антихабајућег слоја је изведено директно на површине усисних плоча без међуслоја. Пре наношења превлака, урађена је припрема површина брушењем. Изведено је предгревање усисних плоча на 230-270 °C за 18 min. Мешавина горивих гасова која је коришћена за метализацију: керозин 380 ml/min, кисеоник 845 l/min и азот 9.9 l/min. Остали параметри који су коришћени приликом наношења превлака на прву групу усисних плоча приказани су у Таб.5.7.:

Табела 5.7. Параметри наваривања са додатним материјалом Б

Дод. мат.	Дим. Дод. Мат.	Поступак наношења	Притисак гаса	Темп. гаса	Положај навара	V_z	V_u	T_p	T_m
			bar	°C					
Б	прах	HVOF	15	250	Чеоно површине	125 4	70	230 - 270	135 - 180

V_z – Брзина кретања честица; V_u – Брзина наношења честица; T_p – Температура предгревања; T_m – Температура међупролаза;

Превлака се наноси у 30 слојева по чеоној површини и то њихањем у правцу у-осе. Просечна дебљина слоја је ~ 0.3-0.5 mm. Изглед усисних плоча након нанесене антихабајуће превлаке је приказан на слици 5.10.

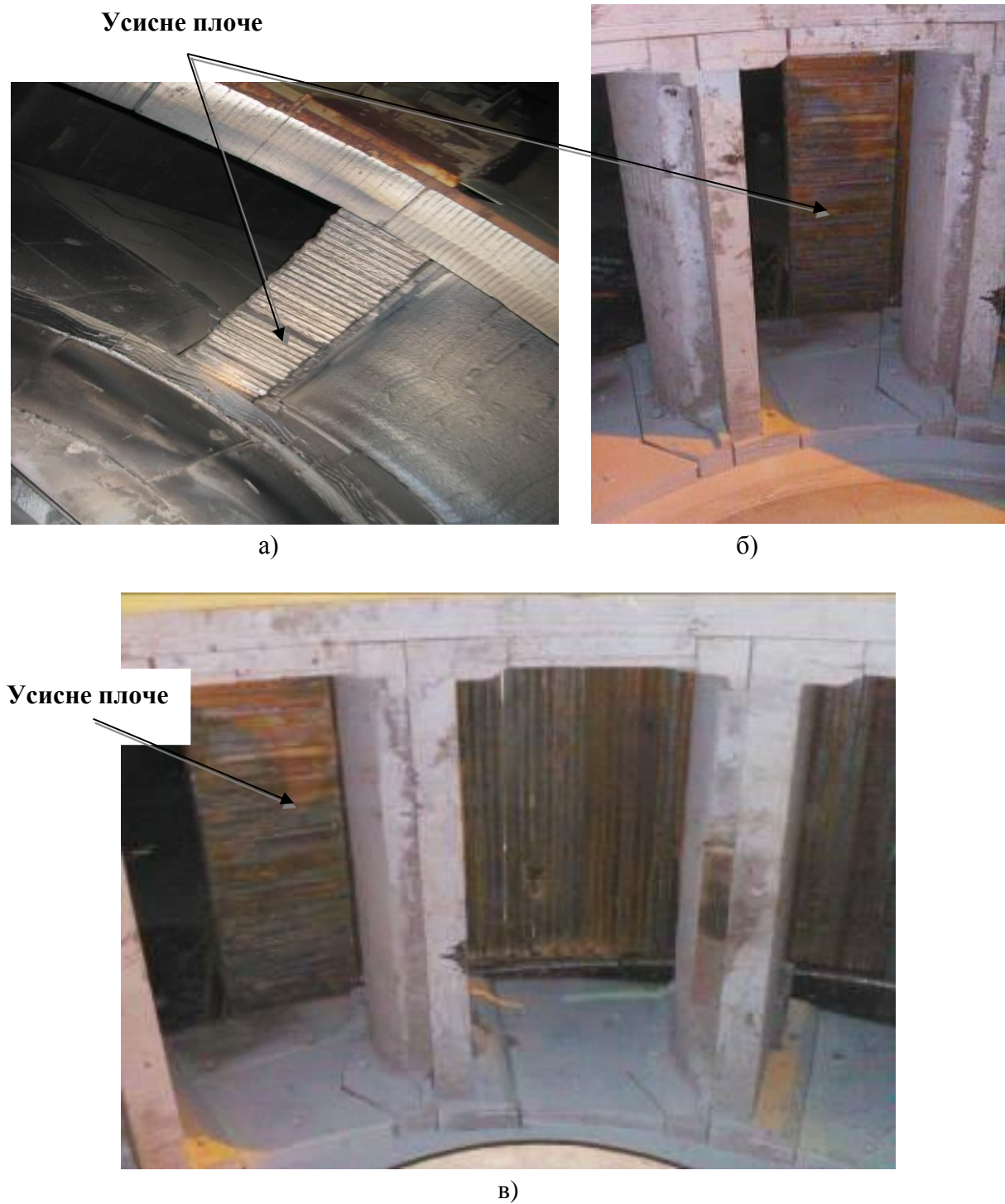
5.5. Уградња усисних плоча у вентилациони млин

Након наношења антихабајућих превлака на усисне плоче, извршена је њихова уградња и експлоатационо испитивање. Уградња усисних плоча представља сложен процес из неколико разлога. Наиме, уградња је могућа тек приликом ремонта целог вентилационог млина, јер би непланско заустављање рада млина било неизводљиво а последице би се огледале у економским разлозима било би превише скупоцено да се производња на једном млину комплетно прекине на пар сати или читав један дан. Из ових разлога је морало да се координише, у сваком тренутку и током свих анализа, као и предлога појединих решења, са техничком службом одржавања термоелектране Костолац Б. То је отежавало испитивање и успоравало сам процес истраживања, јер није било могуће радити анализу и примењивати предложена решења у сваком тренутку. Заправо, рад млина је диктирао динамику овог истраживања. Услови експлоатационих испитивања, предлози и планови, су такође договорани са службом одржавања. Првобитни план је био да време рада усисних плоча остане уобичајено од 1400-1700 радних сати. Након тог времена усисне плоче би се демонтирале без обзира на њихово стање. Извела би се анализа стања усисних плоча и упоредило стање плоча са модификованом радном површином (плоче са антихабајућим слојем) и постојећих плоча, које су до тог тренутка биле у употреби у млину и постизале максимални радни век од 1400 до 1700 сати рада.

Уградња и испитивање усисних плоча је изведено на вентилационом млину блока 1. Сет од 20 усисних плоча са нанесеним антихабајућим слојем је уграђен у исти вентилациони млин. Приликом дефинисања тока испитивања водило се рачуна о најповољнијим условима, а то су да све усисне плоче са антихабајућим превлакама раде у истим експлоатационим условима. Цео сет усисних плоча за један вентилациони млин се састоји од 35 плоча. Поред плоча са антихабајућим превлакама постављено је и 15 оригиналних усисних плоча без антихабајућег слоја. На овај начин би било могуће оценити понашање плоча са, као и оних без превлака, приликом рада у истим условима, у истом временском интервалу, приликом истих оптерећења, истовременим испитивањем.

Резултати функционалних испитивања, детаљно су приказани и описани у овом поглављу докторске дисертације. Ти резултати недвосмислено указују на предности предложеног решења и потврђују очекивања овог истраживања о побољшању радног

века испитиваних делова, као и доприносу истраживања приказаних у овој докторској дисертацији. На слици 5.11. је приказан изглед и положај уграђених усисних плоча у вентилационом млину, спремних за испитивање у експлоатационим условима.



Слика 5.11. Уграђене усисне плоче у вентилациони млин пре испитивања у експлоатационим условима

5.6. Анализа губитка масе усисних плоча

На усисним плочама са и без антихабајућег слоја (превлаке), које су биле у експлоатацији 1440 h, односно 1550h изведена је масена и димензиона анализа.

При ванредном застоју млина, узрокованом кваром на некој другој компоненти, установљено је да се због прекомерног оштећења, један део усисних плоча мора заменити (1440h) а да преостале плоче могу остати у експлоатацији до планираног времена од 1550h.

Након експлоатације извршен је визуелни преглед и одговарајућа мерења плоча. На слици 5.12. приказан је изглед сета носних плоча након експлоатације.



Слика 5.12. Изглед усисних плоча са нанесеним антихабајућим слојем након експлоатације

Изведена мерења су укључивала визуелни преглед и одговарајућа мерења (мерење масених и димензионих губитака и геометрије) усисних плоча. Плоче су подељене у две групе (I и II) на основу експлоатационог времена, група I са додатним материјалима А и Б након експлоатације од 1550h и група II са додатним материјалима Г и Ђ након експлоатације од 1440h. Масе плоча су измерене на калибрисаној ваги са прецизношћу мерења од 0.001 kg. На слици од 5.13. приказан је изглед неких од похабаних плоча, а у табели 5.8. дате су средње вредности масе плоча пре експлоатације $Q_{0sr.}$, $Q_{1sr.}$ и после експлоатације $Q_{2sr.}$, апсолутни и релативни губитак масе, релативан губитак масе сведен на основну масу плоче ($Q_{3sr.}$, $R_{sr.}$, R_{1sr}) и брзина хабања ($m_{sr.}$).



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Слика 5.13. Изглед усисних плоча након експлоатације а) Група I додатни материјал А изглед после 1550 h, б) Група I додатни материјал Б изглед после 1550h, в) и г) Група II додатни материјал Г изглед после 1440h, д) и е) Група II додатни материјал Ђ изглед после 1440h

Табела 5.8. Резултати мерења масе уисних плоча пре и после експлоатације од $\tau = 1550/1440$ часова на млину 5

Ознаке плоча група (дод. мат.)	Q_{0sr}, kg	Q_{1sr}, kg	Q_{2sr}, kg	Q_{3sr}, kg ($Q_1 - Q_2$)	R, %	$R_1, %$	$Q_{3,0i} [kg]$	$\dot{m}_{sr}, 10^{-4} kg/h$
Основна плоча (G36Mn5)	27.000	27.000	25.947	1.053	3.90	3.90	1.053	7.313
I (А)	26.275	27.006	25.950	1.056	3.91	1.24	1.756	6.810
I (Б)	26.220	26.303	25.360	0.943	3.58	3.29	1.132	6.080
II (Г)	26.700	28.100	27.257	0.843	3.00	3.00	2.441	5.854
II (Ђ)	26.750	28.250	27.798	0.452	1.60	1.60	2.543	3.139

Коришћене ознаке из табеле:

Q_{0sr} – основна тежина уисне плоче (сваки сет уисних плоча се састоји од 5 комада и овде је дата њихова просечна тежина)

Q_{1sr} – тежина уисне плоче пре експлоатације (нанесен антихабајући слој);

Q_{2sr} – тежина уисне плоче после експлоатације;

Q_{3sr} – апсолутни губитак тежине уисне плоче;

R – процентуални губитак тежине;

R_1 – процентуални губитак у односу на основну масу уисних плоча.

\dot{m}_{sr} – брзина хабања

$\tau_1 = 1440$ h и $\tau_2 = 1550$ h

Начин на који се израчунавају неки од параметара у табели 5.8.:

R_1 се израчунава на следећи начин:

Q_h - тежина нанетог хабајућег слоја= $Q_{1sr} - Q_{0sr}$

Q_4 -тежина похабаног основног материјала= $Q_{3sr} - Q_h$

$R_1 = Q_4 / Q_0 \times 100$ (%)

$\dot{m}_{sr} = \frac{Q_3}{\tau_1}$ [kg/h]- средња брзина губитка масе плоча током периода експлоатације

$$Q_{3,0i} = 0,04 \cdot Q_{1,0} + (Q_{1,i} - Q_{1,0}) \text{ [kg]}$$

У табели 5.8. су приказани резултати мерења масе усисних плоча пре и након експлоатационог испитивања. Приказане вредности у табели 5.8. су средња вредност масе плоча у једној групи (просечна тежина од пет усисних плоча са антихабајућим слојем и 15 плоча без нанесеног антихабајућег слоја).

На основу времена проведеног у експлоатацији плоче су подељене у групе I и II, са тим да је група I (додатни материјали А и Б) била у експлоатацији 1550 h док је група II (додатни материјали Г и Ђ) била у експлоатацији 1440h.

Део плоча групе II са додатним материјалом Г су извађене из кућишта вентилационог млина због бочног поткопавања антихабајућег слоја. До бочног поткопавања је дошло зато што су се плоче са додатним материјалом Г налазиле поред постојећих плоча без антихабајућег слоја, које су се знатно више похабале и на основу тога су бочне стране усисних плоча са додатним материјалом Г биле изложене интензивнијем хабању бочних страница. Ова појава је такође примећена код још једне групе усисних плоча.

Усисне плоче групе II са антихабајућим слојевима Г и Ђ су извађене из експлоатације након 1550h, без обзира што је дошло до минималног губитка геометрије након визуелне контроле. На вентилационом млину је након овог периода рада због редовног ремонта изведена комплетна замена свих радних делова без обзира на њихово стање.

На основу анализе података из табеле 5.8. очигледно је да се тежина основних плоча, без нанесеног антихабајућег слоја креће између 26-27 kg. Тежина нанесеног антихабајућег слоја се разликује од групе до групе и креће се од минималних 90g за додатни материјал са ознаком Б до 1.5 kg за додатни материјал са ознаком Ђ. Приказане величине представљају просечну вредност свих параметара за сваку групу плоча са антихабајућим слојевима. Ове вредности за плоче са и без антихабајућег слоја су дате у табели 5.8. у колонама Q_{0sr} и Q_{1sr}

Након експлоатације урађена су мерења тежина усисних плоча по групама и у табели 5.6. у колони Q_{2cp} су дате тежине плоча након експлоатације и њихови масени губици (у односу на тежину плоча са антихабајућим слојем) Q_{3cp} . Најмањи губитак тежине су показале усисне плоче са антихабајућим слојем од додатног материјала Ђ и

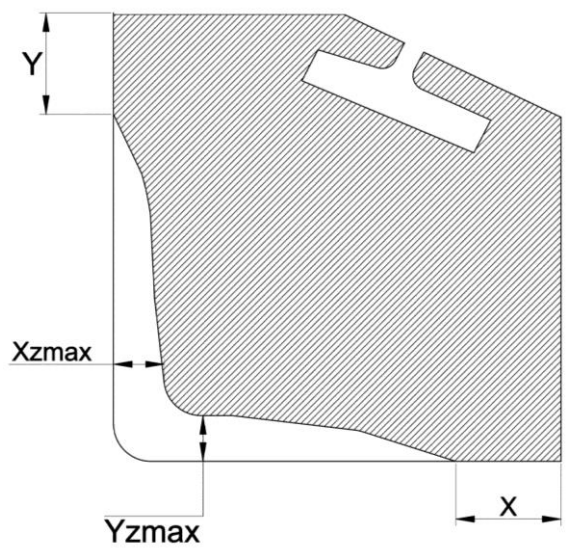
он износи 0.452kg. Усисне плоче са додатним материјалом Б имају губитак тежине од 0.943kg док је тежина нанесеног слоја износила око 90g. Масени губитак усисне плоче са додатним материјалом А је веома близу губитка основне плоче без антихабајућег слоја, од 1.053 kg. На ово је свакако утицало бочно поткопавање неких плоча из ове групе, што је претходно објашњено. Плоче са антихабајућим слојевима од додатних материјала Г и Ђ су показали мале масене губитке.

Процентуални губитак масе плоча је изражен као P – процентуални губитак укупне тежине основне плоче и хабајућег слоја и R_1 – процентуални губитак у односу на основну масу усисних плоча (Таб.5.8.). Анализом резултата може се закључити да најмањи процентуални губитак масе имају усисне плоче са нанесеним антихабајућим слојем Г од 3.0% и Ђ од 1.6%, док усисне плоче са додатним материјалом В имају већи масени губитак 3.58% односно 3.29%. Насупрот томе, код плоче са додатним материјалом А процентуални губитак R_1 је знатно мањи од R због појаве поткопавања основне плоче, што је у претходно наведено.

У табели 5.8. у последњој колони је дата вредност брзине губитка масе усисних плоча у $kg/h \times 10^{-3}$. Анализом вредности из табеле може се закључити да додатни материјали Г и Ђ имају најмањи масени губитак.

5.7. Анализа губитка геометрије усисних плоча вентилационог млина

Шематски приказ димензионих параметара хабања основних усисних плоча, након експлоатације су приказани на слици 5.14.



Слика 5.14. Шематски приказ мерења зона хабања основне усисне плоче

На слици су приказане зоне мерења и параметри X_{Zmax} и Y_{Zmax} који представљају димензија максималног хабања усисних плоча. Анализиране су обе групе усисних плоча I и II. Свака анализирана група плоча има карактеристична оштећења.

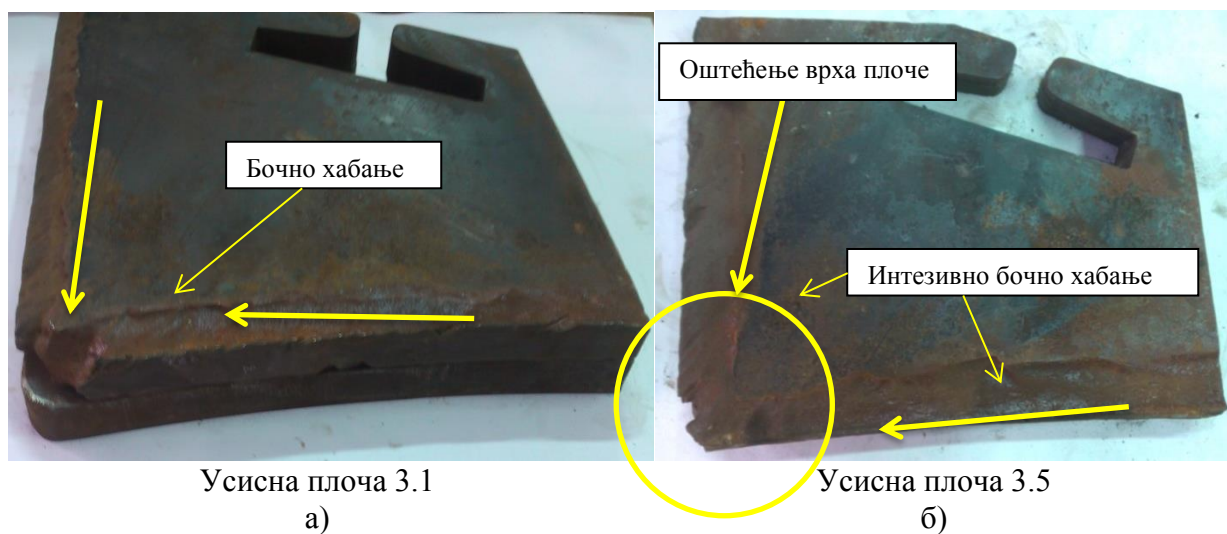
5.7.1. Анализа усисних плоча са нанесеним антихабајућим материјалом А (Ni-Cr-Bo-Si / 60% WC)

Усисне плоче из групе I са антихабајућим слојем од додатног материјала А имају своја карактеристична оштећења. Плоче су означене бројевима од 3.1. до 3.5. Код плоча ове групе присутно је интензивно обострано бочно хабање са врло малим хабањем нанесеног хабајућег слоја (сл. 5.15. и Таб. 5.9.). Наведена појава је последица монтаже плоча са и без антихабајућег слоја у истом сету од 35 плоча.

Поред тога очигледно је знатно оштећење врха плоче које се може видети на слици 5.15. а) и б). Код плоче 3.4 присутно је знатно мање бочно хабање без оштећења врха плоче (Табела 5.9.). Код плоче 3.5 присутно је значајно хабање само на једној страни као и оштећење врха плоче.

Табела 5.9. Похабаност усисних плоча групе I (са додатним материјалом А)

Ознака Плоче (Група I)	Y, mm	Xzmax, mm	X, mm	Yzmax, mm	Xmin, mm	Ymin, mm
3.1	0	27	0	28	15	21
3.2	0	27	0	24	11	20
3.3	0	20	0	17	10	10
3.4	0	10	80	18	7	1
3.5	0	42	0	44	27	27

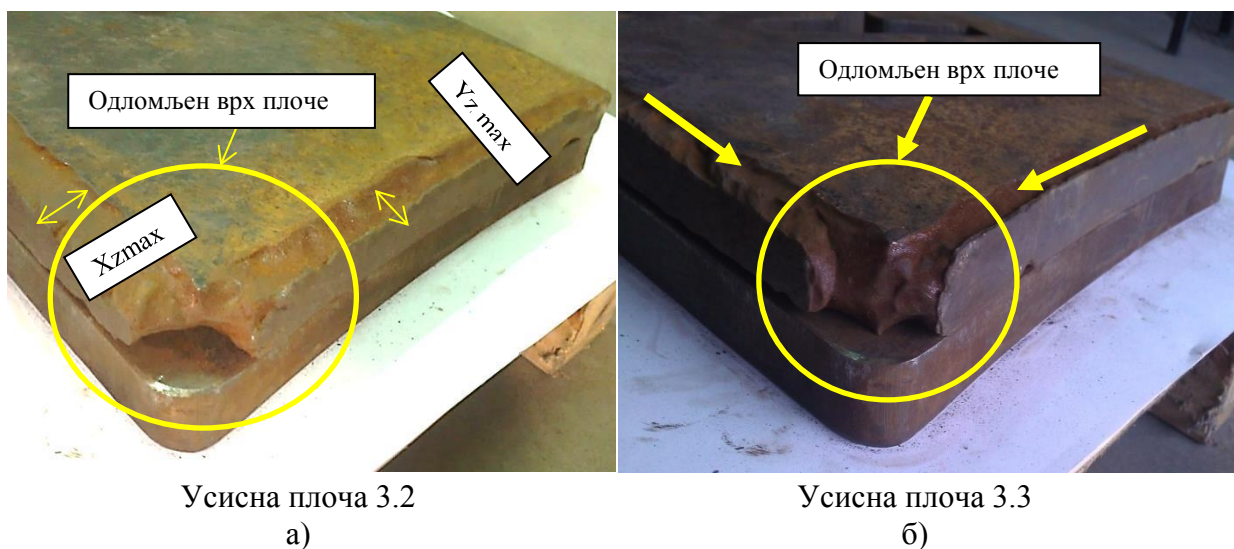


Слика 5.15. Усисне плоче са нанесеним антихабајућим слојем, додатним материјалом А након експлоатације

Карактеристична оштећења плоча са нанесеним антихабајућим додатним материјалом А су приказана на слици 5.16. Знатно оштећење врха плоче је приказано на сликама 5.16. а) и б) где је очигледно одламање врха плоче. Насупрот томе, на чеоним површинама плоча присутно је мало оштећење антихабајућег слоја. До оштећења врха плоча могло је да дође због више фактора, од којих је један структура метала, узрокована неповољним условима наношења слоја.

Поред тога, битан утицај на лом врха плоче има и бочно хабање усисних плоча. Анализом хабања бочних ивица, очигледно је да је струја смеше ушла са задње стране усисне плоче и кретала се ка врху плоче, што је приказано на слици 5.19. а) и б) жутим стрелицама. Претпоставља се да је ова врста хабања, која није карактеристична за све усисне плоче из ове групе, настала због положаја плоча у сету.

Измерене вредности Xz_{max} и Yz_{max} не представљају вредности губитка целе геометрије усисних плоча из ове групе. Вредности које су приказане у табели 5.9. представљају само дубину бочног хабања, као што је приказано на слици 5.16. а). Највеће оштећење има плоча 3.5., 42 и 44 mm, а најмање плоча 3.4.



Слика 5.16. Карактеристична оштећења плоча групе I (са додатним материјалом А)

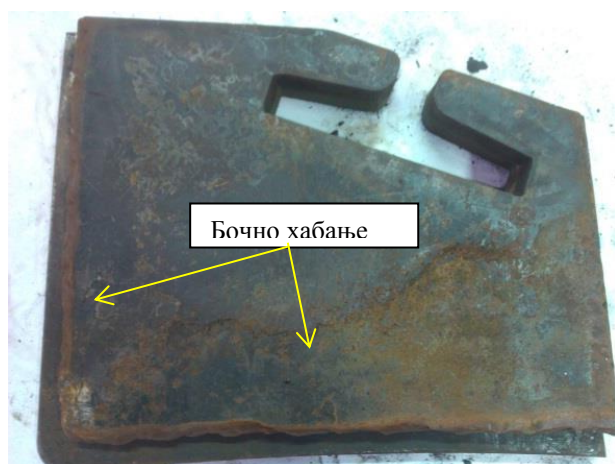
5.7.2. Анализа усисних плоча са нанесеним антихабајућим материјалом Б (FeCrCBNiSi)

Код свих плоча групе II (са додатним материјалом Б) присутно је интензивно и релативно равномерно хабање чеоних површина. Антихабајући слој је у потпуности

одстрањен са чеоних површина, и очигледно је велико хабање основног материјала. На плочама 1.2. и 1.4. присутно је благо бочно хабање, што је и приказано на слици 5.17 а) и б), вероватно узроковано лошим налегањем плоче у сету. Код плоче 1.1 на слици 5.18. а) присутно је мало бочно хабање и велики губитак основног материјала са чеоних површина. Код плоче 1.2 присутно је чеоно хабање и благо оштећење врха плоче што је и приказано на слици 5.17. а). Интензивно чеоно хабање са оштећењем врха је присутно код плоче 1.3 на слици 5.18. б). Поред тога, код ове плоче чеоне површине су равномерно похабане и на њима скоро нема антихабајућег слоја са знатним хабањем основног материјала. Усисна плоча 1.5 има равномерно хабање чеоних површина. Такође код ове плоче је примећено и мање бочно хабање.

Табела 5.10. Похабаност усисних плоча групе I (са додатним материјалом Б)

Ознаке плоча (Група I)	Y, mm	Xzmax, mm	X, mm	Yzmax, mm	Xmin, mm	Ymin, mm
1.1	0	30	0	20	16	16
1.2	0	29	0	34	18	20
1.3	0	28	0	33	12	15
1.4	0	32	0	32	19	19
1.5	0	34	0	27	21	18



Усисна плоча 1.2
а)



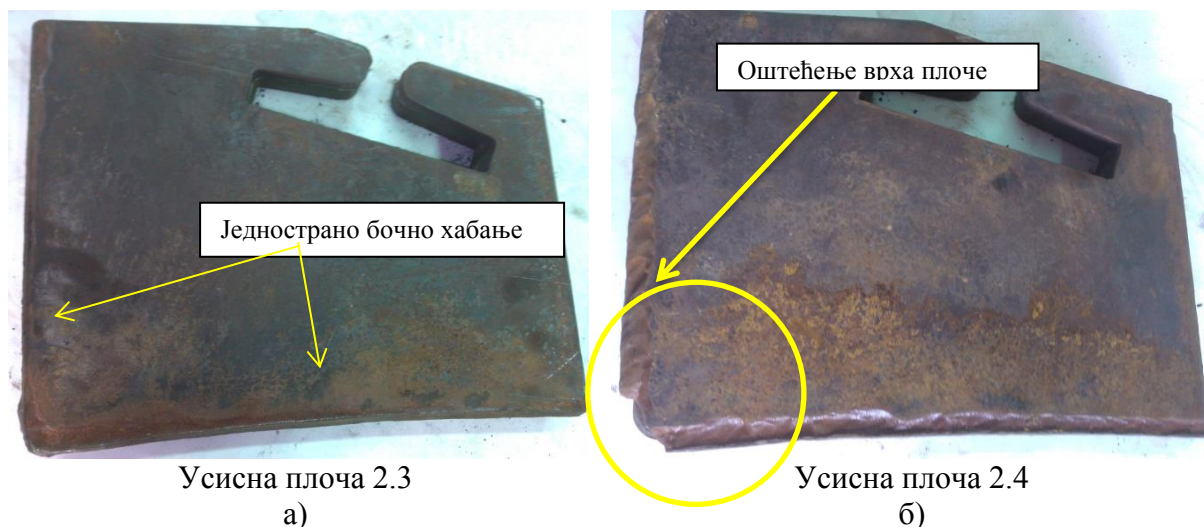
Усисна плоча 1.4
б)

Слика 5.17. Усисне плоче са нанесеним антихабајућим слојем, додатним материјалом Б након експлоатације

Генерално, код свих плоча присутан је потпун губитак антихабајућег слоја (чеоне стране). До значајног губитка антихабајућег слоја је дошло и због тога што је, у односу на остале плоче, веома мале дебљине. Оштећење врхова плоча узроковано је неодговарајућим налегањем у сету, као и неповољном структуром антихабајућег слоја.

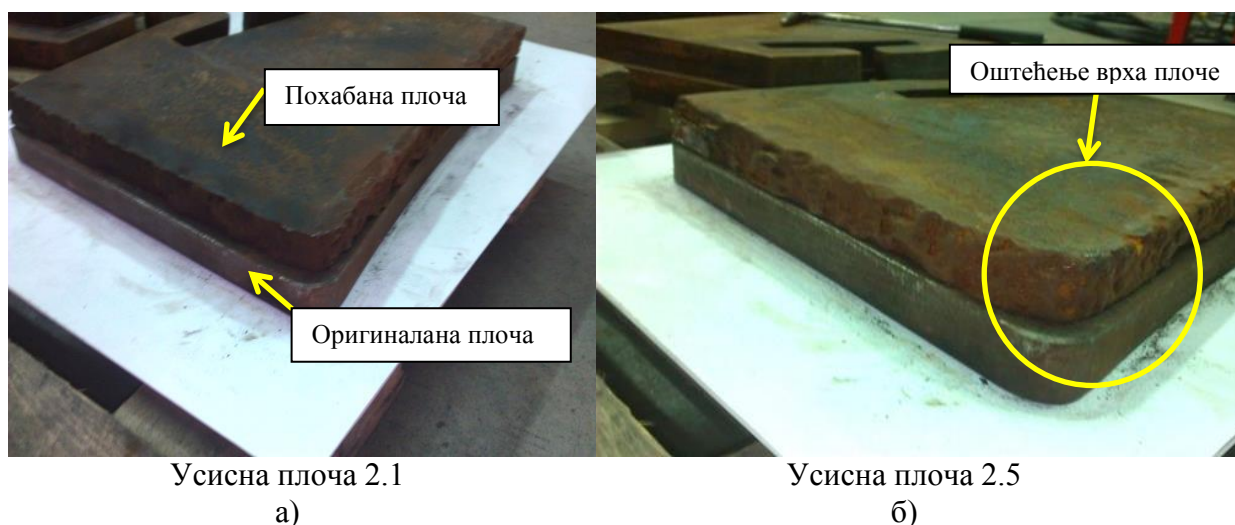
Табела 5.11. Похабаност усисних плоча групе II (са додатним материјалом Г)

Ознаке плоча (Група II)	Y, mm	Xzmax, mm	X, mm	Yzmax, mm	Xmin, mm	Ymin, mm
2.1	0	9	20	6	3	1
2.2	0	14	0	10	2	2
2.3	0	10	0	5	2	2
2.4	0	10	0	10	2	2
2.5	0	12	0	11	2	3



Слика 5.19. Усисне плоче са нанесеним антихабајућим слојем, додатним материјалом Г након експлоатације

Детаљнија оштећења усисних плоча ове групе су приказана на слици 5.20. Код свих плоча присутно је хабање антихабајућег слоја (чеоне стране), али без потпуног одстрањивања истог, што је и приказано на слици 5.20. а). Детаљ оштећење врха плоче је приказано на сликама 5.20. б). Оштећење врхова плоча узроковано је неповољном структуром антихабајућег слоја као и неодговарајућим налегањем у сету.



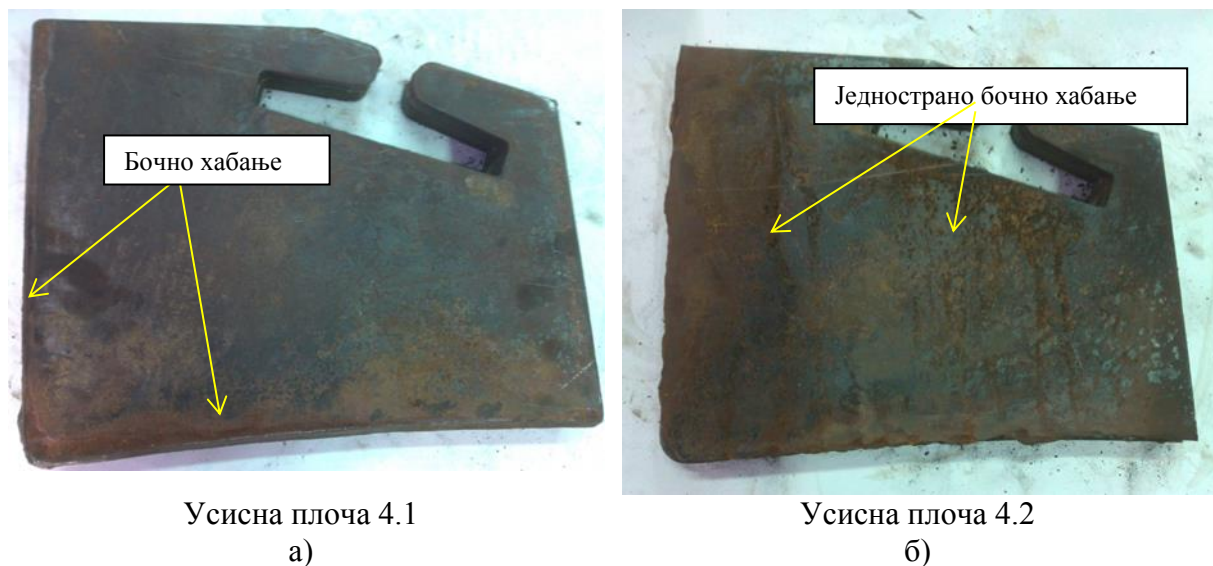
Слика 5.20. Карактеристична оштећења плоча групе II (са додатним материјалом Г)

5.7.4. Анализа усисних плоча са нанесеним антихабајућим материјалом Ђ (Fe-Cr-W-B-Nb-Mo-C)

Код свих плоча групе II (са додатним материјалом Ђ) присутно је веома мало хабање нанесеног антихабајућег слоја, сл. 5.21. а) и б). Поред тога, приметно је и мање бочно хабање и оштећење врха плоче. Код плоче 4.4 присутно је мање бочно хабање без оштећења врха плоче са једне стране док је са друге стране дошло до значајног бочног оштећења усисне плоче. Код плоче 4.5 присутно је мање хабање антихабајућег слоја.

Табела 5.12. Похабаност усисних плоча групе II (са додатним материјалом Ђ)

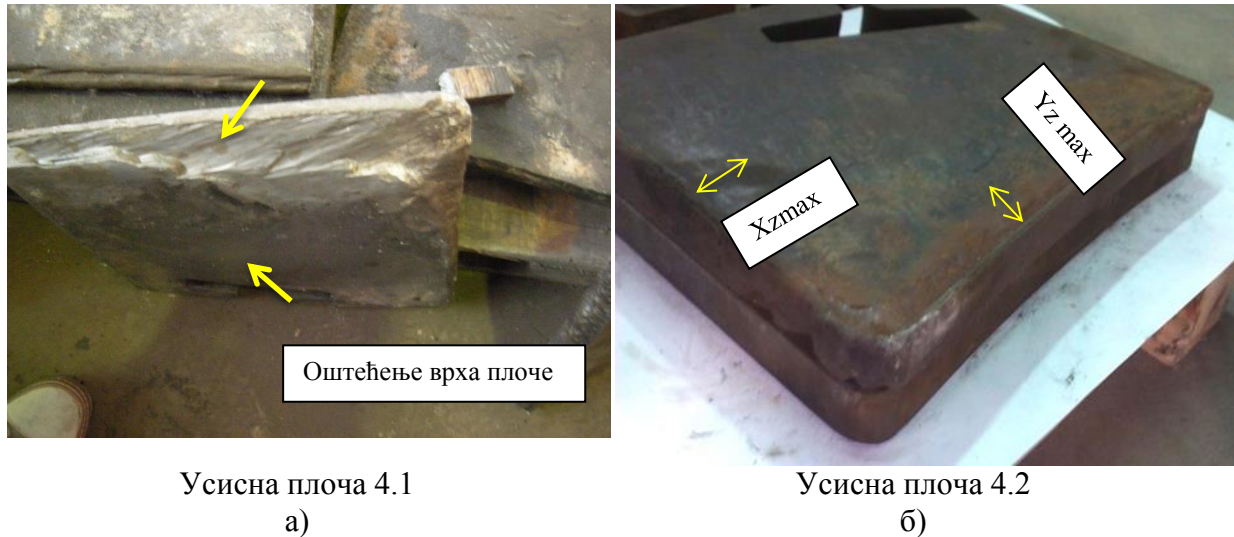
Ознаке плоча (Група II)	Y, mm	Xzmax, mm	X, mm	Yzmax, mm	Xmin, mm	Ymin, mm
4.1	0	14	0	12	11	12
4.2	0	12	0	13	13	10
4.3	0	12	0	15	10	11
4.4	0	15	0	72	9	14
4.5	0	12	0	13	10	9



Слика 5.21. Усисне плоче са нанесеним антихабајућим слојем, додатним материјалом Ђ након експлоатације

Карактеристична оштећења плоча са нанесеним антихабајућим додатним материјалом Ђ су приказана на слици 5.22. Генерално, антихабајући слој је остао већим делом неоштећен на чеоним површинама усисних плоча. Знатно оштећење врха плоче је приказано на сликама 5.22. а), где је запажено и хабање бочне стране плоче.

Вредности које су приказане у табели 5.12. представљају дубину бочног хабања, као што је приказано на слици 5.22. б). Највеће оштећење има плоча 4.4 са 15 и 72 mm. Степен похабаности свих осталих плоча је уједначен, без губитка антихабајућег слоја и губитка геометрије плоча.



Слика 5.22. Карактеристична оштећења плоча групе II (са додатним материјалом Ђ)

5.8. Анализа промене очекиваног века трајања усисних плоча

5.8.1. Процена века трајања усисних плоча

При мљењу угља долази до хабања челичних радних делова млина, због чега они морају да се после одређеног времена мењају поготово ако су поред угља присутне и друге минералне материје, које неповољно утичу на радни век делова. Век експлоатације ових делова утиче значајно на трошкове експлоатације угља.

Усисне плоче су један од веома битних делова вентилационог млина, од чијег радног века зависи пре свега време непрекидног рада млина и остваривање захтеваног вентилационог дејства. Оне се налазе на излазу из вентилационог млина ка каналу аеросмеше. Наведене компоненте изложене су неповољном утицају радног флуида, као што су ерозија, абразија и повишена температура. Насупрот ударним плочама, ови елементи нису изложени динамичким оптерећењима која су изазвана ротацијом.

Век трајања усисних плоча, односно време између две промене ударног кола, се може одредити на основу следећег израза [54,55]:

$$\tau = k_r \ln \frac{D_1^{0,45}}{0,24} \quad (5.1)$$

где су:

k_r - коефицијент који зависи од абразивности мешавина и материјала ударних тела
 D_1 [m] - спољни пречник ударног кола.

5.8.2. Прорачун века трајања усисних плоча од основног материјала

На основу расположивих података о заменама радних елемената вентилационог млина Костолац Б (Таб. 5.13.), могуће је извршити процену века трајања усисних плоча на основу статистичке анализе узорка, према следећој методологији. С обзиром да је коефицијент k_r , који обухвата утицај карактеристика материјала радних елемената и радног флуида, директно пропорционалан веку трајања радних елемената, средњи век трајања одређен непосредно као аритметичка средина емпиријских података, је идентичан веку трајања који се добија применом израза (5.1). Овај резултат омогућава да век трајања носних плоча буде одређен непосредно као аритметичка средина узорка приказаног у Табели 5.13.

Табела 5.13. Емпиријски подаци стварног радног века елемената вентилационог млина Костолац Б.

Број мерења	1	2	3	4	5	6	7	8
Радни век усисних плоча ($\tau_{2,3}$)	2600	2680	2750	2820	2910	3050	3080	3120
k_r	549,03	608,9	678,8	718,72	783,61	816,06	868,46	923,37

Трансформацијом израза (5.1) може се за задати век трајања радних плоча, израчунати непознати коефицијент k_r .

$$k_r = \frac{\tau}{\ln \frac{D_1^{0,45}}{0,24}} \quad (5.2)$$

Најмања и највећа вредност узорка није узета у даље разматрање, тако да се коефицијент k_r може одредити као аритметичка средња вредност на узорку од 8 мерења (Табела 5.13).

$$k_{r,sr} = \frac{\sum_{i=1}^8 k_i}{8} = 743,37$$

Усваја се израчунати средњи коефицијент $k_r=743,37$ за даљи прорачун.

Време између две замене (процењени век трајања) усисних плоча, на основу израза (5.1), а за израчунату и усвојену средњу вредност коефицијента k_r , износи:

$$\tau_{sr2,3} = \frac{\sum_{i=1}^8 \tau_{i2,3}}{8} = 2876,25 \text{ h}$$

Вредност средњег радног века усисних плоча може бити одређена непосредно, као аритметичка средина расположивих експлоатационих података о веку трајања усисних плоча приказаних у Табели 5.13. Средњи век трајања усисних плоча одређен као средња вредност радног века је идентичан резултату добијеном на основу израза (5.3). Такав резултат је очекиван, с обзиром да су величине τ и k_r директно пропорционалне и међусобно линеарно зависне.

Уколико се претпостави да је вредност експлоатационог века радних елемената млина расподељена сагласно нормалној (Гаусовој) расподели на посматраном узорку, тада се стандардна девијација (интервал поверења), може одредити на основу следећег израза [4,5].

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (\tau_i - \tau_{sr})^2} \quad (5.3)$$

Овако одређен интервал поверења σ представља средње расипање измерених вредности века трајања усисних плоча τ_i око аритметичке средине τ_{sr} .

На основу израза (5.3) и експлоатационим подацима радног века усисних плоча, приказаних у табели 5.13. средње квадратно одступање (стандардна девијација) посматраног узорка износи:

$$\sigma_{2,3} = 182,4 \text{ h}$$

Процењени век трајања усисних плоча вентилационог млина Костолац Б, израђених од челика GS-36Mn5, без антихабајућег слоја, на основу извршених прорачуна, са вероватноћом 68,2%, износи:

$$\tau_{2,3} = \tau_{sr2,3} \pm \sigma_{2,3} = (2876,25 \pm 182,4) \text{ h} \quad (5.4)$$

5.8.3. Анализа промене очекиваног века трајања усисних плоча у зависности од карактеристика материјала антихабајућег слоја у односу на основни материјал GS-36Mn5

Промена масе усисних плоча вентилационог млина Костолац Б проузрокована хабањем током периода експлоатације, односно „губитак“ масе усисних плоча у апсолутном износу, у зависности од врсте додатног материјала антихабајућег слоја је приказан у Табели 5.14. колона Q_{3i} .

Период након кога је вршена замена усисних плоча у млину је $\tau_1=1440h$ и $\tau_2=1550h$. За сваки коришћени додатни материјал су измерене различите вредности апсолутног „губитка“ масе усисних плоча. На основу приказаних података, могуће је израчунати средњу брзину губитка масе плоча током периода експлоатације, коришћењем израза:

$$\dot{m}_{sr} = \frac{Q_3}{\tau_1} \quad [\text{kg/h}] \quad (5.5)$$

Табела 5.14. – Резултати мерења масе усисних плоча пре и после експлоатације од $\tau = 1440 h$ и $\tau = 1550 h$

Ознаке плоча група (дод. мат.)	Q_{0sr}, kg	Q_{1sr}, kg	Q_{2sr}, kg	Q_{3sr}, kg ($Q_1 - Q_2$)	R, %	R1, %	$Q_{3,0i} [\text{kg}]$	$\dot{m}_{sr_4} \cdot 10^{-4}$ kg/h	$\tau_{1,i} = \frac{Q_{3,0i}}{\dot{m}_{sr}} [\text{h}]$	T_m [h/kg]
Основна плоча (G36Mn5)	27.000	27.000	25.947	1.053	3.90	3.90	1.0531	7.313	1440	/
I (А)	26.275	27.006	25.950	1.056	3.91	1.24	1.756	6.810	2579	973
I (Б)	26.220	26.303	25.360	0.943	3.58	3.29	1.132	6.080	1859	327
II (Г)	26.700	28.100	27.257	0.843	3.00	3.00	2.441	5.854	4170	3238
II (Ђ)	26.750	28.250	27.798	0.452	1.60	1.60	2.543	3.139	8102	14739

Коришћене ознаке из табеле:

$$\dot{m}_{sr} = \frac{Q_{3sr}}{\tau_1} [\text{kg/h}] - \text{средња брзина губитка масе плоча током периода експлоатације}$$

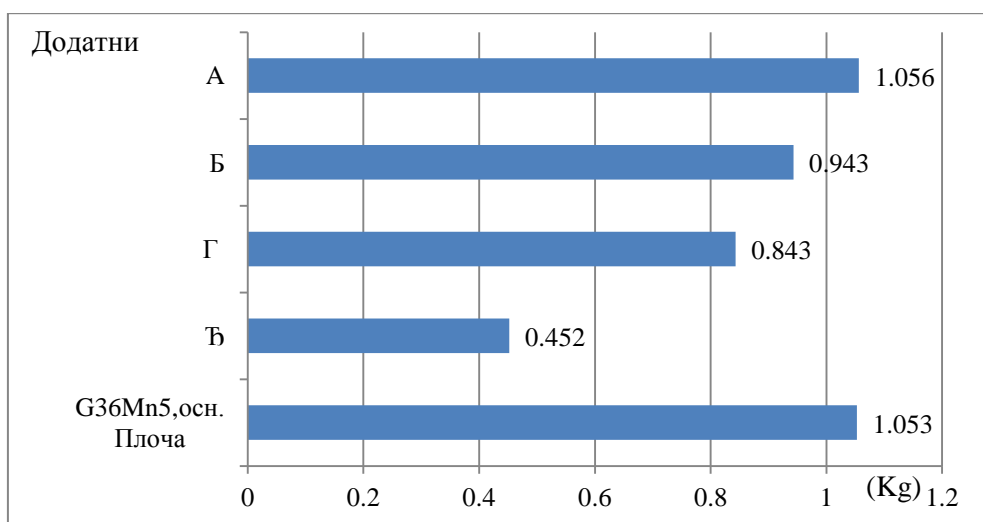
$$Q_{3sr,Oi} = 0,04 \cdot Q_{1,sro} + (Q_{1sr,i} - Q_{1sr,o}) \text{ [kg]}$$

$Q_{1sr,o}$ и $Q_{1sr,i}$ - масе плоча без и са антихабајућим слојем сукцесивно при чему $i = \{0, 1, 2, 3, 4\}$, сагласно са подацима у табели. 5.14.

$T_m = (\tau_{1i} - 1440 \text{ ili } 1550) / (Q_{1sr} - Q_{2sr})$ - Продужење радног века, срачунатог као разлика трајања радног века плоча са антихабајућим слојем у односу на основне уисне плоче од конструкционог челика, сведена на килограм утрошеног додатног материјала плоча (h/kg)

Подаци из табеле 5.14. су приказани илустративно у виду дијаграма на сликама од 5.2.3 до 5.28.

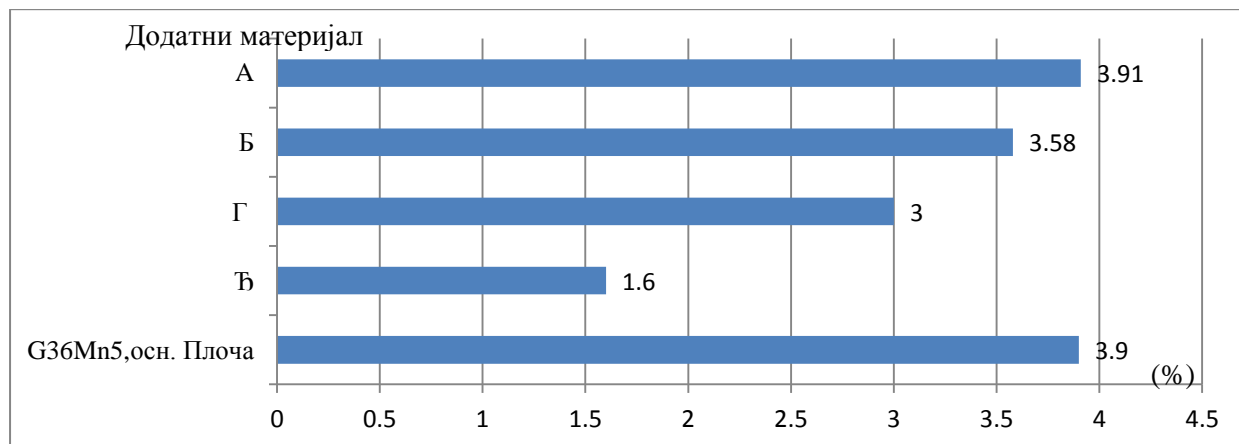
Анализом података приказаних на слици 5.23., очигледно је да највећи апсолутни губитак тежине, имају основне уисне плоче од челика G36Mn5 (1.053kg) и плоче са антихабајућим слојем од додатног материјала А (1.056kg). Насупрот томе, плоче са нанесеним антихабајућим слојевима од материјала Ђ и Г, имају најмањи апсолутни губитак тежине током периода експлоатације од 0.452 kg и 0.843kg. Поред тога, уисне плоче са нанесеним антихабајућим материјалом Б имају нешто већи губитак од прва два додатна материјала 0.943kg.



Слика 5.23. Апсолутни губитак тежине уисних плоча у (kg)

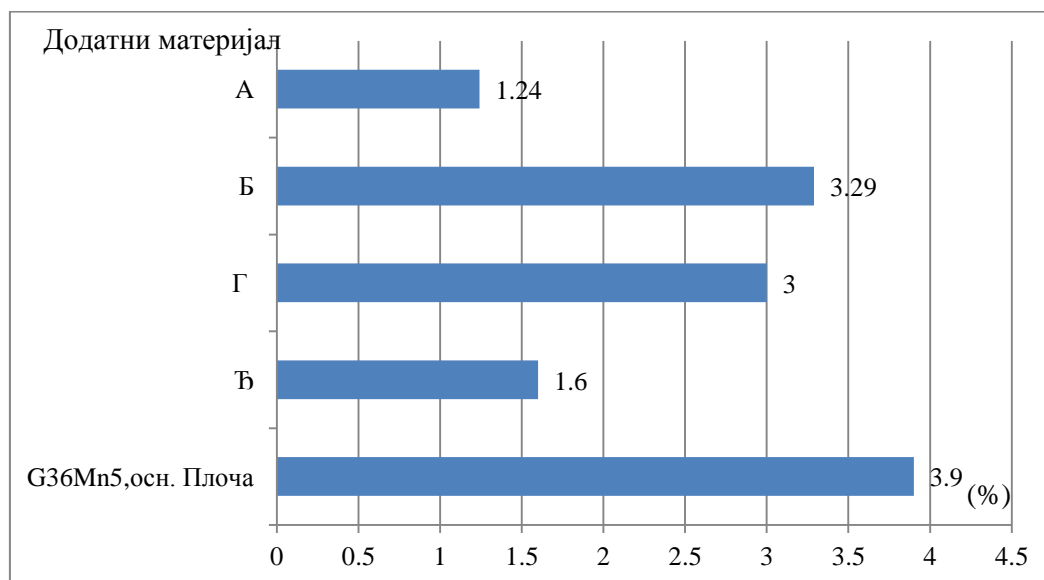
Резултати приказани на слици 5.24, указују да најмањи процентуални губитак масе имају плоче са нанесеним антихабајућим материјалима Ђ и Г, (1.6% и 3%). Уисне плоче са нанесеним антихабајућим материјалом В имају нешто већи

процентуални губитак тежине од 3.58% док са нанесеним материјалом А имају највећи процентуални губитак тежине од 3.91%.



Слика 5.24. Процентуални губитак масе усисних плоча у (%)

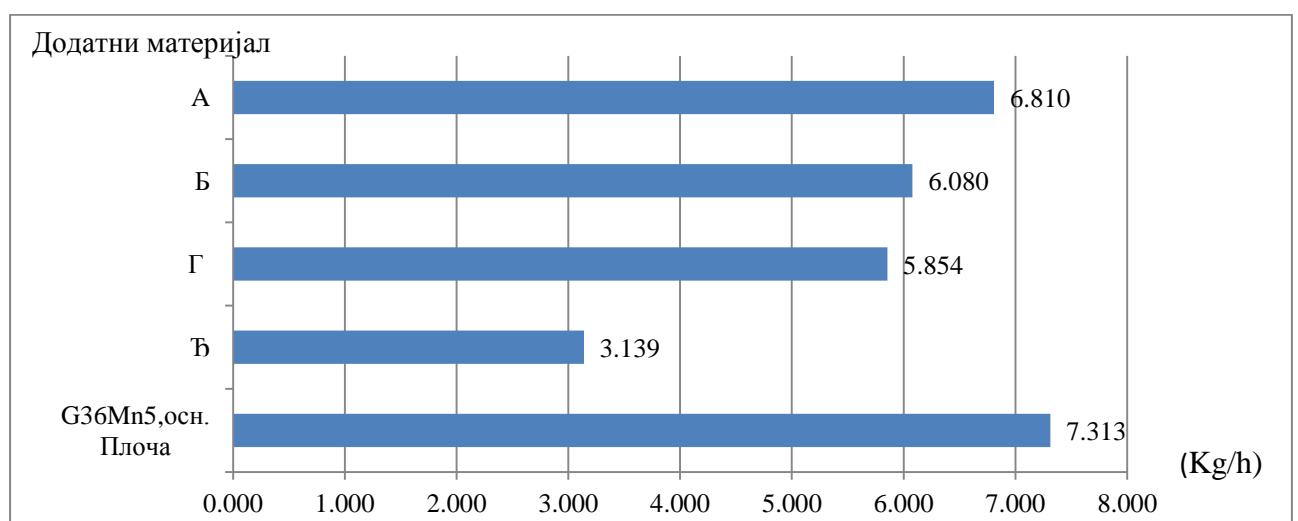
На слици 5.25 приказан је процентуални губитак масе усисних плоча у односу на основну масу усисних плоча. Плоче са нанесеним антихабајућим материјалима Ђ и А имају најмањи губитак масе, респективно 1.6% и 1.24%. Усисне плоче са нанесеним антихабајућим материјалом Г имају нешто већи (3.00%) а са материјалом Б највећи (3.29%) процентуални губитак масе. Генерално речено, наведени губици су мањи у односу на губитак масе основне усисне плоче.



Слика 5.25. Процентуални губитак масе усисних плоча у односу на основну масу усисних плоча

Анализом података приказаних у колони \dot{m}_{sr} , табеле 5,12. и на слици 5.26. могуће је закључити, да највећу израчунату средњу брзину губитка масе, имају

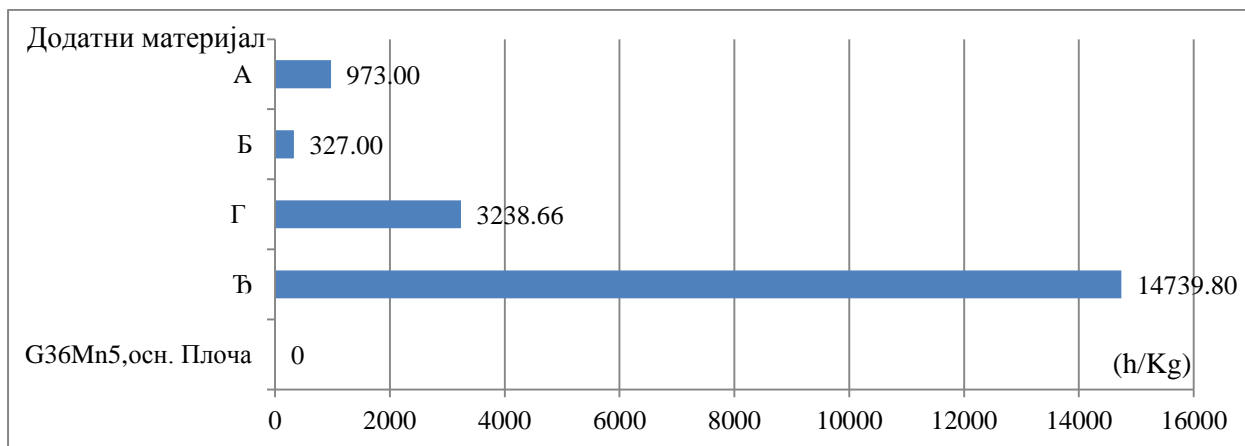
основне плоче GS-G36Mn5 без нанесеног антихабајућег слоја. Што се тиче плоча са нанесеним антихабајућим слојевима, може се закључити да плоче са нанесеним антихабајућим материјалом Ђ и Г имају најмању средњу брзину губитка масе плоча током периода експлоатације (*губитак тежине антихабајућег слоја) респектабилно 3.139 и $5.854 \text{ kg/h} \times 10^{-4}$. Усисне плоче са нанесеним антихабајућим материјалом А и Б имају нешто већу средњу брзину губитка масе у односу на претходна два 6.810 и $6.080 \text{ kg/h} \times 10^{-4}$. Усисне плоче са антихабајућим материјалом А имају највећу прорачунату средњу брзину губитка масе плоча током периода експлоатације (*губитак тежине антихабајућег слоја) $7.313 \text{ kg/h} \times 10^{-4}$.



Слика 5.26. Средња брзина губитка масе усисних плоча током периода експлоатације (10^{-4} Kg/h)

Продужење радног века, израчунатог као разлика трајања радног века усисних плоча са нанесеним антихабајућим слојем у односу на основне усисне плоче од челика GS-G36Mn5, сведена на килограм утрошеног додатног материјала (h/kg) је приказана у табели 5.12. и на дијаграму на слици 5.27.

Анализом резултата приказаних у колони T_m табеле 5.14. и на слици 5.27. очигледно је, да највеће повећање радног века, имају усисне плоче са нанесеним антихабајућим материјалом Ђ од 14739 (h/kg) . Што се тиче осталих плоча са нанесеним антихабајућим слојевима, може се закључити да плоче са нанесеним антихабајућим материјалом Г имају значајно повећање радног века 3238 (h/kg) . Усисне плоче са нанесеним антихабајућим материјалом А имају нешто мањи повећање и оно износи 937 (h/kg) . Најмање повећање радног века имају плоче са додатним материјалом Б који износи 327 (h/kg) .



Слика 5.27. T_m - Продужење радног века, израчунатог као разлика трајања радног века усисних плоча са нанесеним антихабајућим слојем у односу на основне усисне плоче од челика GS-G36Mn5, сведена на килограм утрошеног додатног материјала (h/kg)

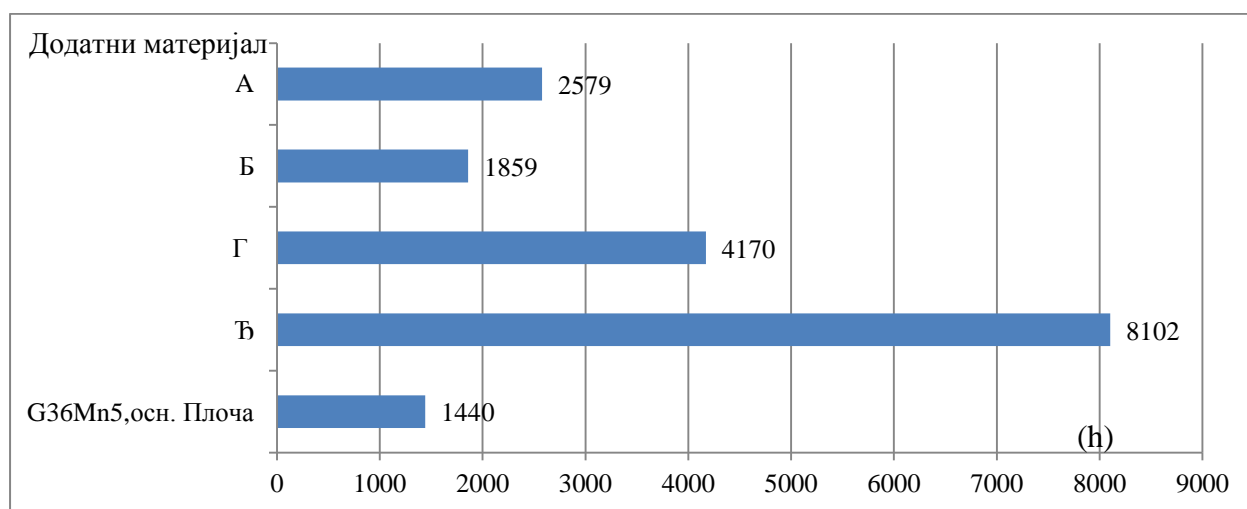
Процењени век трајања плоча, у односу на задати релативни губитак масе од 4.0%, (губитак масе усисних плоча од челика GS-G36Mn5 без нанесеног антихабајућег слоја, након чијег достизања се врши замена радних елемената, у циљу очувања захтеваног квалитета млина и вентилационог дејства млина) се може одредити на основу израза 5.6.

$$\tau_{1,i} = \frac{Q_{3,oi}}{\dot{m}_{sr}} \text{ [kg/h]} \quad (5.6)$$

Очекивани век трајања усисних плоча са антихабајућим слојевима, и различитим врстама додатног материјала приказан је у колони $\tau_{1,i}$ табеле 5.12. Највећа вредност века трајања усисних плоча, израчуната на овај начин, се добија за усисне плоче са додатним материјалом Ђ, док је најмања вредност радног века добијена за усисне плоче израђене са додатним материјалом А, изузимајући основне плоче без нанесеног антихабајућег слоја.

Што се тиче усисних плоча са нанесеним антихабајућим материјалом Г, прорачун је показао да је дужина њиховог радног века 4170h док је дужина радног века усисних плоча са додатним материјалом Б нешто краћа и износи 4140 h. Међутим, специфично продужење радног века, срачунатог као разлика трајања радног века плоча са нанесеним антихабајућим слојем у односу на основне усисне плоче челика GS-G36Mn5, сведена на килограм утрошеног додатног материјала ($T_m = (\tau_{1i} - 1440) / (Q_{1i} - Q_{1o})$), показује да је тај параметар најповољнији за усисне плоче са антихабајућим

материјалом Ђ (колона T_m Таб. 5.14.). Ови подаци су илустративно приказани на слици 5.28.



Слика 5.28. Процењени век трајања усисних плоча (h)

6. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

Истраживање могућности оптимизације рада термоенергетског постројења термоелектране Костолац Б, конкретно усисних плоча вентилационог млина, представља комплексну област, која отвара могућности за опсервацију проблема са различитих аспеката. С обзиром да је основни циљ ове дисертације да предложи технолошко решење које ће довести до оптимизације рада постројења у оквиру стратегије одрживог развоја, дисертација је формулисана најпре са аспекта технолошке и економске валоризације.

У оквиру овог поглавља урађена је анализа добијених резултата, поређење ефеката и успешности у циљу дефинисања оптималне технологије наношења антихабајући превлака на радне делове вентилационог млина (усисне плоче). Рад млина је праћен током процеса млевења угља и након одређеног времена рада извршена је демонтажа и анализа понашања материјала радног дела (усисних плоча). Након тога предложени су даљи правци истраживања у области заштите радних делова од хабања.

Резултати који су приказани у поглављима 3 и 4 односе се на нумеричку симулацију и експериментална испитивања која су спроведена у лабораторијским условима, са циљем да се прецизније одреде карактеристике и могућности

антихабајућих превлака при заштити усисних плоча у функционалним испитивањима. У оквиру поглавља 5 су приказана функционална испитивања усисних плоча вентилационог млина у реалним експлоатационим условима, односно је изведено наношење антихабајућих превлака помоћу претходно дефинисаних технологија на усисне плоче и њихова уградња у један вентилациони млин.

Истраживања у оквиру дисертације су реализована симултаном применом више метода испитивања. Нумеричком симулацијом је пре свега изведена анализа струјања аеросмеше (ваздуха, рецикулационих гасова, угља, песка, влаге и осталог) и њен утицај на проблеме присутне у раду система вентилациони млин - канал аеросмеше, везаних за појаву хабања виталних делова (у овом случају усисних плоча). Тачније, присуство гасовитих и чврстих фаза са различитим гранулацијама, механичким и хемијским особинама, услед ротације радног кола млина ствара вишефазно струјање, које доводи до низа интерактивних утицаја са виталним деловима вентилационог млина, до њиховог хабања и (или) потпуног оштећења. У лабораторијским условима су изведена испитивања, хемијског састава, структурно – механичких особина и процена заварљивости материјала усисних плоча вентилационог млина. Поред тога, дати су услови израде, израда и резултати недеструктивних и структурно – механичких и хемијских испитивања моделних узорака са антихабајућим слојевима.

Концепт дисертације је осмишљен тако да обухвати све доступне, релевантне методе, које се користе у свету и код нас, а чији резултати примене могу да се употребе у доказивању главне хипотезе. У доступној литератури до сада није познат овакав приступ решавању наведених проблема у раду вентилационог млина..

Као основа за мултидисциплинарна испитивања су коришћене стандардизоване методе, које се до сада нису овако обједињене, користиле на сложеном систему вентилациони млин - канал аеросмеше. Узроци за експериментална испитивања су исто тако припремани према стандардизованим, акредитованим методама. Основни циљ је био да се обезбеди тачност резултата истраживања и да се на основу тога овакав приступ квалификује као метода високих перформанси, чија имплементација у решавању сложених проблема, доприноси оптимизацији самих постројења и повећању поузданости.

У Србији, из године у годину, се бележи раст производње електричне енергије, са већ постојећим капацитетима, без изградње нових производних погона. Ови захтеви стављају на испит постојећа енергетска постројења, од којих се очекују да раде не само са максималним капацитетом већ и са повећаним. Обзиром на ове захтеве и

вентилациони млинови, од којих се очекује да прераде све већу количину угља, су изложени великим напрезањима. Претходних година су урађене бројне реконструкције система вентилациони млин – канал аеросмеше у циљу повећања постојећих капацитета и ефикасности рада. Последице овога су и повећавање хабања радних делова вентилационог млина.

Одлука о погодности и могућности примене технологија (поступака и додатних материјала) наношења антихабајућих слојева на радне делове млина условљена је следећим факторима:

- проценом времена потребног за наношење антихабајућих слојева;
- полазним испитивањима којима се оштећења констатују и дефинишу величина и положај истих;
- одређивањем узрока који су довели до оштећења;
- предвиђањем могућег радног века;
- економским разматрањима заснованим на потреби заустављања постројења и могућности замене новим делом;
- избором оптималне процедуре наношења антихабајућих слојева узимајући у обзир локалне услове;
- дефинисањем технологије наношења антихабајућих слојева, избором додатног материјала, применом изабраних технологија и испитивањем квалитета изведених радова;
- дефинисањем контролних периода.

Решавање проблема продужења животног века радних делова вентилационог млина наметнуо је истраживања на освајању и верификацији техно – економске ефикасности нових и усавршавању постојећих технологија наношења антихабајућих превлака.

6.1. Анализа резултата нумеричке симулације

Добијени резултати потврдили су променљивост нумеричке симулације струјања у анализи проблема присутних у раду система вентилациони млин - канал аеросмеше. Тачније, слике струјања мешавине, настале услед ротације радног кола

млина, указала су прецизније на услове и места хабања радних компоненти а посредно и на могућа решења у заштити од хабања истих.

У оквиру ове дисертације размотрене су могућности примене различитих модела струјања, који би омогућили што реалнију нумеричку симулацију струјања у вентилационом млину.

Приказан је начин дефинисања најважнијих параметара (гранични услови, параметри смеше, интеракције присутних фаза и турбулентни модели) за адекватну нумеричку симулацију на основу кога су дефинисани модел симулације, параметри нумеричке мреже и критеријум конвергенције. На основу тога развијена је комплетна методологија истраживања која је утицала на квалитет добијених резултата.

На основу расположивих рачунарских ресурса и сложености објекта испитивања изабрани су и примењени одговарајући модели (модел мешавине и Ојлеров модел) за решавање мултифазног струјања софтверским пакетом ANSYS FLUENT. Тачније, вентилациони млин и канал аеросмеше су моделирани и нумерички испитани у реалној геометрији и реалним радним условима.

Улазни подаци за нумеричку симулацију вишефазног струјања у вентилационом млину, дефинисани су на основу мерења, које је извршила релевантна институција (Лабораторија за термотехнику и енергетику, Института Винча). На основу тога, улазне вредности запреминских и масених протока су дате као средње вредности са два млина и приказане су у поглављу 3.5.1. у једначинама од 3.85. до 3.99. На основу вредности запреминских концентрација секундарних фаза (угљеног праха и песка), утврђено је да је у питању мултифазно струјање врло разређене мешавине. Насупрот томе, вода, односно влага у угљу која брзо испарава и заједно са рециркулационим гасовима даје смешу идеалних гасова, постаје примарна или носећа фаза.

Приказана нумеричка симулација има одређена ограничења, која су узета у обзир при моделирању ове реалне појаве, као и при анализи добијених резултата. Први тип ограничења везан је за коришћени софтвер, односно за сложеност физичких модела за које се могу добити релевантни резултати. Поред тога, софтвер ANSYS FLUENT 12 који је коришћен за нумеричку симулацију, припада области нумеричке динамике флуида (CFD), и не обухвата процес млевења. Због тога је усвојено да кроз улаз вентилационог млина поред мешавине гасова истовремено улази већ самлевени угаљ и песак, а затим се егзактно симулира струјање аеросмеше у млину.

Поред тога, због нумеричке симулације вишефазног струјања (рециркулисани гасови, угљени прах и песак) генерисана је мрежа од 2 996 772 запреминских елемента.

Тачније, са повећањем броја фаза морао је да се смањи број запреминских елемената мреже, при чему се водило рачуна да то смањење у највећој могућој мери буде тамо где је промена величина струјног поља најмања. Како је у овом случају било најважније сагледати карактеристике струјања песка као изразито абразивног материјала, направљен је компромис између броја запреминских елемената и броја фаза, тако да су угљени прах и песак третирани као монодисперзни.

Поступак нумеричког моделирања вишефазног струјања у вентилационом млину, састоји се од два дела. Први део је обављен у посебном софтверском пакету намењеном за припрему геометрије у форми која је потребна софтверу за нумеричку симулацију, а садржи: генерисање геометрије и генерисање мреже.

Други део који је везан непосредно за солвер, обухватио је: дефинисање општег модела струјања, дефинисање мултифазног модела, фаза и њихових интеракција, дефинисање вискозног модела и модела турбуленције, дефинисање граничних услова, избор реда тачности нумеричке дискретизације, иницијализацију струјног поља, праћење конвергенције решења, постпроцесирање и анализу добијених резултата.

У усвојеном Ојлер-Ојлер приступу нумеричке симулације вишефазних струјања, прво су дефинисани мултифазни модел и број фаза. У овом случају за примарну (континуалну или носећу) фазу узети су рециркулациони гасови, док су секундарне фазе угљени прах, песак и влага. Анализа резултата и поређење резултата са мерењима су изведена за струјање мешавине угља и песка као монодисперзних грануларних секундарних фаза, чије су све честице истог пречника од 150 μm , односно 300 μm .

Анализа струјних слика показује да се највећа турбуленција јавља у прелазним зонама и најинтензивнија је на излазу из вентилационог млина где су постављене усисне плоче. У тој зони се јављају и највеће брзине струјања (око 140 m/s) које су приказане векторима брзина на сликама од 3.5 до 3.10. Поред тога, струјне слике 3.10. и 3.11. потврђују интензивну турбуленцију мешавине у наведеној зони. Велики утицај на турбуленцију у овој зони има повратак дела честица мешавине из канала аеросмеше, што потврђују слике 3.6., 3.8. а), 3.9., 3.10. и 3.12.

Анализа струјних слика мешавине и песка (вектори брзине мешавине и песка) приказани на сл. 3.8, 3.9 и 3.10, указује на доминанто дејство ерозивног хабања усисних плоча. Тачније, мултифазно струјање загрејаних рециркулационих гасова, честица угља и песка у зони изласка из вентилационог млина указује да је њихово дејство усмерено под малим нападним углом на чеоне површине усисних плоча са

максималном брзином од око 127 m/s. Ово је у складу са тврдњом да је за материјале мање тврдоће (у овом случају од 360 – 420 HV за челични лив GS-36Mn5) најинтензивније ерозивно хабање при нападним угловима од 15° до 30° [3]. Поред тога, велики утицај на хабање усисних плоча има и тврдоћа честица песка (800-1000 HV) који је у значајном уделу присутан у мешавини (око 20%) [1-15] и чија је запреминска концентрација највећа у вентилационом млину (сл. 3.16.).

Резултати добијени нумеричком симулацијом са моделом мешавине јасно показују могућности и предности CFD софтвера, који даје све детаље струјне слике, поље брзина и притиска и чије коришћење, посебно у почетним фазама пројектовања знатно скраћује време и смањује трошкове налажења оптималног решења.

Резултати нумеричке симулације струјања у систему вентилациони млин канал аеросмеше изведени су применом модела мешавине и Ојлеровог модела. Дефинисани су улазни параметри фаза (запремински и масени проток и њихове запреминске концентрације) и поступак нумеричког моделирања од генерисања геометрије и мреже, до иницијализације струјног поља и праћења конвергенције решења.

Анализа резултата нумеричке симулације мултифазног струјања и поређење са релевантним резултатима мерења параметара система, указују на следеће:

- нумеричка симулација струјања у вентилационом млину и каналу аеросмеше даје реалну слику струјања ;
- у делу система који се односи на зону - излаз из млина, односно на улаз у канал аеросмеше, јавља се интензивно турбулентно струјање;
- највећи интервал брзина кретања честица песка и осталих минералних материја, присутан је око усисних плоча вентилационог млина у зони где су турбулентна струјања од 60 до 100 m/s, а највећи интензитет брзина ових честица је уз зидове кућишта млина у зони усисних плоча у интервалу од 80 до 127 m/s;
- Анализом смера струјања мешавине могу се уочити нападни углови честица мешавине на чеоне површине усисних плоча и на тај начин предвидети са већом прецизношћу доминанту врсту хабања. У овом случају нападни углови од око 20° указују на доминантно ерозивно хабање

6.2. Анализа резултата експерименталних испитивања

У циљу дефинисања оптималних технологија наношења антихабајућих слојева (поступака и додатних материјала) извршена су пре свега испитивања хемијског састава, структурно – механичких особина као и процена заварљивости материјала у сисних плоча (челика GS-36Mn5). Поред тога, на моделним узорцима са антихабајућим слојевима, који су израђени по условима изабраних технологија наваривања и метализације (поступци и додатни материјали) извршена су испитивања без разарања, хемијска и структурно – механичких испитивања.

Резултати аналитичке процене заварљивости, температуре предгревања и температуре фазних трансформација челика (GS-36Mn5) на основу добијене хемијске анализе челика (табела 4.1) који су дати у табелама 4.3., 4.4. и 4.5., респективно, показали су следеће:

- У циљу спречавања појаве хладних прелина у завареном споју (навару) и добијања споја (навара) са захтеваним механичким особинама било је потребно одредити такав температурни циклус заваривања (наваривања), који би обезбедио одређену брзину хлађења споја у температурском интервалу трансформације аустенита и оптимално задржавање изнад A_{c3} температуре. [27] Резултати испитивања приказани на сл. 4.4. и 4.5. показују да се у испитаним условима заваривања (наваривања) не могу постићи времена хлађења $t_{8/5}$, која би онемогућила појаву хладних прелина.
- На основу анализа приказаних резултата на сл. 4.3. и 4.7., може се извести закључак да јачина струје заваривања треба да буде у опсегу од 160-200А, јер се тада постижу најмање вредности удела мартензита, тврдоће у ЗУТ-у, и најдуже време хлађења, односно постоји најмања опасност од настајања хладних прелина.
- Очигледно је да се тврдоћа челика (ЗУТ-а) испод 350 HV не може постићи под овим условима наваривања сл. 4.8., већ би то било могуће уколико се предгревање изврши на температурама изнад 300°C , што представља одступање од температуре предгревања добијене аналитичким прорачуном (Таб.4.4.) [27]. Разлози овог одступања могу бити услед коришћене недовољно прецизне апроксимације, којом се аналитички процењује температура

предгревања, и тек би праву слику о сагласности аналитичког и практичног поступка избора температуре предгревања за GS-36Mn5 могао да пружи експеримент, што може послужити као тема будућих истраживања.

- Челик GS-36Mn5 припада групи условно заварљивих челика, који могу успешно да се заварују уз примену посебних додатних материјала, предгревања и других мера предострожности. У случају наваривања поред контролисаног термичког циклуса потребно је и наваривање међуслоја. На основу ових предвиђања изведена су моделна експериментална наваривања различитим технолошким процедурама [27-29].

На основу резултата нумеричке симулације, аналитичке процене заварљивости челика GS-36Mn5, расположиве опреме и додатних материјала, извршен је избор шире палете поступака, додатних материјала, као и услова наваривања и метализације за наношење антихабајућих слојева на моделне узорке (Таб. 4.6., поглавља од 4.2.1. до 4.2.6.).

Резултати визуелних и пенетранских испитивања моделних узорака су у сагласности када су питању изглед, расподела и густина грешака типа прлина, порозности и других недозвољених грешака на површини антихабајућег слоја. Међутим, једино код узорака који су израђени HVOF – хладна метализација суперсоничним поступком и топлом метализацијом са накнадним утапањем (са додатним материјалима Б и В и приказани на сликама 4.18. а), б) и 4.21. а), б), нису примећене грешке типа прлина, порозности или неких других недозвољених грешака. Поред тога, ова испитивања су показала да је највеће присуство ових грешака у антихабајућем слоју узорака добијених ручним електролучним поступком наваривања са додатним материјалима Г (сл.4.17. а и 4.20. а) и Д (4.19. б) и 4.22. б) а мање код узорака добијених РТА-плазма наваривањем (додатни материјал А) и МИГ/МАГ поступком са самозаштитном жицом (додатни материјал Ђ) на сл. 4.17. б), 4.20. б) и сл. 4.19. а), 4.22. а), респективно.

Резултати испитивања тврдоће и макроструктуре, који су приказани у таб. 4.13. и на сл. 4.23. до 4.28., показују да се узроци са антихабајућим слојем од материјала Ђ и Д, карактеришу поред релативно хомогене расподеле макроструктуре и тврдоће по попречном пресеку и највишим нивоом како површинске тако и тврдоће по попречном пресеку у односу на остале узорке. Тачније, код узорака са антихабајућим слојем од материјала ознаке Ђ и Д површинске тврдоће су више него код осталих узорака за око

20 – 40%. Поред тога, интервал тврдоће по попречном пресеку је већи за око 10 – 80% (таб. 4.13.). Насупрот томе, код ових узорака очигледан је знатно већи степен мешања од 25 – 27% и шири ЗУТ. Измерене тврдоће узорака се разликују, без обзира на то што неки од антихабајућих материјала имају сличан хемијски састав. Ово је углавном последица примене различитих поступака и услова наношења антихабајућих слојева (превлака) [28, 33, 40-45].

Микроструктуру антихабајућих слојева добијених метализацијом карактерише жилава матрица – чврсти раствор на бази Ni (узорак А и В) или на бази Fe (узорак Б). Микроконституенти који дају највећу тврдоћу композиту су углавном WC (узорак А и В) и Cr –карбиди и Cr – бориди (узорак Б) примарно полигоналног облика. У микроструктури је очигледно присуство и ситнијих WC игличастог и штапићастог облика (узорак А). Наведено потврђују резултати дати на сл. 4.31. и таб. 4.15. (узорак А) сл. 4.34 и таб. 4.17 (узорак Б) и сл. 4.37 и таб. 4.19 (узорак В). Поред тога, величина и расподела ових фаза је различита код сва три узорка. Код узорака А и В су крупнији WC (~30 – 120 μm , односно ~20 – 90 μm) у односу на ситније Cr –карбиде и Cr – бориде код узорка Б (~12 \pm 4.0 μm) полигоналног облика. Такође, хомогенија је расподела фаза по попречном пресеку антихабајућег слоја код узорка Б (сл. 4.32) него код узорака А и В (сл. 4.29. и сл. 4.35.). Тачније, код узорака А и В нехомогенија је расподела ових фаза у површинској зони него у осталом делу узорка.

Микроструктуру антихабајућих слојева добијених наваривањем карактерише релативно жилава матрица – ламеларна еутектичка мешавина аустенита - γ + Cr – карбиди углавном игличастог и делимично штапићастог облика (узорак Г и Д) и матрица номиналног састава FeCrWMo мартензитно – беинитне структуре (узорак Ђ). Код узорака Г и Д највећу тврдоћу антихабајућих слојева даје присуство примарних карбида у матрици, који су идентификовани као (Cr,Fe)₇C₃. Ови карбиди показују стубичаст раст и хексагонални попречни пресек. Насупрот томе, у матрици узорка Ђ доминантно је присуство специјалних карбида типа WC, MoC, NbC, комплексних карбида типа Fe₃(W, Mo, Nb, Cr)₃C као и Cr-карбида. Наведено потврђују резултати дати на сл. 4.39 и таб. 4.20 (узорак Г) сл. 4.41. и таб. 4.22. (узорак Д) и сл. 4.43. и таб. 4.23. (узорак Ђ).

Међутим, код наведених узорака присутна је значајна разлика у величини, облику и расподели присутних примарних карбида. Наиме, код узорка Г крупни примарни Cr - карбиди су издуженог (оштроуглог) облика (~50 – 300 μm), насупрот карбидима истог типа код узорка Д, који су штапићастог и полигоналног (издуженог)

облика (~20 – 60 μm). Поред тога, код узорка Д није уочено присуство Cr - карбида издуженог и оштроуглог облика. Ово је у сагласности са радовима [12, 17, 35] који доказују да се при порасту садржаја угљеника у овим легурама (у легури Д садржај угљеника је око 2% већи него у легури Г) стварају повољнији услови за трансформацију карбида из издуженог (оштроуглог) облика у штапићасти облик. Наиме, присуство штапићасте морфологије карбида побољшава отпорност легуре (антихабајућег слоја) на хабање.

Међутим, код узорка Ђ, у поређењу са узорцима Г (сл. 4.38.) и Д (сл. 4.40.), запажена је релативно равномерна расподела карбида полигоналног и сферичног облика, димензија $\sim 20 \pm 8 \mu\text{m}$ (сл.4.42.) са нешто израженијом равномерношћу расподеле карбида у средишњој зони (4.42. б)) у односу на површинску (4.42. в)). Наиме, присуство специјалних карбида наведеног облика у антихабајућем слоју, типа WC, MoC, NbC и комплексних карбида $\text{Fe}_3(\text{W}, \text{Mo}, \text{Nb}, \text{Cr})_3\text{C}$ утиче на пораст тврдоће и отпорности на хабање [1-3, 7, 12, 26].

Узимајући у обзир резултате: визуелних, пенетранских, тврдоће, структурних и хемијских испитивања, може се сматрати да антихабајући слојеви узорака Ђ, Д, Г и А имају оптималнију комбинацију технологичности (поступак, услови наношења и квалитет антихабајућег слоја) и структурно – механичких особина у односу на узорке Б и В.

6.3. Анализа резултата функционалних испитивања

Анализа резултата приказаних у поглављу 5, указује да на понашање антихабајућих слојева у сисних плоча, поред услова експлоатације, значајно утичу и њихова својства (тврдоћа, структура, квалитет нанесеног слоја и дебљина).

Наиме, због све већих захтева у производњи електричне енергије услови рада постројења су све неповољнији, што доводи до одступања од оптималних параметара рада и оштећења радних делова. Нумеричка симулација вишефазног струјања у систему вентилациони млин – канал аеросмеше, која је приказана у 3. поглављу, детаљније је указала на услове експлоатације, могуће начине оштећења и продужења радног века компоненти система.

Анализом својстава антихабајућих превлака (слојева) моделних узорака, резултата нумеричке симулације, карактеристика расположиве опреме и додатних материјала, као и другим приказаним резултатима, извршен је избор поступка

наношења антихабајућих превлака, додатних материјала и услова наношења истих. Тачније, при избору су примењени следећи критеријуми: услови рада, отпорност на хабање, потребан квалитет завршне обраде, допуштена дебљина, порозност слоја и кохезиона чврстоћа основног и нанесеног слоја, карактеристике основног материјала, облик и величина радног предмета и трошкови.

Антихабајуће превлаке, које су нанесене дефинисаним технологијама наваривања и метализације (Таб. 5.3.) на чеоне површине усисних плоча, омогућиле су веће или мање повећање радног века ових делова. На тај начин је омогућено да се смањи број интервентних поправки и повећа временски период између неопходних комплетних ремонта постројења, што у крајњем случају утиче и на повећање енергетске ефикасности термоенергетских агрегата.

Анализа резултата функционалних испитивања хабања усисних плоча без и са нанесеним антихабајућим слојем на радним површинама, односно масених губитака истих, који су приказани у Таб. 5.12. и на сл. од 5.23. до 5.28., указала је на следеће:

- Највећи апсолутни губитак тежине, поред основних усисних плоча од челика GS-G36Mn5 (1.053kg) имају и плоче са антихабајућим слојевима од додатног материјала А (1.056kg) и Б (0.943kg). Насупрот томе, плоче са нанесеним антихабајућим слојевима од материјала Ђ (0.452kg) и Г (0.843kg) имају најмањи апсолутни губитак тежине.
- Највећи процентуални (релативни) губитак масе, поред основних усисних плоча од челика GS-G36Mn5 (3.9%) имају и плоче са антихабајућим слојевима од додатног материјала А (3.91%) и Б (3.58%). Најмањи процентуални губитак масе имају плоче са нанесеним антихабајућим материјалима Ђ (1.6%) и Г (3.0%).
- Највећи процентуални губитак масе плоча у односу на основну масу усисних плоча GS-G36Mn5 (3.9%) имају плоче са антихабајућим слојевима од додатног материјала Б (3.29%) и Г (3.00%). Насупрот томе, најмањи губитак имају плоче са нанесеним антихабајућим материјалима Ђ и А, респективно 1.6% и 1.24%.
- Највећу средњу брзину губитка масе, имају основне плоче G36Mn5 (7.313×10^{-4} kg/h) и усисне плоче са нанесеним антихабајућим слојевима од материјала А (6.810×10^{-4} kg/h) и Б (6.080×10^{-4} kg/h). Најмању средњу брзину губитка масе имају плоче са антихабајућим слојевима од материјала Ђ (3.139×10^{-4} kg/h) и Г (5.854×10^{-4} kg/h).

- Највеће повећање радног века, имају уисне плоче са антихабајућим слојем од материјала Ђ (14739 h/kg) и Г (3238 h/kg). Насупрот томе, знатно мање повећање радног века имају уисне плоче са антихабајућим слојем од материјала А (973 h/kg) и Б (327 h/kg).
- Највећу вредност процењеног века трајања уисних плоча са антихабајућим слојем, имају плоче са додатним материјалом Ђ (8102 h) и Г (4170 h), док најмања вредност радног века карактерише плоче са антихабајућим слојем од материјала А (2579 h) и Б (1859 h), у односу на основне плоче без нанесеног антихабајућег слоја.

Анализа резултата промене геометрије и димензија уисних плоча са и без антихабајућег слоја, приказаних у поглављима од 5.8.1 до 5.8.4, указала је на следеће:

- Код плоча са нанесеним антихабајућим материјалом А присутно је интензивно углавном обострано бочно хабање са врло малим хабањем нанесеног слоја (слика. 5.15. и табела. 5.9.). Наведена појава је последица монтаже плоча са и без антихабајућег слоја у истом сету од 35 плоча. Поред тога, очигледно знатно оштећење врха неких плоча (слика 5.15. а) и б)), вероватно је последица утицаја неповољне структуре антихабајућег слоја и бочног хабања.
- Генерално, код свих плоча са нанесеним антихабајућим материјалом Б присутан је потпуни губитак антихабајућег слоја (Таб. 5.10. и сл. 5.17.), односно потпуни губитак геометрије. На потпуни губитак антихабајућег слоја доминантно је утицала мала дебљина истог ($\approx 0.3-0.5 \text{ mm}$) у односу на дебљине антихабајућих слојева осталих плоча ($\approx 4 - 5 \text{ mm}$).
- Код свих плоча са нанесеним додатним материјалом Г присутно је равномерно хабање слоја али без потпуног одстрањивања истог и бочно хабање (Таб. 5.11., сл. 5.19. до 5.20.).
- Код свих плоча са нанесеним додатним материјалом Ђ присутно је веома мало и равномерно хабање нанесеног слоја (Таб. 5.12., сл. 5.21. и сл. 5.22). Поред тога, приметно је и мање бочно хабање и оштећење врха плоче. Тачније, степен похабаности свих плоча је уједначен, без значајног губитка антихабајућег слоја и губитка геометрије плоча.

Упоређењем резултата губитка масе и промене геометрије и димензија плоча са антихабајућим слојевима, може се закључити да је бочно хабање, нарочито изражено

код плоча са антихабајућим слојем од материјала А, битно утицало на повећање масених губитака. Тачније, хабање ових плоча није искључиво последица својстава антихабајућих слојева и технологија наношења истих, већ и начина монтаже у сету усисних плоча. Повољније решење ове операције и монтажа целог сета усисних плоча са антихабајућим слојем од истог материјала, омогућило би смањење хабања, односно добијање још бољих односно, релевантнијих резултата везаних за експлоатациони век истих.

7. ЗАКЉУЧАК

7.1. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру ове докторске дисертације изведена су истраживања која су имала за основни циљ да испитају утицај мултифазног струјања мешавине у вентилационом млину на хабање усисних плоча, испитивање и дефинисање технологија (поступака и материјала) наношења антихабајућих слојева (превлака) и верификацију добијених резултата функционалним испитивањима усисних плоча на које су нанесени антихабајући материјали изабраним технологијама.

Истраживања у оквиру ове дисертације обухватила су анализу услова рада и дефинисање метода и процедура за продужење радног века радних делова вентилационог млина (усисних плоча). Продужење радног века поменутих усисних плоча проистекло је из корелације резултата нумеричке симулације вишефазног струјања у вентилационом млину, посебно вектора брзина у зони усисних плоча, експерименталним испитивањима која укључују моделна испитивања пробних узорка са антихабајућим превлакама као и функционалних испитивања усисних плоча са нанесеним антихабајућим превлакама.

На основу резултата наведених истраживања може се закључити следеће:

- У делу система који се односи на излаз из млина, односно на улаз у канал аеросмеше (зона усисних плоча), јавља се интензивно турбулентно струјање честица песка и осталих минералних материја у интервалу од 60 до 100 m/s.
- Највећи интензитет брзина ових честица је уз зидове кућишта млина у зони усисних плоча у интервалу од 80 до 140 m/s;

- Нападни угао честица мешавине на чеоне површине усисних плоча је мањи од 20° и указује на доминантно ерозивно хабање уз мање абразивно хабање.
- Најповољнију комбинацију тврдоће, структуре, удела и расподеле фаза имају антихабајући слојеви од додатних материјала Г (Fe- Cr-C- Si), Ђ (Fe- Cr-W-B-Nb-Mo-C) и А (Ni-Cr-Bo-Si / 60% WC).
- Најмањи масени губици, промене геометријског облика и димензија су уочени код усисних плоча са антихабајућим слојевима од материјала А (Ni-Cr-Bo-Si / 60% WC), Ђ (Fe-Cr-W-B-Nb-Mo-C) и Г (Fe- Cr-C- Si).
- Највећу вредност процењеног радног века, у односу на основне усисне плоче од конструкционог челика, имају усисне плоче са антихабајућим слојевима од додатних материјала Ђ (Fe-Cr-W-B-Nb-Mo-C) и Г (Fe- Cr-C- Si).
- Увођењем ових технологија наношења антихабајућих превлака на радне делове млина (усисне плоче) омогућено је продужење њиховог радног века, а тиме и стабилније вентилационо дејство млина.
- На овај начин дефинисан је нов приступ у изучавању утицаја услова експлоатације и могућег продужења радног века делова у вентилационом млину у условима интензивног хабања, које може бити константно и/или променљивог спектра оптерећења (удара).

7.2. ДОПРИНОС НАУЧНОЈ МИСЛИ И ИНЖЕЊЕРСКОЈ ПРАКСИ

У свету се све више, у циљу оптимизације рада различитих постројења, користе различите методе нумеричке симулације, а на основу којих могу да се дефинишу одговарајуће мере, које би биле везане за евентуалну реконструкцију и/или ремонт. Распоживи подаци показују да у свету, а поготову у нашој земљи, до сада није изведен овакав приступ проблему анализе услова рада постројења као што је вентилациони млин, као и начин решавања проблема хабања неких радних делова овог постројења

Оригинални приступ у истраживању омогућио је да се разматрани проблем осветли са више аспеката. Наношење антихабајућих превлака и примена нових додатних материјала као и дефинисање процедура истих, захтева специфичан приступ с обзиром на услове експлоатације млина. Широка је палета додатних материјала, као и параметара процеса који нису у потпуности истражени, тако да ће резултати

истраживања у оквиру докторске дисертације дати значајни допринос у освајању мултидисциплинарног приступа истраживању оптимизације рада постројења (вентилационог млина), бољем разумевању процеса и феномена, примени нумеричких метода и наношењу антихабајућих превлака на радне делове.

На основу остварених резултата истраживања и њихове упоредне анализе са расположивим досадашњим истраживањима у предметној области, научни допринос ове дисертације се може исказати кроз следеће целине:

- Побољшање ефикасности рада вентилационог млина у склопу термоенергетског постројења, освајањем метода и нових знања у области нумеричке симулације вишефазних струјања и продужење радног века усисних плоча са нанесеним антихабајућим превлакама.
- Успостављање нових приступа у анализи радних услова и решавању проблема продужетка радног века делова, који су изложени интензивном хабању (усисних плоча) у вентилационом млину. Овај оригиналан приступ могао би се применити и на сличним уређајима у другим гранама индустрије.
- Примена различитих метода нумеричке симулације вишефазног струјања и оптимизације рада вентилационог млина као и технологија наношења антихабајућих превлака (слојева) на радне делове. Примена ове методологије у раду, ремонту и реконструкцији млина имала би значајне економске ефекте и на рад целокупног термоенергетског постројења.
- Редукцију веома скувих експерименталних истраживања коришћењем прорачунских и експерименталних метода у циљу повећања радног века сложених делова у термоенергетским постројењима која су изложена хабању, и лоцирањем и анализом критичних зона на деловима постројења. Дефинисање струјних параметара у вентилационом млину, одређивање расподеле брзина и притисака вишефазног струјања (рециркулациони гасови, угљени прах, песак и друге примесе, односно чврста и гасовита фаза) у комплексном систему као што је вентилациони млин са реалном геометријом и предвиђање ефеката струјања на радне делове.
- Употреба нових и усавршавање постојећих технологија и нових материјала за наношење антихабајућих превлака комплексно легираних са Cr, Mo, Nb, W, V, Ti, B, Co и другим елементима.

- Дефинисање технологије наношења антихабајућих превлака, предлог додатних и потрошних материјала са најприхватљивијим особинама заварљивости, као и дефинисање врсте и обима контроле нанесеног слоја.

7.3. ПРЕПОРУКЕ ЗА БУДУЋИ РАД

Кроз искуство стечено током израде ове дисертације, а у циљу даљег развоја и новог приступа анализи радних услова и решавања проблема заштите од хабања у термоенергетским постројењима, намеће се потреба за даљим истраживањима у овој области. Наиме, због све већих захтева у производњи електричне енергије и све тежих експлоатационих услова на површинским коповима (угаљ са све већим процентом минералних материја и песка), услови рада постројења су све неповољнији, што доводи до одступања од оптималних параметара рада и оштећења радних делова.

У вези тога требало би учинити следеће кораке:

- Поред освајања примене нових поступака и материјала у заштити од хабања, која је изведена у овој дисертацији, требало би истражити и могућности примене неких других поступака и материјала. Ово се свакако односи на даље усавршавање постојећих технологија као и на реконструкцију млинова и модификовање геометрије и димензија радних делова. Требало би анализирати и ефекат мљења (гранулација честица угља) након предложених модификација.
- Истраживања усмерити на освајање и имплементацију технологија израде (депоновања) прототипа антихабајућих превлака модификованог облика (редизајнирање) на радним деловима система вентилациони млин - канал аеросмеше (ВМ-КА).

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Strategija razvoja energetike republike srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. Godine, 2015 pp. 1-78
2. "Country Comparison Electricity - Consumption". CIA. 2013. Retrieved November 2014.
3. M. Gulić, Lj. Brkić, T. Živanović, M. Stojaković, Analiza rada ložišta i postrojenja za pripremu ugljenog praha kotla u TE gacko sa predlogom mera za poboljšanje, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1984.
4. Titosalv Živanović, Postrojenja za pripremu ugljenog praha sa ventialatorskim mlinovima, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, , ISBN 86-7083-381-6, 2000.
5. Mirko Kozić, Slavica Ristić, Mirjana Puharić, Boris Katavić, Primena metoda numeričke simulacije strujanja u ventilacionom mlinu, kanalu aerosmeše i okoline termoelektrana, monografija Institut Goša Beograd, ISSN 978-86-86917-15-7, 2011
6. Kozić M, Ristić S, Puharić M, Katavić B, Prvulović M, "Comparison of Numerical and Experimental Results for Multiphase Flow in Duct System of Thermal Power Plant," Scientific Technical Review, Vol. 60, 2010, p. 39-47.
7. Marko Ristic, Radica Prokic-Cvetkovic, MirkoKozic, SlavicaRistic, Boris Katavic; Wear reducing of ventilation mill suction plates based on the multidisciplinary research ; Journal of the Balkan Tribological Association; ISSN 1310-4772, Vol. 21, year 2015 book 3, pp 493-514
8. Marko Ristic, Ljiljana Radovanovic, Radica Prokic-Cvetkovic, Goran Otic, Jasmina Perisic, Ivana Vasovic, Increasing the energy efficiency of thermal power plant kostolac b by the revitalization of ventilation mills, Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, issn 1556-7257, doi: 10.1080/15567249.2015.1014977, year 2015.
9. Mirko Kozic, Slavica Ristic, Boris Katavic, Mirjana Puharic, "Redesign of impact plates of ventilation mill based on 3D numerical simulation of multiphase flow around a grinding wheel" Fuel Processing Technology, FUPROC-03583; 2012, No of Pages 14,
10. A. Alil, B. Katavić, M. Ristić, D. Jovanović, M. Prokolab, S. Budimir, M. Kočić, Structural and mechanical properties of different hard welded coatings for impact plate for ventilation mill, Welding and Material Testing 3 ,2011, p.7–11 (ISSN 1453-0392).
11. Youfu Ma, Yichao Yuana, Jing Jina, Hua Zhanga, Xiaohong Hua, Dengyu Shib, An environment friendly and efficient lignite- fired power generation proce ss based on a boiler with an open pulverizing system and the recovery of water from mill-exhaust, Energy 59 (2013) p.p. 105 -115.

12. Metals Handbook, 9th ed., Volume 18, Friction, lubrication and wear, ASM, Metals Park, Ohio, isbn978-1-61503-163-4, 1993, pp. 320-380.
13. M.Gulič, "Proračun ventilatorskih mlinova", Beograd, 1982.
14. B. Perković, A. Mazurkijević, V. Tarasek, Lj. Stević, Reconstruction, and realization of the projected modernization of power block B2 in the TE Costal, Termotehnika 1, 2004, p.57–81.
15. Termotehnička ispitivanja i analiza rada kotlovskih postrojenja blokova B1 i B2 u TE Kostolac (2007, 2008 godina), PD TENT d.o.o., Proizvodno-tehnički sektor
16. Thermo investigation and analysis of boiler plant blocks B1 and B2 in Costal TE, PD TENT Ltd. Production-technical sector, 2007, 2008 (internal study in Serbian),
17. B.Tasevski, B. Momirov, Shaft repair by metallizing, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 1/2005, (In Serbian) str. 23-28
18. Marko Popović, Zvonimir Jugović, Radomir Slavković, Integrisani pristup konstruisanja habajućih reznih elemenata kod rotornih bagera, SERBIATRIB`07 10th International Conference on Tribology
19. M. Ristic, Lj. Radovanovic, M. Prokolab, I. Vasovic, B. Katavic, Increase energy efficiency of thermal power plant Kostolac B by reducing wear of parts in ventilation mills, The Third IIW South –East European Welding Congress, Timisoara, Romaniaa, 3-5 June 2015, ISBN 978-606-554-955-5, pp 247-252,
20. A. Alil, B. Katavić, M. Ristić, D. Jovanović, M. Prokolab, S. Budimir, M. Kočić: Structural and mechanical properties of different hard welded coatings for impact plate for ventilation mill, Welding & Material Testing, Vol. 20, No. 3, pp. 7-11, 2011.
21. A. Vencl, B. Gligorijević, B. Katavić, B. Nedić, D. Džunić, Abrasive Wear Resistance of the Iron and WC based Hardfaced Coatings Evaluated with Scratch Test Method, Tribology in industry, vol. 35, No. 2, 2013, p. 123-127,
22. M.M. Yovanovich: Micro and macro hardness measurements, correlations, and contact models, in: Proceedings of the 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 09-12.01.2006, Reno, USA, Paper AIAA 2006-979.
23. Yugeswaran S., Selvarajan V., Seo D., Ogawa K., Effect of critical plasma spray parameter on properties of hollow cathode plasma sprayed alumina coatings, Surface and Coatings Technology, Vol.203, Issues 1-2, 2008,p.p. 129-136
24. M. Jovanović, V. Lazić, M. Mutavdžić, D. Adamović, Selection of the optimum reparation hard facing technology of the loading bucket teeth, Welding & welded structures, Original scientific paper, year L, Vol. 50, No. 1-66, (2005), pp. 11-20.
25. Navarivanje i nanošenje prevlaka, Moduo 1-Postupci zavarivanja i oprema za zavarivanje, Materijal IWE kurs, Institut Goša 2015

26. Slojevi naneti plazma lukom smanjuju radne troškove u procesiranju naftnih škrljaca, Castolin Eutectic, škola reparaturnog zavarivanja poglavlje 23, 2007.
27. Katavić Boris, Jegdić B., Odanović Zoran, Hut N., Mladenović M., Jaković D., Ristivojević M., Predviđanje optimalnih parametara interventnog reparaturnog zavarivanja čelika 13CrMo4-5 analitičkim metodama, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, vol. 55, br. 3, str. 91-96, 2010
28. B. Katavić, B. Jegdić, M. Prokolab, M. Prvulović, Stevan Budimir, Z. Milutinović, Optimal Parameters Estimation by the Analytical Methods for the Welding of the GS-36Mn5 Steel, Congress Welding 2012 & NDT 2012 / Proceedings of abstracts, ISBN 987-86-82585-10-7, 2012. p 51-51
29. European Product Catalogue, Wear and Fusion Technology, Castolin Eutectic International Co, Vienna.
30. www.it.jwes.or.jp/weld_simulator
31. M. Jovanović, D. Adamović, V. Lazić, N. Ratković, Engineering materials (in Serbian), Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac, 2003.
32. Bojan R. Gligorijević, Aleksandar Vencl, Boris T. Katavić, Characterization and comparison of the carbides morphologies in the near-surface region of the single- and double-layer iron-based hardfaced coatings, Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, Romania, Transactions on Mechanics, ISSN 1224 – 6077, vol. 57 (71), 2012, p. 15-21
33. Bojan R. Gligorijević, Aleksandar Vencl, Boris T. Katavić, Characterization and comparison of the carbides morphologies in the near-surface region of the single- and double-layer iron-based hardfaced coatings, Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, Romania, Transactions on Mechanics, ISSN 1224 – 6077, vol. 57 (71), 2012, p. 15-21
34. Chao Liu, Dongxiang Jiang , Fulei Chu, Jingming Chen, Crack cause analysis of pulverizing wheel in fan mill of 600 MW steam turbine unit, Engineering Failure Analysis, vol. 42, No. 2, 2014, p. 60-73
35. Chao Liu, Dongxiang Jiang b, Fulei Chu, Jingming Chen, Crack cause analysis of pulverizing wheel in fan mill of 600 MW, Engineering Failure Analysis 42 (2014) pp 60–73
36. Tan J.C., Looney L., Hashmi M.S.J., Component repair using HVOF thermal spraying, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 92-93, 1999 p.p. 203-208
37. A. Kushner and Edward R. Novinski, ASM Handbook Vol.18, Thermal Spray Coatings, Burton Perkin-Elmer Corporation, Metco Division, 1992, str
38. M.F. Buchely, J.C. Gutierrez, L.M. Le´on, A. Toro., "The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys", Wear 259, 2005, pp.52-61.

39. Šolar M., Bregant M., "Filler materials and application for repair welding," *Welding and Welded Structures*, vol. 51, No 2, 2006, p. 71-77,
40. Xinhong Wang, Fang Hanb, Xuemei Liu, Shiyao Qua, Zengda Zoua, "Microstructure and wear properties of the Fe–Ti–V–Mo–C hardfacing alloy," *Wear* 265, 2007, p. 583-589.
41. M. Kirchgauer, E. Badisch, F. Franek, Behavior of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact, *Wear* Vol.265, 2008, p.772-779.
42. Yi Zhou, Zhiqiang Huang, Fuxiao Zhang, Shuang Jing, Zhen Chen, Yachao Ma, Gang Li, Haitao Ren, Experimental study of WC–Co cemented carbide air impact rotary drill teeth based on failure analysis, *Engineering Failure Analysis*, vol. 36, 2013, p. 186-198
43. Li-feng Hou, Ying-hui Wei, Yong-gang Li, Bao-sheng Liu, Hua-yun Du, Chun-li Guo, Erosion process analysis of die-casting inserts for magnesium alloy components, *Engineering Failure Analysis*, vol. 33, 2013, p. 457-464
44. Correa E.O., Alcantara N.G., Tecco D.G. and Kumar R.V., "Development of an Iron–Based Hardfacing Material Reinforced with Fe-(TiW)C Composite Powder," *Metallurgical and Materials Transactions*, vol. 38 A, No 5, 2007, p. 937-945.
45. Seong-Hun C., Chang K.K., Kvangjun E., Sunghak L., Jae-Young J. and Sangho A., "Correlation of Microstructure with the Wear Resistance and Fracture Toughness of Hardfacing Alloys Reinforced with Complex Carbides," *Metallurgical and Materials Transactions*, vol. 31 A, No 12, 2000, p. 3041-3052.
46. Santanu Kr. R., Prasanta N., Mani S. M., "Development of chromium-rich hardfacing welded deposit using in situ carbothermic reduction," *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 11, 1992, p. 1469-1470,.
47. Lazić, V., Jovanović, M., Nedeljković, B., Ratković, N., Adamović, D., Josifović, D., Ocena materijala za navarivanje delova izloženi udarnom abrazivnom habanju, *Yutrib '05, Deveta jugoslovenska konferencija o tribologiji, Kragujevac, 15-18. Jun, 2005*
48. Branislav Nedeljković, Vukić Lazić, Srbislav Aleksandrović, Božidar Krstić, Milan Mutavdžić, Dragan Milosavljević, Milosav Đorđević, Influence of the carbide type on tribological properties of the hard faced layers, *Association of Metallurgical Engineers of Serbia*, Vol 16 (2) 2010 p. 77-90,
49. M. Mutavdžić, V. Lazić, M. Jovanović, D. Josifović, B. Krstić, Selection of the optimum technology of reparatory hard facing of the impact beams of the rotational crushing mills, *Welding & welded structures, Original scientific paper, No. 2, (2007), pp. 55-67.*
50. M. Jovanović, V. Lazić, M. Mutavdžić, D. Adamović., Selection of the optimal reparation hard facing technology for loading bucket teet, (In Serbian), *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, Vol.50, br.1, pp 11-20, 2005,

51. SRPS EN ISO 15614-7, Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala — Kvalifikacija tehnologije zavarivanja, Deo 7: Navarivanje, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd 2012.
52. C.-M. Chan, L.-H. Chen, C.-M. Lin, J.-H. Chen, C.-M. Fan, W. Wu, *Surface and Coatings Technology* 205 (2010) 245-250.
53. R.J. Chung, X. Tang, D.Y. Li, B. Hinckley, K. Dolman, *Wear* 267 (2009) 356-361.
54. K.-H. Zum Gahr: Wear by hard particles, *Tribology International*, Vol. 31, No. 10, pp. 587-596, 1998.
55. P.F. Mendez, N. Barnes, K. Bell, S.D. Borle, S.S. Gajapathi, S.D. Guest, H. Izadi, A. Kamyabi Gol, G. Wood: Welding processes for wear resistant overlays, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, No. 1, pp. 4-25, 2014.
56. S. Kumar, D.P. Mondal, H.K. Khaira, A.K. Jha: Improvement in high stress abrasive wear property of steel by hardfacing, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 8, No. 6, pp. 711-715, 1999.
57. R. Chotěborský, P. Hrabě, M. Müller, J. Savková, M. Jirka: Abrasive wear of high chromium Fe-Cr-C hardfacing alloys, *Research in Agricultural Engineering*, Vol. 54, No. 4, pp. 192-198, 2008.
58. Ö.N. Doğan, J.A. Hawk: Effect of carbide orientation on abrasion of high Cr white cast iron, *Wear*, Vol. 189, No. 1-2, pp. 136-142, 1995.
59. M. Jovanović, V. Lazić, M. Mutavdžić, D. Adamović, Selection of the optimal reparation hard facing technology for loading bucket teeth, *Zavarivanje i zavarene konstrukcije* (1/2005), str. 11-20
60. H. Riegger, Refurbishment of rollers in grinding mills, *Science, Research and Development, Zavarivanje i zavarene konstrukcije* (1/2010), str. 3-12)
61. C.Simonin, P.L.Viollet, "Predictions of an Oxygen Droplet Pulverization in a Compressible Subsonic Coflowing Hydrogen Flow", *Numerical Methods for Multiphase Flows*, FED91, 65-82,1990
62. Bhaster C., Numerical simulation of turbulent flow in complex geometries used in power plants, *Advances in Engineering software*, 33, 2002, pp.71-83,
63. Manninen M., Taivassalo V., Hjertager B.H., "On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion", 16th Symp. On Combustion, The Combustion Institute, 1976,
64. Katavić B., Kozić M., Ristić S., Puharić M., Numerička simulacija strujanja u ventilacionom mlinu termoelektrane Drmno-Kostolac- konfiguracija sa žaluzinama, *elaborat*, Institut Goša, 2009,

65. Kozić M., Puharić M., Ristić S., Katavić B., Kutin M., Numerička simulacija strujanja u ventilacijskom mlinu i kanalu aerosmeše termoelektrane Kostolac B, *Strojarstvo* 52, 3, 2010, pp.
66. M. Kozić, S. Ristić, M. Puharić, B. Katavić "Comparison of numerical and experimental results for multiphase flow in duct system of thermal power plant", *Scientific Technical Review*, Vol. 60, no.3-4, pp. 39-47, 2010.
67. M. Kozić, S. Ristić, M. Puharić, B. Katavić " Numerical simulation of multiphase flow in ventilation mill and channel with louvers and centrifugal separator ", *Thermal Science*, Volume , Number (), pp.-, 2011.
68. Y.C. Guoa, C.K. Chanb, A multi-fluid model for simulating turbulent gas-particle flow and pulverized coal combustion, *Fuel* 79 (2000) 1467±1476
69. Milić D. Erić, Dejan B. Cvetinović Predrag Lj. Stefanović, Predrag M. Radovanović, and Nikola V. Živković, Investigation of pressure pulsations in the furnace and flue gas tract of the pulverized coal combustion utility boiler, *Thermal Science: Year 2010*, Vol. 14, No. 1, pp. 261-270
70. Nikola V. Živković, Dejan B. Cvetinović, Milić D. Erić and Zoran J. Marković, Numerical analysis of the flue gas-coal particles mixture flow in burner's distribution channels with regulation shutters at the tpp nikola tesla – a1 utility boiler, *THERMAL SCIENCE: Year 2010*, Vol. 14, No. 2, pp. 505-520
71. Z.F. Tian, K. Inthavong, J.Y. Tu, G.H. Yeoh, Numerical investigation into the effects of wall roughness on a gas-particle flow in a 90° bend, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51 (2008) 1238–1250.
72. C. Bhaister, Numerical simulation of turbulent flow in complex geometries used in power plants, *Advances in Engineering Software* 33 (2002) 71–83.
73. B.T. Kuan, W. Yang, C. Solnordal, CFD simulation and experimental validation of dilute particulate turbulent flows in 90° duct bend, in: *Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 2003; 10/12 Dec. Proceedings, 2003*, pp. 531–536.
74. M. Kozić, S. Ristić, M. Puharić, B. Katavić, Primena metoda numeričke simulacije strujanja u ventilacionom mlinu, kanalu aerosmeše i okolini termoelektrane, *Институт Гоша, Београд* 2012.
75. M. Kozić, S. Ristić, M. Puharić, B. Katavić, Comparison of Euler–Euler and Euler–Lagrange approach in numerical simulation of multiphase flow in ventilation mill, in: *Third Serbian (28th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Vlasina Lake, Serbia, 5–8 July 2011*, 2011.
76. B. Pavković, Z. Čarija, V. Karuza, Numerical Analyses of Heat Transfer and Fluid Flow in Coal Depot and Mill, *Proceedings of the 2nd IASME / WSEAS International*

- Conference on Energy & Environment (EE'07), Portoroz, Slovenia, May 15-17, 2007, 40-43,
77. K.V. Shah, R. Vuthaluru, H.B. Vuthaluru, CFD based investigations into optimization of coal pulveriser performance: effect of classifier vane settings, *Fuel Processing Technology* 90 (2009) 1135–1141.
 78. Kamalesh S. Bhambare, Zhanhua Ma, Lu. Pisi, CFD modeling of MPS coal mill with moisture evaporation, *Fuel Processing Technology* 91 (2010) 566–571.
 79. Z. Mazur, R. Campos-Amezcuca, G. Urquiza-Beltran, A. Garcia-Gutierrez, Numerical 3D simulation of the erosion due to solid particle impact in the main stop valve of a steam turbine, *Applied Thermal Engineering* 24 (2004) 1877–1891.
 80. R. Vuthaluru, O. Kruger, M. Abhishek, V.K. Pareek, H.B. Vuthaluru, Investigation of wear pattern in a complex coal pulveriser using CFD modelling, *Fuel Processing Technology* 87 (2006) 687–694.
 81. D. Tucakovic, T. Zivanovic, V. Stevanovic, S. Belosevic, R. Galic, A computer code for the prediction of mill gases and hot air distribution between burners' sections at the utility boiler, *Applied Thermal Engineering* 28 (2008) 2178–2186.
 82. M. Sommerfeld, Analysis of collision effects for turbulent gas–particle flow in a horizontal channel: part I. Particle transport, *International Journal of Multiphase Flow* 29 (2003) 675–699.
 83. Goran Živković, Stevan Nemoda, Predrag Stefanović, and Predrag Padovanović, Numerical simulation of the influence of stationary louver and coal particle size on distribution of pulverized coal to the feed ducts of a power plant burner)
 84. Mohammad Zakir Hossain, Abdul Kalam Mohammad sadrul islam: Numerical investigation of fluid flow and heat transfer characteristics in sine, triangular, and arc-shaped channels, *Thermal science: Vol. 11 (2007), No. 1, pp. 17-26]*
 85. Marina Kutin, Ivana Vasovic, Mirko Maksimovic, Marko Ristic; Prediction of Residual Life Assesment Using Thermography and Crack Growth Analysis; *International Conference on Mechatronics and Applied Mechanics (ICMAM2011) Hong Kong, China Dec.27-28. 2011. ISSN: 1875-3892, Session 3, paper*
 86. Kuan B.T. CFD simulation of dilute gas-solid two-phase flows with different solid size distributions in a curved 90° duct bend, 2005, *Anziam J. (2005), C744-C763*

ПРИЛОЗИ:

9. БИОГРАФИЈА

Име и презиме: Марко Ристић

Датум рођења: 18.05.1986.

Место рођења: Смедеревска Паланка , Србија

Школовање:

1993-2001. Основна школа Херој Иван Мукер у Смедеревској Паланци

2001-2005. Средња Машинско-електротехничка школа Гоша у Смедеревској Паланци
смер машински техничар за компјутерско конструисање

2005-2010. Студије на Машинском факултету у Београду
модул Транспортно инжењерство конструкције и логистика

од 2013 Међународни инжењер заваривања IWE

од 2014 Међународни Инспектор заваривања IWI-C

Запослење:

2010-2010 Ватроспрем Београд

2010 Институт ГОША, Београд

Објављени научни радови:

Марко Ристић

Рад у међународном часопису – M23=3

1. **Marko Ristic**, Radica Prokic-Cvetkovic, MirkoKozic, SlavicaRistic, Boris Katavic; *Wear Reducing of Ventilation Mill Suction Plates Based on the Multidisciplinary Research*; Journal of the Balkan Tribological Association; ISSN 1310-4772, , Vol. 21, year 2015 book 3.
2. **Marko Ristic**, Ljiljana Radovanovic, Radica Prokic-Cvetkovic, Goran Otic, Jasmina Perisic, Ivana Vasovic, *Increasing the Energy Efficiency of Thermal Power Plant Kostolac B by the Revitalization of Ventilation Mills*, Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, year 2015, ISSN 1556-7257, DOI: 10.1080/15567249.2015.1014977.
3. J. Perisic, Lj. Radovanovic, M. Milovanovic, I. Petrovic, **M. Ristic**, M. Bugarcic, V. Perisic, Brine mixing mobile unit in oil and gas industry - An example of a cost-effective, efficient and environmentally justified technical solution, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Vol. 38, Issue 23, 2016, pp. 3470-3477, ISSN 1556-7230. DOI: 10.1080/15567036.2016.1153752.
4. J. Perisic, M. Milovanovic, I. Petrovic, Lj. Radovanovic, **M. Ristic**, V. Perisic, M. Vrbanac, Modelling and Risk Analysis of Brine Mixing Mobile Unit Operation Processes, Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, ISSN 1556-7257, UESB-2016-0164.R1, DOI:10.1080/15567249.2016.1259694.
5. Kovacevic, M., Lambic, M., Radovanovic, Lj., Kucora, I., **Ristic, M.**, 2016, Measures for Increasing Consumption of Natural Gas, Energy Sources Part B: Economics, Planning, and Policy, (UESB-2016-0085; DOI: 10.1080/15567249.2016.117 9359)

Радови категорије - M24 (=3)

1. **Marko Ristic**, Radica Prokic-Cvetkovic, Boris Katavic, Ivana Vasovic; *Selecting hardfacing technologies for ventialtion mill suction paltles and extending its working life*; Structural integrity an life; ISSN 1451-3749, Vol. 15, No 3, year 2015, pp 173-180

2. **Marko Ristic**, Radica Prokic-Cvetkovic, Mirko Kozic, Slavica Ristic, Mirko Pavisic, Numerical Simulation of Multiphase Flow Around Suction Plates of Ventilation Mill in the Function of Extending its Remaining Working Life, strane: ISSN: 1451-2092, Vol. 44, No 3, year 2016, pp 154-158

Рад у врхунском часопису националног значаја M51=2

1. Ivana Vasović, Mirko Maksimović, Marina Kutin, **Marko Ristić**, Numerical simulation in domains crack growth and welding process behaviors and comparative methods, Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timisoara, editura politehnica; ISSN 1224-6077; vol. 57(71), special ISSUE S1, 2012; pp 75-80
2. Marina Kutin, Miroslav Radosavljevic, Ivana Vasovic, **Marko Ristić**, Ana Alil, Milan Prokolab; Using the numerical simulations and comparative diagnostic methods to optimize the product; Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timisoara, editura politehnica; ISSN 1224-6077; vol. 57(71), special ISSUE S1, 2012; pp 31-40
3. A. Alil, B. Katavic, **M. Ristić**, M Kocic, D. Jovanović, M. Prokolab, S. Budimir, Structural and mechanical properties of different hard welded coatings for impact plate for ventilation mill, Structural Integrity of Welded Structures, vol 3/2011 Year XX, 2011. ISSN 1453-0392, pp 7-11
4. **Marko Ristic**, Mirjana Prvulovic, Milan Prokolab, Stevan Budimir, Miroslav Radosavljevic, Dragan Jovanovic, Zlatan Milutinovic, Numerical simulation of the cold-water pressure test and operating conditions for air reservoir, Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, Romania Transactions on mechanics. Tom 53 (67) ISSN 1224 – 6077, pp 73-76, year 2012.
5. **Marko Ristic**, Milorad Kocic, Ana Alil, Olivera Ilić, Jelena Ignjatović, Distribution of loads of cycloid speed reducer, Scientific bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, Romania Transactions on mechanics. Tom 53 (67) ISSN 1224 – 6077, pp 69-72, year 2012.
6. Marina Kutin, Ivana Vasovic, Mirko Maksimovic, **Marko Ristic**; Prediction of residual life assesment using thermography and crack growth analysis; Applied Mechanics and

Materials Vols. 157-158 (2012) Trans Tech Publications, Switzerland doi: 10.4028/www.scientific.net/ AMM.157-158.202 , pp 202-209

7. **Marko Ristic**, Bojan Gligorijević , Ana Alil, Boris Katavić , Marina Kutin , Dragan Jovanović, Stevan Budimir, Studies of the properties of different hard coatings resistant to wear, Scientific bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, Romania, Transactions on mechanics, issn 1224 - 6077 , year 2012.
8. Kutin Marina, Prokolab Milan, **Ristic Marko**, Alil Ana, Gligorijevic Bojan, Determination and analysis of the dynamic loaded screws by structural analysis, fractography and numerical simulation, Trans Tech Publications, Switzerland, Advanced Materials Research Vol. 814 (2013), pp 87-98, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.814.87
9. Milorad Kocic, Mirjana Prvulovic, Suzana Linic, **Marko Ristić**, Milan Prokolab , Computer simulation of spray deposition process for Al1.0Si0.6Mg0.6Mn alloy, The Bulletin of the National R&D Institute for Welding and Material Testing ISIM Timișoara, Romania, pp 09-12, ISSN 1453-0392, year 2013.
10. Stevan Budimir, Ana Alil, **Marko Ristic**, Milorad Kocic, Boris Katavic, Analysis of compressor valves bolts failure, The Bulletin of the National R&D Institute for Welding and Material Testing ISIM Timișoara, Romania, pp 13-16, ISSN 1453-0392, year 2013.
11. Ivana Vasovic, **Marko Ristić**, Miroslav Radosavljevic, Zlatan Milutinovic, Milorad Kocic, Analysis of compressor valves bolts failure, The Bulletin of the National R&D Institute for Welding and Material Testing ISIM Timișoara, Romania, pp 19-22, ISSN 1453-0392, year 2013.
12. Vasovic Ivana, **Ristic Marko**, Ristic Slavica, Maksimovic Mirko, Stamenkovic Dragi; Numerical modeling and initial fatigue life estimations of welded structural components; Advanced Materials Research Vol. 1029 (2014) pp 124-129, Trans Tech Publications, Switzerland, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1029.124. , ISSN web 1662-8, year 2014.
13. Milutinovic Zlatan, **Ristic Marko**, Vasovic Ivana, Prokolab Milan, Gligorijevic Bojan; Analyzing properties of new hard coating technologies for increasing the wear resistance; Advanced Materials Research Vol. 1029 (2014) pp 112-117, Trans Tech Publications, Switzerland, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1029.112., ISSN web 1662-8, year 2014.

14. M. Kočić, A. Vencl, I. Bobić, **M. Ristić**, M. Antić, Z. Milutinović, Joining of composite materials based on al-si alloys by using the gmax PROCESS, *Welding & Material Testing*, pp. 9-12, year XXIII, no.3/2014. issn 1453-0392
15. Ana Alil, **Ristić Marko**, Stanković Miloš, Ristić Miloš, Repair of Steel Construction of Truck-mounted Crane Tadaho tl200ii/k, Sanacija Celicne Konstrukcije Strele Samohodne Autodizalice Tadaho tl200ii/k, *Zavarivanje I zavarene konstrukcije (Welding & Welded structures)*, Društvo za unapredjenje zavarivanja u Srbiji (Serbian Welding Society), year 2014, ISSN 0354-7965, SR-ID 105396743, pp 169-174
16. M. Milovanović, J. Perišić, S. Vukotić, M. Bugarčić, Lj. Radovanović, **M. Ristić**, Learning mathematics using multimedia in engineering education, *Acta technica corviniensis - Bulletin of Engineering Faculty of Engineering – Hunedoara, University Politehnica Timisoara*, 2016, volume IX, number 1, pp. 45-49. ISSN: 2067-3809
17. Mirjana Prvulovic, **Marko Ristic**, Stevan Budimir, Milan Prokolab, Zlatan Milutinovic, Prediction of stress distribution of pressure vessel shell using numerical simulation, *Welding and Material Testing, ISIM Timisoara, Volume 2-2016*, pp. 9-12 ISSN: 1456-0392
18. Dušan Jovanić, Zlatan Milutinović, **Marko Ristić**, Određivanje uticaja elektromagnetnog polja aparata za zavarivanje na bezbednost i zaštitu zdravlja, Determination of the welding machine electromagnetic field effect on health safety and protection, *Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji - DUZS, Volume 2-2016*, pp. 53-62 ISSN: 0354-7965 UDK / UDC: 613.64; 331.45/.46:621.791

Саопштење са међународног скупа штампано у целини – М33 = 1

1. M. Kutin, S. Ristic, M. Puharic, **M. Ristic** Tensile Features of Hole in Plate Specimen Testing by Thermography and Conventional Method Third Serbian (28th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics Vlasina lake, Serbia, 5-8 July 2011, ISBN 978-86-909973-3-6, pp 563-573,
2. A. Alil, B. Katavic, **M. Ristić**, M Kocic, D. Jovanović, M. Prokolab, S. Budimir, Structural and Mechanical Properties of Different Hard Welded Coatings for Impact Plate

for Ventilation Mill, The 5th International Conference Timisoara – Innovative technologies for joining advanced materials, year 2011, ISSN 1844-4938, Section 1 Quality of welded joint and welded structures,.

3. Mirjana Prvulovic, Milan Prokolab, Stevan Budimir, **Marko Ristic**, Miroslav Radosavljevic, Dragan Jovanovic, Computation of Pressure Increase of the Liquid Carbon Dioxide During Storage Time, 4th international scientific conference on defensive technologies OTEX 2011, Belgrade, Serbia, 6-7 October 2011, ISBN 978-86-81123-50-8, pp 668-674,
4. B. Gligorijevic, B. Katavic, A. Alil, B. Jegdic, **M. Ristic**, M. Prokolab, Analysis of a Floating-Head Heat Exchanger Bolts Failure, International Conference “Structural integrity of welded structures” Timisoara Romania, 3-4 November 2011, ISSN 1842-5518, Session I – Metallic structures, Paper 2
5. **M.Ristić**, M., Kočić, M., Vasović, I., Milutinoić, Z., Ilic, O., Obradović, J.; Testing the Stability of Portal Crane; I International Conference - Process Technology And Environmental Protection (PTEP 2011); Technical faculty “Mihajlo Pupin”, Zrenjanin, University of Novi Sad; ISBN: 978-960-98780-6-7; COBISS. SR-ID 267866119; pp 124 – 131,
6. Marina Kutin, Ivana Vasovic, Mirko Maksimovic, **Marko Ristic**; Prediction of Residual Life Assesment Using Thermography and Crack Growth Analysis; International Conference on Mechatronics and Applied Mechanics (ICMAM2011) Hong Kong, China Dec.27-28. 2011. ISSN: 1875-3892, Session 3, paper 6,
7. Ana Alil, Bore Jegdić, Biljana Bobić, **Marko Ristić**, Corrosion Behaviour of an al-zn-mg-cu Alloy After Different Heat Treatments, II International Conference - Industrial Engineering and Environmental Protection (IIZS 2012), echnical faculty “Mihajlo Pupin”, Zrenjanin, University of Novi Sad, ISBN: 978-86-7672-184-9, SR-ID 274556935, pp 121-129,
8. Branko Skoric, Milan Arsenović, Marina Kutin, Ivana Vasovic, **Marko Ristic**, Thermography and Numerical Simulations with Respects to Stress State and Fracture of Continuous Cast Specimens Made of Bronze Alloy, Forth Serbian (29th Yu) Congress on

Theoretical and Applied Mechanics Vrnjačka Banja, Serbia, 4-7 June 2013, Serbian Society of Mechanics, ISBN: 978-86-909973-5-0, SR-ID 198308876, pp 485-490

9. **Ristic Marko**, Perisic, Jasmina, Radovanovic, Ljiljana, Adamovic, Zivoslav, Failure Analysis of the Ventilation Mills in Power Plant and Proposals for Their Revitalization, Forth Serbian (29th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics Vrnjačka Banja, Serbia, 4-7 June 2013, ISBN 978-88-908185, paper 664
10. Ivana Vasović, **Marko Ristić**, Mirjana Opačić, Mirko Maksimović, Stress Analyses of Connection of Turntable with Chassis of Articulated Bus Using Software Package Catia and Comparative Methods, III International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection, 30. Oktober, 2013, Zrenjanin, , ISBN 978-86-7672-208-2, COBISS SR-ID 274556935, pp 140-146,
11. J. Perišić, M. Milovanović, M. Bugarčić, M. Vrbanac, **M. Ristić**, Using semantic web based tools in engineering education, VI International Conference Industrial Engineering And Environmental Protection 2016 (IIZS 2016), Technical faculty "Mihajlo Pupin" Zrenjanin, University of Novi Sad, October 13-14th October, 2016, Zrenjanin, Serbia, pp. 1-7. ISBN: 978-86-7672-293-8.
12. M. Vrbanac, M. Milovanović, M. Bugarčić, J. Perišić, Lj. Radovanović, **M. Ristić**, Education and promotion of women entrepreneurs, VI International Conference Industrial Engineering And Environmental Protection 2016 (IIZS 2016), Technical faculty "Mihajlo Pupin" Zrenjanin, University of Novi Sad, October 13-14th October, 2016, Zrenjanin, Serbia, pp. 14-19. ISBN: 978-86-7672-293-8.
13. I. Stošić, J. Perišić, M. Milovanović, M. Vrbanac, Lj. Radovanović, **M. Ristić**, Hydropower plants of tomorrow, VI International Conference Industrial Engineering And Environmental Protection 2016 (IIZS 2016), Technical faculty "Mihajlo Pupin" Zrenjanin, University of Novi Sad, October 13-14th October, 2016, Zrenjanin, Serbia, pp. 228-234. ISBN: 978-86-7672-293-8.
14. M. Bugarčić, M. Milovanović, J. Perišić, **M. Ristić**, j. Bugarčić, Monetary union in theory and practice, VI International Conference Industrial Engineering And Environmental Protection 2016 (IIZS 2016), Technical faculty "Mihajlo Pupin"

Zrenjanin, University of Novi Sad, October 13-14 th October, 2016, Zrenjanin, Serbia, pp. 296-301. ISBN: 978-86-7672-293-8.

15. M. Milovanović, J. Perišić, M. Vrbanac, I. Stošić, **M. Ristić**, Computer tools in engineering education – example on macromedia flash, VI International Conference Industrial Engineering And Environmental Protection 2016 (IIZS 2016), Technical faculty "Mihajlo Pupin" Zrenjanin, University of Novi Sad, October 13-14 th October, 2016, Zrenjanin, Serbia, pp. 312-317. ISBN: 978-86-7672-293-8.

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу – M34 =0.5

1. Ivana Vasović, Mirko Maksimović, Marina Kutin, **Marko Ristić**, Numerical simulation in domains crack growth and welding process behaviors and comparative methods, The XIVth International Symposium “Young People and Multidisciplinary Research” Organizer: ACM-V, Timisoara, Romania, November 15-16, 2012. pp 15. (TR 34028) i (TR 35045)
2. Ivana Vasovic, **Marko Ristić**, Miroslav Radosavljevic, Zlatan Milutinovic, Milorad Kocic; Stress analyses and optimization of bus chassis using software package catia and comparative methods; XV International Symposium „Young People and Multidisciplinary Research“; Timisoara, Romania, 14-15 November 2013. TR 34028 I TR 35045
3. Vasovic Ivana, Ristic **Marko, Ristic**, Slavica, Maksimovic Mirko, Stamenkovic Dragi; Numerical Modeling and Initial Fatigue Life Estimations of Welded Structural Components; Romania 2014 TR 34028 I TR 35045
4. Milutinovic Zlatan, **Ristic Marko**, Vasovic Ivana, Prokolab Milan, Gligorijevic Bojan; Analyzing Properties of New Hard Coating Technologies for Increasing the Wear Resistance; Romania 2014 TR 34028
5. I. Vasović, M. Maksimović, K. Maksimović, **M. Ristić**; Numerical Simulation of Temperature Field and Residual Stresses in Butt Welded Joint; The 8th International Conference, Innovative technologies for joining advanced materials, 2-3 June 2016, Romania.
6. M. Prvulovic, **M. Ristic**, S. Budimir, M. Prokolab, Z. Milutinovic; Prediction of Stress Distribution of Pressure Vessel Shell Using Numerical Simulation; The 8th International

Conference, Innovative technologies for joining advanced materials, 2-3 June 2016, Romania.

Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини **M63=0,5**

1. **Marko Ristic**, Zlatan Milutinovic, Milan Prokolab, Milorad Kocic, Stevan Budimir, Analyzing of tribological and structural properties a of wear resistant coatings, Savetovanje Zavarivanje 2014, Borsko jezero –Jun 2014, ISBN 978-86-82585-11-4, COBISS.SR-ID 207486732

Техничка решења M83=4

1. Борис Катавић, Мирко Козић, Мирјана Првуловић, Милан Проколаб, Мирјана Пухарић, **Марко Ристић**, Славица Ристић, Редизајнирање радних површина ударних и уисних плоча вентилационог млина термоелектране Костолац Б новом технологијом репаратурног наваривања (M83), 2014 Редизајнирање радних површина ударних и уисних плоча вентилационог млина термоелектране Костолац Б новом технологијом репаратурног наваривања

Учешће на међународним пројектима

1. Од 13.09.2013. до 13.03.2015. био је ангажован на међународном, међуграничном пројекту Србија-Румунија, носилац пројекта је био Институт ИСИМ из Темишвара. Назив пројекта је Партнерство и технолошка подршка за сарадњу између Истаживачко развојних институција и малих и средњих предузећа у пограничном региону - PARTECH , MIS - ETC Kod : 1396.
2. Од 25.09. 2015. ангажован је на међународном, међуграничном пројекту Србија-Румунија, носилац пројекта је био Институт ИСИМ из Темишвара. Назив пројекта је Training in Industrial Risk Management (Тренинг кадрова за препознавање опсаности у индустријским постројењима)- T-IRM , MIS - ETC Kod : 1412.

Учешће у организационим одборима

1. XVth Symposium "Young People and Multidisciplinary Research" 14 - 15 November 2013 Timisoara, Member of Organizing Committee
<http://www.acmv.ro/j/lang-ro/simpozion-2013/157-comitetul-de-organizare-acmv.html>
The symposium is organize by the Association for Multidisciplinary Research (ACM-V), the University "Politehnica" of Timisoara and the West University "Vasile Goldiș" Arad under de aegis of the Ministry of National Education Republic Romania
2. XVth Symposium "Young People and Multidisciplinary Research" 15 - 16 November 2014 Timisoara, Member of Organizing Committee
3. XVth Symposium "Young People and Multidisciplinary Research" 14 - 16 November 2015 Timisoara, Member of Organizing Committee

Учешће на пројектима финансираним од Министарства просвете, науке и технолошког развоја

1. Истраживање и оптимизација технолошких и функционалних перформанси вентилационог млина термоелектране Костолац Б, бр. ТР – 34028 / 2011. – 2016. год. Руководилац пројекта др Борис Катавић.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Марко Ристић

број индекса Д74/10

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

МЕТОДОЛОГИЈА ПРОДУЖЕТКА РАДНОГ БЕКА ДЕЛОВА ВЕНТИЛАЦИОНИХ

МЛИНОВА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 08.03.2017.



Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

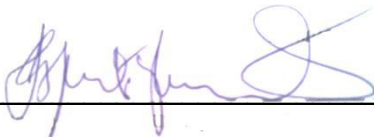
Име и презиме аутора Марко Ристић

Број индекса Д74/10

Студијски програм Докторске студије

Наслов рада МЕТОДОЛОГИЈА ПРОДУЖЕТКА РАДНОГ ВЕКА ДЕЛОВА
ВЕНТИЛАЦИОНИХ МЛИНОВА

Ментор проф. др Радица Прокић-Цветковић

Потписани/а 

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 08.03.2017.



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

МЕТОДОЛОГИЈА ПРОДУЖЕТКА РАДНОГ БЕКА ДЕЛОВА ВЕНТИЛАЦИОНИХ

МЛИНОВА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 08.03.2017.

