



**UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA**



Zorana Lanc

**RAZVOJ INOVATIVNE METODE
PROCENE RIZIKA OD KONTAKTNIH
TERMIČKIH OPEKOTINA
IZAZVANIH VRUĆIM METALNIM
POVRŠINAMA MAŠINA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentori:
prof. dr Milan Zeljković
prof. dr Miodrag Hadžistević

Novi Sad, 2023. godine

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Зорана Ланц
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција)	др Милан Зељковић, редовни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад др Миодраг Хаџистевић, редовни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад
Наслов рада:	Развој иновативне методе процене ризика од контактних термичких опекотина изазваних врућим металним површинама машина
Језик публикације (писмо):	Српски (латиница)
Физички опис рада:	Унети број: Страница: <u>152</u> Поглавља: <u>8</u> Референци: <u>179</u> Табела: <u>47</u> Слика: <u>48</u> Графикона: <u>0</u> Прилога: <u>6</u>
Научна област:	Инжењерство заштите животне средине и заштите на раду
Ужа научна област (научна дисциплина):	Инжењерство заштите на раду
Кључне речи / предметна одредница:	Процена ризика, КТО, ИЦ камера, вруће металне површине
Резиме на језику рада:	Иновативна метода процене ризика од контактних термичких опекотина (КТО) изазваних врућим металним површинама машина и производа има за циљ да омогући квантификацију ризика од КТО, одређивањем тежине КТО у зависности од степена КТО и величине вруће металне површине. Коришћењем инфрацрвене (ИЦ) камере могуће је измерити температуру читаве вруће металне површине и приказати зоне ризика од КТО, са њиховом тачном локацијом и величином, што има свој практични значај код пројектовања машина и производа, али и радних места где постоје овакве површине.
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	27.11.2020.
Датум одбране: (Попуњава одговарајућа служба)	

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

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

5г – Изјава о коришћењу.

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

<p>Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)</p>	<p>Председник: др Иван Крстић, редовни професор, Факултет заштите на раду, Ниш</p> <p>Члан: др Ненад Степић, редовни професор, Медицински факултет Војномедицинске академије, Београд</p> <p>Члан: др Бранко Штрбац, ванредни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад</p> <p>Члан: др Маја Петровић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад</p> <p>Члан (ментор): др Милан Зељковић, редовни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад</p> <p>Члан (ментор): др Миодраг Хаџистевић, редовни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад</p>
<p>Напомена:</p>	

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Zorana Lanc
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	PhD Milan Zeljković, Full professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad PhD Miodrag Hadžistević, Full professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad
Thesis title:	Development of an innovative method for risk assessment of contact thermal burns caused by hot metal surfaces of machines
Language of text (script):	Serbian language (Latin)
Physical description:	Number of: Pages: <u>152</u> Chapters: <u>8</u> References: <u>179</u> Tables: <u>47</u> Illustrations: <u>48</u> Graphs: <u>0</u> Appendices: <u>6</u>
Scientific field:	Environmental and Occupational Safety Engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Occupational Safety Engineering
Subject, Key words:	Risk assessment, CTB, IR camera, hot metal surfaces
Abstract in English language:	An innovative method for risk assessment of Contact Thermal Burn (CTB) caused by hot metal surfaces of machines and products aims to quantify the risk of CTB by determining the severity of CTB depending on the degree of CTB and the size of the hot metal surface. By using the infrared (IR) camera it is possible to measure the temperature on the entire hot metal surface and show CTB risk zones, with their exact location and size, which has its practical importance in the design of machines and products as well as workplaces where there are hot metal surfaces.
Accepted on Scientific Board on:	November, 27 2020
Defended: (Filled by the faculty service)	

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

56 – Statement on the authority,

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

5r – Statement on copyright licenses.

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

<p>Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution)</p>	<p>President: Dr. Ivan Krstić, Full Professor, Faculty of Occupational Safety, Niš</p> <p>Member: Dr. Nenad Stepić, Full Professor, Faculty of Medicine, Military Medical Academy, Belgrade</p> <p>Member: Dr. Branko Štrbac, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad</p> <p>Member: Dr. Maja Petrović, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad</p> <p>Member (Mentor): Dr. Milan Zeljković, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad</p> <p>Member (Mentor): Dr. Miodrag Hadžistević, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad</p>
<p>Note:</p>	

REZIME

Dužnost proizvođača jeste da, u skladu sa Direktivom 2006/42/EZ o bezbednosti mašina, sprovede procenu rizika, kako bi utvrdio koji zahtevi za zaštitu zdravlja i bezbednost se moraju primeniti za mašinu. Nakon toga, mašina se projektuje i izrađuje uzevši u obzir rezultate ove procene. Ponavljanjem procene rizika proizvođač smanjuje rizik i određuje ograničenja mašine, u slučaju njene predviđene i svake razumno predvidive nepravilne upotrebe. Takođe, on utvrđuje opasnosti koje mašina može proizvesti i sa tim u vezi opasne situacije, kako bi ih eliminisao ili smanjio rizik od istih na najmanju moguću meru primenom adekvatnih zaštitnih mera. Jedan od bitnih zahteva za zaštitu zdravlja i bezbednosti u pogledu projektovanja i izrade mašine, prema Direktivi 2006/42/EZ, jeste i zahtev za ekstremne temperature. Zahtev nalaže da se moraju preduzeti sve mere za otklanjanje rizika od povrede izazvane dodiranjem delova mašine ili materijala visoke ili veoma niske temperature. U vezi zahteva za ekstremne temperature, objavljen je standard EN ISO 13732-1:2006 Ergonomija toplotne sredine - Metoda za ocenu odgovora čoveka na kontakt sa površinom - Deo 1: Vruće površine. U standardu je prikazana metoda procene rizika od kontaktnih termičkih opekotina (KTO) izazvanih vrućim površinama mašina i proizvoda. Standard definiše granične uslove za vruće površine pri kojima će doći do KTO, odnosno temperaturu, T_{KTO} i period kontakta, D_{KTO} . Nedostatak ove metode jeste nemogućnost definisanja težine KTO, koja je neophodna za kvantifikaciju rizika od KTO. Pored navedenog, granični uslovi su bazirani na istraživanjima sprovedenim u periodu od 1947. do 1989. godine, a merenje temperature se izvodi u izabranim tačkama pomoću termoparova. Zbog toga, predložena je inovativna metoda procene rizika od KTO, primenom infracrvene termografije (ICT), koja predstavlja beskontaktnu metodu merenja temperature. Metalne površine su izabrane zbog njihovog velikog udela kod mašina i proizvoda i zato što su metali, usled odlične sposobnosti provođenja toplote, najrizičniji sa aspekta nastanka KTO u odnosu na druge materijale. Kvantifikacija rizika od KTO omogućena je određivanjem težine KTO. Težina KTO je definisana pomoću dva faktora: veličine vruće metalne površine i stepena KTO. Stepeni KTO su određeni u zavisnosti od T_{KTO} i D_{KTO} , pomoću tabele u kojoj su objedinjeni granični uslovi iz velikog broja istraživanja, dok je veličina vruće metalne površine dovedena u vezu sa veličinom opečene površine koja može dovesti do nastanka lake, srednje i teške KTO. Sa druge strane, za merenje temperature korišćena je infracrvena (IC) kamera, čiji se princip rada zasniva na ICT. IC kamera omogućava prikaz temperature čitave posmatrane površine na IC slikama, za razliku od termoparova. Ova prednost je iskorišćena kako bi se na IC slikama definisale zone rizika od KTO na vrućim metalnim površinama mašina i proizvoda. Problem primene ICT za merenje temperature jeste određivanje emisivnosti metala, od kojeg je izrađena metalna površina, a koja uslovljava tačnost merenja. Emisivnost metala zavisi od mnogih faktora, zbog čega su u disertaciji sprovedena eksperimentalna ispitivanja, sa ciljem izvođenja zaključaka i davanja smernica za određivanje emisivnosti premazanih i nepremazanih metalnih površina. Inovativna metoda procene rizika od KTO omogućava kvantifikaciju i vizuelnu interpretaciju zona rizika od KTO na čitavoj vrućoj metalnoj površini, što je od koristi kod projektovanja ne samo mašina i proizvoda, nego i radnih mesta gde postoje ovakve površine.

ABSTRACT

The manufacturer of machinery must ensure, following the Machinery Directive 2006/42/EC, that the risk assessment is carried out in order to determine the health and safety requirements which apply to the machinery. The machinery must be designed and constructed, taking into account the results of the risk assessment. By the iterative process of risk assessment and its reduction, the manufacturer determines the limits of the machinery, which include the intended use and any reasonably foreseeable misuse thereof. Also, manufacturer identifies the hazards that can be generated by the machinery and the associated hazardous situations, estimates and evaluates the risks, and eliminates the hazards or reduce the risks associated with these hazards, by application of protective measures. One of the essential health and safety requirements relating to the design and construction of machinery according to Machinery Directive 2006/42/EC is extreme temperatures. The request mandates that steps must be taken to eliminate any risk of injury arising from contact with or proximity to machinery parts or materials at high or very low temperatures. Also, necessary steps must be taken to avoid or protect against the risk of hot or very cold material being ejected. All health and safety requirements apply only when there is a corresponding danger in the use of the machine and the conditions foreseen by the manufacturer for cases of improper use of the machine. Regarding the requirement for extreme temperatures, the standard EN ISO 13732-1:2006 Ergonomics of the thermal environment - Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces - Part 1: Hot surfaces, was published. The standard presents a method for risk assessment of Contact Thermal Burn (CTB) caused by hot metal surfaces of machines and products. EN ISO 13732-1:2006 defines the burn thresholds for hot surfaces at which the CTB will occur, and that is the temperature, T_{CTB} , and the contact period, D_{CTB} . The disadvantage of this method is the impossibility to determine the severity of CTB, a necessary risk factor for the quantification of the risk of CTB. In addition to the above, burn thresholds are based on research conducted in the period from 1947 to 1989, and temperature measurement is performed only at selected places on the hot surface using thermocouples. Due to all of the above, an innovative method for risk assessment of CTB, using Infrared Thermography (IRT) as a non-contact method of temperature measurement, is presented. Metal surfaces are chosen because of their large share in machines and products and because metals have the highest risk from the aspect of CTB, due to their excellent ability to conduct heat, compared to other materials. Quantification of the risk of CTB is enabled by determining the severity of CTB. The severity of CTB is defined by two factors: the size of the hot metal surface and the degree of CTB. The degrees of CTB are determined depending on T_{CTB} and D_{CTB} , using a table in which the burn thresholds from a large number of studies are combined, while the size of the hot metal surface is related to the required size of the burn surface to cause the minor, moderate or major CTB. On the other hand, an infrared (IC) camera was used to measure the temperature, which working principle is based on ICT. Unlike thermocouples, an IR camera enables the temperature of the entire observed surface to be displayed on IR images. This advantage was used to define the risk zones of CTB on hot metal surfaces of machines and products on IR images. The problem with using IRT for measuring the temperature is determining the emissivity of the metal from which the metal surface is made in order to conduct accurate IR measurements. The emissivity of metals depends on many factors, which is why experiments were carried out in the dissertation, to draw conclusions and provide guidelines for determining the emissivity of coated and uncoated metal surfaces. Innovative method for risk assessment of CTB allows quantification and visual interpretation of the CTB risk zones on the entire hot metal surface, which is useful in the design of not only machines and products, but also workplaces where such surfaces exist.

ZAHVALNICA

Zahvaljujem se mentorima, prof. dr Milanu Zeljkoviću i prof. dr Miodragu Hadžisteviću na pomoći, savetima i podršci, čije su konstruktivne kritike, sugestije i smernice bile od velike važnosti za izradu doktorske disertacije.

Hvala svim kolegama sa Departmana za proizvodno mašinstvo na izdvojenom vremenu i metodološkoj podršci, a posebno kolegama sa Katedre za mašine alatke, tehnološke procese, fleksibilne tehnološke sisteme i procese projektovanja, zatim kolegama sa Katedre za materijale i tehnologije spajanja, kao i kolegama sa Katedre za tehnologije oblikovanja materijala i inženjerstvo površina.

Posebnu zahvalnost dugujem kolegama sa Katedre za metrologiju, kvalitet, pribore, alate i ekološko-inženjerske aspekte, na nesebičnoj pomoći i višegodišnjoj uspešnoj saradnji.

Veliku zahvalnost dugujem mojoj porodici, mom ocu Darku, mami Ilinki, baki Zori, tetki Maleni i mom bratu Željku i njegovoj porodici, na ljubavi i na svemu što su učinili za mene, a posebno mojoj bratičini Leonori na ogromnoj sreći i osmehu koji je unela u naše živote.

Na kraju, zahvaljujem se Aleksandru na razumevanju za sve godine truda i rada koje sam posvetila ovom poduhvatu, na bezuslovno pruženoj ljubavi i poverenju. Uspeli smo!

SADRŽAJ

SPISAK SLIKA	I
SPISAK TABELA	III
SPISAK SKRAĆENICA.....	V
1. UVOD.....	1
1.1 Problem i potreba za istraživanjem.....	2
1.2 Ciljevi i hipoteze istraživanja	3
1.3 Očekivani rezultati istraživanja	4
1.4 Struktura disertacije	4
2. KONTAKTNE TERMIČKE OPEKOTINE	6
2.1 Nastanak opekotina	7
2.2 Etiologija opekotina	8
2.3 Klasifikacija opekotina	8
2.3.1 Klasifikacija opekotina prema procentu opečene površine	9
2.3.2 Klasifikacija prema dubini (stepenu) opekotina.....	10
2.3.3 Klasifikacija prema težini opekotine	12
2.4 Aktuelno stanje u oblasti graničnih uslova za KTO za metalne površine.....	13
2.4.1 Prve empirijske studije u oblasti KTO za metalne površine.....	14
2.4.2 Standardi iz oblasti najviše dozvoljenih temperatura vrućih površina mašina i proizvoda	18
2.4.3 Novija istraživanja u oblasti graničnih uslova za KTO za metalne površine.....	22
3. METODE PROCENE RIZIKA	27
3.1 Aktuelno stanje u oblasti kvalitativnih metoda procene rizika	29
3.1.1 Matrična metoda procene rizika 3×3.....	29
3.1.2 Matrična metoda procene rizika prema američkom vojnom standardu.....	30
3.2 Aktuelno stanje u oblasti kombinovanih metoda procene rizika.....	31
3.2.1 Kinney metoda procene rizika.....	31
3.2.2 PILZ metoda procene rizika	33
3.2.3 Guardmaster metoda procene rizika	35
3.3. Aktuelno stanje u oblasti kvantitativnih metoda procene rizika	37
3.4 Metoda procene rizika od KTO prema standardu EN ISO 13732-1:2006.....	37
3.4.1 Identifikacija vruće (dodirne) površine	38
3.4.2 Analiza zadatka	38

3.4.3	Merenje temperature vruće površine.....	39
3.4.4	Izbor odgovarajuće T_{KTO}	39
3.4.5	Poređenje izmerene temperature vruće površine i usvojene T_{KTO}	40
3.4.6	Određivanje nivoa rizika od KTO.....	40
3.4.7	Ponavljjanje procedure procene rizika od KTO.....	40
3.4.8	Nedostaci metode procene rizika od KTO.....	40
4.	INFRACRVENA TERMOGRAFIJA.....	42
4.1	Podela infracrvene termografije.....	43
4.2	Osnove prenosa toplote zračenjem.....	45
4.2.1	Infracrveni elektromagnetni spektar.....	47
4.2.2	Prenos toplote zračenjem sa površine i između površine i okoline.....	48
4.2.3	Zračenje idealno crnog tela.....	50
4.2.4	Planck zakon.....	51
4.2.5	Wien zakon.....	53
4.2.6	Stefan-Boltzmann zakon.....	53
4.2.7	Zračenje realnih tela.....	53
4.2.8	Kirchhoff zakon.....	55
4.3	Detektori infracrvenog zračenja.....	56
4.3.1	Princip rada detektora infracrvenog zračenja.....	56
4.3.2	Princip rada mikrobolometara.....	57
4.4	Infracrvena kamera.....	58
4.4.1	Transmisija vazduha za infracrveno zračenje.....	59
4.4.2	Princip formiranja infracrvene slike.....	60
4.4.3	Prednosti i nedostaci infracrvene kamere.....	61
4.4.4	Određivanje emisivnosti infracrvenom kamerom.....	63
4.5	Aktuelno stanje u oblasti emisivnosti metala.....	64
5.	ISPITIVANJE EMISIVNOSTI METALNIH POVRŠINA.....	68
5.1	Ispitivanje emisivnosti nepremazanih metalnih površina.....	68
5.1.1	Izbor materijala za ispitivanje emisivnosti nepremazanih metalnih površina.....	68
5.1.2	Priprema i oznake uzoraka.....	70
5.1.3	Merenje površinske hrapavosti uzoraka.....	70
5.1.4	Opis uređaja i eksperimentalne postavke.....	71
5.1.5	Metodologija određivanja emisivnosti uzoraka.....	72
5.1.6	Statistička analiza rezultata ispitivanja.....	74
5.1.7	Rezultati ispitivanja emisivnosti legure aluminijuma AlSi1MgMn.....	75
5.1.8	Rezultati ispitivanja emisivnosti konstrukcionog čelika S235.....	78
5.1.9	Rezultati ispitivanja emisivnosti mesinga CuZn37.....	80

5.2 Ispitivanje emisivnosti premazanih metalnih površina	82
5.2.1 Izbor premaza za ispitivanje uticaja debljine i vrste premaza na emisivnost metalnih površina	83
5.2.2 Izbor materijala za ispitivanje uticaja vrste metala na emisivnost premazanih metalnih površina	83
5.2.3 Priprema i oznake uzoraka	84
5.2.4 Merenje debljine premaza i površinske hrapavosti uzoraka	86
5.2.5 Opis uređaja i eksperimentalna postavka	88
5.2.6 Metodologija određivanja emisivnosti uzoraka	88
5.2.7 Rezultati ispitivanja emisivnosti konstrukcionog čelika S275 i sivog liva GJL-200.....	89
5.2.8 Rezultati ispitivanja emisivnosti uzoraka sa premazom TOP PUR AY	91
5.2.9 Rezultati ispitivanja emisivnosti uzoraka sa premazom TOP PUR PU.....	94
5.3 Ispitivanje emisivnosti metalnih površina od nerđajućeg čelika	95
5.3.1 Izbor materijala za ispitivanje emisivnosti metalnih površina od nerđajućeg čelika.....	95
5.3.2 Priprema i oznake uzoraka	96
5.3.3 Merenje površinske hrapavosti uzoraka.....	96
5.3.4 Opis uređaja i eksperimentalne postavke.....	96
5.3.5 Metodologija određivanja emisivnosti uzoraka	96
5.3.6 Rezultati ispitivanja emisivnosti nerđajućeg čelika X2CrNi18-9 i X6Cr17	97
5.4 Zaključci i smernice za određivanje emisivnosti metalnih površina	99
6. INOVATIVNA METODA PROCENE RIZIKA OD KTO IZAZVANIH VRUĆIM METALNIM POVRŠINAMA	100
6.1 Određivanje težine KTO	100
6.2 Definisane granične uslova za KTO za metalne površine.....	102
6.3 Procedura inovativne metode procene rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama.....	106
6.3.1 Opis vruće metalne površine	107
6.3.2 Određivanje emisivnosti vruće metalne površine.....	108
6.3.3 Određivanje perioda kontakta.....	108
6.3.4 Merenje temperature vruće metalne površine	109
6.3.5 Određivanje stepena KTO	109
6.3.6 Određivanje težine KTO.....	109
6.3.7 Kvantifikacija rizika od KTO	110
6.3.8 Definisane zone rizika od KTO na IC slici/slikama	110
6.3.9 Ponavljanje procedure inovativne metode procene rizika od KTO.....	111
6.3.10. Obrazac inovativne metode procene rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama	111
7. VERIFIKACIJA INOVATIVNE METODE PROCENE RIZIKA OD KTO IZAZVANIH VRUĆIM METALNIM POVRŠINAMA	114
7.1 Procena rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama grejne ploče pegle primenom inovativne metode.....	114

7.2 Procena rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama grejne ploče pegle prema standardu EN ISO 13732-1:2006	118
7.3 Procena rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama cilindra mašine za injekciono presovanje primenom inovativne metode	120
8. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA.....	128
LITERATURA	130
PRILOG 1 MORITZ I HENRIQUES ISTRAŽIVANJE NA SVINJSKOJ KOŽI	143
PRILOG 2 MORITZ I HENRIQUES ISTRAŽIVANJE NA LJUDSKOJ KOŽI	146
PRILOG 3 GRANIČNI USLOVI ZA NASTANAK I, II I III STEPENA KTO	147
PRILOG 4 STATISTIČKI IZVEŠTAJ ZA ALUMINIJUM AlSi1MgMn.....	150
PRILOG 5 STATISTIČKI IZVEŠTAJ ZA KONSTRUKCIONI ČELIK S235	151
PRILOG 6 STATISTIČKI IZVEŠTAJ ZA MESING CuZn37	152

SPISAK SLIKA

Slika 2.1	Patologija opekotine	7
Slika 2.2	„Pravilo devetke”	9
Slika 2.3	Land-Brovder dijagram	10
Slika 2.4	Podela opekotina prema dubini	11
Slika 2.5	Eksperimentalna postavka Moritz i Henriques.....	15
Slika 2.6	Krive graničnih uslova prema Moritz i Henriques	16
Slika 2.7	Granični uslovi za nastanak KTO za nepremazane metalne površine.....	19
Slika 2.8	Porast T_{KTO} za lakirane metalne površine debljine: a) 50 μm , b) 100 μm i c) 150 μm	19
Slika 2.9	Porast T_{KTO} za metalne površine.....	20
Slika 2.10	Stepen opekotina u zavisnosti od graničnih uslova za: a) svinjsku i b) ljudsku kožu.....	22
Slika 4.1	Skica eksperimentalne postavke Vilijama Heršela	42
Slika 4.2	Prenos toplote zračenjem između čvrstog tela i okoline u vakuumu.....	45
Slika 4.3	Emisija toplote zračenjem kao a) zapreminski fenomen i b) površinski fenomen	46
Slika 4.4	Elektromagnetni spektar	47
Slika 4.5	Prenos toplote zračenjem a) sa površine i b) između površine i okoline.....	49
Slika 4.6	Karakteristike izotermalne šupljine idealno crnog tela	51
Slika 4.7	Spektralna emisiona snaga idealno crnog tela.....	52
Slika 4.8	Uporedni prikaz emisije idealno crnog i realnog tela.....	54
Slika 4.9	Šematski prikaz termičkog detektora IC zračenja	57
Slika 4.10	Šematski prikaz preseka mikrobolometra.....	58
Slika 4.11	Transmisija vazduha za IC zračenje	60
Slika 4.12	Primer IC slike sa elementom $g(x,y)$	60
Slika 4.13	Uticaj emisivnosti na očitane temperature IC kamerom	62
Slika 5.1	Kontaktni profilometar MarSurf PS1	70
Slika 5.2	Eksperimentalna postavka za ispitivanje emisivnosti nepremazanih metalnih površina ...	71
Slika 5.3	Uređaji za merenje temperature.....	72
Slika 5.4	Analize IC slike primenom programa Guide IrAnalyser uzoraka A1 na 200 °C	73
Slika 5.5	IC slike uzoraka legure aluminijuma AlSi1MgMn temperature 50 °C	76

Slika 5.6	Poređenje emisivnosti legure aluminijuma AlSi1MgMn dobijenih eksperimentom i primenom regresionog modela	77
Slika 5.7	IC slike uzoraka konstrukcionog čelika S235 temperature 50 °C	78
Slika 5.8	Poređenje emisivnosti konstrukcionog čelika S235 dobijenih eksperimentom i primenom regresionog modela	80
Slika 5.9	IC slike uzoraka mesinga CuZn37 temperature 50 °C	80
Slika 5.10	Poređenje emisivnosti mesinga CuZn37 dobijenih eksperimentom i primenom regresionog modela.....	82
Slika 5.11	Vidljiva oblast elektromagnetnog spektra.....	82
Slika 5.12	Uzorci konstrukcionog čelika S275 i sivog liva GJL-200.....	84
Slika 5.13	Pneumatski pištolj DELTALYO® DL-30.....	84
Slika 5.14	Uporedni mikroskopski prikaz uzoraka sa plavim TOP PUR AY premazom	86
Slika 5.15	Eksperimentalna postavka za ispitivanje emisivnosti premazanih metalnih površina.....	88
Slika 5.16	Primer analize IC slike primenom programa Guide IrAnalyser uzorka AYČC1 ($T = 80\text{ °C}$)....	89
Slika 5.17	Emisivnost uzoraka NPČ i NPSL u zavisnosti od temperature	90
Slika 5.18	IC slike uzoraka NPČ i NPSL temperature 50 °C i 100 °C.....	91
Slika 5.19	IC slike uzoraka sa premazom TOP PUR AY crvene boje	92
Slika 5.20	IC slike uzoraka sa premazom TOP PUR AY plave boje	93
Slika 5.21	IC slike uzoraka sa premazom TOP PUR PU sive boje	94
Slika 5.22	Emisivnost uzoraka NRČ1 i NRČ10 u zavisnosti od temperature	98
Slika 5.23	IC slike uzoraka NRČ1 i NRČ10 temperature 50 °C i 100 °C.....	98
Slika 6.1	Algoritam inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama.....	107
Slika 7.1	Delovi cilindra mašine za injekciono presovanje.....	124

SPISAK TABELA

Tabela 2.1	Klasifikacija opekotina prema težini.....	13
Tabela 2.2	Rezultati istraživanja Moritz i Henriques sprovedena na svinjskoj koži	17
Tabela 2.3	Rezultati istraživanja Moritz i Henriques sprovedena na ljudskoj koži.....	18
Tabela 2.4	T_{KTO} za $D_{KTO} \geq 1$ min	20
Tabela 2.5	Smernice za izbor D_{KTO}	21
Tabela 2.6	Granični uslovi za nastanak termičkih povreda	23
Tabela 2.7	Granični uslovi za nastanak KTO izazvanih vrućim metalnim površinama.....	24
Tabela 2.8	Rezultati istraživanja Ye i De.....	25
Tabela 3.1	Matrica rizika 3×3.....	30
Tabela 3.2	Matrica rizika 4×6	30
Tabela 3.3	Nivoi faktora rizika prema Kinney metodi	32
Tabela 3.4	Nivoi rizika prema Kinney metodi.....	32
Tabela 3.5	Nivoi faktora rizika prema PILZ metodi.....	34
Tabela 3.6	Nivoi rizika prema PILZ metodi	35
Tabela 3.7	Nivoi faktora rizika prema Guardmaster metodi.....	36
Tabela 3.8	Nivoi rizika prema Guardmaster metodi	36
Tabela 4.1	Podela IC elektromagnetnog spektra prema James Byrnes.....	47
Tabela 4.2	Podela IC elektromagnetnog spektra prema CIE	48
Tabela 4.3	Podela IC elektromagnetnog spektra prema EN ISO 20473:2007.....	48
Tabela 4.4	Preporučene vrednosti emisivnosti pojedinih materijala	63
Tabela 5.1	Hemijski sastav legure aluminijuma AlSi1MgMn.....	69
Tabela 5.2	Hemijski sastav konstrukcionog čelika S235.....	69
Tabela 5.3	Hemijski sastav mesinga CuZn37	69
Tabela 5.4	Oznake uzoraka u zavisnosti od vrste metala i režima obrade.....	70
Tabela 5.5	Površinska hrapavost, R_a uzoraka.....	71
Tabela 5.6	Emisivnost legure aluminijuma AlSi1MgMn u zavisnosti od T i R_a	76
Tabela 5.7	Emisivnost konstrukcionog čelika S235 u zavisnosti od T i R_a	79
Tabela 5.8	Emisivnost mesinga CuZn37 u zavisnosti od T i R_a	81

Tabela 5.9	Hemijski sastav konstrukcionog čelika S275	83
Tabela 5.10	Hemijski sastav sivog liva GJL-200.....	83
Tabela 5.11	Oznake uzoraka u zavisnosti od premaza i metala.....	85
Tabela 5.12	Površinska hrapavost uzoraka, R_a i debljina premaza, d	87
Tabela 5.13	Emisivnost uzoraka NPC i NPSL u zavisnosti od T	90
Tabela 5.14	Hemijski sastav nerđajućeg čelika X2CrNi18-9	95
Tabela 5.15	Hemijski sastav nerđajućeg čelika X6Cr17	96
Tabela 5.16	Oznake uzoraka u zavisnosti od vrste nerđajućeg čelika i debljine uzorka	96
Tabela 5.17	Površinska hrapavost, R_a uzoraka	96
Tabela 5.18	Emisivnost uzoraka nerđajućeg čelika u zavisnosti od temperature	97
Tabela 6.1	Težina KTO u zavisnosti od stepena KTO i veličine vruće površine, P [m^2].....	101
Tabela 6.2	Matrica za određivanje težine KTO	102
Tabela 6.3	Granični uslovi za nastanak I stepena KTO za nepremazane metalne površine	102
Tabela 6.4	Granični uslovi za nastanak I, II i III stepena KTO za metalne površine do 200 °C ...	105
Tabela 6.5	Uvećanje T_{KTO} u °C za premazane metalne površine.....	106
Tabela 6.6	Inovativna metoda procene rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama.	111
Tabela 7.1	PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama grejne ploče pegle primenom inovativne metode.....	114
Tabela 7.2	Procena rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama grejne ploče pegle prema standardu EN ISO 13732-1:2006	119
Tabela 7.3	PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama cilindra mašine za injekciono presovanje primenom inovativne metode	120

SPISAK SKRAĆENICA

ABA	<i>engl.</i>	American Burn Association
CIE	<i>engl.</i>	International Commission on Illumination
CTB	<i>engl.</i>	Contact Thermal Burn
<i>D</i>KTO	<i>srp.</i>	Period kontakta sa vrućom površinom za koji nastaje KTO
EN	<i>engl.</i>	European Norm
EU	<i>srp.</i>	Evropska unija
FPA	<i>engl.</i>	Focal Plane Array
GBD	<i>engl.</i>	Global Burden of Disease
IC	<i>srp.</i>	Infracrveno/infracrvena
ICT	<i>srp.</i>	Infracrvena termografija
IHME	<i>engl.</i>	Institute for Health Metrics and Evaluation
IRNDT	<i>engl.</i>	Infrared Nondestructive Testing
ISBI	<i>engl.</i>	International Society for Burn Injuries
ISO	<i>engl.</i>	International Organization for Standardization
KTO	<i>srp.</i>	Kontaktna termička opekotina
MIL-STD	<i>engl.</i>	Military Standards (United States)
NUC	<i>engl.</i>	Non Uniformity Correction
PR	<i>srp.</i>	Procena rizika
ROIC	<i>engl.</i>	Readout Integrated Circuit
SAD	<i>srp.</i>	Sjedinjene Američke Države
SZO	<i>srp.</i>	Svetska zdravstvena organizacija
TRIR	<i>engl.</i>	Time-Resolved Infrared Radiometry
<i>T</i>KTO	<i>srp.</i>	Temperatura vruće površine pri kojoj nastaje KTO
UPT	<i>srp.</i>	Ukupna površina tela

1. UVOD

Opekotine predstavljaju jedne od najčešćih povreda u svetu [1]. U Evropskoj uniji (EU) je od 2010. do 2019. godine zabeleženo oko 530.000 termičkih povreda na radnom mestu. Pod termičkom povredom se smatraju opekotine, oparotine i smrzotine. Podatak se odnosi na države članice EU, od kojeg se oko 160.000 termičkih povreda dogodilo na radnom mestu u proizvodnoj industriji [2]. Opekotine na radnom mestu su češće kod muškaraca, dok žene opekotine uglavnom zadobiju kod kuće. Štaviše, muškarci su izloženiji opekotinama (70%) od žena (30%) [3]. Pojedine studije pokazuju da je oko 40% slučajeva sa smrtnim ishodom rezultat opekotina na radnom mestu, dok je oko 20% hospitalizovanih pacijenata usled opekotina rezultat povrede na radu [4]. Opekotine predstavljaju problem i nakon oporavka, jer dovode do traume i stresa, prouzrokovanim dugim bolničkim lečenjima, ožiljcima i trajnim posledicama u vidu invaliditeta [5]. U periodu od 1992. do 1999. godine u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD) zabeležena su 138 slučaja u kojima su rukovaoci mašina zadobili opekotine na radnom mestu i čak 170 slučaja gde su opekotine zadobijene prilikom korišćenja ili rukovanja alatom na mašinama [6]. Opekotine nastale direktnim kontaktom sa vrućim telom¹ se nazivaju kontaktne termičke opekotine (KTO). Kako mašine i proizvodi u toku rada mogu razviti visoke temperature na spoljašnjim površinama, postoji rizik od toplotnih opasnosti u vidu KTO, koji mora biti procenjen.

S obzirom na to da je Evropa veliki proizvođač mašina, sa oko 33% učešća na svetskom tržištu u oblasti mašina alatki [7], bezbednost mašina je regulisana posebnom direktivom - Evropskom direktivom o mašinama 2006/42/EZ [8]. U skladu sa direktivom, dužnost proizvođača mašine je da sprovede procenu rizika, između ostalog i od toplotnih opasnosti u vidu vrućih površina mašina, radi utvrđivanja zahteva za zaštitu zdravlja i bezbednosti koji se primenjuju za mašinu. Nakon procene rizika, mašina se mora projektovati i izraditi tako da se uzmu u obzir njeni rezultati [9], [10]. S tim u vezi, objavljen je standard EN ISO 13732-1:2006 Ergonomija toplotne sredine - Metoda za ocenu odgovora čoveka na kontakt sa površinom - Deo 1: Vruće površine (engl. *Ergonomics of the thermal environment - Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces - Part 1: Hot surfaces*). Standard prikazuje metodu procene rizika od kontaktnih termičkih opekotina (KTO) izazvanih vrućim površinama mašina i proizvoda². On definiše granične uslove za vruće površine pri kojima će doći do nastanka KTO, odnosno temperaturu, T_{KTO} i period kontakta, D_{KTO} . Nedostatak ove metode jeste nemogućnost definisanja težine povrede, koja je neophodna za kvantifikaciju rizika od KTO. Pored navedenog, granični uslovi su bazirani na istraživanjima sprovedenim u periodu od 1947. do 1989. godine, a merenje temperature se izvodi u izabranim tačkama pomoću termoparova [11].

¹ Vruća tela se u kontekstu disertacije odnose na tela u čvrstom agregatnom stanju čije vruće površine mogu dovesti do nastanka KTO, kao što su mašine, uređaji, itd.

² Radi pojednostavljenja u nastavku će se koristiti termin vruće metalne površine, gde se podrazumeva da su u pitanju vruće metalne površine mašina i proizvoda.

Zbog svega navedenog, predložena je inovativna metoda procene rizika od KTO, primenom infracrvene termografije (ICT), koja predstavlja beskontaknu metodu merenja temperature. Metalne površine su izabrane zbog velikog udela kod mašina i proizvoda i zato što su metali, usled odlične sposobnosti provođenja toplote, najrizičniji sa aspekta nastanka KTO u odnosu na druge materijale. Kvantifikacija rizika od KTO omogućena je određivanjem težine KTO. Težina KTO je definisana pomoću dva faktora: veličine vruće metalne površine i stepena KTO. Stepene KTO su određeni u zavisnosti od T_{KTO} i D_{KTO} , pomoću tabele u kojoj su objedinjeni granični uslovi iz velikog broja istraživanja, dok je veličina vruće metalne površine dovedena u vezu sa veličinom opečene površine koja može dovesti do nastanka lake, srednje i teške KTO.

Sa druge strane, za merenje temperature korišćena je infracrvena (IC) kamera, čiji se princip rada zasniva na ICT. IC kamera omogućava prikaz temperature čitave posmatrane površine na IC slikama, za razliku od termoparova. Ova prednost je iskorišćena kako bi se na IC slikama definisale zone rizika od KTO na vrućim metalnim površinama mašina i proizvoda. Problem primene ICT za merenje temperature jeste određivanje emisivnosti metala, od kojeg je izrađena metalna površina, a koja uslovljava tačnost merenja. Emisivnost metala zavisi od mnogih faktora, zbog čega su u disertaciji sprovedena eksperimentalna ispitivanja, sa ciljem izvođenja zaključaka i davanja smernica za određivanje emisivnosti premazanih i nepremazanih metalnih površina.

Inovativna metoda procene rizika od KTO omogućava kvantifikaciju i vizuelnu interpretaciju zona rizika od KTO na čitavoj vrućoj metalnoj površini, što je od koristi kod projektovanja ne samo mašina i proizvoda, nego i radnih mesta gde postoje ovakve površine.

1.1 Problem i potreba za istraživanjem

Nedostaci metode procene rizika od KTO prema standardu EN ISO 13732-1:2006 su:

- nemogućnost definisanja težine KTO;
- nepostojanje graničnih uslova za više stepene KTO;
- ne uzimanje u obzir veličine vruće površine;
- nemogućnost kvantifikacije rizika od KTO;
- granični uslovi za nastanak KTO bazirani su na istraživanjima sprovedenim u periodu od 1947. do 1989. godine, sa akcentom na istraživanja Moritz i Henriques [40];
- merenje temperature se sprovodi u izabranim tačkama, pomoću termoparova.

Pomenuti nedostaci doveli su do potrebe za razvojem inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama, koja bi omogućila kvantifikaciju rizika od KTO i vizuelnu interpretaciju zona rizika od KTO na mašinama i proizvodima. Zona rizika od KTO zapravo predstavljaju oblasti temperatura koje mogu dovesti do nastanka I, II i III stepena KTO sa prikazom njihove veličine i lokacije, za razliku od termoparova koji omogućavaju merenje temperature samo u izabranim tačkama na vrućoj površini.

Kako bi se ICT primenila za merenje temperature vrućih metalnih površina potrebno je odrediti emisivnost metala od kojeg je izrađena metalna površina. Emisivnost predstavlja sposobnost realnog tela da apsorbuje i emituje toplotu u poređenju sa idealnim crnim telom koje pri istoj temperaturi, geometrijskim i spektralnim uslovima zrači najveću količinu toplote [12]. Emisivnost je

bezdimenzionalna veličina koja se kreće u granicama od 0 do 1 i niska je za metale. Pored toga, emisivnost metala zavisi od mnogih faktora, te je iz tog razloga bila predmet većeg broja istraživanja ([131], [134], [139] i dr.) u kojima je uglavnom eksperimentalno određivana. Ovo je dovelo do potrebe da se sprovede ispitivanje u oblasti emisivnosti metalnih površina u zavisnosti od faktora koji imaju najveći uticaj na njenu promenu. Cilj ispitivanja jeste izvođenje zaključaka i smernica za određivanje emisivnosti metalnih površina, čime bi se doprinelo povećanju tačnosti merenja temperature primenom ICT.

Kvantifikacija rizika od KTO moguća je samo ukoliko se definiše težina KTO, što je dovelo do potrebe za istraživanjem u ovoj oblasti. Kako prema Američkom udruženju za opekotine (engl. *American Burn Association - ABA*) težina opekotine zavisi od stepena opekotine i procenta opečene površine u odnosu na ukupnu površinu tela (UPT), to iziskuje definisanje graničnih uslova za nastanak I, II i III stepena KTO. Neophodno je formirati bazu graničnih uslova za metalne površine na osnovu rezultata novijih istraživanja i definisati ih za različite stepene KTO. Pored toga, da bi se odredila težina KTO mora se uzeti u obzir i veličina metalne površine. Kako veličina metalne površine diktira veličinu opečene površine koja se iskazuje kao procenat od UPT, ovo je dovelo do potrebe da se nađe način za dovođenje u direktnu vezu vruće i opečene površine.

Kvantifikacija rizika od KTO čini samo deo inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama. Kako postoje različite metode procene rizika, sprovedeno je dodatno istraživanje i u ovoj oblasti, sa ciljem izbora najpogodnije metode.

1.2 Ciljevi i hipoteze istraživanja

Osnovni cilj istraživanja jeste razvoj inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama koja bi omogućila kvantifikaciju rizika od KTO i vizuelnu interpretaciju zona rizika od KTO na istim.

Ostvarenje osnovnog cilja istraživanja zahteva dodatne istraživačke ciljeve:

- definisanje graničnih uslova za nastanka I, II i III stepen KTO za metalne površine;
- definisanje načina izražavanja veličine metalne površine u odnosu na veličinu opečene površine;
- određivanje težine KTO u odnosu na stepene KTO i veličine metalne površine;
- kvantifikaciju rizika od KTO najpogodnijom metodom procene rizika;
- ispitivanje emisivnosti metalnih površina sa i bez premaza;
- definisanje procedure inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama;
- verifikaciju inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama.

Da bi se rizik od KTO mogao kvantifikovati neophodno je definisati granične uslove za nastanak I, II i III stepena KTO za metalne površine i odrediti težinu KTO u odnosu na stepene KTO i veličinu metalne površine. Sa druge strane, tačnost merenja temperature primenom ICT uslovljeno je emisivnošću metala od kojeg je izrađena metalna površina. Iz navedenog proizilaze sledeće hipoteze istraživanja:

- H1 - Inovativna metoda PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama omogućava kvantifikaciju rizika od KTO;
- H2 - ICT se može koristiti za tačno merenje temperature vrućih metalnih površina;
- H3 - Inovativna metoda PR od KTO omogućava prikaz zona rizika od KTO na vrućim metalnim površinama.

1.3 Očekivani rezultati istraživanja

U odnosu na postavljene istraživačke ciljeve, očekivani rezultati istraživanja su sledeći:

- nakon objedinjavanja rezultata iz istraživanja u kojima su određeni granični uslovi za nastanak I, II i III stepena KTO formiraće se tabela u kojoj će stepeni KTO biti dati u zavisnosti od T_{KTO} i D_{KTO} za metalne površine;
- kako se prema ABA, veličina opečene površine izražava u procentima od UPT, treba usvojiti vrednost za UPT i izračunati odgovarajuće procene, tako da se opečena površina izrazi u m^2 , što ujedno predstavlja i veličinu vruće metalne površine;
- sledeći ABA kriterijume za težinu termičke povrede, razviće se matrica za određivanje težine KTO u zavisnosti od stepena KTO i veličine vruće površine;
- za kvantifikaciju rizika od KTO preporučiće se nekoliko metoda procene rizika, čija će primena biti ilustrovana prilikom verifikacije inovativne metode;
- ispitivanje emisivnosti sprovedeće se posebno za nepremazane i premazane metalne površine, na osnovu kojih će se izvesti zaključci i smernice za njeno određivanje;
- za sprovođenje inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama posebno će se sačiniti obrazac i algoritam procedure;
- verifikacija inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama;
- sprovođenje dve verifikacije inovativne metode, na primeru mašine i proizvoda.

1.4 Struktura disertacije

Disertacija je organizovana u osam poglavlja:

1. Uvod
2. Kontaktne termičke opekotine
3. Metode procene rizika
4. Infracrvena termografija
5. Ispitivanje emisivnosti metalnih površina
6. Inovativna metoda PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama
7. Verifikacija inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama
8. Zaključna razmatranja i pravci daljih istraživanja

U prvom, uvodnom poglavlju predstavljen je problem, predmet, ciljevi, hipoteze i očekivani rezultati istraživanja, kao i struktura disertacije.

U drugom poglavlju objašnjen je mehanizam nastanka opekotina, zatim etiologija i klasifikacija opekotina prema procentu opečene površine, stepenu i težini. Takođe, prikazano je aktuelno stanje u oblasti graničnih uslova za nastanak KTO za metalne površine, prve empirijske studije u ovoj oblasti, zatim standardi iz oblasti najviše dozvoljenih temperatura vrućih površina, kao i novija istraživanja u oblasti graničnih uslova za KTO.

Treće poglavlje predstavlja aktuelno stanja u oblasti kvalitativnih, kombinovanih i kvantitativnih metoda procene rizika, sa akcentom na Kinny, PILZ i Guardmaster metode procene rizika. Takođe, u trećem poglavlju prikazana je metoda procene rizika od KTO prema standardu EN ISO 13732-1:2006.

S obzirom na složenost ICT, četvrto poglavlje se sastoji iz pet delova. U prvom delu prikazana je sistematizacija ICT, dok je u drugom temeljno obrazložen prenos toplote zračenjem, koji predstavlja njen princip rad. Treći deo se tiče detektora IC zračenja, sa posebnim osvrtom na detektore IC kamere. Četvrti deo detaljno opisuje princip rada IC kamere i problematiku u vezi emisivnosti metala. Emisivnost metala ima tendenciju promene u zavisnosti od mnogobrojnih faktora i pored toga što postoje tablice preporučenih vrednosti, često se zbog njihove nepotpunosti u praksi pribegava eksperimentalnim metodama, čiji je pregled aktuelnog stanja prikazan u poslednjem, petom delu.

Da bi se osigurala tačnost merenja IC kamerom vrućih metalnih površina, u petom poglavlju sprovedeno je ispitivanje emisivnosti nepremazanih i premazanih metalnih površina. Pored navedenog, posebno je ispitana emisivnost metalnih površina od nerđajućeg čelika, zbog njegove primene u izradi mašina i proizvoda. U poslednjem potpoglavlju su izvedeni zaključci i smernice za određivanje emisivnosti metalnih površina.

Prethodna poglavlja predstavljaju osnovu za definisanje procedure inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama. U šestom poglavlju definisani su granični uslovi za I, II i III stepen KTO, način određivanja veličine vruće metalne površine i formirana je matrica za određivanje težine KTO. Na kraju, dat je algoritam procedure inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama i obrazac za njeno sprovođenje.

Verifikacija inovativne metode PR od KTO sprovedena je na primeru pegle i mašine za injekciono presovanje, čiji su rezultati prikazani u sedmom poglavlju, zajedno sa rezultatima procene rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama pegle prema standardu EN ISO 13732-1:2006.

U osmom poglavlju prikazana su zaključna razmatranja i pravci budućih istraživanja.

Na kraju disertacije je dat pregled citirane literature sa neophodnim priložima.

2. KONTAKTNE TERMIČKE OPEKOTINE

Termičke povrede predstavljaju oštećenja telesnog pokrivača i/ili dubljih struktura kao što su mišići, tetive ili kosti, prouzrokovanih dejstvom spoljašnjeg agensa. U zavisnosti da li je temperatura spoljašnjeg agensa niža ili viša od one koju organizam može da toleriše i koriguje sopstvenim odbrambenim mehanizmom, termičke povrede se dele na smrztotine i opekotine. Opekotine nastaju prekomernim dejstvom toplote usled čega, u zavisnosti od prirode toplotnog agensa, njegove temperature i perioda kontakta, dolazi primarno do povrede kože, a kod intenzivnog dejstva i do povreda dubljih struktura [13]. Toplotni agens može biti električna energija, hemijske supstance, zračenje, plamen, vruća tela, tečnosti ili para [14], [15]. Opekotine nastale kontaktom sa vrućim telima su drugačije od opekotina nastalih usled dejstva pregrejane pare ili tečnosti, gde ih, u tom slučaju, nazivamo oparotinama. U praksi se najčešće susreću oparotine izazvane vrelom vodom [16]. Opekotine nastale direktnim kontaktom sa vrućim telima se nazivaju kontaktne termičke opekotine (KTO). Pored toplotnog agensa, na težinu termičke povrede utiče dubina povrede i procenat opečene površine u odnosu na ukupnu površinu tela (UPT).

Opekotine predstavljaju jedne od najčešćih povreda u svetu [1]. Tokom 2017. godine zabeleženo je 8.991.468 opekotina izazvanih plamenom, toplotom ili vrućim telima, od kojih je 1,34% rezultovalo smrtnim ishodom [17]. Podaci se odnose na 195 zemalja i teritorija i rezultat su projekta Globalnog opterećenja bolestima (engl. *Global Burden of Disease - GBD*), koji vodi Institut za zdravstvenu metriku i evaluaciju (engl. *Institute for Health Metrics and Evaluation - IHME*) u saradnji sa Svetskom zdravstvenom organizacijom (SZO). Prema podacima Međunarodnog udruženja za opekotine (engl. *International Society for Burn Injuries - ISBI*) i SZO, broj opekotina se u državama kreće između 0,2% i 1% od ukupne populacije, u zavisnosti od ekonomske razvijenosti i preventivnog programa opekotina. U SAD godišnje se registruje oko 2.000.000 opekotina (1% od ukupne populacije), od čega od 60.000 do 70.000 opekotina zahteva bolničko lečenje. Oko 5% do 12% pacijenata umire usled direktnih posledica opekotina, a 50.000 ostaju trajni invalidi [20].

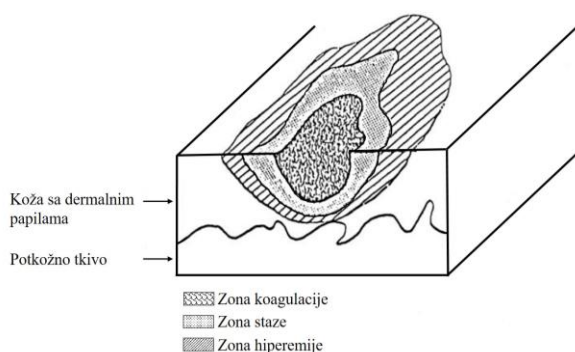
Povrede na radu u vidu opekotina se češće susreću kod muškaraca, dok žene opekotine uglavnom zadobiju kod kuće. Štaviše, muškarci su više izloženi opekotinama (70%) od žena (30%) [3]. Profesije kod kojih često dolazi do opekotina su piloti, vatrogasci, automehaničari, autolimari, rukovaoci mašina, električari i radnici na visokonaponskoj mreži, građevinski radnici, rudari, mineri, zavarivači, vozači kamiona i drugih transportnih vozila, zatim profesije koje zahtevaju rad blizu peći ili kotlova, kao što su pekari, kuvari, radnici u livnicama, itd. [6], [13]. U SAD je u periodu od 1992. do 1999. godine su zabeležena 138 slučajeva prouzrokovana termičkim opekotinama zadobijenim prilikom korišćenja ili održavanja mašina, a čak 170 slučajeva prouzrokovano je vrućim alatom na mašinama [6]. Prema jednoj od studija, 20% svih termičkih opekotina dogodi se na radnom mestu, a čak 40% svih slučajeva sa smrtnim ishodom prouzrokovanih opekotinama, povezano je sa požarima i eksplozijama na radnom mestu [4]. Termičke opekotine čine oko 86% svih opekotina, od kojih su 43% opekotine zadobijene u požaru, 34% oparotine, dok je 9% opekotina zadobijeno direktnim kontaktom sa vrućim telima (KTO). Opekotine su na četvrtom mestu po uzroku trauma i smrti kod odraslih, a druge po redu kod dece uzrasta od 1 do 4 godine. Zbog poboljšane prevencije opekotina kod kuće i na radnim mestima, kao i zbog savremenijih metoda lečenja, procenat preživljavanja

opekotina je oko 97%, a broj slučajeva sa smrtnim ishodom usled opekotina je manji za oko 75% u odnosu na 1960. godinu [18]. Opekotine predstavljaju ozbiljan problem i nakon oporavka, jer dovode do psiholoških poremećaja, kao što su trauma i stres, često prouzrokovanim dugim bolničkim lečenjima, ožiljcima, kao i trajnim invaliditetom [5].

Poseban vid termičke povrede na radnom mestu jesu KTO izazvane vrućim površinama mašina i proizvoda. Nastanak KTO uslovljen je sa dva granična uslova: temperaturom vruće površine pri kojoj dolazi do nastanka KTO (T_{KTO}) i periodom kontakta za koji nastaje KTO (D_{KTO}). Poznavanje graničnih uslova za nastanak KTO značajno je ne samo kod projektovanja mašina, proizvoda, nego i radnih mesta, uređaja u domaćinstvima, igraćaka, itd. [19]. Granični uslovi diktiraju stepen KTO, zbog čega je neophodno objasniti ne samo mehanizam nastanka opekotina, njihovu etiologiju, nego i klasifikaciju prema procentu opečene površine, zatim klasifikaciju prema dubini, odnosno stepenu opekotina i klasifikaciju prema težini opekotine. Sve ovo je važno kako bi se razumeli i izveli zaključci iz prvih empirijskih studija u oblasti KTO, standarda iz oblasti najviše dozvoljenih temperatura vrućih površina i novijih istraživanja sa ciljem definisanja graničnih uslova ne samo I, nego i II i III stepena KTO nastalih kontaktom sa vrućim metalnim površinama.

2.1 Nastanak opekotina

Pri temperaturi višoj od 40 °C dolazi do procesa gde se menjaju prirodna svojstva ćelijskih proteina pod uticajem spoljašnjih agenasa, tzv. denaturacije. U zavisnosti od graničnih uslova izazvane promene mogu biti reverzibilne, dok pri temperaturama iznad 45 °C ove promene su ireverzibilne. Tada nastaju oštećenja tkiva koja se mogu podeliti u tri zone: zona koagulacije (nekroze), zona staze u kojoj je započela upala i zona hiperemije [13] (Slika 2.1).



Slika 2.1 Patologija opekotine [20]

Zona koagulacije (nekroze) predstavlja središnje područje opekotina i mesto najvećeg oštećenja tkiva oko kojeg se javlja zona staze i periferna zona hiperemije. Zona hiperemije se može oporaviti u celosti i kod nje mikrocirkulacija nije oslabljena, zbog čega su tretmani i lečenje opekotina najviše usmereni ka zoni staze. Zona staze se može sačuvati od daljeg oštećenja koje se javlja kao posledica progresivne ishemije i napreduje tokom iduća dva dana od povrede ili duže usled pritiska, sušenja ili infekcije [21], [22].

2.2 Etiologija opekotina

Opekotine se prema etiološkim faktorima mogu grupisati u tri kategorije [23]–[26]:

- termičke opekotine su najčešće opekotine i nastaju dejstvom plamena, zračenja, trenja ili kontaktom sa vrućim telima, tečnostima ili parom;
- hemijske opekotine karakterišu ograničene površine, srednja dubina i najčešće nastaju dejstvom hemijskih supstanci, kiselina i baza (npr. sumporna, hlorovodonična, sirćetna kiselina, kreč, živa soda, itd.);
- električne opekotine nastaju direktnim kontaktom sa izvorom električne energije visokog napona ili putem električnog luka, a takođe mogu biti izazvane plamenom ili bleskom. Dele se na nisko-voltažne elektropekotine (napon niži od 1.000 V) koje su najčešće izazvane korišćenjem kućnih uređaja i visoko-voltažne (napon viši od 1.000 V) koje su uglavnom posledica nesreća u industriji.

Posebnu grupu termičkih opekotina čine radijacione opekotine, nastale dejstvom jonizujućih zračenja. Ova grupa opekotina je specifična, jer za razliku od drugih opekotina kod kojih se klinička slika promena na tkivima javlja odmah ili ubrzo nakon povrede, radijacione povrede se odlikuju pre svega tzv. asimptomatskim ili latentnim periodom različite dužine u zavisnosti od agensa koji je izazvao zračenje. Pored navedenih, postoje još i inhalacione opekotine koje predstavljaju termičke povrede respiratornog trakta. One mogu nastati pri udisanju vrelog vazduha, obično u zatvorenim prostorima; toplog dima; toksičnih produkata sagorevanja, naročito plastičnih (najlon ili polivinil) materijala; ugljen-monoksida zajedno sa cijanidima i cijanatima ili vrelih para, što dovodi do oštećenja donjih respiratornih puteva [20].

Opekotine, bez obzira na poreklo i prirodu toplotnog agensa, spadaju u termičke povrede, a posebnu grupu opekotina čine termičke opekotine koje mogu nastati usled indirektnog ili direktnog kontakta sa toplotnim agensom. Pod indirektnim kontaktom smatra se da je termička opekotina nastala usled dejstva pregrejane pare, plamena ili zračenja, dok se pod direktnim kontaktom smatra da je termička opekotina nastala pri kontaktu nezaštićene kože sa vrućim telima ili tečnostima. S tim u vezi, u disertaciji su izučavane tzv. kontaktne termičke opekotine (KTO), koje predstavljaju opekotine nastale direktnim kontaktom sa vrućim telima. Ovaj termin (engl. *Contact Thermal Burn - CTB*) je u englesku literaturu prvi uveo Adam Singer, jedan od najznačajnijih istraživača u ovoj oblasti [27].

2.3 Klasifikacija opekotina

Opekotine se mogu klasifikovati prema procentu opečene površine, zatim prema dubini, odnosno stepenu opekotine i prema težini. Sve tri klasifikacije su neophodne kako bi se objasnila razlika između dubine (stepena) opekotine i težine opekotine, te su u daljem tekstu navedene podele detaljnije razmotrene.

2.3.1 Klasifikacija opekotina prema procentu opečene površine

Određivanje opečene površine je značajno radi utvrđivanja težine opekotina, na osnovu koga se dalje definiše tok lečenja. Opečena površina se izražava u procentima u odnosu na UPT i u tu svrhu se obično koriste sledeće metode [28], [29]:

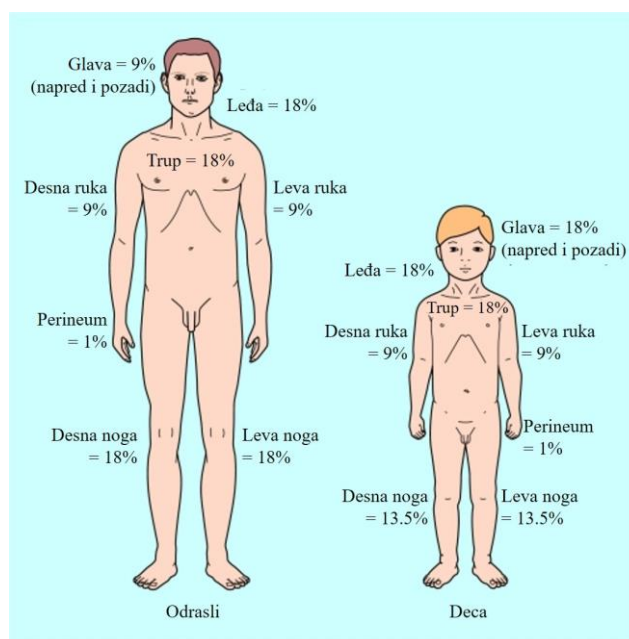
1. „pravilo dlana“ ili „pravilo 1% površine tela“;
2. „pravilo devetke“ ili „Valasovo pravilo“ ili „Wallace pravilo“;
3. Land-Brovder dijagram/karta ili Lund-Browder dijagram/karta;
4. B.N. Postnikov metod ili određivanje opečene površine sa milimetarskom hartijom.

„Pravilo dlana“ ili „pravilo 1% površine tela“ je jednostavna metoda za određivanje manje opečenih površina (< 15% UPT) ili veoma velikih opečenih površina (> 85% UPT, kada se računa i neopečena površina). Kod ove metode se palmarna strana šake (uključujući prste) povređenog računa kao 1% UPT, iako je zapravo ovaj procenat nešto niži i iznosi oko 0,8%. Ova metoda nije pogodna kod opečenih površina srednje veličine.

Za grubu orijentaciju opečene površine često se koristi „pravilo devetke“, dok je za preciznije određivanje opečene površine potrebno koristiti Land-Brovder dijagram, odnosno kartu. Ponekad se ove dve metode koriste u kombinaciji. Land-Brovder dijagram se retko koristi u praksi za inicijalnu procenu opečene površine.

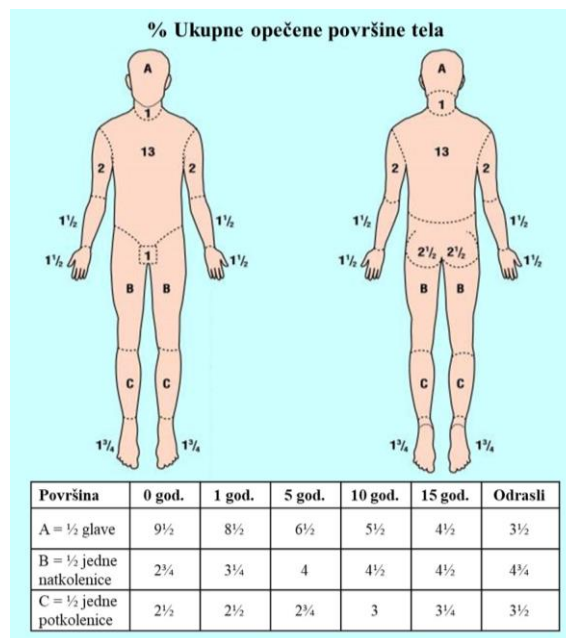
„Pravilo devetke“ predstavlja relativno brz metod procene srednjih i velikih opečenih površina kod odraslih i nije naročito precizan kod dece. Kod odraslih, prema ovoj metodi, glava i gornji ekstremiteti zahvataju po 9% UPT, donji ekstremiteti, prednja i zadnja strana trupa po 18% UPT, a preostalih 1% UPT pokriva perineum.

Kod dece je ovaj procenat nešto drugačiji, gde glava zahvata 18% UPT, a donji ekstremiteti po 13,5% UPT (Slika 2.2).



Slika 2.2 „Pravilo devetke” [30]

Ukoliko se pravilno koristi, Land-Brovdler dijagram je najtačnija metoda za određivanje opečene površine. Metoda uzima u obzir varijacije u obliku tela sa godinama kod dece, te je i u ovom slučaju dobar izbor za precizno određivanje opečene površine (Slika 2.3) [30], [31].



Slika 2.3 Land-Brovdler dijagram [30]

Pored navedenih, postoji još i B.N. Postnikov metod. Prema ovoj metodi na opečenu površinu nanosi se gaza ili sterilni celofan na kojem se ocrtavaju konture opečene površine. Izrezane figure opečenih površina se prenose na milimetarsku hartiju, gde se uz pomoću posebnih tablica, izračunava procenat opečene površine [32], [33].

2.3.2 Klasifikacija prema dubini (stepenu) opekotina

U zavisnosti od dubine oštećenja tkiva opekotina se klasifikuju na (Slika 2.4) [13], [20], [34]:

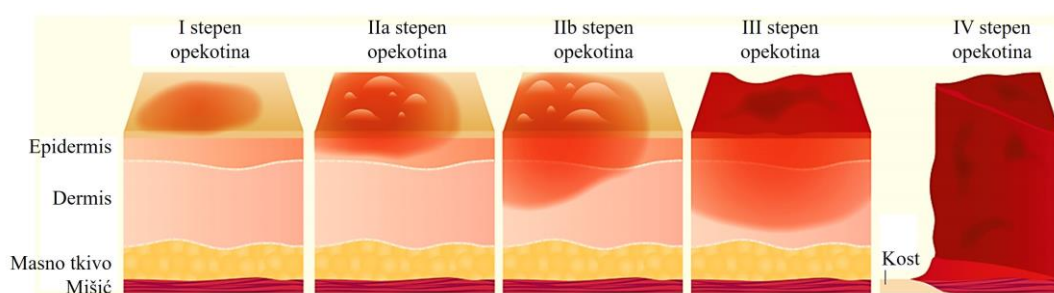
I stepen opekotina označava samo oštećenje površnog epitela, odnosno epiderma, sa pratećim endemom i intenzivnim bolom kao posledicom nadraženih završetaka perifernih nerava. Karakteriše ga slabije ili jače crvenilo, praćeno povišenom temperaturom, nekad i otokom, pogotovo u predelu lica ili kapaka.

Ia stepen opekotina ili drugi površni stepen opekotina odlikuje se plikovima. Opekotinska rana obično zarasta za 10 do 12 dana, s tim da usled uništenja epiderma i papilarnog, površinskog derma postoji opasnost od infekcije.

Iib stepen opekotina ili drugi duboki stepen opekotina se prepoznaje po ružičastoj, beličastoj ili sivkastoj vlažnoj površini koja je na dodir bolna, meka i fleksibilna usled mrtvog sloja. Ovde je oštećen retikularni derm, odnosno dublji sloj derma. Zarastanja ovakvog tipa opekotina je znatno duže i do 6 nedelja, u zavisnosti od veličine. Spontana epitelizacija je moguća u prvih 3 do 4 nedelje uz stvaranje ožiljnih formacija i slabijim kvalitetom kože. U tom periodu postoji opasnost da zbog

slabljenja organizma i pada imuniteta dođe do invazivnog razvoja infekcije i produbljivanja opekotine i njene konverzije u opekotinu III stepena, pa i do sepse, koja bitno umanjuje izgleda za izlječenje.

III stepen opekotina karakteriše destrukcija celokupnog epiderma i derma. Ovaj stepen opekotina odlikuju se potpunim uništenjem svih slojeva kože do supkutanog masnog tkiva. Reč je o koagulacionoj nekrozi. Koža je suva, mrke ili žute boje, sa vidljivim krvnim sudovima koji su trombozirali. Rana izgleda belo ili pepeljasto, tvrda je, suva, bez dlaka i neosetljiva na bol, jer su nervni završeci u koži uništeni. Spontano zarastanje je moguće samo kod vrlo malih opekotina, veličine do 1% UPT ali u dugom vremenskom periodu. U slučaju kontakta sa vrućim toplotnim agensom ili pri dužoj ekspoziciji, kada je povređeni u nesvesti, može doći do karbonifikacije i oštećenja kostiju. U ovom slučaju često se koristi termin **IV stepen opekotina** koji podrazumeva zahvatanje dubljih struktura kao što su mišići, tetive ili kosti.



Slika 2.4 Podela opekotina prema dubini [34]

I i IIa stepen opekotina spadaju u površne opekotine kod kojih je moguće potpuno izlječenje sa ili bez prolaznih tragova opečenosti u periodu do dvadesetak dana od zadobijanja povrede. IIb i III/IV stepen opekotina spadaju u duboke opekotine, jer je kod njih lečenje dugotrajno, vrlo često uz operativni rad, sa trajnim posledicama bilo funkcionalne ili estetske prirode. S tim u vezi, tretman opekotina može biti lokalni ili sistemski i opisan je u nastavku [13].

Kod mladih osoba ili osoba srednjih godina, bez prethodnih hroničnih bolesti, kod kojih je procenat opečene površine niži od 15% UPT dovoljan je samo lokalni tretman.

Kod I stepena opekotina, s obzirom na to da je zahvaćen samo površni epitelni sloj kože i nema opasnosti od razvoja infekcije, moguća je potpuna restitucija. Ovde je lokalni tretman ograničen na smirenje subjektivnih tegoba, što se postiže hlađenjem i korišćenjem hidratantnih kremova. Lečenje je uglavnom simptomsko. Ukoliko nisu zahvaćene veće telesne površine ili ako nema propratnih komplikacija, lečenje prolazi bez većih problema. Tegobe se smiruju za dva do tri dana, oštećeni epitet se peruta i dolazi do pojačane privremene pigmentacije.

S obzirom na to da postoji opasnost od infekcije, cilj lečenja IIa stepena opekotina jeste sprečavanje infekcije adekvatnom hirurškom obradom opečenih površina i zaštitom od naknadnog unošenja infekcije primenom adekvatnog zavoja. Nakon dve nedelje na mestu starog stvara se mladi epiderm koji se neguje još nedelju do dve dana, posle čega pacijent postaje u punoj meri radno sposoban.

Suština lečenja IIb stepena opekotina jeste ubrzano uklanjanje mrtvog sloja i rano pokrivanje ranjavih površina, sa ciljem usporavanja ili sprečavanja razvoja opasne infekcije. Ovaj tip opekotina

zahteva svakodnevno previjanje. IIb stepen opekotina ostavlja vidljive posledice, koža je izmenjena, kvalitet epiderma je slabiji, derm ostaje u ožiljcima različitog intenziteta i ukoliko nema funkcionalnih izmena, zasigurno ostaju trajne estetske promene.

Lečenje III stepena opekotina se sastoji u uklanjanju mrtvog tkiva hirurškim putem i pokrivanju nastalog defekta kožnim transplantatima. Nakon izlečenja sam izgled opekotina ostaje nepromenjen, osim estetskih razlika (koža je tanja, neotporna na traumu, pergamentnog izgleda i boje). Ovakve opekotine mogu dovesti do funkcionalnih promena usled kojih pacijent neće moći da se bavi određenim poslovima (rad u uslovima velikih temperaturnih promena, pri radu sa prljavim i masnim sredstvima i opremom za rad, itd.) [13].

Ukoliko je opečena površina kod opekotina IIa, IIb i III stepena viša od 15% UPT, dolazi do resorpcije toksičnih materija u cirkulaciji i do sistemskih promena koje zahtevaju sistemski tretman za lečenje tzv. opekotinske bolesti. Usled gubitka plazme, smanjuje se cirkulaciona zapremina, čime se povećava opasnost od šoka. Zbog toga se period od prva tri dana od zadobijanja ovakvog tipa opekotina naziva „faza šoka”. U ovom periodu je od ključne važnosti nadoknaditi gubitak tečnosti kod pacijenta kako bi se ovo stanje preventivno izbeglo. Terapija nadoknadom tečnosti je najvažniji reanimacioni postupak kojim se uspostavlja cirkulaciona zapremina, obezbeđuje perfuzija tkiva u optimalno mogućem stanju i obezbeđuje adekvatna eliminacija toksičnih materija kako bi se sprečilo oštećenje bubrega. Ukoliko se ne nadoknadi tečnost, smanjuje se količina dnevne mokraće (diureza) i povećava se i ovako značajna koncentracija otpadnih i toksičnih materija u bubrezima. Ovaj period traje od tri do pet dana od nastanka povrede i označava drugu fazu opekotinske bolesti. Analgetici se daju po potrebi intravenski zbog prolazne pareze creva, koji se spontano povlače u drugoj fazi. U tom periodu obustavlja se peroralno uzimanje tečnosti i uvodi se nazogastrička sonda. Kod velikih i ozbiljnih opekotina veliku opasnost predstavljaju infekcije, koje u 85% slučajeva kod pacijenata sa teškim opekotinama koji prežive prva 24 h predstavlja vodeći uzrok smrti.

Zaustavljanje infekcije se kod dubokih opekotina obezbeđuje:

- hirurškom obradom, odnosno nekrektomijom, uklanjanjem mrtvog tkiva i pretvaranjem opekotinske rane u hirurški čistu površinu koja se pokriva kožnim transplantatima;
- korišćenjem topičnih sredstava - lokalnih terapeutika sa antimikrobnim dejstvom;
- sistemskom primenom antibiotika.

Lečenje opekotina se završava pokrivanjem svih opečenih površina spontanom epitelizacijom ili autotransplantacijom. Za najbolji rezultat neophodno je, po završenom hirurškom lečenju, konsultovati specijalistu fizikalne medicine, radi rehabilitacije i daljeg tretmana pod njegovim nadzorom. Lečenje i rehabilitacija, u zavisnosti od težine opekotine, mogu potrajati veoma dugo i uvek ostavljaju manji ili veći invaliditet sa fizičkim, estetskim, psihičkim, socijalnim i finansijskim posledicama [13].

2.3.3 Klasifikacija prema težini opekotine

Američko udruženje za opekotine (engl. *American Burn Association - ABA*) definisalo je kriterijume za klasifikaciju, inicijalno lečenje i bolničko lečenje opekotina, koji su danas opšte prihvaćeni. Prema ABA opekotine se dele na lake, srednje i teške, u zavisnosti od stepena opekotina, procenta opečene površine u odnosu na UPT i pripadnosti starosnoj grupi (Tabela 2.1). Prema ABA postoje tri starosne grupe: deca, odrasli i stari. Pod decom se smatraju mlađi do 10 godina, odrasli su osobe od 10 do 55 godina, dok se pod starima smatraju osobe starije od 50 godina [35].

Tabela 2.1 Klasifikacija opekotina prema težini [35]

Lake opekotine	Srednje opekotine	Teške opekotine
I stepen	II stepen 10-20% UPT odrasli	II stepen > 20% UPT kod odrasli
II stepen < 10% UPT odrasli	II stepen 5-10% UPT deca i stari	II stepen > 10% UPT deca i stari
II stepen < 5% UPT deca i stari	III stepen 2-5% UPT sve starosne grupe	III stepen > 5% UPT
III stepen < 2% UPT sve starosne grupe		Opekotine funkcionalnih regija
		Električne opekotine
		Hemijske opekotine
		Radijacione opekotine
		Inhalaciona povreda
		Udružene povrede
		Opekotina kod osobe sa povećanim rizikom (hronične bolesti)

Lake opekotine mogu da se leče ambulantno, dok srednje i teške opekotine zahtevaju bolničko lečenje. Kriterijumi za opekotine koje zahtevaju prijem u specijalizovane ustanove za lečenje opekotina, prema ABA protokolu su sledeći [35], [36]:

1. opekotine delimične debljine čija je površina veća od 10% UPT;
2. opekotine koje zahvataju lice, šake, stopala, genitalije, perineum ili velike zglobove;
3. opekotine III stepena bez obzira na starosnu grupu;
4. električne opekotine, uključujući povrede izazvane udarom groma;
5. hemijske opekotine;
6. inhalacione povrede;
7. opekotine kod bolesnika sa postojećim oboljenjima koja mogu da komplikuju lečenje, prolongiraju oporavak ili dovedu do smrtnog ishoda;
8. opekotine sa udruženim povredama;
9. opekotine kod dece (ukoliko ne postoji specijalizovana ustanova sa kvalifikovanim osobljem i adekvatnim materijalno-tehničkim uslovima za lečenje opekotina kod dece, decu treba primiti u specijalizovanu ustanovu za lečenje opekotina za odrasle);
10. opekotine kod bolesnika kod kojih je potrebna posebna socijalna i psihološka podrška ili dugotrajna rehabilitacija.

Slično „pravilu devetke“ i Američko udruženje za opekotine deli UPT na devet regija, gde je procentualni odnos regija kod odraslih isti kao prema „pravilu devetke“, dok je za decu procentualni odnos pojedinih regija izdvojen na sledeći način: glava zahvata 18% UPT, prednja i zadnja strana trupa po 16% UPT, gornji ekstremiteti po 10% UPT, donji ekstremiteti po 14% UPT, a preostalih 1% UPT pokriva perineum [37].

2.4 Aktuelno stanje u oblasti graničnih uslova za KTO za metalne površine

Najpouzdaniji način za određivanje graničnih uslova za nastanak KTO jesu eksperimentalna istraživanja, koja se iz etičkih razloga ne sprovode na ljudima, osim ako su u pitanju istraživanja u vezi sa pragom bola ili nastankom I stepena opekotina. Uglavnom se u eksperimentalnim istraživanjima pribegava indirektnim metodama, na primer, eksperimenti se sprovode na životinjama poput svinja, pacova i miševa, koriste se matematički modeli ili uređaji koji simuliraju ljudsku kožu,

itd. [38]. S obzirom na to da su u današnje vreme strožiji uslovi za izvođenje eksperimenata na živom tkivu, još uvek se većina istraživača oslanja na rezultate prvih empirijskih studija sprovedenim u ovoj oblasti. Ove studije nisu sveobuhvatne, ali daju osnovne podatke o najverovatnijim reakcijama čoveka na kontakt sa vrućom površinom.

Prve empirijske studije na koži svinja [39]–[41] su pokazale da nastanak KTO zavisi od T_{KTO} i D_{KTO} i one predstavljaju fundamentalnu osnovu u ovoj oblasti. Svinjska koža ima relativno istu debljinu epiderma i derma, epidermalne grebene, izrazit dermalni papilarni sloj i duboki sloj potkožne masti, kao ljudska koža. U eksperimentima su se često koristile vruće metalne površine za nanošenje KTO. Ranije metode su preporučivale primenu metalnih šipki pri čemu su se opekotine nanosile koristeći samo gravitaciju. Istraživanje je pokazalo [42] da i pritisak sa kojim se nanosi KTO takođe ima uticaj na dubinu i stepen opekotina. Dakle, granični uslovi koji definišu stepen opekotine, su pored T_{KTO} , D_{KTO} još i pritisak kojim se nanosi KTO [43]. Nažalost, nije dostupan velik broj studija u kojima je poslednji granični uslov uzet u obzir. Sikman [44], [45] je utvrdio najviše temperature za vruće površine i dao preporučene T_{KTO} pri kojima neće doći do KTO. Bernard i Foli [46] su utvrdili T_{KTO} za aluminijum, čelik, staklo i drvo pri kojima neće doći do osećaja bola i I stepena opekotina, pri čemu su za razliku od drugih autora eksperimentalna istraživanja sprovedeli na ljudima. Pojedine studije [47]–[49] su pokazale da KTO nastaju pri 43 °C. Poređenja radi, telesna temperatura čoveka koja ugrožava život je već oko 42 °C [50]. Mnogi autori su nanosili KTO na kožu životinja pomoću vrućih metalnih površina [25], [42], [51]–[57]. Ye i De [58] su dali pregled relevantnih istraživanja u oblasti KTO sprovedenim u periodu od 2000. do 2014. godine. Martin i Falder su u preglednom radu [59] detaljno prodiskutovali ključna istraživanja do 2017. godine u oblasti graničnih uslova za nastanak KTO i zaključili da osećaj bola, kao i stepen opekotina najviše zavisi od T_{KTO} i D_{KTO} . Približno, T_{KTO} iznad 40 °C dovodi do promena čelijskih proteina u smislu denaturacije [13], gde u zavisnosti od graničnih uslova nastale promene mogu biti reverzibilne, dok pri T_{KTO} većoj od 45 °C nastaju ireverzibilne promene [60]. Ken Parsons [38] je dao najpotpuniji pregled literature kada su u pitanju najranija istraživanja u oblasti KTO koja su do danas najcitiranija i predstavljaju osnovu mnogih standarda i preporuka za najviše dozvoljene temperature dodirnih površina. Sa druge strane, Christine Andrews je u disertaciji [65] dala pregled preko 40 empirijskih studija relevantnih za nastanak KTO izazvanih vrućim metalnim površinama. Za razvoj inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama uzeti su u obzir samo izvori literature gde su definisana oba granična uslova za nastanak KTO i bliže su specificirani u poglavlju 6.2.

Postoji značajna razlika u načinu na koji su izvođene empirijske studije, bilo u pogledu izbora životinja, njihove mase, starosti ili toplotnog agensa kojim su nanošene KTO. Ovo otežava poređenje rezultata, kao i njihovo objedinjavanje u cilju definisanja zajedničkih kriterijuma za nastanak KTO različitog stepena. Pored toga, za inovativnu metodu PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama neophodni su samo podaci gde su granični uslovi za nastanak KTO dati konkretno za metalne površine, koji su zbog svoje izuzetne toplotne provodljivosti, najrizičniji materijali sa aspekta KTO. U nastavku je prikazan pregled literature, sa posebnim osvrtom na prve empirijske studije u oblasti KTO, standarde iz oblasti najviše dozvoljenih temperatura vrućih površina mašina i proizvoda, disertaciju pomenute autorke, koja je sa medicinskog stanovišta interpretirala granične uslove za nastanak KTO i druge literaturne izvore koji upotpunjuju bazu graničnih uslova za I, II i III stepen KTO izazvanih vrućim metalnim površinama.

2.4.1 Prve empirijske studije u oblasti KTO za metalne površine

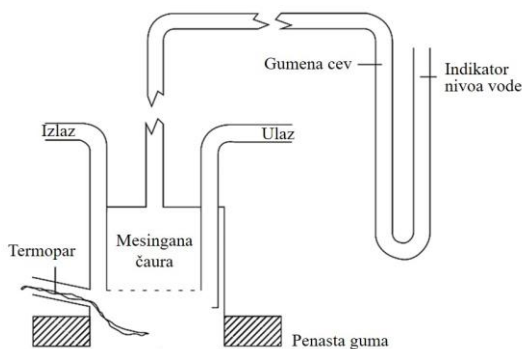
Čovek pomoću senzora u koži oseća pri dodiru sa čvrstim telima da li je telo toplo, vruće ili hladno. Ovo je klasičan primer prenosa toplote kondukcijom, koji u zavisnosti od temperature tela može da izazove bol ili termičku povredu. Usled kontakta sa vrućim površinama, temperatura kože

raste, što uzrokuje različite reakcije od širenja krvnih sudova (vazodilatacije), znojenja, osećaja „toplog“ ili „vrućeg“, pa sve do bola i opekotina. Reakcija ljudske kože na kontakt sa vrućom čvrstom površinom zavisiće od brzine prenosa toplote, što je uslovljeno karakteristikama kako kože, tako i materijalom od kojeg je izrađena površina. Pored vrste materijala postoje i drugi faktori koji utiču na prenos toplote kondukcijom između kože i vruće površine, a neki od njih su: površinska hrapavost, premazi na površini, temperatura, toplotna provodljivost, specifična toplota, gustina, primese u vidu nečistoće ili masnoće na koži ili površini, vlažnost površine, itd. [38].

Opšte je poznato da nastanak KTO najviše zavisi od T_{KTO} i D_{KTO} , pri čemu postoji inverzna veza između ova dva parametra [39]-[41]. Pre studija Moritz i Henriques informacije o graničnim uslovima za nastanak KTO jedino su se mogle naći u istraživanjima Hudack i McMaster i grupe autora Leach, Peters i Rossiter. Prva grupa autora je sprovedla eksperiment na miševima nanoseći KTO pomoću staklenog suda sa vrelom vodom, dok je druga grupa autora sprovedla eksperiment na svinjskoj koži pomoću metalnog suda sa vrelom vodom. Leach, Peters i Rossiter [38] su istraživali mikroskopska i vidljiva termička oštećenja kože prouzrokovana zagrejanim cilindrom od mesinga.

U eksperimentu su korišćene morske svinje i pacovi, čije kože su reagovala na sličan način. Na koži životinja su nanošene KTO pri temperaturi od 45 °C do 80 °C i periodu kontakta od 10 s do 10 min. Zaključeno je da na koži životinja pri $T_{KTO} = 47$ °C i $D_{KTO} = 6$ min nema vidljivih promena; T_{KTO} između 50 °C i 55 °C pri $D_{KTO} = 1$ min stvara ćelijska oštećenja, a T_{KTO} između 70 °C i 80 °C pri D_{KTO} između 10 s i 20 s, dovodi do stvaranja ozbiljnih krasti. Autori su zaključili da će pri istim graničnim uslovima doći do težih termičkih oštećenja ljudske kože [62].

Moritz i Henriques [39]-[41] su sprovedli nekoliko temeljnih studija u oblasti KTO koje čak i danas predstavljaju osnovu mnogim standardima i preporukama za najviše dozvoljene temperature dodirnih površina mašina i proizvoda. U njihovim istraživanjima KTO su nanošene pomoću vrelih tečnosti, uglavnom vode. S tim u vezi, ovaj tip termičkih povreda su zapravo oparotine. Vremenom su ovi granični uslovi usvojeni i za KTO, usled nedostatka relevantnih istraživanja. Ni sami autori ne prave razliku između ova dva tipa kontaktnih termičkih povreda, nego ih u radovima nazivaju opekotinama. Autori su razvili poseban uređaj koji omogućava da koža bude izložena kontinuiranom dejstvu tečnosti pri različitim temperaturama i pritisku od 700 do 860 mmHg (Slika 2.5) [40].

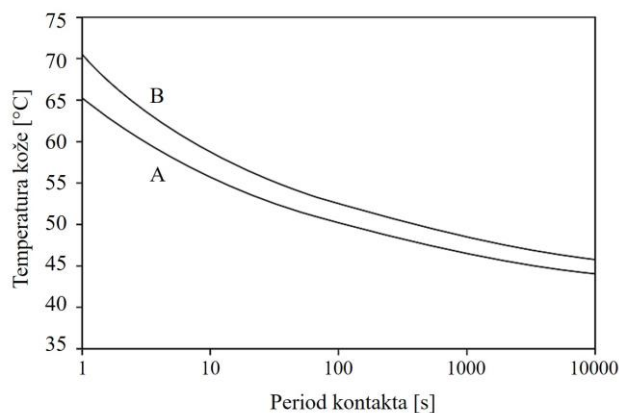


Slika 2.5 Eksperimentalna postavka Moritz i Henriques [38]

Autori su konstruisali uređaj koji ima mesinganu čauru čija je osnova otvorena kako bi se omogućio direktan kontakt između vrela tečnosti i kože. Tečnost se odvojeno zagrevala na određenoj temperaturi u rezervoaru i pumpala kroz gumenu cev sve do mesingane čaure. Kroz donji otvor na mesinganoj čauri koža je direktno izlagana toku tečnosti, a njena temperatura je merena pomoću

termoparova. U eksperimentu su se koristili ulje i voda, ali kako nije bilo razlika u reakciji kože, u većini eksperimenata korišćena je voda. Za životinje su izabrane mlade svinje mase od 8 kg do 10 kg na čijim su bočnim stranama tela nanošene kružne KTO prečnika 25,4 mm (1"). Naneto je ukupno 179 povreda pri temperaturama od 44 °C do 100 °C u trajanju od 1 s do 7 h. Reakcije kože su podeljene na prvostepenu, gde nije došlo do potpunog uništenja epiderma i na drugostepenu i trećestepenu, gde je potpuno uništen epiderm. Drugostepena i trećestepna reakcija kože se razlikuju po tome što kod drugostepene ne dolazi do značajnih nepovratnih povreda derma, dok je kod trećestepene obrnuto. S obzirom na značaj ove studije u Prilogu 1 prikazani su originalni rezultati istraživanja Moritz i Henriques [40] sprovedenih na svinjskoj koži.

Isti autori su dodatno sprovedeli još 33 eksperimenta na 8 volontera kako bi se utvrdilo u kojoj meri rezultati za svinjsku kožu korespondiraju sa rezultatima za ljudsku kožu. Istraživanje je sprovedeno pri temperaturama od 44 °C do 60 °C za periode kontakta od 5 s do 6 h. Reakcija kože je podeljena na prvostepenu, koja uključuje hiperemiju bez gubitka epiderma i na drugostepenu i trećestepenu, koja uključuje kompletnu nekrozu epiderma i različitu dubinu povrede derma. Zaključeno je da postoji mala ili nikakva razlika u reakciji epiderma kod svinjske i ljudske kože. Takođe, zbog značaja istraživanja u Prilogu 2 prikazani su originalni rezultati istraživanja Moritz i Henriques [40] sprovedenih na ljudskoj koži. Moritz i Henriques su podelili KTO kod ljudske kože na prvostepenu, drugostepenu i trećestepenu reakciju, s tim da kod poslednje dve nema razlike te su iz tog razloga objedinjene za razliku od istraživanja sprovedenih na svinjskoj koži. Analizom rezultata definisane su dve krive: kriva A ispod koje se nalaze granični uslovi pri kojima neće doći do primetnih termičkih povreda i kriva B iznad koje se nalaze granični uslovi pri kojima se očekuju termičke povrede. Granični uslovi između A i B krive dovode do oštećenja epiderma, ali ne i transepidermalne nekroze (Slika 2.6).



Slika 2.6 Krive graničnih uslova prema Moritz i Henriques [38]

Postoje mnogobrojne polemike oko načina na koji su Moritz i Henriques klasifikovali KTO. Većina autora se slaže da se prvostepena reakcija kože, zbog toga što ne dolazi do potpunog uništenja epiderma može posmatrati kao I stepen KTO, a drugostepena i trećestepena reakcija kože, pošto dolazi do potpunog uništenja epiderma i derma u manjoj ili većoj meri, kao IIa i IIb stepen KTO. S tim u vezi rezultati Moritz i Henriques se mogu jednostavnije interpretirati tako da se stepeni KTO prikažu u zavisnosti od graničnih uslova, za svinjsku kožu (Tabela 2.2). Uzevši u obzir da Američko udruženje za opekotine ne razlikuje IIa i IIb stepen KTO, ovi podaci su u pomenutim tabelama interpretirani kao II stepen KTO.

Tabela 2.2 Rezultati istraživanja Moritz i Henriques sprovedena na svinjskoj koži (izmenjeno prema literaturi [40])

T_{KTO} [°C]	D_{KTO}	Stepen KTO	T_{KTO} [°C]	D_{KTO}	Stepen KTO	
44	420 min	II	53	20 s	I	
45	150 min	I		30 s	I	
	180 min	II		45 s	I	
46	45 min	I		1 min	II	
	60 min	I		1 min i 30 s	II	
	90 min	II		2 min	II	
46.5	45 min	I	54	15 s	I	
	60 min	II		25 s	I	
47	35 min	I		35 s	II	
	45 min	II		5 s	I	
	50 min	II		10 s	I	
	60 min	II		15 s	I	
48	10 min	I	55	20 s	I	
	12 min	I		25 s	II	
	14 min	I, II		30 s	II	
	15 min	II	56	10 s	I	
	16 min	I		15 s	II	
	18 min	II		20 s	II	
49	20 min	II	58	5 s	I	
	3 min	I		10 s	II	
	4 min	I	60	2 s	I	
	5 min	I		3 s	I	
	6 min	I		5 s	II	
	7 min	I		7 s	I, II	
	8 min	I, II		10 s	II	
	9 min	II		10 min	II	
	10 min	II		1 s	I	
	50	1 min		I	65	2 s
2 min		I	3 s	II		
4 min		I	10 min	II		
5 min		I, II	70	1 s	II	
6 min		II		2 s	II	
6 min i 30 s		II		3 min	II	
51	45 s	I	75	1 s	I	
	1 min	I		5 s	II	
	1 min i 30 s	I	80	1 s	I	
	2 min	I		5 s	II	
	3 min	I, II		85	1 s	I
	4 min	II			5 s	II
	5 min	I, II			90	1 s
10 min	II	5 s	II			
52	30 s	I	95	1 s	I	
	45 s	I		3 s	II	
	1 min i 30 s	II		1 s	I	
	2 min	II	100	3 s	II	
	3 min	II				

Rezultati Moritz i Henriques se takođe mogu interpretirati tako da se stepeni KTO prikažu u zavisnosti od graničnih uslova za ljudsku kožu (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 Rezultati istraživanja Moritz i Henriques sprovedena na ljudskoj koži (izmenjeno prema literaturi [40])

D_{KTO}	44	45	47	48	T_{KTO} [°C] 49	51	53	55	60
3 s									I
5 s									II
20 s								I	
30 s							I	II	
1 min i 30 s							II		
2 min						I			
4 min						II			
6 min						II			
8 min					I				
9 min 30 s					II				
10 min					II				
11 min					II				
15 min				I, II	II				
18 min			II	II					
20 min			I						
25 min			II						
40 min			II						
45 min			II						
2 h		I							
3 h		II							
5 h	I								
6 h	II								

Pojedini standardi sadrže preporuke najviše dozvoljenih temperatura vrućih dodirnih površina, mašina i proizvoda, od kojih se većina oslanja na podatke iz istraživanja Moritz i Henriques [40], te su detaljnije razmotreni u nastavku.

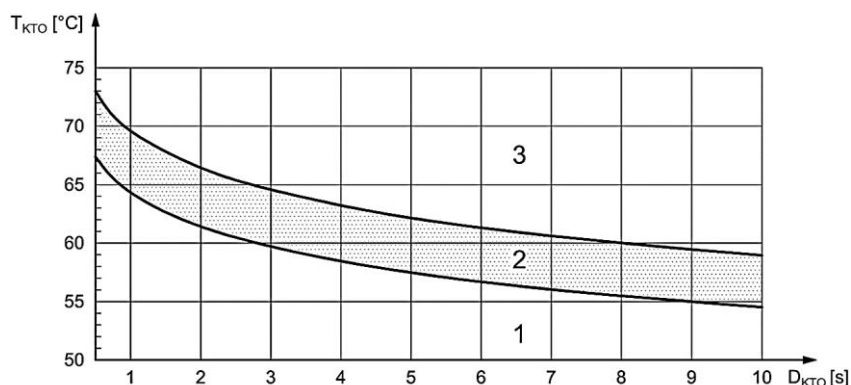
2.4.2 Standardi iz oblasti najviše dozvoljenih temperatura vrućih površina mašina i proizvoda

Međunarodni standard EN ISO 13732-1:2006 prihvaćen je u celosti kao srpski SRPS EN ISO 13732-1:2010, pod nazivom Ergonomija toplotne sredine - Metode za ocenjivanje čovekovog reagovanja na kontakt sa površinom - Deo 1: Vruće površine. Ovaj standard uređuje 1.5.5 zahtev za zaštitu zdravlja i bezbednost Direktive za mašine 2006/42/EC, u kojoj se navodi da je obaveza svakog proizvođača mašine da pri projektovanju i izradi mašine preduzme mere kako bi eliminisao svaki rizik od povreda izazvanih kontaktom ili blizinom vrućih delova mašine ili materijala [9]. S tim u vezi standard definiše granične uslove za nastanak KTO koji se isključivo odnose na vruća čvrsta tela. Izuzetak su voda i tečnosti koje imaju sličan toplotni kapacitet kao metali, gde se u tom slučaju koriste granični uslovi za nastanak KTO za nepremazane metalne površine. Standard se ne primenjuje u slučaju kontakta više od 10% UPT ili više od 10% ukupne površine kože glave, uz uslov da nema direktnog kontakta vitalnih delova lica sa vrućom površinom. Takođe, granični uslovi za nastanak KTO su primenjivi samo u slučaju nastanka I stepena KTO i ne definišu granične uslove za osećaj bola ili nelagode.

U slučaju kada je $D_{KTO} \leq 10$ s, T_{KTO} nisu precizno određene zbog ne uzimanja u obzir mnogobrojnih faktora u istraživanjima, kao npr. debljina i vlažnost kože, prisutne nečistoće na koži, sila pritiska pri kontaktu sa površinom, itd. Iz tog razloga standard za kratkotrajni kontakt sa vrućom metalnom površinom daje grafik prikazan na Slici 2.7 na kojem se razlikuju sledeće tri oblasti:

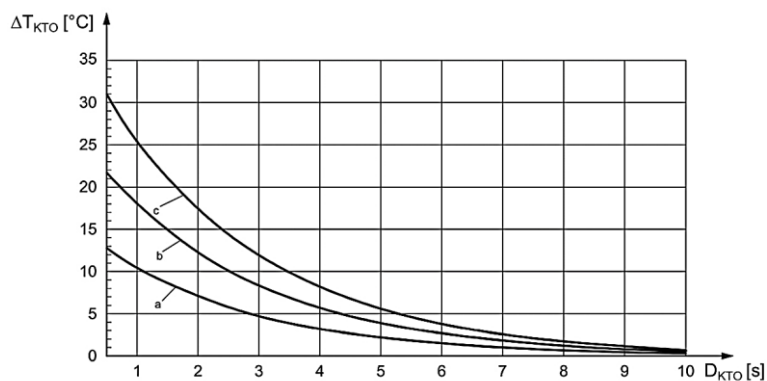
1. granični uslovi (T_{KTO} , D_{KTO}) pri kojima neće doći do nastanka KTO;
2. granični uslovi (T_{KTO} , D_{KTO}) pri kojima može doći do nastanka KTO;
3. granični uslovi (T_{KTO} , D_{KTO}) pri kojima će doći do nastanka KTO.

Donja kriva na Slici 2.7 predstavlja granicu između stanja bez KTO i početka reverzibilnih KTO, dok gornja kriva predstavlja granicu između reverzibilnih i ireverzibilnih KTO koje se ne mogu zalečiti i koje za posledicu imaju potpuno oštećenje kože. Ukoliko je T_{KTO} iznad gornje krive tada se na prvi dodir sa vrućom, nepremazanom metalnom površinom može očekivati KTO, a ako je T_{KTO} ispod donje krive, tada po pravilu ne treba očekivati KTO. U slučaju da se T_{KTO} nalazi u području između gornje i donje krive, tada može, ali ne mora nastati KTO i ovo je posledica nedostatka adekvatnih podataka u istraživanjima iz ove oblasti. Ovo važi za slučaj kada je kontakt sa vrućom površinom kratkotrajan, odnosno kada je $D_{KTO} \leq 10$ s.



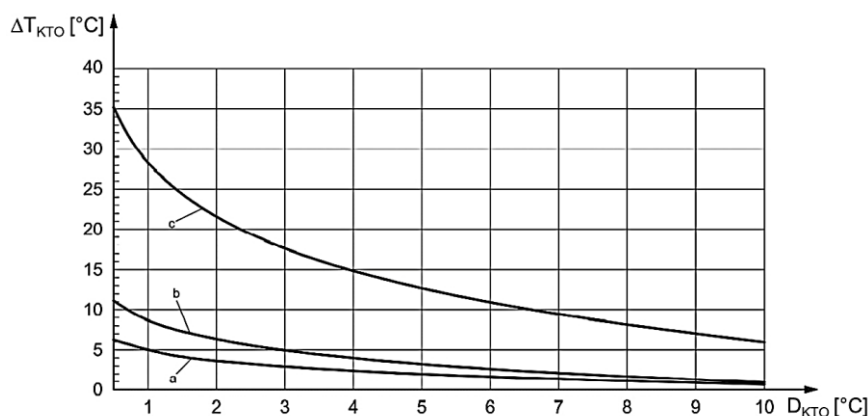
Slika 2.7 Granični uslovi za nastanak KTO za nepremazane metalne površine [11]

T_{KTO} za premazane metalne površine su više u odnosu na nepremazane metalne površine. Porast T_{KTO} za lakirane površine predstavljen je krivama a, b i c na Slici 2.8.



Slika 2.8 Porast T_{KTO} za lakirane metalne površine, debljine a) 50 μm , b) 100 μm i c) 150 μm [11]

Porast T_{KTO} za premazane metalne površine u zavisnosti od vrste i debljine premaza, d [μm] predstavljen je krivama a, b i c na Slici 2.9.



Slika 2.9 Porast T_{KTO} za metalne površine premazane: a) emajlom, $d = 160 \mu\text{m}$ ili praškastim premazom, $d = 60 \mu\text{m}$, b) praškastim premazom, $d = 90 \mu\text{m}$, c) poliamidnim premazom 11 – 12, $d = 400 \mu\text{m}$ [11]

Kada su u pitanju duži periodi kontakta, T_{KTO} su prikazane kao egzaktne vrednosti (Tabela 2.4) u zavisnosti od vrste materijala. T_{KTO} za D_{KTO} koji nisu navedeni u Tabeli 2.4 se dobijaju linearnom interpolacijom između najbližih, poznatih T_{KTO} . Takođe, za kontaktni period od 10 s do 1 min, T_{KTO} za metalne površine se dobijaju linearnom interpolacijom između krive sa Slike 2.7 i odgovarajućih T_{KTO} iz Tabele 2.4. Razlika u T_{KTO} kod premazanih i nepremazanih metalnih površina postoji samo kod kraćih D_{KTO} do 1 min. Za $D_{KTO} = 10 \text{ min}$ i $D_{KTO} \geq 8 \text{ h}$, nastanak KTO uslovljen je samo sa T_{KTO} , ali ne i vrstom materijala i iznosi $48 \text{ }^\circ\text{C}$ i $43 \text{ }^\circ\text{C}$, respektivno.

Tabela 2.4 T_{KTO} za $D_{KTO} \geq 1 \text{ min}$ [11]

Vrsta materijala	T_{KTO} [$^\circ\text{C}$]		
	$D_{KTO} = 1 \text{ min}$	$D_{KTO} = 10 \text{ min}$	$D_{KTO} \geq 8 \text{ h}$
Nepremazani metali	51		
Premazani metali	51		
Keramika, staklo i kamen	56	48	43
Plastične mase	60		
Drvo	60		

D_{KTO} zavisi od više faktora, da li je u pitanju nameran ili nenameran kontakt sa vrućom površinom, pripadnost starosnoj grupi, kao i da li je osoba zdrava ili sa invaliditetom. Za zdrave odrasle osobe prema standardu EN ISO 13732-1:2006 za nenameran kontakt najkraći D_{KTO} iznosi 1 s. D_{KTO} može biti kraći, odnosno 0,5 s ukoliko ne postoji ograničenost u kretanju i moguće je načiniti brz potez povlačenja dela tela od vruće površine usled bola. Za slučaj da se očekuje duži D_{KTO} zbog ograničene mogućnosti kretanja predlaže se 4 s, što je ujedno najkraći period za nameran kontakta.

Standard prikazuje i nekoliko karakterističnih situacija za rukovoaoce mašina, sa njihovim opisom i vremenskim trajanjem (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 Smernice za izbor D_{KTO} [11]

D_{KTO}	Opis radnje	
	Nenamernan kontakt	Namernan kontakt
0,5 s	Najbrže moguće povlačenje nakon osećaja bola usled kontakta sa vrućom površinom bez ograničenja pokreta	Nije primenjivo
1 s	Brzo povlačenje nakon osećaja bola usled kontakta sa vrućom površinom sa ograničenjem pokreta	Nije primenjivo
4 s	Kontakt sa vrućom površinom i duže vreme reagovanja	Uključivanje prekidača, pritiskanje dugmeta
10 s		Duže uključivanje prekidača, podešavanje ručnog točka, ventila itd.
1 min	Pad na vruću površinu, bez mogućnosti ustajanja	Okretanje ručnog točka, ventila itd.
10 min		Korišćenje elemenata za upravljanje (komandi, ručica itd.)
8 h		Dugotrajno korišćenje elemenata za upravljanje (komandi, ručica itd.)

Bitno je napomenuti da granični uslovi definisani standardom EN ISO 13732-1:2006 važe samo u slučaju kada je opekotinom zahvaćeno manje od 10% UPT ili manje od 10% ukupne površine kože glave. Ukoliko kontakt sa vrućom površinom nije lokalni i zahvaćeni su vitalni delovi lica (npr. disajni putevi) može doći do težih povreda čak i pri temperaturama nižim od 43 °C, koliko iznosi T_{KTO} za najduži period kontakta od 8 h (Tabela 2.4).

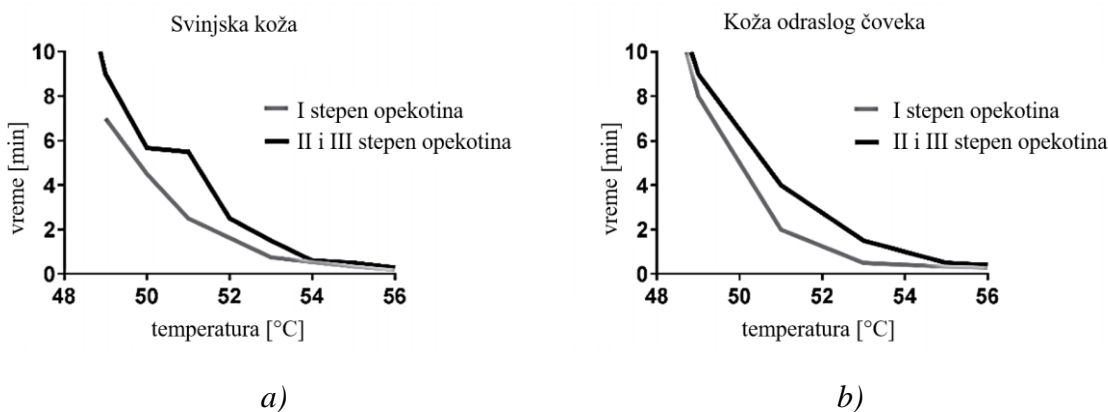
Pored pomenutog standarda, postoje još dva standarda koja definišu najviše dozvoljene temperature vrućih metalnih površina. Američko udruženje za testiranje i materijale izdalo je standard ASTM C1055-03:2009 koji definiše najviše temperature vrućih površina grejnih tela koje mogu dovesti do nastanka KTO, gde se između ostalog navodi da sve metalne površine temperature iznad 70 °C skoro pri trenutnom kontaktu dovode do ozbiljnih termičkih povreda, te je preporuka da njihove temperature ne prelaze navedenu. Standard deli KTO prema mogućnosti oporavka na reverzibilne (od 44 °C do 60 °C), moguće reverzibilne (od 60 °C do 72 °C) i ireverzibilne (više od 72 °C), ali ne definiše periode kontakta [63]. Drugi američki standard UL 60950-1:2019 Uređaji i oprema informacione tehnologije, definiše najviše dozvoljene T_{KTO} za metalne površine u odnosu na delove radnog okruženja rukovaoca. Za spoljašnje površine opreme i unutrašnje delove opreme koji su pristupačni T_{KTO} iznosi 70 °C, za povremeno i kratkotrajno držanje ili dodirivanje ručki, dugmadi, rukohvata itd. iznosi 60 °C, a za kontinuirano držanje ili dodirivanje ručki, dugmadi, rukohvata itd. pri uobičajenom korišćenju iznosi 55 °C. Ni ovaj standard ne sadrži informacije o periodima kontakta [64].

Granični uslovi za nastanak I stepena KTO izazvanih vrućim metalnim površinama definisani su standardom EN ISO 13732-1:2006. Jedan od načina definisanja graničnih uslova za više stepene KTO jeste objedinjavanje podataka iz istraživanja u kojima su se KTO nanosile direktnim kontaktom kože sa vrućim metalnim površinama ili vrelom vodom. Kao što je rečeno, KTO i oparotine predstavljaju različite termičke povrede. Kako ne postoje istraživanja u kojima je jasno potvrđena razlika u njihovim graničnim uslovima, autorka Christine Andrews [65] je u okviru disertacije u kojoj se bavila graničnim uslovima za nastanak različitog stepena oparotina uzela u razmatranje i istraživanja u kojima su korišćene vruće metalne površine za nanošenje termičkih povreda. Pored nje, Ye i De [58] su se, mada u mnogo manjoj meri, bavili istom tematikom, te su i njihovi rezultati poslužili za definisanje graničnih uslova za nastanak viših stepena KTO izazvanih vrućim metalnim površinama. Pregled pomenutih istraživanja dat je u narednom poglavlju.

2.4.3 Novija istraživanja u oblasti graničnih uslova za KTO za metalne površine

Da bi se definisali granični uslovi za više stepene KTO, neophodno je razumevanje odnosa između T_{KT} i D_{KTO} . Istraživanje veze između pomenutih faktora nije novi koncept. U pionirskim radovima Moritz i Henriques [39]-[41] zaključeno je da što je T_{KTO} viša, potreban je kraći D_{KTO} da bi nastala KTO. Njihova istraživanja su utvrdila granične uslove za nastanak nepovratnih epidermalnih povreda koja do danas predstavljaju temelj smernica svetskog programa prevencije opekotina i oparotina. Ova istraživanja, koja služe kao okvir za brojne standarde, uputstva i preporuke kada su u pitanju najviše dozvoljene temperature vrućih površina, previdela su težinu povrede kao jedan od ključnih faktora za kvantifikaciju rizika od KTO. Iz tog razloga neophodno je dopuniti rezultate ovih istraživanja novim saznanjima, kako bi se postavila dobra osnova za buduće strategije i zakonsku regulativu, naročito u oblasti bezbednosti mašina i proizvoda kod kojih postoje toplotne opasnosti u vidu vrućih površina.

Iako nijedan životinjski model nije savršeni prikaz ljudske kože, prednosti korišćenja svinje kao modela za studije termičkih povreda dobro su dokumentovane. Pored oskudne dlake, sličnosti između ljudske i svinjske kože uključuju: relativno debeo epiderm sa izrazitim grebenima i dermalnim papilarnim telima, kompatibilno vaskularno snabdevanje folikula dlake i sličan raspored krvnih sudova u dermu. Takođe, kao i ljudi, svinje se oporavljaju prvenstveno reepitelizacijom. Postoje i određene razlike između ljudske i svinjske kože: svinje nemaju znojne žlezde, imaju manje elastičnih vlakana u dermu i više masnoće ispod potkožice, a subepidermalna vaskularna mreža je manje gusta. Pored toga što imaju sličnu kožu kao ljudi, svinje imaju i dovoljno veliku površinu kože koja omogućava višestruko nanošenje opekotina na istoj životinji. Stvaranje višestrukih opekotina na istoj životinji omogućava povećanje veličine uzorka, te je manji broj životinja potreban za eksperiment, za razliku od miševa i pacova [61]. Sličnost svinjske i ljudske kože se može videti na Slici 2.10, koja je bazirana na istraživanju Moritz i Henriques [40].



Slika 2.10 Stepen opekotina u zavisnosti od graničnih uslova za: a) svinjsku i b) ljudsku kožu [61]

Christine Andrews [65] je istraživala pomenuti fenomen, sa ciljem da se definišu granični uslovi za nastanak oparotina kod dece. U okviru disertacije dat je pregled 42 studije sprovedene na svinjskoj koži, gde su nanošene oparotine ili KTO. S obzirom na to da su predmet disertacije KTO izazvane vrućim metalnim površinama, Tabela 2.6 kombinuje granične uslove iz istraživanja Christine Andrews [65] za nastanak termičkih povreda.

Tabela 2.6 Granični uslovi za nastanak termičkih povreda [65]

Autori	Tip povrede	Vrsta materijala	Granični uslovi: T [°C]/D [s]			
			I stepen	IIa stepen	IIb stepen	III stepen
1. Brans i dr.	oparotina	mesing	/	/	80/30	/
Brans i dr.	KTO	mesing	/	/	170/20	/
2. Branski i dr.	KTO	aluminijum	/	/	/	200/30
3. Breuing i dr.	KTO	aluminijum	/	85/10	/	/
4. Brink i dr.	KTO	čelik	190/1	190/3	190/21	/
5. Brown i dr.	KTO	mesing	/	70/10	/	/
6. Chvapil i dr.	KTO	mesing	/	/	/	165/45
7. Cuttle i dr.	KTO	plastika	/	92/10	92/15	/
8. Danilenko i dr.	KTO	mesing	/	/	100/20	150/25
9. Durham i dr.	KTO	mesing	/	/	/	100/12
10. Eldad i dr.	opekotina plamenom	neprimenjivo	/	/	/	1000/5
11. Eldad i dr.	KTO	plastika	/	/	65/60	/
12. Farhangkhoei i dr.	KTO	mesing	/	/	100/20	/
13. Gaines i dr.	KTO	mesing	/	100/20	/	/
14. Glatter i dr.	KTO	mesing	/	/	/	100/20
15. Goans i dr.	KTO	čelik	/	100/20	/	/
16. Gurfinkel i dr.	radijaciona opekotina	zračenje	/	/	/	400/20
17. Gursu i dr.	KTO, plamen	mesing	/	/	/	/
18. Henze i dr.	oparotina	neprimenjivo	/	/	75/25	/
19. Hoekstra i dr.	KTO	mesing	/	/	170/20	/
20. Jandera i dr.	oparotina	neprimenjivo	/	/	83/11	/
21. Kaczmarek i dr.	KTO	aluminijum, bakar	/	/	80/30	100/30
22. Kim i dr.	KTO	nerđajući čelik	/	/	200/40	/
23. Liu i dr.	KTO	mesing	/	100/20	/	/
24. Lotter i dr.	KTO	aluminijum	100/1-3	100/12	100/30	100/60
25. Menon i dr.	KTO	aluminijum	/	/	90/20	/
26. Moritz i dr.	oparotina	neprimenjivo	/	50/300; 60/5; 70/1	75/5; 100/3	/
27. Morykwas i dr.	KTO	nerđajući čelik	/	100/6	/	/
28. Nanney i dr.	KTO	nepoznato	/	176/6	/	/
29. Orgill i dr.	KTO	aluminijum	/	/	/	100/45
30. Papp i dr.	KTO	mesing	100/1	100/3	/	/
31. Ragol i dr.	KTO	mesing	/	/	100/20	/
32. Rigal i dr.	KTO	aluminijum	60/30	/	/	/
33. Schomacker i dr.	KTO	mesing	/	100/10	100/15	/
34. Sheu i dr.	KTO	nerđajući čelik	/	80/20	90/20	/
35. Shi i dr.	KTO	mesing	/	/	100/45	/
36. Singer i dr.	KTO	aluminijum	/	80/20	/	/
37. Singer i dr.	KTO	aluminijum	70/20	80/20	90/20	100/30
38. Singer i dr.	KTO	aluminijum	/	/	/	80/20
39. Singer i dr.	KTO	mesing	/	/	/	100/30
40. Singh i dr.	KTO	aluminijum	/	/	100/30	/
41. Todorovic i dr.	KTO	nepoznato	/	150/10	/	/
42. Venter i dr.	oparotina	neprimenjivo	/	/	85/10	/

/ podaci su nejasni, nedostupni ili se ne mogu izvesti zaključci iz njih

Autorka navodi da je u literaturi daleko veći broj istraživanja gde su termičke povrede nanošene vrućim metalnim površinama, te se iz tog razloga većina podataka odnosi upravo na granične uslove za nastanak KTO. U Tabeli 2.6 prikazan je stepen različitog tipa termičke povrede u zavisnosti od graničnih uslova, temperature T [°C] i perioda kontakta, D [s] sa naznakom vrste materijala kojim su nanošene termičke povrede. Da bi se omogućilo poređenje studija, autorka je opekotine klasifikovala prema sledećoj nomenklaturi:

- I stepen opekotina - površinske opekotine kod kojih je oštećen samo epiderm;
- Ia stepen opekotina - opekotine kod kojih je oštećen epiderm i površinski (papilarni) derm;
- Ib stepen opekotina - opekotine kod kojih je oštećen epiderm i duboki (retikularni) derm;
- III stepen opekotina - opekotine kod kojih je uništen ceo derm i potkožno tkivo.

U istraživačke svrhe opekotine se vrlo često klasifikuju prema dubini, odnosno stepenu opekotina i to na I, Ia, Ib, III i IV stepen, kao što je opisano u poglavlju 2.3.2, s tim da se često pod IV stepenom opekotina podrazumeva III stepen opekotina sa oštećenjem mišića i kostiju. Međutim, Američko udruženje za opekotine razlikuje samo tri stepena opekotina, te će se iz tog razloga u nastavku smatrati da II stepen opekotina, predstavlja Ia i Ib stepen opekotina, a III stepen, je zapravo III i IV stepen opekotina. Neophodno je usaglasiti klasifikacije KTO, kako bi poređenje rezultata iz različitih istraživanja bilo moguće.

Od ukupno 42 studije prikazane u Tabeli 2.6, za definisanje graničnih uslova za nastanak KTO izazvanih vrućim metalnim površinama (Tabela 2.7) uzete su u obzir studije u kojima je konkretno navedeno kojom vrstom metala su nanošene KTO, kao i termičke povrede u vidu oparotina.

Tabela 2.7 Granični uslovi za nastanak KTO izazvanih vrućim metalnim površinama (izmenjeno prema literaturi [65])

D_{KTO} [s]	T_{KTO} [°C]														
	50	60	70	75	80	83	85	90	100	150	165	170	190	200	
1			II						I					I	
2									I						
3									II				II		
5		II		II											
6									II						
10			II				II		II						
11						II									
12									II,III						
15									II						
20			I		II,III			II	II,III			II			
21													II		
25				II						III					
30		I			II				II,III					III	
40														II	
45									II,III		III				
60									III						
300	II														

Oparotine su uzete u obzir iz tog razloga što nema dovoljno istraživanja u kojima je potvrđena razlika između graničnih uslova za nastanak oparotina i KTO izazvanih vrućim metalnim površinama.

Pored toga, standarda EN ISO 13732-1:2006 takođe navodi da se granični uslovi za nepremazane metalne površine mogu koristiti i za vrelu vodu, a kako postoji evidentan nedostatak relevantnih istraživanja u ovoj oblasti, ovo su ujedno jedini raspoloživi podaci. Od preostalih studija koje nisu uzete u obzir, tri studije su se bavile drugim termičkim povredama (dve studije za opekotine plamenom i jedna za radijacione opekotine) i četiri studije koje, iako su se bavile sa KTO, u dve od njih je korišćena plastika za nanošenje povreda, dok je kod preostale dve ovaj podatak nepoznat, te nisu uzete u razmatranje. U Tabeli 2.7 su iz Tabele 2.6 objedinjene vrednosti za II stepen KTO, a tamo gde se za iste granične uslove pojavio različit stepen opekotina, prikazana su oba.

Postoje i druge studije u kojima granični uslovi za KTO nisu u potpunosti definisani. Raj [66] je u svom radu naveo da se bol oseća već pri temperaturi 44 °C, da I stepen opekotina nastaje pri temperaturi od 44 °C do 55 °C, a II stepen opekotina pri temperaturi 55 °C. Međutim, za prikazane temperature nisu definisani periodi kontakta. Arora i dr. [67] su se nadovezali na prethodna istraživanja i dodali još jedan granični uslov, a to je temperatura od 60 °C za nastanak III stepena opekotina, pri čemu takođe nije definisan period kontakta. Bernard i Foley [46] su se bavili pitanjem dužeg kontakta sa alatima, opremom i drugim elementima radnog okruženja, čije površine usled rada u toploj radnoj sredini mogu da variraju od toplih do vrućih. Rad u ovakvoj sredini može zahtevati da zaposleni budu u dužem kontinuiranom kontaktu sa vrućim površinama alata ili mašina i za razliku od kratkotrajnih kontakata nisu dovoljno istražena. Oni su sprovedeli eksperimente na 9 volontera i ustanovili su da je za period kontakta od 3 min, prosečna $T_{KTO} = 40$ °C za aluminijum. Fokus njihovog istraživanja je bila prevencija toplotnog stresa kod zaposlenih u toplim radnim sredinama, zbog čega su se bavili osećajem bola i I stepenom KTO. Pozivajući se na rad autora Faulkner, Bernard i Foley [46] su dali tabelu gde je za kratkotrajni $D_{KTO} = 1$ s, T_{KTO} za I stepen KTO 60 °C za aluminijum, dok je za čelik nešto viša i iznosi 61 °C. Ovaj podatak je značajan jer ukazuje na razliku u graničnim uslovima između različitih metala. Sheu i dr. [42] su pomoću okrugle šipke od nerđajućeg čelika temperatura 80 °C, 90 °C, 100 °C i 110 °C nanosili KTO različitog stepena. Uređaj za nanošenje KTO temperature 80 °C stvorio je površnu opekotinu koja je išla do dubine papilarnog derma; u ovim ranama došlo je do zarastanja ćelija epiderma koji oblažu kanale znojnih žlezda i folikule dlake. Dublje opekotine nastale su kada je uređaj zagrejan na temperaturu od 90 °C do 110 °C. Histološke studije su pokazale visok stepen korelacije između dubine denaturacije kolagena u rani i temperature izlaganja. I u ovoj studiji je bilo primetno da je temperatura usko povezana sa dubinom opekotina, ali takođe nije definisan period kontakta za pomenute temperature. Hardy i dr. su proučavali prag bola za različite delove tela i došli su do zaključka da se bol oseti pri temperaturi 42,2 °C u donjem delu leđa i 45,7 °C na čelu, sa srednjom vrednošću od oko 44 °C. Izuzetak je bila potpetica sa temperaturom od 53,7 °C zbog relativno deblje kože. Derksen i dr. su zaključili da KTO nastaje za 0,5 s pri temperaturi 82 °C, dok za 100 s nastaje pri temperaturi 46 °C, ali nisu naveli o kom materijalu je reč [68]. Ye i De su u preglednom radu [58] pomenuli relevantna istraživanja u oblasti KTO sprovedena u periodu od 2000. do 2014. godine i dali tabelarni prikaz različitog stepena KTO u odnosu na granične uslove (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 Rezultati istraživanja Ye i De (izmenjeno prema literaturi [58])

D_{KTO} [s]	T_{KTO} [°C]			
	80	90	100	200
10		IIa	IIa	
20	IIb	IIb	IIb	
30			III	III
40			III	

U svojim zaključnim razmatranjima Christine Andrews [65] je ukazala na velike razlike između istraživanja u kojima su nanošene KTO. Razlike se ogledaju u metodologijama prema kojima su korišćeni ne samo različiti metali, nego i njihove dimenzije, kao i različiti pritisci sa kojima su nanošene termičke povrede. Računanjem prosečne temperature i perioda kontakta za KTO i oparotine, autorka je zaključila da oparotine nastaju pri prosečnoj temperaturi od 83 °C i prosečnom periodu kontakta od 14 s, dok je za KTO ovaj granični uslov viši i iznosi 111 °C i 23 s. Iako su metali, u poređenju sa vodom daleko efikasniji provodnici toplote, specifični toplotni kapacitet vode je viši od metala, npr. od mesinga čak deset puta, te je iz tog razloga veća uskladištenost toplotne energije u vodi temperature 82 °C nego u mesinganoj šipci zagrejanom na istoj temperaturi. Odnosno, metali se brže zagrevaju, ali i brže hlade od vode, što znači da će voda pri direktnom kontaktu sa kožom, pri istoj temperaturi, izazvati ozbiljnije termičke povrede od metalnih površina. Iz tog razloga preporuka nije da se granični uslovi za KTO koriste u svrhu prevencije od oparotina. Pored navedenog, poređenje studija je otežano zbog različitih klasifikacija kada je u pitanju dubina termičke povrede, razlika u metodama kao i u vremenu nakon koga su procenjivane dubine termičkih povreda, nedostatka informacija o načinima na koje su sprovedene studije, korišćeni materijali, itd. Autorka je uzela u razmatranje isključivo studije u kojima su stepeni termičkih povreda histološki utvrđeni 7 dana nakon povrede, a kod pojedinih studija morala je da subjektivno izvodi zaključke o stepenima termičkih povreda na osnovu prikazanih podataka. Zbog svega navedenog, jasno je da su dalja istraživanja na polju graničnih uslova za oparotine i KTO neophodna. Međutim, ipak je moguće uspostaviti vezu između podataka, ukoliko se interpretiraju na jedinstven način, kao što je prikazano u Tabeli 2.7 i Tabeli 2.8.

Definisanje graničnih uslova za nastanak I, II i III stepena KTO izazvanih vrućim metalnim površinama je tema šestog poglavlja, u kojem će se definisati koraci inovativne metode PR od KTO. Jedan od njih jeste i kvantifikovanje nivoa rizika od KTO, nakon definisanja faktora rizika: verovatnoće, učestanosti i težine povrede. Kvantifikacija nivoa rizika od KTO je još jedna novina u odnosu na standardnu metodu, gde je u tu svrhu na raspolaganju više metoda procena rizika kojima je posebno posvećena pažnja u narednom poglavlju.

3. METODE PROCENE RIZIKA

Rapidne i radikalne ekonomske, privredne i druge društvene transformacije, usled kojih je sve teže prilagoditi se tranzicionim promenama, predstavljaju jednu od osnovnih odlika savremenog doba. Promene, iako benefitne, dovode do stvaranja novih rizika u radnoj sredini. Kako je tehnički progres nužno povezan sa rizikom, današnje društvo se često posmatra kao „društvo rizika“. Definisane termina rizik umnogome zavisi od sistema koji se posmatra, ali uopšteno govoreći rizik se može posmatrati sa aspekta uzroka i sa aspekta posledica. Sa aspekta uzroka rizik je funkcija opasnosti i mera zaštite, dok je sa aspekta posledica rizik funkcija verovatnoće neželjenog događaja i mere njime izazvanog gubitka. Dakle, rizik objedinjuje dva pojma: verovatnoću i posledicu, tj. štetu [69]. U Republici Srbiji termin rizik na radnom mestu definisan je Zakonom o bezbednosti i zdravlju na radu ("Sl. glasnik RS", br. 101/2005, 91/2015 i 113/2017). Zakon o bezbednosti i zdravlju na radu donesen je na osnovu Direktive 89/391/EEZ o uvođenju mera za podsticanje poboljšanja bezbednosti i zdravlja zaposlenih na radu, koja predstavlja jedan od temeljnih dokumenata sistema bezbednosti i zdravlja na radu EU. Prema Zakonu o bezbednosti i zdravlju na radu rizik predstavlja verovatnoću nastanka povrede, oboljenja ili oštećenja zdravlja zaposlenog usled opasnosti, pri čemu se pod opasnošću smatra okolnost ili stanje koje može ugroziti zdravlje ili izazvati povredu zaposlenog [71].

Zaposleni na radnom mestu mogu biti izloženi različitim opasnostima i/ili štetnostima, koje mogu dovesti do povrede na radu, profesionalnog oboljenja ili bolesti u vezi sa radom. U zavisnosti od prirode i vrste, opasnosti na radnom mestu se dele na: mehaničke opasnosti, koje se pojavljuju u vezi korišćenja opreme za rad; opasnosti koje se pojavljuju u vezi sa karakteristikama radnog mesta i opasnosti koje se pojavljuju korišćenjem električne energije. Sa druge strane, štetnosti na radnom mestu se dele na: štetnosti koje nastaju ili se pojavljuju u procesu rada; štetnosti koje proističu iz psihičkih i psihofizioloških napora; štetnosti u vezi organizacije rada i sve ostale štetnosti koje se pojavljuju na radnim mestima, a ne mogu biti svrstane u prethodne tri grupe [70]. Obaveza svakog poslodavca jeste da, polazeći od načela preventivnih mera, ukoliko ne može da izbegne rizik od povrede na radu, profesionalnog oboljenja ili oboljenja u vezi sa radom usled opasnosti i/ili štetnosti koje se javljaju na radnom mestu, sprovede procenu rizika od istih [71]. S tim u vezi donesen je Pravilnik o načinu i postupku procene rizika na radnom mestu i u radnoj okolini ("Sl. glasnik RS", br. 72/2006, 84/2006 - ispr., 30/2010 i 102/2015). Pravilnik nalaže da se za identifikovane opasnosti i štetnosti na radnom mestu sprovede procena rizika i utvrdi nivo rizika. Nivo rizika zavisi od učestanosti izlaganju opasnostima i/ili štetnostima na radnom mestu, verovatnoće neželjenog događaja (povreda na radu ili profesionalno oboljenje), kao i od težine navedenih posledica.

Prema Zakonu o zdravstvenom osiguranju ("Sl. glasnik RS", br. 25/2019) pod povredom na radu smatra se povreda koja se dogodi u prostornoj, vremenskoj i uzročnoj povezanosti sa obavljanjem posla, prouzrokovana neposrednim i kratkotrajnim mehaničkim, fizičkim ili hemijskim dejstvom, naglim promenama položaja tela, iznenadnim opterećenjem tela ili drugim promenama fiziološkog stanja organizma, dok se pod profesionalnim oboljenjem podrazumeva oboljenje nastalo usled duže izloženosti štetnostima nastalim na radnom mestu [72]. Procenom rizika se sagledava organizacija rada, sredstva rada, radni i tehnološki procesi, sirovine i materijali, sredstva i oprema za ličnu zaštitu na radu, kao i drugi elementi koji mogu da izazovu rizik od povrede na radu ili profesionalnog

oboljenja. Ona predstavlja važan metodološki korak za adekvatno upravljanje rizikom koja je zasnovana na analizi faktora rizika i sprovodi se odgovarajućim tehnikama i metodama. Procena rizika i upravljanje rizikom kao naučna oblast postoji već oko 40 godina i stalno se unapređuje kroz razvoj novih tehnika i metoda. Ove tehnike i metode predstavljaju osnovu procene i upravljanja rizikom, sa čijim se razvojem uspešno povezuje teorijsko znanje i praktična implementacija.

S obzirom na podatke koje koriste, metode za procenu rizika se klasifikuju na: kvalitativne, kvantitativne i kombinovane. Nivo rizika se izražava kvalitativno ili kvantitativno u zavisnosti od načina na koji se izražavaju nivoi faktora rizika. Faktori rizika su ranije pomenuti, a to su učestanost izloženosti opasnostima i/ili štetnostima na radnom mestu, verovatnoća neželjenog događaja koji za posledicu ima povredu na radu ili profesionalno oboljenje i težina povrede na radu ili profesionalnog oboljenja. Pojedine metode procene rizika uzimaju u obzir samo dva od navedena tri faktora rizika, npr. matrice metode, dok pojedine uzimaju u obzir i četvrti faktor rizika, a to je broj osoba izloženih opasnostima i/ili štetnostima, npr. PILZ metoda. Pored razlika u broju faktora rizika, načinu izražavanja nivo rizika bilo množenjem faktora rizika ili pomoću matrica, osnovna podela metoda procena rizika je zasnovana na tipu podataka koje koriste.

Kvalitativne metode procene rizika koriste lingvističke (jezičke) opise za izražavanja nivoa faktora rizika, zbog čega je rezultat kvalitativan opis nivoa rizika. Ove metode rizika koriste matrice rizika, zbog čega se često nazivaju matricnim metodama. Pored kvalitativne procene rizika ove metode služe i za procenu primene i poštovanja kriterijuma koje definišu standardi, zakoni, propisi, itd. [69].

Kvantitativne metode procene rizika koriste numeričke podatke. Kvantitativna analiza rizika predstavlja analitičku metodu kod koje je uticaj procenjivača sveden na najmanji mogući nivo. Pored toga, još jedna prednost kvantitativne analize rizika jeste laka implementacija, jer njeno korišćenje nije uslovljeno velikim iskustvom i predznanjem procenjivača. Sa druge strane, njen bitan nedostatak jeste potreba za velikim brojem statističkih podataka, što može imati restriktivni karakter u situacijama gde je mala učestanost pojave neželjenog događaja [69], [73], [78].

Kombinovane metode procene rizika predstavljaju kombinaciju prethodnih metoda, gde se lingvističkom opisu nivoa faktora rizika dodeljuje težinski koeficijent, odnosno kvalitativan opis nivoa faktora rizika ima i svoju kvantitativnu ocenu. Na ovaj način kombinovane metode izražavaju nivo rizika kao numeričku vrednost, množenjem ili sabiranjem faktora rizika.

U sistemu bezbednosti i zdravlju na radu veoma često se susreću matrice metode, odnosno kvalitativne metode. U nastavku je dat pregled aktuelnog stanja u oblasti metoda procene rizika, sa akcentom na one koji su primenjive za procenu rizika od KTO. S obzirom na to da standard EN ISO 13732-1:2006 sadrži procenu rizika od KTO na osnovu koje je predložena inovativna metoda PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama u poslednjem potpoglavlju su prikazani i prokomentarisani njegovi ključni elementi.

3.1 Aktuelno stanje u oblasti kvalitativnih metoda procene rizika

Kvalitativne metode procene rizika odlikuje grafički prikaz nivoa rizika korišćenjem tzv. matrice rizika, zbog čega se ove metode često nazivaju matričnim metodama. Matrica rizika pomoću kolona i redova povezuju verovatnoću neželjenog događaja i težinu povrede na radu ili profesionalnog oboljenja u čijim presecima je definisan nivo rizika. Kod ovih metoda isključena je učestanost izloženosti opasnostima i/ili štetnostima kao faktor rizika. U zavisnosti od potrebnih nivoa faktora rizika postoje različiti tipovi matrica rizika, npr. 3×3, 4×6, 5×5, itd. Matrice rizika su jednostavni alati za rangiranje i davanje prioriteta riziku i od velike su koristi kod donošenja odluka u vezi nivoa rizika koji se mogu ili ne mogu prihvatiti [74]. Jedna od njihovih osnovnih karakteristika jeste kvalitativan, odnosno lingvistički (jezički) opis, kako nivoa faktora rizika, tako i samih nivoa rizika. Skaliranje nivoa rizika i izbor tipa matrice rizika umnogome zavisi od iskustva i stručnosti procenjivača, zbog čega im se zamera na subjektivnosti. Iako matrice rizika predstavljaju relativno brz i jednostavan način procene rizika, one su pogodne samo u slučaju kada su u pitanju već identifikovane opasnosti i/ili štetnosti koje mogu da dovedu do neželjenog događaja. Dakle, osnovne prednosti matrica rizika jesu praktičnost i direktna veza između verovatnoće neželjenog događaja i težine povrede na radu ili profesionalnog oboljenja kojom se iskazuje nivo rizika. Sa druge strane, nedostaci matrica rizika jesu primena samo kod identifikovanih opasnosti i/ili štetnosti, subjektivnost i mogućnost samo uporedne analize nivoa rizika [75]–[77]. U zavisnosti od nivoa faktora rizika postoji nekoliko tipova matričnih metoda, od kojih su poznatije: matrica rizika 3×3, matrice rizika prema američkom vojnom standardu (MIL-STD) i matrična metoda prema standardu AS/NZS 4360:2004. Navedene matrične metode su detaljnije opisane u nastavku, izuzev poslednje, koja zbog uzimanja finansijskog aspekta u obzir nije pogodna za procenu rizika od KTO.

3.1.1 Matrična metoda procene rizika 3×3

Evropska agencija za bezbednost i zdravlje na radu preporučuje korišćenje matrice rizika 3×3. Ova metoda se često naziva Singapurska metoda. Prema ovoj metodi, rizik se iskazuje kao kombinacija verovatnoće neželjenog događaja (V) i posledice neželjenog događaja, odnosno u konkretnom slučaju težine povrede na radu ili profesionalnog oboljenja (T), jednačina 3.1 [78]:

$$R = V \times T \quad (3.1)$$

Matrica rizika 3×3 kvalitativno opisuje tri nivoa verovatnoće neželjenog događaja (neverovatno, verovatno i veoma verovatno) i tri nivoa posledice neželjenog događaja (umerene, srednje i teške) [78]. Analogno tome, rizik ima tri nivoa koja su kvalitativno iskazana kao nizak, srednji i visok rizik (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 Matrica rizika 3×3 (izmenjeno prema literaturi [78])

Verovatnoća neželjenog događaja	Posledica neželjenog događaja		
	Umerena – povrede i bolesti koje ne prouzrokuju dugotrajne posledice	Srednja – povrede i bolesti koje prouzrokuju srednje, ali ne i dugotrajne posledice	Teška – povrede i bolesti koje prouzrokuju teške i trajne posledice i/ili smrt
Neverovatno – ne bi trebalo da se desi tokom profesionalne karijere zaposlenog	Nizak rizik	Nizak rizik	Srednji rizik
Verovatno – može da se desi nekoliko puta tokom profesionalne karijere zaposlenog	Nizak rizik	Srednji rizik	Visok rizik
Veoma verovatno – može se desi više puta tokom profesionalne karijere zaposlenog	Srednji rizik	Visok rizik	Visok rizik

Matrica rizika 3×3 deli nivoe rizika u dve kategorije: prihvatljiv (nizak i srednji) i neprihvatljiv (visok) rizik. Matrična metoda 3×3 je jedna od često korišćenih metoda procene rizika u Republici Srbiji [79].

3.1.2 Matrična metoda procene rizika prema američkom vojnom standardu

Američki vojni standard (MIL-STD) preporučuje tri tipa matrica za procenu rizika od neželjenog događaja [80]:

- 5×5 (MIL-STD-882B:1984);
- 4×6 (MIL-STD-882C:1993);
- 4×5 (MIL-STD-882D:2000).

Od svih navedenih, najčešće korišćena matrična metoda jeste MIL-STD-882B:1984. Metoda se bazira na matrici rizika 5×5, koja je za potrebe procene rizika od KTO nepraktična zbog finije podele skale težina povrede, nego što je to neophodno. Dakle, u ovu svrhu više ima smisla koristiti matričnu metodu MIL-STD-882C:1993 koja koristi matricu rizika 4×6.

Matrična metoda 4×6 sadrži četiri nivoa (I, II, III i IV), odnosno četiri kvalitativna opisa posledice, koji se odnose između ostalog i na povrede na radu. Kvalitativni opis verovatnoće nastanka neželjenog događaja predstavljen je skalom sa šest nivoa (A, B, C, D, E i F), a rizik je kvalitativno opisan kao visok, srednji, nizak i eliminisan rizik (Tabela 3.2) [78].

Tabela 3.2 Matrica rizika 4×6 (izmenjeno prema literaturi [7])

Verovatnoća neželjenog događaja	Posledice neželjenog događaja			
	Katastrofalne (I)	Kritične (II)	Umerene (III)	Neznatne (IV)
Vrlo verovatno (A)	Visok rizik	Visok rizik	Srednji rizik	Nizak rizik
Verovatno (B)	Visok rizik	Visok rizik	Srednji rizik	Nizak rizik
Povremeno (C)	Visok rizik	Srednji rizik	Srednji rizik	Nizak rizik
Slabo (D)	Srednji rizik	Srednji rizik	Nizak rizik	Nizak rizik
Neverovatno (E)	Nizak rizik	Nizak rizik	Nizak rizik	Nizak rizik
Eliminisano (F)	Eliminisan rizik			

Prema ovoj matricnoj metodi nivoi rizika se takođe dele na dve kategorije: prihvatljiv, gde pripadaju eliminisan, nizak i srednji rizik i neprihvatljiv, gde pripada visok rizik. Matricne metode se mogu koristiti samo za brzu procenu rizika od KTO kada je poznata verovatnoća nastanka KTO i težina KTO. Ove metode ne uzimaju u obzir učestanost izloženosti opasnostima i/ili štetnostima, zbog čega se ne mogu koristiti za kvantifikaciju rizika od KTO, ali mogu poslužiti za rangiranje vrućih metalnih površina kod mašina i proizvoda, prema nivou rizika od KTO.

3.2 Aktuelno stanje u oblasti kombinovanih metoda procene rizika

S obzirom na već spomenute nedostatke kvalitativnih, odnosno matricnih metoda, razvijene su kombinovane metode procene rizika. Osnovna razlika u odnosu na kvalitativne metode procene rizika jeste dodeljivanje težinskih koeficijenata kvalitativnim opisima nivoa faktora rizika. Odnosno, svakom kvalitativnom opisu nivoa faktora rizika se dodeljuje numerička vrednost koja predstavlja njegovu kvantitativnu ocenu. Postoji tri tipa kombinovanih metoda [81]:

1. matricna metoda;
2. tabelarna metoda;
3. grafička metoda.

Poznate kombinovane matricne metode procene rizika su AUVA metoda Austrijskog udruženja proizvođača celuloze i papira i BG metoda Udruženja nemačkih inženjera. Obe metode su zasnovane na formiranju matrica rizika koristeći podmatricnu tabelu verovatnoće i posledica sa uslovima izloženosti i bezbednosti [78], [82], što u slučaju procene rizika od KTO jeste primenjivo, ali je prednost ipak data manje složenim metodama. Grafička metoda koja ima za cilj analizu rizika i opravdanje troškova primenjenih korektivnih mera nije primenjiva kod procene rizika od KTO, te iz tog razloga nije uzeta u razmatranje. Sa druge strane, kombinovane, tabelarne metode procene rizika kombinuju matricni metod i numeričke skale pomoću kojih su kvantifikovani kvalitativni opisi nivoa faktora rizika. Ove metode su manje subjektivne od matricnih metoda i znatno pouzdanije.

Poznate kombinovane tabelarne metode procene rizika su Kinney, PILZ i Guardmaster, koje će biti opisane u nastavku. Pored navedenih postoji još i metoda Fine, koja nije uzeta u razmatranje jer se koristi za donošenje odluka u vezi sa opravdanošću troškova za redukovanje rizika, kao i vremenom za koje bi ti rizici bili otklonjeni, zbog čega nije pogodna za procenu rizika od KTO [73], [78].

3.2.1 Kinney metoda procene rizika

Jedna od poznatijih kombinovanih, tabelarnih metoda procene rizika, jeste Kinney metoda. Prema Kinney metodi rizik zavisi od tri faktora [83]:

1. verovatnoće neželjenog događaja (V);
2. učestanosti izlaganju opasnosti i/ili štetnosti (U);
3. težine povrede na radu ili profesionalnog oboljenja (P).

Rizik se prema Kinney metodi računa kao proizvod navedenih faktora rizika, jednačina 3.2 [84]:

$$R = V \cdot U \cdot P \quad (3.2)$$

Kvantitet svakog faktora rizika se određuje na osnovu numeričke skale koja korespondira kvalitativnom opisu nivoa faktora rizika (Tabela 3.3). Prema Kinney metodi verovatnoća neželjenog događaja ima sedam nivoa i može se kvantitativno oceniti u rasponu od 0,1 do 10. Učestanost izlaganju opasnostima i/ili štetnostima ima pet nivoa i često se u literaturi naziva još i frekvencija izlaganja opasnostima i/ili štetnostima. Kvantitativne ocene ovog faktora rizika su u rasponu od 1 do 10. Težina povrede na radu ili profesionalnog oboljenja, takođe ima pet nivoa i isti raspon kvantitativnih ocena kao faktor rizika U.

Tabela 3.3 Nivoi faktora rizika prema Kinney metodi (izmenjeno prema literaturi [78], [84])

Faktor rizika	Nivo faktora rizika	Kvantitativna ocena nivoa faktora rizika	Kvalitativan opis nivoa faktora rizika
Verovatnoća neželjenog događaja (V)	1	0,1	Jedva pojmljivo
	2	0,2	Praktično neverovatno
	3	0,5	Postoji, ali malo verovatno
	4	1	Mala verovatnoća (moguća u određenim slučajevima)
	5	3	Malo moguće
	6	6	Sasvim moguće
	7	10	Predvidivo, očekivano
Učestanost izloženosti opasnosti i/ili štetnosti (U)	1	1	Retko (godišnje)
	2	2	Mesečno
	3	3	Nedeljno
	4	6	Dnevno
	5	10	Stalno (kontinualno)
Težina povrede na radu ili profesionalnog oboljenja (P)	1	1	Bolest ili povrede koje ne zahtevaju veći tretman
	2	2	Lake telesne povrede sa trenutnom onesposobljenošću
	3	3	Umerene povrede sa privremenom onesposobljenošću
	4	6	Teške telesne povrede sa trajnim invaliditetom
	5	10	Katastrofalne sa višestrukim smrtnim ishodom.

Nakon kvantifikacije nivoa svih faktora rizika, nivo rizika se računa kao njihov proizvod prema jednačini 3.2. Dobijena vrednost u zavisnosti od kriterijuma iz Tabele 3.4 definiše nivo rizika i s njim u vezi preporučene aktivnosti.

Tabela 3.4 Nivoi rizika prema Kinney metodi (izmenjeno prema literaturi [78], [83])

Nivo rizika (R)	Kvantitativna ocena nivoa rizika	Kvalitativan opis nivoa rizika	Preporučene aktivnosti	Kategorija rizika
1	0,1 - 20	Zanemarljiv	Nema.	Prihvatljiv rizik
2	21 - 70	Nizak	Nema potrebe za dodatnim aktivnostima, ali se može razmotriti rešenje ili unapređenje bez dodatnih ulaganja. Neophodan je monitoring.	

3	71 - 200	Srednji	Potrebno je dodatno uložiti napor kako bi se snizio rizik, ali tako da troškovi prevencije budu ograničeni i planirani. Potrebno je definisati rok za sprovođenje unapređenja. Kod događaja sa izuzetno opasnim posledicama, potrebno je dodatno proveriti faktore rizika kako bi se definisale aktivnosti na ublažavanju rizika.	Prihvatljiv rizik
4	201 - 400	Visok	Ne sme se započeti sa aktivnošću sve dok nivo rizika ne bude snižen. Potrebna su znatna sredstva za smanjenje rizika. Ukoliko se rizik odnosi na sve započete aktivnosti, potrebno je preduzeti hitne akcije.	Neprihvatljiv rizik
5	> 400	Nedopustiv	Aktivnost ne sme biti započeta ni nastavljena, sve dok se nivo rizika ne snizi na prihvatljiv nivo. Ukoliko ulaganjem sredstava nije moguće smanjiti rizik na prihvatljiv nivo, aktivnost se zabranjuje.	

Nivo rizika prema Kinney metodi može biti: zanemarljiv, nizak, srednji, visok i nedopustiv. Zanemarljiv, nizak i srednji rizik su prema kategoriji prihvatljiv rizik, dok su visok i nedopustiv neprihvatljiv rizik. U odnosu na nivo rizika preporučuju se određene aktivnosti, ukoliko za tim ima potrebe. Ovo predstavlja ključni element u procesu upravljanja rizikom nakon kojeg se sprovodi kontrola kako bi se utvrdilo da li su preporučene aktivnosti, odnosno mere bezbednosti i zdravlja na radu dovoljne da bi se rizik od povrede na radu ili profesionalnog oboljenja eliminisao ili ukoliko ne, makar smanjio na najmanju moguću meru.

3.2.2 PILZ metoda procene rizika

PILZ je kao vodeća svetska kompanija u oblasti automatizacije razvila svoju metodu procene rizika koja se vrlo često primenjuje u oblasti bezbednosti mašina.

Ključni elementi PILZ metode su [85]:

- utvrđivanje standarda, propisa i procedura koje se odnose na mašinu;
- opis ograničenja mašine;
- pregled mašine u skladu sa važećim nacionalnim i međunarodnim standardima;
- identifikacija i procena postojećih opasnosti i štetnosti;
- ispitivanje opasnosti i štetnosti u svim relevantnim fazama životnog ciklusa mašine;
- analiza i procena rizika;
- preporuka mera za snižavanje rizika.

Usled širokog dijapazona mašina, prvi korak procene rizika jeste upoznavanje sa važećim standardima, propisima i procedurama koji se odnose na konkretan tip mašine. Nakon toga sledi opis mehaničkih i fizičkih karakteristika mašine, njenih funkcionalnih mogućnosti, predviđene namene i razumno predvidivog pogrešnog načina korišćenja mašine, kao i radne okoline u kojoj će se mašina koristiti i održavati. Ovaj korak uglavnom podrazumeva prikupljanje tehničkih informacija o mašini, nakon čega se sprovodi tzv. pregled mašine, odnosno njena usklađenost sa važećim nacionalnim i međunarodnim standardima iz oblasti bezbednosti mašina. Identifikacija i procena postojećih opasnosti i štetnosti polazi od razgovora sa zaposlenima i njihovim predstavnicima za bezbednost i zdravlje na radu, koji imaju iskustva sa radom, pregledom, ispitivanjem ili održavanjem mašine.

Sve opasnosti i štetnosti koje su povezane sa mašinom moraju biti uzete u obzir, čak i kada su sprovedene odgovarajuće mere kontrole rizika. S tim u vezi, mora se posebno obratiti pažnja da li mašina može da [86]:

- izazove povredu usled mehaničkih opasnosti, poput udara, sečenja ili odsecanja, prignječenja, namotavanja, uvlačenja ili zahvatanja, ubadanja ili probadanja, grebanja ili češanja, prskanja tečnosti ili gasova pod visokim pritiskom, itd;
- dovede do pojave opasnih okolnosti, kao što su: štetne emisije, fluidi ili gasovi pod pritiskom, električna energija, buka, zračenje, trenje, vibracija, požar, eksplozija, vlaga, prašina, hladni ili vrući delovi, itd;
- izazove povredu usled lošeg ergonomskeg dizajna.

Ispitivanje opasnosti i štetnosti koje mašina može proizvesti se sprovodi u svim relevantnim fazama životnog ciklusa mašine, pri projektovanju, proizvodnji, eksploataciji, servisiranju, održavanju, itd. Prema PILZ metodi postoji 4 faktora rizika:

1. verovatnoća neželjenog događaja (V);
2. učestanost izlaganju opasnosti i/ili štetnosti (U);
3. težina povrede na radu ili profesionalnog oboljenja (P);
4. broj osoba izloženih opasnostima i/ili štetnostima (B).

Rizik se prema PILZ metodi računa kao proizvod navedenih faktora rizika, jednačina 3.3 [87]:

$$R = V \cdot U \cdot P \cdot B \quad (3.3)$$

Slično Kinney i PILZ metoda za svaki faktor rizika definiše nivoe sa odgovarajućom kvantitativnom i kvalitativnim opisom. Prema ovoj metodi, za razliku od Kinney, verovatnoća neželjenog događaja ima osam nivoa, učestanost izlaganju opasnostima i/ili štetnostima ima šest nivoa, težina povrede na radu ili profesionalnog oboljenja ima devet nivoa, a broj osoba izloženih opasnostima i/ili štetnostima kao faktor rizika ima pet nivoa (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 Nivoi faktora rizika prema PILZ metodi (izmenjeno prema literaturi [86])

Faktor rizika	Nivo faktora rizika	Kvantitativna ocena nivoa faktora rizika	Kvalitativan opis nivoa faktora rizika
Verovatnoća neželjenog događaja (V)	1	0,033	Skoro nemoguće
	2	1	Izrazito mala verovatnoća
	3	1,5	Neverovatno, ali se može desiti
	4	2	Moguće
	5	5	Postoji šansa da se desi
	6	8	Verovatno
	7	10	Vrlo verovatno
	8	15	Izvesno da će se desiti
Učestanost izloženosti opasnosti i/ili štetnosti (U)	1	0,5	Godišnje
	2	1	Mesečno
	3	1,5	Nedeljno
	4	2,5	Dnevno
	5	4	Časovno
	6	5	Konstantno

	1	0,1	Ogrebotine/modrice
	2	0,5	Razderotina/posekotina/blagi zdravstveni simptomi
	3	1	Fraktura manjih kostiju (prsti)
Težina povrede na radu ili profesionalnog oboljenja (P)	4	2	Fraktura većih kostiju (šaka, ruka, noga)
	5	4	Gubitak 1 ili 2 prsta
	6	8	Amputacija noge ili šake, delimični gubitak vida ili sluha
	7	10	Amputacija obe noge ili obe šake, potpuni gubitak vida ili sluha na oba oka ili uha
	8	12	Teške telesne povrede ili trajne bolesti
	9	15	Fatalni ishod
Broj osoba izloženih opasnosti i/ili štetnosti (B)	1	1	1 - 2 osobe
	2	2	3 - 7 osoba
	3	4	8 - 15 osoba
	4	8	16 - 50 osoba
	5	12	Više od 50 osoba

PILZ metoda razlikuje pet nivoa rizika: zanemarljiv, nizak, srednji, visok i nedopustiv. Zanemarljiv, nizak i srednji rizik spadaju u prihvatljiv rizik, dok visok i nedopustiv rizik pripadaju grupi neprihvatljivog rizika (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 Nivoi rizika prema PILZ metodi (izmenjeno prema literaturi [78])

Nivo rizika (R)	Kvantitativna ocena nivoa rizika	Kvalitativan opis nivoa rizika	Preporučene aktivnosti	Kategorija rizika
1	< 5	Zanemarljiv	Nema reagovanja	
2	6 - 50	Nizak	Zahteva monitoring	Prihvatljiv rizik
3	51 - 250	Srednji	Treba preduzeti mere	
4	251 - 500	Visok	Hitno otklanjanje uzroka	Neprihvatljiv rizik
5	> 500	Nedopustiv	Zaustavljanje procesa	

PILZ metoda za razliku od Kinney definiše strožije granice za zanemarljiv, nizak i srednji rizik, dok su kriterijumi za visok i nedopustiv rizik veći. Ova metoda je pogodnija kada je potrebno uzeti u obzir veći broj osoba i u slučaju kada je neophodna finija skala za težinu povrede. S obzirom na to da su vruće površine upravo jedan vid opasnosti sa aspekta bezbednosti mašina, ovo čini PILZ metodu pogodnom za samu problematiku disertacije.

3.2.3 Guardmaster metoda procene rizika

Isporučilac zaštitnih uređaja, Guardmaster predložio je svoju metodu procene rizika. Kod ove metode nivo rizika se izračunava sabiranjem faktora rizika, koji su prema Guardmaster metodi sledeći:

1. verovatnoća neželjenog događaja (V);
2. učestanost izlaganju opasnosti i/ili štetnosti (U);
3. težina povrede na radu ili profesionalnog oboljenja (P).

Nivoi faktora rizika prema Guardmaster metodi prikazani su u Tabeli 3.7.

Tabela 3.7 Nivoi faktora rizika prema Guardmaster metodi (izmenjeno prema literaturi [88])

Faktor rizika	Nivo faktora rizika	Kvantitativna ocena nivoa faktora rizika	Kvalitativan opis nivoa faktora rizika
Verovatnoća neželjenog događaja (V)	1	1	Malo verovatno
	2	2	Verovatno
	3	4	Vrlo verovatno
	4	6	Izvesno
Učestanost izloženosti opasnosti i/ili štetnosti (U)	1	1	Retko (jednom nedeljno)
	2	2	Povremeno (dnevno)
	3	4	Često (više puta u toku dana)
Težina povrede na radu ili profesionalnog oboljenja (P)	1	1	Lake povrede
	2	3	Ozbiljne povrede, lomovi, opekotine, gubitak svesti od kojih je moguć oporavak
	3	6	Teške povrede (trajna invalidnost)
	4	10	Fatalne

Rizik se prema Guardmaster metodi računa kao zbir navedenih faktora rizika, jednačina 3.4:

$$R = V + U + P \quad (3.4)$$

Prilikom postavljanja mašine mogu se desiti pojedini slučajevi u kojima je neophodno korigovati faktore rizika, a to su:

- više od jedne osobe je istovremeno izloženo opasnosti ili štetnosti zbog čega je neophodno faktor rizika P pomnožiti brojem osoba;
- vreme rada u opasnoj zoni je duže od 15 min, zbog čega faktoru rizika U treba dodati 1;
- vreme između održavanja je dugo, treba udvostručiti faktor rizika U ;
- rukovalac nije vešt ili nije obučen, na ukupni nivo rizika R treba dodati 2.

Nakon određivanja numeričke vrednosti faktora rizika i uzimajući u obzir eventualne korekcije, shodno prethodno navedenim slučajevima, nivo rizika se računa kao zbir svih faktora prema jednačini 3.4. i određuje se iz Tabele 3.8.

Tabela 3.8 Nivoi rizika prema Guardmaster metodi (izmenjeno prema literaturi [88])

Nivo rizika (R)	Kvantitativna ocena nivoa rizika	Kvalitativan opis nivoa rizika	Kategorija rizika
1	< 6	Nizak	Prihvatljiv rizik
2	6 -15	Srednji	
3	> 15	Visok	Neprihvatljiv rizik

Prema Guardmaster metodi, nizak i srednji nivo rizika su prihvatljivi rizici, dok je visok rizik neprihvatljiv rizik.

3.3. Aktuelno stanje u oblasti kvantitativnih metoda procene rizika

Razvijanje modela kvantitativnih metoda procene rizika je aktuelna tema među istraživačima iz različitih oblasti. Kvantitativne metode koriste numeričke podatke. Kvantitativna analiza rizika predstavlja analitičku metodu kod koje je uticaj procenjivača sveden na najmanji mogući nivo. Pored toga, još jedna prednost kvantitativne analize rizika jeste laka implementacija, jer njihovo korišćenje nije uslovljeno velikim iskustvom i predznanjem procenjivača. Sa druge strane, njen bitan nedostatak jeste potreba za velikim brojem statističkih podataka, što može imati restriktivni karakter u situacijama gde je mala učestanost pojave neželjenog događaja [69], [73]. Pored pomenutih postoje još i sledeće kvantitativne tehnike i metode procene rizika [78]:

1. PRAT metoda (engl. *Proportional Risk Assessment Technique*) ili Proporcionalna tehnika procene rizika, kvantifikuje rizik množenjem tri faktora rizika: verovatnoće neželjenog događaja, izloženosti neželjenom događaju i mogućih posledica neželjenog događaja.
2. DMRA metoda (engl. *Decision Matrix Risk Assessment*) ili Tehnika procene rizika matricom odlučivanja predstavlja sistematski pristup koji obuhvata kvantifikaciju i kategorizaciju rizika na osnovu verovatnoće neželjenog događaja i njime izazvanih posledica.
3. QRA metoda (engl. *Quantitative Risk Assessment*) ili Kvantitativna procena rizika je razvijena za potrebe eksterne bezbednosti industrijskih postrojenja usled opasnosti od eksplozije prašine.
4. QADS metoda (engl. *Quantitative Assessment of Domino Scenarios*) ili Kvantitativna procena domino scenarija stavlja akcenat na kvantitativnu procenu rizika usled neželjenog događaja sa domino efektom. Domino efekat neželjenog događaja podrazumeva da se primarno izazvan događaj prenosi na susednu opremu postrojenja, prouzrokujući jedan ili više sekundarnih događaja sa znatno težim posledicama u odnosu na one koje bi bile inicirane primarnim događajem.
5. CREA metoda (engl. *Clinical Risk and Error Analysis*) ili Klinički rizik i analiza greške je prvenstveno namenjena za industrijske procese, zbog čega je njena primena u ovoj oblasti dobro utemeljena, ali je vremenom adaptirana i danas se može koristiti i u medicinske svrhe.
6. WRA metod (engl. *Weighted Risk Analysis*) ili Ponderisana analiza rizika je metodološki pristup koji se koristi kao dodatni alat u procesu donošenja odluka, u kojem se efekat mera bezbednosti optimizuje npr. aspektima životne sredine, aspektima kvaliteta, ekonomskim aspektima, itd.

Kako se kvantitativne metode oslanjaju na istorijske podatke i akcenat stavljaju na posmatranju vremenskog razvoja neželjenog događaja, njihova primena za potrebe procene rizika od KTO je isključena.

3.4 Metoda procene rizika od KTO prema standardu EN ISO 13732-1:2006

U standardu EN ISO 13732-1:2006 prikazana je procedura po kojoj se sprovodi procena rizika od KTO, u slučaju kada dolazi ili može doći do direktnog kontakta nezaštićene kože sa vrućom površinom, a njihovi koraci su sledeći:

1. identifikacija vruće (dodirne) površine;
2. analiza zadatka;
3. merenje temperature vruće površine;
4. izbor odgovarajuće T_{KTO} ;
5. poređenje izmerene temperature vruće površine i usvojene T_{KTO} ;
6. određivanje nivoa rizika od KTO;
7. ponavljanje procedure procene rizika od KTO.

Iako standard koristi isključivo termin opekotina, s obzirom na to da naglašava da su u pitanju one koje nastaju direktnim kontaktom sa vrućim površinama, jasno je da su u pitanju KTO. Takođe, standard insistira na terminu dodirne površine, odnosno one površine koje se mogu dodirnuti u toku rada, ne uzimajući u obzir površine koje su van domašaja ili im je na bilo koji drugi način onemogućen pristup. U posebnim slučajevima, dozvoljena su odstupanja od pomenute procedure procene rizika od KTO, npr. kada je neophodno prvo sprovesti analizu zadatka pre identifikacije vrućih površina ili kada se prvo usvaja T_{KTO} , pa se tek onda meri temperatura vruće površine. U nastavku su detaljnije objašnjeni koraci procedure procene rizika od KTO prema standardu EN ISO 13732-1:2006.

3.4.1 Identifikacija vruće (dodirne) površine

Ukoliko mašina ili proizvod imaju jednu ili više vrućih površina neophodno je prikupiti informacije o:

- pristupačnosti svim površinama;
- gruboj proceni temperature površina (vruće, umerene, hladne);
- vrsti materijala površina;
- teksturi površina;
- svim uslovima rada mašine ili proizvoda kada su temperature njihovih površina najviše.

3.4.2 Analiza zadatka

U analizi zadatka prikupljaju se sve neophodne informacije o korišćenju mašine ili proizvoda sa posebnim osvrtom na mogućnost namernog ili nenamernog kontakta sa vrućom površinom i pripadnosti starosnoj grupi osobe koja bi mogla doći u kontakt sa mašinom ili proizvodom (npr. deca ili odrasli). U ovom koraku definiše se verovatnoća i period kontakta sa vrućom površinom. Analizom zadataka dobijaju se informacije o:

- vrućim dodirnim površinama za koje se sprovodi procena rizika od KTO;
- namernom i nenamernom kontaktu;
- verovatnoći namernog i nenamernog kontakta;
- učestanosti namernog i nenamernog kontakta;
- periodu kontakta sa vrućom površinom, D_{KTO} ;
- osobama koje dolaze ili mogu doći u kontakt sa vrućim površinama;
- opsegu snage/temperature mašine ili proizvoda tokom korišćenja.

Analiza zadatka predstavlja analizu uslova pri uobičajenom korišćenju mašine ili proizvoda, kao i uslove koji se javljaju pri održavanju, popravci, itd.

3.4.3 Merenje temperature vruće površine

Temperatura se meri samo na onim vrućim površinama gde je očekivano da će doći do kontakta. Merenje se izvodi pri uobičajenim uslovima rada i u uslovima kada se javljaju najviše temperature površine. Kod merenja temperature mora se omogućiti dobar kontakt između mernog senzora i vruće površine. Temperatura se očitava tek kada se uspostavi temperaturni ekvilibrijum između vruće površine i mernog senzora. Merenje temperature treba sprovesti električnim termometrom sa metalnim kontaktnim senzorom, zanemarljive toplotne kapacitivnosti. Tačnost instrumenta mora biti najmanje $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ za temperature do $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ za temperature više od $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.4.4 Izbor odgovarajuće T_{KTO}

Izbor odgovarajuće T_{KTO} zavisi od prirode kontakta, njegovog trajanja, vrste materijala od kojeg je izrađena vruća površina, kao i od pripadnosti starosnoj grupi osoba koje dolaze ili mogu doći u kontakt sa vrućim površinama mašine ili proizvoda.

Postupak izbora odgovarajuće T_{KTO} je sledeći:

1. Iz analize zadatka se zaključuje da li je kontakt sa vrućom površinom nameran ili nenameran i o kojoj starosnoj grupi je reč (deca, odrasli, starije osobe ili osobe sa invaliditetom).
2. Za nenameran kontakt sa vrućom površinom preporuka je da za:
 - odrasle najkraći period kontakta bude 1 s. U slučaju kada nema nikakvih ograničenja pokreta i moguće je usled osećaja bola pri kontaktu sa vrućom površinom najbrže moguće povlačenje, period kontakta je 0,5 s. Ukoliko se očekuje duže vreme reagovanja zbog ograničenosti u kretanju period kontakta je 4 s;
 - decu najkraći period kontakta bude 1 s. U slučaju kada se zbog njihovih godina očekuje duže vreme reagovanja, period kontakta je 4 s. Deca do 2 godine nemaju dovoljno razvijene reflekse, zbog čega period kontakta treba da bude duži, odnosno 15 s;
 - starije osobe najkraći period kontakta bude 1 s. Ukoliko se zbog njihovih godina očekuje duže vreme reagovanja, period kontakta je 4 s;
 - osobe sa fizičkim invaliditetom period kontakta je duži, a trajanje zavisi najviše od načina na koji osoba sa invaliditetom koristi mašinu ili proizvod.
3. Za nameran kontakt sa vrućim površinama najbolje je izmeriti D_{KTO} . Ukoliko merenje iz nekog razloga nije moguće, period kontakta se može odrediti iz Tabele 2.5. Tabela 2.5 predstavlja osnovu za određivanje perioda kontakta, koji u slučaju namernog kontakta sa vrućom površinom ne sme biti kraći od 4 s. Tabela 2.5 se odnosi na zdrave odrasle osobe, decu, starije osobe i osobe sa fizičkim invaliditetom. Ipak treba razmotriti da li će mašinu ili proizvod koristiti različite grupe ljudi, te shodno tome treba menjati periode kontakta. Ako su mašine ili proizvodi posebno izrađeni za osobe sa invaliditetom, onda se vrsta invaliditeta treba detaljno razmotriti, uzevši u obzir stručne medicinske savete.
4. Izbor odgovarajuće T_{KTO} je moguć tek nakon određivanja perioda kontakta i kada je poznata vrsta materijala. Na osnovu ovih podataka se određuju T_{KTO} kao raspon temperatura sa odgovarajućih grafika prikazanih u standardu EN ISO 13732-1:2006, za različite vrste materijala za kraće D_{KTO} ili kao egzaktno vrednosti prikazane u Tabeli 2.4 za duže periode kontakta. Za materijale koji nisu izričito navedeni u standardu EN ISO 13732-1:2006 važe granični uslovi za grupe materijala koji su im najbliži po toplotnoj inerciji.

3.4.5 Poređenje izmerene temperature vruće površine i usvojene T_{KTO}

Poređenjem izmerene temperature vruće površine i usvojene T_{KTO} mogući su sledeći slučajevi:

1. izmerena temperatura vruće površine je viša od T_{KTO} ;
2. izmerena temperatura vruće površine se nalazi u rasponu temperatura usvojenih sa grafika;
3. izmerena temperatura vruće površine je niža od T_{KTO} .

3.4.6 Određivanje nivoa rizika od KTO

Nivo rizika od KTO se određuje u odnosu na rezultate prethodnog koraka procedure i to:

1. U slučaju kada je izmerena temperatura viša od T_{KTO} doći će do nastanka KTO. Odnosno, postoji rizik od KTO koji se ne može kvantifikovati, ali može biti kvalitativno opisan. Rizik od KTO je veći što je:
 - temperatura vruće površine viša od T_{KTO} ;
 - period kontakta sa vrućom površinom duži od D_{KTO} ;
 - veća učestanost izloženosti vrućoj površini;
 - veća mogućnost pristupa vrućoj površini;
 - manja mogućnost brzog povlačenja usled ograničenosti u kretanju;
 - manja informisanost o bezbednom načinu korišćenja mašine ili proizvoda;
 - manje poznat ili očekivan rizik od KTO (npr. kod dece);
 - usled funkcionalnosti mašine ili proizvoda pri uobičajenom korišćenju istih neizbežna mogućnost izlaganja vrućoj površini (npr. grejna ploča pegle).
2. U slučaju kada se izmerena temperatura vruće površine nalazi u rasponu temperatura usvojenih sa grafika onda dolazi ili može doći do nastanka KTO. Dakle, postoji određen rizik od KTO koji se može kvantitativno opisati kao u prethodnom slučaju.
3. U slučaju kada je izmerena temperatura niža od T_{KTO} neće doći do nastanka KTO i ne postoji rizik od KTO.

3.4.7 Ponavljanje procedure procene rizika od KTO

Procena rizika od KTO se sprovodi za sve vruće površine koje se dodiruju ili se mogu dodirnuti, s tim da je neophodno ponoviti opisanu proceduru ukoliko dođe do:

- konstrukcionih promena mašine ili proizvoda;
- promene opsega snage/temperature mašine ili proizvoda;
- promene namene mašine ili proizvoda;
- promene bilo kakvih okolnosti koje mogu dovesti do drugačijih rezultata procene rizika.

3.4.8 Nedostaci metode procene rizika od KTO

Osnovni nedostaci procene rizika od KTO izazvanih vrućim površinama mašina i proizvoda prema standardu EN ISO 13732-1:2006 jesu sledeći:

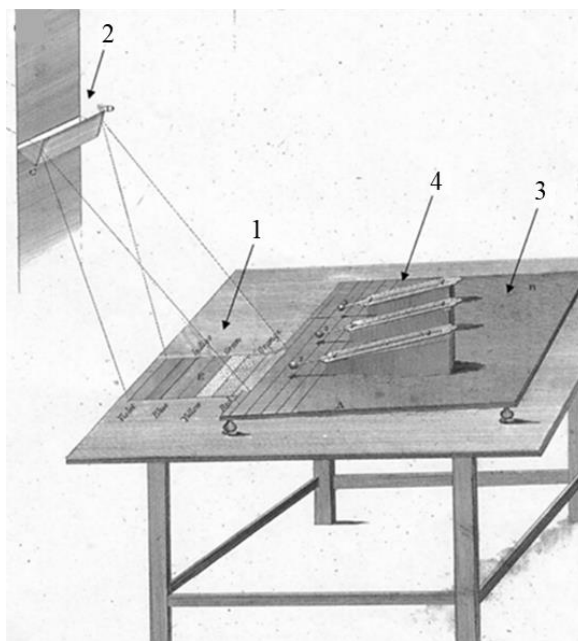
- rizik od KTO se ne može kvantifikovati;
- temperatura vruće površine se meri na izabranim mestima pomoću termoparova;
- granični uslovi su bazirani na istraživanjima sprovedenim u periodu od 1947. do 1989. godine, sa akcentom na istraživanja Moritz i Henriques [40];

- granični uslovi nisu definisani za više stepene KTO;
- veličina metalne površine sa kojom se može doći u kontakt nije uzeta u obzir;
- težina KTO nije uzeta u obzir.

S obzirom na navedene nedostatke, postoji potreba za razvojem inovativne metode PR rizika od KTO, između ostalog i u segmentu merenja temperature vrućih površina. Za potrebe merenja temperature vrućih površina se prema preporukama standarda EN ISO 13732-1:2006 uglavnom koriste termoparovi. Termoparovi predstavljaju kontaktne merne senzore, koji zbog svojih malih dimenzija često zahtevaju postavljanje u većem broju na izabranim mestima na posmatranoj vrućoj površini, što je naročito nepraktično kada su u pitanju veće površine mašina i proizvoda. Kontaktno merenje temperature moguće je unaprediti primenom infracrvene termografije (ICT). ICT predstavlja metodu za beskontaktno merenje temperature, čiji najpoznatiji uređaj, infracrvena (IC) kamera omogućava brzo i jednostavno praćenje i merenje temperatura na celokupnoj posmatranoj površini, što je velika prednost u odnosu na termoparove. Iz tog razloga, naredno poglavlje je posvećeno ICT, ponajviše IC kameri kao uređaju pomoću kojeg bi se mogle prikazati zone rizika od KTO na vrućim metalnim površinama.

4. INFRACRVENA TERMOGRAFIJA

Fundamentalni značaj u razvoju ICT imao je eksperiment astronoma Vilijama Heršela koji je rezultirao otkrićem infracrvenog (IC) zračenja. Heršel je u eksperimentu posmatrao toplotne efekte u različitim spektralnim opsezima sunčevog zračenja, propuštajući svetlosni snop kroz staklenu prizmu i mereći temperaturu boja dobijenih razlaganjem sunčevih zraka. Za merenje temperature koristio je osetljive živine termometre postavljene u posebne crne kalupe, koji su apsorbirali upadno zračenje i na taj način omogućili merenje temperature boja duž spektra (Slika 4.1). Eksperiment je pokazao da temperatura boja raste od plave ka crvenoj i da postoji deo spektra neposredno uz crvenu oblast čija je temperatura viša od svih izmerenih u vidljivoj oblasti. Ovim je otkriveno da postoje zraci koji su nevidljivi golim okom, ali koji se manifestuju u vidu toplote. Heršel ih je nazvao nevidljivim toplotnim zracima, koji su danas poznatiji pod nazivom IC zraci [89]. Pronalaskom IC zraka otkriven je prenos toplote zračenjem, zahvaljujući kojem su razvijene beskontaktno metode merenja temperature.



Slika 4.1 Skica eksperimentalne postavke Vilijama Heršela: 1 - spektar sunčevog zračenja, 2 - staklena prizma, 3 - postolje, 4 - živini termometri [89]

Intenzivnija primena ICT 50-tih godina XX veka bila je rezultat njene primene u vojne svrhe za navođenje projektila tokom Drugog svetskog rata. Nakon završetka rata komercijalno korišćenje ICT se naglo razvilo, a već krajem 1965. godine švedska kompanija Agema (danas FLIR) razvila je prvi ICT uređaj, odnosno infracrvenu termografsku kameru ili kraće infracrvenu (IC) kameru, čija je prvobitna namena bilo ispitivanje dalekovoda.

Njihov prvi model IC kamere je dobio naziv Termovizija 651, zbog čega je termin termovizija, odnosno termovizijska kamera danas prešao u svakodnevnu upotrebu [90]. Industrijska primena IC kamera eksponencijalno je rasla tokom godina, a otkrićem da se na koži obolelih od raka pokazuje viša temperatura, uvelo je ICT i u medicinu. Sa razvojem kompjuterske tehnologije i digitalne slike sredinom 90-ih godina XX veka, ICT je pronašla primenu i mnogim drugim oblastima nauke i tehnologije [91], [92], a naročito u sferama gde promene temperature odražavaju kvalitet i stanje proizvoda ili procesa [93]. ICT je beskontaktna i nedestruktivna tehnika za merenje temperature, pogodna za preventivna i predikativna održavanja [94], [95]. Zbog toga što je nedestruktivna, ova tehnika je odličan alat za Infracrvena Nedestruktivna Ispitivanja Materijala (engl. *Infrared Nondestructive Testing - IRNDT*), kao i za beskontaktno merenje temperature na udaljenim i nepristupačnim mestima [96], [97].

S obzirom na složenost ICT, ovo poglavlje se sastoji iz pet delova. U prvom delu prikazana je njena sistematizacija, dok je u drugom delu temeljno obrazložen prenos toplote zračenjem na kojem je zasnovan princip rada ICT. Treći deo se tiče detektora IC zračenja, sa posebnim osvrtom na detektore IC kamere. Četvrti deo opsežno opisuje princip rada IC kamere i problematiku u vezi emisivnosti, kao najvažnijeg parametra kojeg treba odrediti pre samog ICT merenja temperature. Inovativna metoda PR od KTO temelji se na merenju temperature vrućih metalnih površina pomoću IC kamere. Merenje temperature metalnih površina sa aspekta ICT je vrlo diskutabilno zbog njihove reflektivne površine i niske emisivnosti, bez čijeg poznavanja nije moguće tačno odrediti temperaturu [98]. Emisivnost metala ima tendenciju promene u zavisnosti od mnogobrojnih faktora i iako postoje tablice preporučenih vrednosti emisivnosti za metale, često se zbog njihove nepotpunosti u praksi pribegava eksperimentalnim metodama, čiji je pregled aktuelnog stanja dat u poslednjem, petom delu.

4.1 Podela infracrvene termografije

U osnovi ICT se može podeliti na kvalitativnu i kvantitativnu. Kvalitativna ICT služi za praćenje temperaturnih promena ili distribucije temperature na površini posmatranog fizičkog tela³, te se često primenjuje kod kontrole građevinskih objekata, nadzora, geoloških ispitivanja i sl. Sa druge strane, kvantitativna ICT se koristi kada je neophodno tačno odrediti temperaturu, kao što je to slučaj kod preventivnog održavanja mašina, naučnih istraživanja, ispitivanja materijala, itd. Druga značajna podela ICT jeste na pasivnu i aktivnu. Kod pasivne ICT temperatura tela se meri na osnovu njegove sposobnosti da spontano emituje IC zračenje i često se koristi za kvalitativna ispitivanja njegove strukture, odnosno nedostataka istih. Za razliku od pasivne ICT, aktivna ICT koristi dodatne, spoljašnje izvore toplote, poput lampi ili lasera, kako bi se narušila uniformna distribucija temperature na površini tela. Razlog tome jeste što naprsnuća, delaminacije, vlaga, vazdušni džepovi i slične anomalije u materijalu, usled različitog koeficijenta prenosa toplote, dovode do pojave temperaturnog gradijenta na površini tela, te se na ovaj način lako uočavaju na njegovoj površini.

³ Fizičko telo, odnosno u daljem tekstu telo predstavlja sve što je izgrađeno od supstance, zauzima određeni prostor i ima određenu masu.

Postoji nekoliko tehnika aktivne ICT koje se međusobno razlikuju prema načinu toplotne stimulacije tela, prikupljanju i analizi podataka, a najpoznatije od njih su [99]–[101]:

1. Impulsna termografija;
2. Termografija sa stepenastim zagrevanjem;
3. Lock-in (sinhrona) termografija;
4. Termografija faznog impulsa;
5. Vibrotermografija.

Impulsna termografija predstavlja ICT tehniku kod koje se toplotna stimulacija tela postiže izvorima toplote poput impulsnih lampi ili lasera, koji zrače energiju u vrlo kratkim vremenskim intervalima od nekoliko ns do nekoliko stotina ms. Cilj je da se naruši uniformna distribucija temperature na površini tela, gde nakon prestanka rada izvora toplote dolazi do brzog hlađenja usled difuzije, konvekcije, kondukcije i zračenja sa površine tela [99]. Nakon hlađenja defekti u telu dovode do sporije difuzije, što se manifestuje njihovom nižom temperaturom u odnosu na površinu tela ispod koje nema defekta. Na ovaj način se lakše uočava temperaturni kontrast između defekta i tela, te je moguće sprovesti kvantitativnu analizu i na osnovu potrebnog vremena za prenos toplote odrediti dubinu defekta. Impulsna termografija može biti transmisiona i refleksiona. Kod transmisione impulsne termografije zagrevanje i merenje temperature se sprovodi sa suprotnih strana posmatranog tela, dok se kod refleksione impulsne termografije zagrevanje i merenje temperature sprovodi na istoj strani posmatranog tela.

Za razliku od impulsne termografije, kod koje se nakon zagrevanja prati temperatura tela tokom hlađenja, kod termografije sa stepenastim zagrevanjem temperaturne promene se prate prilikom zagrevanja. Ove promene su u direktnoj vezi sa ispitivanim karakteristikama tela. Termografija sa stepenastim zagrevanjem se naziva još i infracrvena radiometrija sa vremenskom rezolucijom (engl. *Time-Resolved Infrared Radiometry* - TRIR) i najčešće se koristi za ispitivanje višeslojnih struktura, kompozita, keramike itd. [99].

Lock-in (sinhrona) termografija predstavlja ICT tehniku gde se analiziraju generisani toplotni talasi u telu. Ovde se telo izlaže sinusnom, moduliranom signalu koji proizvodi toplotne talase u telu sa različitom frekvencijom i atenuacijom. Kao izvori toplote se koriste halogene lampe, laseri ili toplotni pištolji. Za vreme ispitivanja, simultano se registruju signali pobude i signali odziva ispitivanog tela, gde je neophodno sprovesti precizno merenje vremenske zavisnosti snimljenih signala. Na ovaj način se dobija amplitudna i fazna raspodela IC zračenja sa površine tela. Amplitudna raspodela zavisi od karakteristika površine posmatranog tela, dok fazna raspodela zavisi od tzv. vremena kašnjenja, odnosno fazne razlike između pobudnog i dobijenog signala [99].

Termografija faznog impulsa predstavlja kombinaciju impulsne i Lock-in termografije, kod koje se prikupljeni podaci transformišu iz vremenskog u frekventni domen.

Vibrotermografija je aktivna ICT tehnika kod koje se energija mehaničkih vibracija indukovanih na površinama posmatranog tela pretvara u toplotnu energiju. Toplotna energija se javlja kao posledica trenja između molekula na mestima gde postoje defekti u vidu naprsnuća ili delaminacija [99]. Ova tehnika se naziva još i ultrazvučna termografija ili termosonika.

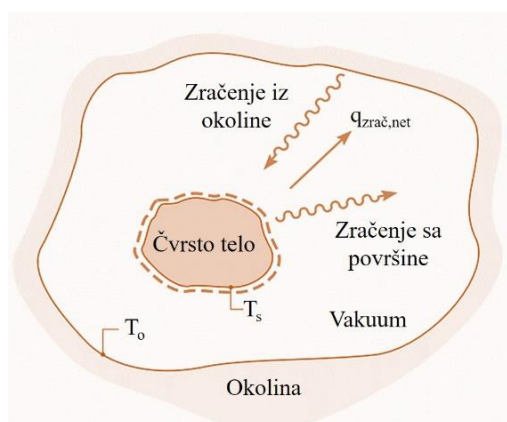
Princip rada ICT uslovljen je prenosom toplote zračenjem, čije su osnove iscrpno objašnjene u knjizi: „Osnove prenosa toplote i mase”, autora Bergman i dr. [102] i kao takve prikazane u narednom poglavlju.

4.2 Osnove prenosa toplote zračenjem

Toplota predstavlja transfer toplotne energije čiji je prenos uslovljen postojanjem razlike temperatura između sistema⁴ i njegove okoline ili između delova istog sistema. Razmenu toplote uslovljavaju dve fizičke veličine: temperatura i količina toplote. Suma kinetičkih energija molekula tela predstavlja količinu toplote tela, dok je intenzitet njihovog kretanja zapravo temperatura. Toplota između dva tela u fizičkom kontaktu se razmenjuje sve dok se njihove temperature, odnosno intenziteti kretanja njihovih molekula, ne izjednače.

Prema Drugom zakonu termodinamike toplota uvek spontano prelazi sa tela koje ima višu na telo niže temperature, pri čemu se ovaj prelaz može realizovati na tri načina: kondukcijom, konvekcijom i/ili zračenjem (radijacijom). Za razliku od kondukcije i konvekcije, prenos toplote zračenjem ne zahteva prisustvo materije i zbog toga se uspešno odvija čak i u vakuumu. Prenos toplote zračenjem je od izuzetne važnosti za mnoge industrijske procese grejanja, hlađenja i sušenja, kao i za metode konverzije energije koje uključuju sagorevanje fosilnih goriva i sunčevo zračenje.

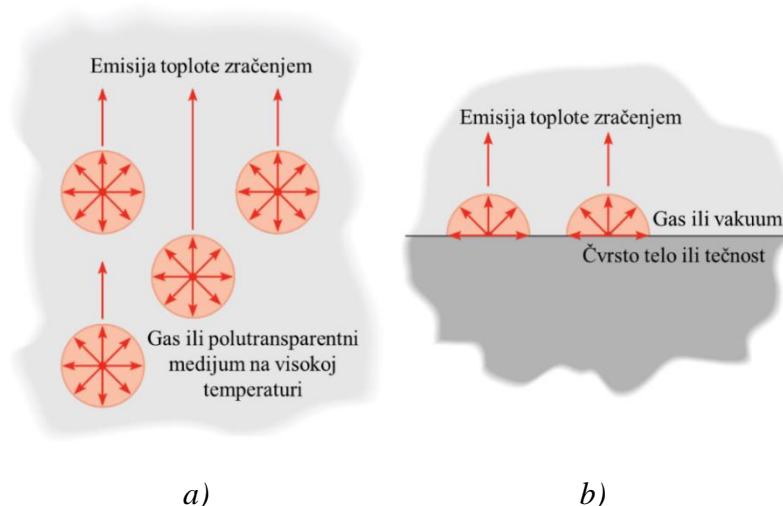
Na Slici 4.2 prikazano je čvrsto telo u vakuumu čija je temperatura T_s viša od temperature u okolini T_o . S obzirom na to da je u vakuumu moguć isključivo prenos toplote zračenjem, prenos, odnosno gubitak toplote sa površine čvrstog tela u ovom slučaju nije moguć kondukcijom ni konvekcijom. Uprkos tome, intuitivno se pretpostavlja da će se čvrsto telo hladiti sve dok ne uspostavi temperaturni ekvilibrijum sa okolinom. Hlađenje čvrstog tela je povezano sa redukcijom uskladištene toplotne energije i javlja se kao posledica emisije toplotnog zračenja sa njegove površine. Istovremeno, površina čvrstog tela će apsorbovati zračenje iz okoline. Međutim, ukoliko važi da je $T_s > T_o$, ukupna količina toplote prenesena zračenjem $q_{zrač.net}$ predstavlja samo toplotu prenesenu sa površine čvrstog tela, koja će se hladiti sve dok se temperature T_s i T_o ne izjednače.



Slika 4.2 Prenos toplote zračenjem između čvrstog tela i okoline u vakuumu [102]

⁴ Sistem predstavlja skup delova povezanih zajedničkom karakteristikom ili funkcijom, a takođe može označavati i tehničku uređenost, npr. optički sistem IC kamere.

Toplotno zračenje zapravo predstavlja stopu ili brzinu kojom materija na konačnoj temperaturi emituje toplotu. Sam mehanizam emisije toplote je povezan sa unutrašnjom toplotnom energijom koja se oslobađa kao rezultat oscilacija ili tranzicije velikog broja konstitutivnih elektrona materije. Iz tog razloga emisija toplotnog zračenja se direktno povezuje sa toplotno ekscitovanim, tj. pobuđenim uslovima (elektronima) koji vladaju unutar materije. Svi oblici materije emituju toplotu. Za gasove i polutransparentne medijume (npr. staklo ili kristale soli) na visokim temperaturama, emisija toplote je zapreminski fenomen, kao što je ilustrovano na Slici 4.3a.



Slika 4.3 Emisija toplote zračenjem kao a) zapreminski fenomen i b) površinski fenomen [102]

Kod čvrstih tela i tečnosti, u većini slučajeva, toplotno zračenje potiče od njihovih internih molekula. Između čvrste materije ili tečnosti, sa jedne strane i okoline, koja može biti gas ili vakuum, sa druge strane, postoji jasno definisana granična površina. Samo molekuli čvrste materije ili tečnosti koji su približno udaljeni 1 μm od ove površine učestvuju u emisiji toplote, zbog čega se emisija toplote zračenjem čvrstih tela ili tečnosti može smatrati površinskim fenomenom (Slika 4.3b).

Sa stanovišta prenosa toplote zračenjem pomoću elektromagnetnih talasa, nasuprot teoriji prenosa toplote česticama koje se nazivaju fotoni ili kvanti, toplotnom zračenju se mogu pripisati svojstva talasa, u smislu talasne dužine λ [μm] i frekvencije ν [Hz], koje povezuje sledeća relacija, jednačina 4.1:

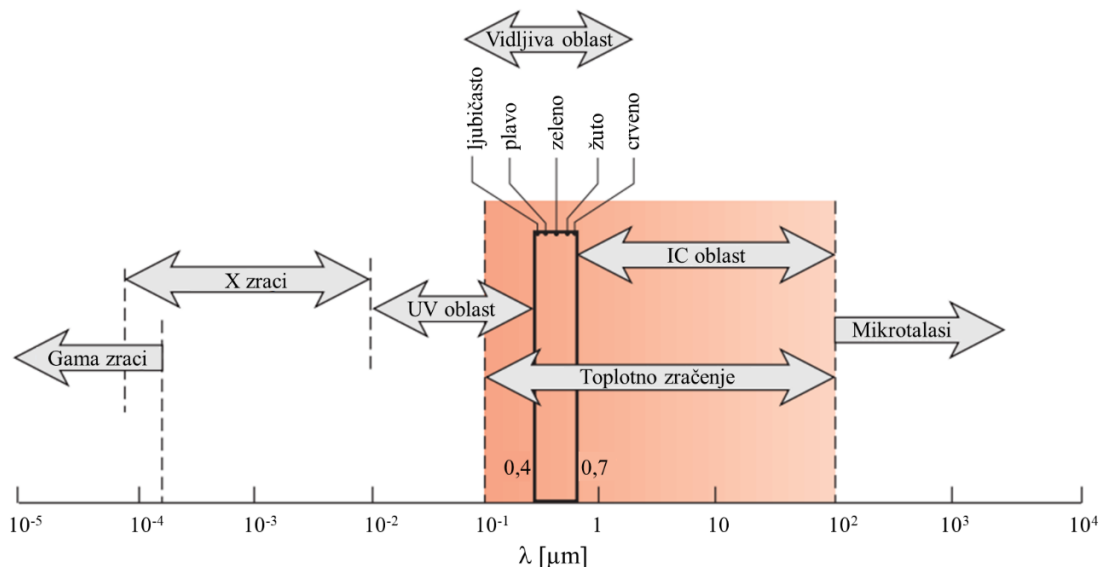
$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (4.1)$$

gde c predstavlja brzinu svetlosti, koja u vakuumu iznosi $c_0 = 2,990 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

Elektromagnetni spektar obuhvata sva zračenja, uključujući i IC zračenje, a kako postoji nekoliko podela elektromagnetnog spektra unutar infracrvene oblasti, u nastavku su detaljnije objašnjene njihove osnovne razlike.

4.2.1 Infracrveni elektromagnetni spektar

Elektromagnetni spektar je prikazan na Slici 4.4. Gama zraci, X zraci ili rendgenski zraci i ultraljubičasti (UV) zraci, predstavljaju kratkotalasna zračenja, dok mikro talasi predstavljaju dugotalasna zračenja. Središnji deo elektromagnetnog spektra, koji obuhvata talasne dužine od oko 0,1 μm do 100 μm i uključuje deo UV oblasti, vidljivu oblast i infracrvenu (IC) oblast zapravo predstavlja toplotno zračenje. Toplotno zračenje je ujedno rezultat i posledica toplotnog stanja materije, odnosno njene temperature, te je iz tog razloga relevantno za prenos toplote.



Slika 4.4 Elektromagnetni spektar [102]

IC zračenje obuhvata deo elektromagnetnog spektra od 0,7 μm do 1.000 μm i deli se na nekoliko oblasti u zavisnosti od izvora literature. Različite podele IC elektromagnetnog spektra su prikazane u Tabeli 4.1, Tabeli 4.2 i Tabeli 4.3. Podela IC elektromagnetnog spektra prema James Byrnes prikazana u Tabeli 4.1 je jedna od najčešće korišćenih podela.

Tabela 4.1 Podela IC elektromagnetnog spektra prema James Byrnes [101]

Naziv oblasti IC zračenja	Talasne dužine [μm]	Energija fotona [eV]
Blisko infracrveno	0,75 - 1,4	0,9 - 1,7
IC zračenje kratkih talasnih dužina	1,4 - 3	0,4 - 0,9
IC zračenje srednjih talasnih dužina	3 - 8	150 - 400
IC zračenje dugih talasnih dužina	8 - 15	80 - 150
Daleka oblast talasnih dužina IC elektromagnetnog spektra	15 - 1.000	1,2 - 80

Podela IC elektromagnetnog spektra prema Međunarodnoj komisiji za osvetljenje (engl. *International Commission on Illumination - CIE*) je prikazana u Tabeli 4.2.

Tabela 4.2 Podela IC elektromagnetnog spektra prema CIE [101]

Naziv oblasti IC zračenja	Talasne dužine [μm]	Frekvencija [THz]
IR-A (IC-A)	0,7 - 1,4	215 - 430
IR-B (IC-B)	1,4 - 3	100 - 215
IR-C (IC-C)	3 - 1.000	300 - 100

Podela IC elektromagnetnog spektra prema međunarodnom standardu EN ISO 20473:2007 prikazana je u Tabeli 4.3.

Tabela 4.3 Podela IC elektromagnetnog spektra prema EN ISO 20473:2007 [101]

Naziv oblasti IC zračenja	Talasne dužine [μm]
Blisko IC zračenje	0,78 - 3
Srednje-talasno IC zračenje	3 - 50
Daleka oblast talasnih dužina IC zračenja	50 - 1.000

Kako bi se bolje razumeo fundamentalni koncept zračenja u nastavku je objašnjen mehanizam prenosa toplote zračenjem sa površine i između površine i okoline, pojam idealno crnog tela, osnovni zakoni u ovoj oblasti, kao i svojstva materije koja definišu njenu efikasnost u pogledu prenosa toplote zračenjem, naročito emisivnost realnih tela.

4.2.2 Prenos toplote zračenjem sa površine i između površine i okoline

Zračenje predstavlja toplotnu energiju koju emituje materija pri temperaturi većoj od apsolutne nule. Uglavnom se posmatra zračenje čvrstih tela, iako gasovi i tečnosti, takođe imaju sposobnost emitovanja toplotne energije. Nezavisno od oblika materije, emitovanje toplotne energije se pripisuje promenama u elektronskoj konfiguraciji konstitutivnih atoma ili molekula. Energija polja zračenja se prenosi elektromagnetnim talasima ili alternativno fotonima, zbog čega se ovo polje naziva još i elektromagnetno polje zračenja. Kao što je prethodno pomenuto, prenos toplotne energije konvekcijom i kondukcijom zahteva prisustvo materijalnog medijuma, dok kod zračenja to nije slučaj. Zapravo, prenos toplote zračenjem se najefikasnije odvija u vakuumu. Na Slici 4.5a prikazan je prenos toplote zračenjem koja potiče od toplotne energije materije ograničene površinom, pri čemu stopa odzračivanja toplotne energije po jedinici površine predstavlja emisionu snagu površine, E [Wm^{-2}]. Emisiona snaga površine se još naziva i emisioni ili toplotni fluks.

Postoji gornja granica za emisionu snagu koja je opisana Stefan-Boltzmann zakonom (jednačina 4.2), gde je T_s [K] temperatura površine, a σ je Stefan-Boltzmann konstanta, koja iznosi $5,67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. Ovakva površina se naziva idealno crno telo i za nju važi, jednačina 4.2:

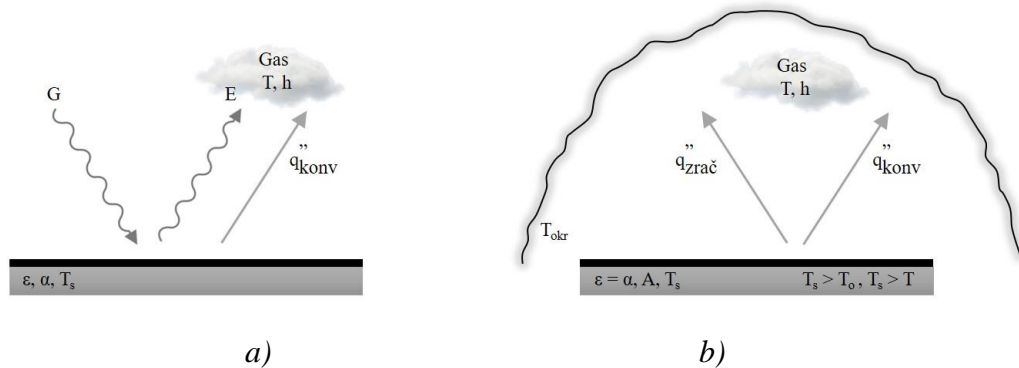
$$E_{ct} = \sigma T_s^4 \quad (4.2)$$

Toplotni fluks koji emituje realna površina je niži od onoga koje emituje idealno crno telo pri istoj temperaturi, jednačina 4.3:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (4.3)$$

gde je ε [-] radijaciono svojstvo površine, odnosno emisivnost.

Emisivnost ima vrednosti između 0 i 1 i predstavlja meru efikasnosti površine realnog tela da emituje energiju u odnosu na idealno crno telo. Emisivnost realnih tela zavisi od više parametara, te zbog složenosti tematike ovom parametru će biti posvećena posebna pažnja u poglavlju 4.2.7.



Slika 4.5 Prenos toplote zračenjem a) sa površine i b) između površine i okoline [102]

Zračenje sa određene površine može biti rezultat njene okoline. Ovo upadno zračenje posledica je drugih izvora toplote, kao što je Sunce ili drugih površina koje emituju toplotu. Nezavisno od izvora zračenja, količina svih zračenja koja padaju po jedinici posmatrane površine se naziva iradijacija G [Jm^{-2}]. Posmatrana površina može da apsorbuje iradijaciju delimično ili celokupno, čime se povećava toplotna energija materije. Količina energije zračenja iz okoline koja se apsorbuje po jedinici površine, G_{aps} [Jm^{-2}] se može odrediti poznavanjem koeficijenta apsorpcije α [-]. Ukoliko važi da je $0 \leq \alpha \leq 1$, onda je količina apsorbovane iradijacije, jednačina 4.4:

$$G_{aps} = \alpha G \quad (4.4)$$

Ukoliko je $\alpha < 1$ i površina je netransparentna, deo iradijacije biće reflektovan. Ukoliko je površina polutransparentna, deo iradijacije može biti propušten. Međutim, dok apsorbovano i emitovano zračenje povećava i smanjuje, respektivno, toplotnu energiju materije, reflektovano i propušteno zračenje nemaju uticaj na ovu energiju. Apsorpcija zavisi od prirode iradijacije i same površine, zbog čega količina toplote koju će površina apsorbovati od Sunca ili od zidova peći može biti potpuno različita.

Poseban slučaj koji se često dešava jeste razmena zračenja između male površine temperature T_s [K] i mnogo veće izotermalne površine, koja je potpuno okružuje (Slika 4.5b). Okolina u ovom slučaju mogu biti zidovi prostorije ili peći čija je temperatura T_o [K] različita od posmatrane manje površine. Ukoliko za površinu važi da je količina apsorbovane i emitovane energije jednaka ($\alpha = \varepsilon$), ukupna količina toplote, $q_{zrač}$ [J] prenesena zračenjem sa površine, q [J] izražena po jedinici površine, A [m^2] iznosi, jednačina 4.5:

$$q_{zrač} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_{ct}(T_s) - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_o^4) \quad (4.5)$$

Gornji izraz predstavlja razliku između odzračene toplotne energije sa površine i apsorbovane toplotne energije iz okoline. U praksi se često jednačina 4.5 može koristiti i u sledećem obliku, jednačina 4.6:

$$q_{zrač} = h_{zrač} A (T_s - T_o) \quad (4.6)$$

iz koje proizilazi jednačina 4.7:

$$h_{zrač} \equiv \varepsilon \sigma (T_s + T_o)(T_s^2 + T_o^2) \quad (4.7)$$

gde je $h_{zrač}$ koeficijent prenosa toplote zračenjem.

Ovde je izvršena linearizacija jednačine 4.5 tako da je količina zračenja, $q_{zrač}$ proporcionalna razlici u temperaturi umesto razlici njihovih četvrtih stepena (jednačina 4.6). Koeficijent $h_{zrač}$, u velikoj meri zavisi od temperature, dok je zavisnost temperature od koeficijenta prenosa toplote konvekcijom h , izuzetno slaba. S tim u vezi, površina prikazana na Slici 4.5 može pored prenosa toplote zračenjem, $q_{zrač}$ istovremeno da prenese toplotu konvekcijom na susedni gas, q_{konv} . Za uslove sa Slike 4.5b, ukupna količina prenesene toplote sa površine, q je data jednačinom 4.8:

$$q = q_{konv} + q_{zrač} = h A (T_s - T_\infty) + \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_o^4) \quad (4.8)$$

S obzirom na to da se prenos toplote zračenjem realnih tela definiše poređenjem sa idealnim crnim telom, koje predstavlja teorijski koncept, u nastavku će biti objašnjen razlog njegovog uvođenja, kao i njegova osnovna svojstva.

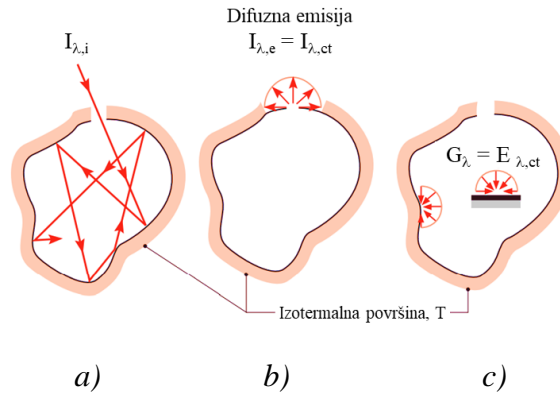
4.2.3 Zračenje idealno crnog tela

Idealno crno telo predstavlja teorijski koncept koga karakterišu sledeća svojstva:

1. idealno crno telo apsorbuje celokupno upadno zračenje, bez obzira na talasnu dužinu i smer upadnog zračenja;
2. pri određenoj temperaturi i talasnoj dužini, nijedna površina, odnosno nijedno realno telo, ne može emitovati više energije od idealno crnog tela;
3. iako je zračenje koje emituje idealno crno telo funkcija talasne dužine i temperature, ono je nezavisno od pravca, tj. idealno crno telo je difuzni emiter.

Kao savršen apsorber i emiter, idealno crno telo služi kao referentno telo sa kojim se mogu uporediti svojstva zračenja površina realnih tela. Iako u praksi postoje realna tela koja blisko aproksimiraju idealno crno telo, nijedno od njih ne predstavlja njegovu savršenu repliku u smislu prethodno navedenih svojstava. Najtačnija aproksimacija idealno crnog tela jeste šupljina čije unutrašnje površine imaju uniformnu temperaturu (Slika 4.6a).

Pri ulasku toplotnog zračenja kroz mali otvor u šupljini postoji velika verovatnoća da će doći do velikog broja odbijanja ili refleksije od unutrašnje površine šupljine, pre nego što toplotno zračenje napusti šupljinu. S obzirom na to da će velika količina toplote pri tome biti apsorbovana i da će samo neznatni deo toplote usled malog otvora napustiti šupljinu, ovakvo realno telo na najpribližniji način oponaša idealno crno telo. Sa termodinamičkog stanovišta toplota koja napušta šupljinu zavisi samo od temperature površine i ekvivalentna je emisiji idealno crnog tela (Slika 4.6b).



Slika 4.6 Karakteristike izotermalne šupljine idealno crnog tela: a) potpuna apsorpcija; b) difuzna emisija iz otvora; c) difuzno zračenje unutrašnjih površina šupljine [102]

Emisija idealno crnog tela je difuzna, zbog čega je spektralni intenzitet $I_{\lambda,ct}$ zračenja koje napušta šupljinu nezavisno od pravca. Polje zračenja u šupljini, koje predstavlja kumulativni efekat emisije i refleksije sa unutrašnjih površina šupljine, je istog oblika kao i zračenje koje izlazi iz otvora, te se iz toga zaključuje da je polje zračenja u šupljini zapravo polje zračenja idealno crnog tela. Shodno tome, svaka mala površina u šupljini je difuzno ozračena (Slika 4.6c) i važi da je iradijacija jednaka emitovanoj toplotnoj energiji, odnosno $G_{\lambda} = E_{\lambda,ct}(\lambda, T)$. Ponašanje idealno crnog tela definisano je Planck, Wien i Stefan-Boltzmann zakonima, prikazanim u nastavku.

4.2.4 Planck zakon

Raspodela intenziteta zračenja idealno crnog tela u vakuumu po spektru talasnih dužina λ , tj. spektralna distribucija zračenja idealno crnog tela, opisuje se Planck zakonom, jednačina 4.9:

$$I_{\lambda,ct}(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(hc_0/\lambda k_B T) - 1]} \quad (4.9)$$

gde je:

h - Planck konstanta, $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Js;

k_B - Bolcamanova konstanta, $k_B = 1,381 \times 10^{-23}$ JK⁻¹;

c_0 - brzina svetlosti u vakuumu, $c_0 = 2,990 \times 10^8$ ms⁻¹;

T - apsolutna temperatura idealno crnog tela [K].

S obzirom na to da je idealno crno telo difuzni emiter toplote, iz jednačine 4.9 sledi da se njegova spektralna emisiona snaga određuje preko jednačine 4.10:

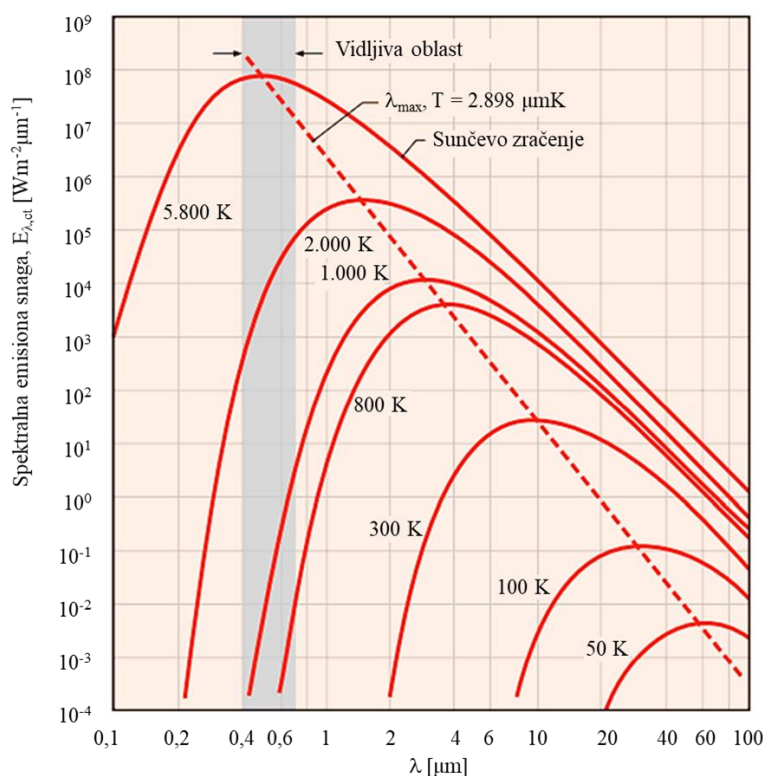
$$E_{\lambda,ct}(\lambda, T) = \pi I_{\lambda,ct}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (4.10)$$

gde je:

C_1 - prva konstanta zračenja, $C_1 = 2 \pi h c_0^2 = 3,742 \times 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4\text{m}^{-2}$;

C_2 - druga konstanta zračenja $C_2 = h c_0 k_B^{-1} = 1,439 \times 10^4 \mu\text{mK}$.

Jednačina 4.10, poznata kao Planck raspodela ili Planck zakon prikazana je na Slici 4.7 za izabrane temperature.



Slika 4.7 Spektralna emisiona snaga idealno crnog tela [102]

Ovde je bitno primetiti sledeće:

1. emitovano zračenje kontinuirano varira sa talasnim dužinama;
2. magnituda emitovanog zračenja raste sa temperaturom na bilo kojoj talasnoj dužini;
3. spektralni region u kome je zračenje skoncentrisano zavisi od temperature, pri čemu se veće zračenje javlja na kraćim talasnim dužinama sa porastom temperature;
4. značajan deo zračenja koje emituje Sunce, koje se ponaša kao idealno crno telo temperature 5.800 K, nalazi se u vidljivom području spektra, suprotno za $T \leq 800 \text{ K}$, zračenje se pretežno manifestuje u IC području spektra i nije vidljivo ljudskom oku.

4.2.5 Wien zakon

Sa Slike 4.7 se uočava da spektralna distribucija zračenja idealno crnog tela ima maksimume kojima odgovara talasna dužina, λ_{max} u zavisnosti od temperature. Tip ove zavisnosti se dobija diferenciranjem jednačine 4.10 po λ i izjednačavanjem rezultata sa 0, te sledi da je:

$$\lambda_{max}T = C_3 \quad (4.11)$$

gde je:

C_3 - treća konstanta zračenja, $C_3 = 2.898$ mK.

Jednačina 4.11 poznata je kao Wien zakon, a prava dobijena primenom ovog zakona je iscrtana isprekidanom linijom na Slici 4.7. Prava ukazuje na pomeranje maksimuma emisione snage ka kraćim talasnim dužinama sa porastom temperature, zbog čega se ovaj zakon naziva još i Wien zakon pomeranja. U slučaju Sunčevog zračenja ova emisija se manifestuje u središnjem delu vidljive oblasti ($\lambda \approx 0,50$ μm), pošto se Sunce ponaša kao idealno crno telo pri temperaturi 5.800 K. Za idealno crno telo temperature 1.000 K, maksimum emisije je na 2,9 μm , gde se određen deo emitovanog zračenja manifestuje kao crvena boja u vidljivom delu elektromagnetnog spektra. Sa povećanjem temperature, kraće talasne dužine postaju sve izraženije, sve dok se značajan deo emitovanog zračenja ne manifestuje u čitavom vidljivom delu elektromagnetnog spektra.

4.2.6 Stefan-Boltzmann zakon

Prema Stefan-Boltzmann zakonu ukupna (integralna) emisiona snaga idealno crnog tela, E_{ct} [Wm^{-2}] proporcionalna je četvrtom stepenu njegove apsolutne temperature, T [K], jednačina 4.12:

$$E_{ct} = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} d\lambda \quad (4.12)$$

odnosno, integracijom jednačine 4.12 dobija se jednačina 4.13:

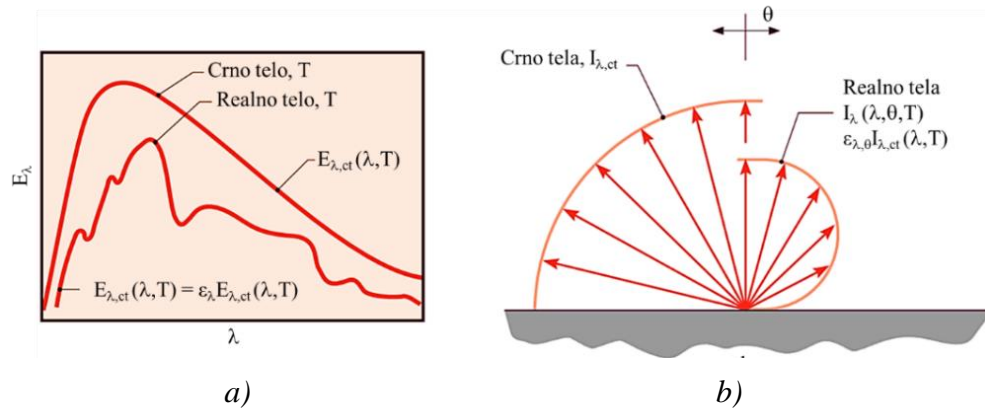
$$E_{ct} = \sigma T^4 \quad (4.13)$$

Jednačina 4.13 je identična sa jednačinom 4.2, s tim da je ovde jasnija zavisnost Stefan-Boltzmann konstante, σ koja iznosi $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ od konstanti zračenja C_1 i C_2 . Značaj Stefan-Boltzmann zakona se ogleda u mogućnosti izračunavanja količine zračenja koju emituje idealno crno telo samo na osnovu poznavanja njegove temperature.

4.2.7 Zračenje realnih tela

Kao što je prethodno pomenuto, idealno crno telo je idealan emiter toplote u poređenju sa kojim nijedno realno telo ne emituje više toplote pri istoj temperaturi. Odnos zračenja koje se emituje sa površine realnog tela i zračenja koje emituje idealno crno telo na istoj temperaturi predstavlja

radijaciono svojstvo površine, odnosno emisivnost. Idealno crno telo zapravo predstavlja referentno telo u odnosu na koje se određuje emisivnost realnih tela. Treba imati u vidu da spektralno zračenje emitovano sa površine realnog tela je drugačije od Planck spektralne distribucije idealno crnog tela (Slika 4.8a). Štaviše, usmerena distribucija realnih tela se može znatno razlikovati od difuzne distribucije idealno crnog tela (Slika 4.8b). Iz tog razloga emisivnost može imati različite vrednosti u zavisnosti da li se posmatra na određenoj talasnoj dužini ili u određenom pravcu ili nad integralom srednjih vrednosti talasnih dužina i pravaca.



Slika 4.8 Uporedni prikaz emisije idealno crnog i realnog tela: a) spektralna distribucija i b) usmerena distribucija [102]

Emisiona snaga koja obuhvata emisiju toplote na svim talasnim dužinama i u svim pravcima se naziva ukupna, hemisferna emisivnost $\varepsilon(T)$. Ona predstavlja odnos ukupne emisione snage realne površine $E(T)$ i ukupne emisione snage idealno crnog tela pri istoj temperaturi $E_{ct}(T)$, jednačina 4.14:

$$\varepsilon(T) \equiv \frac{E(T)}{E_{ct}(T)} \quad (4.14)$$

Ako je poznata ukupna, hemisferna emisivnost površine, njena emisiona snaga se izražava kombinujući jednačinu 4.13 i jednačinu 4.14, odnosno:

$$E(T) = \varepsilon(T) E_{ct}(T) = \varepsilon(T) \sigma T^4 \quad (4.15)$$

Iako jednačina 4.15 deluje prilično jednostavno, njen nedostatak jeste što $\varepsilon(T)$ zavisi od spektralne i usmerene distribucije emisije toplote sa površine. Iz tog razloga uveden je novi termin, tj. spektralna, usmerena emisivnost $\varepsilon_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \phi, T)$ koja predstavlja odnos intenziteta zračenja realne površine, temperature T , na određenoj talasnoj dužini λ , zenitnom θ i azimutnom ϕ uglu ($I_{\lambda, e}$) i intenziteta zračenja idealno crnog tela pri istoj temperaturi i talasnoj dužini ($I_{\lambda, ct}$), jednačina 4.16:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi,T) \equiv \frac{I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi,T)}{I_{\lambda,ct}(\lambda,T)} \quad (4.16)$$

Na sličan način ukupna, usmerena emisivnost ε_{θ} , koja predstavlja spektralni prosek $\varepsilon_{\lambda,\theta}$ može se definisati prema jednačini 4.17:

$$\varepsilon_{\theta}(\theta,\phi,T) \equiv \frac{I_e(\theta,\phi,T)}{I_b(T)} \quad (4.17)$$

Za većinu inženjerskih proračuna, poželjno je koristiti svojstva površine koja predstavljaju usmerene proseke. Spektralna, hemisferna emisivnost se iz tog razloga definiše prema jednačini 4.18:

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda,T) \equiv \frac{E_{\lambda}(\lambda,T)}{E_{\lambda,b}(\lambda,T)} \quad (4.18)$$

U literaturi se često sreću izrazi spektralna i ukupna, hemisferna emisivnost. Spektralna emisivnost se odnosi na emisivnost datu u zavisnosti od temperature i talasne dužine, dok je ukupna emisivnost data u zavisnosti od temperature, nad svim talasnim dužinama i u svim pravcima. U slučaju kada je emisivnost definisana pri azimutnom uglu $\theta = 0^\circ$, tada se govori o normalnoj emisivnosti, koja može biti spektralna ili ukupna.

4.2.8 Kirchhoff zakon

Ukoliko se nekoliko manjih tela nalazi unutar jednog znatno većeg tela, odnosno sistema, čija površina ima temperaturu T_s , njihov doprinos celokupnom zračenju većeg tela je zanemarljiv. U ovom slučaju veće telo se može posmatrati kao šupljina koja oponaša idealno crno telo. S tim u vezi, količina iradijacije koju apsorbuje svako manje telo, G je difuzna i ekvivalentna emisiji crnog tela na temperaturi T_s , odnosno važi:

$$G = E_{ct}(T_s) \quad (4.19)$$

Pod ovim uslovima mora postojati temperaturni ekvilibrijum između manjih tela i velikog tela, odnosno važi da je $T_1 = T_2 = \dots = T_s$, a ukupna energija preneti svakoj površini je 0. To znači da za prvo telo važi:

$$\alpha_1 G A_1 - E_1(T_s) A_1 = 0 \quad (4.20)$$

odnosno kombinujući jednačinu 4.19 i jednačinu 4.20 važi da je:

$$\frac{E_1(T_s)}{\alpha_1} = E_{ct}(T_s) \quad (4.21)$$

S obzirom na to da se ovo može primeniti na svako manje telo unutar velikog tela, konačan izraz je:

$$\frac{E_1(T_s)}{\alpha_1} = \frac{E_2(T_s)}{\alpha_2} = \dots = E_{ct}(T_s) \quad (4.22)$$

Jednačina 4.22 je poznata kao Kirchhoff zakon. Osnovni zaključak koji se može izvesti iz Kirchhoff zakona jeste da kada je $\alpha \leq 1$, tada je $E(T_s) \leq E_{ct}(T_s)$. Odnosno, nijedna realna površina ne može imati višu emisionu snagu od emisione snage idealno crnog tela pri istoj temperaturi, što je u skladu sa tvrdnjom da je idealno crno telo savršen emiter zračenja.

Ukoliko se posmatra ukupna, hemisferna emisivnost, alternativno Kirchhoff zakon glasi, jednačina 4.23:

$$\frac{\varepsilon_1}{\alpha_1} = \frac{\varepsilon_2}{\alpha_2} = \dots = 1 \quad (4.23)$$

tj., za svaku površinu manjeg tela unutar velikog tela važi:

$$\varepsilon = \alpha \quad (4.24)$$

Jednačina 4.24 ukazuje da je ukupna, hemisferna emisivnost površine jednaka ukupnoj, hemisferinoj apsorpciji, ukoliko su zadovoljeni izotermalni uslovi i nema prenosa toplote ni sa jedne površine.

Prenos toplote zračenjem je osnova principa rada ICT uređaja. Osnovni element svakog ICT uređaja, između ostalog i IC kamere jeste detektor IC zračenja. Iz tog razloga princip rada i podela IC detektora, detaljnije su objašnjeni u nastavku.

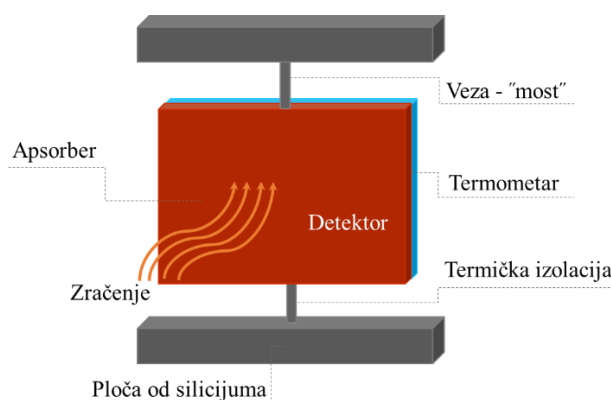
4.3 Detektori infracrvenog zračenja

Kao što je prethodno rečeno, detektori IC zračenja čine osnovu ICT uređaja i služe za konvertovanje IC zračenja u električni signal. U zavisnosti od mehanizma detekcije IC detektori se mogu podeliti na fotonske ili kvantne detektore, koji detektuju IC zračenje u opsegu od 0,78 μm do 1,5 μm i termičke detektori, koji detektuju IC zračenje u opsegu od 20 μm do 1.000 μm . Takođe, IC detektori se mogu podeliti i na IC detektore sa ili bez hlađenja [103]. U nastavku će se objasniti princip rada navedenih detektora, posebno mikrobolometara, koji predstavljaju poseban tip termičkih detektora, najčešće korišćenih kod IC kamera.

4.3.1 Princip rada detektora infracrvenog zračenja

Fotonski detektori su tzv. jednostepeni pretvarači kod kojih dolazi do direktne promene koncentracije ili pokretljivosti slobodnih nosilaca naelektrisanja u detektorskom elementu pri

apsorpciji fotona. Kada se apsorbuje foton čija je energija viša od energije tzv. fotonske apsorpcije, foton pobuđuje elektron i podiže ga na viši energetski nivo. Time se stvaraju parovi elektron-šupljina ili dolazi do povećanja broja elektrona u provodnoj zoni. Generisani nosioci naelektrisanja se usled uspostavljenog električnog polja nakon pobuđivanja usmeravaju do elektroda stvarajući električni signal [104]. Razlikuju se fotokonduktivni, fotonaponski i fotoemisivni fotonski detektori. Sa druge strane, termički detektori predstavljaju tzv. dvostepene pretvarače kod kojih prvo dolazi do apsorpcije IC zračenja i povećanja temperature materijala, a zatim do generisanja električnog signala na osnovu promene određene fizičke karakteristike materijala, npr. promene električne otpornosti u zavisnosti od temperature kod bolometara (Slika 4.9) [104], [105].



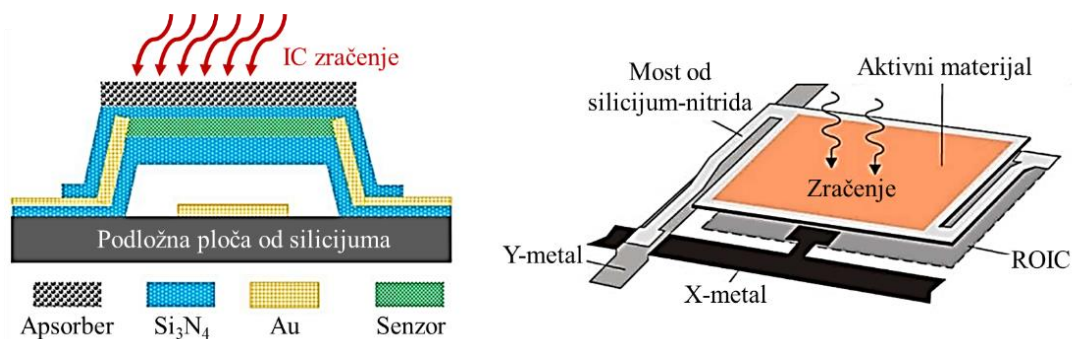
Slika 4.9 Šematski prikaz termičkog detektora IC zračenja [101]

Bitna razlika između fotonskih i termičkih detektora IC zračenja jeste ta što fotonski zahtevaju hlađenje, dok to nije slučaj sa termičkim IC detektorima. Iz tog razloga termički detektori IC zračenja su jeftiniji i mogu se koristiti pri sobnim temperaturama. Nedostatak ovih detektora jeste njihova manja osetljivost u odnosu na fotonske detektore i sporiji odziv usled relativno dugog procesa grejanja i hlađenja detektora.

Postoji nekoliko tipova termičkih detektora od kojih se za potrebe ICT najčešće koriste piroelektrični detektori i bolometri. Osnovna odlika piroelektričnih detektora jeste da se kod njih meri promena u unutrašnjoj električnoj polarizaciji sa promenom temperature, dok se kod bolometara meri promena električnog otpora u zavisnosti od temperature [101]. Najčešći tip IC detektora koji se koristi kod IC kamera jesu detektori sastavljeni od velikog broja mikrobolometara, čiji je princip rada prikazan u nastavku.

4.3.2 Princip rada mikrobolometara

Mikrobolometar je otporni element izrađen od aktivnog materijala (vanadijumovog oksida ili amorfnog silicijuma) sa vrlo malim specifičnim toplotnim kapacitetom i velikim linearnim toplotnim izduženjem, koji je dobro izolovan od okoline. Ovim se postiže da apsorbovano IC zračenje koje uzrokuje velike promene u otporu se meri i procesira u infracrvenu (IC) sliku, odnosno termogram. Mikrobolometar je zapravo matrica, npr. rezolucije 640×480 piksela, gde se svaki piksel sastoji od nekoliko slojeva i predstavlja pojedinačni detektor IC zračenja, kao što je prikazano na Slici 4.10. Ovakav IC detektor se naziva FPA (engl. *Focal Plane Array*) detektor [106].



Slika 4.10 Šematski prikaz preseka mikrobolometra [101]

Donji deo mikrobolometarskog detektora se sastoji od podložne ploče od silicijuma i ROIC (engl. *Readout Integrated Circuit*) iznad kojeg se nalazi senzor. ROIC predstavlja silikonski čip koji ima ulogu pojačavanja i prenosa signala. Ispod senzora se nalazi reflektor izrađen od zlata (Au) koji reflektuje deo IC zračenja koje prođe kroz apsorber i služi da vrati IC zračenje ponovo do apsorbera. Time je postignuta najbolja moguća apsorpcija IC zračenja, a ujedno i nivoa signala. Kako bi se ROIC što bolje izolovao od apsorbera, isti se izdiže iznad ROIC za 2 μm poput mosta. Čitav detektor se nalazi u vakuumu, kako bi se što bolje omogućila toplotna izolovanost apsorbera i sprečio ulazak prašine u detektor koji bi umanjio njegov period eksploatacije.

Mikrobolometri imaju unutrašnji mehanički sistem za rekalkibraciju IC slike, tzv. NUC (engl. *Non Uniformity Correction*) sistem. Usled različitog zagrevanja delova apsorbera, NUC sistem služi za korekciju signala dobijenog od apsorbera. IC slika se rekalkibrira s vremena na vreme zbog zagrevanja detektora u slučaju kad dolazi do naglog upadnog IC zračenja na IC detektor kamere. Ovo se manifestuje kao zvuk “škljocanja“ pri paljenju ili tokom rada IC kamere.

Kako je ranije navedeno, FPA detektor se može sastojati, primera radi od 640×480 piksela, odnosno IC detektora. To je ukupno 307.200 detektora čiji odziv, odnosno promenu otpora, treba da zabeleži ROIC sistem. ROIC sistem koji može da zabeleži 25 (50) puta u sekundi ove promene se naziva PAL sistem, dok ROIC sistem koji može da zabeleži 30 (60) puta u sekundi ove promene se naziva NTSC sistem. Ovim je definisana frekvencija snimanja IC kamere, tj. frekvencija ROIC sistema [101]. Frekvencija snimanja IC kamere je najčešće 25 Hz (50 Hz) za PAL sistem u Evropi, dok je frekvencija snimanja IC kamerom 30 Hz (60 Hz) za NTSC sistem u SAD [103].

Kako je u ovom poglavlju opisan princip rada IC detektora, sa akcentom na mikrobolometre, odnosno FPA detektor koji koristi IC kamera, u narednom poglavlju će biti objašnjen princip rada same IC kamere, njene prednosti i nedostaci i s tim u vezi značaj određivanja emisivnosti materijala, kao fundamentalnog parametra za tačno beskontaktno merenje temperature.

4.4 Infracrvena kamera

Pored prethodno pomenutih, postoji još jedna podela IC detektora na osnovu tehnologije merenja temperature, a koja ujedno predstavlja istoriju razvoja ICT uređaja. Prema ovoj podeli IC detektori se dele na:

- detektore IC zračenja u tački, koji predstavljaju bazično rešenje i osnovu za izradu široke palete instrumenata za beskontaktno merenje temperature u tački, tzv. radijacione termometre;
- infracrveni sistemi sa linijskim skeniranjem, kod kojih je veći broj detektora IC zračenja u tački postavljen u liniju čime je formiran tzv. linijski ili linearni detektor IC zračenja;
- infracrveni sistemi sa detektorima IC zračenja u fokusnoj ravni (FPA), koje karakterišu detektori IC zračenja grupisani u matricu, tako da jednom detektoru odgovara jedna tačka (piksel) na IC slici.

U početku su se koristili ICT uređaji sa jednim detektorom IC zračenja u tački. Kod ovih uređaja je bilo karakteristično da sve tačke na IC slici imaju identične parametre, jer se temperatura u svakoj od njih meri istim detektorom. Sledeći korak bio je razvoj ICT uređaja sa linearnim detektorima IC zračenja koji su mogli da mere temperaturu u vertikalnoj ili horizontalnoj liniji u zavisnosti od položaja detektora IC zračenja. Od 1993. godine počelo je korišćenje IC kamera sa FPA detektorima, a nakon 1997. godine IC kamera sa nehlađenim mikrobolometarskim FPA detektorima. Uvođenjem nehlađenih mikrobolometara IC kamere su postale lakši, brži i pouzdaniji uređaji za beskontaktno merenje temperature [103].

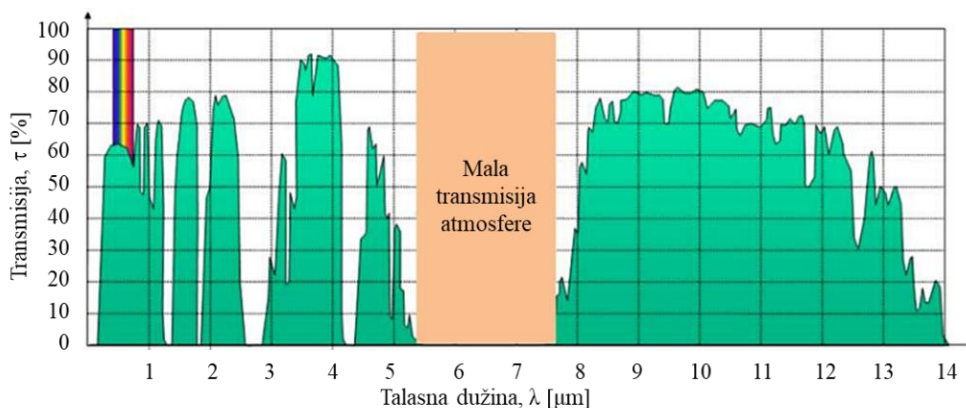
Pored IC detektora, bitan deo IC kamere predstavlja i njen optički sistem. Materijali koji se koriste za izradu sočiva IC kamere moraju biti propusni za IC zračenje, a to su najčešće germanijum, cink sulfid, cink selenid, za dugotalasno IC zračenje, te silikon, safir, kvarc ili magnezijum, za kratko i srednjetalasno IC zračenje [99]. Količina IC zračenja koja će dopreti do optičkog sistema IC kamere zavisi od propusnosti, odnosno transmisije medijuma za IC zračenje. Kako se IC kamera najčešće koristi u vazduhu u daljem tekstu će se obrazložiti značaj transmisije vazduha za IC zračenje.

4.4.1 Transmisija vazduha za infracrveno zračenje

Propusnost vazduha ili njegova transmisija, τ ima veliki uticaj na podelu IC elektromagnetnog spektra, opisanog u poglavlju 4.2.1. Sa druge strane propusnost vazduha je od značaja za IC kameru, jer se merenje temperature uglavnom izvodi upravo u ovom medijumu, te se obavezno moraju uzeti u obzir njegove transmisionne karakteristike.

Komponente vazduha, kao što su vodena para ili ugljendioksid apsorbuju deo IC zračenja određenih talasnih dužina što rezultuje transmisionim gubicima toplote, usled kojih IC kamera može izmeriti nižu temperaturu od stvarne temperature tela.

Da bi se ovo izbeglo, neophodno je sprovesti merenje temperature u opsezima talasnih dužina u kojima je vazduh najpropusniji za IC zračenje. Ovi opsezi se nazivaju atmosferski prozori, od kojih su za merenje temperature IC kamerom najznačajniji kratkotalasni opseg, od 1 μm do 5 μm ili od 2 μm do 5 μm (u zavisnosti od izvora literature) i dugotalasni opseg od 8 μm do 14 μm . Slika 4.11 prikazuje transmisiju IC zračenja kroz vazduha na visini od 10 m iznad tla. Sa slike se vidi da vazduh ima najmanji uticaj na apsorpciju IC zračenja upravo u navedenim opsezima talasnih dužina atmosferskih prozora [101], [103].

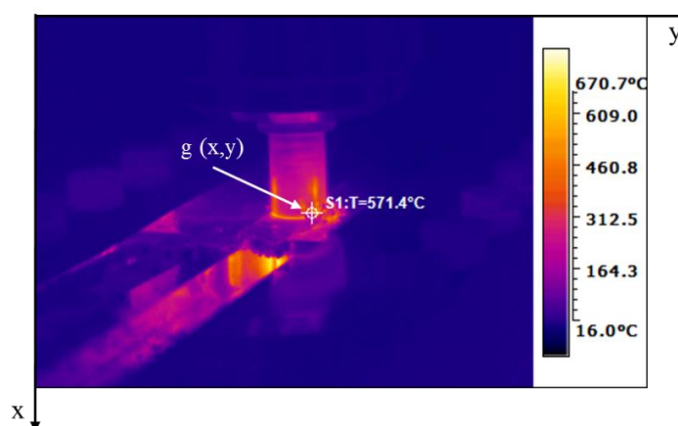


Slika 4.11 Transmisija vazduha za IC zračenje [101]

U zavisnosti od atmosferskog prozora u kojem se sprovodi merenje, IC detektori, kao i same IC kamere se mogu podeliti na kratkotalasne i dugotalasne, a princip formiranja IC slike objašnjen je u nastavku.

4.4.2 Princip formiranja infracrvene slike

Sva tela temperature iznad apsolutne nule emituju toplotu u vidu IC zračenja u skladu sa fundamentalnim zakonima iz oblasti prenosa toplote zračenjem, opisanim u poglavlju 4.2. Merenje temperature IC kamerom se zasniva na transformisanju prostornih varijacija koje se javljaju u emitovanom IC zračenju sa površine tela u dvodimenzionalnu IC sliku, odnosno termogram [107], [108]. IC slika predstavlja sliku koja u određenom kodu boja ili sivih tonova daje prikaz distribucije temperature na posmatranoj površini [109]. IC slika se može definisati još i kao dvodimenzionalna funkcija IC zračenja, gde temperatura u tački $g(x,y)$ predstavlja intenzitet posmatrane veličine čija je lokacija na IC slici određena prostornim koordinatama x i y . Veličina g se još naziva element IC slike ili piksel i ona je proporcionalna IC zračenju, odnosno energiji emitovanoj sa površine tela na mestu definisanim koordinatama x i y (Slika 4.12) [101]. Skala temperatura prikazana na Slici 4.12 je karakteristična za scenu koja se trenutno snima i njen raspon zavisi od najniže i najviše izmerene temperature na sceni.



Slika 4.12 Primer IC slike sa elementom $g(x,y)$

Kad je reč o ICT sistemu, on se u najjednostavnijoj izvedbi, pored IC kamere sastoji još iz računara na kojem je instaliran poseban program za analizu IC slike. Pored pomenutih komponenti, IC kamera poseduje još i jedinicu za pretvaranje električnog u video signal, monitor i memorijsku karticu [100].

Uređaj za merenje temperature, bilo da radi po principu kontaktnog ili beskontaktnog merenja temperature, ima određene prednosti koje ga ističu u odnosu na druge uređaje, ali i svoje nedostatke koji mu ograničavaju korišćenje na specifične uslove prilikom merenja. Glavni razlozi za korišćenje IC kamere za merenje temperature obrazloženi su u nastavku, kao i njeni nedostaci, zbog kojih uređaj mora biti prethodno podešen kako bi se omogućila tačnost merenja temperature.

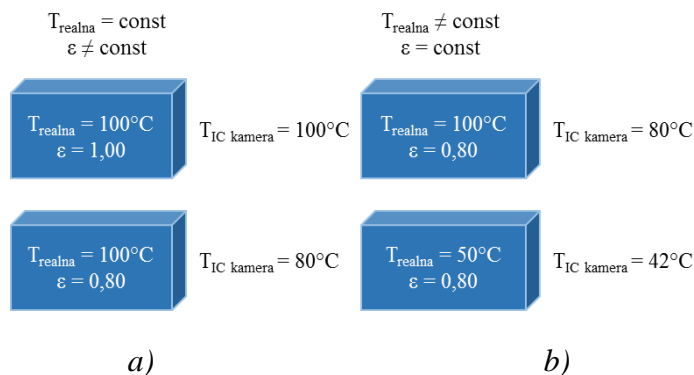
4.4.3 Prednosti i nedostaci infracrvene kamere

Idealni uređaji ili bolje rečeno temperaturni senzori, su oni kod kojih je uticaj na medijum ili telo čija se temperatura meri najmanji, a koji su pri tom izuzetno tačni i precizni i imaju brz odziv. U praksi se teško mogu zadovoljiti navedeni kriterijumi, ali izborom odgovarajuće veličine senzora, njegove enkapsulacije i osnovnih konfiguracija, greške merenja se mogu svesti na najmanji mogući nivo. Osnovne prednosti beskontaktnih temperaturnih senzora, a samim tim i uređaja za beskontaktno merenje temperature poput IC kamere, jeste brz odziv, zatim njihova primena kod izuzetno visokih temperatura (1.400 °C i više), kao i merenje temperature nepristupačnih, udaljenih tela ili pak tela u pokretu. Još jedna bitna prednost IC kamere jeste vizualizacija distribucije temperature u svim tačkama na posmatranoj površini i simultano merenje temperature u više tačaka, za razliku od kontaktnih uređaja za merenje temperature, poput termopara [91].

Kako je ranije pomenuto, transmisivnost vazduha za IC zračenje igra veliku ulogu kod tačnog merenja temperature. Prisustvo prašine, dimova i suspendovanih čestica u vazduhu diskutabilno je i sa aspekta transmisionih gubitaka, kao i sa aspekta kontaminacije optičkih delova IC kamere. Kako bi se sprečila kontaminacija optičkog sistema uređaja često se koristi pribor za strujanje vazduha u vidu adaptera sa navojem sa zbijenim komprimovanim vazduhom. Strujanjem vazduha osigurava se pozitivan pritisak ispred optičkog sistema IC kamere i sprečava se nagomilavanje nečistoća. Zbog toga što IC zračenje koje dopire do objektiva IC kamere nije rezultat samo toplote koju emituje ispitivano telo, nego i IC zračenja koje dopire iz njegove okoline, prilikom merenja obavezno se sprovodi filtracija svih uticaja na IC zračenje koje je emitovano od ispitivanog tela. Takođe, signali prvobitnog IC zračenja koji dospeju u IC detektor, moraju biti modifikovani zbog zračenja koje emituje sočivo, skenirajući sistem i IC detektor. Izbor ICT uređaja umnogome zavisi od talasnih dužina za koje je propusan njegov optički sistem. Uglavnom materijali od kojih se prave sočiva za IC kameru su propusni za IC zračenje i ne moraju biti propusna za talasne dužine vidljive oblasti elektromagnetnog spektra. Primer za to su silicijum i germanijum koji su neprozirni za ljudsko oko, ali propuštaju IC zračenje. Značajni gubici u transmisiji IC zračenja se smanjuju korišćenjem antirefleksivnih premaza na površini sočiva, čime se povećava koeficijent transmisije, τ od 94% do 99% za dati interval talasnih dužina koji je definisan vrstom i debljinom nanetog premaza [91], [99].

U poglavlju 4.2 objašnjen je značaj emisivnosti kod prenosa toplote IC zračenjem, koja ima i svoj praktični značaj kod beskontaktnog merenja temperature IC kamerom. Na Slici 4.13 prikazan je uticaj emisivnosti na očitanoj temperaturi IC kamerom. IC kamera meri tzv. prividnu temperaturu tela, koja predstavlja funkciju njegove realne temperature i emisivnosti. S tim u vezi, ukoliko dva tela imaju istu temperaturu, kao što je prikazano na Slici 4.13 a), ali različitu emisivnost, IC kamera očitava da

telo sa višom emisivnošću ima višu temperaturu. Sa druge strane ukoliko se podesi niža emisivnost tela od njene prave vrednosti, IC kamera očitava nižu temperaturu tela, kao što je prikazano na Slici 4.13 b). Tek kada je emisivnost tela poznata, IC kamera može izmeriti temperaturu tela. Drugim rečima, emisivnost diktira tačnost merenja temperature IC kamerom [110].



Slika 4.13 Uticaj emisivnosti na očitano temperaturu IC kamerom: a) kada je temperatura tela ista i b) kada je temperatura tela različita [110]

Problem kod beskontaktnog merenja temperature predstavlja i pojava refleksije IC zračenja. Tela sa visokim koeficijentom refleksije mogu reflektovati toplotu koju zrače druga tela. Na primer, polirani aluminijum reflektuje oko 90% IC zračenja koje pada na njegovu površinu. Zbog toga što IC kamera detektuje i kvantifikuje emitovano i reflektovano IC zračenje, ako telo reflektuje IC zračenje iz drugog izvora zračenja sa višom temperaturom, IC kamera će izmeriti višu temperatura tela od njene realne temperature i obrnuto [110].

Kada su u pitanju mala ili udaljena tela, primena IC kamere nailazi na mnogobrojne izazove, a neki od njih su sledeći [111]:

1. Realna tela nisu idealno crna tela, te se njihova temperatura određuje na osnovu dve nepoznanice: temperature i emisivnosti tela. Emisivnost tela zavisi od stanja površine tela, prisustva eventualnih premaza, itd. Greška u izmerenoj temperaturi tela direktna je posledica pogrešno određene emisivnosti tela, što u većini slučajeva dovodi do neprihvatljivo velikih grešaka u izmerenoj temperaturi.
2. IC kamera meri prividnu temperaturu, umesto realne temperature tela, koja da bi se izračunala neophodno je raspolagati dodatnim informacijama o telu, kao što su spektralna transmisija i spektralna osetljivost IC kamere. Bez ovih informacija, čak poznajući preostale parametre, greška merenja temperature na daljinu može biti prevelika.
3. Udaljena mala tela su u većini slučajeva dodatno osvetljena zračenjem koje potiče od Sunca, Zemlje, Meseca i iz svemira. Udeo u zračenju svakog od navedenih prirodnih izvora zavisi od njegove temperature, udaljenosti od posmatranog tela, prostorne raspodele u odnosu na telo, kao i od upadnog ugla zračenja. U ovom slučaju pozadinsko osvetljenje, reflektovano od tela u pravcu posmatrača, doprineće značajnom povećanju greške merenja, čak 30% i više. Pozadinsko osvetljenje takođe dovodi do pojave dva nova nepoznata parametra – temperature izvora pozadinskog osvetljenja i njegove emisivnosti, što je u praksi vrlo teško odrediti.

4. Ukoliko je moguće merenje uvek treba izvršiti korišćenjem referentnog tela, koji se postavlja u vidno polje IC kamere i čija je realna temperatura, kao i emisivnost poznata. Iako bi postavljanje ovakvog tela u blizini malog, udaljenog tela olakšalo merenje temperature, često nije praktično izvodljivo.
5. U slučaju da se za merenje temperature malih, udaljenih tela koristi IC kamera niske rezolucije, IC slika može pokazati tela u vidu mrlje, tako da su granice tela nejasne. IC kamere niske rezolucije su svakako jeftinije, ali problem se donekle može prevazići ugradnjom video kamere visoke rezolucije što je moguće bliže IC detektoru. Ovim se dobijaju dve slike, IC slika niske rezolucije i video slika visoke rezolucije sa koje se mogu odrediti karakteristike tela u smislu dimenzija i položaja.

Kao najveći nedostatak IC kamera, pa i ICT jeste što se ovom metodom opažaju samo manifestacije toplote na površini tela i što njena tačnost zavisi od faktora, kao što su transmisivnost vazduha, osetljivost IC detektora i optičkog sistema, temperatura i stanje površine tela, a ponajviše emisivnost tela [112]. Postoji nekoliko metoda za određivanje emisivnosti tela pomoću IC kamere, od kojih će se u nastavku detaljnije objasniti one koje se najčešće primenjuju u praksi.

4.4.4 Određivanje emisivnosti infracrvenom kamerom

Emisivnost predstavlja sposobnost realnog tela da apsorbuje i emituje toplotu u poređenju sa idealnim crnim telom koje pri istoj temperaturi, geometrijskim i spektralnim uslovima zrači najveću količinu toplote [12]. Iz tog razloga emisivnost realnog tela ja niža od najviše emisivnosti koju ima idealno crno telo ($\varepsilon = 1$), a viša od emisivnosti idealnog ogledala ($\varepsilon = 0$). Emisivnost zavisi od mnogih faktora, kao što su vrsta materijala, površinska hrapavost, mikrostruktura, temperatura, talasna dužina zračenja, ugao snimanja itd. [113]–[115]. U literaturi i na internet stranicama mnogih proizvođača ICT uređaja mogu se naći tablice preporučenih vrednosti emisivnosti pojedinih materijala, kao što je prikazano u Tabeli 4.4.

Tabela 4.4 Preporučene vrednosti emisivnosti pojedinih materijala [91]

Materijal	ε	Materijal	ε
Vatrostalni materijali		Nikl	0,15
Aluminijum (III) oksid	0,40	Platina	0,10
Crvena cigla	0,93	Srebro	0,03
Legure		Kalaj	0,09
Mesing	0,10	Titanijum	0,30
Mesing - eloksiran	0,61	Volfram	0,13
Metali		Cink	0,05
Aluminijum	0,05	Cink - eloksiran	0,11
Aluminijum - eloksiran	0,30	Razni materijali	
Hrom	0,15	Asfalt	0,90
Kobalt	0,18	Ugljenik	>0,90
Zlato	0,02	Grafit	0,85
Čelik	0,18	Čađ	0,95
Čelik - eloksiran	0,85	Cement i beton	0,90
Olovo	0,16	Štof	0,85
Olovo - eloksiran	0,63	Destilovana voda	0,98
Magnezijum	0,12	Staklo	0,92

Korišćenje ovih tablica je uslovno, jer ne sadrže dovoljno informacija o pomenutim parametrima za koje je u mnogim istraživanjima pokazano da imaju značajan uticaj na emisivnost, te se iz tog razloga u praksi često pribegava nekim od *in situ* metoda za određivanje emisivnosti.

In situ metode za određivanje emisivnosti pomoću IC kamere se zasnivaju na simultanom merenju temperature IC kamerom i referentne temperature kontaktnim uređajem, najčešće termoparom. Emisivnost se zatim podešava na IC kameri od 0 do 1, sve dok se očitana temperatura ne izjednači sa referentnom [116]. Slično, Orlove je 1982. godine predložio da se emisivnost određuje na sledeći način [103]:

1. na površini tela se nalepi traka ili se deo površine premaže specijalnim premazom visoke poznate emisivnosti ($\varepsilon \approx 0,95$);
2. telo se zagreva do temperature koja je najmanje za 50 °C viša u odnosu na ambijentalnu;
3. centralna tačka na ekranu IC kamere se uperi u traku ili specijalni premaz;
4. u podešavanjima IC kamere se podesi vrednost emisivnosti trake ili specijalnog premaza i prethodno izmerenih ambijentalnih parametara, temperature, vlažnosti vazduha, kao i udaljenost IC kamere od tela;
5. očitava se temperatura trake ili specijalnog premaza u centralnoj tački na ekranu IC kamere;
6. centralna tačka na ekranu IC kamere se zatim uperi u deo na površini gde nema trake ili specijalnog premaza;
7. u podešavanjima IC kamere se menja vrednost emisivnosti od 0 do 1 sve dok IC kamera ne očitava istu temperaturu na površini kao što je prethodno očitavala na traci ili specijalnom premazu.

Sušтина opisanih metoda jeste da se izmeri referentna temperatura, bilo kontaktnim uređajem za merenje temperature ili pomoću trake ili premaza visoke emisivnosti sa kojom se vrši poređenje i podešavanje IC kamere sve dok se izmerena i referentna temperatura ne izjednače. Pored opisanih, koriste se još i eksperimentalne metode. Najveći deo eksperimentalnih metoda razvijen je za metale, zbog njihove tendencije promene emisivnosti u zavisnosti od mnogobrojnih faktora, te će se u nastavku dati pregled aktuelnog stanja u ovoj oblasti.

4.5 Aktuelno stanje u oblasti emisivnosti metala

Veliki broj autora se bavio ispitivanjem emisivnosti materijala u okviru kojih je najviše pažnje posvećeno metalima i njihovim legurama, zbog njihove niske i promenljive emisivnosti. Kako su metali najrizičnija grupa materijala sa aspekta KTO i kako je akcenat inovativne metode PR od KTO predstavljene u disertaciji upravo na njima, to iziskuje dodatne napore u razumevanju ovog parametra, kao i načina za njegovo određivanje. Samo prethodnim determinisanjem emisivnosti metala moguće je izmeriti temperaturu vrućih metalnih površina primenom ICT, zbog čega je pregled aktuelnog stanja u ovoj oblasti dat u nastavku.

Kobayashi i dr. [117] su formirali bazu podataka emisivnosti za 30 čistih metala i legura u zavisnosti od talasnih dužina, temperature, vremena i debljine oksidacionog sloja. Autori su razvili metodologiju koja omogućava merenje normalne spektralne emisivnosti tokom direktnog zagrevanja uzoraka u vakuumu. Normalna spektralna emisivnost je izmerena na oko 100 različitih talasnih dužina u opsegu od 0,55 μm do 5,3 μm pri temperaturama od 780 °C do 1200 °C i u većini slučajeva je zabeležen njen rast sa porastom temperature. Wen [118] je primenio nekoliko emisivnih modela za

ispitivanje ponašanja emisivnosti čelika u zavisnosti od temperature primenom Multispektralne Radijacione Termometrije (MRT). Rezultati su pokazali da emisivnost raste sa povećanjem talasnih dužina. Za čelik koji sadrži visok procenat hroma, emisivnost je obično niža zbog formiranja zaštitnog oksidacionog sloja. Autor je sproveo dodatne eksperimente [119] na različitim čelicima u zavisnosti od temperature, talasnih dužina i vremena zagrevanja. MRT sa Linearnim Emisivnim Modelima (LEMs) i Log-Linearnim Emisivnim Modelima (LLEs) je primenjena za predviđanje temperature. Rezultati pokazuju da spektralna emisivnost čelika opada sa povećanjem talasne dužine i povećava sa porastom temperature. Shi i dr. [120] su izmerili varijacije u spektralnoj emisivnosti Usibor® 1500P čelika tokom dvostepene austenitizacije u argonu i u vazduhu, koristeći bliski IC spektrometar i IC reflektometar. Fazne transformacije u Al-Si prevlaci i površinska oksidacija dovele su do promena u površinskom faznom sastavu i hrapavosti površine, što je za posledicu imalo promenu u spektralnoj emisivnosti. Xing i dr. [121] su merili normalnu spektralnu emisivnost tokom rasta oksidacionog sloja na površini čelika 430 na talasnoj dužini od 1,5 μm u temperaturnom opsegu od 527 °C do 827 °C. U eksperimentu su korišćeni termoparovi, simetrično zavareni na prednjoj površini uzoraka i InGaAs infracrveni detektor. Istraživanje je pokazalo da emisivnost čelika raste sa temperaturom i debljinom oksidacionog sloja. Albatici i dr. [121] su predložili tzv. Infracrvenu Termografsku Tehniku - emisometar (ITT-emisometar), za merenje emisivnosti aluminijuma na temperaturama 100 °C, 175 °C i 250 °C. Autori su zaključili da emisivnost aluminijuma raste sa porastom temperature. Valiorgu i dr. [123] su konstruisali uređaj za određivanje emisivnosti pomoću IC kamere. Ovom metodom dobijena je emisiona kriva za čelik 316L. Pokazano je da se emisivnost čelika povećava između 100 °C i 200 °C, nakon čega opada pri povećanju temperature do oko 400 °C. Deheng i dr. [124] su proučavali efekat površinske oksidacije na spektralnu emisivnost mesinga u temperaturnom opsegu od 527 °C do 797 °C na talasnoj dužini od 1,5 μm . Temperatura površine uzorka se pratila pomoću dva termopara tipa R. Pokazano je da spektralna emisivnost mesinga brzo raste sa porastom temperature. Zhibin i dr. [125] su istraživali uticaj površinske hrapavosti na emisivnost Au filmova za visoko-temperaturnu primenu. Uzorci su zagrevani u vazduhu na 600 °C tokom 200 h. Rezultati su pokazali da je površinska hrapavost imala veliki uticaj na emisivnosti Au filmova. Zhang i dr. [126] su odredili emisivnost čistog titanijuma TA1, oksidovanog nikla i austenitnog nerđajućeg čelika pomoću specijalne merne aparature koristeći monohromator sa difrakcionom rešetkom. U ispitivanom opsegu talasnih dužina od 0,8 μm do 2,2 μm i pri temperaturama od 200 °C do 1000 °C pokazano je da emisivnost ispitanih metala blago opada sa porastom talasnih dužina i raste sa povećanjem temperature. Do sličnih rezultata došli su i autori Zhao i dr. [127], [128] koristeći infracrvenu spektroskopiju sa Furijevom transformacijom (FTIR). Ispitivanje je urađeno pri oksidaciji legura na bazi nikla, K465 i DZ125 u temperaturnom opsegu od 810 °C do 998 °C i pri kratkim talasnim dužinama. Kong i dr. [129], [130] su analizirali emisivnost superlegure nikla, GH536 i pet aeronautičkih legura pomoću FT-IR spektrometra na talasnim dužinama od 1 μm do 5 μm u intervalu temperatura od 127 °C do 927 °C. Istraživanja su pokazala da emisivnost ispitanih legura raste sa povećanjem temperature i opada sa povećanjem talasnih dužina, dok oksidacija i tretman plamenom dovode do porasta emisivnosti. Wen i dr. [131]–[134] su u svojim opsežnim istraživanjima koristili multispektralnu radijacionu termometriju (MRT) za određivanje emisivnosti legura aluminijuma u zavisnosti od temperature, površinske hrapavosti i oksidacije. Pokazano je da su emisijski spektri različitih legura aluminijuma pri istoj temperaturi veoma sličnog oblika, ali usled oksidacije dolazi do znatnih razlika u magnitudi. Porast temperature i površinske hrapavosti uglavnom dovodi do porasta emisivnosti ispitanih legura. Jo i dr. [135] su ispitivali uticaj oksidacije i površinske hrapavosti na emisivnost metala i potvrdili su da oba parametra imaju uticaj na promenu emisivnosti metala, s tim

da je uticaj oksidacije na emisivnost metala signifikantniji, odnosno dominantniji u odnosu na površinsku hrapavost.

Poslednjih nekoliko decenija predložene su i mnoge druge metode za određivanje emisivnosti. Impulsna kalorimetrijska metoda sa direktnim grejanjem za termofizičku karakterizaciju metala i legura [136] još od početka osamdesetih godina prošlog veka se uspešno koristi u Laboratoriji za termotehniku i energetiku Instituta za nuklearne nauke Vinča. Njenom primenom moguće je na efikasan i pouzdan način odrediti vrednost ukupne, normalne i spektralne emisivnosti čvrstih elektroprovodnih materijala u širokom temperaturnom opsegu. Zahvaljujući jednostavnosti, metoda je postala standardna za određivanje pomenutih termofizičkih veličina, sa mernom nesigurnosti od 5% do 10% kod određivanja ukupne, normalne emisivnosti. Smetana i Reicher [137] su predložili korišćenje lasersko – radijacionih sistema sa mogućnošću varijabilnih talasnih dužina. Ianiro i Cardone [138] su odredili emisivnost korišćenjem dve IC kamere u stereo rasporedu sa IC detektorima osetljivim na različite opsege talasnih dužina. Ibos i dr. [139] su proučavali uticaj srednjeg aritmetičkog odstupanja profila površinske hrapavosti, Ra na emisivnost, pomoću metode toplotne modulacije i zaključili su da u okviru ispitivanih materijala povećanje hrapavosti površine dovodi do povećanja emisivnosti. Metoda za određivanje emisivnosti materijala koju je razvila ASTM organizacija, koristi diferencijal termoelektrične baterije emisometra za merenje ukupne, hemisferne emisivnosti [140]. Barreira i dr. [141] su ispitali emisivnost različitih građevinskih materijala pomoću ICT (metoda crne trake) i sa emisometrom. Rezultati su ukazali na značajne razlike u eksperimentalno dobijenim podacima i preporučenim vrednostima emisivnosti dostupnim u literaturi. Razlike u temperaturi sa podešenom vrednošću emisivnosti iz literature i onom određenom eksperimentalno u toku istraživanja su bile i do 7 °C. Kod većine građevinskih materijala koje su Avdelidis i Moropoulou [142] ispitivali, između ostalog i metala, emisivnost se povećavala sa temperaturom u opsegu talasnih dužina od 3 μm do 5,5 μm, dok je u intervalu od 8 μm do 12 μm emisivnost bila konstantna. Zhu i dr. [143] su predstavili novi instrument za merenje emisivnosti neprozirnih materijala od 200 °C do 450 °C u spektralnom opsegu od 2,1 μm do 2,5 μm. Instrument se sastoji od para hemisfernih čaša obloženih Vantablack® i zlatom, posebno dizajniranog IC termometra i grejne ploče. Ovaj instrument omogućava direktno i indirektno merenje emisivnosti materijala.

Nije redak slučaj da se stabilna emisivnost metala postiže specijalnim premazima, zbog čega postoji određen broj studija koje su se bavile i ovom problematikom. Pored ovoga, premazi za metale se često koriste kao jedna od mera inženjerske kontrole kao najefikasnije sredstvo za snižavanje prekomerne izloženosti toploti kada je u pitanju rad u blizini vrućih površina [144]. Brodu i dr. [145] su odredili ukupnu, hemisfernu emisivnost tri premaza izrađenih od renijuma, volframa i molibdena, u opsegu temperature od 827 °C do 1.627 °C. U zavisnosti od specifične strukture površine svakog uzorka, izmerene ukupne, hemisferne emisivnosti su bile u rasponu od 0,2 do 0,8. Brandt i dr. [146] su ispitali emisivnost dva referentna premaza koja se koriste kod in situ metoda za određivanje nepoznate emisivnosti materijala pomoću IC kamere. U ispitivanju su korišćeni premazi HE6 i HE23 koje je razvio Rols-Rojs. Spektralna emisivnost premaza je izmerena pri uglovima od 30° i 60° u vazduhu, pri normalnom pritisku i temperaturi od 700 °C do 1313 °C. HE6 premaz je pokazao blagu zavisnost emisivnosti od ugla, ali praktično nezavisnu od temperature ($\epsilon = 0,95$), dok je emisivnost HE23 premaza bila nešto niža i pokazala je blago opadanje sa porastom temperature od 0,93 do 0,90.

S obzirom na tendenciju promene emisivnosti metala u zavisnosti od temperature, površinske hrapavosti i premaza, neophodno je sprovesti eksperimentalno ispitivanje u zavisnosti od navedenih parametara, kako bi se sa sigurnošću mogli osloniti na merenje temperature vrućih metalnih površina

IC kamerom, što je tema narednog poglavlja. Iako je u ovom poglavlju usvojen termin emisivnost metala, zbog korišćene literature, u nastavku će se koristiti termin emisivnost metalnih površina. Razlog tome je taj što emisivnost zapravo predstavlja svojstvo tela da sa svoje površine emituje toplotu, a kako IC kamera meri temperaturu na površini tela, predloženi termin je u konkretnom slučaju adekvatniji.

5. ISPITIVANJE EMISIVNOSTI METALNIH POVRŠINA

Iz pregleda aktuelnog stanja u oblasti emisivnosti metala može se zaključiti da emisivnost metala, odnosno metalnih površina, primarno zavisi od vrste metala, temperature i površinske hrapavosti, dok premazi utiču na povećanje emisivnosti metalnih površina. Ispitivanje emisivnosti sprovedeno je na metalnim površinama zbog njihovog velikog udela kod mašina i proizvoda, ali i zbog toga što su metali najrizičniji sa aspekta nastanka KTO, zbog svoje odlične sposobnosti provođenja toplote u odnosu na druge materijale. Kako bi se osigurala tačnost merenja IC kamerom, neophodno je sprovesti ispitivanje emisivnosti nepremazanih i premazanih metalnih površina u zavisnosti od temperature i površinske hrapavosti, kao i ispitivanje emisivnosti premazanih metalnih površina u zavisnosti od vrste i debljine premaza na različitim temperaturama. Ispitivanje emisivnosti nepremazanih metalnih površina sprovedeno je na leguri aluminijuma, konstrukcionom čeliku i mesingu, dok je ispitivanje emisivnosti premazanih metalnih površina sprovedeno na konstrukcionom čeliku i sivom livu korišćenjem dva različita poliuretanska završna premaza za metale. Izbor vrste metala je različit kod ispitivanja premazanih u odnosu na nepremazane metalne površine, jer nije uobičajeno da se metalne površine od aluminijuma i mesinga premazuju. Sivi liv je odabran kao materijal, koji je pored čelika (preko 80%) jedan od najčešće primenjenih materijala (oko 10%) u industriji prerade metala [147]. Pored navedenog, posebno je ispitana emisivnost metalnih površina od nerđajućeg čelika, zbog njegove česte primene u izradi mašina i proizvoda u određenim industrijama. U poslednjem potpoglavlju su izvedeni zaključci i smernice za određivanje emisivnosti nepremazanih i premazanih metalnih površina.

5.1 Ispitivanje emisivnosti nepremazanih metalnih površina

Ispitivanje uticaja temperature i površinske hrapavosti na emisivnost nepremazanih metalnih površina sprovedeno je na leguri aluminijuma, konstrukcionom čeliku i mesingu. U nastavku je objašnjen izbor materijala, način pripreme, označavanje i merenje površinske hrapavosti uzoraka, korišćeni uređaji, eksperimentalna postavka, metodologija, statistička analiza rezultata ispitivanja i prikazani su i prodiskutovani rezultati ispitivanja emisivnosti izabranih materijala.

5.1.1 Izbor materijala za ispitivanje emisivnosti nepremazanih metalnih površina

Za ispitivanje emisivnosti nepremazanih metalnih površina izabrani su sledeći materijali: legura aluminijuma AlSi1MgMn, konstrukcioni čelik S235 i legura bakra sa cinkom (mesing) CuZn37.

Legura aluminijuma AlSi1MgMn pripada legurama serije 6000 koje sadrže magnezijum i silicijum, kao glavne legirajuće elemente. Legure aluminijuma iz serije 6000 podložne su termomehaničkoj obradi i danas se najviše koriste u automobilskoj i građevinskoj industriji [148].

Hemijski sastav legure aluminijuma AlSi1MgMn prikazan je u Tabeli 5.1. Izabrana legura aluminijuma je srednje čvrstoće, izuzetno otporna na koroziju i poznata je kao konstrukciona legura, zbog čega ima široku primenu u industriji.

Tabela 5.1 Hemijski sastav legure aluminijuma AlSi1MgMn

	Hemijski elementi							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
min udeo u %	0,70			0,40	0,60			
max udeo u %	1,30	0,50	0,10	1,00	1,20	0,20	0,10	0,25

Čelik S235 pripada grupi konstrukcionih čelika i njegov hemijski sastav je prikazan u Tabeli 5.2. Koristi se za izradu konstrukcionih elementa u mašinogradnji, mostogradnji, brodogradnji, zatim za izradu krovnih konstrukcija (rešetkasti nosači, stubovi, elementi ukrućenja), ramova i šasija poljoprivrednih mašina. Široku primenu nalazi i u građevinarstvu, kao materijal za izradu stepeništa, gazišta, platformi, zaštitnih ograda, prilaznih rampi, itd.

Tabela 5.2 Hemijski sastav konstrukcionog čelika S235

	Hemijski elementi													
	C	Si	Mn	P	S	N	Cu	Ni	Mo	Al	V	As	Ceq*	Cr
Udeo u %	0,150	0,210	0,580	0,013	0,010	0,010	0,240	0,130	0,016	0,027	0,002	0,022	0,299	0,120

*Ceq – ekvivalent ugljenika

Mesing CuZn37 je legura bakra sa cinkom, koju karakteriše visok sadržaj bakra od 58% do 63% (Tabela 5.3). Ove legure imaju dobru obradljivost i mehaničke osobine. Koriste se za izradu frikcionih elemenata, poput elemenata sinhronizacije brzine (sinhroni prstenovi), konstrukcionih elemenata prenosa snage pri rotacionom kretanju, itd. [149], [150]. Mesing CuZn37 je namenjen za hladnu obradu kao što su izvlačenje, valjanje i presovanje. Otporan je na koroziju izazvanu slatkim vodom i pogodan za zavarivanje, te se iz navedenih razloga koristi za izradu cevi, limova, vijaka, zatvarača (ventila), itd.

Tabela 5.3 Hemijski sastav mesinga CuZn37 [150]

	Hemijski elementi	
	Cu	Zn
min udeo u %	62	
max udeo u %	65	~37

5.1.2 Priprema i oznake uzoraka

Ukupno je pripremljeno 12 uzoraka dimenzija 150×150×10 mm. Uzorci su bili većih dimenzija, da bi se različitim režimima obrade postigla razlika u kvalitetu površine (površinska hrapavost). Pripremljeno je 4 uzorka od svakog metala, od kojih je 1 uzorak obrađen brušenjem, dok su 3 uzorka obrađena različitim režimima glodanja. Oznake uzoraka u zavisnosti od vrste metala, postupka i režima obrade su prikazane u Tabeli 5.4.

Tabela 5.4 Oznake uzoraka u zavisnosti od vrste metala i režima obrade

Vrsta metala	Postupak i režim obrade	Oznaka uzorka
Aluminijum AlSi1MgMn	Brušenje	A1
	Glodanje 1	A2
	Glodanje 2	A3
	Glodanje 3	A4
Konstrukcioni čelika S235	Brušenje	Č1
	Glodanje 1	Č2
	Glodanje 2	Č3
	Glodanje 3	Č4
Mesing CuZn37	Brušenje	M1
	Glodanje 1	M2
	Glodanje 2	M3
	Glodanje 3	M4

5.1.3 Merenje površinske hrapavosti uzoraka

Hrapavost predstavlja mikogeometrijske nepravilnosti površine nastale tokom obrade ili pod dejstvom drugih uticaja i pripada domenu mikro - karakteristika kvaliteta obrađene površine. Merenje površinske hrapavosti sprovedeno je metodom kontaktne profilometrije, korišćenjem kontaktnog profilometra MarSurf PS1, proizvođača *Mahr* (Slika 5.1).



Slika 5.1 Kontaktni profilometar MarSurf PS1

Uređaj poseduje merni opseg od 0,01 μm do 38 μm , sa proširenom mernom nesigurnošću 4,12%. Princip rada se zasniva na direktnom kontaktu mernog pipka sa ispitivanom površinom, pri čemu se profil ispitivane površine očitava duž hoda pipka definisanog izabranom referentnom dužinom, l_r [151].

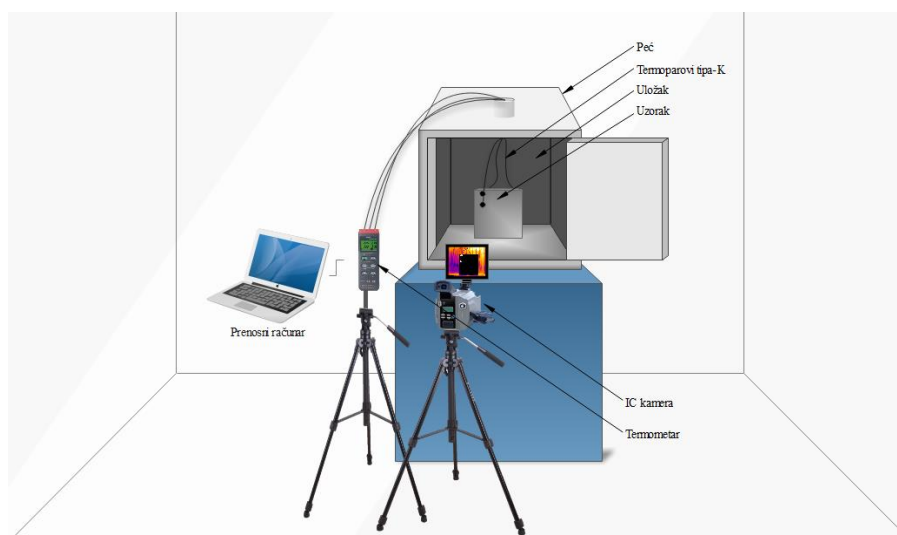
Na svakom uzorku je izabrano devet mernih mesta, uniformno raspoređenih na površini uzorka, sa trostrukim ponavljanjem merenja srednje aritmetičke površinske hrapavosti, R_a . R_a predstavlja srednju vrednost sume odstojanja svih tačaka efektivnog profila od srednje linije, na izabranoj referentnoj dužini, a njena prosečna vrednost, \bar{R}_a je uzeta kao reprezentativni parametar stanja obrađene površine uzorka. Površinska hrapavost, \bar{R}_a uzoraka aluminijuma AlSi1MgMn, konstrukcionog čelika S235 i mesinga CuZn37 prikazana je Tabeli 5.5.

Tabela 5.5 Površinska hrapavost, \bar{R}_a uzoraka

Oznake uzoraka	\bar{R}_a [μm]
A1	1,07
A2	1,25
A3	1,55
A4	1,77
Č1	0,63
Č2	1,72
Č3	2,04
Č4	3,71
M1	1,23
M2	3,24
M3	3,38
M4	3,92

5.1.4 Opis uređaja i eksperimentalne postavke

Za ispitivanje emisivnosti nepremazanih metalnih površina konstruisana je eksperimentalna postavka prikazana na Slici 5.2. Eksperimentalna postavka se sastoji iz peći za termičku obradu, uloška od tankog nerđajućeg čelika, termoparova tipa-K, termometra, IC kamere i prenosnog računara.



Slika 5.2 Eksperimentalna postavka za ispitivanje emisivnosti nepremazanih metalnih površina

Za zagrevanje uzoraka korišćena je peć za termičku obradu sa posebno napravljenim uloškom od nerđajućeg čelika debljine 2 mm, premazanim u crnu boju, kako bi se eliminisao uticaj sjajnih i visoko reflektivnih unutrašnjih površina peći na rezultate merenja. Merenje temperature sprovedeno je simultano IC kamerom ThermoPro™ TP8S (Slika 5.3a) i četvorokanalnim termometrom T395 sa termoparovima tipa-K (Slika 5.3b).



Slika 5.3 Uređaji za merenje temperature: a) IC kamera ThermoPro™ TP8S i b) četvorokanalni termometar T395 sa termoparom tipa-K

IC kamera ThermoPro™ TP8S, proizvođača *Wuhan Guide Infrared Technology*, poseduje dva filtera za merenje temperature, prvi za merenje temperature od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (sa tačnošću $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ili $\pm 1\%$) i drugi za merenje temperature od $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (sa tačnošću $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ili $\pm 2\%$). Spektralni opseg kamere iznosi od $8\text{ }\mu\text{m}$ do $14\text{ }\mu\text{m}$. Kamera ima ugrađen nehlađeni IC detektor (FPA, mikrobolometar), rezolucije 384×288 piksela i LCD ekran rezolucije 640×480 piksela. IC kamera omogućava merenje temperature u istovremeno deset mesta ili oblasti sa prikazivanjem najniže, najviše i srednje temperature. Visoka tačnost uređaja obezbeđena je autokalibracijom pri merenju.

Termometar T395, proizvođača *PCE*, je četvorokanalni digitalni merač temperature sa mernim opsegom temperatura od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1370\text{ }^{\circ}\text{C}$ i sa tačnošću od $\pm 0,2\%$ (od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$), $\pm 0,5\%$ (od $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $400\text{ }^{\circ}\text{C}$) i $\pm 0,2\%$ (od $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1.370\text{ }^{\circ}\text{C}$). Na uređaj se mogu priključiti sve vrste temperaturnih senzora tipa-K, a najviše četiri merna senzora. Termometar se može koristiti za snimanje i monitoring kod održavanja i servisiranja, zatim za dijagnostiku i analizu, kontrolu kvaliteta, u istraživačke svrhe, itd.

5.1.5 Metodologija određivanja emisivnosti uzoraka

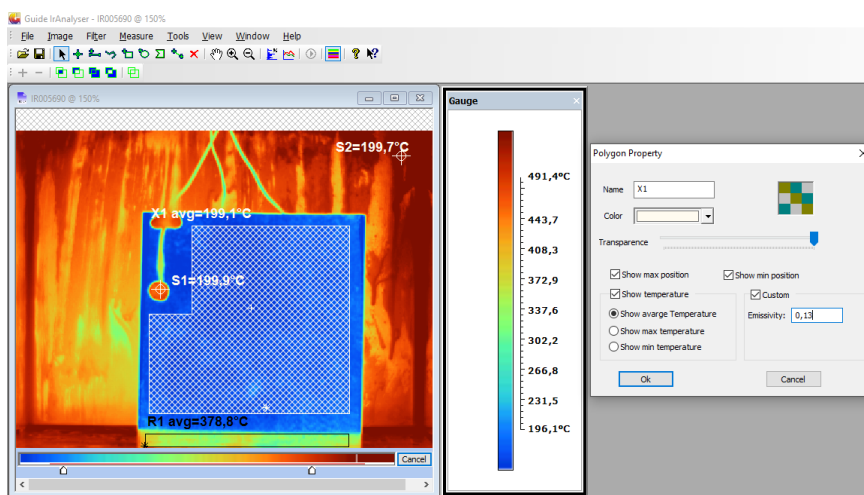
Određivanje emisivnosti pripremljenih uzoraka sprovedeno je prema sledećoj metodologiji:

1. uzorak se postavlja vertikalno u peć i na njega se montiraju tri termopara;
2. uzorak se zagreva do temperature $\sim 220\text{ }^{\circ}\text{C}$;
3. peć se isključuje i otvara;
4. IC kamerom se snimaju IC slike uzorka za svaki pad temperature od $10\text{ }^{\circ}\text{C}$;
5. IC slike se analiziraju primenom programa *Guide IrAnalyser* i određuje se emisivnost uzorka.

Tokom ispitivanja uzorci su postavljeni vertikalno u peći da bi se omogućilo njihovo ravnomerno zagrevanje. Merenje temperature sprovedeno je IC kamerom postavljenom na stalak u visini uzorka na udaljenosti 1 m od peći i termoparovima tipa-K. Sa zadnje strane uzorka postavljena su dva termopara, pričvršćena pomoću metalne pločice i vijaka, tako da merni krajevi termoparova budu na jednakoj udaljenosti od centra ploče, sa leve i desne strane. Sa prednje strane uzorka postavljen je treći termopar, čiji je kontakt učvršćen crnom gumom poznate emisivnosti 0,95. Crna guma je pored termoparova, služila za merenje referentne temperature. Provodnici termoparova su sprovedeni kroz gornji otvor peći do termometra povezanog sa prenosnim računarnom, tako da je merenje praćeno u realnom vremenu.

Uzorci su ispitivani pojedinačno, zbog svojih dimenzija i visoko reflektivne površine, koja bi uticala na nemogućnost raspoznavanja emitovanog od reflektovanog zračenja na IC kameri u slučaju ispitivanja više uzoraka istovremeno. Usled naglog hlađenja nakon otvaranja peći, uzorci su zagrejani na višoj temperaturi od oko 220 °C. Tokom ispitivanja primetno je bilo brže hlađenje prednje od zadnje strane uzorka, sa razlikom u temperaturi i do 10 °C.

Emisivnost uzorka je određena analizom IC slika primenom programa *Guide IrAnalyser*. Na svakoj IC slici je izabrana oblast *X1* koja obuhvata samo reprezentativne delove površine uzorka, izuzimajući prednji termopar i oblast *R1* (Slika 5.4). Oblast *R1* je izuzeta iz analize zbog reflektovanog zračenja od poda peći. Emisivnost oblasti *X1* je podešavana od 0 do 1 dok se njena srednja temperatura ne izjednači sa temperaturom izmerenom prednjim termoparom i temperaturom izmerenom na crnoj gumi u tački *S1* sa podešenom emisivnošću 0,95.



Slika 5.4 Analize IC slike primenom programa *Guide IrAnalyser* uzoraka A1 na 200 °C

Sa Slike 5.4 se vidi koliki uticaj na merenje temperature IC kamerom ima reflektovano zračenja, gde je prosečna temperatura analizirane oblasti *X1* na uzorku A1 199,1 °C, u tački *S1* na crnoj gumi 199,9 °C, dok je prosečna temperatura oblasti *R1* 378,8 °C.

Program *Guide IrAnalyser* omogućava prikazivanje samo jedne temperaturne skale, što predstavlja nedostatak kod IC slika koje imaju različite oblasti emisivnosti, kao što je to slučaj sa uzorkom, crnom gumom i crnim uloškom u peći. Kada se emisivnost podesi prema uzorak A1 temperaturna skala odgovara rasponu temperatura od 196,1 °C do ~300 °C u različitim nijansama

plave, što odgovara rasporedu boja na uzorku. Međutim, nijanse narandžaste odgovaraju temperaturama od oko 500 °C, što nije slučaj sa crnom gumom i crnim uloškom, jer su njihove temperature oko 200 °C. U slučaju da se emisivnost IC slike podese prema crnoj gumi i crnom ulošku, temperaturna skala ne odgovara rasporedu boja na uzorku, zbog čega je izabrano da se kod prikazivanja IC slika uzoraka emisivnost IC slike podese prema uzorku.

5.1.6 Statistička analiza rezultata ispitivanja

Primenom višestruke regresione analize utvrđena je zavisnost između temperature, površinske hrapavosti i emisivnost. Izlaz iz primene ovog pristupa je linearni, regresioni model koji povezuje uticaj dve nezavisne promenljive na zavisnu promenljivu [152].

U konkretnom slučaju, emisivnost, ε (zavisno promenljiva) se dovodi u vezu sa temperaturom, T i površinskom hrapavosti, R_a (dve nezavisno promenljive), preko sledećeg linearnog modela:

$$\varepsilon = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 R_a + r \quad (5.1)$$

gde su β_0 , β_1 i β_2 regresioni koeficijenti koje treba oceniti, a r je komponenta slučajne greške.

Ispitivanje je sprovedeno pri temperaturama od 50 °C do 200 °C, sa korakom 10 °C, odnosno na 16 različitih temperatura. Kako druga nezavisno promenljiva, R_a ima 4 različite vrednosti, to znači da je ukupan broj opservacija za jedan uzorku $n = 64$. Za ocenu modela za $n = 64$ opservacija i brojem nezavisno promenljivih $k = 2$, korišćen je matrični oblik jednačine 5.1 dat izrazom [153]:

$$Y = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{64} \end{bmatrix} X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} \\ 1 & x_{21} & x_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{(64)1} & x_{(64)2} \end{bmatrix} \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_{64} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

gde je:

- x_1 - prva nezavisno promenljiva (T);
- x_2 - druga nezavisno promenljiva (R_a);
- Y - matrica zavisno promenljive;
- X - matrica nezavisno promenljive;
- β - matrica regresionih koeficijenata;
- r - matrica grešaka merenja, tj. reziduala.

Za rešavanje matrične jednačine 5.2 korišćen je *Minitab* program i dobijeni su linearni, regresioni modeli za emisivnost izabranih materijala. Takođe, dobijene su i tablice za rezime modela u kojima oznake R -sq, R -sq(adj), S i R -sq(pred) imaju sledeće značenje [154]:

- R -sq ili R^2 naziva se koeficijent determinacije i predstavlja meru reprezentativnosti regresionog modela. On je relativna mera koja pokazuje koji procenat ukupnog varijabiliteta je objašnjen primenom regresionog modela, odnosno koliko su varijacije izlazne (zavisne) promenljive prouzrokovane varijacijama u ulaznim (nezavisno) promenljivim. Što je vrednost R^2 veća to je regresioni model bolji.

- $R\text{-sq}(adj)$ ili $R_{pril.}^2$ naziva se prilagođeni koeficijent determinacije koji se uvodi zbog toga što dodavanjem bilo kog novog faktora, čak i nebitnog, dolazi do povećanja koeficijenta determinacije, R^2 . Izračunava se korigovanjem koeficijenta determinacije faktorom koji je uslovljen brojem stepena slobode.
- S je standardna greška, odnosno veličina koja pored koeficijenta determinacije, pokazuje u kojoj meri regresioni model dobro opisuje podatke. Zapravo, S predstavlja prosečnu udaljenost posmatranih podataka od regresione linije. Što je vrednost standardne greške niža, to znači da su podaci bliži regresionoj liniji i da je regresioni model adekvatan.
- $R\text{-sq}(pred)$ ili $R_{pred.}^2$ predstavlja predikativni koeficijent determinacije koji ukazuje na to koliko dobro regresioni model predviđa rezultate za nove opservacije [155].

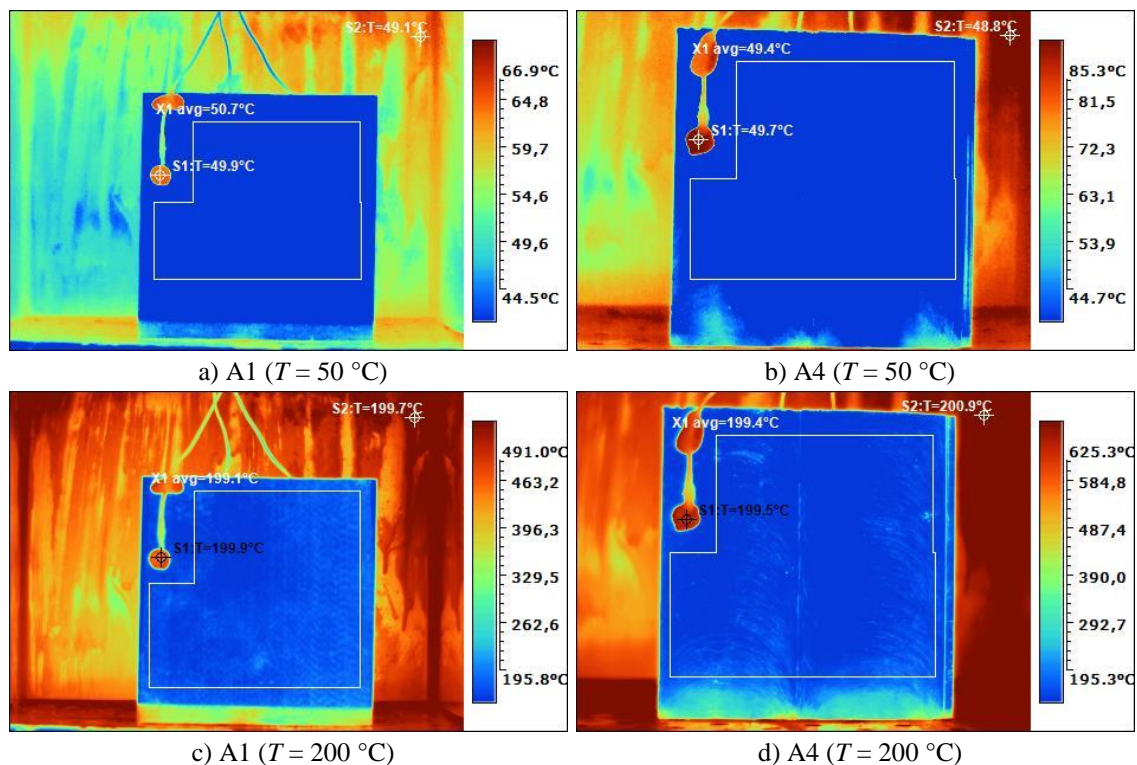
Pored linearnih, regresionih modela u *Minitab* programu dobijena je i ANOVA (engl. *Analysis Of Variance*). Analiza varijanse, odnosno ANOVA predstavlja metodu kojom se, na temelju F -testa, utvrđuje da li između aritmetičkih sredina više eksperimentalnih grupa postoje razlike koje su statistički značajne. Za svaki linearni, regresioni model dobijena je ANOVA tablica u kojoj oznake DF , SS , MS , F -Value i p -Value imaju sledeće značenje [154]:

- DF (engl. *Degrees of Freedom*) ili stepeni slobode predstavljaju minimalan broj vrednosti koji treba biti specificiran kako bi se odredile sve tačke podataka;
- SS (engl. *Sum of Squares*) ili suma kvadrata očitavanja, predstavlja devijaciju oko srednjih vrednosti izvora;
- MS (engl. *Mean Square*) ili srednja vrednost kvadrata, predstavlja količnik SS i DF ;
- F -Value ili F -vrednost ima za cilj da odredi da li ulazni parametri utiču značajno na izlazni parametar;
- p -Value, ili p -vrednost jeste vrednost koja ukoliko je manja od praga značajnosti $\alpha = 0,05$, a koji sledi iz uobičajenog intervala poverenja 95%, tada se može reći da je posmatrani faktor statistički signifikantan.

Kompletna statistička analiza dobijena u programu *Minitab* zajedno sa tablicama za rezime modela i ANOVA tablicama data je u Prilogu 4 za aluminijum AlSi1MgMn, u Prilogu 5 za konstrukcioni čelik S235 i u Prilogu 6 za mesing CuZn37. U nastavku su pojedinačno prikazani i prodiskutovani samo ključni delovi ispitivanja emisivnosti izabranih materijala.

5.1.7 Rezultati ispitivanja emisivnosti legure aluminijuma AlSi1MgMn

Na Slici 5.5 prikazani su uzorci legure aluminijuma AlSi1MgMn, A1 i A4, na najnižoj i najvišoj ispitanoj temperaturi. Kod uzoraka A1 i A4 temperature 50 °C (Slika 5.5a i Slika 5.5b) površina je uniformnije zagrejana u poređenju sa uzorcima A1 i A4 temperature 200 °C (Slika 5.5c i Slika 5.5d). Takođe, tragovi glodanja na IC slikama su primetniji na višim temperaturama, naročito kod uzorka A4 (Slika 5.5d.) Prosečna temperatura oblasti XI i temperatura u tački $S1$ su bile u dobroj korelaciji, sa razlikama do najviše 2 °C. Iako su uzorci pre ispitivanja očišćeni, pojedini defekti na njihovoj površini doveli su do pojave svetloplavih tački na IC slikama, kao što se to npr. može primetiti na Slici 5.5d. Ovi defekti nisu doveli do porasta prosečne temperature XI oblasti, zbog čega nisu izuzeti iz analize. Emisivnost je podešena u odnosu na uzorak, tako da boje na skali temperatura odgovaraju rasporedu temperatura na njegovoj površini. Temperatura uloška na IC slikama je znatno viša od njene stvarne temperature, upravo zbog podešavanja emisivnosti u odnosu na uzorak. Iz tog razloga temperatura uloška je posebno izmerena u tački $S2$ sa podešenom emisivnošću 0,95.



Slika 5.5 IC slike uzoraka legure aluminijuma AlSi1MgMn temperature $50\text{ }^{\circ}\text{C}$: a) A1 i b) A4 i uzoraka temperature $200\text{ }^{\circ}\text{C}$: c) A1 i d) A4

IC slike su analizirane primenom programa *Guide IrAnalyser* i određena je emisivnost legure aluminijuma AlSi1MgMn u zavisnosti od temperature, T i površinske hrapavosti, \bar{R}_a (Tabela 5.6) na način opisan u poglavlju 5.1.5.

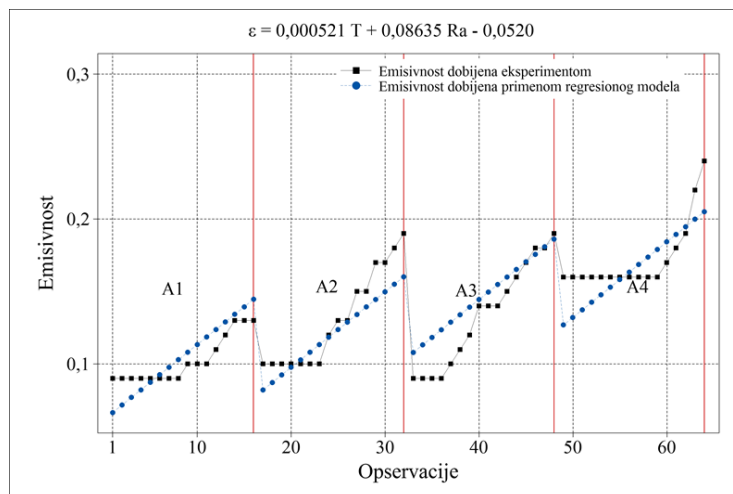
Tabela 5.6 Emisivnost legure aluminijuma AlSi1MgMn u zavisnosti od T i \bar{R}_a

T [$^{\circ}\text{C}$]	ε			
	A1	A2	A3	A4
50	0,09	0,10	0,09	0,16
60	0,09	0,10	0,09	0,16
70	0,09	0,10	0,09	0,16
80	0,09	0,10	0,09	0,16
90	0,09	0,10	0,10	0,16
100	0,09	0,10	0,11	0,16
110	0,09	0,10	0,12	0,16
120	0,09	0,12	0,14	0,16
130	0,10	0,13	0,14	0,16
140	0,10	0,13	0,14	0,16
150	0,10	0,15	0,15	0,16
160	0,11	0,15	0,16	0,17
170	0,12	0,17	0,17	0,18
180	0,13	0,17	0,18	0,19
190	0,13	0,18	0,18	0,22
200	0,13	0,19	0,19	0,24

Višestrukom regresionom analizom, primenom programa *Minitab*, na način opisan u poglavlju 5.1.6, dobijen je linearni, regresioni model za emisivnost legure aluminijuma AlSi1MgMn:

$$\varepsilon = 0,000521 T + 0,08635 \bar{R}_a - 0,0520 \quad (5.3)$$

Predstavljeni linearni, regresioni model se može koristiti za određivanje emisivnosti za temperature od 50 °C do 200 °C i za površinske hrapavosti od 1,07 μm do 1,77 μm (jednačina 5.3). Iz ANOVA tabele prikazane u Prilogu 4 vidi se da je p -vrednost 0,000. S obzirom na to da je ova vrednost niža od praga značajnosti, $\alpha = 0,05$, a koji sledi iz uobičajenog intervala poverenja 95%, posmatrani faktori, tj. temperatura i površinska hrapavost, su statistički signifikantni za emisivnost. Vrednost koeficijenta determinacije, R^2 iznosi 80,94%, dok vrednost koeficijenta predikcije, R^2_{pred} iznosi 78,68% (Prilog 4). R^2 pokazuje da je 80,94% ukupnog varijabiliteta objašnjeno primenom regresionog modela, odnosno da 80,94% varijacija u emisivnosti potiče od varijacija u temperaturi i površinskoj hrapavosti, dok je preostalih 19,06% posledica uticaja drugih parametara, (npr. vlažnosti vazduha, temperature okoline, itd.). R^2_{pred} je uvek niži od R^2 i on pokazuje da je dobijeni regresioni model 78,68% pouzdan za predviđanje emisivnosti legure aluminijuma AlSi1MgMn za sve nove opservacije. Vrednost prilagođenog koeficijenta determinacije, $R^2_{pril.}$ iznosi 80,32%, dok je vrednost standardne greške 0,02 (Prilog 4). Dakle, prosečna udaljenost eksperimentalnih podataka od regresione linije iznosi 0,02%, što ukazuje na visok stepen slaganja između emisivnosti dobijenih eksperimentom i regresionim modelom (Slika 5.6).

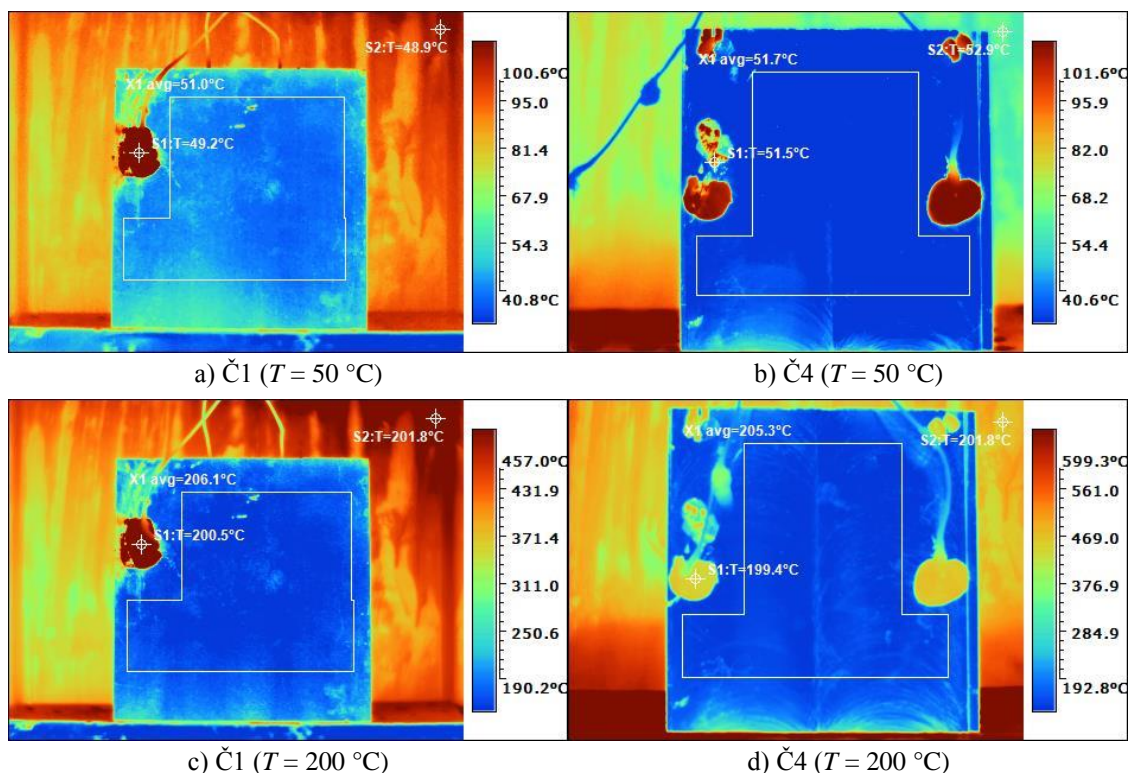


Slika 5.6 Poređenje emisivnosti legure aluminijuma AlSi1MgMn dobijenih eksperimentom i primenom regresionog modela

Rezultati istraživanja objavljeni su u više radova, od kojih su najznačajniji radovi [156] i [157]. Radovi su naišli na određeno zanimanje naučne javnosti, o čemu svedoči njihova citiranost. Prvi rad je citiran u četiri rada [158]–[161], dok je drugi rad citiran u pet radova [162]–[166] i dve disertacije [167], [168].

5.1.8 Rezultati ispitivanja emisivnosti konstrukcionog čelika S235

Na Slici 5.7 prikazani su uzorci konstrukcionog čelika S235 sa najnižom i najvišom površinskom hrapavošću, Č1 i Č4 na najnižoj i najvišoj temperaturi. Slično, kao kod legure aluminijuma AlSi1MgMn i kod uzoraka Č1 i Č4 temperature 50 °C (Slika 5.7a i Slika 5.7b) površina je uniformnije zagrejana u poređenju sa uzorcima Č1 i Č4 temperature 200 °C (Slika 5.7c i Slika 5.7d). Tragovi glodanja na IC slikama uzorak Č4 su uočljiviji na višim temperaturama, naročito na Slici 5.7b i 5.7d. Ovde prosečna temperatura oblasti *X1* i temperatura u tački *S1* nisu u dobroj korelaciji. Razlike su više od 10 °C, zbog toga što je crna guma lepljena više puta na površini uzorka. Na kraju, za referentnu temperaturu uzeta je samo ona izmerena prednjim termoparom.



Slika 5.7 IC slike uzoraka konstrukcionog čelika S235 temperature 50 °C: a) Č1 i b) Č4 i uzoraka temperature 200 °C: c) Č1 i d) Č4

Zbog postojanja defekata na uzorcima na IC slikama su vidljive svetloplave tačke. S obzirom na to da ovi defekti ne utiču na porast prosečne temperature *X1* oblasti, isti nisu izuzeti iz analize. I ovde je emisivnost podešena u odnosu na uzorak, zbog čega skala temperatura ne odgovara rasporedu boja na ulošku. Zbog toga, temperatura uloška je posebno određena u tački *S2* na svim IC slikama sa podešenom emisivnošću 0,95, kako bi se prikazala njena stvarna vrednost. IC slike su analizirane primenom programa *Guide IrAnalyser* kako bi se odredila emisivnost konstrukcionog čelika S235 u zavisnosti od temperature i površinske hrapavosti, na način opisan u poglavlju 5.1.5 (Tabela 5.9).

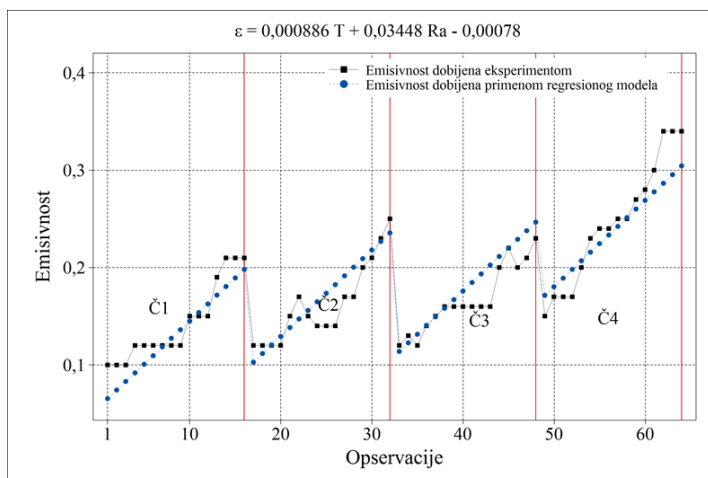
Tabela 5.7 Emisivnost konstrukcionog čelika S235 u zavisnosti od T i \bar{R}_a

T [°C]	ε			
	Č 1	Č 2	Č 3	Č 4
50	0,10	0,12	0,12	0,15
60	0,10	0,12	0,13	0,17
70	0,10	0,12	0,12	0,17
80	0,12	0,12	0,14	0,17
90	0,12	0,15	0,15	0,20
100	0,12	0,17	0,16	0,23
110	0,12	0,15	0,16	0,24
120	0,12	0,14	0,16	0,24
130	0,12	0,14	0,16	0,25
140	0,15	0,14	0,16	0,25
150	0,15	0,17	0,16	0,27
160	0,15	0,17	0,20	0,28
170	0,19	0,20	0,22	0,30
180	0,21	0,21	0,20	0,34
190	0,21	0,23	0,21	0,34
200	0,21	0,25	0,23	0,34

Primenom *Minitab* programa, na način opisan u poglavlju 5.1.6, dobijen je linearni, regresioni model za emisivnost konstrukcionog čelika S235:

$$\varepsilon = 0,000886 T + 0,03448 \bar{R}_a - 0,00078 \quad (5.4)$$

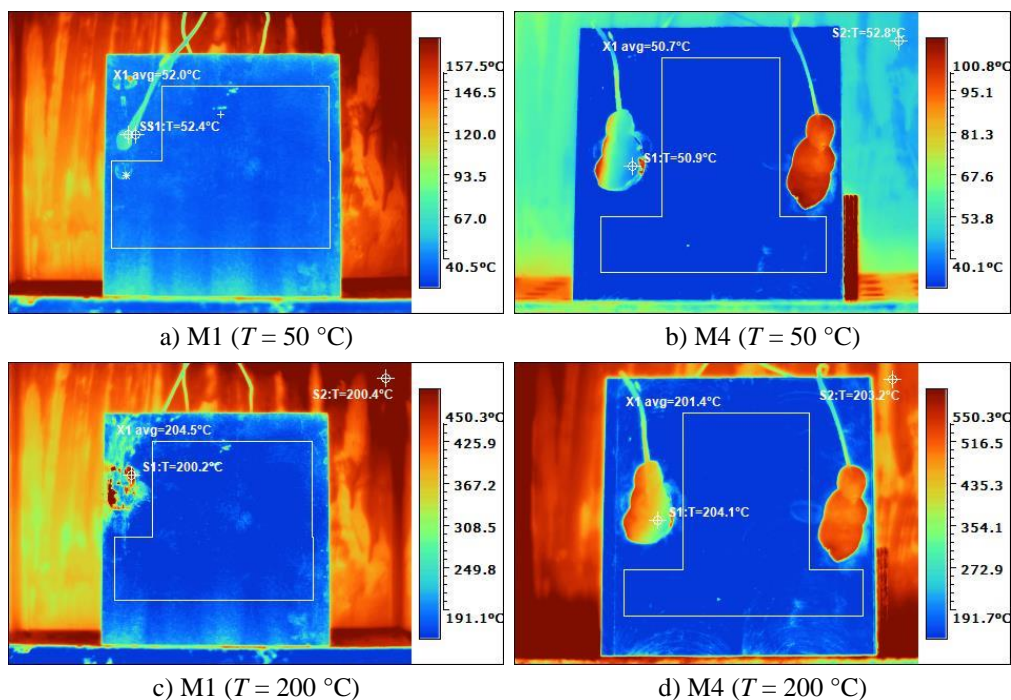
Jednačina 5.4 se može koristiti za određivanje emisivnosti za temperature od 50 °C do 200 °C i za površinske hrapavosti od 0,63 μm do 3,71 μm . Iz ANOVA tabele sledi da je p -vrednost 0,000 (Prilog 5). S obzirom na to da je ova vrednost niža od praga značajnosti, $\alpha = 0,05$ (usvojeni interval poverenja je 95%), zaključuje se da su temperatura i površinska hrapavost statistički signifikantni za emisivnost. Koeficijent determinacije, R^2 pokazuje da je 87,92% varijacija u emisivnosti rezultat varijacija u temperaturi i površinskoj hrapavosti, dok je preostalih 12,08% posledica uticaja drugih parametara koji nisu uzeti u obzir. R^2_{pred} ukazuje da dobijeni regresioni model je 86,56% pouzdan za predikciju emisivnosti konstrukcionog čelika S235 za sve nove opservacije. Vrednost prilagođenog koeficijenta determinacije, $R^2_{pril.}$ iznosi 87,52%, dok je vrednost standardne greške 0,02 (Prilog 5). Odnosno, prosečna udaljenost eksperimentalnih podataka od regresione linije iznosi 0,02%, što ukazuje na visok stepen slaganja između emisivnosti dobijenih eksperimentom i regresionim modelom (Slika 5.8).



Slika 5.8 Poređenje emisivnosti konstrukcionog čelika S235 dobijenih eksperimentom i primenom regresionog modela

5.1.9 Rezultati ispitivanja emisivnosti mesinga CuZn37

Uporedni prikaz uzoraka mesinga CuZn37 sa najnižom i najvišom površinskom hrapavošću, M1 i M4 na najnižoj i najvišoj temperaturi prikazan je na Slici 5.9. Ni ovde prosečna temperatura oblasti *X1* i temperatura u tački *S1* nisu bile u dobroj korelaciji. Razlike su više od 5 °C, zbog čega je za referentnu temperaturu uzeta ona izmerena prednjim termoparom. Kod ispitivanja mesinga crna guma se više puta odvajala od uzorka, zbog čega je kontakt morao biti dodatno osiguran, naročito kod uzorka najveće hrapavosti, M4.



Slika 5.9 IC slike uzoraka mesinga CuZn37 temperature 50 °C: a) M1 i b) M4 i uzoraka temperature 200 °C: c) M1 i d) M4

Kod IC slika uzoraka M1 i M4 temperature 50 °C (Slika 5.9a i Slika 5.9b) u poređenju sa IC slikama uzoraka temperature 200 °C (Slika 5.9c i Slika 5.9d) nije bilo značajnijih razlika u raspodeli temperature u pogledu uniformnosti. Takođe, tragovi glodanja na IC slikama uzorak M4 su приметniji na višim temperaturama, naročito na Slici 5.9d. I u ovom slučaju defekti na površini uzoraka doveli su do pojave svetloplavih tački na IC slikama, ali ne i do porasta prosečne temperature XI oblasti, zbog čega nisu izuzeti iz analize. Emisivnost je podešena u odnosu na uzorak, dok je temperatura uloška posebno izmerena u tački $S2$ sa podešenom emisivnošću 0,95. Emisivnost mesinga CuZn37 određena je primenom programa *Guide IrAnalyser* u zavisnosti od temperature, T i površinske hrapavosti, \bar{R}_a na način opisan u poglavlju 5.1.5 (Tabela 5.8).

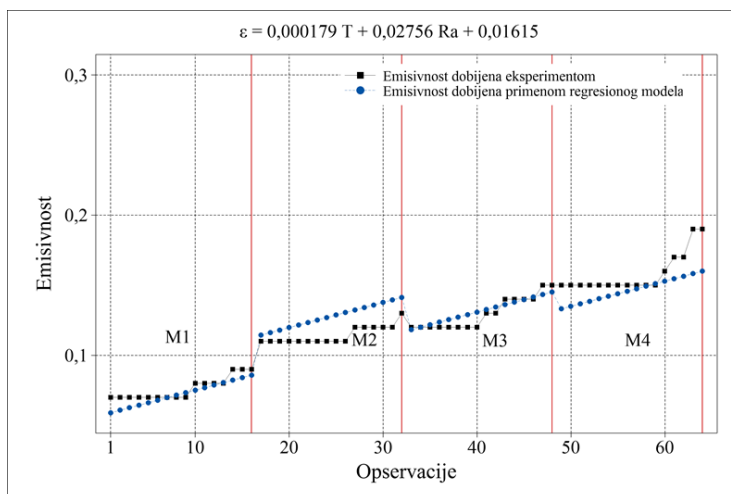
Tabela 5.8 Emisivnost mesinga CuZn37 u zavisnosti od T i \bar{R}_a

T [°C]	ε			
	M1	M2	M3	M4
50	0,07	0,11	0,12	0,15
60	0,07	0,11	0,12	0,15
70	0,07	0,11	0,12	0,15
80	0,07	0,11	0,12	0,15
90	0,07	0,11	0,12	0,15
100	0,07	0,11	0,12	0,15
110	0,07	0,11	0,12	0,15
120	0,07	0,11	0,12	0,15
130	0,07	0,11	0,13	0,15
140	0,08	0,11	0,13	0,15
150	0,08	0,12	0,14	0,15
160	0,08	0,12	0,14	0,16
170	0,08	0,12	0,14	0,17
180	0,09	0,12	0,14	0,17
190	0,09	0,12	0,15	0,19
200	0,09	0,13	0,15	0,19

Primenom *Minitab* programa, na način opisan u poglavlju 5.1.6 dobijen je linearni, regresioni model za emisivnost mesinga CuZn37:

$$\varepsilon = 0,000179 T + 0,02756 \bar{R}_a + 0,01615 \quad (5.5)$$

Predstavljeni linearni, regresioni model (jednačina 5.5) se može koristiti za određivanje emisivnosti za temperature od 50 °C do 200 °C i za površinske hrapavosti od 1,23 do 3,92. Iz ANOVA tabele date u Prilogu 6 sledi da je p -vrednost 0,000. I u ovom slučaju p -vrednost je niža od praga značajnosti, $\alpha = 0,05$ za usvojeni interval poverenja 95%, što implicira da su parametri, temperatura i površinska hrapavost, statistički signifikantni za emisivnost. Koeficijent determinacije, R^2 iznosi 87,94%, dok koeficijenta predikcije, R^2_{pred} iznosi 86,72% (Prilog 6). R^2 pokazuje da je 87,94% varijabilnosti u emisivnosti opisano varijabilnostima u temperaturi i površinskoj hrapavosti, dok je preostalih 12,06% posledica uticaja drugih parametara, koji nisu uzeti u obzir. R^2_{pred} ukazuje da je pouzdanost regresionog modela 86,72% za predikciju emisivnosti mesinga CuZn37 za sve nove opservacije. Vrednost prilagođenog koeficijenta determinacije, $R^2_{pril.}$ iznosi 87,55%, dok je vrednost standardne greške 0,01 (Prilog 6). Odnosno, prosečna udaljenost eksperimentalnih podataka od regresione linije iznosi 0,01%, što ukazuje na visok stepen slaganja između emisivnosti dobijenih eksperimentom i regresionim modelom (Slika 510).



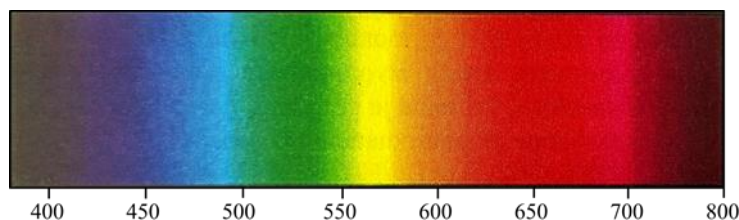
Slika 5.10 Poređenje emisivnosti mesinga CuZn37 dobijenih eksperimentom i primenom regresionog modela

Na osnovu rezultata istraživanja emisivnosti mesinga CuZn37 objavljen je rad [150], koji je citiran u tri rada [169]–[171] i jednoj disertaciji [172].

S obzirom na to da se određene metalne površine mašina i proizvoda premazuju, sprovedeno je posebno ispitivanje emisivnosti premazanih metalnih površina kako bi se utvrdilo da li emisivnost zavisi od temperature, vrste metala, debljine i boje premaza ili isključivo od vrste premaza.

5.2 Ispitivanje emisivnosti premazanih metalnih površina

Ispitivanje uticaja premaza na emisivnost metalnih površina sprovedeno je na konstrukcionom čeliku i sivom livu. Izabrana su dva poliuretanska završna premaza za metale u tri boje: crvenoj, plavoj i sivoj. Crvena i plava boja su izabrane jer se nalaze na suprotnim krajevima vidljivog dela elektromagnetnog spektra (Slika 5.11), dok je siva boja izabrana kao jedna od najčešćih koja se koristi kod mašina alatki. Plava boja obuhvata talasne dužine od 400 nm do 500 nm, dok crvena boja obuhvata talasne dužine od 620 nm do 750 nm [173]. Siva boja predstavlja nijansu između crne i bele boje. Zapravo, siva, crna i bela nisu boje, jer se pod crnom smatra skup svih boja, a pod belom odsustvo svih boja iz vidljive oblasti elektromagnetnog spektra, zbog čega ni jedna od njih ne obuhvata određen opseg talasnih dužina. U naučnim krugovima se još uvek vodi polemika oko toga da li su siva, crna i bela boje ili samo prisustvo i odsustvo svetlosti, zbog čega se nazivaju još i akromatskim bojama. Zbog navedenog, siva se smatra nijansom između crne i bele [174].



Slika 5.11 Vidljiva oblast elektromagnetnog spektra [175]

U nastavku je dalje objašnjen izbor premaza i materijala, način pripreme, označavanje, merenje debljine premaza i površinske hrapavosti uzoraka, opisani su korišćeni uređaji, eksperimentalna postavka, metodologija i prikazani su rezultati ispitivanja emisivnosti premazanih metalnih površina.

5.2.1 Izbor premaza za ispitivanje uticaja debljine i vrste premaza na emisivnost metalnih površina

Za ispitivanje uticaja debljine i vrste premaza na emisivnost metalnih površina izabrana su dva dvokomponentna poliuretanska završna premaza za metale: TOP PUR AY na bazi akril-izocijanatnog veziva i TOP PUR PU na bazi poliestar-izocijanatnog veziva. Premazi su dobavljeni od proizvođača PICTURE u tri boje u nijansama prema RAL ton karti: RAL 3020 (nijansa crvene), RAL 5010 (nijansa plave) i 7040 (nijansa sive). Premazi su isporučeni sa posebnim očvršćivačima, razređivačima i pripadajućim tehničkim listovima.

TOP PUR AY je završni premaz za metale koji se koristi za zaštitu od korozije autobusa, cisterni, putničkih vagona, lokomotiva, mostova, releja, kranova, nadvodnih delova plovnih objekata, itd. Premaz je hemijski postojan, UV stabilan, ima veliku elastičnost, odlične mehaničke karakteristike i postojan je na temperaturi do 200 °C.

TOP PUR PU je završni premaz za metale koji se koristi za dugotrajnu zaštitu metalnih površina u enterijeru i eksterijeru, izloženih izrazito korozionim uslovima u industriji. Naročito se koristi se zaštitu putničkih vagona i lokomotiva, mostova, releja, cisterni, kamiona, konstrukcija u petrohemiji, nadvodnih delova plovnih objekata, itd. Premaz je hemijski postojan, UV stabilan, ima veliku pokrivnu moć, odlične mehaničke karakteristike i postojan je na temperaturi do 150 °C.

5.2.2 Izbor materijala za ispitivanje uticaja vrste metala na emisivnost premazanih metalnih površina

Za ispitivanje uticaja vrste metala na emisivnost premazanih metalnih površina izabrani su konstrukcioni čelik S275 i sivi liv GJL-200. Hemijski sastav konstrukcionog čelika S275 prikazan je u Tabeli 5.9. Konstrukcioni čelici se koriste u proizvodnji karakterističnih konstrukcijskih delova mašina i uređaja. Konstrukcioni čelik S275 pripada podgrupi čelika za noseće konstrukcije [176].

Tabela 5.9 Hemijski sastav konstrukcionog čelika S275

	Hemijski elementi										
	C	Si	Mn	S	Cr	P	Cu	Ni	Mo	V	W
Udeo u %	0,096	0,015	0,800	0,010	0,021	0,009	0,013	0,007	0,002	0,002	0,002

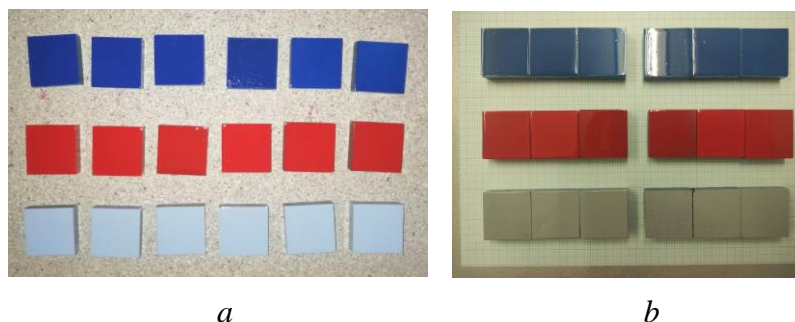
Sivi liv GJL-200 se zbog sposobnosti upijanja vibracija često koristi za izradu postolja mašini alatki za obradu rezanjem. Takođe, koristi se i za izradu statora elektromotora, grejnih tela (radijatora) i kočionih doboša motornih vozila. Hemijski sastav sivog liva GJL-200 prikazan je u Tabeli 5.10.

Tabela 5.10 Hemijski sastav sivog liva GJL-200

	Hemijski elementi					
	C	Si	Mn	S	Cr	P
Udeo u %	3,050	2,580	0,420	0,100	0,050	0,068

5.2.3 Priprema i oznake uzoraka

Za potrebe ispitivanja napravljeno po 19 uzoraka konstrukcionog čelika S275 i sivog liva GJL-200, dimenzija 30×30×10 mm. Na uzorcima je sa bočne strane izbušen otvor prečnika 2 mm i dubine 10 mm, kako bi se omogućilo merenje temperature uzorka termoparom prilikom zagrevanja. Uzorci su manjih dimenzija bi se lakše postigla ujednačenost debljine premaza. Po 1 uzorak konstrukcionog čelika S275 i sivog liva GJL-200 ostao je nepremazan. Kako su se uzorci premazivali sa 2 različita premaza, u 3 različite boje i sa 3 različite debljine premaza, to je ukupan broj premazanih uzoraka iznosio 36 (Slika 5.12).



Slika 5.12 Uzorci konstrukcionog čelika S275 i sivog liva GJL-200 premazani sa
a) TOP PUR AY premazom i b) TOP PUR PU premazom

Pre nanošenja premaza uzorci su pripremljeni prema zahtevima specificiranim u tehničkom listu. Uzorci su očišćeni od ulja, masnoće, prljavštine i brušeni vodobrusnim papirom različite granulacije (od P360 do P600), zbog čega nije bilo neophodno prethodno nanositi osnovni premaz. Premaz je zatim nanošen ručno pneumatskim pištoljem DELTALYO® DL-30, otvora dizne 1,4 mm i pritiskom od 4 bar (Slika 5.13). Uzorci su premazani prvo u sivoj, zatim u crvenoj i na kraju u plavoj boji. Premaz se ručno nanosio u jednom sloju na po 3 uzorka konstrukcionog čelika S275 i sivog liva GJL-200. Nakon sušenja prvog sloja premaza, premaz se nanosio u drugom sloju na 2 uzorka, da bi se nakon ponovnog sušenja naneo u trećem sloju na po 1 uzorku konstrukcionog čelika S275 i sivog liva GJL-200. Postupak je ponovljen za svaku boju premaza.



Slika 5.13 Pneumatski pištolj DELTALYO® DL-30

Drugi i treći sloj premaza nanet je 2 h nakon sušenja prethodnog premaza. Oznake uzoraka u zavisnosti od vrste premaza i metala, boje i broja sloja premaza su prikazani u Tabeli 5.11.

Tabela 5.11 Oznake uzoraka u zavisnosti od premaza i metala

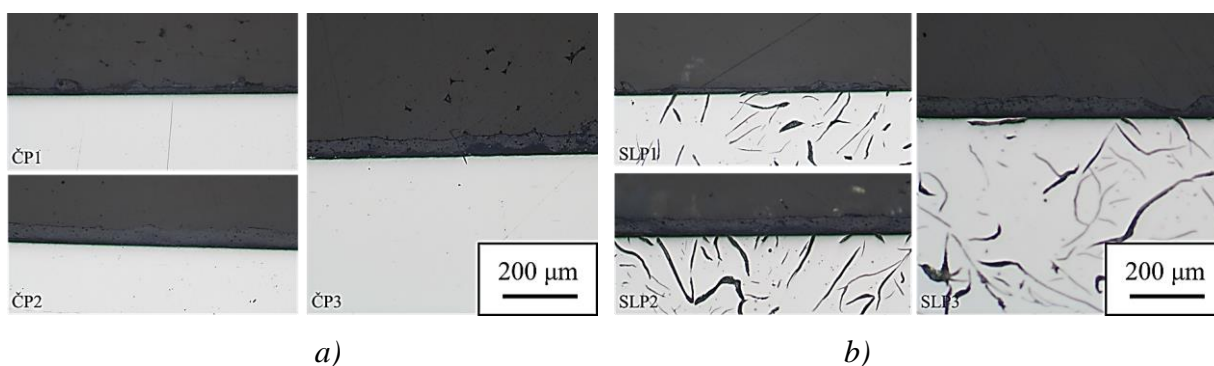
Vrsta premaza	Vrsta metala	Boja	Broj sloja premaza	Oznaka uzorka
AY	Konstrukcioni čelik S275	Siva	1	AYČS1
			2	AYČS2
			3	AYČS3
		Crvena	1	AYČC1
			2	AYČC2
			3	AYČC3
		Plava	1	AYČP1
			2	AYČP2
			3	AYČP3
	Sivi liv GJL-200	Siva	1	AYSLS1
			2	AYSLS2
			3	AYSLS3
		Crvena	1	AYSLC1
			2	AYSLC2
			3	AYSLC3
Plava	1	AYSLP1		
	2	AYSLP2		
	3	AYSLP3		
PU	Konstrukcioni čelik S275	Siva	1	PUČS1
			2	PUČS2
			3	PUČS3
		Crvena	1	PUČC1
			2	PUČC2
			3	PUČC3
		Plava	1	PUČP1
			2	PUČP2
			3	PUČP3
	Sivi liv GJL-200	Siva	1	PUSLS1
			2	PUSLS2
			3	PUSLS3
		Crvena	1	PUSLC1
			2	PUSLC2
			3	PUSLC3
Plava	1	PUSLP1		
	2	PUSLP2		
	3	PUSLP3		
/	Konstrukcioni čelik S275	/	/	NPČ
	Sivi liv GJL-200	/	/	NPSL

Oznake uzoraka su formirane tako da se prvi deo oznake odnosi na vrstu premaza (AY ili PU), drugi deo oznake se odnosi na vrstu metala (Č ili SL), treći deo oznake se odnosi na boju (S, C ili P), dok se četvrti deo oznake odnosi na broj nanetih slojeva premaza (1, 2 ili 3). Izuzetak su nepremazani uzorci konstrukcionog čelika S275 i sivog liva GJL-200, čije oznake su NPČ i NPSL, respektivno.

5.2.4 Merenje debljine premaza i površinske hrapavosti uzoraka

Metalografskim ispitivanjem izmerena je debljina premaza, d na uzorcima pomoću svetlosnog mikroskopa. Uzorci su pre ispitivanja sečeni, zatapani, brušeni i polirani tako da se izazovu najmanje mehaničke deformacije premaza. Uzorci su isečeni točilom sa vodenim hlađenjem na meru potrebnu da bi se mogli zatopiti. Zatapanje je bilo neophodno kako bi se očuvale ivice uzorka i da ne bi došlo do oštećenja premaza. Nakon zatapanja uzorci su gravirani, a zatim podvrgnuti brušenju i poliranju. Za brušenje se koristio vodobrusni papir, koji se prelivao vodom kako bi se uzorak hladio i sprečilo nagomilavanje produkata brušenja, tzv. mokro brušenje. Za brušenje je korišćena serija vodobrusnih papira različite granulacije (od P220 do P2000). Posle brušenja uzorci su mehanički polirani dijamantskom pastom. Cilj poliranja jeste da se što je moguće više uklone risevi i sloj zaostao nakon brušenja. Nakon poliranja uzorci su oprani vodom, isprani alkoholom i osušeni toplim vazduhom, odnosno fenom.

Mikrostruktura uzoraka ispitana je Leitz Orthoplan svetlosnim mikroskopom pri uvećanju 50 puta. Uzorci su fotografisani digitalnom kamerom povezanom sa računarom koja se nalazi u sklopu mikroskopa. Na fotografijama uzoraka primenom programa *Adobe Photoshop* podešen je kontrast sa ciljem jasnijeg prikazivanja granica između premaza i metalne površine. Na Slici 5.14a i 5.14b uporedno su prikazani uzorci konstrukcionog čelika S275 i sivog liva GJL-200 sa jednim, dva i tri sloja premaza TOP PUR AY plave boje.



Slika 5.14 Uporedni mikroskopski prikaz uzoraka sa plavim TOP PUR AY premazom:
a) konstrukcionog čelika S275 i b) sivog liva GJL-200

Sa Slike 5.14 se uočava da je veća ujednačenost debljine premaz postignuta nanošenjem drugog i trećeg sloja. Površinska hrapavost uzoraka izmerena je uređajem MarSurf PS1, opisanim u poglavlju 5.1.3. Za parametar je izabrana aritmetička površinska hrapavost, R_a o kojoj je ranije bilo reči u pomenutom poglavlju, s tim da zbog manjih dimenzija uzoraka u drugom delu eksperimenta, R_a je izmerena duž referentne linije, $l_t = 17,5$ mm. R_a uzoraka je izmerena pre i posle nanošenja premaza i prikazana je zajedno sa izmerenim debljinama premaza u Tabeli 5.12. Izuzetak su nepremazani uzorci, čija je površinska hrapavost izmerena samo jednom.

Tabela 5.12 Površinska hrapavost uzoraka, R_a i debljina premaza, d

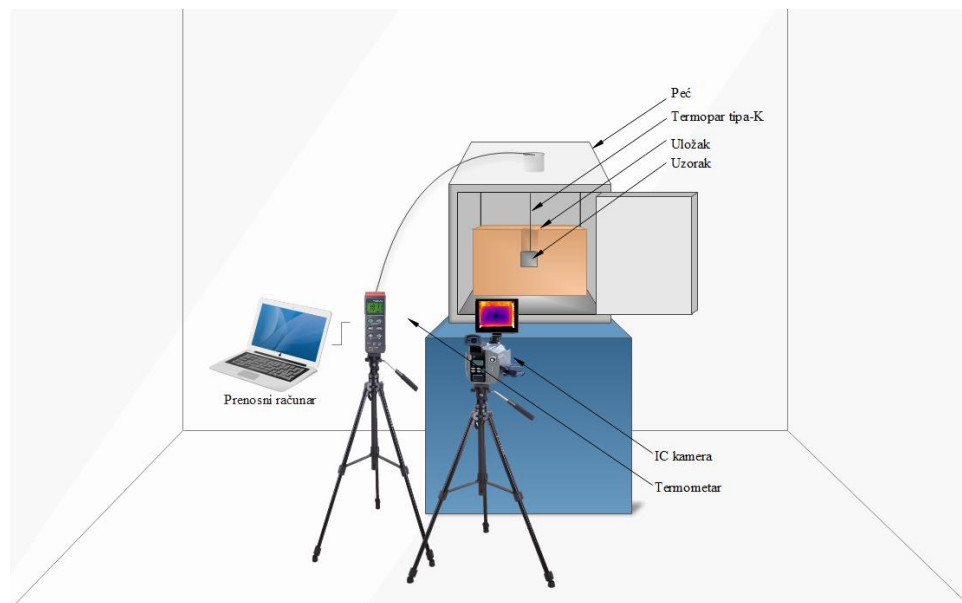
Oznaka uzorka	R_a [μm] (pre)	R_a [μm] (posle)	d [μm]
AYČS1	1,104	0,590	37,5
AYČS2	1,239	0,372	50
AYČS3	1,221	0,282	85
AYČC1	1,181	0,408	22,5
AYČC2	1,640	0,303	45
AYČC3	1,184	0,265	65
AYČP1	0,112	0,278	20
AYČP2	0,295	0,095	40
AYČP3	0,232	0,106	50
AYSLS1	1,166	0,311	40
AYSLS2	1,226	0,320	55
AYSLS3	1,406	0,268	85
AYSLC1	1,185	0,377	25
AYSLC2	1,189	0,278	42,5
AYSLC3	1,165	0,255	50
AYSLP1	0,412	0,549	20
AYSLP2	1,563	0,474	35
AYSLP3	0,296	0,189	45
PUČS1	1,324	0,523	20,0
PUČS2	1,269	0,402	46,0
PUČS3	1,241	0,412	52,0
PUČC1	1,311	1,438	35,0
PUČC2	1,672	0,233	47,0
PUČC3	1,213	0,302	60,0
PUČP1	1,242	0,408	24,0
PUČP2	1,315	0,325	33,9
PUČP3	1,262	0,426	43,0
PUSLS1	1,386	0,341	21,0
PUSLS2	1,256	0,355	31,2
PUSLS3	1,436	0,298	41,0
PUSLC1	1,415	1,227	33,0
PUSLC2	1,309	0,208	44,0
PUSLC3	1,295	0,385	61,0
PUSLP1	1,442	0,579	31,6
PUSLP2	1,493	0,404	42,0
PUSLP3	1,626	0,419	92,3
NPČ		0,462	/
NPSL		0,438	/

Iz Tabele 5.12 primećuje se da je površinska hrapavost uzoraka sa jednim premazom viša od površinske hrapavosti pre nanošenja premaza. Razlog tome je mala pokrivna moć premaza u jednom sloju, zbog čega se na površini uzorka formira neravnomeran sloj koji dovodi do povećanja površinske hrapavosti uzorka. Nanošenjem premaza u dva ili tri sloja snižava se površinska hrapavost uzorka, a debljina premaza, kako je prethodno rećeno, je ujednaćena. Za premaz TOP PUR AY postignuta debljina premaza nanetog u jednom sloju je od 20 μm do 40 μm , u dva sloja od 35 μm do 55 μm , dok je u tri sloja od 45 μm do 85 μm . Za premaz TOP PUR PU postignuta debljina premaza nanetog u jednom sloju je od 20 μm do 35 μm , u dva sloja od 31,2 μm do 47 μm , dok u tri sloja je od 41 μm do 92,3 μm .

S obzirom na to da su se premazi nanosili ručno prvo u sivoj, zatim u crvenoj i na kraju u plavoj boji, očekivano je da će postojati razlika u debljinama premaza, posmatrajući npr. samo prvi sloj premaza u svim bojama. Sa druge strane, kao što se iz Tabele 5.12 može primetiti, debljine premaza su vrlo slične kada se porede uzorci oba metala u istoj boji, pa tako debljina premaza TOP PUR AY sive boje sa jednim slojem premaza iznosi 37,5 μm za konstrukcioni čelik S275 i 40 μm za sivi liv GJL-200; sa dva sloja premaza iznosi 50 μm za konstrukcioni čelik S275 i 55 μm za sivi liv GJL-200; dok sa tri sloja premaza je ista za oba metala i iznosi 85 μm .

5.2.5 Opis uređaja i eksperimentalna postavka

Za ispitivanje emisivnosti konstrukcionog čelika S275 i sivog liva GJL-200 korišćena je eksperimentalna postavka opisana u poglavlju 5.1.4. Eksperimentalna postavka je prilagođena za ispitivanje emisivnosti manjih uzoraka, tako što se unutar peći postavi uložak od šamotne opeke sa specijalno napravljenim udubljenjem za uzorak. Šamotna opeka služila je kao izolator i omogućila stabilno zagrevanje uzorka bez naglog hlađenja prilikom otvaranja peći tokom snimanja IC slika. Ostatak eksperimentalne postavke, kao i korišćeni uređaji su isti kao kod prvog eksperimenta sa većim uzorcima. Izmenjena eksperimentalna postavka za ispitivanje premazanih metalnih površina prikazana je na Slici 5.15.



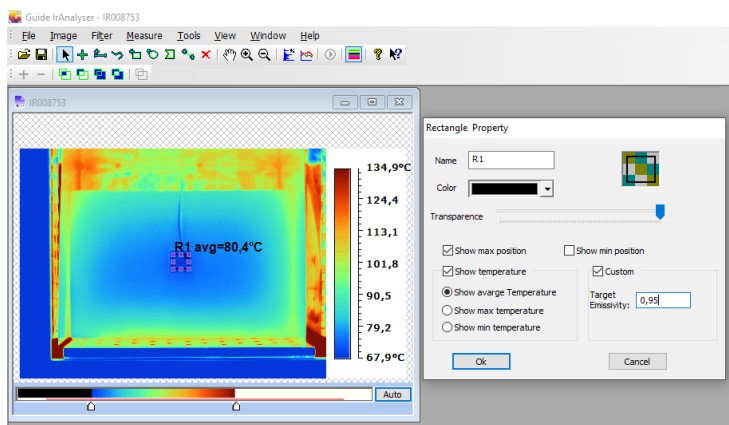
Slika 5.15 Eksperimentalna postavka za ispitivanje emisivnosti premazanih metalnih površina

5.2.6 Metodologija određivanja emisivnosti uzorka

Određivanje emisivnosti pripremljenih uzoraka sprovedeno je prema sledećoj metodologiji:

1. uzorak se postavlja u specijalno napravljeno udubljenje u šamotnoj opeci;
2. unutar uzorka se kroz izbušen otvor sa njegove gornje strane postavlja termopar;
3. uzorak se zagreva do temperature $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
4. pri svakom porastu temperature za $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ peć se otvara i snimaju se IC slike uzorka;
5. IC slike se analiziraju primenom programa *Guide IrAnalyser* i određuje se emisivnost uzorka.

Tokom eksperimenta uzorci su ispitivani pojedinačno, tako što su postavljeni u šamotnu opeku da bi se omogućilo njihovo ravnomerno zagrevanje. Merenje temperature sprovedeno je IC kamerom postavljenom na stalak u visini uzorka na udaljenosti 1 m od peći i termoparom tipa-K. Termopar je postavljen u uzorak kroz izbušen otvor sa njegove gornje strane. Provodnici termopara su sprovedeni kroz gornji otvor peći do termometra povezanog sa prenosnim računarom, tako da je merenje praćeno u realnom vremenu. Emisivnost uzorka je određena primenom programa *Guide IrAnalyser*. Na svakoj IC slici je izabrana oblast *R1* koja obuhvata samo reprezentativne delove površine uzorka (Slika 5.16). Emisivnost oblasti *R1* je podešavana od 0 do 1 dok se njena srednja temperatura ne izjednači sa temperaturom izmerenom termoparom.



Slika 5.16 Primer analize IC slike primenom programa *Guide IrAnalyser* uzorka AYČC1 ($T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$)

S obzirom na to da usled dimenzija uzoraka nije mogao biti postignut različit kvalitet površine (površinska hrapavost), emisivnost nepremazanih uzoraka je određena u zavisnosti od temperature samo radi poređenja sa emisivnošću premazanih uzoraka pri istoj temperaturi. U nastavku su prikazani uporedni rezultati ispitivanja emisivnosti konstrukcionog čelika S275 i sivog liv GJL-200 sa i bez premaza, posebno za premaz TOP PUR AY i premaz TOP PUR PU.

5.2.7 Rezultati ispitivanja emisivnosti konstrukcionog čelika S275 i sivog liva GJL-200

Kako bi se mogli porediti rezultati ispitivanja emisivnosti premazanih metalnih površina izrađenih od konstrukcionog čelika S275 i sivog liva GJL-200, prvo je ispitana emisivnost njihovih nepremazanih metalnih površina pod istim uslovima. Izbor opsega temperature u ovom delu eksperimenta bilo je uslovljeno uobičajenim temperaturama koje se javljaju kada su u pitanju premazane metalne površine mašina i proizvoda, a to je do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rezultati ispitivanja emisivnosti nepremazanih uzoraka konstrukcionog čelika S275 (NPČ) i sivog liva GJL-200 (NPSL) prikazane su u Tabeli 5.13. Kako su najčešće premazane metalne površine glatke⁵, površinska hrapavost nije uzeta u razmatranje kao parametar kod određivanja emisivnosti premazanih metalnih površina. Pored toga, uzorci su bili manjih dimenzija, te se nije mogla postići značajnija razlika u površinskoj hrapavosti uzoraka različitim režimima obrade.

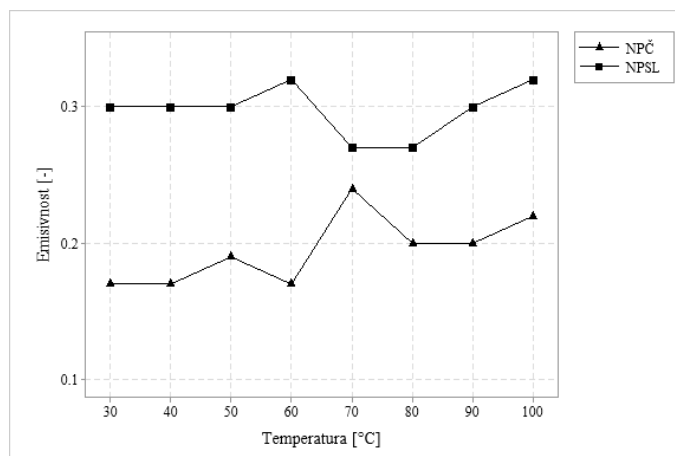
⁵ Glatkim površinama se smatraju površine male površinske hrapavosti.

Tabela 5.13 Emisivnost uzoraka NPČ i NPSL u zavisnosti od T

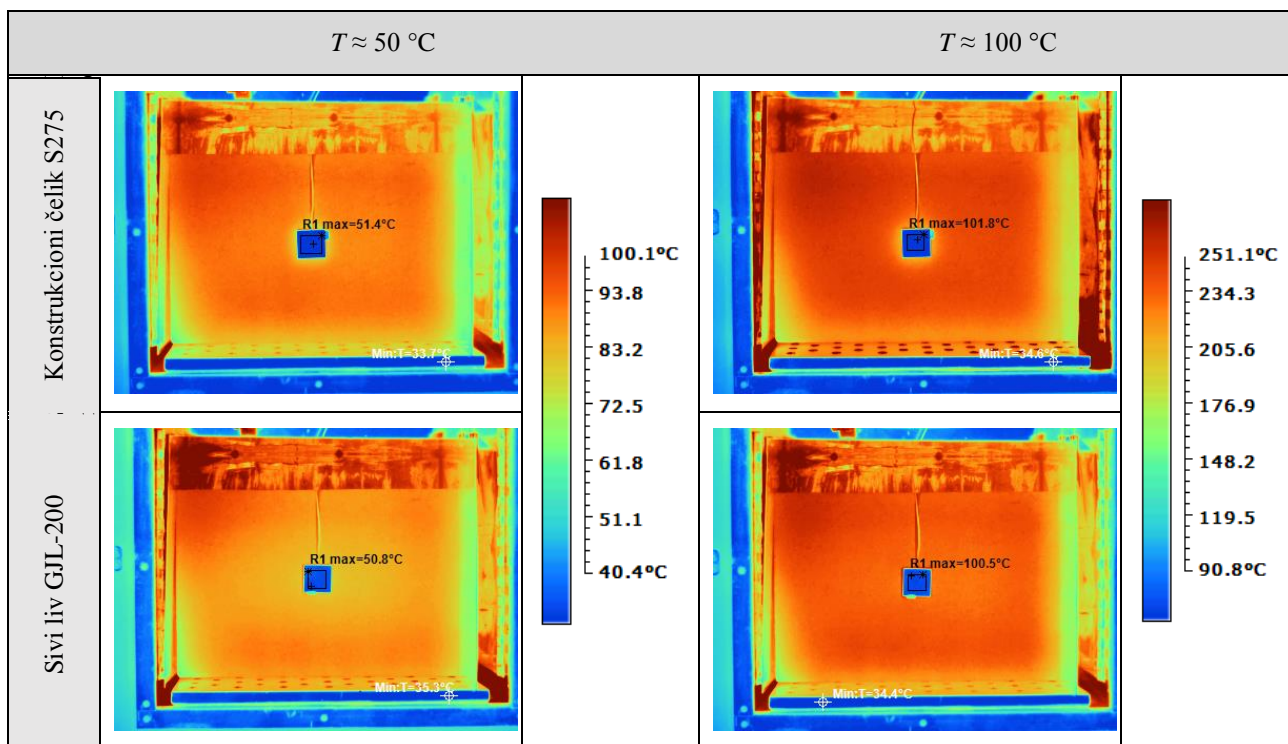
T [°C]	ε	
	NPČ	NPSL
30	0,17	0,30
40	0,17	0,30
50	0,19	0,30
60	0,17	0,32
70	0,24	0,27
80	0,20	0,27
90	0,20	0,30
100	0,22	0,32

Podaci iz Tabele 5.13 grafički su interpretirani i prikazani na Slici 5.17. Sa Slike 5.17 se uočava trend blagog porasta emisivnosti uzoraka sa temperaturom, s tim da je emisivnost sivog liva GJL-200 viša u odnosu na emisivnost konstrukcionog čelika S275. Emisivnost sivog liva GJL-200 se kreće u granicama od 0,30 do 0,32 dok je za konstrukcioni čelik S275 nešto niža i iznosi 0,17 do 0,22.

Emisivnost konstrukcionog čelika S275 opada sa porastom temperature u intervalu od 60 °C do 70 °C, dok emisivnost sivog liva GJL-200 opada sa porastom temperature u intervalu od 50 °C do 60 °C i od 70 °C do 80 °C. Ovo ukazuje na neustaljeni trend emisivnosti nepremazanih metalnih površina, zbog čega ona mora biti određena pre početka snimanja IC kamerom.

**Slika 5.17** Emisivnost uzoraka NPČ i NPSL u zavisnosti od temperature

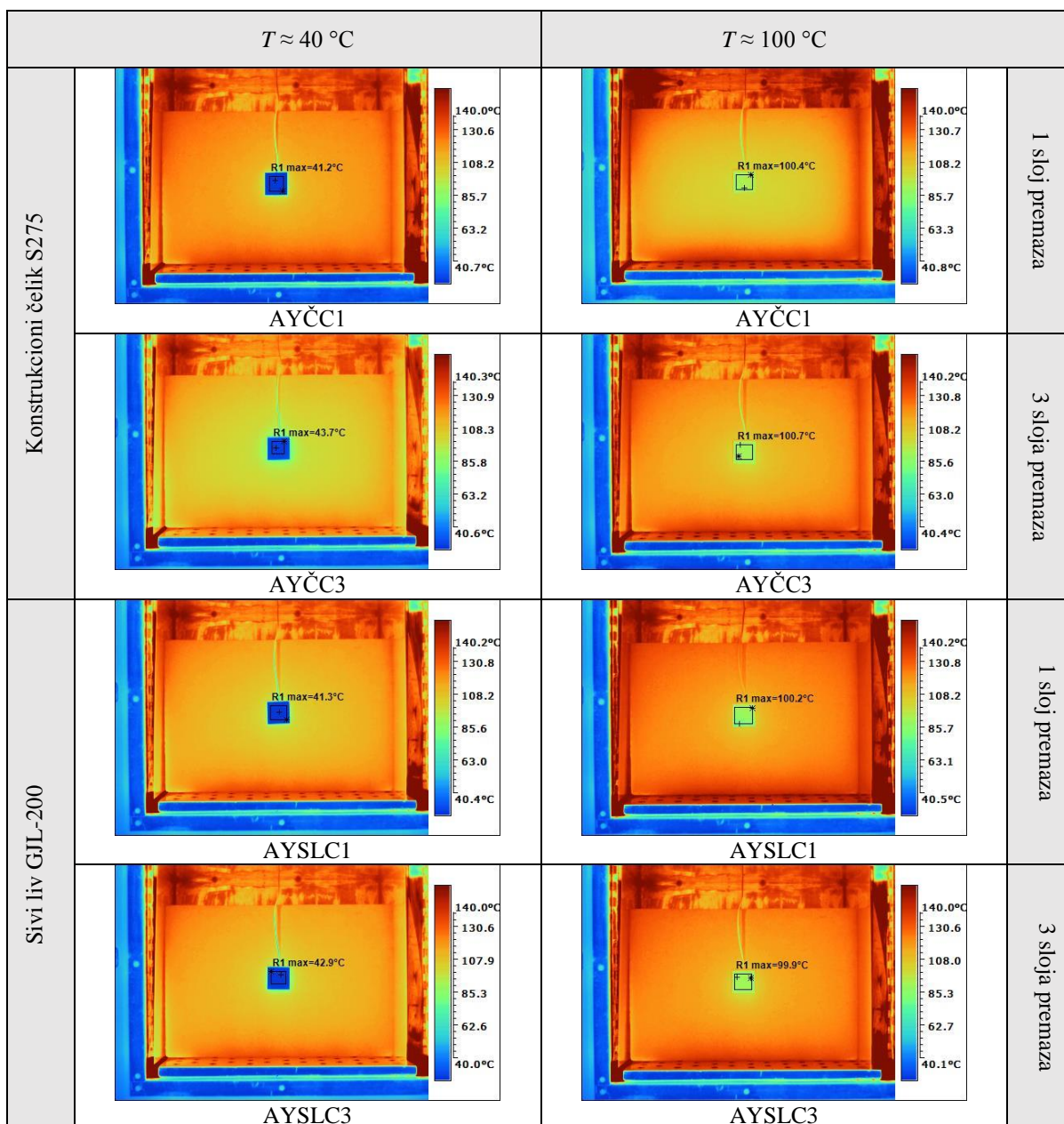
Na Slici 5.18 prikazane su IC slike nepremazanih uzoraka konstrukcionog čelika S275 (NPČ) i sivog liva GJL-200 (NPSL) temperature 50 °C i 100 °C. Na prikazanim IC slikama se uočava razlika u temperaturama između nepremazanih uzoraka i šamotne opeke, gde boje na uzorcima odgovaraju plavim nijansama na skali temperatura, a boje na šamotnoj opeci narandžastim i crvenim nijansama. Ukoliko se na IC slici nalaze materijali različite emisivnosti, raspodela boja na skali temperatura može odgovarati samo jednom materijalu, u ovom slučaju metalu od kojeg je izrađen uzorak. Kako je na IC slikama podešena emisivnost u odnosu na metale, ovo je za posledicu imalo prikaz znatno više temperature šamotne opeke. Stvarna temperatura šamotne opeke je oko 70 °C kada je temperatura uzoraka 50 °C i oko 150 °C kada je temperatura uzorka 100 °C.



Slika 5.18 IC slike uzoraka NPC i NPSL temperature 50 °C i 100 °C

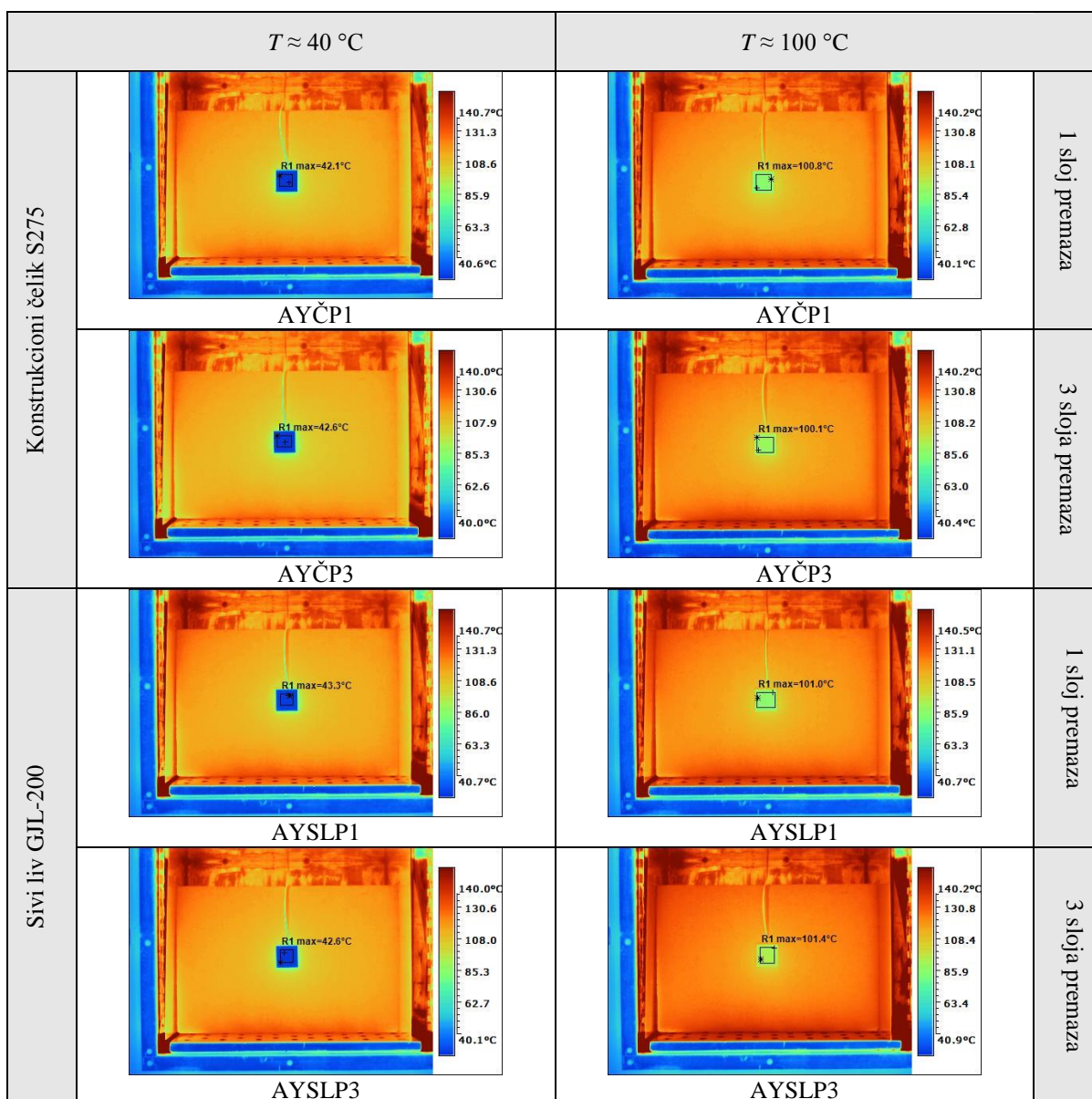
5.2.8 Rezultati ispitivanja emisivnosti uzoraka sa premazom TOP PUR AY

Da bi se osigurala uporedivost rezultata ispitivanja emisivnosti uzoraka konstrukcionog čelika 275 i sivog liva GJL-200 sa dva različita poliuretanska premaza ugao snimanja IC kamerom je morao biti isti. Razlog tome je što temperaturna skala koja se generiše prilikom IC snimanja odgovara rasponu najniže i najviše izmerene temperature na površini ne samo uzoraka, nego i dela peći, kao i šamotne opeke. Ove temperaturne skale se mogu podesiti primenom programa *Guide IrAnalyser* na približne vrednosti, ali ne mogu biti identične za sve IC slike, zbog čega se morala posvetiti posebna pažnja postavljanju IC kamere tako da se uticaj ugla snimanja eliminiše što je više moguće. Zbog velikog broja IC slika na Slici 5.19 predstavljene su samo IC slike uzoraka crvene boje, temperature 40 °C i 100 °C, sa jednim i sa tri sloja premaza. Uzorci temperature 40 °C su izabrani jer su ravnomernije zagrejani nego na 30 °C. Odstupanje između temperature izmerene IC kamerom i termoparovima tokom ispitivanja je bilo $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Svaka IC slika ima svoju skalu temperatura koje međusobno malo odstupaju, svega $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, zahvaljujući istom uglu snimanja IC kamerom tokom eksperimenta. Rezultati su pokazali da emisivnost uzoraka crvene boje ne zavisi od temperature, debljine premaza niti vrste metala. Emisivnost je tokom čitavog ispitivanja iznosila 0,95. Isto važi za plave i sive uzorke. Dakle, emisivnost premazanih metalnih površina sa premazom TOP PUR PU ne zavisi od vrste metala, debljine i boje premaza, niti temperature do 100 °C. Temperatura 100 °C je najviša temperaturu ispitivanja, iz razloga što se ispitivala emisivnost premaza za opštu namenu.



Slika 5.19 IC slike uzoraka sa premazom TOP PUR AY crvene boje

U cilju poređenja na Slici 5.20 prikazane su IC slike uzoraka plave boje, temperature $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, sa jednim i sa tri sloja premaza. Sa Slike 5.19 i Slike 5.20 se uočava razlika u bojama uzorka koje su u korespondenciji sa skalom temperatura. Odnosno, uzorci temperature $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ na IC slikama su prikazani u nijansama plave boje, dok su uzorci temperature $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ na IC slikama prikazani u nijansama zelene boje. Kako je emisivnost šamotne opeke približna emisivnosti premazanih metalnih uzoraka, njena boja takođe odgovara skali temperatura.

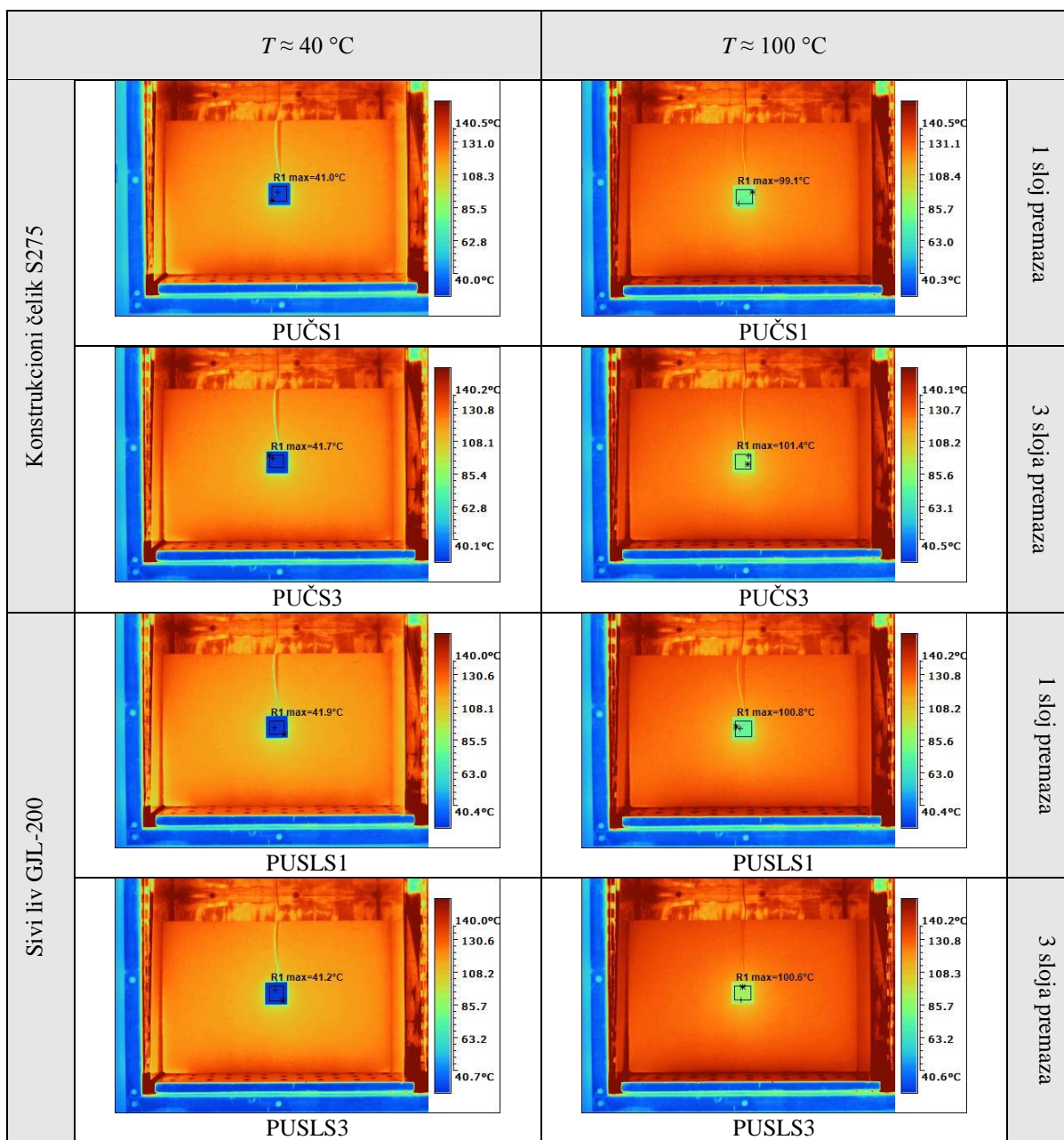


Slika 5.20 IC slike uzoraka sa premazom TOP PUR AY plave boje

Iz razloga što je ispitivanje pokazalo da emisivnost premaza TOP PUR AY ne zavisi od temperature, vrste metala, debljine i boje premaza, isto ispitivanje sprovedeno je za drugi premaz, TOP PUR PU. Rezultati ispitivanja emisivnosti uzoraka sa premazom TOP PUR PU su prikazani u nastavku.

5.2.9 Rezultati ispitivanja emisivnosti uzoraka sa premazom TOP PUR PU

Uporedivost rezultata ispitivanja emisivnosti uzoraka konstrukcionog čelika S275 i sivog liva GJL-200 sa dva različita poliuretanska premaza obezbeđena je podešavanjem istog ugla snimanja IC kamerom. Rezultati su pokazali da emisivnost uzoraka premazanih sa TOP PUR PU ne zavisi od temperature, debljine i boje premaza, niti vrste metala. Emisivnost je tokom čitavog ispitivanja iznosila 0,92. Zbog velikog broja IC slika na Slici 5.21 predstavljene su samo IC slike uzoraka sive boje, temperature 40 °C i 100 °C, sa jednim i sa tri sloja premaza.



Slika 5.21 IC slike uzoraka sa premazom TOP PUR PU sive boje

Uzorci sive boje su izabrani jer su uzorci crvene i plave boje ranije prikazani za premaz TOP PUR AY. Slično kao za prethodni premaz i ovde su prikazani uzorci temperature 40 °C jer su ravnomernije zagrejani nego na nižoj temperaturi. Najviša temperatura ispitivanja 100 °C izabrana je zbog toga što se ispitivala emisivnost premaza za opštu namenu. Odstupanje između temperature izmerene IC kamerom i termoparovima tokom ispitivanja je bilo ± 2 °C. Skale temperatura na IC slikama su se međusobno malo razlikovale, svega ± 1 °C.

Ispitivanje je potvrdilo da emisivnost premazanih metalnih površina ne zavisi od temperature, vrste metala, debljine i boje premaza, ali zavisi od vrste premaza. Ukoliko postoji razlika u emisivnosti sličnih premaza, kao što su TOP PUR AY i TOP PUR PU, može se zaključiti da postoji i razlika u emisivnosti između premaza koji se znatno razlikuju po svojim fizičkim i hemijskim svojstvima, kao što su emajl, lak, premazi za specijalne namene, itd. Iz tog razloga neophodno je odrediti emisivnost premazanih metalnih površina pre merenja temperature IC kamerom.

5.3 Ispitivanje emisivnosti metalnih površina od nerđajućeg čelika

Emisivnost nerđajućeg čelika posebno je ispitana zbog njegove široke primene za izradu radnih i dekorativnih površina bele tehnike i malih kućnih aparata, kao i osnovnog materijala za izradu postrojenja u procesnoj i prehrambenoj industriji. Izbor materijala, priprema i oznake uzoraka, merenje površinske hrapavosti, opis uređaja i eksperimentalne postavke, metodologija određivanja emisivnosti i rezultati ispitivanja su prikazani u nastavku.

5.3.1 Izbor materijala za ispitivanje emisivnosti metalnih površina od nerđajućeg čelika

Za ispitivanje emisivnosti izabrana su dva nerđajuća čelika: X2CrNi18-9 i X6Cr17.

Nerđajući čelik X2CrNi18-9 ima primenu u hemijskoj, prehrambenoj, automobilskoj, kao i u industriji mašingradnje. Odlikuje ga dobra otpornost na koroziju i odlična zavarljivost. Hemijski sastav nerđajućeg čelika X2CrNi18-9 prikazan je u Tabeli 5.14.

Tabela 5.14 Hemijski sastav nerđajućeg čelika X2CrNi18-9

	Hemijski elementi							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	N	Ni
Udeo u %	0,03	1,00	2,00	0,045	0,015	17,50 - 19,50	0,11	8,00 – 10,50

Nerđajući čelik X6Cr17 se koristi u automobilskoj industriji, zatim za izradu unutrašnjih površina vešmašina, mašina za sušenje veša, mašina za pranje sudova, sudopera, malih kućnih aparata i sl. Njegova primena je široka zbog odlične estetike i otpornosti na koroziju. Hemijski sastav nerđajućeg čelika X6Cr17 prikazan je u Tabeli 5.15.

Tabela 5.15 Hemijski sastav nerđajućeg čelika X6Cr17

	Hemijski elementi										
	C	Si	Mn	S	Cr	P	Cu	Ni	Mo	V	W
Udeo u %	0,096	0,015	0,800	0,010	0,021	0,009	0,013	0,007	0,002	0,002	0,002

5.3.2 Priprema i oznake uzoraka

Za potrebe ispitivanja emisivnosti napravljen je 1 uzorak nerđajućeg čelika X2CrNi18-9 dimenzija 30×30×10 mm i 1 uzorak nerđajućeg čelika X6Cr17 dimenzija 30×30×1 mm. Oznake uzoraka u zavisnosti od vrste nerđajućeg čelika i debljine uzorka prikazane su u Tabeli 5.16.

Tabela 5.16 Oznake uzoraka u zavisnosti od vrste nerđajućeg čelika i debljine uzorka

Vrsta nerđajućeg čelika	Debljina uzorka	Oznaka uzorka
X2CrNi18-9	10 mm	NRČ10
X6Cr17	1 mm	NRČ1

5.3.3 Merenje površinske hrapavosti uzoraka

Površinska hrapavost uzoraka izmerena je uređajem MarSurf PS1, opisanim u poglavlja 5.1.3. Za parametar je izabrana aritmetička površinske hrapavosti, R_a o kojoj je bilo reči u pomenutom poglavlju, s tim da zbog manjih dimenzija uzoraka u trećem delu eksperimenta, R_a je izmerena duž referentne linije, $l_t = 17,5$ mm (Tabela 5.17).

Tabela 5.17 Površinska hrapavost, R_a uzoraka

Oznake uzoraka	R_a [μm]
NRČ10	0,323
NRČ1	0,211

5.3.4 Opis uređaja i eksperimentalne postavke

Kako su u pitanju uzorci manjih dimenzija, korišćena je eksperimentalna postavka prikazana u poglavlju 5.2.5.

5.3.5 Metodologija određivanja emisivnosti uzoraka

Određivanje emisivnosti pripremljenih uzoraka sprovedeno je prema sledećoj metodologiji:

1. uzorak se postavlja u specijalno napravljeno udubljenje u šamotnoj opeci i na njega se sa prednje strane pričvršćuje termopar pomoću žive gume;
2. uzorak se zagreva do temperature ~ 220 °C;
3. peć se isključuje i otvara;
4. IC kamerom se snimaju IC slike uzorka za svaki pad temperature od 10 °C;
5. IC slike se analiziraju primenom programa *Guide IrAnalyser* i određuje se emisivnost uzorka.

Opisana metodologija predstavlja kombinaciju metodologija opisanih u poglavlju 5.1.5 za uzorke većih dimenzija i poglavlju 5.2.6 za uzorke manjih dimenzija. Razlog tome je to što kod uzoraka od nerđajućeg čelika nije ispitivan uticaj površinske hrapavosti na emisivnost, jer su u pitanju glatke metalne površine, te su mogli da se koriste uzorci manjih dimenzija, a samim tim i prilagođena eksperimentalna postavka. Na temperaturama višim od 100 °C uzorci nerđajućeg čelika su naglo hladili prilikom otvaranja peći. Kako bi se omogućio kontinuitet u snimanju IC slika tokom ispitivanja emisivnost se određivala kao u slučaju uzoraka većih dimenzija, tj. prilikom hlađenja.

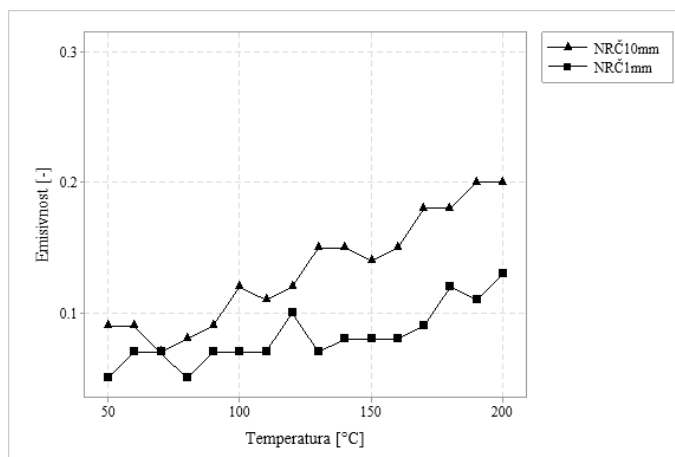
5.3.6 Rezultati ispitivanja emisivnosti nerđajućeg čelika X2CrNi18-9 i X6Cr17

Rezultati ispitivanja emisivnosti uzoraka nerđajućeg čelika X2CrNi18-9 (NRČ10) i X6Cr17 (NRČ1) prikazane su u Tabeli 5.18.

Tabela 5.18 Emisivnost uzoraka nerđajućeg čelika u zavisnosti od temperature

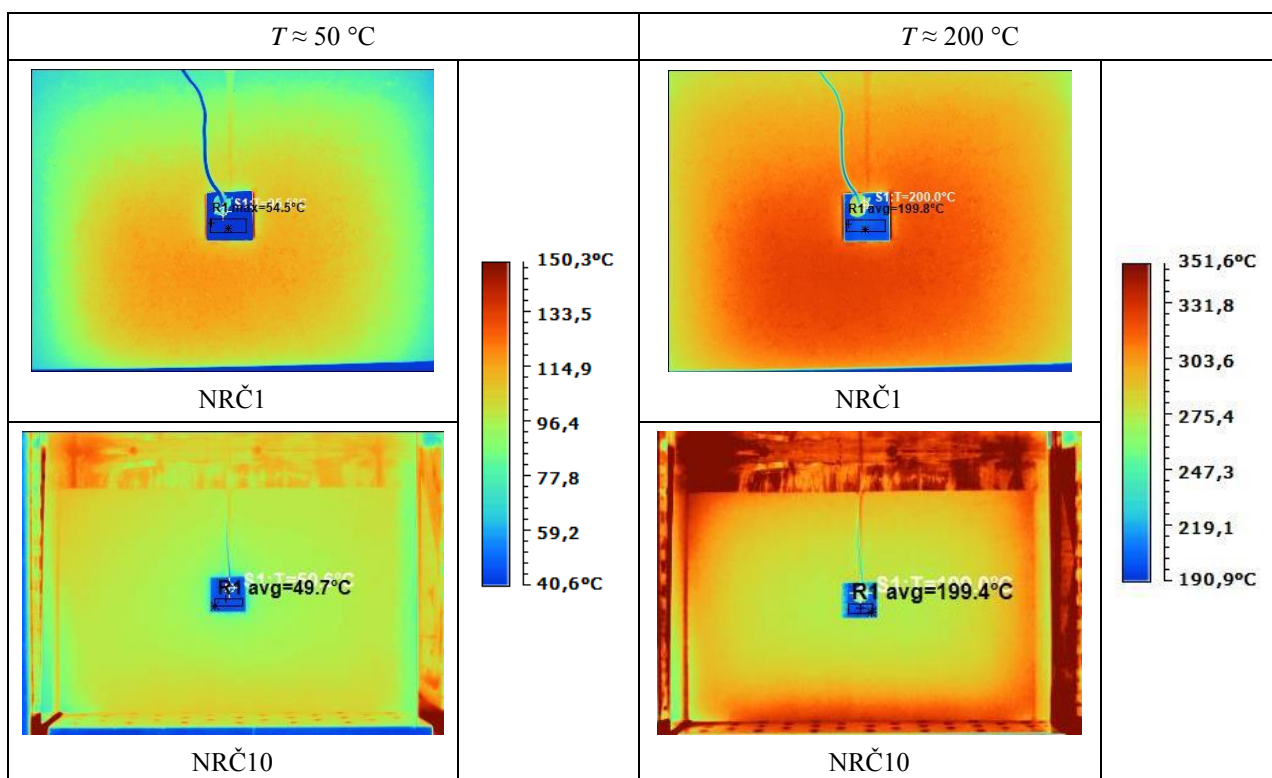
T [°C]	ε	
	NRČ10	NRČ1
50	0,09	0,05
60	0,09	0,07
70	0,07	0,07
80	0,08	0,05
90	0,09	0,07
100	0,12	0,07
110	0,11	0,07
120	0,12	0,10
130	0,15	0,07
140	0,15	0,08
150	0,14	0,08
160	0,15	0,08
170	0,18	0,09
180	0,18	0,12
190	0,20	0,11
200	0,20	0,13

Podaci iz Tabele 5.18 grafički su interpretirani i prikazani na Slici 5.22. Sa Slike 5.22 se uočava trend porasta emisivnosti uzoraka nerđajućeg čelika sa temperaturom. Emisivnost nerđajućeg čelika X2CrNi18-9 (NRČ10) se kreće u granicama od 0,09 do 0,20 dok je za nerđajući čelik X6Cr17 (NRČ1) niža i iznosi 0,05 do 0,13. Emisivnost nerđajućeg čelika X2CrNi18-9 opada sa porastom temperature u intervalu od 60 °C do 70 °C, zatim od 100 °C do 110 °C i od 140 °C do 150 °C, dok emisivnost nerđajući čelik X6Cr17 opada sa porastom temperature u intervalu od 70 °C do 80 °C, od 120 °C do 130 °C i od 180 °C do 190 °C. Rezultati ukazuju da postoji izvesna razlika u promeni emisivnosti sa temperaturom, čak i kod metala koji pripadaju istoj grupi, kao što su nerđajući čelici X2CrNi18-9 i X6Cr17.



Slika 5.22 Emisivnost uzoraka NRČ1 i NRČ10 u zavisnosti od temperature

Emisivnost uzorka nerđajućeg čelika debljine 10 mm je viša od emisivnosti uzorka nerđajućeg čelika debljine 1 mm. S obzirom na to da su u pitanju dva različita nerđajuća čelika, ne može se sa sigurnošću tvrditi da razlika u emisivnost potiče od debljine metala. Na Slici 5.23 prikazane su IC slike uzoraka nerđajućeg čelika X2CrNi18-9 (NRČ10) i X6Cr17 (NRČ1) temperature 50 °C i 100 °C.



Slika 5.23 IC slike uzoraka NRČ1 i NRČ10 temperature 50 °C i 100 °C

Na prikazanim IC slikama (Slika 5.23) uočava se razlika u temperaturama između uzoraka nerđajućeg čelika i šamotne opeke, gde boje na uzorcima odgovaraju plavim nijansama skale temperatura, a boje na šamotnoj opeci narandžastim i crvenim nijansama. Kao što je poznato, ako se na IC slici nalaze materijali različite emisivnosti, raspodela boja na skali temperatura može odgovarati samo jednom materijalu. Kako je na IC slikama podešena niska emisivnost u odnosu na nerđajući čelik, ovo je za posledicu imalo prikaz znatno više temperature šamotne opeke u odnosu na njenu stvarnu temperaturu. Stvarna temperatura šamotne opeke je oko 70 °C kada je temperatura nerđajućeg čelika 50 °C i oko 250 °C kada je temperatura nerđajućeg čelika 200 °C.

5.4 Zaključci i smernice za određivanje emisivnosti metalnih površina

S obzirom na obim eksperimentalnog ispitivanja emisivnosti metalnih površina u nastavku su sumarno izvedeni zaključci koji ujedno predstavljaju smernice za određivanje njihove emisivnosti:

1. U slučaju nepremazanih metalnih površina, izuzev ukoliko su u pitanju glatke nepremazane metalne površine, mogu se koristiti regresioni modeli i to za:
 - a. aluminijum AlSi1MgMn (jed. 5.3), odnosno: $\varepsilon = 0,000521 T + 0,08635 \bar{R}_a - 0,0520$;
 - b. konstrukcioni čelik S235 (jed. 5.4), odnosno: $\varepsilon = 0,000886 T + 0,03448 \bar{R}_a - 0,00078$;
 - c. mesing CuZn37 (jed. 5.5), odnosno: $\varepsilon = 0,000179 T + 0,02756 \bar{R}_a + 0,01615$.

Treba obratiti pažnju da se u ovom slučaju navedeni regresioni modeli mogu koristiti za temperature od 50 °C do 200 °C i površinske hrapavosti od 1,07 μm do 1,77 μm za aluminijum AlSi1MgMn, od 0,63 μm do 3,71 μm za konstrukcioni čelik S235 i od 1,23 μm do 3,92 μm za mesing CuZn37. Iz tog razloga neophodno je pre početka merenja temperature IC kamerom izmeriti površinsku hrapavost kontaktnim profilometrom i pomoću odgovarajućih jednačina odrediti emisivnost.

2. U slučaju da su u pitanju premazane metalne površine, emisivnost zavisi isključivo od premaza, a ne od temperature, debljine i boje premaza, kao ni od vrste metala od koje je izrađena metalna površina. Kako cilj ispitivanja nije bilo određivanje emisivnosti, nego uticaja navedenih faktora na emisivnost premaza, ona se za sve ostale premaze može odrediti nekom od *in situ* metoda određivanja emisivnosti IC kamerom opisanih u poglavlju 4.4.4.
3. U slučaju nepremazanih glatkih metalnih površina od nerđajućeg čelika emisivnost se može odrediti iz Tabele 5.18. U koloni NRČ10 prikazana je emisivnost nerđajućeg čelika u zavisnosti od temperature kada su u pitanju deblje metalne površine izrađene od nerđajućeg čelika, a u koloni NRČ1 prikazana je emisivnost nerđajućeg čelika u zavisnosti od temperature kada su u pitanju limene metalne površine.

Merenje temperature metalnih površina IC kamerom predstavlja samo jedan od koraka inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama. U narednom poglavlju je prikazana njena kompletna procedura sa detaljnijim objašnjenjima svake njene faze.

6. INOVATIVNA METODA PROCENE RIZIKA OD KTO IZAZVANIH VRUĆIM METALNIM POVRŠINAMA

Prethodna poglavlja predstavljaju osnovu za definisanje procedure inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama. Kako se standard EN ISO 13732-1:2006 odnosi podjednako na mašine i proizvode, takođe i inovativna metoda PR od KTO je primenjiva u oba slučaja, iako je akcenat u disertaciji stavljen na mašine sa aspekta bezbednosti i zdravlja na radu. Kako bi se omogućila kvantifikacija rizika od KTO neophodno je odrediti težinu KTO, koja je pored veličine vruće metalne površine uslovljena i graničnim uslovima za nastanak različitog stepena KTO. Načini određivanja težine KTO i graničnih uslova za nastanak različitog stepena KTO za metalne površine prikazani su u nastavku.

6.1 Određivanje težine KTO

Kao što je pomenuto u poglavlju 2.3.3, težina opekotina prema ABA zavisi od stepena opekotina, procenta opečene površine u odnosu na UPT i starosne grupe (Tabela 2.1) [35]. UPT zapravo predstavlja ukupnu površinu kože, koja je jedan od najvećih ljudskih organa, kako po veličini, tako i po masi. Primera radi kod odraslog muškarca masa kože se kreće od 6 do 10 kg. U proseku UPT kod odraslih osoba iznosi između $1,5 \text{ m}^2$ i 2 m^2 , dok je kod novorođenčadi UPT niža i iznosi između $0,2 \text{ m}^2$ i $0,3 \text{ m}^2$ [177]. S obzirom na razlike u konstituciji kod odraslih osoba, a naročito u pogledu pola, teško je precizirati prosečnu UPT. Među istraživačima se još uvek vodi polemika da li je najčešće korišćena vrednost za UPT od $1,73 \text{ m}^2$ reprezentativna. Buchkremer i Segerer su 2021. godine sproveli istraživanje na preko 5.000 muškaraca i isto toliko žena, starijih od 20 godina i zaključili su da je prosečna UPT kod muškaraca $2,05 \text{ m}^2$, dok je kod žena prosečna UPT niža i iznosi $1,80 \text{ m}^2$ [178]. Za potrebe procene rizika od KTO smatraće se da je prosečna UPT kod odraslih osoba $1,73 \text{ m}^2$, jer pored toga što većina istraživača koristi ovaj podatak, on je i dalje dosta niži u odnosu na prethodno pomenuto istraživanje i može se uzeti za najniži kriterijum. S tim u vezi, ukoliko se izračuna odgovarajući procentualni udeo, prema Tabeli 2.1, od prosečne UPT od $1,73 \text{ m}^2$, dobijaju se veličine opečene površine u m^2 koje u zavisnosti od stepena KTO mogu dovesti do nastanka lake, srednje ili teške KTO. S obzirom na to da je težina opekotina prema Tabeli 2.1 definisana prema starosnim grupama, mora se uzeti u obzir da stari pripadaju starosnoj grupi preko 50 godina i da su još uvek radno sposobni, te je neophodno objediniti kriterijume za odrasle, sa jedne strane i decu mlađu od 10 godina i starije od 50 godina, sa druge strane. Iz Tabele 2.1 sledi da su:

1. Lake opekotine:
 - a. opekotine I stepena, bez obzira na procenat opečene površine;
 - b. opekotine II stepena, u slučaju kada je zahvaćeno manje od 5% UPT;
 - c. opekotine III stepena, u slučaju kada je zahvaćeno manje od 2% UPT.

2. Srednje opekotine:
 - a. opekotine II stepena, u slučaju kada je zahvaćeno od 5% do 10% UPT;
 - b. opekotine III stepena, u slučaju kada je zahvaćeno od 2% do 5% UPT.
3. Teške opekotine:
 - a. opekotine II stepena, u slučaju kada je zahvaćeno više od 10% UPT;
 - b. opekotine III stepena, u slučaju kada je zahvaćeno više od 5% UPT.

Kako je već rečeno, izračunavanjem odgovarajućih procentualnih udela od prosečne UPT kod odraslog čoveka od $1,73 \text{ m}^2$ dobijaju se veličine opečene površine u m^2 koje u zavisnosti od stepena opekotina definišu njenu težinu, odnosno:

1. Lake KTO su:
 - a. KTO I stepena, bez obzira na veličinu opečene površine;
 - b. KTO II stepena, u slučaju kada je opečena površina manje od $0,0865 \text{ m}^2$;
 - c. KTO III stepena, u slučaju kada je opečena površina manje od $0,0346 \text{ m}^2$.
2. Srednje KTO su:
 - a. KTO II stepena, u slučaju kada je veličina opečena površine od $0,0865 \text{ m}^2$ do $0,173 \text{ m}^2$;
 - b. KTO III stepena, u slučaju kada je veličina opečena površine od $0,0346 \text{ m}^2$ do $0,0865 \text{ m}^2$.
3. Teške KTO su:
 - a. KTO II stepena, u slučaju kada je opečena površine veća od $0,173 \text{ m}^2$;
 - b. KTO III stepena, u slučaju kada je opečena površine veća od $0,0865 \text{ m}^2$.

Veličina opečene površine je kod KTO uslovljena veličinom vruće površine, koja se takođe može izraziti u m^2 . Odnosno, ako je poznato da I stepen KTO bez obzira na veličinu opečene površine, predstavlja po težini laku KTO, to znači da sve vruće površine kod kojih postoji rizik od nastanka I stepen KTO bez obzira na svoju veličinu, mogu dovesti samo do lake KTO, itd. Na ovaj način se mogu definisati kriterijumi za težinu KTO u zavisnosti od stepena KTO i veličine vruće površine, P (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 Težina KTO u zavisnosti od stepena KTO i veličine vruće površine, $P[\text{m}^2]$

Stepen KTO	Težina KTO		
	Lake	Srednje	Teške
I	sve KTO I stepena	–	–
II	$P < 0,0865 \text{ m}^2$	od $0,0865 \text{ m}^2$ do $0,173 \text{ m}^2$	$P > 0,173 \text{ m}^2$
III	$P < 0,0346 \text{ m}^2$	od $0,0346 \text{ m}^2$ do $0,0865 \text{ m}^2$	$P > 0,0865 \text{ m}^2$

Radi lakše interpretacije rezultata iz Tabele 6.1, površina od $0,0346 \text{ m}^2$ približno odgovara kvadratu stranica 190 mm , površina od $0,0865 \text{ m}^2$ približno odgovara kvadratu stranica 300 mm , a površina od $0,173 \text{ m}^2$ približno odgovara kvadratu stranica 420 mm . Za potrebe procene rizika od KTO izazvanih vrućim površinama, a po uzoru na matrične metode prikazane u poglavlju 3.1 formirana je matrica za određivanje težine KTO, gde su lake KTO označene zelenom bojom, srednje KTO žutom bojom, a teške KTO crvenom bojom u zavisnosti od stepena KTO i veličine vruće površine, P (Tabela 6.2).

Tabela 6.2 Matrica za određivanje težine KTO u zavisnosti od stepena KTO i veličine vruće površine, $P[m^2]$

Veličina površine $P [m^2]$	Stepen KTO		
	I	II	III
< 0,0346	Lake KTO	Laka KTO	Laka KTO
0,0346 – 0,0865		Srednja KTO	Srednja KTO
0,0865 – 0,173		Teška KTO	Teška KTO
> 0,173			

Korišćenjem matrice moguće je odrediti težinu KTO ukoliko je poznata veličina površine, kao i granični uslovi za nastanak I, II i III stepena KTO, a koji su definisani u narednom poglavlju.

6.2 Definisane graničnih uslova za KTO za metalne površine







U poglavlju 2.4 prikazano je aktuelno stanje u oblasti graničnih uslova za nastanak KTO za metalne površine. Kako bi se svi relevantni podaci iz ovog poglavlja objedinili, neophodno ih je interpretirati na jedinstven način, naročito u pogledu klasifikacije opekotina prema stepenima. Iz razloga što ABA koristi pojednostavljeni sistem klasifikacije opekotina na I, II i III stepen, podaci o stepenima opekotina su interpretirani tako da su opekotine IIa i IIb stepena objedinjene kao II stepen KTO, a opekotine III i IV stepena, kao III stepen KTO. Cilj jeste formiranje tabele sa svim graničnim uslovima za koje postoje podaci o stepenu KTO, kako bi se deduktivnim načinom zaključivanja definisali granični uslovi za nastanak I, II i III stepena KTO za metalne površine. Podaci o graničnim uslovima za nastanak I stepena KTO izazvanih vrućim metalnim površinama su preuzeti iz standarda EN ISO 13732-1:2006 (Tabela 6.3).

Tabela 6.3 Granični uslovi za nastanak I stepena KTO za nepremazane metalne površine [11]

D_{KTO}	$T_{KTO} [^{\circ}C]$
0,5 s	67 - 73
1 s	65 - 70
2 s	61 - 66
3 s	60 - 65
4 s	59 - 63
5 s	58 - 62
6 s	57,5 - 61,5
7 s	57 - 61
8 s	56 - 60
9 s	55 - 59
10 s	54 - 58
1 min	51
10 min	48
8 h	43

Prema standardu EN ISO 13732-1:2006 voda i nepremazane metalne površine imaju iste granične uslove, koji su za periode kontakta do 10 s prikazani na Slici 2.7, a za periode kontakta 1 min i duže u Tabeli 2.4. Temperature za nastanak I stepena KTO pri periodu kontakta 10 s i kraće su zbog brojnih nesigurnosti u njihovom određivanju prikazani kao rasponi temperatura i zajedno sa podacima za periode kontakta 1 min i duže iz Tabele 2.4 su jednostavnije interpretirani u Tabela 6.3.

Uzevši u obzir diskusiju o graničnim uslovima za vodu i metalne površine iz poglavlja 2.4.3, kao i to da ih i standard EN ISO 13732-1:2006 poistovećuje, smatraće se da su usled nedostatka relevantnih istraživanja u ovoj oblasti granični uslovi pri kojima nastaje različit stepen KTO isti za vodu i metalne površine. Da bi se uočila veza između rezultata relevantnih istraživanja u oblasti KTO i standarda, formirana je tabela koja je zbog svog obima prikazana u Prilogu 3. Prilog 3 obuhvata T_{KTO} od 43 °C do 200 °C i D_{KTO} od 0,5 s do 8 h, gde su stepeni KTO u zavisnosti od reference označeni bojama na sledeći način:

-  stepeni KTO prema standardu EN ISO 13732-1:2006 [11] (Tabela 6.3);
-  stepeni KTO prema Moritz i Henriques, istraživanje na svinjskoj koži [40] (Tabela 2.9);
-  stepeni KTO prema Moritz i Henriques, istraživanje na ljudskoj koži [40] (Tabela 2.3);
-  stepeni KTO prema istraživanju Christine Andrews [65] (Tabela 2.10);
-  stepeni KTO prema istraživanju Ye i De [58] (Tabela 2.11);
-  stepeni KTO prema istraživanju Singera i dr. [179].

U radu [179] se navodi da III stepen KTO nastaje pri temperaturama 70 °C i 90 °C za period kontakta 30 s i pri 100 °C za period kontakta od 10 s do 30 s. Ovi podaci se odnose na istraživanja Singera i dr. [179] koji su pomenuti u istraživanju Christine Andrews [65], ali nisu konkretno navedeni u ovom obliku, te se takođe moraju uzeti u obzir. Iz Priloga 3 se vidi da su rezultati istraživanja Moritz i Henriques [40] sprovedena na svinjskoj i ljudskoj koži u dobroj korelaciji, čime je potvrđeno da svinjska i ljudska koža na sličan način reaguju na termičke povrede. Takođe, postoji sličnost između njihovih istraživanja gde su nanošene oparotine i podataka za nepremazane metalne površine prikazanih u standardu EN ISO 13732-1:2006, čime se još jednom može opravdati usvajanje istih graničnih uslova za oparotine i KTO izazvane vrućim metalnim površinama.

U Prilogu 3 plava oblast označava granične uslove pri kojima sigurno neće doći do nastanka KTO. Ovo su svi periodi kontakta koji su prema istraživanjima Moritz i Henriques [40] kraći od D_{KTO} potrebnog da na određenoj T_{KTO} dođe do prvih promena, bilo na svinjskoj ili ljudskoj koži, kao i svi periodi kontakta prema EN ISO 13732-1:2006 pri kojima sigurno neće doći do nastanka I stepena KTO. Rasponi temperatura iz Tabele 6.3 pri kojima može, ali ne mora doći do nastanka I stepena KTO pri određenom D_{KTO} , se smatraju graničnim uslovima za nastanak I stepena KTO i zajedno sa preostalim podacima iz pomenute tabele su označeni zelenom bojom u Prilogu 3.

Kod definisanja graničnih uslova za nastanak I stepena KTO postoje dva problema. Prvi problem se odnosi na temperaturu 47 °C gde je navedeno da II stepen KTO nastaje za 18 min, I stepen KTO za 20 min i II stepen KTO za 25 min. S obzirom na to da je u pitanju isto istraživanje i posmatrajući druge bliske granične uslove, smatraće se da za 18 min nastaje, takođe, I stepen KTO, dok II stepen KTO nastaje tek nakon 25 min. Drugi problem se odnosi na temperaturu 55 °C, gde prema Moritz i Henriques [40] za 5 s nastaje I stepen KTO, što je kraći period kontakta od propisanog standardom od 9 s. Posmatrajući bliske podatke iz Priloga 3, za temperaturu 55 °C smatraće se da period kontakta iznosi 9 s za nastanak I stepena KTO.

Usled nedostatka relevantnih podataka o stepenima KTO za sve granične uslove prikazane u Prilogu 3, sivom bojom su označeni pretpostavljeni stepeni KTO do kojih se došlo vodeći se time da

što su metalne površine toplije pri istom periodu kontakta doći će do nastanka većeg stepena KTO i što je duži period kontakta pri istim temperaturama, takođe će doći do nastanka većeg stepena KTO. Ovo znači da ako postoji podatak da na 70 °C za 0,5 s nastaje II stepen KTO, onda za period kontakta 0,5 s za temperature više od 70 °C može nastati samo II ili eventualno III stepen KTO, ako za to postoji podatak. Ako prema postojećim podacima se na 70 °C za period kontakta 30 s prvi put javlja III stepen KTO, to implicira da na istoj temperaturi za sve periode kontakta kraće od 30 s važi da dovode do nastanka II stepena KTO, a da svi periodi kontakta duži od 30 s dovode do nastanka III stepena KTO. Neki od primera su sledeći: ako za period kontakta 10 s na 58 °C i 60 °C nastaje II stepen KTO, onda je očekivano da za isti period kontakta i na 59 °C nastane II stepen KTO; ako na 46 °C postoji podatak da za 45 min i za 1 h nastaje I stepen KTO, onda je očekivano da za sve periode kontakta između 45 min i 1 h pri istoj temperaturi dođe do nastanka I stepen KTO, itd. Ako prema podacima na 46,5 °C za 45 min nastaje I stepena KTO, a za 1 h nastaje II stepena KTO, smatra se da za sve periode kontakta između 45 min i 1 h nastaje viši, odnosno II stepena KTO, zbog uzimanja u obzir uvek najtežeg mogućeg slučaja. Dakle, za 50 min na 46,5 °C nastaje II stepen KTO. Na mestima gde se pri istim graničnim uslovima javlja različit stepen KTO, usvaja se viši, kao npr. kod 48 °C za 14 min gde se javlja I i II stepen KTO, usvaja se II stepen KTO. Zbog nedostatka podataka, kao i zbog usvajanja višeg stepen KTO, postoje periodi kontakta, npr. 8 min, gde nije definisano kada nastaje I stepen KTO. Pretpostavlja se da on nastaje na prvoj nižoj temperaturi od one gde se prvi put javlja II stepen KTO, te se ovaj princip primenio i za sve slične slučajeve. Pretpostavljeni stepeni KTO su u tabeli iz Priloga 3 označeni sivom bojom.

Najniža T_{KTO} na kojoj se prvi put javlja III stepen KTO iznosi 70 °C za 30 s, a najkraći period kontakta potreban za nastanak III stepena KTO je 10 s pri temperaturi 100 °C. Ovo znači da granični uslovi gde je T_{KTO} viša od 70 °C, a D_{KTO} duži od 20 s, kao i granični uslovi gde je T_{KTO} viša od 100 °C, a D_{KTO} duži od 10 s, dovode do nastanka III stepena KTO (crvena oblast u Prilogu 3). Definisanjem graničnih uslova za I i III stepen KTO, preostali deo Priloga 3 se odnosi na granične uslove za nastanak II stepena KTO (žuta oblast u Prilogu 3). Međutim i ovde je došlo do izvesnih nedoumica. Prvo, za temperature do 70 °C ne postoji podaci o nastanku III stepen KTO pri dužim periodima kontakta, npr. 5h. S obzirom na to da se III stepen KTO u istraživanjima prvi put javlja tek na 70 °C, smatraće se da T_{KTO} do 70 °C dovode do nastanka najviše II stepena KTO. Drugo, na temperaturama od 75 °C do 100 °C postoje podaci da se II stepen KTO javlja nakon perioda kontakta 1 s, te će se smatrati da pri periodu kontakta 0,5 s za navedene temperature isto dolazi do II stepena KTO. Treće, postoji neslaganje između podataka iz standardu EN ISO 13732-1:2006 [11] i istraživanja Moritz i Henriques [40] za temperature između 60 °C i 67 °C. Prema njihovim istraživanjima za svinjsku i ljudsku kožu II stepen KTO nastaje na 60 °C nakon 5 s, što znači da pri istom periodu kontakta na višim temperaturama mora nastati isti ili viši stepen KTO, dok standard definiše da je ovo I stepen KTO. Kako su do sada podaci iz standarda i rezultati istraživanja Moritz i Henriques bila u dobroj korespondenciji, daće se prednost istraživanju Moritz i Henriques. Ovo važi i za T_{KTO} više od 65 °C za period kontakta 2 s, jer ako na 65 °C za isti period kontakta nastaje II stepena KTO, mora i na višoj temperaturi biti isti stepen KTO.

Kako bi se pojednostavila tabela iz Priloga 3 u Tabeli 6.4 su prikazani granični uslovi za nastanak I, II i III stepena KTO za metalne površine, predstavljeni samo bojama za temperature od 43 °C do 200 °C.

Tabela 6.4 Granični uslovi za nastanak I, II i III stepena KTO za metalne površine do 200 °C

D_{KTO}	T_{KTO} [°C]																									
	43	44	45	46	46,5	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	57,5	58	59	60 - 65	65 - 67	67 - 70	70 - 80	80 - 100	100 - 200	
0,5 s																										
1 s																										
2 - 4 s																										
4 s																										
5 s																										
6 s																										
7 s																										
8 s																										
9 s																										
10 s																										
11 - 20 s																										
20 s																										
21 - 30 s																										
30 - 45 s																										
45 s - 1 min																										
1 - 3 min																										
3 - 5 min																										
5 - 8 min																										
8 - 10 min																										
10 - 14 min																										
14 - 25 min																										
25 - 45 min																										
45 - 50 min																										
50 - 90 min																										
90 min - 3 h																										
3 h - 6 h																										
6 h - 8 h																										

U Tabeli 6.4 su objedinjeni granični uslovi pri kojima nastaje isti stepen KTO. Prema Tabeli 6.4 I stepen KTO nastaje već na temperaturi 43 °C nakon 6 h, što nije neočekivano s obzirom na to da prema Hardy i dr. najniža temperatura za osećaj bola iznosi 42,2 °C [68]. Najniža temperatura za nastanak II stepena KTO iznosi 44 °C za period kontakta 6 h, dok najkraći period kontakta iznosi 0,5 s za temperaturu 70 °C. Najniža temperatura za nastanak III stepena KTO iznosi 70 °C za period kontakta 30 s, dok pri temperaturi 100 °C najkraći period kontakta iznosi 10 s. Treba uzeti u obzir da se deo Tabele 6.4 za periode kontakta 10 s i kraće odnosi na nepremazane metalne površine, a da je za premazane metalne površine neophodno uvećati T_{KTO} u skladu sa vrstom i debljinom premaza, na način opisan u poglavlju 2.4.2. S tim u vezi formirana je Tabela 6.5 u skladu sa Slikom 2.8 i Slikom 2.9. Primera radi, ukoliko se inovativna metoda PR od KTO sprovodi za metalne površine premazane lakom debljine 150 μm , u slučaju usvajanja perioda kontakta od 4 s uvećanje T_{KTO} iz Tabele 6.4 iznosi 8 °C. To znači da nepremazane metalne površine prema Tabeli 6.4 za 4 s dovode do I stepena KTO pri 59 °C i do II stepena KTO pri 65 °C, dok metalne površine premazane debljim slojem laka dovode do I stepena KTO za 4 s pri 67 °C i do II stepena KTO za 4 s pri 73 °C u skladu sa povećanjem T_{KTO} za 8 °C prema Tabeli 6.5.

Tabela 6.5 Uvećanje T_{KTO} u [$^{\circ}C$] za premazane metalne površine

Vrsta premaza	d [μm]	D_{KTO} [s]										
		0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lak	50	13	10	7	5	3,5	2	1,5	1	0,5	0,5	0
	100	22	18	12	8,5	6	4	2,5	2	1	0,5	0
	150	31	25	17,5	12	8	6	4	2,5	2	1,5	0,5
Emajl	160	6	5	4	3	2,5	2	1,5	1	1	1	0,5
Praškasti premaz	60	6	5	4	3	2,5	2	1,5	1	1	1	0,5
	90	11	9	6	5	4	3	2,5	2	1,5	1	0,5
Poliamid (PA 11 i PA12)	400	35	27,5	22	18	15	12,5	11	9	8	6	5

S obzirom na to da prema standardu EN ISO 13732-1:2006 za period kontakta 1 min i duže nema razlike između premazanih i nepremazanih metalnih površina, a nakon 10 min i duže ni između vrućih površina izrađenih od različitih materijala, granični uslovi za nastanak I, II i III stepena KTO se za period kontakta 1 min i duže mogu primeniti za procenu rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama, bez obzira na premaz, a granični uslovi gde je period kontakta 10 min i duže i za sve vruće površine, bez obzira na vrstu materijala od kojeg su izrađene.

6.3 Procedura inovativne metode procene rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama

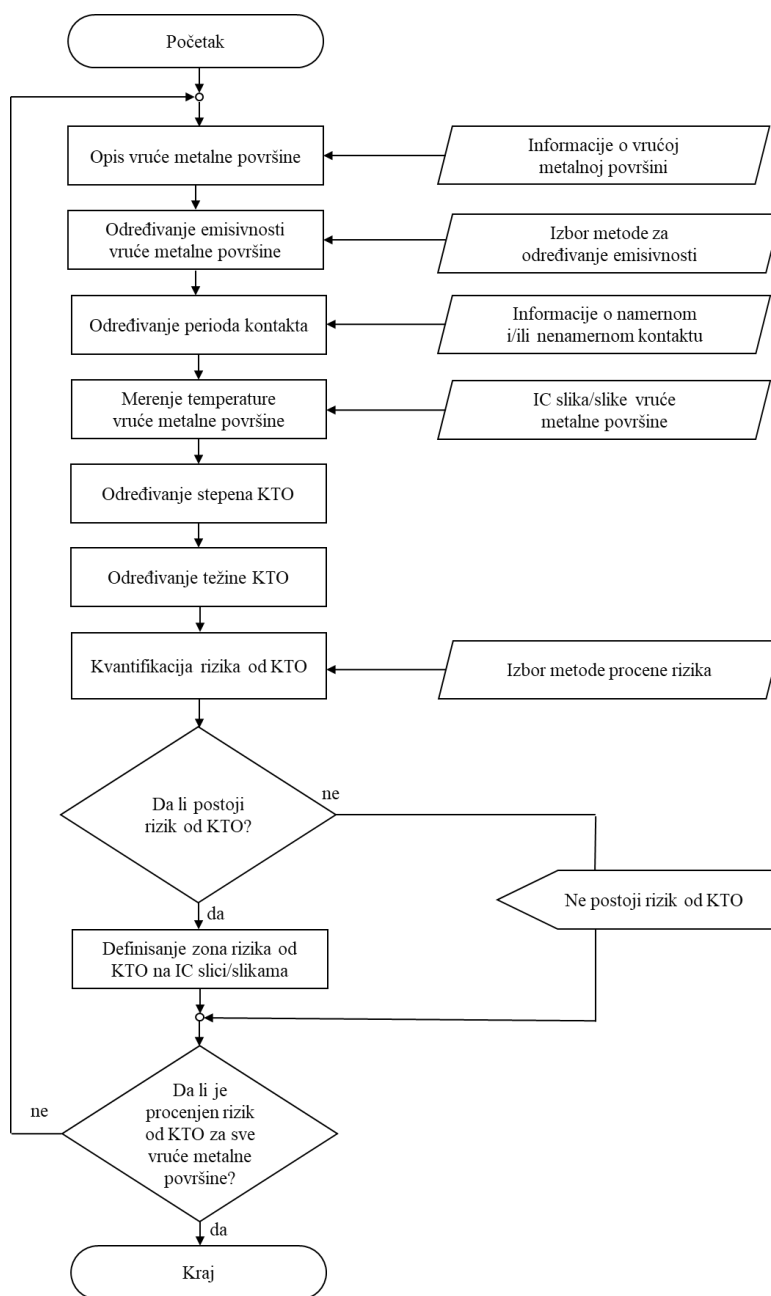
Procedura inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama se sprovodi pojedinačno za sve metalne površine mašine ili proizvoda koje mogu predstavljati rizik od KTO, zbog čega je na početku neophodno pored opštih podataka o mašini ili proizvodu navesti broj relevantnih vrućih metalnih površina za koje se sprovodi procena rizika od KTO.

Opšti podaci o mašini ili proizvodu obuhvataju:

- naziv mašine ili proizvoda;
- naziv proizvođača;
- model ili tip mašine, odnosno proizvoda.

Procedura inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućom metalnom površinom prema algoritmu prikazanom na Slici 6.1, obuhvata:

1. opis vruće metalne površine;
2. određivanje emisivnosti vruće metalne površine;
3. određivanje perioda kontakta;
4. merenje temperature vruće metalne površine;
5. određivanje stepena KTO;
6. određivanje težine KTO;
7. kvantifikaciju rizika od KTO;
8. definisanje zona rizika od KTO na IC slici/slikama;
9. ponavljanje procedure inovativne metode PR od KTO.



Slika 6.1 Algoritam inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama

6.3.1 Opis vruće metalne površine

Opis vruće metalne površine podrazumeva prikupljanje informacija o vrućoj metalnoj površini koje se odnose na:

- naziv vruće metalne površine za koju se sprovodi procena rizika od KTO;
- veličinu vruće metalne površine;
- uslove rada mašine ili proizvoda pri kojim je temperatura vruće metalne površine najviša;

- u slučaju da je u pitanju nepremazana metalna površina treba utvrditi vrstu metala i izmeriti površinsku hrapavost, osim u slučaju metalnih površina od nerđajućeg čelika;
- u slučaju da je metalna površina premazana potrebno je odrediti vrstu i debljinu premaza.

U ovom delu procedure potrebno je navesti naziv vruće metalne površine za koju se sprovodi procena rizika od KTO, kao i njenu veličinu koja predstavlja bitan podatak za određivanje težine KTO u šestom delu procedure. Veličina metalne površine se određuje na osnovu smernica prikazanih u poglavlju 6.1. Bitno je navesti da li je vruća metalna površina, P :

- $P \leq 0,0346 \text{ m}^2$;
- $0,0346 \text{ m}^2 < P \leq 0,0865 \text{ m}^2$;
- $0,0865 \text{ m}^2 < P \leq 0,173 \text{ m}^2$;
- $P > 0,173 \text{ m}^2$.

S obzirom na to da se procena rizika od KTO sprovodi u slučaju kada je temperatura vruće metalne površine najviša, treba prikupiti informacije o uslovima rada mašine ili proizvoda kada dolazi do pojave istih. Sledeći korak jeste definisanje da li je u pitanju nepremazana ili premazana vruća metalna površina. U slučaju da je u pitanju nepremazana metalna površina treba utvrditi vrstu metala i izmeriti površinsku hrapavost, osim u slučaju metalnih površina od nerđajućeg čelika. Merenje površinske hrapavosti nije neophodno kod metalne površine izrađene od nerđajućeg čelika, jer je ovakva metalna površina glatka, te njena emisivnost zavisi samo od temperature, kao što je pokazano u poglavlju 5.3.

U slučaju da je metalna površina premazana potrebno je odrediti vrstu i debljinu premaza. Ovi podaci nisu od važnosti za određivanje emisivnosti premazane metalne površine, ali diktiraju uvećanje T_{KTO} u odnosu na nepremazane metalne površine, kao što je objašnjeno u poglavlju 6.2. Inovativna metoda PR od KTO izazvanih vrućim premazanim metalnim površinama se može sprovesti samo za premaze u debljinama navedenim u Tabeli 6.5. Debljina premaza se može odrediti uređajem za kontaktno merenje debljine premaza, gde se preporučuje korišćenje uređaja koji radi na principu magnetne indukcije i vrtložnih struja. Ovakav uređaj omogućava merenje debljine premaza nanetog na magnetnu ili nemagnetnu podlogu.

6.3.2 Određivanje emisivnosti vruće metalne površine

U ovom delu procedure neophodno je odrediti emisivnost metalne površine u skladu sa smernicama datim u poglavlju 5.4.

6.3.3 Određivanje perioda kontakta

Određivanje perioda kontakta podrazumeva prikupljanje informacija o načinu kontakta sa vrućom metalnom površinom, a koje se odnose na situacije u kojima može doći do:

- namernog kontakta sa vrućom metalnom površinom;
- nenamernog kontakta sa vrućom metalnom površinom.

Kod ovog dela procedure neophodno je utvrditi da li može doći do namernog ili nenamernog kontakta sa vrućom metalnom površinom i sa tim u vezi odrediti period kontakta. U tu svrhu se mogu koristiti smernice za izbor D_{KTO} iz standarda EN ISO 13732-1:2006 (Tabela 2.5). Takođe, iz standard se mogu koristiti predloženi periodi kontakta i to za:

- a. nameran kontakt sa vrućom metalnom površinom:
 - najkraći period kontakta je 1 s za odrasle. U slučaju kada nema nikakvih ograničenja pokreta period kontakta je 0,5 s. Ukoliko se očekuje duže vreme reagovanja zbog ograničenosti u kretanju period kontakta je 4 s;
 - najkraći period kontakta je 1 s za stare, a ukoliko se zbog njihovih godina očekuje duže vreme reagovanja period kontakta je 4 s;
 - za osobe sa fizičkim invaliditetom period kontakta je duži, a trajanje zavisi najviše od načina na koji osoba sa invaliditetom koristi mašinu ili proizvod.
- b. nameran kontakt sa vrućom metalnom površinom je najbolje izmeriti period kontakta. Ukoliko merenje iz nekog razloga nije moguće, potrebno je odrediti D_{KTO} iz Tabele 2.5. Tabela 2.5 predstavlja osnovu za određivanje D_{KTO} , koji u slučaju namernog kontakta sa vrućom površinom ne sme biti kraći od 4 s. Ako mašinu ili proizvod koriste osobe sa invaliditetom, onda se način korišćenja mašine ili proizvoda mora detaljno razmotriti, kako bi se odredio D_{KTO} .

Treba napomenuti da inovativna metoda PR od KTO nije primenjiva kod dece, jer je težina KTO određena u odnosu na UPT kod odraslih osoba. UPT kod dece je dosta niža i varira u odnosu na njihove godine starosti, mada se može odrediti i kao takva koristiti i kod dece ukoliko za tim ima potrebe.

6.3.4 Merenje temperature vruće metalne površine

Merenje temperature vruće metalne površine sprovodi se simultano termometrom i IC kamerom. Temperatura se meri samo na onim mestima gde je očekivano da će doći do kontakta. Merenje se izvodi u uslovima kada se javljaju najviše temperature metalne površine. Kod merenja termometrom treba izabrati instrument sa metalnim kontaktnim senzorom, zanemarljive toplotne kapacitivnosti. Tačnost instrumenta mora biti najmanje ± 1 °C u rasponu temperatura do 50 °C i ± 2 °C za temperature preko 50 °C. Kod merenja temperature mora se omogućiti dobar kontakt između mernog senzora i vruće metalne površine. Temperatura se očitava tek kada se uspostavi temperaturni ekvilibrijum između vruće metalne površine i mernog senzora. Kod merenja temperature IC kamerom treba koristiti IC kamere sa nehlađenim FPA detektorom i tačnošću od najmanje ± 1 °C u rasponu temperatura do 200 °C i ± 2 °C za temperature preko 200 °C. U ovom delu procedure prikazuju se IC slika/slike vruće metalne površine sa obeleženim najvišim i najnižim izmerenim temperaturama na vrućoj metalnoj površini. Treba obratiti pažnju da se na IC slici vidi čitava vruća metalna površina, ukoliko to nije moguće treba snimiti više IC slika iz različitih uglova.

6.3.5 Određivanje stepena KTO

Stepen KTO se određuje iz Tabele 6.4 za sve izmerene temperature na vrućoj metalnoj površini u rasponu od najniže do najviše temperature i u odnosu na sve periode kontakta. S obzirom na to da mogu postojati razlike u periodu kontakta za nameran i nameran kontakt, može se desiti da postoje i razlike u stepenima KTO, te ih je sve neophodno navesti.

6.3.6 Određivanje težine KTO

Težina KTO se određuje korišćenjem matrice prikazane u Tabeli 6.2 na osnovu veličine vruće metalne površine i stepena KTO. Ukoliko vruća metalna površina može dovesti do nastanka KTO

različitog stepena, njena težina se mora odrediti za svaki stepen KTO. Ovo treba imati u vidu pri kvantifikaciji rizika od KTO, odnosno pri kvantitativnom ocenjivanju faktora rizika – težina povrede.

6.3.7 Kvantifikacija rizika od KTO

Za kvantifikaciju rizika od KTO preporučuje se korišćenje kombinovanih metoda, opisanih u poglavlju 3.2 i to:

- Kinney metode za proizvode i u slučaju kada je samo jedna osoba izložena vrućoj metalnoj površini (poglavljje 3.2.1);
- PILZ metode za mašine i u slučaju kada je jedna osoba ili više osoba izloženo vrućoj metalnoj površini (poglavljje 3.2.2);
- Guardmaster metode za mašine i u slučaju kada je jedna osoba izloženo vrućoj metalnoj površini (poglavljje 3.2.3).

U ovom delu procedure nakon izbora kombinovane metode potrebno je kvalitativno i kvantitativno oceniti nivoe faktora rizika, prikazati način kvantifikovanja (izračunavanja) rizika i odrediti nivo(e) rizika. Kvalitativne i kvantitativne ocene faktora rizika prema pomenutim metodama su prikazane u Tabeli 3.3 za Kinney metodu, u Tabeli 3.5 za PILZ metodu i u Tabeli 3.7 za Guardmaster metodu. U situaciji kada postoje razlike u učestanosti korišćenja mašine ili proizvoda, zbog razlike u kvalitativnim i kvantitativnim ocenama ovog faktora rizika, neophodno je izračunati sve nivoe rizika. Nakon određivanja nivoa rizika obavezno je navođenje kategorije rizika, odnosno da li je rizik od KTO prihvatljiv ili neprihvatljiv (visok ili nedopustiv). Navedene kategorije rizika se određuju za Kinney metodu iz Tabele 3.4, za PILZ metodu iz Tabele 3.6, dok za Guardmaster metodu se određuju iz Tabele 3.8.

6.3.8 Definisanje zona rizika od KTO na IC slici/slikama

Bez obzira na kategoriju rizika od KTO na IC slici/slikama se mogu prikazati zone rizika od nastanka različitog stepena KTO. Iz Tabele 6.4 na osnovu perioda kontakta potrebno je odrediti raspone temperatura koje neće dovesti do nastanka KTO ili koje će dovesti do nastanka različitog stepena KTO. Izabrani rasponi temperatura iz Tabele 6.4 se mogu predstaviti na IC slici/slikama korišćenjem programa *GuideIrAnalyser* u vidu zona pomoću tzv. izotermi. Preporuka je da boje izotermi odgovaraju bojama stepena KTO iz Tabele 6.4, odnosno da:

- plava izoterma predstavlja zonu koja neće dovesti do nastanka KTO;
- zelena izoterma predstavlja zonu koja će dovesti do nastanka I stepena KTO;
- žuta izoterma predstavlja zonu koja će dovesti do nastanka II stepena KTO;
- crvena izoterma predstavlja zonu koja će dovesti do nastanka III stepena KTO.

Program *GuideIrAnalyser* automatski obeležava pozadinu na IC slici nijansama plave boje, dok su temperature jednake i više od 200 °C predstavljene izotermom braon boje. U ovom koraku potrebno je u legendi ispod IC slike navesti boje korišćenih izotermi i temperature koje im odgovaraju. Nakon toga, treba prokomentarisati rezultate i izvesti zaključak inovativne metode PR od KTO.

6.3.9 Ponavljanje procedure inovativne metode procene rizika od KTO

Procedura inovativne metode PR od KTO se ponavlja sve dok se za sve identifikovane vruće metalne površine ne proceni rizik od KTO, kao i u slučaju da dođe do:

- konstrukcionih promena mašine ili proizvoda;
- promene opsega snage/temperature mašine ili proizvoda;
- promene namene mašine ili proizvoda;
- promene bilo kakvih okolnosti koje mogu dovesti do drugačijih rezultata procene rizika.

6.3.10. Obrazac inovativne metode procene rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama

Radi lakšeg sprovođenja inovativne metode PR od KTO u Tabeli 6.6 prikazan je obrazac u skladu sa kojim treba sprovesti njenu proceduru.

Tabela 6.6 Obrazac inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama

Opšti podaci o proizvodu ili mašini	
Naziv proizvoda ili mašine:	
Naziv proizvođača:	
Model proizvoda ili mašine:	
Broj relevantnih vrućih metalnih površina:	
Inovativna metoda PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama	
Opis vruće metalne površine	
Naziv vruće metalne površine:	
Veličina vruće metalne površine:	
Uslovi rada proizvoda pri kojima je temperatura vruće metalne površine najviša:	
Vruća metalna površina je sa/bez premaza:	
Vrsta i debljina premaza (samo za premazane metalne površine):	
Vrsta metala:	
Određivanje emisivnosti vruće metalne površine	
Način određivanja emisivnosti:	
Temperatura:	
Površinska hrapavost (samo kod nepremazanih metalnih površina)	
Emisivnost vruće metalne površine:	
Određivanje perioda kontakta	
Pristupačnost vrućoj metalnoj površini:	
Nameran kontakt sa vrućom metalnom površinom:	
D_{KTO} za nameran kontakt:	
Nenameran kontakt sa vrućom metalnom površinom:	
D_{KTO} za nenameran kontakt:	

Merenje temperature vruće metalne površine			
Naziv vruće metalne površine		Naziv vruće metalne površine	
IC slika		IC slika	
Najniža izmerena T_{KTO} :		Najniža izmerena T_{KTO} :	
Najviše izmerena T_{KTO} :		Najviše izmerena T_{KTO} :	
Određivanje stepena KTO			
Najniža izmerena T_{KTO} :			
Najviše izmerena T_{KTO} :			
Stepen KTO:			
Određivanje težine KTO			
Veličina metalne površine:			
Stepen KTO:			
Težina KTO:			
Kvantifikacija rizika od KTO			
Korišćena kombinovana metoda:			
Kvalitativna ocena faktora rizika:	verovatnoća (V):		
	učestanost (U):		
	težina povrede (P):		
Kvantitativna ocena faktora rizika:	verovatnoća (V):		
	učestanost (U):		
	težina povrede (P):		
Način kvantifikovanja nivoa rizika:			
Nivo(i) rizika:			
Kategorija rizika:			
Zone rizika od KTO na IC slikama			
Naziv vruće metalne površine		Naziv vruće metalne površine	
IC slika sa izotermama		IC slika sa izotermama	
Izoterma 1:	T_{KTO} za izotermu 1	Izoterma 1:	T_{KTO} za izotermu 1
Izoterma 2:	T_{KTO} za izotermu 2	Izoterma 2:	T_{KTO} za izotermu 2
Izoterma 3:	T_{KTO} za izotermu 3	Izoterma 3:	T_{KTO} za izotermu 3
Izoterma 4:	T_{KTO} za izotermu 4	Izoterma 4:	T_{KTO} za izotermu 4

Komentar i zaključak inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama

Da bi se proverila primenjivost inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama, neophodno je sprovesti verifikaciju na primeru proizvoda i mašine, što je tema narednog poglavlja.

7. VERIFIKACIJA INOVATIVNE METODE PROCENE RIZIKA OD KTO IZAZVANIH VRUĆIM METALNIM POVRŠINAMA

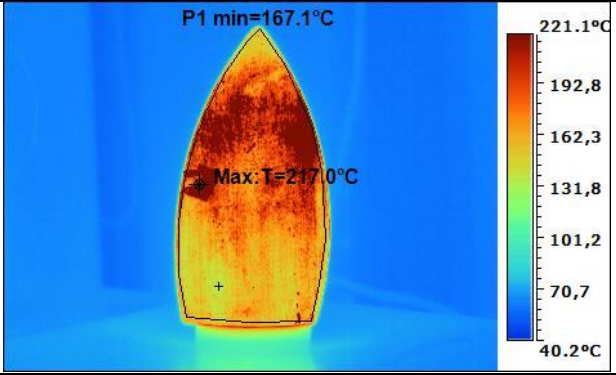
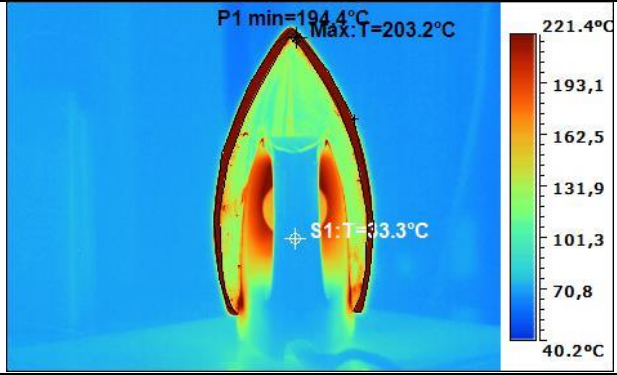
Verifikacija inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama sprovedena je na primeru proizvoda i mašine. Za proizvod je izabrana (električna) pegla, zbog njenih lako dodirnih vrućih metalnih površina. Pored toga, u standardu EN ISO 13732-1:2006 je ilustrovana primena metode procene rizika od KTO upravo za peglu, čime je poređenje metoda procena rizika od KTO olakšano. U cilju verifikacije inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama mašine izabrana je mašina za injekciono presovanje.

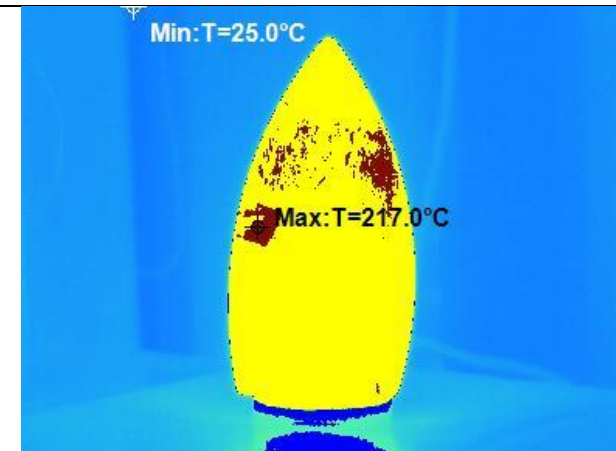
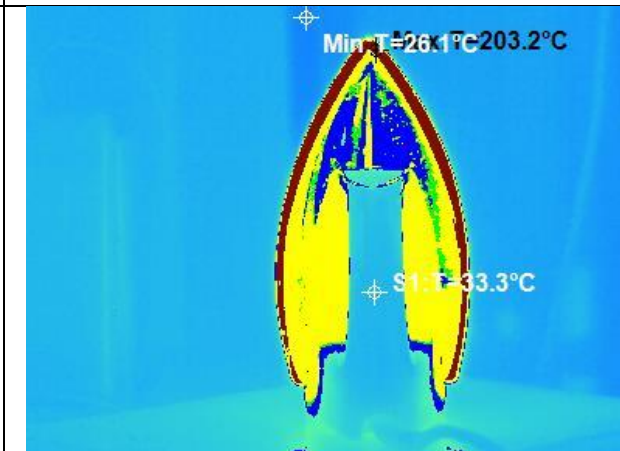
7.1 Procena rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama grejne ploče pegle primenom inovativne metode

Verifikacija inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama proizvoda ilustrovana je u Tabeli 7.1 na primeru grejne ploče pegle.

Tabela 7.1 PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama grejne ploče pegle primenom inovativne metode

Opšti podaci o proizvodu	
Naziv proizvoda:	Pegla
Naziv proizvođača:	Rowenta
Model proizvoda:	LA 58
Broj relevantnih vrućih metalnih površina:	1
Inovativna metoda PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama	
Opis vruće metalne površine	
Naziv vruće metalne površine:	Grejna ploča
Veličina metalne površine:	$P < 0,0346 \text{ m}^2$
Uslovi rada proizvoda pri kojima je temperatura vruće metalne površine najviša:	U slučaju peglanja sintetičkih materijala najviša podesiva temperatura na pegli je $200 \text{ }^\circ\text{C}$
Vruća metalna površina je sa/bez premaza:	Bez premaza
Vrsta metala:	Nerđajući čelik
Određivanje emisivnosti vruće metalne površine	
Način određivanja emisivnosti:	Tabele 5.18 (kolona za NRČ10)
Temperatura:	$T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$
Emisivnost vruće metalne površine:	$\varepsilon = 0,20$
Određivanje perioda kontakta	
Pristupačnost vrućoj metalnoj površini:	Lako dodirna

Nameran kontakt sa vrućom metalnom površinom:	Ne postoji mogućnost namernog kontakta kod osoba koje su upoznate sa bezbednim korišćenjem proizvoda		
D_{KTO} za nameran kontakt:	-		
Nenameran kontakt sa vrućom metalnom površinom:	Postoji mogućnost nenamernog kontakta u slučaju kada se pegla nalazi u uspravnom položaju		
D_{KTO} za nenameran kontakt:	0,5 s za odrasle i 1 s za starije osobe		
Merenje temperature vruće metalne površine			
Grejna ploča (pogled od dole)		Grejna ploča (pogled od gore)	
			
Najniža izmerena T_{KTO} :	167,1 °C	Najniža izmerena T_{KTO} :	194,4 °C
Najviše izmerena T_{KTO} :	217,0 °C	Najviše izmerena T_{KTO} :	203,2 °C
Određivanje stepena KTO			
Najniža izmerena T_{KTO} :	167,1 °C		
Najviše izmerena T_{KTO} :	217,0 °C		
Stepen KTO:	<p>Iz Tabele 6.4 za period kontakta 0,5 s važi:</p> <ul style="list-style-type: none"> - KTO ne može nastati ako je $T_{KTO} \leq 67$ °C; - I stepen KTO nastaje ako je 67 °C < $T_{KTO} \leq 70$ °C; - II stepen KTO nastaje ako je $T_{KTO} > 70$ °C. <p>Iz Tabele 6.4 za period kontakta 1 s važi:</p> <ul style="list-style-type: none"> - KTO ne može nastati ako je $T_{KTO} \leq 65$ °C; - I stepen KTO nastaje ako je 65 °C < $T_{KTO} \leq 70$ °C; - II stepen KTO nastaje ako je $T_{KTO} > 70$ °C. 		
Određivanje težine KTO			
Veličina metalne površine:	$P < 0,0346$ m ²		
Stepen KTO:	II stepen KTO (Tabela 6.4)		
Težina KTO:	Laka KTO (Tabela 6.2)		
Kvantifikacija rizika od KTO			
Korišćena kombinovana metoda:	Kinney metoda		
Kvalitativna ocena faktora rizika (Tabela 3.3):	verovatnoća (V):	Mala mogućnost	
	učestanost (U):	Nedeljno ili dnevno korišćenje pegle	
	težina povrede (P):	Lake telesna povrede sa trenutnom onesposobljenošću	
Kvantitativna ocena faktora rizika (Tabela 3.4):	verovatnoća (V):	3	
	učestanost (U):	3 ili 6	
	težina povrede (P):	2	
Način kvantifikovanja nivoa rizika:	$R = V \cdot U \cdot P$		
Nivo(i) rizika:	$R_1 = 3 \cdot 3 \cdot 2 = 18$ (zanemarljiv rizik) $R_2 = 3 \cdot 6 \cdot 2 = 36$ (nizak rizik)		

Kategorija rizika:		Prihvatljiv rizik	
Zone rizika od KTO na IC slikama			
Grejna ploča (pogled od dole)		Grejna ploča (pogled od gore)	
			
Braon izoterma:	$T_{KTO} > 200 \text{ °C}$ (II KTO)	Braon izoterma:	$T_{KTO} > 200 \text{ °C}$ (II KTO)
Žuta izoterma:	$70 \text{ °C} < T_{KTO} \leq 200 \text{ °C}$ (II KTO)	Žuta izoterma:	$70 \text{ °C} < T_{KTO} \leq 200 \text{ °C}$ (II KTO)
Zelena izoterma:	$65 \text{ °C} < T_{KTO} \leq 70 \text{ °C}$ (I KTO)	Zelena izoterma:	$65 \text{ °C} < T_{KTO} \leq 70 \text{ °C}$ (I KTO)
Plava izoterma	$40 \text{ °C} < T_{KTO} \leq 65 \text{ °C}$ (bez KTO)	Plava izoterma	$40 \text{ °C} < T_{KTO} \leq 65 \text{ °C}$ (bez KTO)
Komentar i zaključak inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama			
<p>Nivo rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama pegle prihvatljiv, odnosno zanemarljiv do nizak u zavisnosti od učestanosti korišćenja pegle. Rizik od KTO je najviši u središnjem delu grejne ploče i na ivicama grejne ploče. Iako grejna ploča pegle može dovesti do nastanka najviše II stepena KTO, nivo rizika je prihvatljiv, jer veličina grejne ploče nije dovoljno velika da nanese srednje ili teške opekotine.</p>			

U skladu sa algoritmom inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama prikazanim na Slici 6.1 prvi korak podrazumeva opis vruće metalne površine. Zaključeno je da je grejna ploča izrađena od nerđajućeg čelika, bez premaza i izmerena je njena veličina koja iznosi manje od $0,0346 \text{ m}^2$.

U drugom koraku određena je emisivnost vruće metalne površine, gde je korišćena Tabela 5.18, odnosno podaci za emisivnost nerđajućeg čelika debljine 10 mm. Prema Tabeli 5.18 emisivnost nerđajućeg čelika na temperaturi 200 °C iznosi 0,20.

Treći korak podrazumeva određivanje perioda kontakta. Mogućnost namernog kontakta ne postoji kod osoba koje su upoznate sa bezbednim korišćenjem proizvoda, dok mogućnost nenamernog kontakta sa grejnom pločom pegle postoji u slučaju kada se pegla nalazi u uspravnom položaju. U skladu sa preporukama za nenameran kontakt prikazanih u poglavlju 6.3.3 period kontakta iznosi 0,5 s za odrasle i 1 s za starije osobe. Period kontakta 0,5 s izabran je jer ne postoji ograničenje u pokretima u slučaju brzog povlačenja ruke od grejne ploče pegle. Usvojena su dva perioda kontakta zbog toga što se pegla koristi u domaćinstvima i na radnom mestu, te je koriste kako odrasli tako i starije osobe čije je vreme reagovanja duže.

Četvrti korak jeste merenje temperature grejne ploče IC kamerom. Ovde je bilo neophodno snimiti dve IC slike, sa donje i gornje strane pegle, kako bi se snimila čitava grejna ploča. Najviša temperatura grejne ploče gledano sa donje strane iznosi 217 °C i ovde su temperature najviše u gornjem delu grejne ploče. Najniža temperatura iznosi 167,1 °C i nalazi se u donjem delu grejne ploče. Razlog ovome jeste pozicija grejača pegle. Sa druge strane, gledano od gore najviše izmerena temperatura iznosi 203,2 °C, dok najniža izmerena temperatura iznosi 194,4 °C. Na IC slici je prikazana temperatura ručke pegle koja iznosi 33,3 °C. S obzirom na to da je ručka pegle izrađena od plastike, ona kao takva nije predmet inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama proizvoda, te u ovom slučaju nije uzeta u razmatranje.

Nakon merenja temperature u petom koraku je, u odnosu na najnižu i najvišu izmerenu temperaturu na grejnoj ploči i periode kontakta 0,5 s i 1 s, određen stepen KTO. Iz Tabele 6.4 se vidi da za period kontakta 0,5 s:

- KTO ne može nastati ukoliko je $T_{KTO} \leq 67$ °C;
- I stepen KTO može nastati ukoliko je 67 °C < $T_{KTO} \leq 70$ °C;
- II stepen KTO može nastati ukoliko je $T_{KTO} > 70$ °C.

Sa druge strane iz iste tabele se vidi da za period kontakta 1 s:

- KTO ne može nastati ukoliko je $T_{KTO} \leq 65$ °C;
- I stepen KTO može nastati ukoliko je 65 °C < $T_{KTO} \leq 70$ °C;
- II stepen KTO može nastati ukoliko je $T_{KTO} > 70$ °C.

Kako je najniža izmerena temperatura na grejnoj ploči 167,1 °C, to znači da može doći do nastanka samo II stepena KTO bez obzira na bilo koji od dva navedena perioda kontakta. Na grejnoj ploči pegle ne postoji opasnost od nastanka III stepena KTO pri kraćim periodima kontakta, jer kao što se može videti iz Tabele 6.4 potrebno je najmanje 10 s da bi na temperaturi 200 °C nastao III stepen KTO.

Šesti korak podrazumeva određivanje težine KTO na osnovu stepena KTO i veličine vruće metalne površine. Kako je u pitanju II stepen KTO i grejna ploča površine manje od 0,0346 m² iz Tabele 6.2 se vidi da u tom slučaju može doći samo do nastanka samo lake KTO.

U sedmom koraku rizik od KTO je kvantifikovan Kinney metodom. Kinney metoda objašnjena je u poglavlju 3.2.1, gde su u Tabeli 3.3 prikazane kvalitativne i kvantitativne ocene nivoa faktora rizika, a u Tabeli 3.4 nivoi rizika zajedno sa kategorijama rizika. S obzirom na to da odrasli i starije osobe su upoznate sa bezbednim korišćenjem pegle, prema Kinney metodi je uzeto da postoji mala verovatnoća da će doći do kontakta sa grejnom pločom pegle i da ukoliko i dođe nastaje laka telesna povreda sa trenutnom onesposobljenošću. Učestanost izloženosti može biti na nedeljnom ili dnevnom nivou, u zavisnosti da li se pegla koristi u domaćinstvu ili u profesionalne svrhe, te shodno tome postoje dva različita nivoa rizika od KTO koja treba kvantifikovati. U slučaju nedeljnog korišćenja pegle nivo rizik od KTO izazvan grejnom pločom pegle je zanemarljiv, dok u slučaju dnevnog korišćenja pegle je nizak. Oba nivoa rizika prema Kinney metodi pripadaju kategoriji prihvatljivog rizika.

U osmom koraku su prikazane IC slike grejne ploče sa zonama rizika od KTO koje su predstavljene izotermama. Boje izotermi odgovaraju različitim stepenima KTO i rasponima

temperatura. S obzirom na to da postoje dva perioda kontakta i to 0,5 s za odrasle i 1 s za starije osobe na IC slikama su prikazane zone rizika u najtežem mogućem slučaju, dakle za period kontakta 0,5 s. Što je period kontakta kraći to je potrebna viša temperatura da bi nastala KTO istog stepena kao pri dužem periodu kontakta, zbog čega su zone rizika od KTO predstavljene za kraći period kontakta.

U skladu sa preporukama za izbor boja izoterma u poglavlju 6.3.8 na IC slikama su sa plavom izotermom predstavljene oblasti temperatura koje neće dovesti do nastanka KTO, sa zelenom su predstavljene oblasti temperatura koje će dovesti do nastanka I stepena KTO i sa žutom su predstavljene oblasti temperatura koje će dovesti do nastanka II stepena KTO. Braon izotermom su obeležene temperature više od 200 °C na IC slici, koje ukazuju da iako je nivo rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama pegle prihvatljiv, odnosno zanemarljiv do nizak u zavisnosti od učestanosti korišćenja pegle, rizik od KTO je najviši u središnjem delu i na ivicama grejne ploče.

Zaključuje se da na grejnoj ploči pegle postoji rizik od nastanka najviše II stepena KTO, ali kako površina pegle nije dovoljno velika da nanese srednje ili teške KTO, ovaj rizik spada u kategoriju prihvatljivog rizika čak i u slučaju dnevnog korišćenja pegle.

Kako bi se uporedili rezultati inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama grejne ploče pegle, u nastavku je prikazana procena rizika od KTO takođe za grejnu ploču pegle prema standardu EN ISO 13732-1:2006.

7.2 Procena rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama grejne ploče pegle prema standardu EN ISO 13732-1:2006

U standardu EN ISO 13732-1:2006 prikazana je primena metode procene rizika od KTO za peglu. Procedura se sprovodi pojedinačno za sve površine pegle koje se mogu zagrejati prilikom korišćenja, a to su grejna ploča, ručka i površina između grejne ploče i ručke. S obzirom na to da su od interesa samo metalne površine u nastavku će biti opisana procena rizika od KTO samo za grejnu ploču.

Procedura procene rizika od KTO prema standardu EN ISO 13732-1:2006 je sledeća:

1. identifikacija vruće (dodirne) površine;
2. analiza zadatka;
3. merenje temperature vruće površine;
4. izbor odgovarajuće T_{KTO} ;
5. poređenje izmerene temperature vruće površine i usvojene T_{KTO} ;
6. određivanje nivoa rizika od KTO;
7. ponavljanje procedure procene rizika od KTO.

Detalniji koraci procedure procene rizika od KTO prema standardu EN ISO 13732-1:2006 su opisani u poglavlju 3.4, a u Tabeli 7.2 je prikazana njen izgled.

Tabela 7.2 Procena rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama grejne ploče pegle prema standardu EN ISO 13732-1:2006

Identifikacija vrućih metalnih površina
<p>Procedura procene rizika od KTO odnosi se samo na grejnu ploču pegle, koja zbog samog dizajna proizvoda mora da bude vruća prilikom korišćenja. Preostale relevantne informacije o proizvodu su sledeće:</p> <ul style="list-style-type: none"> – grejna ploča je lako dodirna; – grubom procenom temperature utvrđeno je da je u pitanju vruća površina; – materijal od koga je izrađena grejna ploča je čelik; – tekstura grejne ploče je glatka; – postoje tri podesiva nivoa temperature na pegli.
Analiza zadatka
<p>Analizom zadatka prikupljene su sledeće informacije:</p> <ul style="list-style-type: none"> – vruća površina sa kojom se može doći u kontakt je grejna ploča; – kontakt sa grejnom pločom je nenameran; – osobe koje mogu doći u kontakt sa grejnom pločom su odrasli i deca; – D_{KTO} iznosi 0,5 s za odrasle, 4 s za decu i 15 s za decu do dve godine; – verovatnoća nenamernog kontakta sa grejnom pločom je niska prilikom korišćenja, zbog samog položaja pegle i visoka kada je pegla u uspravnom položaju, pri čemu je verovatnoća srednja do visoka za osobe koje nisu svesne rizika od KTO, npr. deca; – učestanost namernog kontakta sa grejnom pločom je nula; – izabran je najviši nivo temperature na pegli.
Merenje temperature vruće površine
<p>Najviše izmerena temperatura grejne ploče pri korišćenju iznosi 250 °C.</p>
Izbor odgovarajuće T_{KTO}
<p>Za glatke nepremazane metalne površine T_{KTO} za period kontakta 0,5 s iznosi od 67 °C do 73 °C. Ovo važi samo u slučaju da pristup pegli imaju odrasli, a ako i deca imaju pristup onda T_{KTO} za period kontakta 4 s iznosi od 58 °C do 63 °C, odnosno za period kontakta 15 s iznosi od 55 °C do 59 °C.</p>
Poređenje izmerene temperature vruće površine i usvojene T_{KTO}
<p>Izmerena temperatura grejne ploče je daleko iznad usvojenih T_{KTO}. Očekivano je da će pri kontaktu doći do nastanka KTO, kako kod odraslih, tako i kod dece.</p>
Određivanje nivoa rizika od KTO
<p>S obzirom na to da temperatura grejne ploče prelazi T_{KTO} jasno je da postoji evidentan rizik od KTO. Verovatnoća da će doći do kontakta sa vrućom grejnom pločom je niska kada peglu koriste iskusne odrasle osobe kod kuće ili na radnom mestu. Kada su u pitanju deca, verovatnoća da će se doći u kontakt sa peglom kod kuće je srednja do visoka. U slučaju kontakta nezaštićene kože sa vrućom grejnom pločom očekivano je da će doći do ozbiljnih termičkih povreda. Rizik od KTO je nizak do srednji kada peglu koriste iskusne odrasle osobe, dok je rizik od KTO srednji do visko u slučaju da deca dođu u kontakt sa peglom.</p>
Mere zaštite
<p>Savetuje se pažljivo korišćenje pegle od strane odraslih za koje se podrazumeva da su i sami svesni rizika od KTO. Treba preduzeti mere kako bi se sprečilo da deca dođu u kontakt sa peglom, te se predlaže tehničkim komitetima koji pripremaju standarde za proizvode da uzmu u obzir postavljanje svetlosnih indikatora koji bi upozoravali na nivo zagrejanosti grejne ploče.</p>

Poređenjem rezultata procene rizika od KTO prema standardu EN ISO 13732-1:2006 i prema inovativnoj metodi za grejnu ploču pegle, dolazi se do zaključaka da je inovativna metoda PR od KTO temeljnija, zbog toga što uzima u obzir veličinu grejne ploče pegle, kao i stepen KTO, što omogućava određivanje težine KTO, odnosno kvantifikaciju nivoa rizika od KTO. Zaključak inovativne metode PR od KTO jeste da grejna ploča pegle predstavlja zanemarljiv do nizak rizik od KTO za odrasle i starije osobe, jer bez obzira na visoku temperaturu grejne ploče njena površina nije dovoljno velika da dovede do nastanka teških KTO. Uzevši u obzir i druge faktore rizika, kao što je nemogućnost namernog kontakta sa grejnom pločom kod osoba koje su svesne rizika od KTO, ovaj nivo rizika je dodatno opravdan. Sa druge strane standard EN ISO 13732-1:2006 navodi da je rizik od KTO izazvan grejnom pločom pegle nizak do srednji kada peglu koriste iskusne odrasle osobe, ali da u slučaju kontakta nezaštićene kože sa vrućom grejnom pločom treba očekivati da će doći do ozbiljnih termičkih povreda. Inovativna metoda PR od KTO je pokazala da pri temperaturi 200 °C i kratkim periodima kontakta može najviše doći do nastanka II stepena KTO, što u kombinaciji sa veličinom grejne ploče pegle može da dovede samo do lake KTO. U prilog ovakvom zaključku ide i činjenica da se III stepen KTO odlikuju potpunom destrukcijom svih slojeva kože do supkutanog masnog tkiva (poglavlje 2.3.3), što implicira da bi za ovakvu težinu povrede sigurno trebao duži period kontakta od 1 s. Dake, čak i u slučaju nenamernog kontakta sa vrućom grejnom pločom pegle ne može doći do nastanka srednje ni teške KTO, kako je zaključeno u standardu EN ISO 13732-1:2006.


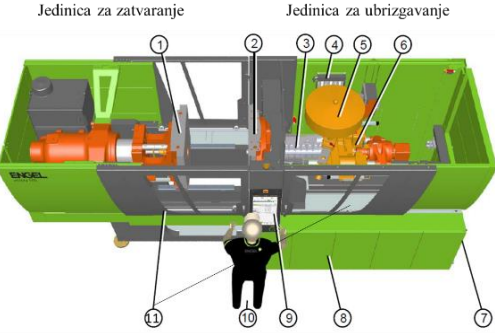
Pored mogućnosti definisanja stepena KTO, uzimanja u obzir veličine vruće površine, definisanja težine KTO i kvantifikacije nivoa rizika od KTO, inovativna metoda PR omogućava još i prikaz zona rizika od KTO. Prikazivanje zona rizika od KTO je još jedna prednost u odnosu na standard EN ISO 13732-1:2006. Na IC slikama se mogu predstaviti oblasti temperatura koje dovode do različitog stepena KTO, čime je olakšano davanje preporuka za bezbedno korišćenje proizvoda, odnosno pegle, kada postoje preostali rizici od KTO koji nisu mogli biti eliminisani.

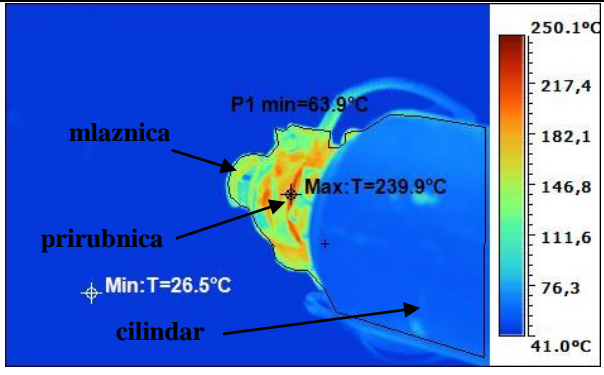
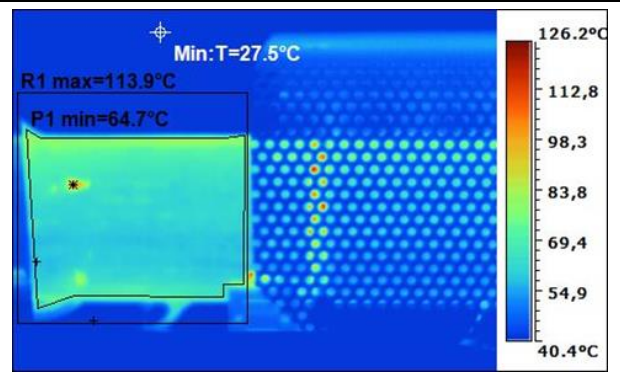
7.3 Procena rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama cilindra mašine za injekciono presovanje primenom inovativne metode

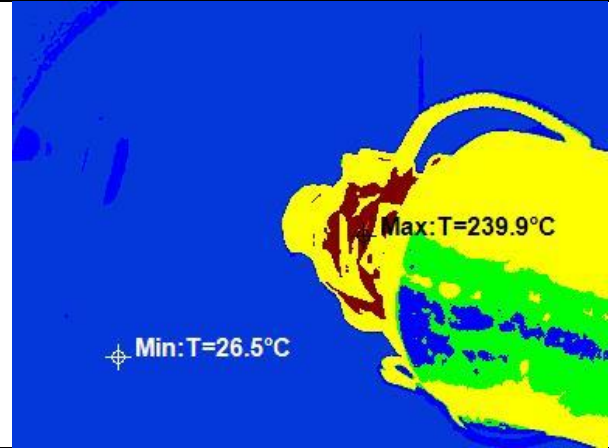
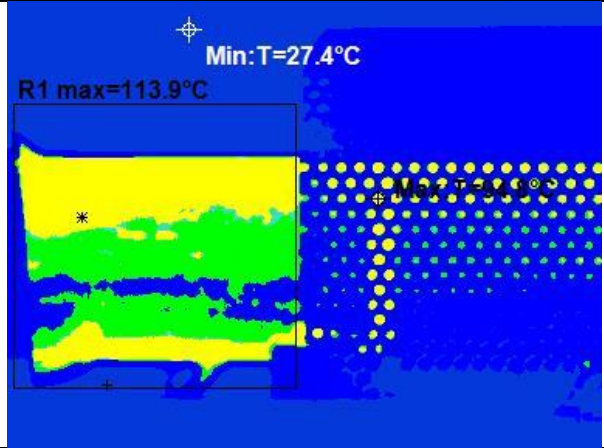
Verifikacija inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama cilindar mašine za injekciono presovanje ilustrovana je u Tabeli 7.3.

Tabela 7.3 PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama cilindra mašine za injekciono presovanje primenom inovativne metode

Opšti podaci o mašini	
Naziv mašine:	Mašina za injekciono presovanje
Naziv proizvođača:	ENGEL
Model mašine:	Victory 50
Broj relevantnih vrućih metalnih površina:	1

Inovativna metoda PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama		
Opis vruće metalne površine		
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Pokretna ploča 2. Nepokretna ploča 3. Cilindar 4. Baterija za vodu za hlađenje 5. Spremnik materijala 6. Agregat za pritisak 7. Glavni prekidač 8. Elektro orman 9. Kontrolni panel 10. Rukovalac mašine na radnom mestu 11. Zaštitna vrata
Naziv metalne površine:	Cilindar	
Veličina metalne površine:	$P < 0,0346 \text{ m}^2$	
Uslovi rada proizvoda pri kojima je temperatura vruće metalne površine najviša:	Najviša temperatura mlaznice je oko $200 \text{ }^\circ\text{C}$	
Vruća metalna površina je sa/bez premaza:	Bez premaza	
Vrsta metala:	Čelik	
Određivanje emisivnosti vruće metalne površine		
Način određivanja emisivnosti cilindra:	<i>In situ</i> metoda pomoću termoparova	
Emisivnost vruće metalne površine:	$\varepsilon = 0,50$	
Način određivanja emisivnosti mlaznice i prirubnice:	$\varepsilon = 0,000886 T + 0,03448 \bar{R}_a - 0,00078$	
Temperatura:	$T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$	
Površinska hrapavost:	$R_a = 0,63 \text{ } \mu\text{m}$	
Emisivnost vruće metalne površine:	$\varepsilon = 0,20$	
Određivanje perioda kontakta		
Pristupačnost vrućoj metalnoj površini:	Teško pristupačna	
Nameran kontakt sa vrućom metalnom površinom:	-	
D_{KTO} za nameran kontakt:	-	
Nenameran kontakt sa vrućom metalnom površinom:	Usled nedovoljnog preliminarnog sušenja ili dekompozicije određenih plastičnih materijala može doći do nekontrolisanog isticanja rastopljenog materijala kroz mlaznicu ili priрубnicu cilindra, te je isti potrebno ukloniti. Iako se cilindar nalazi zatvoren unutar jedinice za ubrizgavanje u opisanom slučaju neophodno je otvoriti zaštitna vrata i rukom ukloniti višak nakupljenog materijala, tako da postoji velika verovatnoća nenamernog kontakta sa vrućim metalnim površinama cilindra.	
D_{KTO} za nenameran kontakt:	1 s (Tabela 2.5)	

Merenje temperature vruće metalne površine			
Mlaznica i prirubnica cilindra		Cilindar	
			
Najniža izmerena T_{KTO} :	63,9 °C	Najniža izmerena T_{KTO} :	64,7 °C
Najviše izmerena T_{KTO} :	239,9 °C	Najviše izmerena T_{KTO} :	113,9 °C
Određivanje stepena KTO			
Najniža izmerena T_{KTO} :	63,9 °C		
Najviše izmerena T_{KTO} :	239,9 °C		
Stepen KTO:	Iz Tabele 6.4 za 1 s važi: – I stepen KTO nastaje kada je $65\text{ °C} < T_{KTO} \leq 70\text{ °C}$; – II stepen KTO nastaje kada je $T_{KTO} > 70\text{ °C}$.		
Određivanje težine KTO			
Veličina metalne površine:	$P < 0,0346\text{ m}^2$		
Stepen KTO:	II stepen KTO		
Težina KTO:	Laka KTO (Tabela 6.2)		
I Kvantifikacija rizika od KTO			
Korišćena kombinovana metoda:	Guardmaster metoda		
Kvalitativna ocena faktora rizika (Tabela 3.7):	verovatnoća (V):	Vrlo verovatno	
	učestanost (U):	Retko (jednom nedeljno)	
	težina povrede (P):	Laka povreda	
Kvantitativna ocena faktora rizika (poglavlje 3.2.3)	verovatnoća (V):	4	
	učestanost (U):	1	
	težina povrede (P):	1	
Način kvantifikovanja nivoa rizika:	$R = V + U + P$		
Nivo(i) rizika:	$R = 4 + 1 + 1 = 6$ (srednji rizik)		
Kategorija rizika:	Povećan rizik		
II Kvantifikacija rizika od KTO			
Korišćena kombinovana metoda:	PILZ metoda		
Kvalitativna ocena faktora rizika (Tabela 3.5):	verovatnoća (V):	Vrlo verovatno	
	učestanost (U):	Nedeljno	
	težina povrede (P):	Razderotina/posekotina/blagi zdravstveni simptomi	
	br. izloženih osoba (B):	Jedna	
Kvantitativna ocena faktora rizika (Tabela 3.6):	verovatnoća (V):	10	
	učestanost (U):	1,5	
	težina povrede (P):	0,5	
	br. izloženih osoba (B):	1	
Način kvantifikovanja nivoa rizika:	$R = V \cdot U \cdot P \cdot B$		

Nivo(i) rizika:	$R = 10 \cdot 1,5 \cdot 0,5 \cdot 1 = 7,5$ (nizak rizik)		
Kategorija rizika:	Prihvatljiv rizik		
Zone rizika od KTO na IC slikama			
Mlaznica i prirubnica		Cilindar	
			
Braon izoterma:	$T_{KTO} > 200 \text{ °C}$ (II KTO)	Braon izoterma:	Nije primenjivo
Žuta izoterma:	$70 \text{ °C} < T_{KTO} \leq 200 \text{ °C}$ (II KTO)	Žuta izoterma:	$70 \text{ °C} < T_{KTO} \leq 200 \text{ °C}$ (II KTO)
Zelena izoterma:	$65 \text{ °C} < T_{KTO} \leq 70 \text{ °C}$ (I KTO)	Zelena izoterma:	$65 \text{ °C} < T_{KTO} \leq 70 \text{ °C}$ (I KTO)
Plava izoterma:	$40 \text{ °C} < T_{KTO} \leq 65 \text{ °C}$ (bez KTO)	Plava izoterma:	$40 \text{ °C} < T_{KTO} \leq 65 \text{ °C}$ (bez KTO)
Komentar i zaključak inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama			
<p>Posmatrajući izoterme na IC slikama zaključuje se da na cilindru postoji rizik od nastanka II stepena KTO na gotovo svim njegovim površinama, izuzev u tankom pojasu na njegovoj bočnoj strani gde postoji rizik od nastanka I stepena KTO. Procenjeni rizik prema Guardmaster metodi je srednji, što iziskuje dodatne mere bezbednosti i zdravlja na radu. Jedna od predloženih mera jeste isticanje upozorenja na zaštitnim vratima mašine na jedinici za ubrizgavanje da u slučaju otvaranja zaštitnih vrata i uklanjanja nakupljenog materijala na mlaznici cilindra postoji rizik od nastanka II stepena KTO, te je u tom slučaju neophodno korišćenje zaštitnih rukavica.</p>			

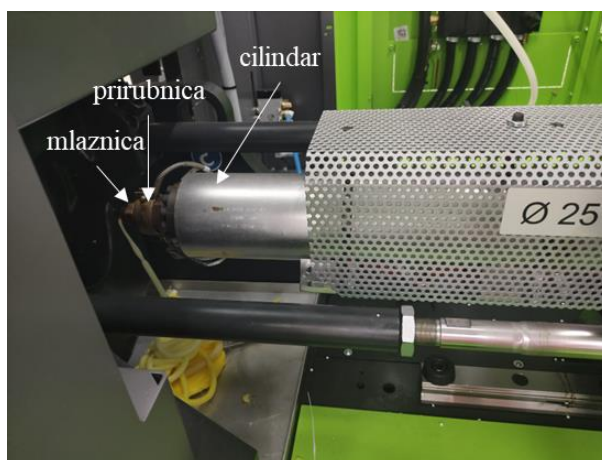
Verifikacija inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama mašina sprovedena je za mašinu za injekciono presovanje ENGEL Victory 50. U uputstvu proizvođača mašine su, kako se nalaže prema Direktivi o mašinama 2006/42/EZ, naglašeni preostali rizici u vezi sa toplotnim opasnostima zbog mogućnosti dodira sa vrućim rastopljenim materijalom i vrućim površinama mašine. Razlog tome je što mašina za injekciono presovanje ili kako se još naziva mašina za ubrizgavanje ili brizganje, tokom rada stvara visoke temperature, te je u skladu sa tim označena sa oznakama za bezbednost i zdravlje na radu, a to su:

- oznaka za upozorenje od visokih temperatura u zoni cilindra;
- oznaka za upozorenje od rastopljenog materijala u zoni cilindra;
- oznaka za obavezno korišćenje zaštitnih rukavica u zoni cilindra;
- oznaka za obavezno korišćenje opreme za zaštitu lica u zoni cilindra i alata za injekciono presovanje.

Uputstvo takođe naglašava da postoji opasnost od KTO zbog blizine vrućeg cilindra u slučaju kada usled nedovoljnog preliminarnog sušenja ili dekompozicije određenih plastičnih materijala dođe do nekontrolisanog isticanja rastopljenog materijala, odnosno vruće plastične mase kroz mlaznicu ili prirubnicu cilindra. Ovo dovodi do toga da mlaznica ne može u potpunosti da se nasloni na alat za

injekciono presovanje, te je istu potrebno očistiti kako upravljački uređaj ne bi detektovao nepravilnu poziciju kontakta mlaznice. Iako se cilindar nalazi zatvoren unutar jedinice za ubrizgavanje, u opisanom slučaju, neophodno je otvoriti zaštitna vrata i rukom ukloniti višak nakupljenog materijala, tako da postoji velika verovatnoća nenamernog kontakta sa vrućim spoljašnjim metalnim površinama cilindra. Uzevši u obzir da je najviša temperatura mlaznice 200 °C i više, jasno je da postoji evidentan rizik od KTO koji u ovom slučaju nije kvantifikovan i kao takav je naveden u preostalim rizicima od toplotnih opasnostima mašine.

Kako se inovativna metoda PR od KTO sprovodi samo za relevantne vruće metalne površine mašine u obzir je uzet samo cilindar, odnosno njegovi delovi sa kojima se može doći u kontakt, a to su mlaznica, prirubnica i cilindar (Slika 7.1).



Slika 7.1 Cilindar mašine za injekciono presovanje

U skladu sa algoritmom inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama prikazanim na Slici 6.1 prvi korak jeste opis vruće metalne površine. Zaključeno je da je cilindar izrađen od čelika, bez premaza i izmerena je veličina metalne površine sa kojom se može doći u kontakt, a koja je manja od 0,0346 m².

U drugom koraku određena je emisivnost vruće metalne površine, gde je korišćen linearni regresioni model za konstrukcioni čelik (jednačina 5.4), pri čemu je korišćena površinska hrapavost za brušeni čelik 0,63 μm i temperatura mlaznice 200 °C. Izračunata emisivnost iznosi 0,20. Tokom merenja temperature IC kamerom postavljen je termopar na mlaznicu, prirubnicu i cilindar. Pokazano je da emisivnost na IC kameri mora biti podešena na 0,50 za mlaznicu i prirubnicu cilindra kako bi IC kamera merila iste vrednosti temperatura kao termopar. Razlog tome jeste što su mlaznica i prirubnica cilindra bile prekrivene naslagama ulja, što je dovelo do povećanja njihove emisivnosti i nemogućnosti primene linearnog regresionog modela za konstrukcioni čelik. Dakle, emisivnost je u konkretnom slučaju morala biti određena *in situ* metodom opisanom u poglavlju 4.4.4 pomoću termoparova. Na čistom delu cilindra IC kamera je sa podešenom emisivnošću 0,20 dala odlične rezultate u poređenju sa termoparom.

Treći korak jeste određivanje perioda kontakta, gde je ranije objašnjeno da zbog toga što se cilindar nalazi u jedinici za ubrizgavanje koja je zatvorena zaštitnim vratima ne postoji mogućnost kontakta sa cilindrom, osim u slučaju kada je potrebno ukloniti višak nakupljenog materijala sa

mlaznice. Kontakt sa vrućom metalnom površinom cilindra u ovom slučaju može biti samo nenameran, jer se ne očekuje da su temperature na mlaznici, prirubnici i cilindru toliko visoke da mogu dovesti do nastanka KTO. Iz Tabele 2.5 usvaja se period kontakta, $D_{KTO} = 1$ s, zbog ograničenja u pokretima usled pozicije cilindra u jedinici za ubrizgavanje.

U četvrtom koraku temperatura vruće metalne površine je izmerena IC kamerom i termoparovima. Termoparovi su poslužili samo za određivanje emisivnosti mlaznice, prirubnice i cilindra, dok je merenje temperature istih sprovedeno pomoću IC kamere. U ovom delu su prikazane dve IC slike, jedna mlaznice i prirubnice i druga cilindra. Najviša temperatura je izmerena na prirubnici cilindra i iznosi oko 240 °C, dok je najviša temperatura cilindra bila oko 114 °C, sa najnižom izmerenom temperaturom oko 64 °C.

U petom koraku određen je stepen KTO pomoću Tabele 6.4. Iz Tabele 6.4 se vidi da pri periodu kontaktu 1 s:

- KTO ne može nastati ukoliko je $T_{KTO} \leq 65$ °C;
- I stepen KTO može nastati ukoliko je 65 °C < $T_{KTO} \leq 70$ °C;
- II stepen KTO može nastati ukoliko je $T_{KTO} > 70$ °C.

Iako temperature na cilindru prelaze 200 °C, pri vrlo kratkom periodu kontaktu od 1 s ne može doći do potpune destrukcije derma, što je glavna karakteristika III stepena KTO. Za to je neophodan duži period kontakta od najmanje 10 s (Tabela 6.4).

U šestom koraku se na osnovu Tabele 6.2 određuje težina KTO. Iz Tabele 6.2 se vidi da je vruća metalna površina manja od 0,0346 m² i u kombinaciji sa II stepenom KTO može dovesti samo do nastanka lake KTO. Dakle, iako je u pitanju II stepen KTO zbog relativno male površine sa kojom se može doći u kontakt ne može nastati teška telesna povreda ili kako je u uputstvu proizvođača navedeno teška opekotina. Podsećanja radi, površina od 0,0346 m² približno odgovara površini kvadrata stranica 190 mm, što prema ABA nije dovoljno da bi KTO bilo kog stepena prouzrokovala srednju, a ponajmanje tešku KTO.

Sedmi korak podrazumeva kvantifikaciju nivoa rizika od KTO gde su istovremeno prikazane dve kombinovane metode, Guardmaster i PILZ. PILZ i Guardmaster metode se preporučuju za procenu rizika kod mašine, s tim da je PILZ metoda više primenjiva u slučaju kada je nekoliko osoba istovremeno izloženo riziku od KTO.

Guardmaster metoda je pokazala da postoji srednji rizik od KTO na cilindru, dok je PILZ metoda pokazala da je rizik od KTO na cilindru nizak. Rizik od KTO je prema Guardmaster metodi viši od procenjenog rizika prema PILZ metodi. Prema saznanjima, u praksi se dešavalo da se rukovalac mašine slučajno opeče spoljašnjim delom šake na cilindar i da oporavak od KTO bez medicinske pomoći traje i po nedelju dana. S obzirom na period oporavka jasno je da je u pitanju II stepen KTO i da iako spada u laku KTO zbog veličine vruće metalne površine, u kombinaciji sa frekvencijom izloženosti na nedeljnom nivou i vrlo verovatnim nenamernim kontaktom sa vrućom metalnom površinom cilindra u već opisanom slučaju, usvojiće se prema Guardmaster metodi, da je ipak u pitanju srednji rizik od KTO.

Osmi korak obuhvata prikazivanje zona rizika od KTO na delovima cilindra mašine za injekciono presovanje. Na IC slikama prikazane su četiri izoterme sa sledećim opsegom temperatura:

- braon izoterma za prikaz $T_{KTO} > 200$ °C;
- žuta izoterma za prikaz 70 °C < $T_{KTO} \leq 200$ °C;

- zelena izoterma za prikaz $65\text{ °C} < T_{KTO} \leq 70\text{ °C}$;
- plava izoterma za prikaz $40\text{ °C} < T_{KTO} \leq 65\text{ °C}$.

Posmatrajući izoterme na IC slikama zaključuje se da na cilindru postoji rizik od nastanka II stepena KTO na gotovo svim njegovim površinama, izuzev u tankom pojasu na njegovoj bočnoj strani gde postoji rizik od nastanka I stepena KTO. Inovativna metoda PR od KTO za cilindar mašine za injekciono presovanje kvantifikovala je i pokazala da postoji srednji rizik od KTO i to najviše na mlaznici i prirubnici cilindra. Zbog veličine vruće metalne površine sa kojom se u ovom slučaju može doći u kontakt ne postoji opasnost od teških KTO, kako je navedeno u uputstvu proizvođača. Iako srednji rizik spada u prihvatljiv rizik, neophodno je preduzeti dodatne mere bezbednosti i zdravlja na radu za njegovo eliminisanje ili svođenje na najmanju moguću meru, što se u konkretnom slučaju može postići isticanjem upozorenja na zaštitnim vratima jedinice za ubrizgavanje. Dakle, u slučaju otvaranja zaštitnih vrata i uklanjanja nakupljenog materijala na mlaznici cilindra postoji rizik od nastanka II stepena KTO, te je u tom slučaju neophodno korišćenje zaštitnih rukavica.

S obzirom na to da se inovativna metoda PR od KTO bavi samo vrućim metalnim površinama proizvoda i mašina kod kojih postoji opasnost od KTO ovde nisu uzete u obzir njene premazane površine koje ne predstavljaju toplotnu opasnost. Temperature premazanih površina mašine za injekciono presovanje u toku rada mašine nisu više od 40 °C , što znači da ne mogu dovesti do nastanka KTO ni u slučaju najdužeg perioda kontakta 8 h kako je navedeno u Tabeli 6.4. Međutim, radi verifikacije inovativne metode PR od KTO u nastavku je objašnjen način određivanja T_{KTO} za premazane metalne površine.

Premazane spoljašnje površine mašine su izrađene od lima premazanog lakom. Kontaktnim uređajem za merenje debljine premaza izmerena je debljina od $150\text{ }\mu\text{m}$. Ovo znači da se vrednosti T_{KTO} iz Tabele 6.2 moraju uvećati shodno vrednostima prikazanim u Tabeli 6.5 za metalne površine premazane lakom. Pored debljine premaza bitno je znati i o kom periodu kontakta je reč. Uzevši u obzir da je prema Tabeli 2.5 najkraći period kontakta za nameran kontakt 4 s, a za nenameran kontakt 0,5 s, to znači da je uvećanje T_{KTO} iz Tabele 6.4 za $D_{KTO} = 4\text{ s}$ 8 °C , a za $D_{KTO} = 0,5\text{ s}$ 31 °C . Ovi podaci za uvećanje temperature u °C se nalaze u Tabeli 6.5 za lakirane premazane površine debljine $150\text{ }\mu\text{m}$.

Primenjeno u konkretnom slučaju ovo znači da za nepremazane metalne površine za period kontakta 0,5 s (Tabela 6.4):

- KTO neće nastati ako je $T_{KTO} \leq 67\text{ °C}$;
- nastaće I stepen KTO ako je $67\text{ °C} < T_{KTO} \leq 70\text{ °C}$;
- nastaće II stepen KTO ako je $T_{KTO} > 70\text{ °C}$.

Odnosno, za metalne površine premazane lakom debljine $150\text{ }\mu\text{m}$ pri istom periodu kontakta 0,5 s shodno uvećanju od 31 °C , važi da:

- KTO neće nastati ako je $T_{KTO} \leq 98\text{ °C}$;
- nastaće I stepen KTO ako je $98\text{ °C} < T_{KTO} \leq 101\text{ °C}$;
- nastaće II stepen KTO ako je $T_{KTO} > 101\text{ °C}$.

Isti princip važi za period kontakta 4 s gde za nepremazane metalne površine važi da:

- KTO neće nastati ako je $T_{KTO} \leq 58\text{ °C}$;
- nastaće I stepen KTO ako je $58\text{ °C} < T_{KTO} \leq 65\text{ °C}$;
- nastaće II stepen KTO ako je $T_{KTO} > 65\text{ °C}$.

Odnosno, za metalne površine premazane lakom debljine 150 μm pri istom periodu kontakta 4 s shodno uvećanju od 8 $^{\circ}\text{C}$, važi da:

- KTO neće nastati ako je $T_{KTO} \leq 66 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- nastaje I stepen KTO ako je $66 \text{ }^{\circ}\text{C} < T_{KTO} \leq 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- nastaje II stepen KTO ako je $T_{KTO} > 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Potrebno je naglasiti da navedena uvećanja T_{KTO} nisu potvrđena, nego samo preuzeta iz standarda EN ISO 13732-1:2006. Prema standardu premazana metalna površina treba da bude na višoj temperaturi od nepremazane metalne površine da bi pri istom periodu kontakta dovela do nastanka KTO. Primera radi, standard navodi da za 0,5 s sigurno nastaje KTO pri temperaturi 73 $^{\circ}\text{C}$ (Slika 2.7), ako se doda 31 $^{\circ}\text{C}$, koliko iznosi uvećanje za lakirane metalne površine debljine 150 μm (Slika 2.8), to znači da će KTO nastati za 0,5 s ukoliko je temperatura lakirane metalne površine debljine 150 μm 104 $^{\circ}\text{C}$. Sa druge strane, standard navodi da za 4 s sigurno nastaje KTO pri temperaturi 58 $^{\circ}\text{C}$ (Slika 2.7), ako se doda 8 $^{\circ}\text{C}$ koliko je uvećanje za lakirane metalne površine debljine 150 μm , to znači da će KTO nastati za 4 s ukoliko je temperatura lakirane metalne površine debljine 150 μm 66 $^{\circ}\text{C}$. Ovi rezultati su slični rezultatima inovativne metode PR od KTO, gde će pri periodu kontakta 0,5 s doći do nastanka KTO kada je temperatura lakirane metalne površine debljine 150 μm 98 $^{\circ}\text{C}$, a pri periodu kontakta 4 s kada je temperatura lakirane metalne površine debljine 150 μm 66 $^{\circ}\text{C}$. Dakle, inovativna metoda PR od KTO postavlja strožije zahteve u pogledu T_{KTO} za najkraće periode kontakta u odnosu na standard EN ISO 13732-1:2006.

8. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

Procena rizika od KTO izazvanih vrućim površinama prema standardu EN ISO 13732-1:2006 ima svoj praktični značaj kod projektovanja mašina i proizvoda, ali samo u smislu definisanja najviših dozvoljenih temperatura površina pri kojima neće doći do nastanka KTO. Ukoliko zbog funkcionalnosti mašine ili proizvoda ne postoji mogućnost eliminisanja vrućih površina, kao što je to slučaj sa grejnom pločom pegle, preostali rizici moraju biti procenjeni i obavezno navedeni u uputstvu mašine ili proizvoda. Da bi se procenio rizik od KTO neophodno je definisati sve faktore rizika, odnosno verovatnoću neželjenog događaja, učestanost izloženosti vrućoj površini i težinu povrede, odnosno težinu KTO. Težina KTO zavisi od stepena KTO i procenta opečene površine u odnosu na UPT. Za potrebe definisanja graničnih uslova za metalne površine napravljena je Tabela 6.4 koja objedinjuje podatke iz prvih empirijskih studija u ovoj oblasti, zatim standarda EN ISO 13732-1:2006 i novijih istraživanja. Tabela 6.4 predstavlja osnovu za definisanje stepena KTO za metalne površine i zajedno sa matricom prikazanom u Tabeli 6.2 služi za određivanje težine KTO u zavisnosti od stepena KTO i veličine vruće površine. Tabela 6.2 je formirana izračunavanjem odgovarajućih procentualnih udela od prosečne UPT kod odraslog čoveka od $1,73 \text{ m}^2$ prema ABA kriterijumima, za težinu opekotine. Ovim su dobijene veličine opečene površine u m^2 koje u zavisnosti od stepena KTO mogu dovesti do nastanka lake, srednje ili teške KTO. Veličina opečene površine je uslovljena veličinom vruće površine, koja se takođe može izraziti u m^2 , te je time uspostavljena veza između navedenih površina. Inkorporiranjem veličine vruće površine i stepena KTO u težinu KTO izražen je ne samo faktor rizika koji je neophodan za kvantifikaciju rizika od KTO, nego je za razliku od standarda EN ISO 13732-1:2006 uzet u obzir stepen KTO i veličina metalne površine. Time je potvrđena prva hipoteza istraživanja, odnosno:

H1 – Inovativna metoda procene rizika od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama omogućava kvantifikaciju rizika od KTO.

ICT kao i svaka metoda merenja temperature ima prednosti i nedostatke koji definišu njen opseg primene. Metali zbog svoje visoko reflektivne površine odbijaju velik deo IC zračenja, zbog čega greške merenja temperature IC kamerom mogu biti znatne, ukoliko se ne podesi odgovarajuća emisivnost. Kao što se iz aktuelnog stanja u oblasti emisivnosti metala, odnosno metalnih površina može zaključiti, najčešći način određivanje emisivnosti jeste eksperimentalno zbog tendencije promene u zavisnosti od mnogobrojnih faktora. Kako se inovativna metoda PR od KTO bazira na merenju temperature vrućih metalnih površina IC kamerom, emisivnost je morala biti ispitana kako bi se dale smernice za njeno određivanje, u slučaju kada ne postoje adekvatni literaturni podaci. Emisivnost je posebno ispitana za premazane i nepremazane metalne površine i metalne površine izrađene od nerđajućeg čelika. U slučaju nepremazanih metalnih površina, izuzev ukoliko su u pitanju glatke nepremazane metalne površine, za određivanje emisivnosti se mogu koristiti linearni regresioni modeli za aluminijum AlSi1MgMn, konstrukcioni čelik S235 i mesing CuZn37. Treba obratiti pažnju da se u ovom slučaju navedeni linearni regresioni modeli mogu koristiti za temperature od $50 \text{ }^\circ\text{C}$ do $200 \text{ }^\circ\text{C}$ i površinske hrapavosti od $1,07 \text{ }\mu\text{m}$ do $1,77 \text{ }\mu\text{m}$ za aluminijum AlSi1MgMn, od $0,63 \text{ }\mu\text{m}$ do $3,71 \text{ }\mu\text{m}$ za konstrukcioni čelik S235 i od $1,23 \text{ }\mu\text{m}$ do $3,92 \text{ }\mu\text{m}$ za mesing CuZn37. U slučaju da su u

pitanju premazane metalne površine, emisivnost zavisi isključivo od vrste premaza, a ne od temperature, debljine i boje premaza, kao ni od vrste metala od koje je izrađena metalna površina. Za slučaj nepremazanih glatkih metalnih površina od nerđajućeg čelika emisivnost se može odrediti iz Tabele 5.18. U koloni NRČ10 prikazana je emisivnost nerđajućeg čelika u zavisnosti od temperature kada su u pitanju deblje metalne površine izrađene od nerđajućeg čelika, a u koloni NRČ1 prikazana je emisivnost nerđajućeg čelika u zavisnosti od temperature kada su u pitanju limene metalne površine. Davanjem smernica za određivanje emisivnosti metalnih površina omogućeno je tačno merenje temperature primenom ICT umesto termoparova, što potvrđuje drugu hipotezu istraživanja, odnosno:

H2 – ICT se može koristiti za tačno merenje temperature vrućih metalnih površina.

Nakon merenja temperature vruće metalne površine IC kamerom, na IC slikama se mogu prikazati zone rizika od nastanka različitog stepena KTO. Iz Tabele 6.4 moguće je na osnovu perioda kontakta odrediti raspone temperatura koje neće dovesti do nastanka KTO ili koje će dovesti do nastanka različitog stepena KTO. Izabrani rasponi temperatura iz Tabele 6.4 se mogu predstaviti na IC slici pomoću tzv. izotermi, primenom programa *GuideIrAnalyser*. Preporuka je da boje izotermi odgovaraju bojama stepena KTO iz Tabele 6.4, odnosno da plava izoterma predstavlja zonu koja neće dovesti do nastanka KTO, zelena izoterma predstavlja zonu koja će dovesti do nastanka I stepena KTO, žuta izoterma predstavlja zonu koja će dovesti do nastanka II stepena KTO i crvena izoterma predstavlja zonu koja će dovesti do nastanka III stepena KTO. Prikazivanjem zona rizika od KTO omogućena je vizualizacija rizika od KTO i potvrđena treća hipoteza, odnosno:

H3 – Inovativna metoda procene rizika od KTO omogućava prikaz zona rizika od KTO na vrućim metalnim površinama.

Inovativna metoda PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama se može primeniti kod projektovanja mašina i proizvoda, ali i radnih mesta kod kojih postoje ovakve površine. Predložena metoda može biti unapređena kroz dalja istraživanja, a koja obuhvataju sledeće ključne pravce.

S obzirom na to da je sprovođenje eksperimenata na živom tkivu neetičko, naročito kada su je u pitanju nanošenje III stepena KTO, predlaže se pravljenje simulacija ljudskog tkiva na kojem bi se ispitaio uticaj ne samo graničnih uslova za nastanak KTO, nego i pritiska kojim bi KTO bile nanošene, vrste materijala, itd. Na ovaj način bi se kompletirala baza graničnih uslova za nastanak KTO za različite grupe materijala u zavisnosti od T_{KTO} , D_{KTO} i sile kojom bi se nanosila KTO.

Inovativna metoda PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama primenjiva je kod odraslih osoba, zbog usvojene vrednosti za UPT od $1,73 \text{ m}^2$. Kako deca često stradaju od opekotina zadobijenih kod kuće, naročito usled kontakta sa vrućim površinama pegle, šporeta, ringli, itd. da bi se metoda mogla primeniti i u ovom slučaju, neophodno je prilagoditi matricu za određivanje težine KTO u odnosu na UPT kod dece.

Takođe, planiran je i razvoj programskog rešenja kojim bi se omogućila automatizacija procedure inovativne metode PR od KTO izazvanih vrućim metalnim površinama.

LITERATURA

- [1] Schiefer JL, Perbix W, Grigutsch D, Zinser M, Demir E, Fuchs PC, Schulz A. 2016. Etiology, incidence and gender-specific patterns of severe burns in a German Burn Center – Insights of 25 years. *Burns* 42(3): 687–696. doi: 10.1016/j.burns.2015.10.031.
- [2] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/HSW_N2_07_custom_2936278/default/table?lang=en (Sep. 11, 2022)
- [3] Jovanović M. 2012. Komparativna analiza primene preparata sa nanočesticama srebra i srebrosulfadiazina u lokalnom lečenju opekotina na svinjskom modelu. Doktorska disertacija, Medicinski fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad
- [4] Mian MA, Mullins RF, Alam B, Brandigi C, Friedman BC, Shaver JR, Hassan Z. 2011. Workplace – related burns. *Ann Burns Fire Disasters* 24(2): 89–93. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3230153/> (Sep. 11, 2022)
- [5] Evers LH, Bhavsar D, Mailänder P. 2010. The biology of burn injury. *Exp Dermatol.* 19(9):777-83. doi: 10.1111/j.1600-0625.2010.01105.x.
- [6] Quinney B, McGwin G, Cross J, Valent Francesca, Taylor Allison, Rue L. 2002. Thermal Burn Fatalities in the Workplace, United States, 1992 to 1999. *The Journal of Burn Care and Rehabilitation* 23(5): 305–310. doi: 10.1097/00004630-200209000-00001.
- [7] <https://www.cecimo.eu/> (Sep. 11, 2022)
- [8] Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on machinery, and amending Directive 95/16/EC (recast) (Text with EEA relevance)
- [9] Pravilnik o bezbednosti mašina ("Sl. glasnik RS", br. 58/2016)
- [10] Božanić D, Bakić Z. 2012. Priručnik za primenu Pravilnika o bezbednosti mašina. Ministarstvo finansija i privrede Republike Srbije, Beograd. ISBN: 978–86–88295–15–4
- [11] EN ISO 13732-1:2006 Ergonomics of the thermal environment – Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces – Part 1: Hot surfaces
- [12] Rathore M, Kapuno R. 2011. Engineering heat transfer. Sudbury, Canada: Jones & Bartlett Learning, LLC.
- [13] Tačević Z. 1998. Termičke povrede. In: *Urgentna i ratna hirurgija*, ed. T. Ražnatović, ch. 9, 109–120. Beograd: Velarta.
- [14] Vlahović N, Vlahović A. 2012. Fizikalna terapija kod dečijih opekotina. *Med. Rev.* 4(4): 447–450.
- [15] Stranjanac V, Trajković S, Bojičić-Petrov I, Milojević I, Petković M, Simić D. 2012. Anesteziološki pristup detetu sa povredom glave i opekotinama. *Serbian Journal of Anesthesia and Intensive Therapy* 34(3-4): 211–7.

- [16] Tasić M. 2007. *Sudska medicina*. Novi Sad: ZMAJ.
- [17] Spencer J, Lucchesi Lydia, Bisignano C, et al. 2020. Epidemiology of injuries from fire, heat and hot substances: global, regional and national morbidity and mortality estimates from the Global Burden of Disease 2017 study. *Injury Prevention* 26(Suppl 2): i36–i45. doi: 10.1136/injuryprev-2019-043299.
- [18] Schaefer TJ, Tannan SC. Thermal Burns. 2022. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK430773/> (Sep. 11, 2022)
- [19] Parsons K. 2014. *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*, 3rd ed. Boca Raton, USA: CRC Press.
- [20] Hadžić Ž. 1998. Termičke povrede u ratnim uslovima. In: *Urgentna i ratna hirurgija*, ed. T. Ražnatović, ch. 10, 121–146. Beograd: Velarta.
- [21] Glavan N, Bosak A, Jonjić N. 2015. Opekline kod djece i njihovo liječenje. *Medicina Fluminensis* 51(2): 254–260. Available from: <https://hrcak.srce.hr/139470> (Sep. 11, 2022)
- [22] Duplančić B, Ninčević Ž, Perković M, Utrobičić I, Došenović Svjetlana, Vučemilović H, Kovač R, Periš F. 2020. Uloga Parklandske formule u liječenju opsežne duboke opekline – prikaz bolesnika. *Liječnički vjesnik* 142 (1): 24–28. doi: 10.26800/LV-142-1-2-7
- [23] Aginčić A, Čvorak A, Fazlić A. 2007. Vodič za opekotine. Ministarstvo zdravstva Kantona Sarajevo, Institut za naučnoistraživački rad i razvoj Kliničkog centra Univerziteta u Sarajevu. Available from: https://mz.ks.gov.ba/sites/mz.ks.gov.ba/files/MZ-vodic_za_opekotine.pdf (Sep. 11, 2022)
- [24] Opekotine i smrzotine. 2014. Poljoprivredni Fakultet, Departman za veterinarsku medicinu, Univerzitet u Novom Sadu. Available from: <http://www.nsveterina.edu.rs/oldsite/sites/default/files/Opekotine%20i%20smrzotine.pdf> (Sep. 11, 2022)
- [25] Panajotović R, Panajotović M, Panajotović L. 2011. Povrede električnom strujom. *Zdravstvena zaštita* 40(6): 79–88. doi: 10.5937/ZZ1106079P.
- [26] Brkić E. 2016. Opekline. Završni rad, Odjel za Biomedicinske znanosti, Sveučilište Sjever, Varaždin
- [27] Singer A, Berruti L, Thode H, McClain, S. 2000. Standardized Burn Model Using a Multiparametric Histologic Analysis of Burn Depth. *Academic Emergency Medicine* 7(1): 1–6. doi: 10.1111/j.1553-2712.2000.tb01881.x
- [28] Kozarski J. 2020. Opekotine – etiologija, patofiziologija, lečenje. Monografije naučnih skupova Akademije medicinskih nauka Srpskog lekarskog društva 9(2): 75–95. Available from: <http://akademija.sld.org.rs/global/pdf/Monografije2020vol9br2.pdf> (Sep. 11, 2022)
- [29] Popović N, Marković M, Sabljak V, Mandraš A, Bojičić-Petrov I, Milošević B. 2013. Nadoknada i izbor tečnosti kod opekotina. *Serbian Journal of Anesthesia and Intensive Therapy* 35(3-4): 175–180.
- [30] Hettiaratchy S, Papini R. Initial management of a major burn: II – assessment and resuscitation. 2004. *BMJ* 329(7457): 101–103. doi: 10.4103/0970-0358.63962

- [31] Agarwal P, Sahu S. 2010. Determination of hand and palm area as a ratio of body surface area in Indian population. *Indian J. Plast. Surg.* 43(1): 49–53. doi: 10.4103/0970–0358.63962.
- [32] <https://gsurgery.pdmu.edu.ua/storage/resources/docs/8hHTS6GKwu2NYXDQxOsXfHN4125LBjkQQEY8elxe.pdf> (Sep. 11, 2022)
- [33] https://new.meduniv.lviv.ua/uploads/repository/kaf/kaf_gensurgery/08.English_student/01_Medical/03_Guidlines/Burns–met.pdf (Sep. 11, 2022)
- [34] Jeschke M, Baar M, Choudhry M, Chung K, Gibran N, Logsetty S. 2020. Burn injury. *Nat. Rev. Dis. Prim.* 6(1): 1–25. doi: 10.1038/s41572–020–0145–5.
- [35] Vulović D, Stepić N. 2008. Importance of proper initial treatment of moderate and major burns. *Vojnosanitetski preglad* 65(4): 281–285. doi: 10.2298/VSP0804281V.
- [36] American College of Surgeons. 2014. Guidelines for Trauma Centers Caring for Burn Patients. In *Resources for Optimal Care of the Injured Patient*, ed. Rotondo M, Chris Cribari C, Smith S, ch 14, 100–106. Chicago, USA. ISBN 978–0–9846699–8–1.
- [37] American Burn Association/American College of Surgeons. 2007. Guidelines for the operation of burn centers. *J Burn Care Res.* 28(1): 41–134. doi: 10.1097/BCR.0b013e31802c8861.
- [38] Parsons K. 2014. Human Skin Contact with Hot, Moderate and Cold Surfaces. In: *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*, 3rd ed, ch. 17, 409–442. Boca Raton, USA: CRC Press.
- [39] Henriques FC, Moritz AR. 1947. Studies of Thermal Injury: I. The Conduction of Heat to and through Skin and the Temperatures Attained Therein. A Theoretical and an Experimental Investigation. *Am J Pathol.* 23(4): 530–549. PMID: 19970945; PMCID: PMC1934298.
- [40] Moritz AR, Henriques FC. 1947. Studies of Thermal Injury: II. The Relative Importance of Time and Surface Temperature in the Causation of Cutaneous Burns. *Am J Pathol.* 23(5): 695–720. PMID: 19970955; PMCID: PMC1934304.
- [41] Moritz AR. 1947. Studies of Thermal Injury: III. The Pathology and Pathogenesis of Cutaneous Burns. An Experimental Study. *Am J Pathol.* 23(6): 915–941. PMID: 19970971; PMCID: PMC1934331.
- [42] Sheu SY, Wang WL, Fu YT, Lin SC, Lei YC, Liao JH, Tang NY, Kuo TF, Yao CH. 2014. The pig as an experimental model for mid–dermal burns research. *Burns* 40(8): 1679–1688. doi: 10.1016/j.burns.2014.04.023.
- [43] Singer AJ, Taira BR, Anderson R, McClain SA, Rosenberg L. 2010. Does pressure matter in creating burns in a porcine model? *J Burn Care Res.* 31(4): 646–651. doi: 10.1097/BCR.0b013e3181e4ca73.
- [44] Siekmann H. 1989. Determination of maximum temperatures that can be tolerated on contact with hot surfaces. *Applied Ergonomics* 20(4): 313–317. doi: 10.1016/0003–6870(89)90197–X.
- [45] Siekmann H. Recommended maximum temperatures for touchable surfaces. *Appl. Ergon.* 21(4) : 69–73. doi: 10.1016/0003–6870(90)90076–A.

- [46] Bernard TE, Foley MF. 1993. Upper acceptable surface temperature for prolonged hand contact. *International Journal of Industrial Ergonomics* 11(1): 29–36. doi: 10.1016/0169–8141(93)90052–F.
- [47] Dewhirst MW, Viglianti BL, Lora–Michiels M, Hanson M, Hoopes PJ. 2003. Basic principles of thermal dosimetry and thermal thresholds for tissue damage from hyperthermia. *Int J Hyperthermia* 19(3): 267–294. doi: 10.1080/0265673031000119006.
- [48] Viglianti BL, Dewhirst MW, Abraham JP, Gorman JM, Sparrow EM. 2014. Rationalization of thermal injury quantification methods: application to skin burns. *Burns*. 40(5): 896–902. doi: 10.1016/j.burns.2013.12.005.
- [49] Greenhalgh DG, Lawless MB, Chew BB, Crone WA, Fein ME, Palmieri TL. 2004. Temperature threshold for burn injury: an oximeter safety study. *J Burn Care Rehabil.* 25(5): 411–415. doi: 10.1097/01.bcr.0000138295.63830.90.
- [50] Rakovac M. 2011. Središnja temperatura tijela u procjeni anaerobnog praga pri progresivnom testu opterećenja. Doktorska disertacija, Medicinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
- [51] Brink JA, Sheets PW, Dines KA, Etchison MR, Hanke CW, Sadove AM. 1986. Quantitative assessment of burn injury in porcine skin with high–frequency ultrasonic imaging. *Invest Radiol.* 21(8): 645–651. doi: 10.1097/00004424–198608000–00008.
- [52] Mazhar A, Saggese S, Pollins AC, Cardwell NL, Nanney L, Cuccia DJ. 2014. Noncontact imaging of burn depth and extent in a porcine model using spatial frequency domain imaging. *J Biomed Opt.* 19(8): 086019. doi: 10.1117/1.JBO.19.8.086019.
- [53] Lin YH, Huang CC, Wang SH. 2011. Quantitative assessments of burn degree by high–frequency ultrasonic backscattering and statistical model. *Phys. Med. Biol.* 56(3): 757–773. doi: 10.1088/0031–9155/56/3/014.
- [54] Branski LK, Mittermayr R, Herndon DN, Norbury WB, Masters OE, Hofmann M, Traber DL, Redl H, Jeschke MG. 2008. A porcine model of full–thickness burn, excision and skin autografting. *Burns* 34(8): 1119–1127. doi: 10.1016/j.burns.2008.03.013.
- [55] Venter NG, Monte–Alto–Costa A, Marques RG. 2015. A new model for the standardization of experimental burn wounds. *Burns* 41(3): 542–547. doi: 10.1016/j.burns.2014.08.002.
- [56] Nguyen JQ, Crouzet C, Mai T, Riola K, Uchitel D, Liaw LH, Bernal N, Ponticorvo A, Choi B, Durkin AJ. 2013. Spatial frequency domain imaging of burn wounds in a preclinical model of graded burn severity. *J Biomed Opt.* 18(6): 66010. doi: 10.1117/1.JBO.18.6.066010.
- [57] Gaines C, Poranki D, Du W, Clark R, Van Dyke M. 2013. Development of a porcine deep partial thickness burn model. *Burns* 39(2): 311–319. doi: 10.1016/j.burns.2012.06.011.
- [58] Ye H, De S. 2017. Thermal injury of skin and subcutaneous tissues: A review of experimental approaches and numerical models. *Burns* 43(5): 909–932. doi: 10.1016/j.burns.2016.11.014.
- [59] Martin NA, Falder S. 2017. A review of the evidence for threshold of burn injury. *Burns* 43(8): 1624–1639. doi: 10.1016/j.burns.2017.04.003.
- [60] Tatomir J. 2016. Procedure zdravstvene nege pacijenta sa opekotinskom traumom / Procedures health care of the patient with burns trauma. *Sestrin. Žurnal* 3(1): 48. doi: 10.7251/sez0116048t.

- [61] Andrews C. 2017. Validating the relationship between burn temperature, duration of exposure and tissue injury severity for scald burns. Ph.D. dissertation, Faculty of Medicine, The University of Queensland, Brisbane
- [62] Leach EH, Peters RA, Rossiter RJ. 1943. Experimental Thermal Burns, Especially the Moderate Temperature Burn. *Q. J. Exp. Physiol. Cogn. Med. Sci.* 32(1): 67–86. doi: 10.1113/expphysiol.1943.sp000875.
- [63] ASTM C1055-03:2009 Standard Guide for Heated System Surface Conditions that Produce Contact Burn Injuries. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [64] UL 60950-1:2019 Standard on Information Technology Equipment Safety. Canadian Standards Association, CAN/CSA–C22.2 No. 60950–1–07, MOD
- [65] Andrews Christine, Cuttle Leila. 2017. Comparing the reported burn conditions for different severity burns in porcine models: a systematic review. *International Wound Journal* 14(6): 1742–4801. doi: 10.1111/iwj.12786.
- [66] Raj PK. 2006. Hazardous heat. *Journal NFPA* 100:5 74–79.
- [67] Arora A, Medora NP, Pinnangudi B. 2015. Experimental Characterization of Burn Hazards. Exponent: Electrical Engineering and Computer Science, Newsletter 3:9. Available from: https://www.exponent.com/~media/newsletters/eecs/eecs-2015-v3/experimental_characterization_of_burn_hazards.pdf?la=en (Sep. 9, 2022)
- [68] Ghazy A. 2014. Modelling thermal skin burning in protective clothing. In: *Protective Clothing: Managing Thermal Stress*, ed. F. Wang, C. Gao, ch. 17, 435–455, Sawston, Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute.
- [69] Grozdanović M, Stojiljković E. 2013. Metode procene rizika. Fakultet zaštite na radu u Nišu. Niš.
- [70] Pravilnik o načinu i postupku procene rizika na radnom mestu i u radnoj okolini ("Sl. glasnik RS", br. 72/2006, 84/2006 – ispr., 30/2010 i 102/2015)
- [71] Zakon o bezbednosti i zdravlju na radu ("Sl. glasnik RS", br. 101/2005, 91/2015 I 113/2017 – dr. zakon)
- [72] Zakon o zdravstvenom osiguranju ("Sl. glasnik RS", br. 25/2019)
- [73] Radu LD. 2009. Qualitative, semi – quantitative and, quantitative methods for risk assessment: Case of the financial audit. *Analele Stiintifice ale Universitatii "Alexandru Ioan Cuza" din Iasi - Stiinte Economice (1954-2015)* 56(1): 643-657. Available from: https://econpapers.repec.org/article/aicjournal/y_3a2009_3av_3a56_3ap_3a643-657.htm (Sep. 9, 2022)
- [74] Duijm NJ. 2015. Recommendations on the use and design of risk matrices. *Safety Science* 76(12): 21–31. doi: 10.1016/j.ssci.2015.02.014.
- [75] Ristic D. 2013. A Tool for Risk Assessment. *Saf. Eng.* 3(3): 121–127. doi: 10.7562/SE2013.3.03.03.
- [76] Elmonstri M. 2014. Review of the Strengths and Weaknesses of Risk Matrices. *J. Risk Anal. Cris. Response* 4(1): 49–57. doi: 10.2991/jrarc.2014.4.1.6.

- [77] Staletović N, Kovačević S, Tucović N, Kovačević M. 2013. Methodological framework for risk assessment in the function of mining equipment maintenance and management IMS (QMS, AMS, EMS AND OHSAS) in mining companies. *Mining and Metallurgy Engineering Bor* (3): 135–158. doi: 10.5937/mmeb1303135S.
- [78] Tepić G. 2019. Razvoj metodološkog koncepta za upravljanje rizikom u sistemu opasnih materija. Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad
- [79] Mučenski V, Kecman N, Peško I, Bibić D, Vujkov A, Velkovski T. 2017. Occupational Health and Safety Risk Assessment for Demolition Processes in Construction. *Ergon. Int. J.* 1(2): 1–9. doi: 10.23880/EOIJ–16000112.
- [80] Kovačević N, Stojiljković A, Kovač M. 2019. Application of the matrix approach in risk assessment. *Oper. Res. Eng. Sci. Theory Appl.* 2(3): 55–64. doi: 10.31181/oresta1903055k.
- [81] Kulić L, Galjak M, Kulić S. 2016. Possibility of choice of methodology for risk assessment in the workplace and the working environment. *Zdr. Zast.* 45(4): 26–30. doi: 10.5937/ZZ1604026K.
- [82] Stanković M, Stanković V. Comparative Analysis of Methods for Risk Assessment – Kinney and Auva. *Saf. Eng.* 3(3): 129–136. doi: 10.7562/SE2013.3.03.04.
- [83] Staletović N, Kovačević S, Kovačević M. 2014. Development the model of assessment the OH&S risks for the work place driller in the process of geological exploratory drilling. *Min. Metall. Eng. Bor* (3): 105–140. doi: 10.5937/mmeb1403105s.
- [84] Stefanović V. 2019. Modelovanje faktora rizika na radnim mestima u proizvodnim procesima sa pretežno ženskom radnom snagom. Doktorska disertacija, Tehnički fakultet u Boru, Univerzitet u Beogradu, Bor.
- [85] <https://www.pilz.com/en-INT/services/machinery-safety/risk-assessment> (Sep. 11, 2022)
- [86] <https://www.aihs.org.au/sites/default/files/Pilz%20Introduction%20to%20Risk%20Assessment.pdf> (Sep. 11, 2022)
- [87] Davidović B, Nikolić M. 2010. Pristup proceni i smanjenjenju rizika u radu sa autodizalicama prema zahtevima OHSAS–a. In *Proc. 37. Nacionalna konferencija o kvalitetu*, 6. Kragujevac, 19–21. maja. Available from: <https://www.cqm.rs/2010/37.html> (Sep. 9, 2022)
- [88] Macdonald DM, Mackay S. 2004. *Practical Machinery Safety*. Elsevier. ISBN 9780750662703.
- [89] Minkina W. 2021. How Infrared Radiation Was Discovered – Range of This Discovery and Detailed, Unknown Information. *Appl. Sci.* 11(21): 14. doi: 10.3390/app11219824.
- [90] Mandić G. 2006. Osnovni Principi Infracrvene Termografije / Basic Principles of Infrared Thermography. *Integritet i vek Konstr.* 6(1–2): 15–23. Available from: <http://divk.inovacionicentar.rs/ivk/ivk06/ivk0601conts.html> (Sep. 9, 2022)
- [91] Lanc Z, Štrbac B, Hadžistević M. 2014. Pregled eksperimentalnih tehnika za određivanje faktora emisivnosti. Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Edicija: „Tehničke nauke – Zbornici“ (4): 733-736. ISSN 0350-428X. Available from: <http://www.ftn.uns.ac.rs/ojs/index.php/zbornik/issue/view/9/broj%2004%2014> (Sep. 9, 2022)

- [92] Petrović K. 2010. Infracrvena termografija (termovizija) pravi izbor za redovno održavanje. Mjerna i regulacijska tehnika, Kem. Ind. 65(1-2): 110–113. Available from: <https://hrcak.srce.hr/file/222865> (Sep. 9, 2022)
- [93] Michalski L, Eckersdorf K, Kucharski J, McGhee J. 2001. Temperature Measurement, 2nd ed. John Wiley and Sons, Ltd. ISBN:9780471867791. Online ISBN:9780470846131. doi:10.1002/0470846135
- [94] Krešák J, Peterka P, Kropuch S, Novák L. 2014. Measurement of tight in steel ropes by a mean of thermovision. Measurement 50(1): 93–98. doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2013.12.026.
- [95] Kosec B, Karpe B, Budak I, Ličen M. 2012. Efficiency and quality of inductive heating and quenching of planetary shafts. Metalurgija 51(1): 71–74. Available from: <https://hrcak.srce.hr/file/105949> (Sep. 9, 2022)
- [96] Bagavathiappan S, Lahiri BB, Saravanan T, Philip J, Jayakumar T. 2013. Infrared thermography for condition monitoring – A review. Infrared Phys. Technol. 60(1): 35–55. doi: 10.1016/J.INFRARED.2013.03.006.
- [97] Florez–Ospina JF, Benitez–Restrepo HD. 2015. Toward automatic evaluation of defect detectability in infrared images of composites and honeycomb structures. Infrared Phys. Technol. 71(1): 99–112. doi: 10.1016/J.INFRARED.2015.01.029.
- [98] Mohr G, Nowakowski S, Altenburg SJ, Maierhofer C, Hilgenberg K. 2020. Experimental Determination of the Emissivity of Powder Layers and Bulk Material in Laser Powder Bed Fusion Using Infrared Thermography and Thermocouples. Metals 10(11): 1546. doi: 10.3390/met10111546.
- [99] Ristić S, Polić–Radovanović S, Popović–Živančević M, Jegdić B. 2011. Some examples of thermography application in detecting earthquake damages to buildings of cultural heritage protection. Mater. i Konstr. 54(3): 83–96. Available from: <http://scindeks.ceon.rs/article.aspx?artid=0543-07981103083R&lang=en> (Sep. 9, 2022)
- [100] Polić–Radovanović S, Ristić S, Popović–Živanović M, Jegdić B. 2011. Thermographic diagnosis of objects to cultural heritage protection. Tehnička dijagnostika 10(2): 33–40. Available from: <http://scindeks.ceon.rs/article.aspx?artid=1451-19751102033P> (Sep. 9, 2022)
- [101] Milovanović B. 2013. Karakterizacija oštećenja armiranog betona primjenom metode infracrvene termografije. Doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
- [102] Bergman TL, Lavine AS, Incropera FP, DeWitt DP. 2011. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th ed. John Wiley and Sons, Ltd. ISBN 0470501979, 9780470501979.
- [103] Minkina W, Dudzik S. 2009. Infrared Thermography: Errors and Uncertainties. John Wiley and Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-68224-1.
- [104] Stanojević J. 2020. Razvoj nehlađenog infracrvenog detektora na bazi olovo selenida. Doktorska disertacija, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad
- [105] Vollmer M, Möllmann KP. 2018. Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications, 2nd ed. John Wiley and Sons, Ltd. ISBN: 978-3-527-41351-5.

- [106] Iniewski K. (Ed.). 2013. *Smart Sensors for Industrial Applications*, 1st ed. CRC Press. doi: 10.1201/b14875.
- [107] Glavaš H, Józsa L, Barić T. 2016. Infrared thermography in energy audit of electrical installations. *Teh. Vjesn.* 23(5): 1533–1539. doi: 10.17559/TV–20150702185559.
- [108] Usamentiaga R, Venegas P, Guerediaga J, Vega L, Molleda J, Bulnes FG. 2014. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors (Switzerland)* 14(7): 12305–12348. doi: 10.3390/S140712305.
- [109] ASTM C1060–11a Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2015.
- [110] <https://www.optotherm.com/emissivity> (Sep. 11, 2022)
- [111] Ivanov GV, Ivanov VG. 2013. Temperature and emissivity determination of small-size long-range object's using staring Thermovision Cameras. *Infrared Physics & Technology* 60(1): 161–165. doi: 10.1016/j.infrared.2013.04.009.
- [112] Schreivogel P, Pfitzner M. 2015. Optical convective heat transfer measurements using infrared thermography and frequency domain phosphor thermometry. *Int. J. Heat Mass Transf.* 82(1): 299–308. doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2014.11.025.
- [113] Švantner M, Honnerová P, Veselý Z. 2016. The influence of furnace wall emissivity on steel charge heating. *Infrared Phys. Technol.* 74(1): 63–71. doi: 10.1016/j.infrared.2015.12.001.
- [114] Vallero D. 2014. *Fundamentals of Air Pollution*, 5th ed. Academic Press. ISBN 9780124017337. doi: 10.1016/B978-0-12-401733-7.00020-7.
- [115] Zhao W (Ed.), Chellappa R (Ed.). 2006. *Face Processing: Advanced Modeling and Methods*. Academic Press. ISBN 9780120884520.
- [116] Švantner M, Vacíková P, Honner M. 2013. Non-contact charge temperature measurement on industrial continuous furnaces and steel charge emissivity analysis. *Infrared Phys. Technol.* 61(1): 20–26. doi: 10.1016/j.infrared.2013.07.005.
- [117] Kobayashi M, Ono A, Otsuki M, Sakate H, Sakuma F. 1999. A Database of Normal Spectral Emissivities of Metals at High Temperatures. *Int. J. Thermophys.* 20(1): 299–308. doi: 10.1023/A:1021467322442.
- [118] Wen CD. 2010. Investigation of steel emissivity behaviors: Examination of Multispectral Radiation Thermometry (MRT) emissivity models. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53(9–10): 2035–2043. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.12.053.
- [119] Wen CD, Yi-Hau C. 2010. The Assessment of Multispectral Radiation Thermometry Using Linear and Log-Linear Emissivity Models for Steel. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals* 58(1): 40–54. doi: 10.1080/10407790.2010.504696.
- [120] Shi C, Daun KJ, Wells MA. 2015. Spectral emissivity characteristics of the Usibor® 1500P steel during austenitization in argon and air atmospheres. *Int. J. Heat Mass Transf.* 91(1): 818–828. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.021.

- [121] Xing W, Shi D, Sun J, Zhu Z. 2018. Emissivity model of steel 430 during the growth of oxide layer at 800–1100 K and 1.5 μm . *Infrared Phys. Technol.* 88(1): 23–31. doi: 10.1016/j.infrared.2017.11.001.
- [122] Albatici R, Passerini F, Tonelli AM, Gialanella S. 2013. Assessment of the thermal emissivity value of building materials using an infrared thermovision technique emissometer. *Energy Build.* 66(1): 33–40. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.07.004.
- [123] Valiorgue F, Brosse A, Naisson P, Rech J, Hamdi H, Bergheau JM. 2013. Emissivity calibration for temperatures measurement using thermography in the context of machining. *Appl. Therm. Eng.* 58(1–2): 321–326. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.03.051.
- [124] Shi D, Liu Q, Zhu Z, Sun J, Wang B. 2014. Experimental study of the relationships between the spectral emissivity of brass and the temperature in the oxidizing environment. *Infrared Phys. Technol.* 64(1): 119–124. doi: 10.1016/J.INFRARED.2014.03.001.
- [125] Huang Z, Zhou W, Tang X, Zhu D, Luo F. 2011. Effects of substrate roughness on infrared-emissivity characteristics of Au films deposited on Ni alloy. *Thin Solid Films* 519(10): 3100–3106. doi: 10.1016/J.TSF.2010.12.157.
- [126] Zhang F, Yu K, Zhang K, Liu Y, Xu K, Liu Y. 2015. An emissivity measurement apparatus for near infrared spectrum. *Infrared Phys. Technol.* 73(1): 275–280. doi: 10.1016/j.infrared.2015.10.001.
- [127] Zhao S, Li X, Zhou X, Cheng K, Huai X. 2016. Investigation of the effects of Ni-based alloy K465 on the normal spectral emissivity during oxidation. *Infrared Phys. Technol.* 78(1): 214–222. doi: 10.1016/j.infrared.2016.08.008.
- [128] Zhao S, Li X, Zhou X, Cheng K, Huai X. 2016. Investigation of the effects of Ni-based alloy DZ125 on the normal spectral emissivity during oxidation. *Appl. Therm. Eng.* 109(1): 663–671. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.122.
- [129] Kong B, Li T, Eri Q. 2017. Normal spectral emissivity of GH536 (HastelloyX) in three surface conditions. *Appl. Therm. Eng.* 113(1): 20–26. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.022.
- [130] Kong B, Li T, Eri Q. 2017. Normal spectral emissivity measurement on five aeronautical alloys. *J. Alloys Compd.* 703(1): 125–138. doi: 10.1016/j.jallcom.2017.01.288.
- [131] Wen CD, Mudawar I. 2004. Emissivity characteristics of roughened aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models. *Int. J. Heat Mass Transf.* 47(17–18): 3591–3605. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.04.025.
- [132] Wen CD, Mudawar I. 2006. Modeling the effects of surface roughness on the emissivity of aluminum alloys. *Int. J. Heat Mass Transf.* 49(23–24): 4279–4289. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.04.037.
- [133] Wen CD, Chai TY. 2011. Experimental investigation of emissivity of aluminum alloys and application of multispectral radiation thermometry. *Appl. Therm. Eng.* 31(14–15): 2414–2421. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.04.005.
- [134] Wen CD, Mudawar I. 2005. Emissivity characteristics of polished aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models. *Int. J. Heat Mass Transf.* 48(7): 1316–1329. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.10.003.

- [135] Jo HJ, King JL, Blomstrand K, Sridharan K. 2017. Spectral emissivity of oxidized and roughened metal surfaces. *Int. J. Heat Mass Transf.* 115(1): 1065–1071. doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2017.08.103.
- [136] Babić MM, Milošević ND. 2011. Impulsna metoda sa direktnim grejanjem za određivanje termofizičkih osobina metala i legura u širokom temperaturnom opsegu. *Termotehnika* 37(2): 211–222.
- [137] Smetana W, Reicher R. 1998. A new measuring method to determine material spectral emissivity. *Meas. Sci. Technol.* 9(5): 797. doi: 10.1088/0957-0233/9/5/009.
- [138] Ianiro A, Cardone G. 2010. Measurement of surface temperature and emissivity with stereo dual-wavelength IR thermography. *Journal of Modern Optics* 57(18): 1708–1715. doi: 10.1080/09500340.2010.514068.
- [139] Ibos L, Marchetti M, Boudenne A, Datcu S, Candau Y, Livet J. 2006. Infrared emissivity measurement device: principle and applications. *Meas. Sci. Technol.* 17(11): 2950. doi: 10.1088/0957-0233/17/11/013.
- [140] ASTM C1371–15 Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2015.
- [141] Barreira E, Almeida RMSF, Simões ML. 2021. Emissivity of Building Materials for Infrared Measurements. *Sensors* 21(6): 1961. doi: 10.3390/S21061961.
- [142] Avdelidis NP, Moropoulou A. 2003. Emissivity considerations in building thermography. *Energy Build.* 7(35): 663–667. doi: 10.1016/S0378-7788(02)00210-4.
- [143] Zhu C, Hobbs MJ, Willmott JR. 2020. An accurate instrument for emissivity measurements by direct and indirect methods. *Meas. Sci. Technol.* 31(4): 13. doi: 10.1088/1361-6501/ab5e9b.
- [144] https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/heat_control.html (Sep. 11, 2022)
- [145] Brodu E, Balat-Pichelin M, Sans JL, Freeman MD, Kasper JC. 2015. Efficiency and behavior of textured high emissivity metallic coatings at high temperature. *Materials and Design* 83(1): 85–94. doi: 10.1016/J.MATDES.2015.05.073.
- [146] Brandt R, Bird C, Neuer G. 2008. Emissivity reference paints for high temperature applications. *Measurement* 41(7): 731–736. doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2007.10.007.
- [147] Rekecki J, Gatalo R, Zeljković M, Borojević Lj, Hodolić J. 1989. *Fleksibilni tehnološki sistemi za obradu rotacionih izradaka*, knjiga I, Stanje, tendencije i podloge za razvoj. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka – Institut za proizvodno mašinstvo.
- [148] Stamenkovic U, Ivanov S, Markovic I, Strbac N, Mitovski A. 2017. The influence of the temperature of solution heat treatment on the properties of 6000 series aluminium alloys. *Tehnika* 72(4): 523–527. doi: 10.5937/tehnika1704523s.
- [149] Lanc Z, Zeljković M, Živković A, Štrbac B, Hadžistević M. 2018. Determination of Emissivity of Brass Alloy using Infrared Thermographic Technique. *Mater. Geoenvironment* 65(3): 115–121. doi: 10.2478/rmzmag-2018-0019.

- [150] Trifunovic M, Grujic N, Nedeljkovic B. 2013. Kompoziti sa matricom na bazi legure CuZn37 za izradu frikcionih elemenata. *Zaštita materijala*. 54(1): 51–56.
- [151] Blanuša V, Zeljković M, Živković A, Štrbac B, Hadžistević M. 2019. Razmatranje primene tehnologije laserske obrade u izradi cilindričnih zupčanika sa pravim zubima sa aspekta kvaliteta obrađene površine. In Proc. 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, 318–322. Jahorina, 20–22. marta.
- [152] Motorcu AR, Isik Y, Kus A, Cakir MC. Analysis of the cutting temperature and surface roughness during the orthogonal machining of AISI 4140 alloy steel via the taguchi method. *Mater. Tehnol.* 50(3): 343–351, 2016. doi: 10.17222/MIT.2015.021.
- [153] Montgomery D, Runger G. 2018. *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 7th Edition. ISBN: 978-1-119-40036-3
- [154] Štrbac B. 2022. Metode planiranja i obrade eksperimenta. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
- [155] <https://blog.minitab.com/en/adventures-in-statistics-2/multiple-regession-analysis-use-adjusted-r-squared-and-predicted-r-squared-to-include-the-correct-number-of-variables> (Dec. 14, 2022)
- [156] Lanc Z, Štrbac B, Zeljković M, Živković A, Hadžistević M. 2018. Emissivity of aluminium alloy using infrared thermography technique. *Mater. Tehnol.* 52(3): 323–327. doi: 10.17222/MIT.2017.152.
- [157] Lanc Z, Zeljković M, Živković A, Štrbac B, Drstvenšek I, Hadžistević M. 2015. The Determination of the Emissivity of Aluminum Alloy aw 6082 using Infrared Thermography. *J. Prod. Eng.* 18(1): 23–26.
- [158] Ahmadihosseini A, Shadi A, Rabiei M, Samea P, Hassani F, Sasmito AP. 2022. Computational study of microwave heating for rock fragmentation; model development and validation. *Int. J. Therm. Sci.* 181(1): 107746. doi: 10.1016/J.IJTHEMALSCI.2022.107746.
- [159] Djurdjevic S, Novakovic D, Adamovic S, Kasikovic N, Milic N, Strbac B, Hadzistevic M. 2020. Colorimetric changes of thermochromic ink printed on smart textile materials exposed to different heat transfer methods. *Tekst. ve Konfeksiyon* 29(4): 336–343. doi: 10.32710/tekstilvekonfeksiyon.532666.
- [160] <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/38071> (Sep. 11, 2022)
- [161] Koli Y, Yuvaraj N, Aravindan S, Vipin. 2021. Enhancement of Mechanical Properties of 6061/6082 Dissimilar Aluminium Alloys Through Ultrasonic – Assisted Cold Metal Transfer Welding. *Arab. J. Sci. Eng.* 46(12): 12089–12104. doi: 0.1007/s13369–021–05844–9.
- [162] Ham SH, Carteret C, Angulo J, Fricout G. 2018. Relation between emissivity evolution during annealing and selective oxidation of TRIP steel. *Corros. Sci.* 132(1): 185–193. doi: 10.1016/J.CORSCI.2017.12.032.
- [163] Palmer J, Jones J, Dyer A, Smith R, Lancaster R, Whittaker M. 2019. Development of test facilities for thermo – mechanical fatigue testing. *Int. J. Fatigue* 121(1): 208–218. doi: 10.1016/J.IJFATIGUE.2018.12.015.

- [164] Zhu C, Hobbs MJ, Willmott JR. 2020. An accurate instrument for emissivity measurements by direct and indirect methods. *Meas. Sci. Technol.* 31(4): 044007. doi: 10.1088/1361-6501/AB5E9B.
- [165] Leslie P, Furxhi O, Short R, Grimming R, Lautzenheiser A, Longcor T, Driggers R. 2022. Mid-wave and long-wave infrared signature model and measurement of power lines against atmospheric path radiance. *Opt Express* 30(1): 563–575. doi: 10.1364/OE.439461. PMID: 35201231.
- [166] Winterborne D, Stannard N, Sjöberg L, Atkinson G. 2019. An Air-Cooled YASA Motor for in-Wheel Electric Vehicle Applications. In *Proc. 2019 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 976–981. San Diego, California, USA, 12-15 May. doi: 10.1109/IEMDC.2019.8785156.
- [167] Heckert A. 2019. Oberflächenstrukturierung von Aluminium mittels gepulster Laserstrahlung für das thermische Fügen an endlosfaserverstärkte Thermoplaste. Ph.D. dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, München
- [168] Labus Zlatanović, D. 2020. Tačkasto zavarivanje trenjem sa mešanjem ultratankih limova od legure aluminijuma i magnezijuma. Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad.
- [169] Johansson J, Alm P, M'Saoubi R, Malmberg P, Ståhl JE, Bushlya V. 2022. On the function of lead (Pb) in machining brass alloys. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 120(11–12): 7263–7275. doi: 10.1007/S00170-022-09205-0/FIGURES/22.
- [170] Zhang K, Xu Y, Yu K, Liu Y. 2022. Experimental measurements and quantified approach of spectral emissivity of cupronickel alloy C7701 during oxidation. *Infrared Phys. Technol.* 122(1): 104106. doi: 10.1016/J.INFRARED.2022.104106.
- [171] Xu YF, Zhang KH, Liu YL, Yu K, Liu YF. 2021. 白铜热氧化过程中光谱发射率特性研究. *光谱学与光谱分析*. 41(9): 2969–2974. doi: 10.3964/J.ISSN.1000-0593(2021)09-2969-06.
- [172] Johansson J. 2022. Towards Sustainable Manufacturing of Brass Components: Characterisation, Machinability and Solid-State Recycling of Lead-Free Brass. Ph.D. dissertation, Department of Production and Materials Engineering, Faculty of Engineering LTH, Lund University, Lund
- [173] Pourang A, Tisack A, Ezekwe N, Torres A, Kohli I, Hamzavi IH, Lim HW. 2022. Effects of visible light on mechanisms of skin photoaging. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 38(3): 191–196. doi: 10.1111/PHPP.12736.
- [174] Caivano JL. 2021. Black, white, and grays: Are they colors, absence of color or the sum of all colors? *Color Res Appl.* 47(2): 252–270. doi:10.1002/col.22727.
- [175] Nedić B, Vesić N, Vasiljević D. 2008. Boja, kolorimetrija i plastične mase. Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet u Kragujevcu. Kragujevac.
- [176] <https://arhiva.simet.hr/hr/nastava/predavanja/diplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/2-godina-diplomskog-studija/specijalni-celici/view> (Sep. 11, 2022)

- [177] Church D, Elsayed S, Reid O, Winston B, Lindsay R. 2006. Burn wound infections. *Clin. Microbiol. Rev.* 19(2): 403–434. doi: 10.1128/CMR.19.2.403–434.2006.
- [178] Buchkremer F, Segerer S. 2021. Body Surface Area, Creatinine Excretion Rate Total Body Water: Reference Data for Adults in the United States. *Kidney Med.* 3(2): 312–313. doi: 10.1016/j.xkme.2020.10.009.
- [179] Loo YL, Haider S, Lim YP, Jeffery S. 2018. Predictor of the depth of burn injuries: A time and temperature relationship review. *International Journal of Medical Science and Clinical Invention* 5(11): 4119–4128. doi: 10.18535/ijmsci/v5i11.01.

PRILOG 1 MORITZ I HENRIQUES ISTRAŽIVANJE NA SVINJSKOJ KOŽI

T [°C]	Vreme	Broj eksp.	Delimična destrukcija epidermisa				Potpuna destrukcija epidermisa	
			Prvostepena reakcija				Drugostepena i trećestepena reakcija	
			Samo hiperemija		Fokalna nekroza epiderma		Potpuna nekroza epiderma	
			umerena	ozbiljna	ljuštenje	mali čirevi	crvena opekotina	beličasta opekotina
44	420 min	1					x	
45	150 min	1	x					
	180 min	1					x	
46	45 min	1	x					
	60 min	1		x				
	90 min	1					x	
46.5	45 min	1	x					
	60 min	1					x	
47	35 min	1	x					
	45 min	1					x	
	50 min	1					x	
	60 min	1					x	
48	10 min	3	x					
	12 min	1		x				
	14 min	2			x			
	14 min	1					x	
	15 min	2					x	
	16 min	1		x				
	18 min	1					x	
20 min	1					x		
49	3 min	4	x					
	4 min	5	x					
	5 min	2	x					
	6 min	5		x				
	6 min	2			x			
	6 min	2				x		
	7 min	2		x				
	7 min	1			x			
	7 min	1				x		
	8 min	4			x			
	8 min	1				x		
	8 min	2					x	
	9 min	11					x	
10 min	5					x		
50	1 min	1	x					
	2 min	1	x					
	4 min	1			x			
	5 min	1		x				
	5 min	3			x			
	5 min	2				x		
	5 min	2					x	

	6 min	2					x	
	6 min i 30 s	2					x	
51	45 s	2	x					
	1 min	2	x					
	1 min i 30 s	2	x					
	2 min	1			x			
	3 min	2		x				
	3 min	2			x			
	3 min	2					x	
	4 min	2					x	
	5 min	1				x		
	5 min	1					x	
10 min	2					x		
52	30 s	1	x					
	45 s	1		x				
	1 min i 30 s	1					x	
	2 min	4					x	
	3 min	1					x	
53	20 s	1	x					
	30 s	1		x				
	45 s	2			x			
	1 min	2					x	
	1 min i 30 s	3					x	
	2 min	1					x	
54	15 s	1	x					
	25 s	1		x				
	35 s	1					x	
55	5 s	1	x					
	10 s	1	x					
	15 s	1	x					
	20 s	1			x			
	25 s	1					x	
	30 s	3					x	
56	10 s	1			x			
	15 s	1					x	
	20 s	1					x	
58	5 s	1	x					
	10 s	1					x	
60	2 s	1	x					
	2 s	1			x			
	3 s	1			x			
	5 s	1					x	
	7 s	1				x		
	7 s	1					x	
	10 s	2					x	
	10 min	1					x	
65	1 s	1	x					
	2 s	1					x	
	3 s	1					x	
	10 min	1					x	
70	1 s	2					x	
	2 s	1					x	
	3 min	2						x

75	1 s	1					x	
	5 s	1						x
80	1 s	1					x	
	5 s	1						x
85	1 s	1					x	
	5 s	1						x
90	1 s	1					x	
	5 s	1						x
95	1 s	1					x	
	3 s	1						x
100	1 s	1					x	
	3 s	1						x

PRILOG 2 MORITZ I HENRIQUES ISTRAŽIVANJE NA LJUDSKOJ KOŽI

T [°C]	Vreme			Prvostepena reakcija kože Hiperemija bez gubitka epiderma	Drugostepena i trećestepena reakcija kože Potpuna nekroza epiderma
	[h]	[min]	[s]		
44	5			x	
	5			x	
	6				x
	6				x
45	2			x	
	3				x
	3				x
47		18			x
		20		x	
		20		x	
		20		x	
		25			x
		40			x
		40			x
	45			x	
48		15		x	
		15			x
		18			x
49		8		x	
		8		x	
		9	30		x
		10			x
		11			x
		15			x
51		2		x	
		4			x
		6			x
53			30	x	
		1	30		x
55			20	x	
			30		x
60			3	x	
			5		x

PRILOG 3 GRANIČNI USLOVI ZA NASTANAK I,II I III STEPENA KTO ZA METALNE POVRŠINE

D_{kto}	T_{kto} [°C]													
	43	44	45	46	46,5	47	48	49	50	51	52	53	54	55
0,5 s														
1 s														
2 s														
3 s														
4 s														
5 s														I
6 s														
7 s														
8 s														
9 s														I
10 s													I	II
11 s													I	II
12 s													I	II
15 s													I	II
20 s												I	II	III
21 s												I	II	III
25 s												I	II	III
30 s											I	II	III	III
35 s											I	II	III	III
40 s											I	II	III	III
45 s										I	I	I	II	III
1 min									I	II	II	II	II	III
1 min i 30 s									I	II	II	III	III	III
2 min									I	II	II	II	III	III
3 min								I	II	III	III	III	III	III
4 min								I	II	III	III	III	III	III
5 min								I	II	III	III	III	III	III
6 min								I	II	III	III	III	III	III
6 min 30 s								I	II	III	III	III	III	III
7 min								I	II	III	III	III	III	III
8 min							I	III	III	III	III	III	III	III
9 min							I	III	III	III	III	III	III	III
9 min 30 s							I	III	III	III	III	III	III	III
10 min							I	III	III	III	III	III	III	III
11 min							I	III	III	III	III	III	III	III
12 min							I	III	III	III	III	III	III	III
14 min							I	III	III	III	III	III	III	III
15 min							I	III	III	III	III	III	III	III
16 min							I	III	III	III	III	III	III	III
18 min							I	III	III	III	III	III	III	III
20 min							I	III	III	III	III	III	III	III
25 min							I	III	III	III	III	III	III	III
35 min							I	III	III	III	III	III	III	III
40 min							I	III	III	III	III	III	III	III
45 min				I	I	II	II	II	II	II	II	II	II	II
50 min				I	I	II	II	II	II	II	II	II	II	II
1 h				I	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
1 h 30 min			I	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
2 h			I	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
2 h 30 min			I	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
3 h		I	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
5 h		I	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
6 h	I	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
7 h	I	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
8 h	I	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II

D_{kto}	T_{kto} [°C]												
	56	57	57,5	58	59	60	61	61,5	62	63	65	66	67
0,5 s													I
1 s											II	I	I
2 s						I	I	I	I	I	II	II	II
3 s						II	I	I	I	I	II	II	II
4 s					I	I	I	I	I	I	II	II	II
5 s				II	I	II	II	II	II	II	II	II	II
6 s			I	I	I	II	II	II	II	II	II	II	II
7 s		I	I	I	I	II	II	II	II	II	II	II	II
8 s	I	I	I	I	I	II	II	II	II	II	II	II	II
9 s	I	I	I	I	I	II	II	II	II	II	II	II	II
10 s	II	I	I	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
11 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
12 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
15 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
20 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
21 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
25 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
30 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
35 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
40 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
45 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
1 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
1 min i 30 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
2 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
3 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
4 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
5 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
6 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
6 min 30 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
7 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
8 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
9 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
9 min 30 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
10 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
11 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
12 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
14 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
15 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
16 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
18 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
20 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
25 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
35 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
40 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
45 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
50 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
1 h	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
1 h 30 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
2 h	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
2 h 30 min	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
3 h	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
5 h	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
6 h	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
7 h	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
8 h	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II

D_{kTO}	T_{kTO} [°C]													
	70	73	75	80	83	85	90	95	100	150	165	170	190	200
0,5 s	I II	I II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
1 s	I II	II	II	II	II	II	II	II	II I	II	II	II	I II	II
2 s	II	II	II	II	II	II	II	II	I II	II	II	II	II	II
3 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II II	II	II	II	II	II
4 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
5 s	II	II	II II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
6 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
7 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
8 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
9 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
10 s	II	II	II	II	II	II	II	II	II III	III	III	III	III	III
11 s	II	II	II	II	II	II	II	II	III	III	III	III	III	III
12 s	II	II	II	II	II	II	II	II	III III	III	III	III	III	III
15 s	II	II	II	II	II	II	II	II	III III	III	III	III	III	III
20 s	I II	II	II	II III	III	III	II III	III	III III	III	III	III	III	III
21 s	II	II	II	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
25 s	II	II	II	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
30 s	II III	III	III	III III	III	III	III III	III	III III	III	III	III	III	III III
35 s	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
40 s	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III III
45 s	III	III	III	III	III	III	III	III	III III	III	III	III	III	III
1 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
1 min i 30s	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
2 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
3 min	II III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
4 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
5 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
6 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
6 min 30 s	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
7 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
8 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
9 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
9 min 30 s	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
10 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
11 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
12 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
14 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
15 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
16 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
18 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
20 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
25 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
35 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
40 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
45 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
50 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
1 h	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
1 h 30 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
2 h	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
2 h 30 min	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
3 h	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
5 h	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
6 h	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
7 h	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
8 h	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III

PRILOG 4 STATISTIČKI IZVEŠTAJ ZA ALUMINIJUM AlSi1MgMn

Regression Equation

$$\varepsilon = -0,0520 + 0,000521 T + 0,08635 Ra$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-0,0520	0,0124	-4,19	0,000	
T	0,000521	0,000045	11,56	0,000	1,00
Ra	0,08635	0,00771	11,20	0,000	1,00

Model Summary

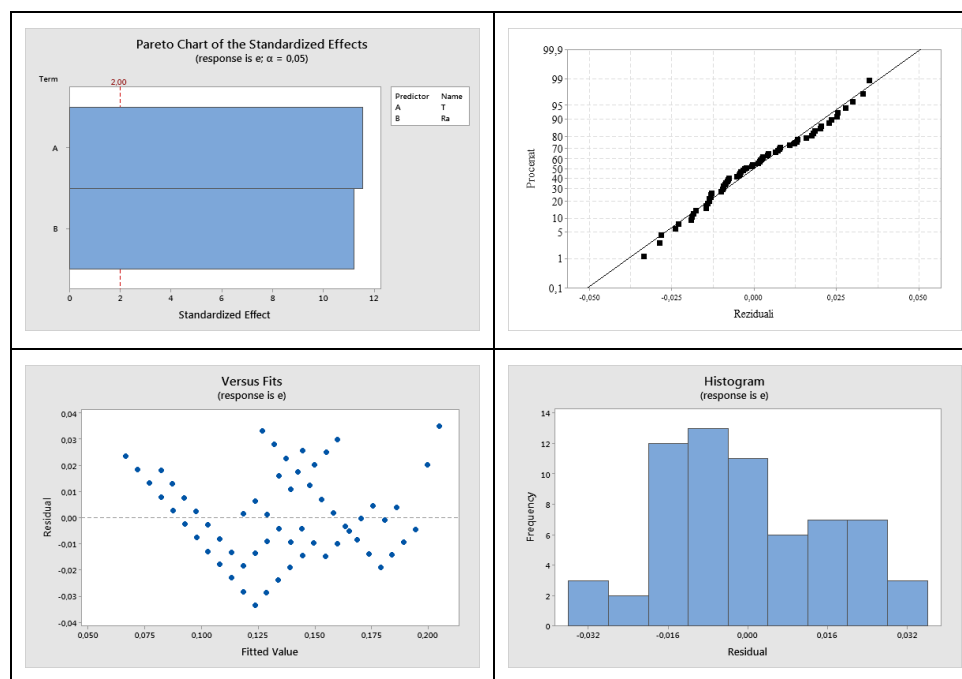
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0166184	80,94%	80,32%	78,68%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	0,07155	0,035776	129,54	0,000
T	1	0,03691	0,036910	133,65	0,000
Ra	1	0,03464	0,034642	125,44	0,000
Error	61	0,01685	0,000276		
Total	63	0,08840			

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	e	Fit	Resid	Std Resid	
45	0,09000	0,12349	-0,03349	-2,05	R
49	0,24000	0,20500	0,03500	2,20	R
64	0,16000	0,12686	0,03314	2,08	R



PRILOG 5 STATISTIČKI IZVEŠTAJ ZA KONSTRUKCIONI ČELIK S235

Regression Equation

$$\varepsilon = -0,00078 + 0,03448 Ra + 0,000886 T$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-0,00078	0,00907	-0,09	0,932	
Ra	0,03448	0,00240	14,37	0,000	1,00
T	0,000886	0,000058	15,41	0,000	1,00

Model Summary

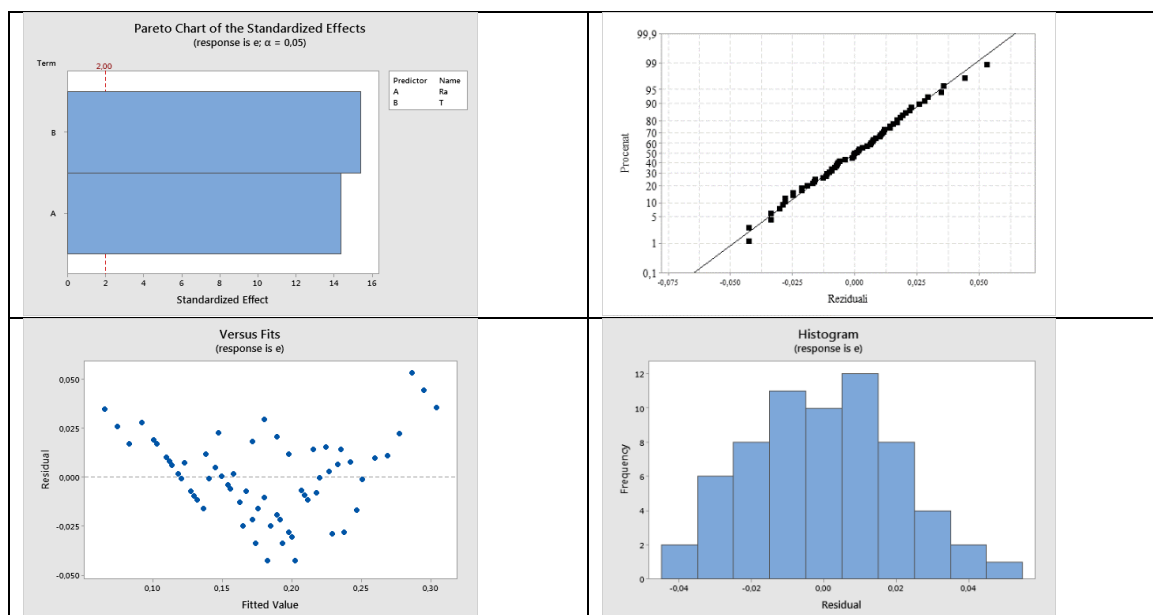
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0212064	87,92%	87,52%	86,56%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	0,19967	0,099833	221,99	0,000
Ra	1	0,09281	0,092811	206,38	0,000
T	1	0,10686	0,106855	237,61	0,000
Error	61	0,02743	0,000450		
Total	63	0,22710			

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	e	Fit	Resid	Std Resid
23	0,14000	0,18262	-0,04262	-2,03 R
38	0,16000	0,20252	-0,04252	-2,03 R
50	0,34000	0,29556	0,04444	2,19 R
51	0,34000	0,28670	0,05330	2,61 R



PRILOG 6 STATISTIČKI IZVEŠTAJ ZA MESING CuZn37

Regression Equation

$$\varepsilon = 0,01615 + 0,000179 T + 0,02756 Ra$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0,01615	0,00567	2,85	0,006	
T	0,000179	0,000030	5,95	0,000	1,00
Ra	0,02756	0,00136	20,24	0,000	1,00

Model Summary

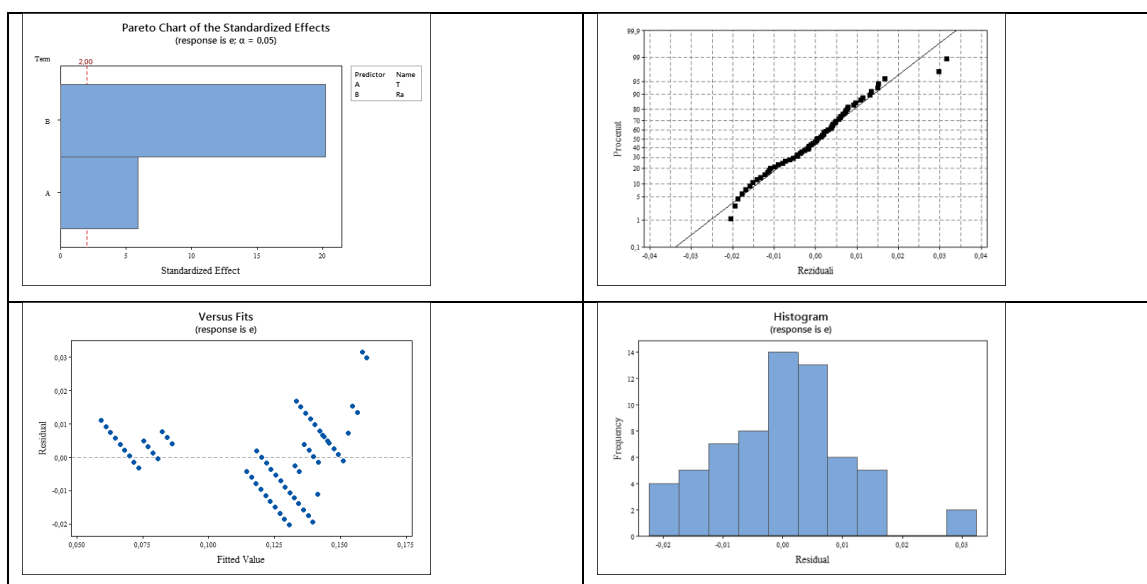
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0111221	87,94%	87,55%	86,72%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	0,055048	0,027524	222,50	0,000
T	1	0,004378	0,004378	35,39	0,000
Ra	1	0,050670	0,050670	409,62	0,000
Error	61	0,007546	0,000124		
Total	63	0,062594			

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	e	Fit	Resid	Std Resid
49	0,19000	0,16009	0,02991	2,79 R
50	0,19000	0,15829	0,03171	2,94 R



План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Развој иновативне методе процене ризика од контактних термичких опекотина изазваних врућим металним површинама машина
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
а) Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Департман за производно машинство б) Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Департман за инжењерство заштите животне средине и заштите на раду
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
Докторске академске студије: Доктор наука – Инжењерство заштите на раду
1. Опис података
1.1 Врста студије Докторска дисертација _____
1.2 Врсте података <input type="checkbox"/> <u>квантитативни</u> <input type="checkbox"/> <u>квалитативни</u>
1.3. Начин прикупљања података а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту _____ ђ) снимци, фотографије: навести врсту _____ <input type="checkbox"/> <u>текст: преглед литературе</u> ж) мапа, навести врсту _____ <input type="checkbox"/> <u>остало: експериментална испитивања</u>
1.3 Формат података, употребљене скале, количина података
1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке: а) Excel фајл, датотека: .xlsx б) SPSS фајл, датотека

- c) PDF фајл, датотека: .pdf
- d) Текст фајл, датотека: .docx
- e) JPG фајл, датотека: .jpg
- f) Остало, датотека: *Minitab, Adobe Photoshop* и *Guide IrAnalyser* софтвер

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

- a) број варијабли: 6
- б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.): 630

1.3.3. Поновљена мерења

- a) да
- б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- a) временски размак између поновљених мера је _____
- б) варијабле које се више пута мере односе се на _____
- в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

- а) Да
- б) Не

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

- а) експеримент: аналитичке методе, синтеза, регресиона анализа
- б) корелационо истраживање, навести тип _____
- ц) анализа текста: прикупљање података анализом литературе
- д) остало: анализа и синтеза; методе апстракције и конкретизације; метода класификације; метода индукције и дедукције; научно посматрање; *Kinney, PILZ* и *Guardmaster* метода процене ризика

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

Инструменти: профилометар MarSurf PS1, инфрацрвена камера ThermoProTM TP8S, термометар T395, светлосни микроскоп Leitz Orthoplan

Стандард: EN ISO 13732-1:2006

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да Не

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) Колики је број недостајућих података? _____

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података?

Квалитет података је контролисан поређењем експерименталних и теоријских података.

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у Репозиторијум докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду.

3.1.2. URL адреса: <https://www.cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf>

3.1.3. DOI:

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

Да

б) Да, али после ембарга који ће трајати до: _____

в) Не

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење:

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? _____

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? _____

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да Не

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да Не

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да Не

Образложити:

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да Не

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да Не

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

а) Подаци нису у отвореном приступу

б) Подаци су анонимизирани

ц) Остало, навести шта: _____

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

а) јавно доступни

б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области

ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

5.2. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

Ауторство – некомерцијално – без прераде

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података:

Зорана Ланц, zoranalanc@uns.ac.rs

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима:

Зорана Ланц, zoranalanc@uns.ac.rs

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима:

Зорана Ланц, zoranalanc@uns.ac.rs