

Универзитет у Крагујевцу  
Факултет инжењерских наука

Универзитет Одбране  
Војна академија



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство  
Ниво студија: Мастер академске студије  
Назив предмета: Техничка дијагностика  
Број индекса: 414/2015

**Стефан В. Ђурић**

## **Примена инфрацрвене термографије у развоју новог материјала**

**мастер рад**

**Комисија за преглед и одбрану мастер рада:**

1. проф. др Петар Тодоровић
2. проф. др Богдан Недић
3. проф. др Александар Пеулић

Датум одбране: 28.10.2016.

Оцена: \_\_\_\_ (\_\_\_\_\_)

## Задатак мастер рада

Студент има задатак да се анализом литературе и прегледом радова упозна са применом термографије при развоју нових материјала. Потребно је реализовати експеримент и након испитивања механичких карактеристика добијених узорака видети како се праћењем температурних промена у фази припреме материјала може утицати на побољшање карактеристика новог материјала.

### Препоручена литература:

1. Тодоровић П (2009) Техничка дијагностика. Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац.
2. Prakash R (2010) Infrared thermography. InTech, Ријека.
3. Васиљевић Д (2004) Оптички уређаји и оптоелектроника. Машински факултет Универзитета у Београду, Београд.

Крагујевац, август 2016.

Ментор:

проф. др Петар Тодоровић

---

**Резиме рада**

Применом инфрацрвене термографије у раду је на експерименталном примеру показано да се на основу термографске слике може утицати на особине полазног материјала. Термографија је основна бесконтактна метода мерења температурних промена на основу енергије тела које се посматра. Приказ термографске слике омогућава да се током млевења прати гранулација честица у млину. Добијањем одређене гранулације честица, директно се може утицати на излазне механичке карактеристике узорака.

Добијена керамика у праху се меша са прахом бетонског челика и процесом синтеровања добија се керамика-метал композит.

**Кључне речи:** IR термографија, температурне промене, гранулација честица, синтеровање.

**Abstract**

Application of the infrared thermography in this paper showed via experimental work that the properties of the starting material can be determined by the thermographic image. Thermography is the basic method of contactless measurement of temperature changes based on the energy of the body being observed. Thermographic images allow the monitoring of the milling. The specific size of particles obtained by milling, directly affect the mechanical properties of the final element made of that powder.

The resulting ceramic powder was mixed with steel powder and ceramic-metal composite is fabricated by the sintering.

**Key words:** IR thermography, temperature changes, granulation particles, sintering.

## Садржај

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1. Увод</b> .....                                                                  | 7  |
| <b>2. Основи инфрацрвене термографије и њена примена у савременој индустрији ....</b> | 8  |
| 2.1 Основи бесконтактног мерења температуре .....                                     | 9  |
| 2.1.1 Инфрацрвено зрачење .....                                                       | 10 |
| 2.1.2 Зрачење црног тела.....                                                         | 11 |
| 2.1.3 Зрачење реалног тела .....                                                      | 13 |
| 2.2 Детектори инфрацрвеног зрачења.....                                               | 14 |
| 2.3 Инструменти за инфрацрвену термографију .....                                     | 16 |
| 2.3.1 Детектори инфрацрвеног зрачења у тачки.....                                     | 16 |
| 2.3.2 Инфрацрвени линијски скенери.....                                               | 17 |
| 2.3.3 Инфрацрвене термографске камере.....                                            | 17 |
| 2.4 Примена инфрацрвене термографије.....                                             | 23 |
| 2.4.1 Примена термографије у војсци.....                                              | 23 |
| 2.4.2 Примена термографије у областима истраживања за потребе војске .....            | 26 |
| 2.4.3 Испитивање механичких система .....                                             | 27 |
| 2.4.4 Испитивање електричних и електронских система .....                             | 27 |
| <b>3. Развој нових материјала за потребе војне индустрије.....</b>                    | 29 |
| 3.1 Керамички материјали.....                                                         | 29 |
| 3.1.1 Глина.....                                                                      | 30 |
| 3.1.2 Техничка керамика .....                                                         | 31 |
| 3.2 Примена керамичких материјала у војној индустрији.....                            | 32 |
| 3.3 Синтеровање материјала .....                                                      | 34 |
| <b>4. Примена термографије при развоју новог материјала .....</b>                     | 38 |
| 4.1 Планирање експеримента.....                                                       | 38 |
| 4.2 Теоријска анализа примене термографије при развоју материјала .....               | 41 |
| 4.3 Припрема материјала и израда калупа.....                                          | 41 |
| 4.3.1 Припрема материјала .....                                                       | 41 |
| 4.3.2 Израда калупа.....                                                              | 45 |
| 4.4 Праћење температурних промена термографском камером <i>FLIR E50</i> .....         | 47 |
| 4.5 Пресовање смеше керамика-метал.....                                               | 48 |

---

|                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.6 Синтеровање смеше керамика-метал.....                                       | 49        |
| 4.7 Испитивање узорака на универзалној машини <i>CT3 Texture Analyzer</i> ..... | 51        |
| <b>5. Обрада резултата добијених током испитивања .....</b>                     | <b>53</b> |
| 5.1 Анализа резултата мерења температуре млина .....                            | 53        |
| 5.2 Анализа резултата испитивања механичких особина .....                       | 55        |
| <b>6. Закључак.....</b>                                                         | <b>66</b> |
| <b>7. Литература .....</b>                                                      | <b>68</b> |

## 1. Увод

Примена термографије широко је распрострањена у области одржавања техничких система, система безбедности, лабораторијских и других испитивања где је неопходно мерење температурних промена површина. Мерење температуре као једне од основних физичких величина представља фундамент термографије. Принцип се заснива на бесконтактном мерењу температуре, односно зрачења које свако тело у природи емитује (Тодоровић, Мачужић, Јеремић 2009).

Многи системи савремене индустрије директно или индиректно повезани су са термографијом у зависности од области примене. Модерно наоружање применом ових система има могућност дејства у апсолутно свим временским приликама без обзира на количину светлости (дан или ноћ). Захтеви за развој не само војних, већ и уређаја за комерцијалну употребу наметнули су систем непрестаног побољшања основних карактеристика система у погледу мобилности уређаја, габарита, отпорности на спољне утицаје, режима рада и опсега примене (Тодоровић, Мачужић, Јеремић 2009, Васиљевић 2004, Prakash 2012).

Превентивним деловањем на специфичним местима код великих система могу се спречити огромни губици, хаварије и нежељена дејства. Температура као особина било ког тела у природи указује на стање у ком се тело (елемент/систем) налази, што термографији даје апсолутни приоритет.

Применом термографије у лабораторијским условима при развоју нових материјала могу се пратити температурне промене при међусобној реакцији честица два различита материјала (стругање, глодање, бушење, брушење). Термографске слике могу дати информације о реакцијама у контакту алата и предмета обраде, на основу којих се детектују критичне зоне. Побољшањем карактеристика алата у критичним зонама подиже се квалитет процеса обраде и продужава радни век алата (Тодоровић, Мачужић, Јеремић 2009, Јовановић, Адамовић, Лазић et al 2003).

Развој нових материјала представља један од највећих изазова за научнике и истраживаче. Приликом развоја материјала првенствено је потребно обавити истраживања са аспекта разматрања постојећих решења, затим се детаљно упознати са областима у којима се материјал примењује и специфичним захтевима због којих се тежи модификацији постојећег или развоју потпуно новог решења. Након теоријске анализе и постављања идејног решења потребно је прецизно испланирати ток експерименталних истраживања јер се у таквим ситуацијама углавном налази на неочекиване препреке (Meola and Carlomagno 2004, Meola et al 2004).

Композити на бази керамике примену налазе у специфичним условима експлоатације. Ови материјали отпорни су на високе температуре, имају добру отпорност на корозију и ударна оптерећења па се користе при изради кочионих дискова, супер тврдых алата, делова за млазне моторе, ватроотпорних и термостојаних материјала, у области панцирне и оклопне заштите. Једна од области у којој се непрестано тежи усавршавању је оклопна заштита код борбених возила. Композити настали комбинацијом керамике и метала представљају једно ефикасних решења на дејство поткалибарних и кумулативних пројектила али још увек не значе потпуну заштиту од истих. Приликом развоја постојећих решења показано је да поред развоја материјала отпорног на удар пројектила и кумулативни млаз треба имати и добро конструкционо решење, које добром поставком у комбинацији са овим материјалом може представљати ефикасну оклопну заштиту (Lui et al 2016, Lopez-Puente 2005, Fawaz et al 2004).

## 2. Основи инфрацрвене термографије и њена примена у савременој индустрији

Развој технологије током претходног века довео је до револуционарних техничких открића, док су данас ти проналасци (уређаји и инструменти) у практичној употреби готово свакодневно. Чињеница је да су тада настали модели, данас доста модификовани, унапређени и прилагођени широј популацији. Као један од примера може се узети величина првог *PC* рачунара у односу на данашње далеко компактније а истовремено технолошки „моћније“ уређаје.

Велики број технологија које се данас налазе у широј употреби развијане су првенствено за потребе војне индустрије. Први радар и млазни мотор развијени су првобитно за потребе војске. Затим је раних седамдесетих година развијен данас далеко најзаступљенији Глобални позициони систем познатији као *GPS*. Његова примена била је за навођење пројектила, док је данас уграђен у сваки модернији аутомобил.

Инфрацрвене камере представљају уређаје који региструју промену температуре. Савремене камере имају могућност регистровања промене температуре од  $0,05^{\circ}\text{C}$ . Прве термалне камере развијене су 1958. године у Шведској за потребе војне индустрије од компаније која се звала *AGA*, данас позната као *FLIR Systems* (произвођач камере коришћене током испитивања). За комерцијалне сврхе инфрацрвена камера први пут је коришћена 1963. године за испитивање струјних водова. Скоро десет година касније први пут је развијена камера која је била преносива, али и даље веома гломазна. Чекало се све до краја прошлог века да се развије потпуно мобилна термална камера са нехлађеним детектором (<http://www.termalnekamere.rs>).

Инфрацрвена термографија се може користити за мерење температуре у распону од  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $2000^{\circ}\text{C}$  и представља савремену бесконтактну методу мерења температуре. Као излаз добија се слика температурног поља где се јасно могу уочити разлике у температури појединих области и дефинисати њихова међусобна зависност (Тодоровић, Мачужић, Јеремић 2009).

## 2.1 Основи бесконтактног мерења температуре

Свако тело у природи емитује одређену количину енергије електромагнетног зрачења на чијем принципу је метода и заснована. Поље науке и технике које се бави проучавањем принципа на којима се ова теорија заснива је радијациона термографија.

Механизми преношења топлоте су :

- кондукција (провођење) – преношење директним контактом кроз чврсту средину,
- конвекција (струјање флуида) – преношење топлотне енергије кретањем флуида различите температуре и густине,
- зрачење (радијација) – преношење топлотне енергије путем електромагнетних таласа и извор може бити било које тело чија је температура виша од температуре околине.

Кондукција се може одвијати на два начина и представља размену кинетичке енергије:

- са молекула на молекул (карактеристично за изолационе материјале),
- преко слободних електрона (карактеристичан за метале).

Енергија се преноси са тела са вишом температуром на тело ниже температуре. Са повећањем температурне разлике брзина простирања топлоте је већа.

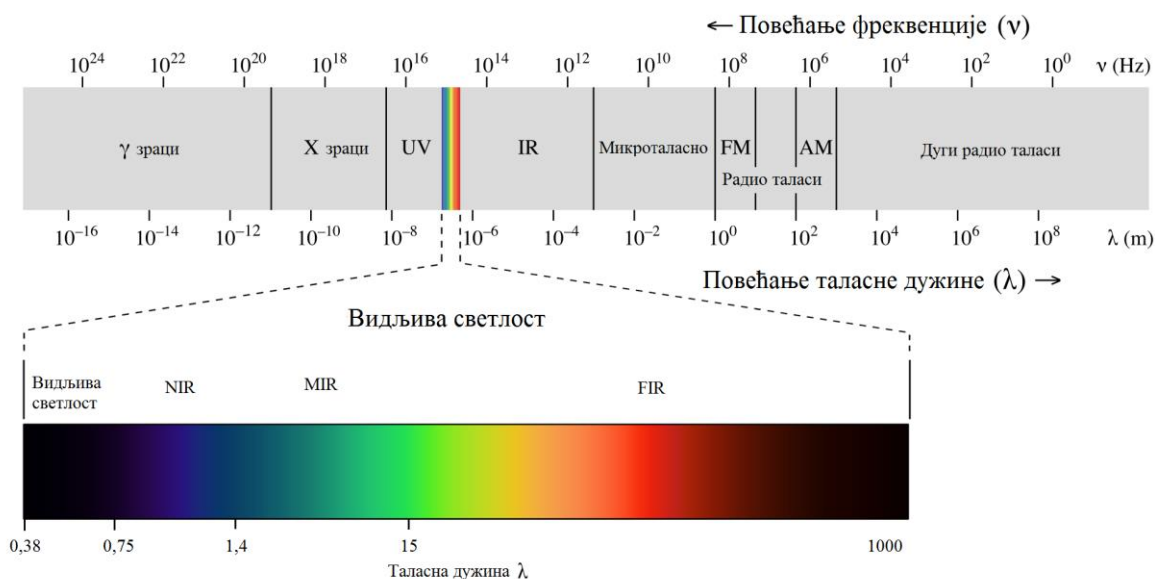
Конвекција је карактеристична за гасове и течности. Приликом преласка топлоте, потребно је да топлотна енергија савлада отпор који ствара контактна површина између две средине. Прелаз топлоте се дефинише коефицијентом прелаза топлоте.

Коефицијент прелаза топлоте је количина топлоте која се у јединици времена размени између јединичне површине флуида и чврстог тела при температурној разлици од  $10^{\circ}\text{C}$ .

Код зрачења се унутрашња топлотна енергија трансформише у енергију електромагнетног зрачења и ово зрачење се назива инфрацрвено зрачење. Електромагнетни талас се у контакту са чврстим телом понаша као светлост, што значи да се делимично одбија или апсорбује (Тодоровић, Мачужић, Јеремић 2009, Prakash 2012).

### 2.1.1 Инфрацрвено зрачење

На основу фундаменталне физике, свако тело са температуром изнад апсолутне нуле емитује топлотно зрачење, односно одређену количину енергије која се креће кроз простор брзином светлости (Тодоровић, Мачужић, Јеремић 2009, Vollmer and Mollmann 2010).



Слика 2.1 Спектар електромагнетног зрачења

Инфрацрвено зрачење у електромагнетном спектру се налази између видљиве светлости и микроталасног зрачења у границама од  $0,75 \mu\text{m}$  до  $1 \text{ mm}$  (слика 2.1). Опсег у коме се налази инфрацрвено зрачење је широко па се дели на више региона (табела 2.1).

За мерење температуре преко инфрацрвеног зрачења најважнији су средњеталасни и дуготаласни подрегиони.

Табела 2.1 Региони инфрацрвеног опсега електромагнетног зрачења

| Основни регион                            | Подрегион                                       | Таласна дужина              |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------|
| Блиско IC зрачење<br>(NIR-Near Infrared)  |                                                 | $0,75 \div 1,4 \mu\text{m}$ |
| Средње IC зрачење<br>(MIR – Mid Infrared) | Краткоталасно IC зрачење<br>(SWIR-Shortwave IR) | $1,4 \div 3 \mu\text{m}$    |
|                                           | Средње таласно IC зрачење<br>(MWIR-Midwave IR)  | $3 \div 8 \mu\text{m}$      |
|                                           | Дуготаласно IC зрачење<br>(LWIR-Longwave IR)    | $8 \div 15 \mu\text{m}$     |
| Далеко IC зрачење (FIR-Far Infrared)      |                                                 | $15 \div 1 \text{ mm}$      |

Људско око је осетљиво на тоplotно зрачење које се налази у делу спектра видљиве светлости који се граничи са  $IC$  опсегом. Када се посматра метални предмет који се загрева могуће је уочити промене боја од тамно црвене, преко јарко црвене, наранџасте, жуте и на крају све до беле боје усијања. Ова палета боја представља температурску градацију. Без обзира на ове појаве, највећи део тоplotног зрачења смештен је у опсегу који је невидљив за човека без употребе специјализованих уређаја. Интензитет  $IC$  зрачења је у функцији спољашње температуре тела (Тодоровић, Мачужић, Јеремић 2009, Prakash 2012).

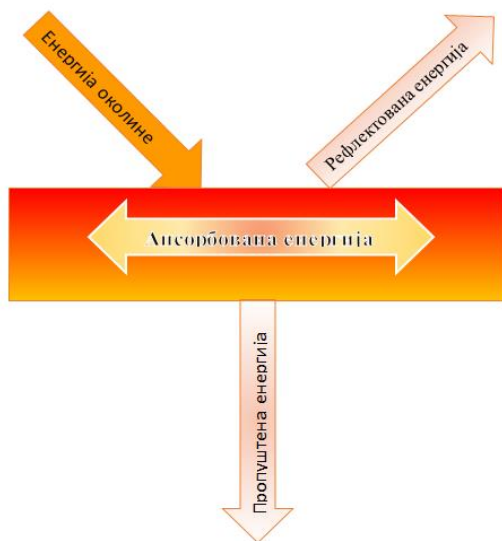
### 2.1.2 Зрачење црног тела

Мерење температуре инфрацрвеним зрачењем је сложено јер постоји више начина расподеле и емитовања енергије сваког тела. Укупна енергија која се емитује из околине ка телу дели се на следеће целине:

- апсорбована енергија,  $a$
- рефлектована енергија,  $r$
- трансмитована или проведена енергија,  $t$ .

Свако тело апсорбује одређену количину тоplotне енергије, због чега подиже своју температуру, док је касније емитује у околину као инфрацрвено зрачење.

Када тело апсорбује енергију, постоји одређена количина укупне енергије која се рефлектује од површине тела и на тај начин не остварује утицај на температуру самог тела.



Трећа целина која се јавља као део укупне енергије је трансмитована или проведена енергија која представља енергију која пролази кроз тело без утицаја на његову температуру.

За мерење температуре тела важна је само енергија коју тело емитује, а која представља претходно апсорбовану енергију (слика 2.2). Како би резултати били релевантни, утицај енергије која се рефлектује и проводи кроз тело мора се уклонити или минимизирати њен утицај.

Слика 2.2 Расподела енергије

Код већине чврстих тела коефицијент пропуштене енергије је једнак нули ( $t=0$ ), што значи да се укупна енергија или апсорбује или рефлектује ( $a+r=1$ ).

Приликом истраживања феномена полази се од два специјална случаја:

- идеално огледало, представља тело које апсолутно рефлектује сву енергију,
- црно тело, представља тело које апсолутно апсорбује енергију.

Реална тела која се налазе у природи у одређеној мери одступају од идеалних случајева па се називају сива тела.

Фундаменталне законе зрачења поставио је Густав Кирхоф који је увео термин „црно тело“. То је била полазна основа за све касније изведене законе који су представљали темељ развоја радијационе термометрије:

- Планков закон зрачења,
- Винов закон померања и
- Штефан-Болцманов закон.

Планков закон зрачења црног тела дефинише интензитет зрачења који зависи од температуре зидова сфере црног тела (израз 2.1):

$$P_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (2.1)$$

где су:

- $P_{\lambda}$  – енергија коју зрачи црно тело на таласној дужини  $\lambda$ ,
- $C_1 = 3,741 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^{-2}$  – прва радијациона константа,
- $C_2 = 1.438 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$  – друга радијациона константа,
- $T, K$  – температура црног тела,
- $\lambda, m$  – таласна дужина зрачења.

Таласну дужину на којој зрачење црног тела има максималну вредност на одређеној температури дефинише Винов закон померања, који је изведен из Планковог закона (израз 2.2):

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ mK} \quad (2.2)$$

Један од примера који сликовито описује ову законитост је, максимални интензитет зрачења на собној температури јавља се на таласној дужини од око  $10 \mu m$ , док је на температури од приближно  $6000^\circ C$  зрачење најинтензивније у видљивом опсегу зрачења од око  $0,5 \mu m$ .

Интегралењем Планковог закона (израз 2.3) добија се Штефан-Болцманов закон (израз 2.4) у опсегу од  $\lambda=0$  до  $\lambda=\infty$ . Након интеграције добија се формула која представља укупну енергију коју емитује црно тело у целом електромагнетном опсегу (Тодоровић, Мачужић, Јеремић 2009, Prakash 2012):

$$E(T) = \int_0^{\infty} P_{\lambda}(T) d\lambda \quad (2.3)$$

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (2.4)$$

где је :

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

### 2.1.3 Зрачење реалног тела

Код зрачења реалног тела не могу се применити претходно дефинисане законитости које се односе на теоријски модел идеално црног тела. Како би се омогућило мерење зрачења уводи се карактеристика коефицијент емисије  $\varepsilon$ . Коефицијент емисивости (израз 2.5) представља однос енергије коју емитује реално тело на одређеној температури и енергију коју емитује црно тело на истој тој температури.

$$\varepsilon = \frac{T_s}{T_c} \quad (2.5)$$

где је :

- $\varepsilon$ - коефицијент емисивости,
- $T_s$ - температура реалног тела,
- $T_c$  – температура црног тела.

**Коефицијент емисије  $\varepsilon$**  представља способност тела да зрачи топлотну енергију у зависности од његове температуре. Код црног тела једнак је јединици ( $\varepsilon=1$ ) јер црно тело представља идеални апсорбер док је код огледала овај коефицијент једнак нули ( $\varepsilon=0$ ). Према овој дефиницији коефицијент емисије свих реалних тела налази се у границама  $0 < \varepsilon < 1$  и у највећој мери зависи од врсте материјала. За најчешће коришћене материјале коефицијенти емисије дати су у табели 2.2) (Тодоровић, Мачужић, Јеремић 2009, Prakash 2012, Meola and Carlamagno 2004):

Табела 2.2 Вредности коефицијената емисије  $\epsilon$  појединих материјала

| Материјал       | Температура, °C | Коефицијент емисије $\epsilon$ , - |
|-----------------|-----------------|------------------------------------|
| Алуминијум      |                 |                                    |
| полиран, ваљан  | 20              | 0,04                               |
| елоксиран       | 20              | 0,83-0,94                          |
| Бакар           |                 |                                    |
| полиран         | 100             | 0,05                               |
| оксидиран       | 130             | 0,76                               |
| Гвожђе          |                 |                                    |
| ливено          | 100             | 0,64                               |
| јакo кородирано | 20              | 0,69-0,96                          |
| Челик           |                 |                                    |
| сјајно углачан  | 150             | 0,128                              |
| ваљан           | 20              | 0,77                               |
| кородиран       | 20              | 0,85                               |
| Дрво            | 20              | 0,8-0,9                            |
| Опека           | 20              | 0,93                               |
| Лед             | 0               | 0,96                               |
| Стакло          | 20              | 0,94                               |

## 2.2 Детектори инфрацрвеног зрачења

Саставни део свих инструмената за мерење температуре на принципу инфрацрвеног зрачења представља детектор. Улога детектора је да апсорбује инфрацрвено зрачење и претвори га у електрични сигнал (напонски или струјни). Постоји велики број детектора који се међусобно разликују по принципу рада, карактеристикама као што су таласни опсег мерења, отпорност на спољашње утицаје, време одзива, резолуција. Тежи се ка смањењу габарита ових детектора како би се повећала мобилност уређаја. У основи, инфрацрвени детектори се деле на:

- хлађене инфрацрвене детекторе и
- нехлађење инфрацрвене детекторе.

Хлађени инфрацрвени детектори су смештени у херметизованим кућиштима где им се обезбеђује хлађење до криогених температура, приближно  $-200^{\circ}\text{C}$ . Рад на ниским температурама значајно повећава њихову осетљивост јер је температура самог детектора значајно нижа од температуре тела која се мери. Уколико се не би хладили, ови детектори били би практично неупотребљиви.

Уређаји са хлађеним детекторима су гломазни, скупи и са slabим одзивом али их одликује велика прецизност. За израду ових детектора користе се индијум-антимонид, индијум-арсенид, олово-сулфид, платина-силикат, олово-селенид.

За хлађење се користе течни хелијум или водоник уз примену посебних техничко-конструктивних решења.

За рад на собним температурама, примењују се нехлађени детектори. Под дејством инфрацрвеног зрачења ови детектори мењају своје електричне карактеристике на основу чега се ове промене упоређују са референтним вредностима што као излазну вредност даје количину примљеног инфрацрвеног зрачења.

Значајно су мањих димензија од хлађених детектора и не захтевају криогено хлађење. Њихова примена је распрострањенија у односу на хлађене, где су главни фактори знатно нижа цена и габарити. Карактеристике које су слабије у односу на хлађене детекторе су мања прецизност и резолуција.

Израђују се од пироелектричних материјала који раде на принципу промене капацитивности детектора под дејством инфрацрвеног зрачења или на принципу промене отпорности детектора под дејством инфрацрвеног зрачења (микроболометара).

Поред основне поделе детектора (хлађени и нехлађени) инфрацрвеног зрачења дефинисана је подела на основу технологије мерења температуре, тачније формирања термографске слике. Ова подела хронолошки приказује како је текао развој радијационе термометрије:

1. Детектори инфрацрвеног зрачења у тачки
2. Инфрацрвени системи са линијским скенирањем
3. Инфрацрвени системи са детекторима у фокусној равни

Детектори инфрацрвеног зрачења у тачки представљали су основу за даљи развој и модернизацију уређаја са могућим скенирањем у више тачака како би се на крају формирала термографска слика. Детектори ове врсте називали су се **радијациони термометри**.

Код линијских система за скенирање, мерење температуре се врши у више тачака, на основу чега се формира термографска слика. Детектори су постављени у једну линију по чему су добили назив линијски детектори. Преко система огледала, зрачење се доводи на линијски детектор, а механичким померањем огледала врши се скенирање чија се температура мери.

Инфрацрвени системи са детекторима у фокусној равни преко одговарајуће оптике доводе на сензор велики број појединачних инфрацрвених детектора од којих сваки за себе даје електрични сигнал еквивалентан температури тачке која се мери.

Типичан детектор овог типа има од 14.400 па до 70.000 детекторских елемената који одређују и саму резолуцију слике (Тодоровић, Мачужић, Јеремић 2009, Prakash 2012, Vollmer and Mollmann 2010)

## 2.3 Инструменти за инфрацрвену термографију

Према претходно описаним детекторима развијени су инструменти за бесконтактно мерење температуре. Ови инструменти се деле у две групе:

- инструменти за мерење температуре у тачки и
- инструменти који имају могућност мерења температуре и више тачака уз формирање одговарајуће термографске слике (линијски скенери и камере за инфрацрвену термографију).

### 2.3.1 Детектори инфрацрвеног зрачења у тачки

Инфрацрвени радијациони термометри користе се за бесконтактно мерење површинске температуре елемената у условима отежаног приступа самој површини која се мери. Примену налазе при мерењу температуре машинских склопова и компонената, електросклопова, термичких уређаја и постројења, процесне опреме. Три основне компоненте сваког радијационог термометра су:

- оптички систем који прикупља и усмерава инфрацрвено зрачење,
- детектор инфрацрвеног зрачења и
- мерни ланац за обраду сигнала са детектора инфрацрвеног зрачења и приказивање резултата мерења.

Зависно од намене и сврхе којој служе, радијациони термометри могу бити израђени као фиксни (слика 2.3а) или као преносни инструменти (слика 2.3б).



Слика 2.3 Радијациони термометри

Ови инструменти су веома практични и у великој мери заступљени у области одржавања техничких система. Једноставни су за руковање, прецизни за мерење и због повољне цене постали су незаобилазни дијагностички инструмент.

Основни типови радијационих термометара имају фиксну вредност коефицијента емисије  $\varepsilon$  (0,95) док уређаји новијих генерација имају могућност подешавања коефицијента емисије зависно од површине материјала чија се температура мери. Постоје и типови инструмената који имају ласер како би се лакше и прецизније дефинисала тачка у којој се температура мери (слика 2.36).

Поред подесивог коефицијента емисије треба водити рачуна о растајању између величине површине која се мери и самог инструмента. Овај фактор дефинисан је оптичком резолуцијом термометра. Функционише тако што оптички систем прикупља инфрацрвено зрачење и фокусира га на детектор. Оптичка резолуција је дефинисана односом растојања од инструмента до објекта  $D$  и величине зоне чија се температура мери  $S$ , што је представљено као количник ове две величине  $D/S$ . Што је однос ове две величине већи резолуција инструмента је боља, а мерење се може фокусирати на мању тачку. Код основних модела резолуција се креће у односу 6/1 до 12/1, док је код модела новијих генерација тај однос 60/1 (Тодоровић, Мачужић, Јеремић 2009, Васиљевић 2004).

### 2.3.2 Инфрацрвени линијски скенери

Скенери из ове групе инструмената користе се у одређеним индустријским гранама које су прилагођене процесима где је потребно да се обезбеди континуално праћење температуре дугачких објеката, покретних трака, производње тракастих и жичаних производа. Један од конкретних примера примене јесу ваљационе челика где линијски скенер прати температуру траке лима која излази са ваљака и указује на одступања у температури која могу да послуже за праћење технологије процеса ваљања.

Као излаз линијских скенера добија се формирана термографска слика која најчешће нема приказане термографске вредности температуре већ се кроз палету боја приказују промене температуре по зонама (Тодоровић, Мачужић, Јеремић 2009, Васиљевић 2004).

### 2.3.3 Инфрацрвене термографске камере

Инфрацрвене термографске камере представљају најмодерније и најсавременије инструменте за бесконтактно мерење температуре преко праћења инфрацрвеног зрачења. Постоји више термина који се користе, термографске камере, термовизијске камере, али сви ови термини означавају исти инструмент.

Термографске камере могу, према начину употребе бити преносне или фиксне. Преносне се користе за мерења на терену и представљају основни елемент у техничкој дијагностици док се фиксне камере користе за лабораторијска мерења и истраживања (Тодоровић, Мачужић, Јеремић 2009, Васиљевић 2004, Prakash 2012).

### 2.3.3.1 Принцип рада инфрацрвене термографске камере

Инфрацрвена термографија подразумева савремени систем који се састоји од инфрацрвене термографске камере и рачунара са одговарајућим софтвером. Термографска камера састоји од следећих подсистема:

- оптички систем (*B*),
- детектор инфрацрвеног зрачења (*C*),
- електроника за обраду сигнала и његово претварање у видео сигнал и меморијски део за складиштење резултата мерења (*D*) и
- монитори за приказ термографских слика (*E*).

Оптички систем сакупља инфрацрвено зрачење и усмерава га на скенер и детектор који га следећим операцијама претварају у жељени облик. Зависно од спектралног опсега рада и намене термографске камере бира се тип оптичког система.

Оптички елементи израђују се од ретких и скувих материјала као што су силицијум, германијум, сафир, цинксулфид. Оптичке особине ових материјала зависе од температуре што отежава оптимизацију оптичког система за рад на свим предвиђеним температурама. Проблем се решава применом различитих пасивних и активних метода атермализације које компензују утицај температуре на положај равни лика који формира објектив. Поред овог, јавља се и проблем високог индекса преламања због чега се јављају велики губици услед рефлексије. Како би се ови губици умањили израђују се специјални антирефлексни слојеви.

Квалитет оптичког система у великој мери утиче на укупан квалитет термовизијске слике у погледу температурне резолуције на коју оптички систем има утицај и просторне резолуције, на коју вишенаменска преносна функција објектива има утицај.

Улога детектора је да претвори инфрацрвено зрачење у електрични сигнал. Зрачење се може детектовати помоћу термичког или фотоелектричног ефекта.

Појава термичког ефекта инфрацрвеног зрачења представља апсорбовање топлоте која доводи до повећања температуре детектора. Промена температуре детектора представља промену неког температурно зависног параметра који може да се мери. Углавном су то електричне отпорности или димензија детектора са променом температуре.

Код појаве фотоелектричног ефекта, фотони из инфрацрвеног зрачења изазивају електронске прелазе унутар атома материјала детектора. Како би дошло до ових прелаза неопходно је детектор охладити на температуру од  $-196^{\circ}\text{C}$ . Ови детектори називају се квантни детектори.

Електроника за обраду сигнала омогућава превођење излазног сигнала детектора у одговарајући облик који се може приказати на екрану. Ово се постиже појачивачима сигнала који кроз појачање детекторског сигнала и његову обраду кроз трансформацију сигнала по амплитуди и временском формату дају одговарајући излаз.

У циљу побољшања квалитета слике врши се додатна обрада информација. То је посебно важно код система за аутоматског праћење и препознавање.

Величине које дефинишу изглед термовизијске слике приликом електронске обраде детекторског сигнала и формирања видео сигнала термовизијског уређаја су:

- температурски ниво - представља ниво референтног сигнала који се одузима од детекторског сигнала због лакшег уочавања малих контраста на мереној површини и
- температурски прозор – контраст, представља опсег вредности напонског сигнала по једном нивоу сивог, у црно белој слици која се може приказати на екрану.

Екран има улогу да прикаже излаз из блока за електронску обраду сигнала као дводимензионалну расподелу видљиве светлости. Обично се за ову намену користе стандардни монитори. Овај подсистем важан је код преносних термографских камера (Васиљевић 2004).

#### 2.3.3.2 Основне карактеристике инфрацрвених термографских камера

Сваку термографску камеру дефинишу техничке карактеристике према којима се одређује подручје примене ових инструмената. Основне техничке карактеристике комерцијалних термографских инфрацрвених камера су:

1. уграђени детектор инфрацрвеног зрачења,
2. резолуција детектора инфрацрвеног зрачења,
3. таласни и температурски опсег мерења,
4. температурска резолуција,
5. просторна резолуција,
6. тачност и поновљивост мерења,
7. меморијске и видео карактеристике.

Детектори инфрацрвеног зрачења представљају најважнији елемент термографске камере који директно одређује многе физичко-техничке карактеристике уређаја. За групу преносних уређаја углавном се користе камере са нехлађеним детектором које су због својих габарита и цене у великој мери заступљеније на тржишту. Тако су у употребни доминантни нехлађени детектори у фокусној равни засновани на микроболометарској технологији.

Резолуција детектора инфрацрвеног зрачења, односно камере, дефинише се бројем пиксела на термографском снимку. Код термографских камера резолуција је значајно мања у односу на стандардне дигиталне фото-апарате (максимално 110.000 пиксела).

Снимци слика код стандардних термовизијских камера крећу се око 76.800 пиксела (320x240) па све до минималних 14.400 пиксела (120x120) које пружају слику са које се могу добити све жељене информације. Модели термографских камера које се најчешће користе се деле у две групе:

- камере напредних перформанси чија је резолуција 320 x 240 пиксела и
- камере мањих димензија чија је резолуција 120 x 120 или 160 x 120.

**Резолуција термографске камере *FLIR E50*** (слика 2.4) коришћене у експерименталном делу износи **240 x 180** пиксела.



**Слика 2.4** Камера *FLIR E50* коришћена у експерименту

Таласни и температурски опсег мерења дефинише регион у којем камера мери зрачење. Претходно је речено да термографске камере прате зрачење у средњем региону *MIR* (приказано у табели 2.1) инфрацрвеног опсега. Комерцијалне камере деле се у две групе према подрегиону инфрацрвеног зрачења:

- термографске камере – опсег од 8 до 15  $\mu m$  што представља дуготаласно инфрацрвено зрачење (*LWIR* подрегион),
- термографске камере – опсег од 2 до 5  $\mu m$  што представља краткоталасно и доње гранично средње таласно инфрацрвено зрачење (*SWIR* и *MWIR*, респективно).

Првој групи припадају камере које су осетљиве на нижим температурама и користе се за мерење температуре у опсегу  $-20$  до  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Стандардне комерцијализоване термографске камере коришћене у техничкој дијагностици углавном припадају овој групи.

За мерење температура које иду до  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  користе се камере осетљиве на дуготаласно зрачење али је за њихову употребу неопходна додатна опрема. Једна од њихових предности је могућност коришћења за мерење инфрацрвеног зрачења на већим удаљеностима, јер је смањење зрачења кроз атмосферу у *LWIR* подрегиону релативно мало.

Термографске краткоталасне камере осетљивије су на високим температурама па се претежно користе за специјализована индустријска постројења и мерења код којих се јављају високе температуре од преко  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . За разлику од дуготаласних камера, ове се могу користити за мерење зрачења на удаљеностима до  $200\text{m}$  јер је опадање зрачења кроз атмосферу у *SWIR* и *MWIR* региону прилично интензивно са повећањем удаљености.

Како би се повећала прецизност у одређеном опсегу мерења, опсег се дели на више делова, углавном на два дела, а ређе на четири.

Камера **FLIR E50** коришћена у експерименту припада првој групи која мери дуготаласна зрачења, са дефинисаним опсегом од **7,5 до  $13\text{ }\mu\text{m}$** .

Температурска (термичка) резолуција се дефинише као најмања температурна промена коју камера може да региструје. Дуготаласне камере најосетљивије су на температури од  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  док је код краткоталасних тај случај на  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Модерније термографске камере имају осетљивост од чак  $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ , док је код камера мањих димензија температурска резолуција од  $0,1$  до  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  на  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Камера **FLIR E50** има температурску резолуцију  **$0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$**  на температури  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Просторна резолуција је мера најмањег детаља који може бити приказан на термографском снимку. Просторну резолуцију исказује фактор тренутног видног поља који представља најмањи регион који детектор инфрацрвеног зрачења може да региструје или преко фактора укупног видног поља.

Фактор тренутног видног поља се израчунава као количник величине појединачног сегмента инфрацрвеног детектора и живе даљине оптичког система камере. За добијање фактора укупног видног поља узима се величина целог детекторског елемента (Тодоровић, Мачужић, Јермић 2009).

Пожељно је да просторна резолуција буде што већа јер директно зависи од величине детектора инфрацрвеног зрачења. Кад се повећава просторна резолуција, смањује се величина детектора што доводи до смањења електричног сигнала који детектор генерише под утицајем инфрацрвеног зрачења.

Тачност и поновљивост мерења представља особину која показује колико измерена температура одступа од стварне и њена вредност се исказује у процентима или као грешка мерења температуре у апсолутном износу ( $\pm 2^\circ \text{C}$ ).

Поновљивост представља вероватноћу да се резултат поновног мерења поклопи са претходним без обзира да ли је мерење тачно.

Меморијске и видео карактеристике подразумевају уобичајне меморијске картице за складиштење забележених фотографија или видео записа у дигиталном облику. Величина меморијске картице тачније простор који је на располагању за чување записа није од већег значаја јер се записи у сваком тренутку могу сачувати на рачунару, а како је резолуција мања у односу на стандардне дигиталне фото-апарате то картица може сачувати више записа. Постоји могућност коришћења и замене картице током снимања, са паузом приликом замене картице чиме се додатно обезбеђује складишни простор (Тодоровић, Мачужић, Јеремић 2009).

#### 2.3.3.3 Развој инфрацрвених термографских камера

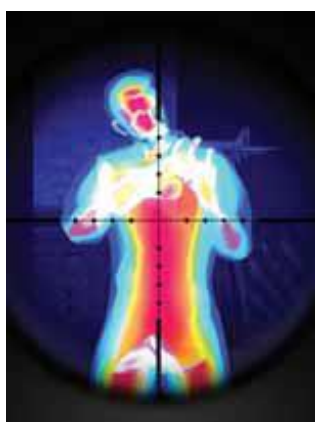
Приликом развоја и истраживања термовизијских уређаја постоје три међусобно повезане целине које је потребно дефинисати и испитати како би развојни програм био успешан:

- теоријски математичко-физички модел,
- лабораторијски тестови и
- теренска и верификациона испитивања.

Теоријски модели представљају математички приказ и симулацију модела простирања зрачења од извора до посматрача. При томе су укључени следећи параметри: својства циља и његова позадина, слабљење инфрацрвеног зрачења у атмосфери током простирања, детекција и обрада сигнала (оптика, сензор, електроника), приказ слике на екрану. Приликом развоја, овим моделима се дефинишу захтеви као што су топлотна осетљивост и резолуција уређаја које је потребно испунити. Математичко-физички модели одређују параметре потребне за пројектовање нових уређаја док са друге стране служе и за оцену карактеристика постојећих. Захтеви који се прописују и који се односе на теоријски модел, код уређаја западног порекла прописују се стандардом *NATO (STANAG) 4350*.

Методе лабораторијског мерења својстава прилагођавају се и развијају наменски према условима које лабораторија омогућава. Опремање лабораторија за ова испитивања је веома скупо, чак и за буџете предвиђене за истраживања за потребе војске. Лабораторијска испитивања служе да практично потврде теоријске моделе, након чега следе само теренска и верификациона испитивања.

Практични примери теренских испитивања приказују гађања оружјем кратког домета са муницијом у распону од 12,7 *mm* до 40 *mm*. У дневним условима резултати гађања су добри чак и на циљевима преко 1500 *m* али су у ноћним условима, где су коришћени уређаји са појачивачима слике постигнути су слаби резултати. Применом термовизијских уређаја у ноћним условима омогућава се идентификација циљева на практично истој удаљености као у дневним условима (приказано на слици 2.5). Ови резултати поређени су са тенковским термографским системима прве генерације (<http://odbrana.mod.gov.rs/>).



**Слика 2.5** Приказ слике употребе термовизије у ноћним условима

На овај начин се остварује могућности дејства у свим временским условима независно од средине дејства (урбана средина, шума, пустиња).

## 2.4 Примена инфрацрвене термографије

Инфрацрвене термографске камере због својих предности и доступности налазе примену у више области, од примене на пољу науке приликом истраживања и разних експеримената, кроз одржавање техничких система како би се на време идентификовали могући откази до примене у широј индустрији (машинство, електроника, грађевина, безбедност). Модули које камера нуди зависе првенствено од цене али се захтеви усклађују према потребама које дефинише област у којој се примењују (Breitenstein 2010, <http://odbrana.mod.gov.rs/>).

### 2.4.1 Примена термографије у војсци

Највећа предност термографских уређаја је у ноћним условима и када су услови смањене виљивости. У овим условима нишанске и класичне осматрачке справе не функционишу. У отежаним условима, када је видљивост смањена постоји могућност коришћења пасивних нишанских и осматрачких справа. Главна разлика између термографских уређаја и пасивних уређаја је та што уређаји на бази термографије раде на таласним дужинама од 3 до 5  $\mu m$  и од 8 до 14  $\mu m$  док пасивни уређаји раде на принципу појачања постојећег видљивог и блиског инфрацрвеног зрачења. Пасивни уређаји за појачање користе светлост звезда и Месеца који се налазе на небу.

Међутим кад су облачне ноћи без месечина ови уређаји нису корисни. На том пољу је термографија доминантна, иако је знатно скупља у односу на пасивне нишане (<http://odbrana.mod.gov.rs/>).

#### 2.4.1.1 Термовизијски нишани

Термовизијски нишани обезбеђују погодне услове за осматрање и детекцију циљева потребним наоружањима у дневним и ноћним условима, условима смањење видљивости и отежаним временским приликама. Термовизија се пре свега користи за осматрачке системе који су интегрисани у командно-информационе системе и омогућавају истовремено праћење и откривање више циљева.

Услови за визуелизацију „топлотних слика“ створени су појавом веома брзих полупроводничких кола високе интеграције и микропроцесора који су омогућили примену различитих техника за форматирање, обраду и побољшање слике.

Домети за детекцију, препознавање и идентификацију циљева рачунају се коришћењем наменских симулационих програма које дефинише стандард *STANAG 4347*. У савремене модуларне нишане уграђују се софтвери који се на једноставан начин прилагођавају специфичним захтевима за контролу ватре код специјализованих оружја. Имају могућност детекције промене температуре у вредности од  $0, 25 \cdot 10^{-3} \text{ K}$ , са временом интеграције од  $20 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ . На слици 2.6 приказан је модерни термовизијски нишан компаније *FLIR* (<http://odbrana.mod.gov.rs/>).



Слика 2.6 Савремени термовизијски нишани

#### 2.4.1.2 Термографија код тенкова

Модернизацијом тенкова, нишански и осматрачки уређаји са компјутерском обрадом података значајно повећавају могућности дејства на циљу без обзира на време дејства (дан или ноћ) и без обзира на временске прилике које смањују видљивост (магла, киша). Овој групи, поред ласерског даљиномера, балистичког рачунара, *GPS*-а, припада термографија. Термографска камера на куполи тенка повезана је рачунарима којима управља командир тенка, где се уз помоћ термографске слике лакше детектују циљеви.

На слици 2.7 приказана је даљински управљана кружна платформа RCWS типа WAVE 300, на коју је монтиран митраљез 12,7 *mm* који уз помоћ термографије има могућност прецизног дејства по циљу ноћу.



**Слика 2.7** Термографија на даљински управљаној платформи митраљез 12,7 *mm*

Приказана платформа на претходној слици налази се на индијском тенку друге генерације „Арцун“. Ефикасност термографије посебно долази до изражаја приликом борбених дејстава у урбаним срединама (Bhatnagar 2006, <http://odbrana.mod.gov.rs/>).

#### 2.4.1.3 Примена термографије код безбедносних система

Поред примене код борбених оружја/оруђа, вођених ракета, термографија масовну примену налази у системима безбедности (слика 2.8). Корисници су гранична полиција, затим агенције и компаније које обезбеђују велика складишта, бродоградилишта, фирме, опасне материје. На овај начин се спречавају нежељени догађаји и превентивно делује. Програм који се нуди је разноврстан у зависности од захтева купца и системи могу бити модификовани према потребама корисника (<http://odbrana.mod.gov.rs/>).



**Слика 2.8** Примена термовизије у системима безбедности

#### 2.4.2 Примена термографије у областима истраживања за потребе војске

Приликом истраживања и одређивања инфрацрвеног зрачења у области наоружања примена термографских камера има значајну улогу пре свега са аспекта безбедности. Првенствено омогућава праћење температурних промена са одређене удаљености која представља безбедан простор за истраживаче и учеснике експеримента. Могу се пратити температуре загревања пиштољских, пушчаних или било којих цеви оруђа/оружја приликом рафалне паљбе што омогућава практично мерење температуре која се може поредити са добијеним вредностима аналитичким прорачуном и нумеричким анализама. Поред загревања цеви може се мерити величина бљеска на устима цеви, као и процес периода сагоревања барутних гасова након напуштања пројектила на устима цеви. На слици 2.9 приказана је слика приликом полигонских испитивања где се одређује ефекат барутних гасова на устима цеви приликом опаљења из пиштоља (Bhatnagar 2006, Fawaz et al 2004, Lui et al 2016, <http://odbrana.mod.gov.rs/>).

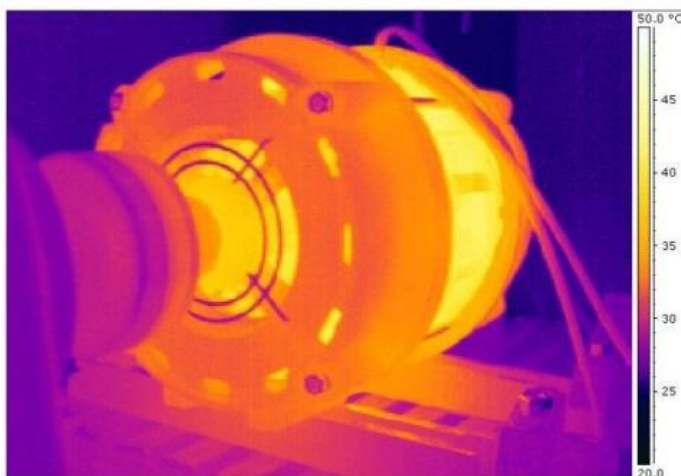


**Слика 2.9** Примена термографске камере за снимање ефекта барутних гасова приликом опаљења из пиштоља

### 2.4.3 Испитивање механичких система

Код механичких система испитивања се врше тамо где је присутно праволинијско или ротационо кретање (слика 2.10). Главни генератор стварања топлоте су триболошки процеси у механичким системима који преносе топлоту са места настанка на остале компоненте у систему. Одређивањем правца простирања топлоте, могу се одредити тачке са највишом температуром што омогућава да се идентификују делови који неправилно функционишу. На овај начин се спречава појава раног отказа што у великој мери може утицати на процес производње а самим тим на смањење трошкова. Углавном су те компоненте лежачеви, каишеви, спојнице, вратила и осовине, ланчаници.

Триболошки процеси проузрокују повећање температуре која настаје као последица хабања које са сигурношћу води ка отказу система (Тодоровић, Мачужић, Јерemiћ 2009, Vollmer and Mollmann 2010).



**Слика 2.10** Примена термовизије код механичких система –ротационо кретање

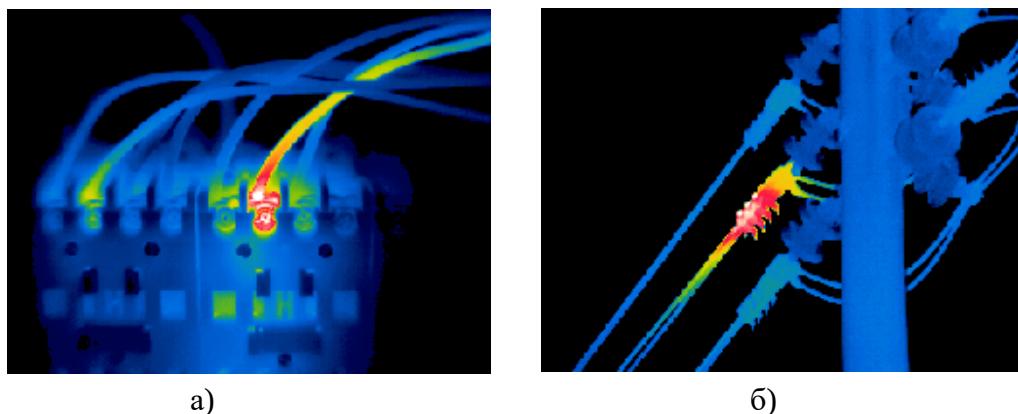
### 2.4.4 Испитивање електричних и електронских система

Како мерење температуре термографским камерама представља бесконтактну методу мерења омогућава највећи степен безбедности. Према томе у широј примени термографија је најзаступљенија код испитивања електричних и електронских система. За разлику од механичких система, код електронских система температура је једини показатељ промене температуре и појаве отказа. Подручја примене термографије код електронских система су следећа:

- идентификација компоненти са високим и ниским температурама и
- испитивање високонапонских компоненти и система.

У првом случају, повишена температура је први индикатор неправилног функционисања или преоптерећења одређене компоненте. Оба случаја повећавају вероватноћу изненадног отказа (осигурачи, прекидачи, контактори, трансформатори, отпорници) па је ова метода одређивања веома значајна. На собним или уобичајним дневним температурама могуће је идентификовати компоненте које су отказале (осигурачи) што омогућава замену исте без прекида рада целог система (слика 2.11а).

Код испитивања високонапонских система предности које има термографија веома су значајне. Прво је отежан приступ овим системима, док са друге стране у случају искључивања проузрокују велике губитке. Примена термографије за откривање потенцијалних отказа трафо-станица, далековода, високонапонских трансформатора представља кључну улогу (слика 2.11б) (Тодоровић, Мачужић, Јеремић 2009, Vollmer and Mollmann 2010, Prakash 2012).



Слика 2.11 Термовизијско испитивање електричних и електронских система

### 3. Развој нових материјала за потребе војне индустрије

Област материјала подразумева низ фундаменталних и инжењерских дисциплина које представљају основу за истраживање и развој нових материјала (<http://www.itn.sanu.ac.rs/indexsr.html>).

Материјали који се примењују на пољу технике према основној подели се могу разврстати на машинске, грађевинске, електричне и текстилне. Према стању, материјали се деле на чврсте, течне и гасовите.

Инжењерски (машински) материјали се користе за израду делова и уређаја заступљених у свим сферама науке. Машински материјали се могу поделити на три класе материјала:

- метали,
- керамике и полимери и
- композити (настали комбинацијом керамике и полимера).

Један од композита који се може наћи у природи је дрво, које се састоји од природне смоле и целулозних влакана.

Сви материјали класификују се према својим особинама које им одређују њихове механичке и конструкционе карактеристике:

- механичке особине (својства отпорности, тврдоће, деформације),
- специфичне тежине – густине и
- технолошке особине – обрадивост материјала (ковност, заварљивост, машинска обрадљивост).

Наведене особине формирају цену коштања материјала, његов век трајања, отпорност на специфичне услове експлоатације (хабање, корозија), рад на различитим радним температурама (Јовановић, Адамовић, Лазић et al 2003).

#### 3.1 Керамички материјали

Керамички материјали представљају једињења која су добијена комбинацијом металних и неметалних елемената. Савремени керамички материјали развијају се као нови материјали за потребе савремене индустрије где се јављају високи притисци и температуре, велике брзине кретања. Настају као резултат планираних истраживања са унапред дефинисаним особинама материјала који се развија. Поред материјала добијених синтерованем, групи савремених материјала припадају и старије керамике који су савременим поступцима обраде добили потпуно нове, побољшане карактеристике (Јовановић, Адамовић, Лазић et al 2003, David et al 2016).

Керамичке материјале одликује јединствена комбинација добрих особина које омогућавају широку примену. Основне особине керамичких материјала:

- висока тврдоћа,
- кртост,
- отпорност на високе температуре,
- мала електрична и топлотна проводљивост и
- висока хемијска стабилност.

Композитни материјали могу се поделити у три групе према основи формирања матрице:

- метали – композитни материјали са металном основом (*MMC - metal matrix composite*),
- полимери – композитни материјали са полимерном основом (*PMC – polymer matrix composite*) и
- **керамике – композитни материјали са керамичком основом (*CMC – ceramic matrix composite*).**

У ширем смислу, керамичким материјалима припадају камен, **глина**, ватростални материјали, **техничка керамика** и стакло. У даљем раду биће описани глина и техничка керамика (Јовановић, Адамовић, Лазих et al 2003, Bhatnagar 2006).

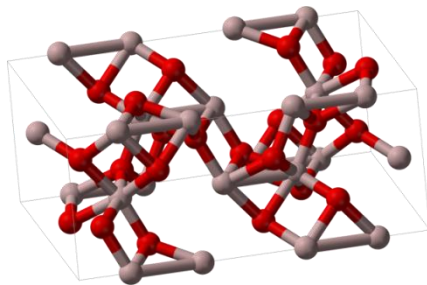
### 3.1.1 Глина

Општи назив **глина** подразумева материјале састављене од веома ситних честица кварца, каолина, лискуна и других минерала. Глина представља главну сировину у керамичкој индустрији. У основи, глина се може поделити на грубу и на фину керамику. Под термином груба керамика подразумевају се керамички материјали за израду црепова, разних ватросталних материјала, синтерованог камена, керамичких плочица. Фина керамика обухвата производе на бази порцелана.

Главни састојак глине представља  $Al_2O_3$ , затим  $SiO_2$ , одређене нечистоће и вода. За употребу у индустрији најважнија је ватростална глина (шамот) која може да садржи до 7% нечистоћа што подразумева оксиде гвожђа, калијума, магнезијума или креч.

Глине као керамички материјали према квалитету могу се поделити на ниско квалитетну, обичну и супер глину. Ниско квалитетну глину одликује мали садржај  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  и могу се употребљавати на температурама до  $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ , обичне глине се могу користити на температурама до  $1370\text{ }^{\circ}\text{C}$  и супер глина на  $1650\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Алуминијум-оксид  $Al_2O_3$  (слика 3.1) која је најраспрострањенија керамика има температуру топљења  $2038\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тврдоћу  $2200\text{ HV}$ , притисну чврстоћу  $\sigma_{mc}=2820\text{ MPa}$ .



Слика 3.1 Структура алуминијум-оксида

Као финални производ може се добијати у блоку, праху или као превлака. Примењује се за израду брусних алата, као изолатор за свећице, у области балистичке заштите. У области балистичке заштите користи се при изради панцирних прслука за заштиту од пројектила калибра 5,56 mm и 7,62 mm (Јовановић, Адамовић, Лазић et al 2003)

### 3.1.2 Техничка керамика

Керамички материјали се данас у машинству користе као абразивни материјали, тврди метали за израду резних алата и као супер тврди материјали. Примену налазе у моторној индустрију где се користе као конструкциони материјал за оптерећене делове мотора, у авио и космичкој индустрији, војној индустрији и другим гранама индустрије где се постављају специфични захтеви на које керамичке карактеристике могу адекватно одговорити. У техничку керамику спадају алуминијум-оксид  $Al_2O_3$ , силицијум карбид  $SiC$ , берилијум оксид  $BeO$ , баријумтитанит  $BaTiO_2$ . За пресовање се припремају у облику сувог праха. Представљају добре изолаторе и представљају материјале велике чистоће због чега су веома скупи.

Абразивни материјали од керамике служе за полирање и брушење материјала мање тврдоће. Производи су брусеви, брусне траке, тоцила који се добијају повезивањем ситних керамичких честица. Приликом израде, везивни материјал је органска смола, глина или адхезиви на бази гуме. Један од најзначајнијих абразивних материјала је борнитрид који представља материјал тврђи од дијаманта а термички је стабилнији.



Слика 3.2 Материјали за брушење

Композитни материјали са керамичком основом (СМС – *ceramic matrix composite*) представљају синтеровани материјал који чине две врсте материјала. Једна врста је керамика која представља основни материјал и друга је метал који се налази у мањој количини а има улогу везивног средства. Ови композити имају побољшане карактеристике које обједињује мешавина два материјала, керамика даје отпорност на високе температуре, ватросталност и отпорност на корозију, а метал даје добре механичке особине на собној температури и има добру отпорност на удар. Подела керамика-метал композита врши се према керамичкој компоненти: оксидне, карбидне, нитриде, боридне, силикатне. Примену налазе у авио индустрији при изради млазних мотора, затим за израду кочионих дискова, ватроотпорних и термостојаних материјала (Јовановић, Адамовић, Лазић et al 2003, Лукић 2014, Мирковић 2006)

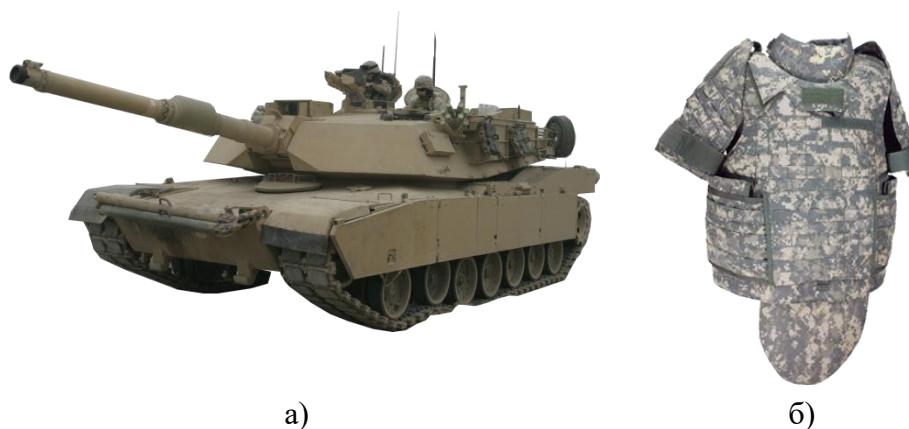


Слика 3.3 Композит керамика метал

### 3.2 Примена керамичких материјала у војној индустрији

Развој нових материјала за потребе војне индустрије представља највећи изазов за истраживаче јер се након откривања новог материјала са побољшаним карактеристикама исти брзо превазилази. За потребе цивилне индустрије развија се нови материјал, композит, са побољшаним карактеристикама који након тога улази у свакодневну примену и серијску производњу и услови за које се развија остају непромењени или варирају у веома малим границама. За разлику од цивилне, војна индустрија захтева потпуно другачији приступ, знатно динамичнији, јер се откривени материјал одмах по доласку у руке непријатеља испитује и налази оружје/оруђе које га може ефикасно разорити и извршити жељено дејство. Приликом развоја новог материјала за оклопна возила одмах следи развој пројектила који својим дејством исти може пробити.

Примена керамичких материјала у својству композита за примену оклопне заштите представља важан фактор у развоју борбених возила. Композити на бази керамике омогућавају знатно већи ниво заштите у односу на еквивалент тежине металног оклопа. Веома ефикасни показали су се у одбрани од противоклопних система (поткалибарних и кумулативних пројектила). Поред израде оклопне заштите (слика 3.4а), користе се за израду прслука за личну заштиту (панцири) у комбинацији са полиетиленом високих перформанси и арамидним влакнима (слика 3.4б) (Bhatnagar 2006, Lui 2016, Lopez-Fuente 2005).



Слика 3.4 Керамика за израду средстава заштите

Главна одлика керамике је релативно мала густина (пример је  $Al_2O_3$  који је дупло лакши од челика), вишеструко већа тврдоћа, али и неупоредиво мања жилавост. Први који су употребили керамику били су руси, на свом Т-64 А/Б. Они су унутар чела куполе користили уметак од кугли  $Al_2O_3$  уливених у легуру алуминијума - силумин. То се показало као ефикасније него чист силумин из претходне варијанте, пре свега због веће абразивне моћи. На тенковима Т-72 А/М1 у предњој страни куполе коришћен је јефтинији али мање ефикасан уметак од песка који је спајан са воденим стаклом, док су нешто касније тенкови попут Леопарда 2 и Абрамса користили керамику на бази ваљаних плоча које су далеко погодније за остваривање модуларности. Нису коришћење керамичке кугле, већ плоче, тачније призматични сегменти који су са свих страна били облагани различитим материјалима попут легуре алуминијума и челика високе тврдоће. Систем функционише тако што се керамика након удара ломи, мрви и тежи да напусти затворен простор у којој се налази а то се дешава на најслабијем месту. То место је тамо где је пројектил пробио оклоп и на овај начин се значајно ремети кумулативни млаз.

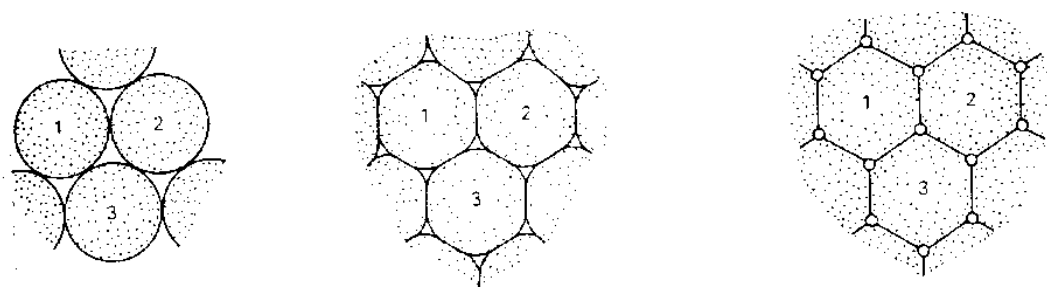
Оклопно тело израђено је од најновије врсте панцирних и композитних материјала високе балистичке отпорност. Састоји се од неколико слојева композитних материјала керамике, челика, легуре титана и угљеничних наноцеви.

За оклопну заштиту индијског тенка нове генерације „Арџун-2“ коришћени су композитни материјали. Основни оклоп је од челика канкан (*eng. Chanchan*). Са овим *RHA* челиком примењен је модуларни оклоп вишеслојних композита сачињен од керамике, алуминијума, фибер-гласа и легура никла. Поред овог развијен је и вишеслојни мултифункционално ојачани фибер-полимер-*FRP*, композитни материјал као додатак подструктури шасије и куполе. Такође, развијен је композитни интегрални оклоп - *CIA* који садржи керамичке плочице и гумени слој између композитних слојева- *FRP*. Спољашњи слој *FRP* има функцију покривке, керамички слој примарно обезбеђује заштиту од кинетичких пројектила, а унутрашњи слој јавља се као апсорбент кинетичке енергије пројектила (Bhatnagar 2006, <http://odbrana.mod.gov.rs/>).

### 3.3 Синтеровање материјала

Синтеровање материјала представља процес међусобног повезивања честица пресованог праха на температури испод тачке топљења материјала. Прахови који се пресују могу бити мешавине више метала или неметала. На бази доминантног материјала разликују се гвоздени, бакарни, алуминијумски синтеровани материјали и керамички материјали. Процес синтеровања представља мешање прашкастих материјала који се међусобно приближавају дејством високог притиска а затим на повишеној температури међусобно спајају.

Један од циљева синтеровања је сједињавање различитих материјала у једну целину како би синтеровани материјал имао боље карактеристике од полазних карактеристика основног материјала. За разлику од легирања, код синтеровања полазни материјали не мењају своју маркоскопску структуру већ се честице на микро нивоу међусобно зближавају и смањују међуатомско растојање (слика 3.5) (Јовановић, Адамовић, Лазић et al 2003, Лукић 2014).



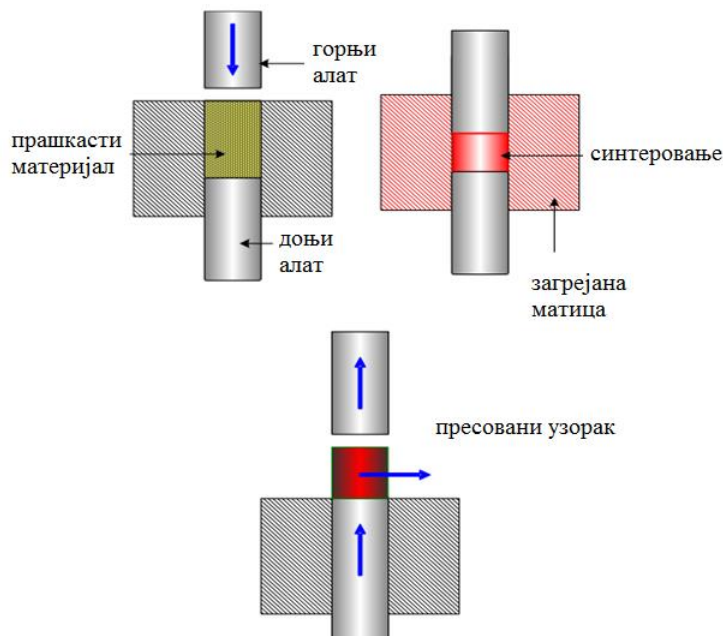
Слика 3.5 Зближавање атома под дејством притиска

Методe синтеровања које се примењују су:

- **конвенционално синтеровање,**
- изостатичко синтеровање и
- синтеровање истискивањем.

**Конвенционално синтеровање** представља релативно једноставан процес. У калуп који је израђен тако да дефинише облик коначног предмета додаје се прах који је претходно помешан, чиме су дефинисани сви материјали који улазе у састав финалног производа. На прах који се налази у калупу делује се покретним алатом чији се притисак унапред одређује.

Процес се може реализовати на собној или повишеној температури у зависности од услова међусобног дејства честица под високим притиском и одређеној температури (слика 3.6).



Слика 3.6 Процес синтеровања

Овим методом синтеровања добијају се високо чврсти и жилави производи уз могућност добре поновљивости израде истих делова уз веома мала одступања.

Углавном се пресовање изводи на хладно па онда следи процес синтеровања односно загревање добијених узорак како би дошло до међусобног повезивања честица. Приликом пресовања на хладно прашкасти материјал своју почетну запремину (слободно насуту) смањује двоструко или троструко. Овако пресовани узорци имају малу јачину па је неопходно да се пеку на температури која се одређује према компонентама које чине смешу. У случају више компонената које улазе у састав, температура на којој се пеку узорци може довести до тога да поједине компоненте могу прећи у течно стање јер се синтеровање врши изнад температуре топљења те компоненте. Температура се одређује према обрасцу:

$$T = (0.7 \div 0.8) \cdot T_t \quad 3.1$$

Када су у питању карбиди, бориди, оксиди и дијамантско-металне смеше које спадају у тврде и тешко топлјиве прашкове пресовање је потребно вршити на температури од  $\approx 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  и притиску од  $\approx 1000\text{ bar}$ . Алатни челици произведени на овај начин имају финозрнасту структуру и бољу хомогеност од алатних челика произведених конвекционалним поступцима. То продужава век трајања алата и његову отпорност на хабање.

Постоји могућност додатног побољшања синтерованих производа испуњавањем пора у гвозденим деловима за шта се најчешће користе бакар или полиестер. Ова дорада побољшава заптивност, глаткост, бољу машинску обрадивост и корозиону отпорност.

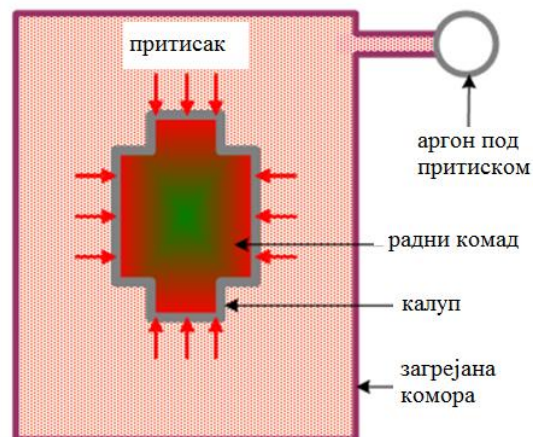
Генерално, металургија праха (синтеровање) подразумева избор материјала за синтеровање, припрему праха, конструкцију алата и адитива (уколико је потребан) након чега следи сабијање и синтеровање прашка у један комад (Јовановић, Адамовић, Лазић et al 2003, Лукић 2014).

Изостатичко синтеровање подразумева истовремено дејство притиска са свих страна на радни предмет под високом температуром. На овај начин добија се уравнотежена расподела честица унутар радног комада, постиже се равномерна порозност производа. Овај начин синтеровања користи се за израду сложенијих конфигурација.

Постоје две варијанте изостатичког синтеровања:

- хладно изостатичко пресовање (само уз дејство притиска) и
- топло изостатичко пресовање (дејство притиска и температуре истовремено).

Топло изостатичко пресовање спада у поступке који истовремено обухватају дејство притиска  $\approx 2000\text{ bar}$  и температуре  $\approx 2200\text{ }^{\circ}\text{C}$  што омогућава пресовање и синтеровање у истом кораку (слика 3.7). На овај начин постиже се потпуна или теоријска густина материјала.



Слика 3.7 Изостатичко синтеровање

Процес топлог изостатичког синтеровања спада у скупе поступке па се због економичности користи само за добијање сложених производа (слика 3.8) од посебно одабраних материјала ( $Ti$ ,  $Al$ , тврди метални композити) (Delaey 1993).



**Слика 3.8** Ротор за рад при високим температурама од индустријске керамике израђен поступком врућег изостатичког синтеровања

Синтеровање истискивањем почиње предмешањем металног праха са органским везивом (термопластична мешавина воска, полимера, уља, мазива) након чега следи мешање и гранулирање смеше која се убризгава у калуп. Након пресовања везиво које додато се уклања отапањем и завршни корак је синтеровање. Честице праха који се припрема се крећу у распону од  $10 \mu m$  до  $150 \mu m$ . Након синтеровања код овог типа предприпреме долази до смањења димензија због присуства везива (око 20%) (Јовановић, Адамовић, Лазић et al 2003).

## 4. Примена термографије при развоју новог материјала

### 4.1 Планирање експеримента

Експеримент представља сложен појам у теоријском и техничком смислу. Предуслов за успешан експеримент је добро испланиран и осмишљен ток реализације. Експеримент је тест или серија тестова у којима се променом улазних величина утврђује утицај тих промена на излазне величине узорка предмета, процеса или система. Експериментална истраживања као примарни циљ имају да разјасне одређене феномене у области науке, допринесу развоју и побољшању производа или система, или да на одговарајући начин оцене перформансе постојећих система.

Експериментална испитивања широку примену имају у фази **развоја производа**. Развој самог производа представља веома сложен процес. Напредовање савремене индустрије наметнуо је потребу за развојем нових производа у апсолутно свим областима науке. Само један од захтева је оптималан однос цене коштања и квалитета самог производа, међутим постоје захтеви где се чак овај однос занемарује а све у циљу остваривања одређеног захтева.

Прегледом одговарајуће литературе неопходно је добити информације: који проблеми су били изражени приликом сличних испитивања, да ли се неко бавио тим проблемом и слично. Све информације из обрађене литературе доприносе успешнијем коначном резултату (Тадић 2015).

На слици 4.1 представљена је шема на којој су приказани основни услови за успешну реализацију експеримента.



Слика 4.1 Основни услови за успешну реализацију експеримента

Теоријски анализиран проблем један је од услова за успешну реализацију експеримента. Теоријска анализа подразумева преглед литературе сличних експеримената и области из којих се експеримент реализује. У овом делу се постављају основни принципи и токови даљег експеримента.

Други услов представља идејно решење што представља добру физичку и техничку основу. Препоруке су да се никада не усваја прво идејно решење, већ да се размотри више идеја, консултују стручни кадрови који имају искуства у операцијама које су део рада и идеју вишекритеријумски оптимизирати. Потребно је обратити пажњу на одступања, системске грешке, сложеност експеримента и на крају на поузданост добијених резултата.

Експеримент спада у сложен подухват који обухвата низ активности и различитих операција. Самим тим захтева се добра организација како би се обезбедили потребни услови за квалитетан рад. Приликом реализације сваког експеримента постоји могућност да исти не успе, а вероватноћа је у корелацији са компетенцијама реализатора и учесника и са питањем сложености експеримента. Ако је број компетентних учесника већи, вероватноћа за успешну реализацију експеримента расте.

Добро испланирана и затворена финансијска контрукција представља веома важан услов за успешну реализацију експеримента. У случају да се појави недостатак финансија самим тим расте вероватноћа поузданости усвојених физичких модела, мерне опреме и других инструмената који се користе. Набавка опреме у већини случајева представља највећи финансијски терет па је са те стране добро размотрити шта све од опреме има на располагању за сам експеримент.

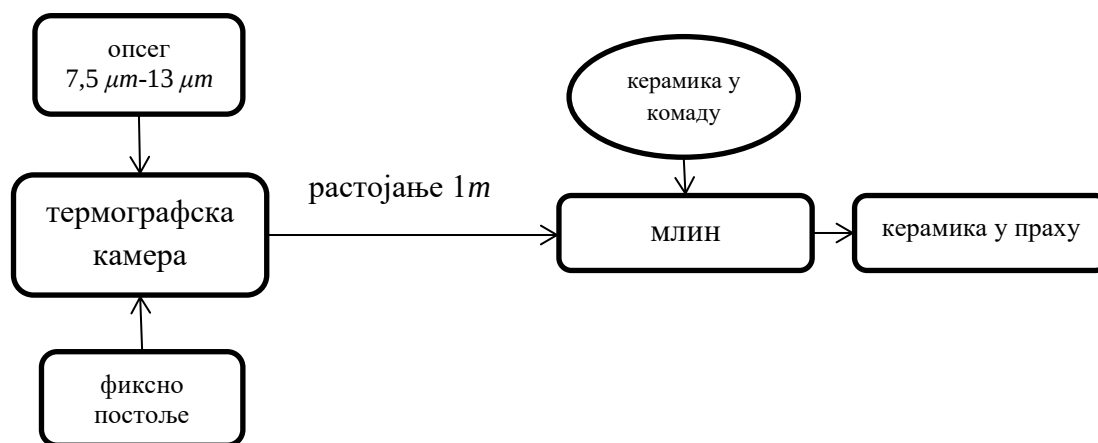
Приликом планирања експеримента увек треба водити рачуна на потенцијална одступања и кашњења која се не могу увек са прецизношћу предвидети. Што је већи број учесника и руковаоца опреме укључено у реализацију експеримента вероватноћа за кашњења је извеснија. Ове факторе треба предочити и на време отклонити тачније смањити шансе да до кашњења дође.

Поуздана мерна опрема обезбедиће већу прецизност и тачније резултате мерења. Зато при планирању експеримента треба изабрати поуздану мерну опрему код које је могућност одступања од тачних резултата минимална. За потребе експеримента од мерне опреме коришћења је термовизијска камера „*FLIR E50*“ како би се пратиле температурне промене узорака.

Добијене резултате мерења треба адекватно обрадити статистичким методама и тестовима и приказати их у виду *2D* и *3D* дијаграма кроз релативне односе променљивих, дефинисати одређене хипотезе и слично (Тадић 2015).

Безбедност учесника приликом извођења експеримента представља апсолутни приоритет са било које тачке гледишта. Када су у питању експерименти који се реализују за потребе наменске индустрије, развој нових или испитивања постојећих решења, потребно је посебно посветити пажњу. Имајући у виду до каквих све последица могу довести потенцијални инциденти/акциденти потребно је сагледати све потенцијалне хазарде. Рад са опасним материјама, убојним средствима и слично може довести до нежељених догађаја уколико се не предузму потребне мере безбедности (Тадих 2015, Ђурић и Вукадиновић 2015).

Шематски приказ поставке термографске камере приликом млевења керамике:



**Слика 4.2** Шематски приказ плана експеримента са основним уређајима и процесима

## 4.2 Теоријска анализа примене термографије при развоју материјала

Примена инфрацрвене термографије широко је распорастрањена и омогућава праћење температурних промена одређених површина. Приликом планирања експеримента анализиране су могућности примене термографије за праћење појединих фаза развоја новог материјала.

Планом је предвиђено пратити температурне промене млина током мљења керамичког материјала и припреме праха за синтеровање. На основу термографске слике повезује се зависност температуре површине млина од гранулације честица. Овај начин праћења промене температуре пружа могућност карактеризације особине материјала у раној фази, приликом припреме материјала. Величина честица керамике директно утиче на каснији процес синтеровања материјала. Добијање жељене гранулације честица приликом мљења, може се остварити кроз праћење температурних промена млина.

Приликом мљења керамике у млину, термографска камера је постављена на фиксно постоље како би се током десетоминутног периода пратиле промене температуре горњег дела млина (поклопац и радни део где се налази нож).

Композитни материјал који је у потпуности развијен током експеримента представља смешу керамике и метала. Примена ових врста материјала користи се код израде панцирних плоча, за израду панцирних прслука, за оклопну заштиту борбених возила. Прегледом опреме која је на располагању и могућност набавке материјала (керамика и метал) који су потребни за развој новог композита изведен је закључак да постоје сви потребни услови за реализацију експеримента у лабораторијама Факултета. Развој ове врсте материјала је актуелна тема у светској војној индустрији и увек се тежи развоју нове и усавршавање постојеће оклопне заштите. Поред тога постоје домаће фирме и предузећа која производе опрему и борбена возила где керамика-метал композит има директну примену (Meola and Carlamagno 2004, Meola et al 2004, Meola et al 2005, Јовановић, Адамовић, Лазих et al 2003).

## 4.3 Припрема материјала и израда калупа

### 4.3.1 Припрема материјала

Развој материјала тежи стварању новог композита на бази керамике са додатком металног праха. За основни материјал који чини керамика користи се грађевинска керамика (цреп за кровове) која се израђује од глине.

Глина представља геолошке слојеве који настају распадањем фелдспатних и других стена у природи. Обично представљају мешавину основних глинених минерала као што су каолинит, монтморилонита и илит.

Као примесе основним састојцима обично се налазе кварц, лискун, кречњак и други минерали. Главни састојак глине је  $Al_2O_3$ , затим  $SiO_2$ , нечистоће и вода (описано у поглављу 3.1.1).

За експеримент коришћен је цреп *Kontinental lux* произвођача „Младост Лесковац“ (слика 4.3).



Слика 4.3 Цреп *Kontinental lux*

Тежина црепа износи  $39,37 \frac{kg}{m^2}$ . Савојна чврстоћа црепа са слике 4.3 износи  $1,85 kN$ . Комад црепа је уситњен како би се могао убацити у млин и самлети, чиме се добија прашкаста структура материјала неопходна за процес синтеровања (слика 4.4).



Слика 4.4 Керамика припремљена за млевење

У млин *IKA M20 Universal mill* (слика 4.5a) се убацује претходно припремљена керамика и млевењем у трајању од 4 минута добија се потребна гранулација честица керамике. Овај веома крт материјал са високом температуром топљења погодан је за поступак млевења.

Нож који се користи приликом млевења израђен је од нерђајућег челика (1.4043) који има максималну брзину окретања  $2000 \text{ min}^{-1}$  (приказан на слици 4.5б).



а)



б)

**Слика 4.5** Млин и нож са којим је керамика млевена

Поступак млевења реализује се периодичним понављањем (10 секунди млевења, 10 секунди пауза) док се не добије жељена прашкаста структура керамике. На слици 4.6 приказана је керамика у млину након завршеног млевења.



**Слика 4.6** Керамика након млевења

Други материјал који улази у састав композита је **ребрасти бетонски челик B500B**. Према стандарду *SRPS EN 10080* дефинисано је да вредности појединих елемената које улазе у састав бетонског челика не смеју да пређу вредности од 0,22% C, 0,050% S, 0,050% P.

Стандардом је дефинисано да се челици за армирање бетона обележавају ознаком *B500*. Зависно од облика, распореда и нагиба попречних ребара у односу на уздужну осу бетонски челик добија додатну ознаку *B500A*, ***B500B***, *B500C*. За бетонски челик *B500* стандардом је дефинисан минимални напон течења  $R_{eh}=500 \text{ MPa}$  (<http://www.ingkomora.org.rs/>).

Бетонски челик челик ***B500B*** који се користи у експерименту испитан је у центру за квалитет ***EUROPOLIS***. Испитивања нису реализована за потребе експеримента већ је извештај о испитивању коришћеног челика добијен од произвођача (*METALFER STEEL MILL*). У табели 4.1 дате су методе испитивања и мерна опрема према којима је челик испитиван:

Табела 4.1 Методе испитивања бетонског челика *B500B*

| Методе испитивања                                   | Коришћена опрема                                           |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <i>SRPS EN ISO 15630-1:2011 t. 5, 6, 10, 11, 12</i> | Универзална хидраулична машина <i>WALTER+BAI AG 150 kN</i> |
| <i>SRPS EN ISO 6892-1:2012 – метод Б</i>            | Екстензиометар <i>RDP 0-10 mm</i>                          |
| <i>SRPS EN ISO 7438-1:2011</i>                      | Дигитална вага <i>METTLER TOLEDO 0-3000g</i>               |
| <i>SRPS C.A1.011:2004</i>                           | Универзално помично мерило <i>ORION 0-150 mm</i>           |
| <i>SRPS EN 10080:2008 t. 7.3.2, 7.4.2</i>           | Угломер <i>INSIZE</i>                                      |
|                                                     | Оптички емисиони спектометар <i>ARL 3460</i>               |

Испитивања бетонског челика *B500B* су реализована према стандарду *SRPS EN 10080:2008*. У табели 4.2 биће приказани резултати испитивања која су од значаја за експериментални развој композита.

Табела 4.2 Резултати испитивања механичких особина и хемијског састава

| Резултати испитивања механичких особина затезањем |               |            |              |         |                                        |          |          |          |         |
|---------------------------------------------------|---------------|------------|--------------|---------|----------------------------------------|----------|----------|----------|---------|
| $d, mm$                                           | $R_{eh}, MPa$ | $R_m, MPa$ | $R_m/R_{eh}$ | $A, \%$ |                                        |          |          |          |         |
| 10                                                | 551           | 618        | 1,12         | 6       | Резултати испитивања хемијског састава |          |          |          |         |
| $C, \%$                                           | $S, \%$       | $Mn, \%$   | $P, \%$      | $S, \%$ | $Cr, \%$                               | $Mo, \%$ | $Ni, \%$ | $Cu, \%$ | $V, \%$ |
| 0,20                                              | 0,22          | 0,62       | 0,007        | 0,05    | 0,15                                   | 0,02     | 0,13     | 0,19     | 0,002   |

У табели су дате вредности:

$d$ - пречник шипке,

$R_{eh}$ - напон течења,

$R_m$ - затезна чврстоћа,

$R_m/R_{eh}$ - однос напон течења и затезна чврстоћа,

$A$  – укупно издужење при максималној сили.

Према вредностима из табеле 4.2, од свих легирајућих елемената бетонски челик *B500B* у највећем проценту садржи манган.

Бетонски челик се приликом набавке налази у праху што у великој мери олакшава реализацију експеримента (приказан на слици 4.7а). На слици 4.7б приказани су керамика и бетонски челик припремљени за експеримент.



а)



б)

Слика 4.7 Бетонски челик *B500B* и керамика у праху

#### 4.3.2 Израда калупа

Развој новог композита реализује се конвенционалном методом синтеровања (поглавље 3.3). Примарни циљ експеримента је реализација што већег броја операција на опреми којом располаже Факултет. Тако је за процес пресовања прашкастог материјала на механичкој кидалици (приситак, затезање) неопходно израдити калуп. Идејно решење представља израду два калупа од једне шипке и две цеви различитог пречника:

- шипка пречника  $D = \varnothing 30 \text{ mm}$ ,
- цев пречника  $D = \varnothing 41 \text{ mm}$  и дебљине зида  $t = 6 \text{ mm}$  и
- цев пречника  $D = \varnothing 33 \text{ mm}$  и дебљине зида  $t = 4,5 \text{ mm}$ .

Како се прах под дејством силе ( $F=20000N$ ) не би кретао у смеру супротном од смера кретања алата којим се притиска неопходно је израдити калуп где између покретног алата (шипке) и фиксног дела (цев) постоји лабаво налегање. Лабаво налегање или налегање са зазором ( $H7/h6$ ) у случају пресовања треба да обезбеди центрирано кретање покретног алата. Да би се добило налегање са зазором неопходно је машински обрадити шипку и цев. Пример калупа након машинске обраде стругањем приказан је на слици 4.8.



Слика 4.8 Калуп за пресовање прашкасте смеше

#### 4.4 Праћење температурних промена термографском камером *FLIR E50*

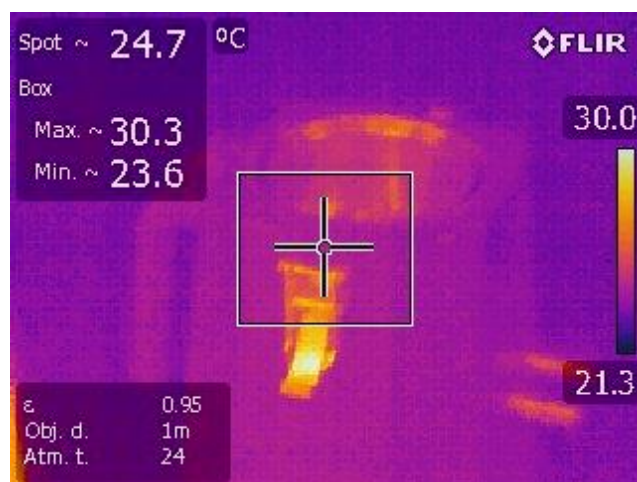
Планом експеримента предвиђено је мерење температурне промене површине млина од почетка млевења керамике до почетка хлађења површине млина. За добијање термографске слике температурне промене површине млина користи се камера *FLIR E50*. У току млевења керамике, топлота се преноси из унутрашњости млина до спољне површине чија се промена температуре (кондукција) мери. Термографска камера *FLIR E50* може пратити температурне промене у опсегу од  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Има могућност фотографисања и снимања са детектором  $240 \times 180$  пиксела. Поседује температурску резолуцију од  $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Камера мери дуготаласна зрачења у дефинисаном опсегу од  $7,5\text{ }\mu\text{m}$  до  $13\text{ }\mu\text{m}$ . На слици 4.9 је приказана термографска камера која је коришћена током експеримента.



Слика 4.9 Камера *FLIR E50*

У току експеримента камера се постављена на фиксно постоље на удаљености  $1\text{ m}$  од површине чија се температура мери. Камера је подешена тако да прати промену температуре у дефинисаном оквиру и у центрираној тачки. Прати се температура тачке, минимална и максимална температура унутар дефинисаних граница задатог оквира.

Подешавају се параметри мерења на температуру од  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , коефицијент емисивности износи  $\varepsilon = 0,95$  и удаљеност је  $1\text{ m}$ . Фотографија направљена пре почетка експеримента приказана је на слици 4.10 где је дефинисан оквир у коме се мери распон минималне и максималне температуре и тачка која се налази у центру оквира.



Слика 4.10 Дисплеј камере пре почетка млевења

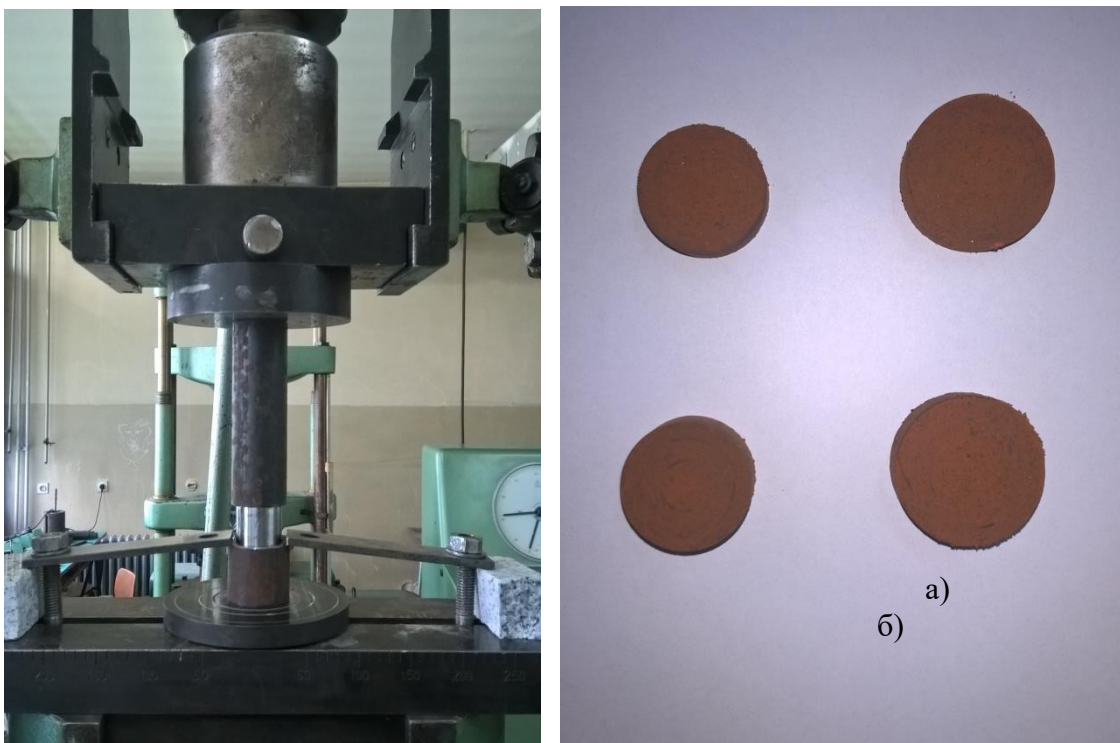
Термографском камером се прати температурна површине млина у периоду од 10 минута. Поступак млевења траје 4 минута али се након завршетка млевења наставља праћење температуре све до тренутка стабилизације температуре и лаганог почетка пада.

#### 4.5 Пресовање смеше керамика-метал

Материјали керамике и бетонског челика претходно су припремљени за процес пресовања. Керамика је млевена у млину *IKA M20 Universal mill* док је прах бетонског челика *B500B* обезбеђен од стране дистрибутера грађевинског материјала.

Прашкасти материјали су помешани у односу 90:10 (90% керамика, 10% бетонски челик) уз додатак воде како би смеша добила жељени облик потребан за добијање једне целине након пресовања. Калуп (поглавље 4.3.2) је прилагођен механичкој кидалици, где је доњи део калупа (цев) фиксиран, а покретни део који врши притисак центриран је у односу на цев.

Механичка кидалица делује силом од  $F = 20000\text{ N}$  на горњи део алата који притиска смешу која се налази у доњем делу калупа (слика 4.11a). Након достизања вредности задате силе следи растерећење и ослобађање калупа који је претходно фиксиран. После пресовања потребно је извадити узорак који се налази у доњем делу калупа. На радном столу поред кидалице поставља се калуп и дејством на горњи део алата узорак који се налази у калупу се ослобађа. Добијени узорци након пресовања приказани су на слици 4.11б.



Слика 4.11 Пресовање смеше на механичкој кидалици и добијени узорци

#### 4.6 Синтеровање смеше керамика-метал

Узорци који се након пресовања сједине у компакну целину под дејством силе од  $F=20000N$  пеку се на температури од  $1200^{\circ}C$ . Температура печења се одређује према обрасцу 3.1 :

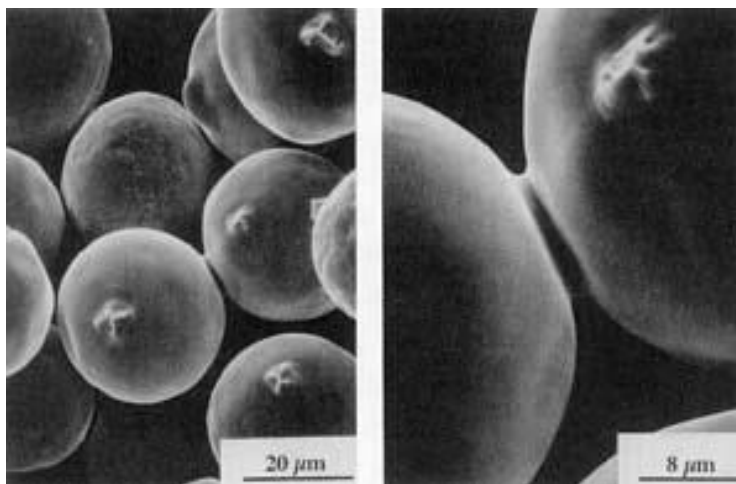
$$T = (0,7 \div 0,8) \cdot Tt \quad 3.1$$

Узорци се убацују док пећ није укључена (собна температура) и параметри се подешавају тако да се након достизања задате температуре од  $1200^{\circ}C$  узорци пеку 15 минута. Док се узорци загревају, унутар смеше се одвија низ процеса који у највећој мери зависе од температуре и састава:

- до границе од  $400^{\circ}C$  губи се влага и вода из кристалохидрата,
- разлагање карбоната у опсегу од  $400^{\circ}C$  до  $1000^{\circ}C$ ,
- настајање нових облика унутар кристалне решетке (полиморфне трансформације),
- настајање нових једињења хемијским реакцијама у чврстом стању изнад  $600^{\circ}C$ ,
- синтеровање и топљење на температурама изнад  $1000^{\circ}C$ .

Реакција између честица које се налазе у чврстом стању на високим температурама подлежу другачијим законитостима у односу на реакције у течной и гасној фази.

Основна карактеристика ових реакција је да производ који се формира обавија честице реактанта и делује као препрека за даљи ток реакције која је могућа једино дифузијом кроз овај слој. Са повећањем температуре убрзава се и дифузија која представља иницијалну силу за пренос масе у овим реакцијама. Појава течне фазе код ових реакција знатно убрзава ток јер се коефицијент дифузије повећава и до 1000 пута. Овај низ реакција формира нове структуре, односно једињења. Процес синтеровања доводи до низа физичких промена у контакту појединих честица праха при чему настаје непорозна структура повећане густине која је хемијски отпорна и има добре механичке особине. На слици 4.12 је приказано на микро нивоу како долази до сједињавања честица приликом синтеровања (Јовановић, Адамовић, Лазић et al 2003, Лукић 2014).



Слика 4.12 Процес синтеровања на микро нивоу

#### 4.7 Испитивање узорака на универзалној машини *CT3 Texture Analyzer*

Добијени узорци композита током експеримента испуњавају све претходно задате услове. Током пресовања израђени калуп је задовољио све захтеве и није било непредвиђених одступања у виду „изливања“ смеше изван калупа. Процес синтеровања објединио је честице керамике и бетонског челика у једну целину, где је присуство воде током процеса печења нестало у виду испарења. Узорци након печења приказани су на слици 4.13.



**Слика 4.13** Узорци керамика-метал композита након печења

Добијени узорци су испитивани на универзалној машини за тестирање узорака на притисак (*CT3 Texture Analyzer*). Уређај (слика 4.14) омогућава испитивање узорака притисном силом од  $50\text{kg}$  са више десетина различитих индентера у зависности од површине и тврдоће узорка који се испитује. Индентери су таквих профила да дејство на површину узорака могу вршити у једној тачки, линијски, или одређеном квадратном или цилиндричном површином. Поседује шест различитих модула за испитивање где је при избору сваког модула доступно више опција:

- дефинисање укупног пута по вертикали након чега се индентер враћа у почетни положај,
- дефинисање деформације након чега се индентер враћа у почетни положај,
- достизање задате силе након чега се индентер враћа у почетни положај и
- дефинисање дистанце до које индентер врши испитивање.

Приликом сваког од изабраних модула и задатог режима дефинише се оптерећење које достиже индентер током продора у узорак који се испитује. Вредности оптерећења су:  $0,1\text{kg}$ ,  $1\text{kg}$ ,  $1,5\text{kg}$ ,  $4,5\text{kg}$ ,  $10\text{kg}$ ,  $25\text{kg}$ ,  $50\text{kg}$ .

Софтверски се даље подешава избор индентера који може бити у облику цилиндра, сфере, купе, квадратног или неког другог специфичног облика који се може израдити специјално за одређена испитивања.

Пре почетка испитивања подешавају се димензије узорка који се испитује (ширина, дужина, висина) и дефинише се површина (цилиндар или квадрат). Приликом подешавања потребно је дефинисати силу од које индентер креће испитивање што практично значи да се тек при постизању жељеног контакта-налегања индентера на површину узорка приказују резултати. Уз подешавање контактне силе потребно је подесити брзину кретања алата која је изражена у  $mm/s$  (<http://www.brookfieldengineering.com/>).

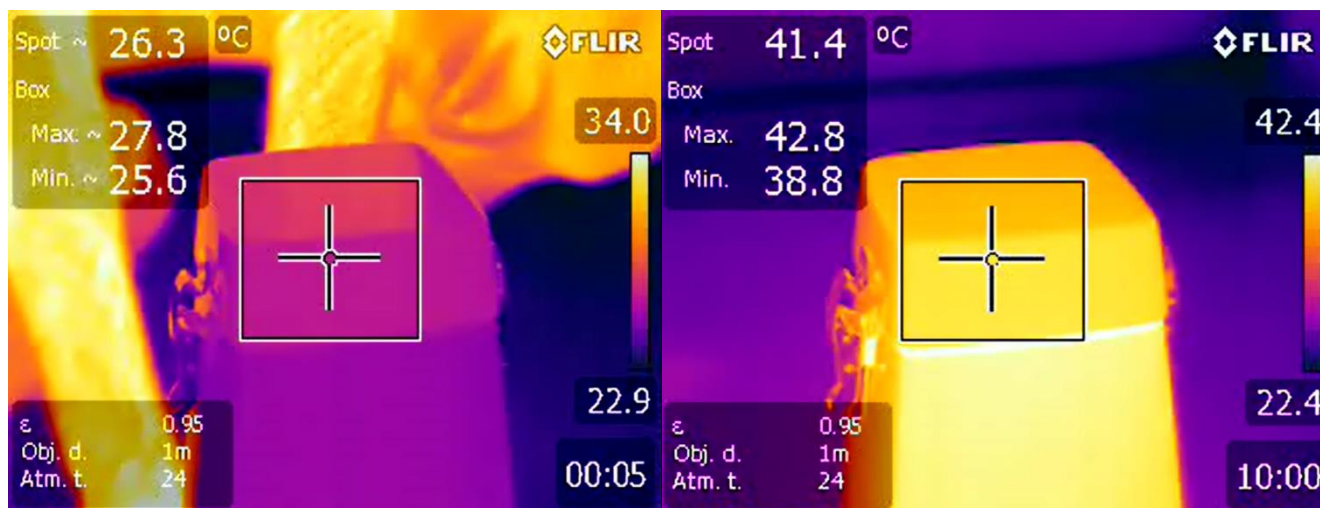


Слика 4.14 Универзални уређај *CT3 Texture Analyzer*

## 5. Обрада резултата добијених током испитивања

### 5.1 Анализа резултата мерења температуре млина

У току млевења, млин *IKA M20 Universal mill* својим сечивом ситни комаде керамике у прах при чему долази до загревања унутрашње површине кутије млине. Температура се од унутрашњих ка спољним зидовима кутије млина преноси кроз чврсту средину што представља простирање топлоте кроз чврсту материју-**кондукција**. Спољни зидови млина се загревају и **зрачењем** преносе топлоту у околину. Температурна промена зидова млина прати се термографском камером *FLIR E50* од почетка млевења (слика 5.1a) до



стабилизације температуре и почетка хлађења (приказано на слици 5.1б).

а)

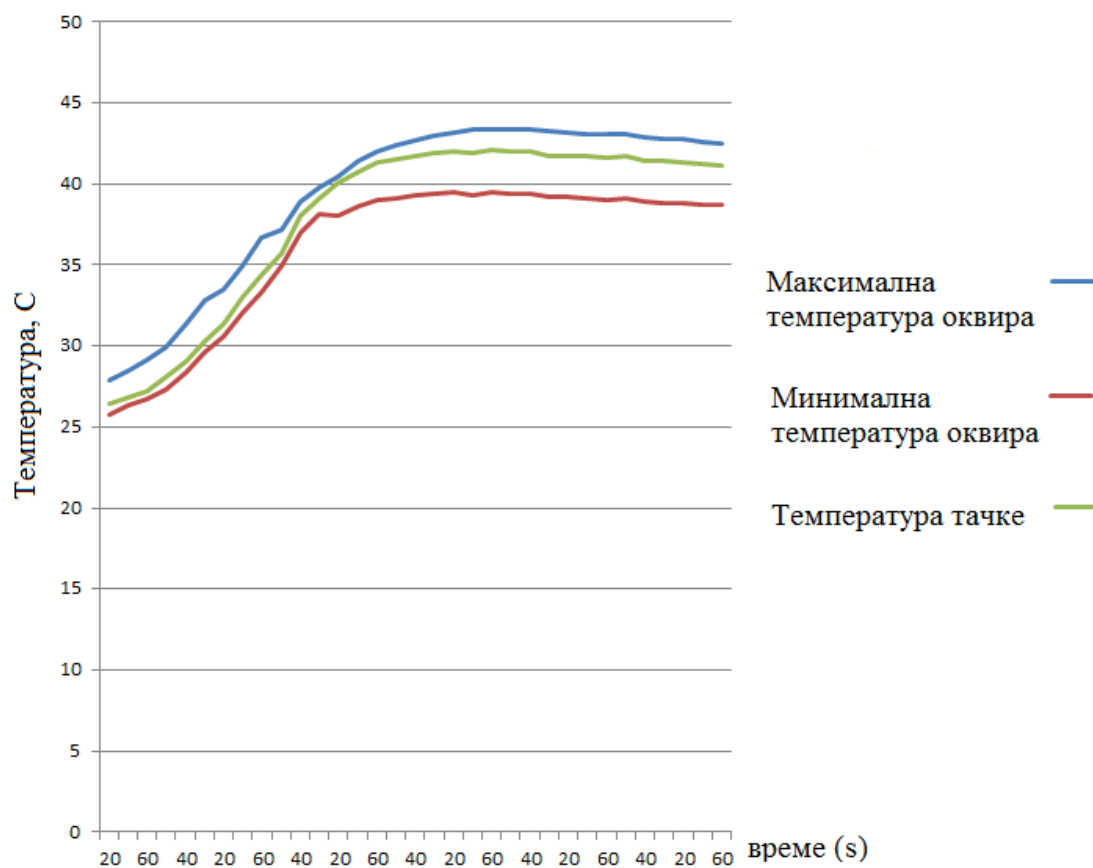
б)

Слика 5.1 Термографска слика млина

Током млевења у трајању од четири минута површина млина се равномерно загрева и линеарно расте, а онда након престанка млевења температура зидова наставља да расте смањеним интензитетом што представља ширење топлоте од унутрашњости зидова ка спољним. Након три минута од престанка рада млина, температура се стабилизује што значи да се температуре спољашњих и унутрашњих зидова изједначавају. Спољашни зидови зрачењем преносе топлоту околини до одређеног временског интервала, а онда почиње хлађење што представља природан процес јер је околина у којој се налази млин (собна температура) за 19,4 °C нижа од спољашње површине млина. Закон дефинише да се топлота простира од тела са вишом температуром ка телу са nižом температуром.

На дијаграму (слика 5.2) приказана је температурна промена температуре тачке, максимална и минимална температура оквира који је подешен на термографској камери. Дијаграм представља зависност температуре у односу на време трајања целог процеса.

Минимална температура оквира је знатно ближа температури тачке до тренутка мљења, а након престанка вредност минималне температуре знатно слабије расте од температуре тачке и максималне температуре оквира.



Слика 5.2 Дијаграм температурних промена

Разлика минималних и максималних вредности температура током мљења креће се у распону од  $1,7^{\circ}\text{C}$  до  $4,1^{\circ}\text{C}$ . Најмања разлика температура је након престанка рада млина где се интензитет промене раста мења све до почетка пада, док је највећа разлика у периоду стабилизације температуре и достизања максималних вредности.

## 5.2 Анализа резултата испитивања механичких особина

Узорци су испитивани на универзалној машини под различитим оптерећењима. У истом режиму испитивања су реализована дејством силе у распону од 1 *kg* до 50 *kg*. Кретање алата дефинисано је брзином од 5 *mm/s* по вертикалној оси, са режимом дејства силе до постизања максималне задате вредности (достизањем задате силе алат се враћа у почетни положај) и индентер је цилиндричног облика пречника 9 *mm*. Као излазне параметре приказују се:

- дијаграми зависности силе од дубине продирања индентера и
- дијаграми зависности напона и деформације.

Испитивања су реализована на три узорка различитог пречника. Пре испитивања један од узорака пречника Ø25,25 *mm* био је **потопљен у води 5 дана** након чега је тестиран. Узорци су означени на следећи начин:

1. узорак пречника Ø30,25 *mm* без потапања у воду,
2. узорак пречника Ø25,25 *mm* без потапања у воду,
3. узорак пречника Ø25,25 *mm* потопљен у води.

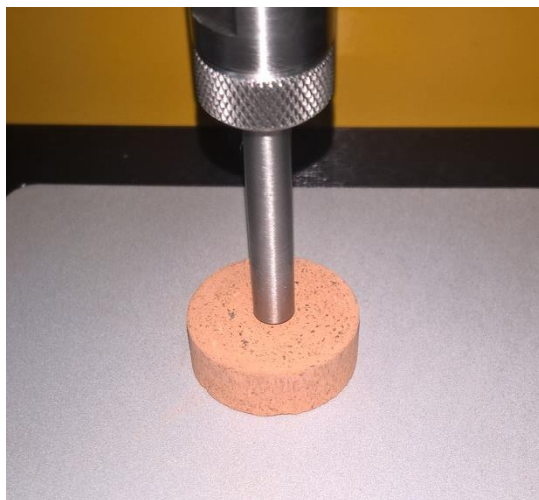
У табели 5.1 приказани су оптерећења и улазни параметри приликом испитивања узорака композита.

**Табела 5.1** Улазни параметри и задата оптерећења

| Улазни параметри CT3 Texture Analyzer            |                 |      |                                  |       |       |
|--------------------------------------------------|-----------------|------|----------------------------------|-------|-------|
| Брзина кретања индентера                         | Врста индентера |      | Оптерећење при ком почиње мерење |       |       |
| 0,05 mm/s                                        | цилиндар 9 mm   |      | 1 g                              |       |       |
| Ознака узорка                                    | оптерећења      |      |                                  |       |       |
|                                                  | I               | II   | III                              | IV    | V     |
| узорак пречника Ø30,25 mm<br>без потапања у воду | 1 kg            | 3 kg | 10 kg                            | 20 kg | 50 kg |
| узорак пречника Ø25,25 mm<br>без потапања у воду | 1 kg            | 3 kg | 10 kg                            | 20 kg | 50 kg |
| узорак пречника Ø25,25 mm<br>потопљен у води     | 1 kg            | 3 kg | 10 kg                            | 20 kg | 50 kg |

На дијаграмима (слике 5.5, 5.6, 5.8, 5.9, 5.12, 5.13) су приказани излазни резултати након оптерећења узорка. Дијаграм зависности силе и дубине продирања индентера на вертикалној оси приказује вредност силе до које индентер оптерећује узорак (задата сила), док је на хоризонталној оси приказано кретање индентера.

На сликама 5.3 и 5.4 приказан је узорак пречника  $\varnothing 30,25 \text{ mm}$  који није потапан у воду.



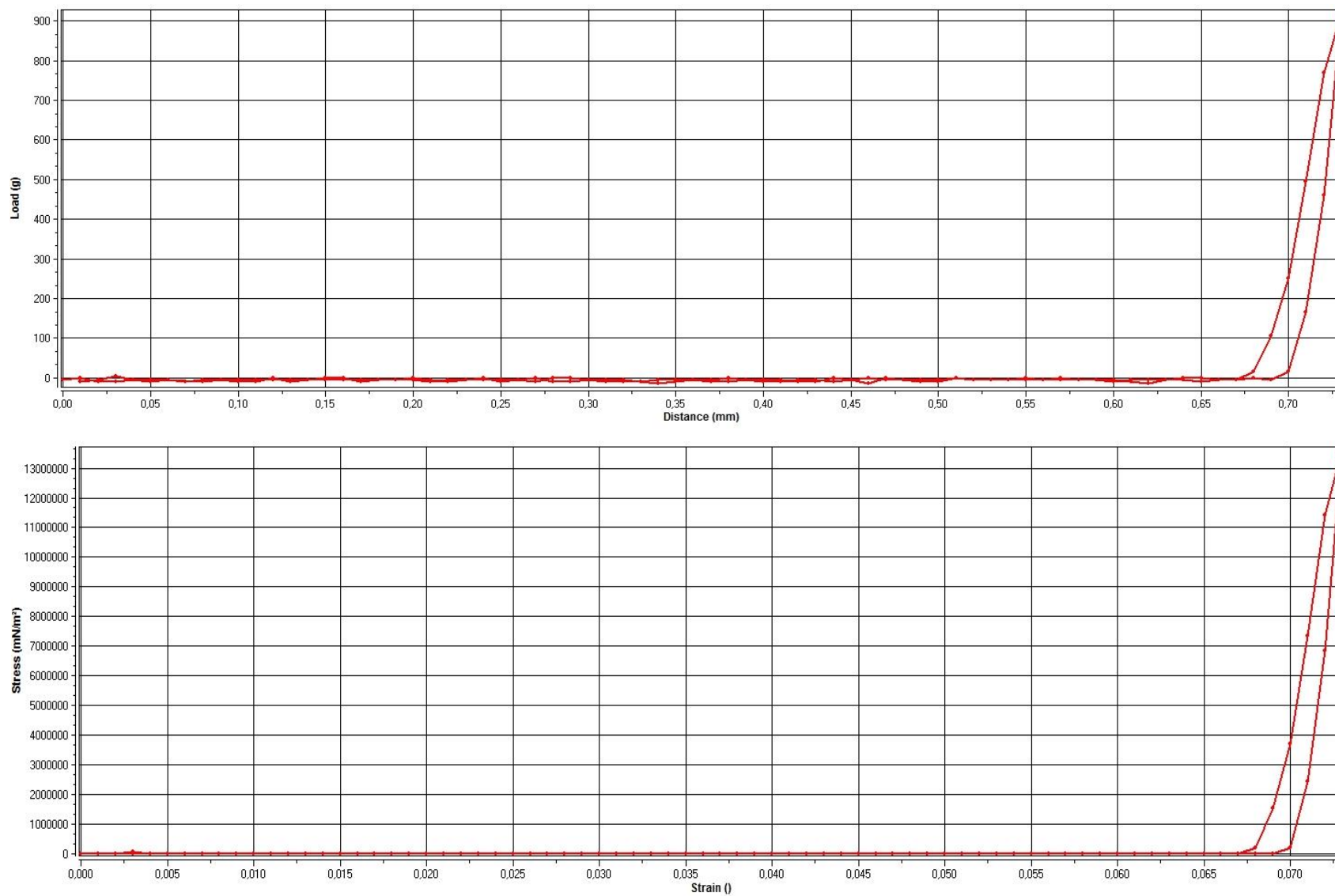
**Слика 5.3** Узорак пречника  $\varnothing 30,25 \text{ mm}$  пре испитивања



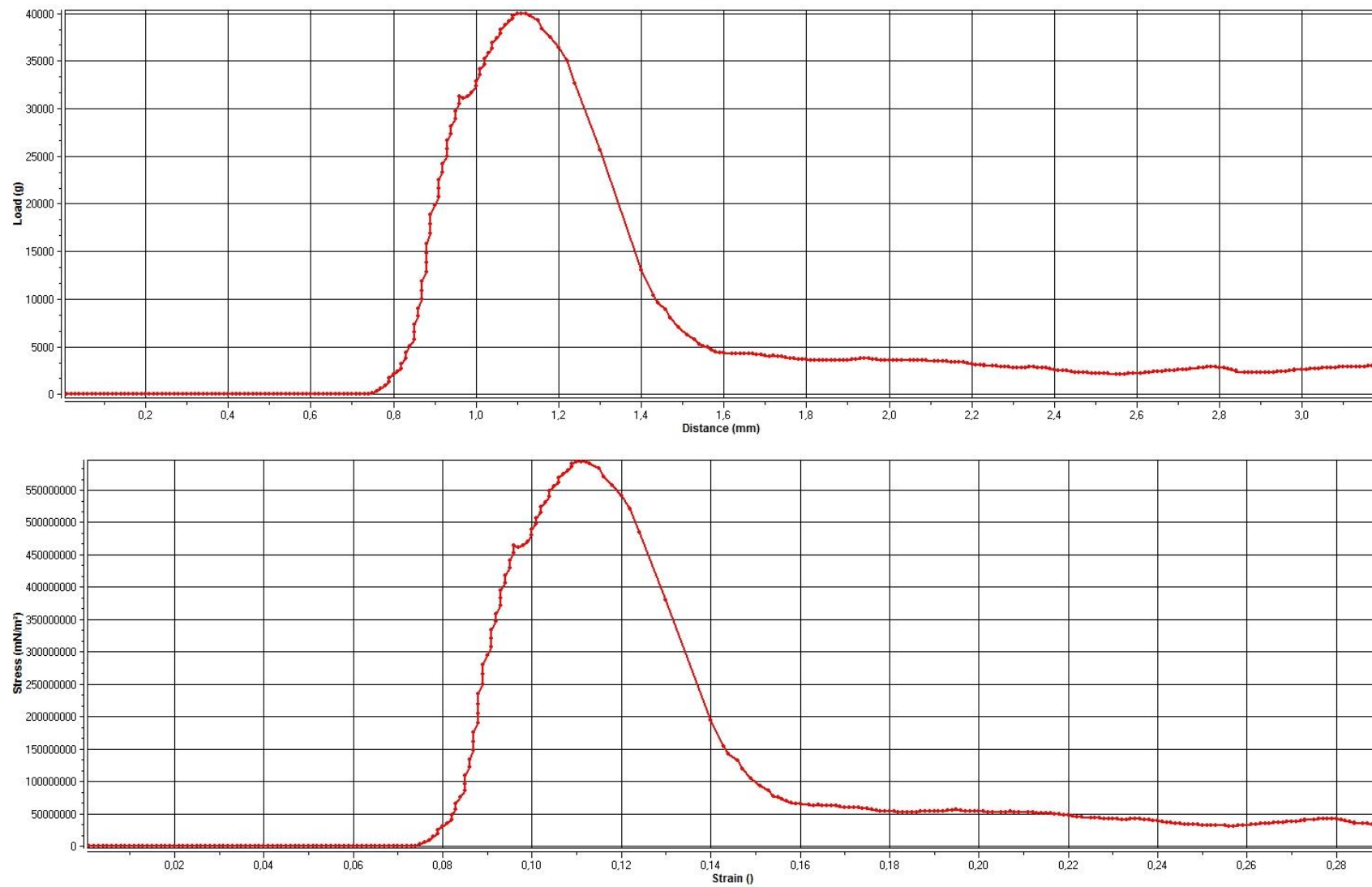
**Слика 5.4** Узорак пречника  $\varnothing 30,25 \text{ mm}$  након испитивања

На слици 5.5 приказани су дијаграми зависности под дејством оптерећења од  $1 \text{ kg}$ . Са дијаграма зависности може се видети да се контакт индентера и површине узорка остварује на вредности  $D \approx 0,675 \text{ mm}$ . Сила расте до задате вредности након чега следи растерећење, појава хистерезиса, што значи да је дошло до пластичних деформација.

На слици 5.6 су приказани дијаграми са истим улазним параметрима, са задатим оптерећењем од  $50 \text{ kg}$ . Дијаграм показује да је на дубини од  $D \approx 1,1 \text{ mm}$  и дејству силе од  $F = 392 \text{ N}$  ( $40 \text{ kg}$ ) дошло до лома узорка.



Слика 5.5 Дијаграми зависности сила/дубина продирања и напон/деформација за узорак пречника  $\text{Ø}30,25 \text{ mm}$  при оптерећењу  $1 \text{ kg}$

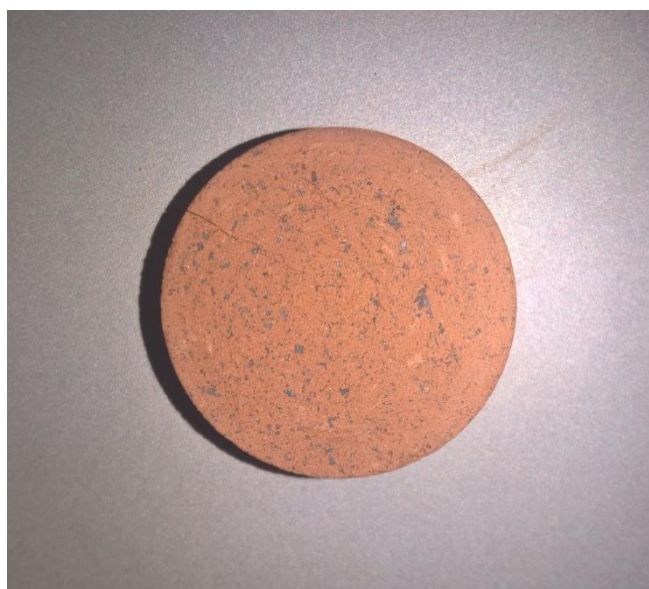


Слика 5.6 Дијаграми зависности сила/дубина продирања и напон/деформација за узорак пречника  $\text{Ø}30,25 \text{ mm}$  при оптерећењу  $50 \text{ kg}$

Узорак пречника  $\varnothing 25,25 \text{ mm}$  који није потапан у воду је приликом испитивања показао боље карактеристике у односу на претходно испитани узорак већег пречника. Узорци су израђени од потпуно истих материјала, али се на узорак мањег пречника због мање површине делује већим притиском, што значи да под оптерећењем од  $F = 20000 \text{ N}$  алат више сабија материјал и има већу густину. Узорак са већом густином показао је боље карактеристике приликом испитивања одакле се изводи закључак да се смањењем пречника калупа и повећањем оптерећења приликом пресовања могу добити узорци са знатно бољим карактеристикама. На слици 5.7а приказан је узорак пречника  $\varnothing 25,25 \text{ mm}$  пре испитивања, а слика 5.7б приказује узорак након испитивања.



а)

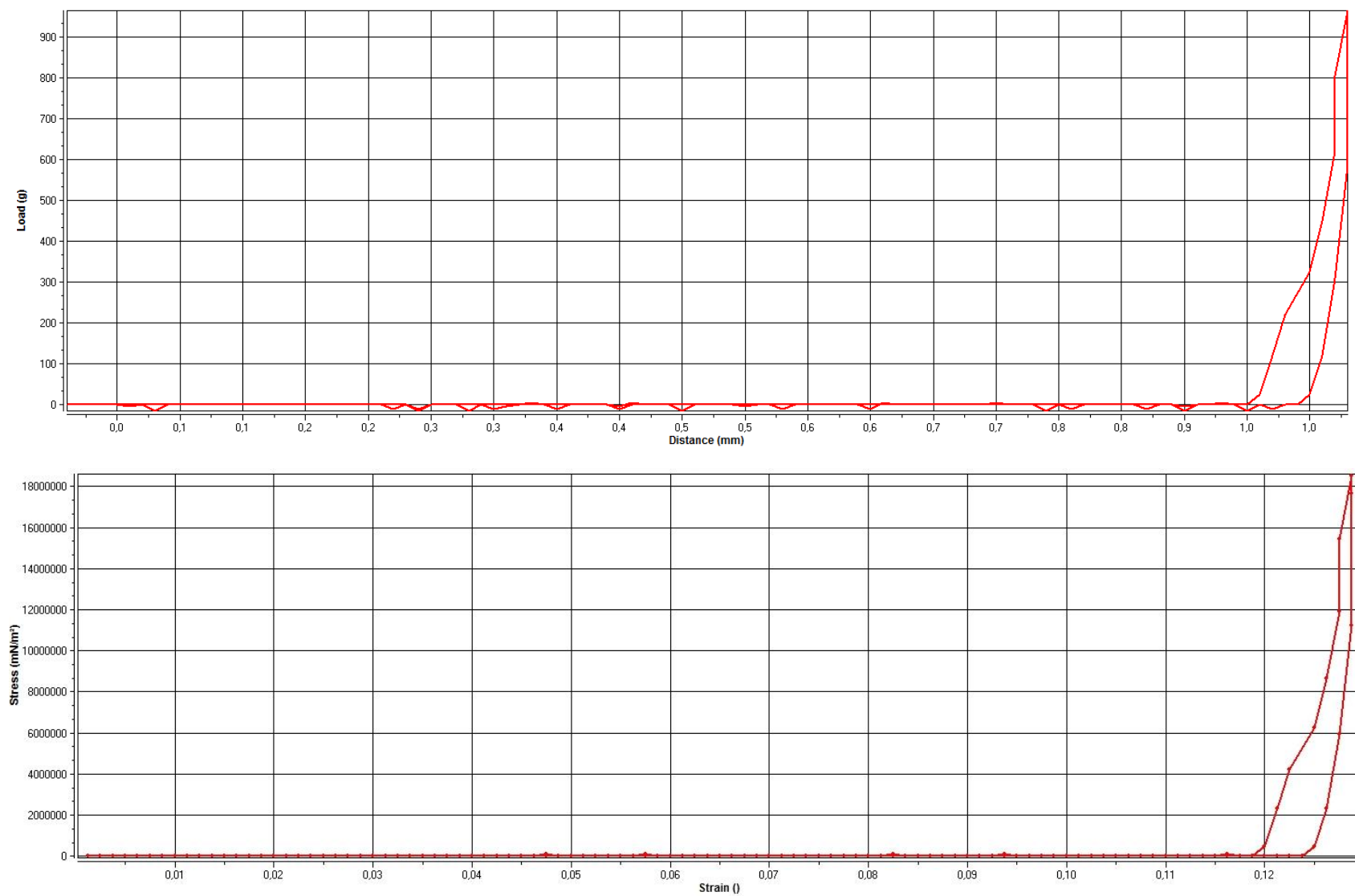


б)

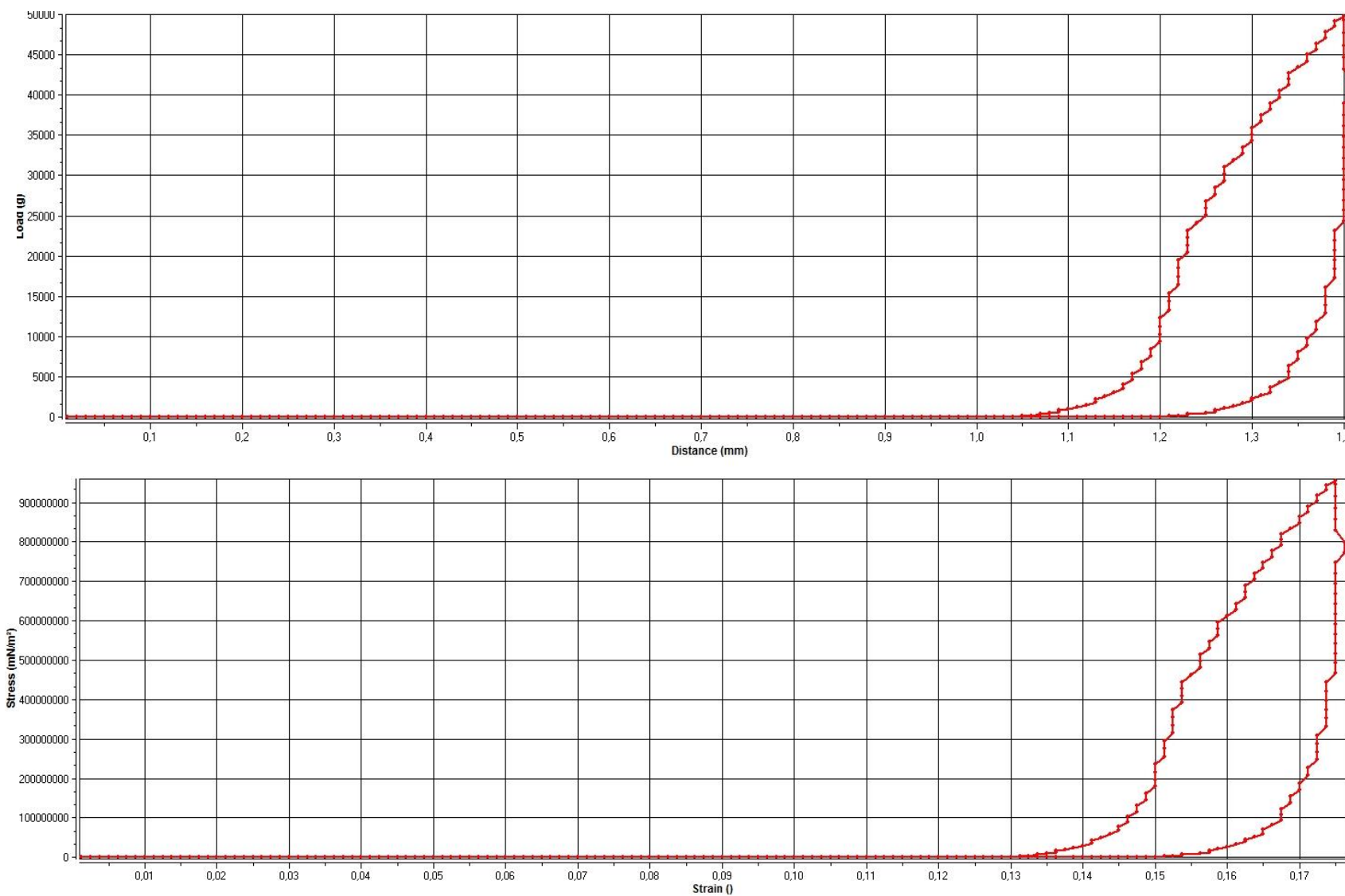
**Слика 5.7** Узорак пречника  $\varnothing 25,25 \text{ mm}$  пре и после испитивања

На слици 5.7б се јасно види пукотина која је настала приликом испитивања узорка али није дошло до лома. Дијаграми показују да на удаљености  $D \approx 1,05 \text{ mm}$  почиње дејство силе и узорак успешно издржава оптерећење од  $F = 490 \text{ N}$  ( $50 \text{ kg}$ ) (слика 5.8 и слика 5.9). Резултати показују да се повећањем притиска приликом пресовања могу добити узорци са знатно бољим карактеристикама, односно могу издржати већа оптерећења без потпуног разлаза.

Механичка кидалица на којој су узорци пресовани може деловати силом од  $F = 98066 \text{ N}$  ( $10000 \text{ kg}$ ) чиме се могу добити материјали веће густине.



**Слика 5.8** Дијаграми зависности сила/дубина продирања и напон/деформација за узорак пречника  $\varnothing 25,25 \text{ mm}$  при оптерећењу  $1 \text{ kg}$



**Слика 5.9** Дијаграми зависности сила/дубина продирања и напон/деформација за узорак пречника  $\text{Ø}25,25 \text{ mm}$  при оптерећењу  $50 \text{ kg}$

Други узорак пречника  $\varnothing 25,25 \text{ mm}$  (слика 5.10б) је израђен под истим условима као претходно испитани, али је 5 дана пре испитивања потопљен у воду (слика 5.10а). На овај начин тестира се отпорност композита на утицај воде. На испитивањима се тестира оптерећење од  $F=490 \text{ N}$  ( $50 \text{ kg}$ ) и резултати показују да вода не утиче на карактеристике узорка. Ово је поред резултата испитивања на универзалној машини *CT3 Texture Analyzer* још један показатељ добрих карактеристика овог композита.



а) потопљен у води

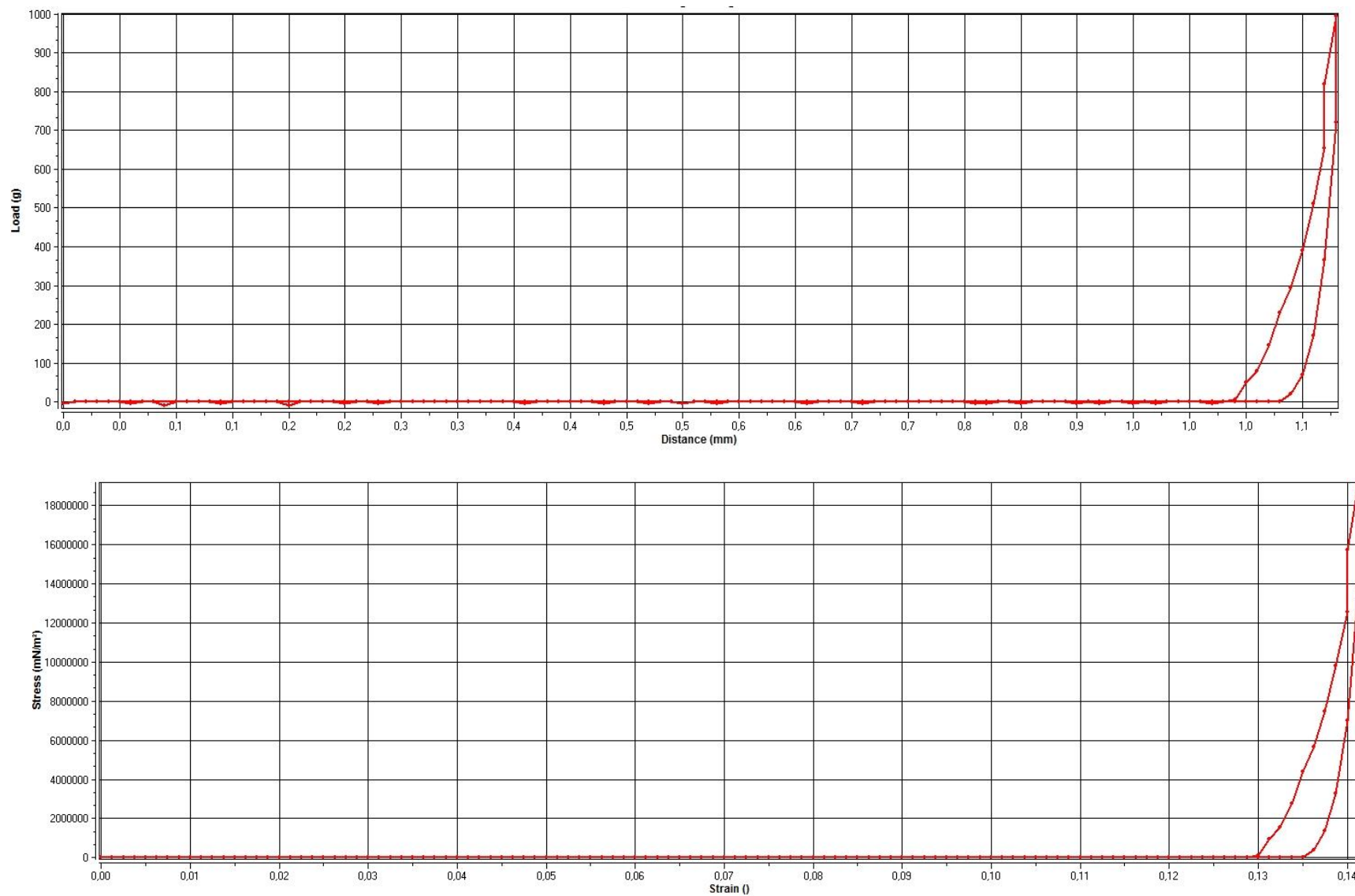


б) након боравка у води

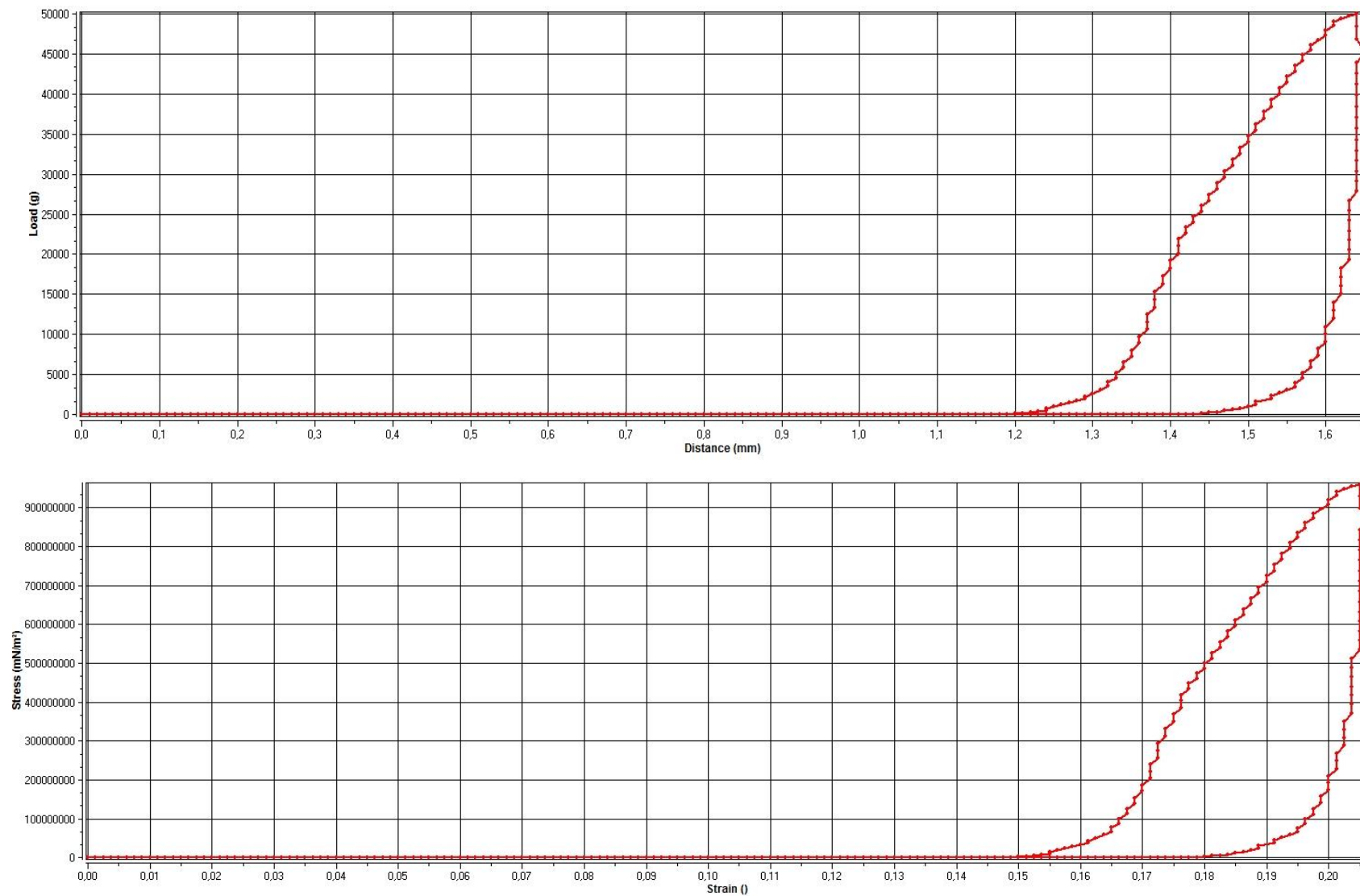
**Слика 5.10** Узорак пречника  $\varnothing 25,25 \text{ mm}$  пре испитивања

Дејством силе  $F=490 \text{ N}$  ( $50 \text{ kg}$ ) узорак пречника  $\varnothing 25,25 \text{ mm}$  који је 5 дана био потопљен у води показао је приближно исте резултате као узорак истог пречника који је приликом испитивања био сув. Дејством силе долази до појаве прислине (слика 5.11) али узорак издржава оптерећење.

**Слика 5.11** Узорак пречника  $\varnothing 25,25 \text{ mm}$  након испитивања на оптерећење од  $50 \text{ kg}$  (5 дана потопљен у води)

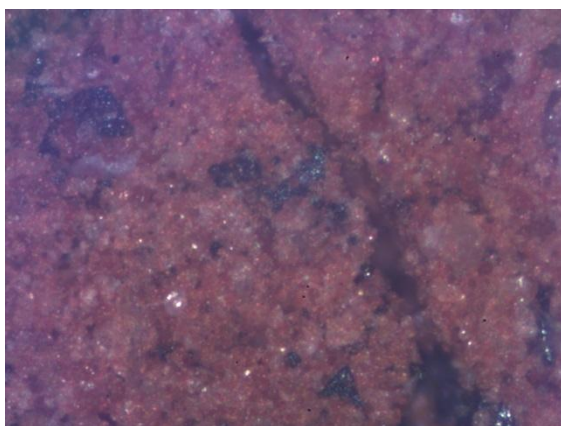
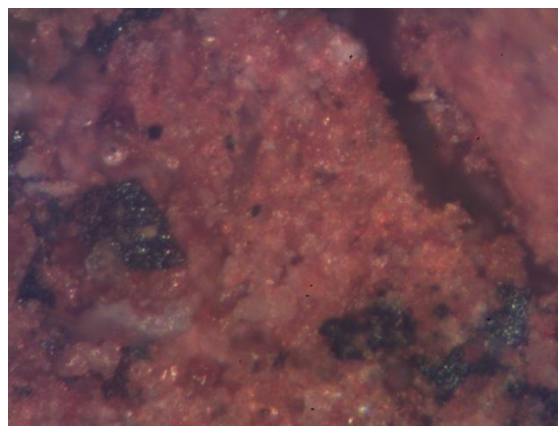


Слика 5.12 Дијаграми зависности сила/дубина продирања и напон/деформација за узорак пречника  $\text{Ø}25,25 \text{ mm}$  при оптерећењу  $1 \text{ kg}$  (узорак потопљен у води)



Слика 5.13 Дијаграми зависности сила/дубина продирања и напон/деформација за узорак пречника  $\text{Ø}25,25 \text{ mm}$  при оптерећењу  $50 \text{ kg}$  (узорак потопљен у води)

На оптичком микроскопу са увећањима  $\times 5$  и  $\times 10$  је анализиран узорак пречника  $\varnothing 30,25 \text{ mm}$  који није издржао оптерећење од  $F=490 \text{ N}$  ( $50 \text{ kg}$ ). На слици 5.14 се види да није дошло до раздвајања честица већ до пуцања композита. Повећањем притиска приликом пресовања постиже се већа густина материјала што може довести до бољег међусобног повезивања честица током процеса синтеровања. На овај начин може се добити композитни материјал са бољим механичким карактеристикама.

а) увећање  $\times 5$ б) увећање  $\times 10$ 

**Слика 5.14** Узорак пречника  $\varnothing 30,25 \text{ mm}$  на оптичком микроскопу

На слици са увећањем  $\times 5$  се види пукотина на основу које се закључује да је материјалу повећана жилавост али је ипак и даље сличне кртости као чиста керамика. Додавањем металног праха може се постићи да композит буде жилавији и отпорнији на оптерећења али паралелно са тим се не смеју изгубити основне предности керамичких материјала (висока тврдоћа, отпорност на високе температуре, хемијска стабилност). На слици са увећањем  $\times 10$  се јасно могу видети честице керамике и метала као једна целина настала сједињавање током процеса синтеровања.

## 6. Закључак

Термографија као један од основних алата савремене индустрије током експеримента примењена је у једној од фаза развоја новог композита. На основу принципа на којима функционише, бесконтактног мерења температурних промена пратила се промена температуре млина током млевења керамике. Термографска камера *FLIR E50* је инструмент који мери дуготаласна зрачења чија је осетљивост  $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$  што у потпуности одговара експерименту. Мала осетљивост омогућава да се прате и најмање промене током и након млевења што представља могућност повезивања зависности температуре од величине честица керамике током млевења. У обзир треба узети време потребно да се топлота од унутрашњих зидова пренесе до спољашњег (кондукција) чија се температура мери (зрачење) као и коефицијент емисије. Након престанка млевења процес стабилизације температуре представља изједначавање температуре унутрашњих и спољашњих зидова.

Материјали у прашкастом стању (керамика и бетонски челик) су се током пресовања успешно повезали у једну целину без додатка везива. Након пресовања, током синтеровања долази до полиморфне трансформације (нови облик кристалне решетке) између честица два материјала и топљења бетонског челика. Температура печења је  $\approx 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  што представља разлог преласка бетонског челика у течну фазу. Ово доприноси знатном убрзању процеса дифузије што омогућава пренос масе при чему настаје непорозна структура.

Добијени узорци тестирани су на оптерећења у опсегу од  $1\text{ kg}$  до  $50\text{ kg}$  где су показали добре механичке карактеристике. Узорак са већим пречником није издржао оптерећење од  $50\text{ kg}$  док су остала два узорка са мањим пречником показали пукотине, али су издржали задато оптерећење. Разлог оваквог резултата налази се у процесу пресовања, где се на сва три узорка деловало истом силом од  $F = 20000\text{ N}$  али због међусобне зависности силе и површине на коју се делује, на мањим узорцима вредност притиска је већа.

Један од узорака је био потопљен у води након чега се тестирао, где је показао сличне карактеристике као узорак истог пречника који није био у води. Ово је показује да су узорци отпорни на воду, тачније немају својство упијања воде.

У раду је показано да се кроз зависност промене температуре млина може одредити гранулација честица керамике током млевења. На овај начин се може директно утицати на величину честица од којих зависи међусобно повезивање истих током пресовања и синтеровања. Након тога даљим испитивањима механичких особина се утврђују карактеристике материјала. За прецизно дефинисање зависности температурне промене млина током млевења од гранулације честица потребно је израдити и тестирати више десетина узорака. На основу добијених резултата тестирања могуће је усвојити релацију

преко које се у односу на температурне промене може утицати на гранулацију честица керамике током млевења.

Експеримент приказује да постоје предуслови за развој новог композита на бази керамика-метал. За даља истраживања потребно је усавршавање свих области у циљу постизања значајних резултата који ће омогућити ширу примену новоразвијеног композита. Композит керамика-метал је већ у комерцијалној употреби, али се показало да постоји доста фактора који могу утицати на крајње особине материјала што представља огроман простор за даља истраживања.

## 7. Литература

Васиљевић Д (2004) Оптички уређаји и оптоелектроника. Машински факултет Београд, Београд.

Ђурић С, Вукадиновић Н (2015) Управљање ризицима у располагању УБС. Фестивал квалитета 6:331-335.

Јовановић М, Адамовић Д, Лазић В et al (2003) Машински материјали. Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац.

Лукић М (2014) Двостепено синтеровање, фазне трансформације, електричне и механичке особине наноструктурних биокерамичких материјала на бази хидроксиапатита. Докторска дисертација, Факултет за физичку хемију.

Мирковић Н (2006) Механичка својства метал-керамичких система никл-хром и кобалт-хром легура. Војносанитетски преглед 64(4):241:245.

Радоњић В, Јовановић Д, Живановић Г (2013) Унапређење балистичких карактеристика и одржавања заштитних балистичких прслука. Војнотехнички гласник 62(4):89-103.

Тадић Б (2015) Експеримент у машинству. Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац.

Тодоровић П, Јеремић Б, Мачужић И (2009) Техничка дијагностика. Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац.

Bhatnagar A (eds) (2006) Lightweight ballistic composites. Woodhead publishing in Materials, Boca Raton.

Breitenstein O, Warta W, Langenkamp M (2010) Lock-in Thermography 2nd edition, Springer, Heidelberg.

David P, Finis DR, Guiseppe D (2016) A new rapid thermographic method to assess the fatigue limit in GFPR composites. Composites 103:60-67.

Delaey L, Tas H (1993) Hot Isostatic Pressing. Elsevier, Antwerp.

Fawaz Z, Zheng W, Behdinan (2004) Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armours. Composite Structures 63:387-395.

<http://www.termalnekamere.rs> приступљено 20.09.2016.

<http://odbrana.mod.gov.rs/>, приступљено 05.10.2016.

<http://www.itn.sanu.ac.rs/indexsr.html>, приступљено 10.10.2016.

<http://www.yugoimport.com/> , приступљено 17.10.2016.

<http://www.ingkomora.org.rs/> , приступљено 17.10.2016.

<http://www.brookfieldengineering.com/>, приступљено 20.10.2016.

Lopez-Puente J, Arias A, Zaera R et al (2005) The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. *Impact Engineering* 32:321-336.

Lui W, Chen Z, Cheng X et al (2016) Design and ballistic penetration of the ceramic composite armor. *Composites* 84:33-40.

Meola C, Carlomagno G (2004) Recent advances in the use of infrared thermography. *Measurement Science and Technology* 15:27-58.

Meola C, Di Maio R, Roberti N (2005) Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures. *Engineering Failure Analysis* 12:875-892.

Meola C, Carlomagno G, Giorleo L (2004) The use infrared thermography for materials characterization. *Journal of Materials Processing Technology* 155-156:1132-1137.

Prakash R (eds) (2012) *Infrared thermography*. In Tech, Ријека.

Vollmer M, Mollmann K.P (2010) *Infrared Thermal Imaging* 2nd edition. WILEY-VCH, Weinheim.