

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Милош Д. Пјевић

**ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА  
РАДИЈУСА ЗАОБЉЕЊА ВРХА АЛАТА  
И БРЗИНЕ РЕЗАЊА НА ПОКАЗАТЕЉЕ  
КВАЛИТЕТА ПРИ МИКРО РЕЗАЊУ  
МАТЕРИЈАЛА НА БАЗИ  
МЕРМЕРА И ГРАНИТА**

докторска дисертација

Београд, 2019.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Miloš D. Pjević

**INVESTIGATION OF THE TOOL TIP  
RADIUS AND THE CUTTING SPEED  
INFLUENCE ON THE QUALITY  
INDICATORS IN THE MICRO CUTTING  
MATERIALS BASED ON MARBLE AND  
GRANITE**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2019

Комисија за преглед и одбрану:

Ментор:                    др Љубодраг Тановић, редовни професор,  
Машински факултет, Универзитет у Београду

Чланови комисије: др Бојан Бабић, редовни професор,  
Машински факултет, Универзитет у Београду

др Александар Седмак, редовни професор,  
Машински факултет, Универзитет у Београду

др Михајло Поповић, доцент,  
Машински факултет, Универзитет у Београду

др Небојша Гојковић, редовни професор,  
Рударско - геолошки факултет, Универзитет у Београду

Датум одбране:

*Маји и Павлу за љубав и подршку која превазилази границе подразумеваног...*

## Предговор

Желео бих да изразим неограничену захвалност свим појединцима и институцијама који су допринели реализацији ове докторске дисертације. Посебну захвалност дугујем:

- **Ментору, проф. др Љубодрагу Тановићу**, на несебичној и стручној подршци током израде ове тезе, као и начину на који ме је увео у проблематику микро резања кртих материјала на бази камена и усмеравао у правом смеру током израде докторске дисертације,
- **Члановима комисије, проф. др Бојану Бабићу, доц. др Михајлу Поповићу, проф. др Александру Седмаку, проф. др Небојши Гојковићу** на конструктивним и колегијалним саветима, као и пријатељском односу током израде ове тезе.
- **Колегама са Катедре за производно машинство, Машинског факултета Универзитета у Београду** на добронамерној помоћи и сугестијама при извођењу експеримената,
- **др Владану Ћосовићу** са Института за хемију, технологију и металургију који ми је омогућио да један део експеримента изведем на Технолошко-металуршком факултету,
- **Филипу Вучетићу** који ми је обезбедио да део испитивања обавим на Катедри за технологију материјала, Машинског факултета Универзитета у Београду,
- **др Јелени Русмировић** са Технолошко-металуршког факултета на помоћи при извођењу експеримената на Технолошко-металуршком факултету,

У Београду, јун 2019.

*Милош Д. Пјевић*

# Истраживање утицаја радијуса заобљења врха алата и брзине резања на показатеље квалитета при микро резању материјала на бази мермера и гранита

## Апстракт

Да би се извршила обрада материјала, кртих по својој природи, неопходно је прећи са нивоа макро на ниво микро обраде. Са друге стране, то је неизводљиво без јасно дефинисаних механизма микро резања који важе за поменуте материјале. Докторска дисертација усмерена је на формирање механизма микро резања мермера *Плави ток* и гранита *Јошаница* и *Буковик*. Предложени механизми експериментално су потврђени методама утискивањем утискивача при статичком дејству силе утискивања и микро резања (гребања). Испитиван је утицај фактора који потенцијално делују на процес микро резања, међу којима су: брзина микро резања, дубина продирања алата и вредност радијуса заобљења врха алата. Методом утискивања утискивача при статичком дејству силе утискивања, предложен је, а касније и експериментално потврђен механизам на основу ког се, са једне стране долази до формирања отиска у режиму платичног деформисања, док је са друге стране објашњен развој прслина које доводе до кртог одвајања материјала унутар материјала у режиму кртог лома. Критичне вредности дубина у зависности од дејства само нормалне компоненте силе микро резања, а које раздвајају ова два режима, дефинисане су за сва три материјала. Механизам који, поред нормалне компоненте силе резања, у себи има укључен и утицај тангенцијалне компоненте, предложен је у оквиру ове докторске дисертације, а затим и потврђен експериментима микро резања (гребања). Установљено је да услед промене геометрије врха дијамантског алата (вредности радијуса врха алата) долази до промене критичне вредности дубине продирања. Ово настаје као последица промене ефективне вредности грудног угла. У режиму кртог лома, интензитет разарања материјала различит је међу материјалима, а на њега додатно утичу геометрија алата и брзина микро резања. При овом режиму, мермер *Плави ток* се има другачији механизам

уклањања материјала у поређењу са микро резањем гранита *Јошаница* и *Буковик*. Установљено је да поред геометрије врха алата и брзина микро резања утиче на вредности критичне дубине продирања, а које се разликују међу овим материјалима. Измерене су вредности интензитета компонената сила микро резања и дате су криве које најближе описују њихову промену у функцији од брзине микро резања, дубине продирања и вредности радијуса заобљења врха алата. Поред овога, одређене су и криве специфичне енергије микро резања за сва три материјала, а у функцији од истих параметара. Уочено је да се највећи део енергије троши на пластично деформисање материјала, док, у знатно мањем проценту, део енергије одлази на иницијализацију и даљи раст прслина у режиму кртог лома. Последња фаза докторске дисертације обухватила је формирање математичког модела компонента силе микро резања одређивањем параметара обрадљивости, чије се рачунске вредности у границама толеранције поклапају са стварним.

**Кључне речи:** Микро резање, крти материјали, геометрија алата, критична дубина продирања, специфична енергија микро резања.

**Научна област:** Машинство.

**Ужа научна област:** Производно машинство.

**УДК:** 621.91:691.212:691.214.8(043.3)

# Investigation of the tool tip radius and the cutting speed influence on the quality indicators in the micro cutting materials based on marble and granite

## Abstract

In order to process the brittle material, it is necessary to move from the macro to the micro cutting level. On the other hand, this is unfeasible without clearly defined micro cutting mechanisms applicable to these materials. The doctoral dissertation is focused on the formation of micro cutting mechanisms of marble *Plavi tok* and granites *Jošanica* and *Bukovik*. The proposed mechanisms were experimentally confirmed by the methods of Static indentation and Micro cutting (Scratching). The influence of potentially affecting factors on the micro cutting process was examined, among which were: micro cutting speed, depth of cut and tool tip radius. A mechanism of the Static indentation method was proposed and subsequently experimentally confirmed on the basis of which, on the one hand, the formation of an indent in the ductile mode was created, while on the other hand, the development of the cracks that lead to the brittle separation of the material in the brittle fracturing mode was explained. The critical penetration depths in the function of normal components of the micro cutting force, which separate these two regimes, were defined for all three materials. The mechanism, which, in addition to the normal component of the cutting force, also includes the influence of the tangential component, is proposed within this doctoral dissertation, and then confirmed by micro cutting (Scratching) experiments. It was found that due to change in the geometry of the tip of the diamond tool (tip radius) there was observed a change in the value of critical penetration depth. This occurs as a result of a change in the effective rake angle value. In the brittle fracturing mode, the intensity of material destruction was different between the materials, and is further influenced by the geometry of the tool and speed of micro cutting. In this regime, the *Plavi tok* marble was removed differently compared to the micro cutting of granite *Jošanica* and *Bukovik*. In addition to the tool tip geometry, micro cutting speed also had great influence on the critical penetration depth value, and which differ between



these materials. The values of the intensities of the components of the micro cutting force were measured and the curves which closely describe their change in function of speed of micro cutting, penetration depth and tool tip radius were given. Moreover, specific micro cutting energy curves for all three materials were determine, and in function of the same parameters as components of the micro-cutting force. It was noted that bulk of energy was spent on plastic deformation of the materials in the ductile mode, while in a much smaller percentage, part of the energy went to initialization and further crack growth in the brittle fracturing mode. The last phase of the doctoral dissertation included the formation of a mechanistic model for prediction of components of the micro cutting force by determining the processing parameters, whose calculation values within the limits of tolerance coincide with the real ones.

**Key words:** Micro cutting, brittle materials, tool geometry, critical penetration depth, specific micro cutting energy.

**Scientific discipline:** Mechanical engineering

**Scientific subdiscipline:** Production engineering

**UDC:** 621.91:691.212:691.214.8(043.3)

---

# Номенклатура

| Ознака   | ЈМ                | Опис                                       |
|--|-------------------|--|
| $a$  | [mm]              | Дубина продирања                           |
| $a_c$  | [mm]              | Критична дубина продирања                  |
| $b_{n0}, b_{n1}, b_{n2},$<br>$b_{n3}, b_{t0}, b_{t1},$<br>$b_{t2}, b_{t3}$ |                   | Коефицијенти                               |
| $C_n, C_t, p_{n1},$<br>$p_{n2}, p_{n3}, p_{t1},$<br>$p_{t2}, p_{t3}$       |                   | Параметри обрадљивости                     |
| $d_1, d_2$   | [ $\mu\text{m}$ ] | Дијагонале отиска                          |
| $D_a$  | [mm]              | Пречник алата                              |
| $F_H, F_V, F_n, F_t$   | [N]               | Компоненте силе резања                     |
| $F_n^m, F_t^m$   | [N]               | Рачунске вредности компонената силе резања |
| $F_{\text{rac}}$   |                   | Рачунска вредност $F$ -критеријума         |
| $F_{\text{tab}}$   |                   | Таблична вредност $F$ -критеријума         |
| $\varphi$  | [ $^\circ$ ]      | Угао нагиба обрађиване површине            |
| $\gamma$   | [ $^\circ$ ]      | Грудни угао                                |
| $\gamma_e$   | [ $^\circ$ ]      | Ефективна вредност грудног угла            |
| HV   |                   | Тврдоћа материјала                         |
| $L$  | [mm]              | Дужина жљеба                               |
| $N$  |                   | Број експеримената                         |
| $n_0$  |                   | Број контролних експеримената              |
| $n$  | [o/min]           | Број обртаја                               |

---

| Ознака  | ЈМ                   | Опис  |
|---|----------------------|---|
| $r$   | [mm]                 | Радијус заобљења врха алата                               |
| $\psi$  | [°]                  | Угао конуса утискивача                                    |
| $s_i^2$   |                      | Дисперзија параметара модела                              |
| $s_E^2$   |                      | Дисперзија резултата у нултој тачки                       |
| $S_M^2$   |                      | Дисперзија разлике експерименталних и рачунских вредности |
| $S_E^2$   |                      | Дисперзија резултата за експерименте средњег нивоа        |
| $T$   | [s]                  | Време мировања утискивача у материјалу                    |
| $u$   | [J/mm <sup>3</sup> ] | Специфична енергија микро резања                          |
| $v_s$   | [m/s]                | Брзина микро резања                                       |
| $v_w$   | [mm/min]             | Брзина помоћног кретања                                   |
| $V$   | [mm <sup>3</sup> ]   | Запремина уклоњеног материјала                            |
| $x_{n1}, x_{n2}, x_{n3},$<br>$x_{t1}, x_{t2}, x_{t3}$ |                      | Независно променљиве                                      |
| $\xi$   | [°]                  | Угао оријентације силе резања                             |

---

# Садржај

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>УВОД</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Предмет истраживања . . . . .  | 1         |
| 1.2      | Циљ истраживања . . . . .  | 2         |
| 1.3      | Полазне хипотезе . . . . .   | 4         |
| 1.4      | Композиција рада . . . . .   | 4         |
| <b>2</b> | <b>ПРЕГЛЕД СТАЊА ИСТРАЖИВАЊА У ОБЛАСТИ МИКРО<br/>РЕЗАЊА КРТИХ МАТЕРИЈАЛА</b>   | <b>8</b>  |
| 2.1      | Уводне напомене . . . . .  | 8         |
| 2.1.1    | Поистовећивање процеса утискивања при статичком и ди-<br>намичком дејству силе и процеса микро резања . . . . .          | 11        |
| 2.1.2    | Испитивање утицаја кинематике процеса микро резања на<br>обрадљивост кртих материјала . . . . .                          | 14        |
| 2.1.3    | Испитивање утицаја геометрије алата на процес микро ре-<br>зања . . . . .  | 16        |
| 2.2      | Микро резање материјала на бази камена . . . . .   | 18        |
| <b>3</b> | <b>МЕХАНИЗАМ МИКРО РЕЗАЊА КРТИХ МАТЕРИЈАЛА</b>   | <b>21</b> |
| 3.1      | Поистовећивање механизма микро резања кртих материјала са<br>утискивањем утискивача при статичком дејству силе . . . . . | 21        |
| 3.2      | Истраживање механизма микро резања кртих материјала мето-<br>дом гребња . . . . .  | 28        |
| 3.2.1    | Заобљење врха алата и ефективна вредност грудног угла . . . . .  | 32        |
| <b>4</b> | <b>МЕТОДОЛОГИЈА И ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНАТА МИ-</b>   |           |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>КРО РЕЗАЊА КРТИХ МАТЕРИЈАЛА</b>   | <b>35</b> |
| 4.1 Експериментална поставка . . . . .   | 35        |
| 4.1.1 Утискивања утискивача при статичком дејству силе . . . . .   | 35        |
| 4.1.2 Обрада дијамантским зрном . . . . .  | 38        |
| 4.1.3 Мерење профила формираних жљебова . . . . .  | 43        |
| 4.2 Извођење експеримента . . . . .  | 45        |
| 4.2.1 Извођење експеримента утискивања утискивача при ста-<br>тичком дејству силе . . . . .                                | 45        |
| 4.2.2 Извођење експеримента микро резања дијамантским зр-<br>ном (метода гребања) . . . . .                                | 47        |
| <b>5 УТИСКИВАЊЕ ПРИ СТАТИЧКОМ ДЕЈСТВУ СИЛЕ</b>   | <b>49</b> |
| 5.1 Одређивање критичне дубине продирања утискивача, методом<br>утискивања утискивача при статичком дејству силе . . . . . | 49        |
| 5.1.1 Утискивања утискивача при статичком дејству силе на мер-<br>меру Плави ток . . . . .                                 | 49        |
| 5.1.2 Статичко утискивање на граниту Јошаница . . . . .  | 57        |
| 5.1.3 Статичко утискивање на граниту Буковик . . . . .   | 65        |
| 5.1.4 Упоредни приказ утискивања утискивача при статичком<br>дејству силе утискивања за сва три испитивана материјала      | 72        |
| <b>6 СИЛЕ ТОКОМ ПРОЦЕСА МИКРО РЕЗАЊА</b>   | <b>74</b> |
| 6.1 Вредности интензитета сила током процеса микро резања . . . . .  | 74        |
| 6.1.1 Вредности интензитета сила током процеса обраде мер-<br>мера Плави ток . . . . .                                     | 74        |
| 6.1.2 Вредности интензитета сила током процеса обраде гранита<br>Јошаница . . . . .  | 79        |
| 6.1.3 Вредности интензитета сила током процеса обраде гранита<br>Буковик . . . . .   | 82        |
| <b>7 ТОПОГРАФИЈА ОБРАЂЕНЕ ПОВРШИНЕ И КРИТИЧНА ДУ-<br/>БИНА ПРОДИРАЊА</b>   | <b>85</b> |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 7.1       | Топографија обрађене површине . . . . .   | 85         |
| 7.1.1     | Анализа површине мермера Плави ток након микро обраде   | 85         |
| 7.1.2     | Анализа површине гранита Јошаница након микро обраде  | 92         |
| 7.1.3     | Анализа површине гранита Буковик након микро обраде .   | 97         |
| 7.2       | Упоредни приказ механизма микро резања мермера и гранита и<br>корелација са методом утискивања утискивача . . . . . | 103        |
| <b>8</b>  | <b>СПЕЦИФИЧНА ЕНЕРГИЈА МИКРО РЕЗАЊА</b>   | <b>105</b> |
| 8.1       | Специфична енергија микро резања . . . . .  | 105        |
| 8.1.1     | Специфична енергија микро резања мермера Плави ток . .  | 106        |
| 8.1.2     | Специфична енергија микро резања гранита Јошаница . .   | 110        |
| 8.1.3     | Специфична енергија микро резања гранита Буковик . . .  | 113        |
| <b>9</b>  | <b>МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ КОМПОНЕНАТА СИЛЕ РЕЗАЊА</b>  |            |
|           | $F_n$ И $F_t$   | <b>116</b> |
| 9.1       | Формирање математичког модела компонената силе резања $F_n$ и $F_t$   | 116        |
| 9.1.1     | Математички модел за мермер Плави ток . . . . .   | 124        |
| 9.1.2     | Математички модел за гранит Јошаница . . . . .  | 127        |
| 9.1.3     | Математички модел за гранит Буковик . . . . .   | 130        |
| <b>10</b> | <b>ЗАКЉУЧАК</b>   | <b>133</b> |
| <b>11</b> | <b>БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА</b>   | <b>137</b> |
| <b>12</b> | <b>ЛИТЕРАТУРА</b>   | <b>138</b> |

---

## Списак слика

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 3.1 | <i>Метод процеса утискивања.</i>   | 22 |
| 3.2 | <i>Фаза 1 а) на самом крају утискивања и б) изглед отиска након растеређења материјала.</i>  | 24 |
| 3.3 | <i>Фаза 2 на самом крају утискивања а), након растеређења материјала б) и крајњи изглед отиска утискивача в).</i>  | 26 |
| 3.4 | <i>Фаза 3 на самом крају процеса утискивања а), након растеређења материјала б) и крајњи изглед отиска утискивача в).</i>  | 27 |
| 3.5 | <i>Процес гребња дијамантским врхом - илустрација</i>  | 30 |
| 3.6 | <i>Компаративни приказ врха алата и дубине обраде <math>a_c</math> током микро резања.</i>   | 32 |
| 3.7 | <i>Напонско поље унутар обратка у случају а) већег и б) мањег радијуса алата</i>   | 34 |
| 4.1 | <i>Експериментална поставка методе утискивања утискивача при статичком дејству силе.</i>   | 36 |
| 4.2 | <i>Експериментални приказ процеса микро резања [1].</i>  | 39 |
| 4.3 | <i>Провере геометрије дијамантских врхова радијуса а) R0,06, б) R0,15 и в) R0,2 mm.</i>  | 40 |
| 4.4 | <i>Експериментална поставка сачињена од а) машине - динамометра - специјалног помоћног прибора - обратка - алата и б) система за прикупљање и аквизицију података [1].</i> | 42 |
| 4.5 | <i>Очекивани изглед формираног жљеба.</i>  | 43 |
| 4.6 | <i>Микроскопска опсервација формираних жљебова и одређивање критичне дубине продирања.</i>   | 44 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.7  | <i>Експериментална поставка за мерење профила израђених жљебова микро резањем дијамантским алатом. . . . .</i>   | 45 |
| 5.1  | <i>Вредности тврдоће мермера Плави ток у функцији дубине продирања, добијени утискивањем утискивача при <math>T = 0</math> s. . . . .</i>                                  | 53 |
| 5.2  | <i>Вредности тврдоће мермера Плави ток у функцији дубине продирања, добијени утискивањем утискивача при <math>T = 15</math> s. . . . .</i>                                 | 53 |
| 5.3  | <i>Састав мермера Плави ток, добијен на основу ИР спектроскопије два узорка материјала. . . . .</i>  | 54 |
| 5.4  | <i>Отисци формирани на мермеру Плави ток утискивањем при статичком дејству силе Vickers утискивачем са силом утискивања <math>F_n = 0,098 \div 2,962</math> N. . . . .</i> | 56 |
| 5.5  | <i>Отисци формирани на мермеру Плави ток утискивањем при статичком дејству силе Vickers утискивачем са силом утискивања <math>F_n = 4,904 \div 9,807</math> N. . . . .</i> | 57 |
| 5.6  | <i>Вредности тврдоће гранита Јошаница у функцији од дубине продирања, добијени утискивањем утискивача при <math>T = 0</math> s. . . . .</i>                                | 60 |
| 5.7  | <i>Вредности тврдоће гранита Јошаница у функцији од дубине продирања, добијени утискивањем утискивача при <math>T = 15</math> s. . . . .</i>                               | 60 |
| 5.8  | <i>Састав гранита Јошаница. . . . .</i>  | 62 |
| 5.9  | <i>Отисци формирани на граниту Јошаница утискивањем при статичком дејству силе Vickers утискивачем са силом утискивања <math>F_n = 0,098 \div 2,962</math> N. . . . .</i>  | 64 |
| 5.10 | <i>Отисци формирани на граниту Јошаница утискивањем при статичком дејству силе Vickers утискивачем са силом утискивања <math>F_n = 4,904 \div 9,807</math> N. . . . .</i>  | 65 |
| 5.11 | <i>Вредности тврдоће гранита Буковик у функцији од дубине продирања, добијени утискивањем утискивача при <math>T = 0</math> s. . . . .</i>                                 | 68 |
| 5.12 | <i>Вредности тврдоће гранита Буковик у функцији од дубине продирања, добијени утискивањем утискивача при <math>T = 15</math> s. . . . .</i>                                | 69 |
| 5.13 | <i>Састав гранита Буковик. . . . .</i>   | 69 |



|      |  |    |
|------|--|----|
| 5.14 | <i>Отисци формирани на граниту Буковик утискивањем при статичком дејству силе Vickers утискивачем са силом утискивања <math>F_n = 0,098 \div 2,962 \text{ N}</math>.</i>   | 71 |
| 5.15 | <i>Отисци формирани на граниту Буковик утискивањем при статичком дејству силе Vickers утискивачем са силом утискивања <math>F_n = 4,904 \div 9,807 \text{ N}</math>.</i>   | 72 |
| 5.16 | <i>Упоредни приказ резултата добијених експериментом утискивања при статичком дејству силе утискивања за мермер Плави ток и граните Јошаница и Буковик.</i>  | 73 |
| 6.1  | <i>Вредности компонената силе резања <math>F_n</math> и <math>F_t</math> при микро резању мермера Плави ток алатом радијуса <math>R0,2 \text{ mm}</math> и брзинама резања а) <math>v_s = 15 \text{ m/s}</math> и б) <math>v_s = 25 \text{ m/s}</math>.</i>  | 77 |
| 6.2  | <i>Вредности компонената силе резања <math>F_n</math> и <math>F_t</math> при микро резању мермера Плави ток алатом радијуса <math>R0,15 \text{ mm}</math> и брзинама резања а) <math>v_s = 15 \text{ m/s}</math> и б) <math>v_s = 25 \text{ m/s}</math>.</i> | 78 |
| 6.3  | <i>Вредности компонената силе резања <math>F_n</math> и <math>F_t</math> при микро резању гранита Јошаница алатом радијуса <math>R0,2 \text{ mm}</math> и брзинама резања а) <math>v_s = 15 \text{ m/s}</math> и б) <math>v_s = 25 \text{ m/s}</math>.</i>   | 80 |
| 6.4  | <i>Вредности компонената силе резања <math>F_n</math> и <math>F_t</math> при микро резању гранита Јошаница алатом радијуса <math>R0,15 \text{ mm}</math> и брзинама резања а) <math>v_s = 15 \text{ m/s}</math> и б) <math>v_s = 25 \text{ m/s}</math>.</i>  | 81 |
| 6.5  | <i>Вредности компонената силе резања <math>F_n</math> и <math>F_t</math> при микро резању гранита Буковик алатом радијуса <math>R0,2 \text{ mm}</math> и брзинама резања а) <math>v_s = 15 \text{ m/s}</math> и б) <math>v_s = 25 \text{ m/s}</math>.</i>    | 83 |
| 6.6  | <i>Вредности компонената силе резања <math>F_n</math> и <math>F_t</math> при микро резању гранита Буковик алатом радијуса <math>R0,15 \text{ mm}</math> и брзинама резања а) <math>v_s = 15 \text{ m/s}</math> и б) <math>v_s = 25 \text{ m/s}</math>.</i>   | 84 |
| 7.1  | <i>Изглед жљебова добијених при брзини микро резања <math>v_s = 15</math> и <math>v_s = 25 \text{ m/s}</math> у мермеру Плави ток, алатима а) <math>R0,2</math>, б) <math>R0,15</math> и в) <math>R0,06 \text{ mm}</math>.</i>                               | 87 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 7.2  | Скенирани жљебови у мермеру Плави ток, добијени алатима а) $R0,2$ , б) $R0,15$ и в) $R0,06$ <i>тт</i> , при брзини микро резања $v_s = 15$ <i>т/с</i> . . . . .                            | 90  |
| 7.3  | Скенирани жљебови у мермеру Плави ток, добијени алатима а) $R0,2$ , б) $R0,15$ и в) $R0,06$ <i>тт</i> , при брзини микро резања $v_s = 25$ <i>т/с</i> . . . . .                            | 91  |
| 7.4  | Изглед жљебова добијених при брзини микро резања $v_s = 15$ и $v_s = 25$ <i>т/с</i> у граниту Јошаница, алатима а) $R0,2$ , б) $R0,15$ и в) $R0,06$ <i>тт</i> . . . . .                    | 94  |
| 7.5  | Скенирани жљебови у граниту Јошаница, добијени алатима а) $R0,2$ , б) $R0,15$ и в) $R0,06$ <i>тт</i> , при брзини микро резања $v_s = 15$ <i>т/с</i> . . . . .                             | 95  |
| 7.6  | Скенирани жљебови у граниту Јошаница, добијени алатима а) $R0,2$ , б) $R0,15$ и в) $R0,06$ <i>тт</i> , при брзини микро резања $v_s = 25$ <i>т/с</i> . . . . .                             | 96  |
| 7.7  | Изглед жљебова добијених при брзини микро резања $v_s = 15$ и $v_s = 25$ <i>т/с</i> у граниту Буковик, алатима а) $R0,2$ , б) $R0,15$ и в) $R0,06$ <i>тт</i> . . . . .                     | 99  |
| 7.8  | Скенирани жљебови у граниту Буковик, добијени алатима а) $R0,2$ , б) $R0,15$ и в) $R0,06$ <i>тт</i> , при брзини микро резања $v_s = 15$ <i>т/с</i> . . . . .                              | 101 |
| 7.9  | Скенирани жљебови у граниту Буковик, добијени алатима а) $R0,2$ , б) $R0,15$ и в) $R0,06$ <i>тт</i> , при брзини микро резања $v_s = 25$ <i>т/с</i> . . . . .                              | 102 |
| 7.10 | Механизам микро резања а) мермера Плави ток и б) гранита Јошаница и Буковик. . . . .   | 103 |
| 8.1  | Крива специфичне енергије микро резања мермера Плави ток при обради алатом радијуса $R0,2$ <i>тт</i> и брзинама микро резања а) $v_s = 15$ <i>т/с</i> и б) $v_s = 25$ <i>т/с</i> . . . . . | 107 |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 8.2 | <i>Крива специфичне енергије микро резања мермера Плави ток при обради алатом радијуса <math>R0,15</math> <math>mm</math> и брзинама микро резања а) <math>v_s = 15</math> <math>m/s</math> и б) <math>v_s = 25</math> <math>m/s</math>.</i>                      | 109 |
| 8.3 | <i>Крива специфичне енергије микро резања гранита Јошаница при обради алатом радијуса <math>R0,2</math> <math>mm</math> и брзинама микро резања а) <math>v_s = 15</math> <math>m/s</math> и б) <math>v_s = 25</math> <math>m/s</math>.</i>                        | 111 |
| 8.4 | <i>Крива специфичне енергије микро резања гранита Јошаница при обради алатом радијуса <math>R0,15</math> <math>mm</math> и брзинама микро резања а) <math>v_s = 15</math> <math>m/s</math> и б) <math>v_s = 25</math> <math>m/s</math>.</i>                       | 112 |
| 8.5 | <i>Крива специфичне енергије микро резања гранита Буковик при обради са алатом радијуса <math>R0,2</math> <math>mm</math> и брзинама микро резања а) <math>v_s = 15</math> <math>m/s</math> и б) <math>v_s = 25</math> <math>m/s</math>.</i>                      | 114 |
| 8.6 | <i>Крива специфичне енергије микро резања гранита Буковик при обради алатом радијуса <math>R0,15</math> <math>mm</math> и брзинама микро резања а) <math>v_s = 15</math> <math>m/s</math> и б) <math>v_s = 25</math> <math>m/s</math>.</i>                        | 115 |
| 9.1 | <i>Рачунске вредности компонената силе резања а) <math>F_n^m</math> и б) <math>F_t^m</math> у функцији од вредности брзине микро резања <math>v_s</math>, дубине продирања <math>a</math> и радијуса заобљења врха алата <math>r</math>, за мермер Плави ток.</i> | 126 |
| 9.2 | <i>Рачунске вредности компонената силе резања а) <math>F_n^m</math> и б) <math>F_t^m</math> у функцији од вредности брзине микро резања <math>v_s</math>, дубине продирања <math>a</math> и радијуса заобљења врха алата <math>r</math>, за гранит Јошаница.</i>  | 129 |
| 9.3 | <i>Рачунске вредности компонената силе резања а) <math>F_n^m</math> и б) <math>F_t^m</math> у функцији од вредности брзине микро резања <math>v_s</math>, дубине продирања <math>a</math> и радијуса заобљења врха алата <math>r</math>, за гранит Буковик.</i>   | 132 |

---

## Списак табела

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 4.1 | План експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе. . . . .   | 46  |
| 4.2 | План експеримента микро резања. . . . .   | 48  |
| 5.1 | Резултати експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе у мермеру Плави ток при $T = 0$ s. . . . .  | 51  |
| 5.2 | Резултати експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе у мермеру Плави ток при $T = 15$ s. . . . . | 52  |
| 5.3 | Резултати експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе у граниту Јошаница при $T = 0$ s. . . . .   | 58  |
| 5.4 | Резултати експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе у граниту Јошаница при $T = 15$ s. . . . .  | 59  |
| 5.5 | Резултати експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе у граниту Буковик при $T = 0$ s. . . . .    | 66  |
| 5.6 | Резултати експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе у граниту Буковик при $T = 15$ s. . . . .   | 67  |
| 9.1 | План експеримента за план типа 2 <sup>3</sup> . . . . .   | 117 |
| 9.2 | План матрица. . . . .   | 119 |
| 9.3 | План експеримената - мермер Плави ток. . . . .  | 124 |
| 9.4 | Оцена сигнификантности параметара модела и провера адекватности модела - мермер Плави ток. . . . .                  | 125 |
| 9.5 | План експеримената - гранит Јошаница. . . . .   | 127 |
| 9.6 | Оцена сигнификантности параметара модела и провера адекватности модела - гранит Јошаница. . . . .                   | 128 |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 9.7 | План експеримената - гранит Буковик. . . . .   | 130 |
| 9.8 | Оцена сигнификантности параметара модела и провера адекватности модела - гранит Буковик. . . . . | 131 |

# УВОД

## 1.1 Предмет истраживања

Примена материјала на бази камена у индустрији је све присутнија у последњој декади. Првенствено се то може приметити у гранама индустрије од МЕМС (Micro Electro Mechanical Systems) система, аутомобилске индустрије, грађевинске, наменске и осталих. Све већа примена ових материјала се може оправдати њиховим добрим физичко\механичким својствима, попут термичких својстава, тврдоће или крутости [2]. Међутим, тешка обрадљивост ових материјала представља главну препреку у искоришћењу њиховог пуног потенцијала. То се првенствено може објаснити изразитом кртости ових материјала.

Током микро резања кртих материјала, материјал се одваја услед његовог кртог разарања, а не услед смицања. Управо из овог разлога, процес одвајања материјала на бази камена није могуће поистоветити са случајем обраде материјала са израженом пластичношћу, као што је случај код обраде челика, разних легира алуминијума и осталих.

На малим дубинама обраде материјала, а које спадају у домен микро резања, модел сила резања није идентичан оном које је представио М.Е. Merchant [3, 4]. Разлог је заобљен врх алата чија је вредност радијуса већа од саме дубине резања, као и ефективна вредност грудног угла који је у функцији од вредности

радијуса врха алата и дубине резања.

Истраживања у домену микро резања кртих материјала показала су да се крти материјали могу обрађивати у режиму пластичног деформисања (дуктилном режиму). На овај начин се постиже добијање глатке, прозирне површине без присуства заосталих прслина унутар материјала. Поред овога, предност обраде у дуктилном режиму је и то што не постоји потреба за додатним операцијама обраде, као што је полирање. Са друге стране, недостаци дуктилног режима су ти што услови под којима он настаје нису у потпуности дефинисани, док његов опсег је и даље недовољно истражен и непознат за већину кртих материјала.

Истраживања која су планирана у оквиру предложене докторске дисертације односе се на домен микро резања дијамантским алатом материјала на бази камена. У ширем смислу планира се детаљна анализа интеракције дијамантског алата са више различитих типова материјала на бази камена, како у дуктилном режиму, тако и у режиму кртог лома. У ужем смислу то значи:

- успостављање модела којим је могуће одредити под којим условима ће доћи до преласка из дуктилног у режим кртог лома;
- одређивање утицајних фактора од којих је у функцији вредност опсега постојања дуктилног режима.

## 1.2 Циљ истраживања

У случају микро резања кртих материјала, добијање глатке површине без присуства заосталих прслина представља сложен задатак. Ово је један од главних циљева које водеће светске лабораторије покушавају да достигну. Досадашњи поступак добијања површине таквог квалитета израде се достигао тако што се након брушења дела који је од кртог материјала вршило полирање истог, како би се елиминисале све неправилности и добила глатка површина. Помак у обради кртих материјала догодио се када је установљено да се ови материјали

могу обрађивати у режиму пластичног деформисања. На овај начин, не само да је постигнуто добијање глатке површине без присуства заосталих прслина, већ се и елиминише потреба за накнадном обрадом. Како би се остварила обрада у режиму пластичног деформисања, неопходно је потпуно познавање модела настанка струготине, а који је са једне стране условљен условима обраде, док са друге, материјалом који се обрађује.

Имајући претходно наведено у виду, циљ дисертације представља истраживање интеракције алата и обратка у процесу микро резања кртих материјала на бази камена. Он обухвата:

- развој методологије за формирање модела деформација и разарања при микро резању базиран на процесу утискивања утискивача при мерењу тврдоће;
- развој пилот постројења за реализацију процеса микро резања и анализу настанка продорних, бочних и радијалних прслина;
- успостављање модела настанка прслина при утискивању утискивача у крте материје;
- дефинисање модела настанка струготине;
- лабораторијску експерименталну верификацију успостављеног модела у домену сила микро резања, пресека струготине и специфичне енергије резања;
- дефинисање критичне дубине продирања алата у материјал којом се раздвајају дуктилни режим и режим кртог лома;
- формирање математичког модела компонената силе резања.



### 1.3 Полазне хипотезе

Доленаведене хипотезе су представљале полазну основу за започињање истраживања у овој докторској дисертацији:

- **Прва хипотеза:** могуће је успоставити аналогију између процеса утискивања утискивача у материјал и микро резања дијамантским алатом.
- **Друга хипотеза:** код материјала на бази мермера и гранита који су хетерогени по свом саставу, јављају се различити режими (типови) обраде.
- **Трећа хипотеза:** могућ је развој модела процеса микро резања материјала на бази камена.
- **Четврта хипотеза:** могућа је верификација постављеног модела на основу експерименталних резултата.
- **Пета хипотеза:** могуће је на кривој промене специфичне енергије микро резања у функцији од дубине резања идентификовати границу између дуктилног и режима кртог лома.

### 1.4 Композиција рада

Текст докторске дисертације организован је кроз десет основних поглавља међу којима се налази и закључак кроз који је дат сажет осврт на остварене резултате и могућности њихове примене. Такође, поред основних поглавља, налазе се и два додатна поглавља, поглавље Будућа истраживања и поглавље Литература.

У првом поглављу које уједно представља и уводно поглавље докторске дисертације, објашњена је проблематика која се односи на обраду материјала на бази камена, одакле је проистекла идеја за предмет и циљ ове докторске дисертације. У њему су, такође, представљене и полазне хипотезе на којима су се засновала

будућа истраживања, као и њихова ограничења.

Друго поглавље садржи преглед досадашњих истраживања спроведених у домену микро резања кртих материјала. Управо захваљујући поменутиим истраживањима, постављена је основа одакле се кренуло са израдом ове докторске дисертације и правац њеног одвијања.

Предлози механизма уклањања материјала, како код методе утискивања утискивача при статичком дејству силе, тако и при микро резању дијамантским алатом, дати су у трећем поглављу. У овом поглављу прецизно је објашњен утицај геометрије врха алата код процеса микро резања. За овакву геометрију алата представљен је механизам сила које делују у зони обраде. Специфична геометрија врха алата која се јавља при микро резању и доводи до промене вредности грудног угла, па самим тим и напонског стања унутар материјала, обрађена је у овом поглављу.

У четвртном поглављу спроведена је експериментална верификација механизма из трећег поглавља. У овом поглављу, детаљно је дат опис експерименталних поставки и планова експеримената према којима су вршени.

Статичко утискивање је тема истраживања петог поглавља. У овом поглављу представљени су резултати експеримената статичког утискивања који су спроведени на сва три материјала према претходно дефинисаном плану. У овом поглављу вршено је и одређивање броја минерала од којих су материјали састављени, као и утврђивање њихове тврдоће. Установљене су зависности настанка прслина унутар материјала у функцији од дубине продирања утискивача, као и вредности критичних дубина продирања за испитиване материјале.

Шесто поглавље се односи на сам експеримент микро резања, прецизније на силе које се јављају у процесу микро резања. Представљени су интензитети нормалне ( $F_n$ ) и тангенцијалне ( $F_t$ ) компоненте силе резања у функцији од

вредности брзине микро резања ( $v_s$ ), дубине продирања алата у материјал ( $a$ ), као и радијуса заобљења врха алата ( $r$ ), за сва три испитивана материјала. Такође, дато је разјашњење трендова промене вредности сила.

У седмом поглављу спроведена је микроскопска опсервација формираних жљебова коришћењем алата са дијамантским врхом. Спроведено је и мерење геометрије формираних жљебова, с циљем верификације представљеног механизма микро резања објашњеног у трећем поглављу. У овом поглављу, такође, одређене су и критичне дубине продирања алата за сва три испитивана материјала у функцији од вредности брзине микро резања ( $v_s$ ), као и радијуса заобљења врха алата ( $r$ ).

Формиране криве специфичне енергије микро резања за све случајеве материјала, брзина и алата, које су обухватили експерименти микро резања, дате су у поглављу осам.

Основу деветог поглавља чини успостављање математичког модела компонента силе резања, као и одређивање параметара обрадљивости који фигуришу у формираном моделу. Поред овога, дата је и графичка репрезентација формираних математичких модела предикције сила у зони микро резања чија се одступања налазе у дозвољеним границама од реалног стања за сва три материјала.

У десетом поглављу изведени су закључци истраживања спроведених у овој докторској дисертацији на основу добијених резултата. У овом поглављу наведени су и научни и стручни доприноси до којих се дошло током израде и завршетка докторске дисертације.

Осврт на потенцијалне правце будућих истраживања, представљен је у поглављу једанаест.

У последњем, дванаестом поглављу, представљена је сва литература која је коришћена и наведена током израде докторске дисертације.

---

# ПРЕГЛЕД СТАЊА ИСТРАЖИВАЊА У ОБЛАСТИ МИКРО РЕЗАЊА КРТИХ МАТЕРИЈАЛА

## 2.1 Уводне напомене

Оптимизација сваког процеса обраде захтева јасно познавање механизма по коме се он одвија. У случају обраде челика резањем, још средином четрдесетих година прошлог века, успостављен је јасан модел по коме се одвија процес стварања струготине [3,4]. На бази тог модела, касније је било могуће вршити оптимизацију обраде [5–9], а с циљем ефикасније обраде челика у виду утрошеног времена, бољег квалитета обрађене површине и повећања постојаности алата. Успостављени механизам стварања струготине важи само у случају када се врши обрада хомогених материјала, материјала који по својој природи нису крти и где је вредност дубине резања знатно већа од вредности радијуса заобљења алата, чиме се његов утицај на сам процес обраде може занемарити.

Када се говори о микро обради, постоје два приступа којим се она дефинише [10]:

### Први приступ:

- Микро обрада је скуп свих операција које се реализују на компонентама микро/мезо димензија и производа у дијапазону  $100 \mu\text{m}$  до  $10 \text{mm}$ ;
- Микро обрада карактерише захтеве за производњу високо прецизних производа, комплексних геометријских облика од широког спектра материјала у дефинисаном дијапазону мера;
- Микро обрада подразумева употребу специјалног алата (микро алат пречника  $50 \div 500 \mu\text{m}$ ), малу дебљину струготине (субмикронска до неколико микрометара) и брзину ( $50\text{k} \div 200\text{k} \text{min}^{-1}$ ).

Као последица, главна разлика између микро и макро резања је доминација клизања и гребања над смицањем и потреба да се обавезно узму у разматрање микро-структурни ефекти.

### Други приступ:

Дефиниција микро обраде са становишта димензија дебљине струготине се може класификовати на:

- Макро: обрада у конвенцијалним режимима при чему је дебљина струготине за ред величине већа од радијуса заобљења врха алата и у процесу доминира смицање. При томе се микро-структурни ефекти могу занемарити. Вредност дебљине струготине је изнад  $10 \mu\text{m}$ ;
- Микро/мезо: ову обраду карактерише доминација гребања, трења, еластичне и пластичне деформације уз констатацију да је радијус заобљења врха алата приближно једнак дебљини струготине. Дебљина струготине се креће у интервалу субмикро до неколико микрометара;
- Нано: овај термин се обично везује за ултрапрецизну обраду дијамантским алатима који имају могућност оштрења без радијуса или са малим

радијусом заобљења тако да дебљина струготине може бити у дијапазону нанометра.

Индустрије као што су аутомобилска, наменска, прехранбена и остале, не тако ретко имају потребу за увођењем новијих, савременијих материјала током пројектовања производа, а касније и њиховом израдом од истих. Материјали као што су разне врсте стакла, керамике или материјали на бази камена, налазе се на листи материјала који се често користе у поменутих индустријама. Примену су нашли од МЕМС система до разних врста сочива, па чак и покретних елемената који морају имати добра термичка својства и отпорност на хабање. Ови материјали, који су крти по својој природи, сврставају се у веома пожељне, захваљујући својој великој тврдоћи и добрим термичким карактеристикама. Међутим, увођење материјала оваквог типа у различите индустрије, без обзира на све своје позитивне карактеристике има и негативне стране, а то су отежана обрадљивост ових материјала, као и недовољно познавање механизма по којима се она одвија.

Због своје тврдоће, обрада кртих материјала се одвија на знатно мањим дубинама у поређењу са материјалима који имају израженија пластична својства. Смањењем дубине резања до једног милиметра и мање, процес обраде прелази из домена макро у домен микро резања. Када се говори о микро резању, може се рећи да постављени механизми резања више не важе. Међу главне узрочнике могу се набројати неки од фактора као што су: изразита кртост материјала који се обрађује, заобљење врха алата чији је радијус у овом случају већи од саме дубине резања и нехомогеност (хетерогеност) материјала који се обрађује. Механизам микро резања материјала, кртих по својој природи, а којим је јасно дефинисан процес стварања струготине и услови под којима се одвија, још увек није јасно и прецизно дефинисан.

Оно што је додатно занимљиво је да иако су наведени типови материјала крти по својој природи, они се могу обрађивати у такозваном режиму пластичног деформисања, где се обрада врши без присуства разарања [11–15]. У режиму

пластичног деформисања не уочава се одвајање материјала, већ се комплетна обрада одвија захваљујући повратним еластичним и пластичним деформацијама. Овакав вид обраде је пожељан јер он не изискује накнадну обраду којом би се обезбедила глатка прозачна површина, или чак уклониле заостале прслине које настају током процеса обраде, а које би могле довести у питање интегритет саме конструкције.

Не тако давно, започета су комплекснија истраживања у области микро резања. Сва ова истраживања одвијају се у три основна правца:

- поистовећивање процеса утискивања при статичком и динамичком дејству силе и процеса микро резања;
- испитивање утицаја кинематике процеса микро резања на обрадљивост кртих материјала;
- испитивање утицаја геометрије алата на процес микро резања.

### *2.1.1 Поистовећивање процеса утискивања при статичком и динамичком дејству силе и процеса микро резања*

Како би се појаснили феномени који настају током процеса микро резања, истраживачи су спроводили експерименте утискивања при статичком и динамичком дејству силе, и процеса микро резања (гребања) одговарајућим резним алатом. Основни циљ ових експеримената био је да се објасни механизам стварања струготине, дође до вредности критичне дубине продирања алата, одреде вредности интензитета сила и специфичне енергије микро резања у функцији геометрије алата, брзина и дубина микро резања.

За разлику од материјала са израженом пластичношћу где се током микро резања материјал одваја у виду екструдирања [16–26], код кртих материјала овај процес се одвија механизмом кртог разарања. Процес кртог разарања одвија се кроз феномен настанка прслина у зони резања, затим одваљивања делова



материјала, праћен са појавом дробљења материјала. Истраживања чији је циљ био испитивање облика и начина настанка прслина унутар материјала датирају још од средине седамдесетих година прошлог века [27–31]. Прслине које настају у зони резања могу се класификовати у три основна облика:

- медијалне прслине,
- латералне прслине,
- радијалне прслине.

Предикција интензитета разарања материјала, односно раста прслина током процеса микро резања неопходна је за формирање валидног механизма микро резања. Заостале прслине и њихов нежељени раст унутар материјала могу довести до значајних нежељених ефеката. Њихово присуство унутар материјала након процеса обраде може утицати на сам интегритет конструкције, док њихов неконтролисани раст може довести до нежељеног квалитета обрађене површине. Једну од метода за предикцију дужине прслина представили су В.Р. Lawn и М.В. Swain [32]. Њихова истраживања заснивала су се на бази утискивања утискивача при статичком дејству силе. Обрадом експерименталних резултата уз помоћ "Boussinesq" методе установили су да постоји пропорционалност између вредности силе утискивања и дужине прслина које се јављају унутар материјала током и након процеса утискивања.

Даљим истраживањима које је спровео са својим сарадницима, В.Р. Lawn [30, 31, 33–35] установио је да су заостали напони који су присутни унутар материјала након завршетка процеса утискивања одговорни за даљи раст медијалних прслина и након растерећења материјала. Један од узрока заосталих напона је и хетерогеност материјала који се обрађује. Прецизније, различита тврдоћа минерала од којих је материјал састављен може бити иницијатор за заостале напоне. До истих закључака дошло се и у истраживањима [36, 37].

А. Chandra и сарадници [38] представили су свој модел за предикцију разарања материјала. Експерименталном анализом потврђена је велика подударност мо-

дела са добијеним вредностима. Међутим, оно што се мора издвојити, а што је установљено њиховим истраживањима је да до раста латералних прслина долази током растерећења материјала. Са друге стране, В.Р. Lawn и А.Г. Evans [29] преставили су модел за предикцију раста медијалних/радијалних прслина који обезбеђује функционалну везу између величине критичне вредности прслине и силе утискивања утискивача, неопходне за наставак даљег раста прслина.

Поред методе утискивања при статичком дејству силе, у досадашњим истраживањима, коришћена је и метода гребања. Основна разлика ове методе у односу на утискивање утискивачем је што се услед интеракције алата и обратка јављају и нормална ( $\vec{F}_n$ ) и тангенцијална ( $\vec{F}_t$ ) компонента силе резања. Експериментима који су се заснивали на методи гребања (парања) [39, 40], имали су за циљ да се установи повезаност опсега пластичног деформисања у зависности од параметара обраде, односно повезаност зоне пластичног деформисања и брзине резања.

Сва ова истраживања имају сличан циљ, а то је проналажење и описивање прецизних механизма који објашњавају феномене настале у процесу микро резања кртих материјала. Преглед механизма стварања струготине, како при методи утискивања утискивачем, тако и при микро резању кртих материјала представили су S. Malkin и T.W. Hwang [41].

У самом механизму микро резања, веома важан утицајни фактор је дубина резања, и утицај еластичних деформација материјала. Дубина резања је у директној корелацији са режимом резања (режим пластичног деформисања или кртог лома) у коме се одвија процес микро резања. Ово за последицу има да је количина уклоњеног материјала у процесу микро резања кртих материјала у директној функцији од дубине продирања алата. До методе уз помоћ које се може установити у ком режиму се тренутно врши обрада, покушали су да дођу G. Subhash и сарадници [42]. Истраживања су се заснивала на анализи

вредности сила које се јављају током микро резања користећи "data dependent system (DDS)" метод. Главни циљ је био да се у зависности од интензитета и карактера силе утврди у ком од два режима се тренутно врши обрада.

Јаснију слику о формирању прслина и равни смицања током процеса микро резања испитивали су D. Ghost и сарадници [43] користећи комбиновану "Boussinesq" и "Cerruti - field solution" методу. Спроведени експерименти односили су се на Zirconium Diboride-Silicon Carbide композитни материјал. Поред ових истраживања R. Anton [44] и D. Ghost [45], спровели су сличну анализу, али на различитом материјалу с циљем утврђивања промене механичких својстава материјала током утискивања утискивача при статичком и динамичком дејству силе.

Истраживачи [46–50] су своје експерименте базирали су на развоју математичког модела микро резања кртих материјала. Имплементацијом ових алгоритама у софтверске пакете, који се баве методама коначних елемената, остварује се могућност предикције феномена који се јављају током процеса микро резања.

### *2.1.2 Испитивање утицаја кинематике процеса микро резања на обрадљивост кртих материјала*

Педесетих година прошлог века започета су и истраживања утицаја путање алата на саму обрадљивост материјала [51, 52]. Међутим, експанзија у овој области је почела тек од деведесетих година када су Т. Moriwaiki и сарадници [53, 54] спровели експеримент микро резања са осцилаторним кретањем алата. Тада је утврђено је да у односу на конвенцијално резање кртих материјала, где алат врши релативно праволинијско кретање у односу на обрадак, опсег режима пластичног деформисања може бити повећан применом вибрационог (осцилаторног) кретања алата. Ово је потврђено и у истраживањима [55–57]. Овакав вид микро резања, доводи до смањења интензитета сила које се јављају током процеса обраде, а то су показали М. Zhou и сарадници [58].

V.K. Astashev и V.I. Babitsky [59] дошли су до математичког модела којим се долази до вредности интензитета сила резања у функцији од параметара вибрационог микро резања.

Микро резање при којем алат остварује сложено осцилаторно кретање, захтева посебну геометрију алата како би се жељено кретање могло остварити. Међу првима који су развили један овакав систем су L. Нап и сарадници [60]. Њихов систем специфичан је у томе да има могућност компензације грешке. Међутим, један од проблема који се јавља код оваквог типа микро резања је одржавање алата у резонантном стању уколико дође до промене интензитета сила резања. V.I. Babitsky и сарадници [61] развили су мехатронски систем помоћу ког се алат одржава у резонантном стању без обзира на промену вредности интензитета сила резања.

Иако се осцилаторним кретањем алата повећава његова постојаност, услед интензивног трења између леђне површине алата и обрађене површине обратка јавља се интензивније хабање леђне површине. Променом правца осциловања алата чиме се избегава контакт алата са обратком у повратном, и добрим делом у радном ходу, остварује се додатно повећање постојаности алата, а што су показали M. Jin и M. Murakawa [62].

T. Moriwaki и E. Shamoto [63–65] спровели су надограђени експеримент вибрационог резања, такозвано елиптично вибрационо резање. За потребе оваквог типа експеримента, где алат остварује вибрационо елиптично кретање, развијен је посебан систем алата и представљен од стране E. Shamoto [66]. Како би се добила већа флексибилност током извођења експеримената, развијени систем имао је могућност независног дефинисања амплитуда осциловања у два правца чиме се остварује жељена оријентација осциловања алата. Оваквим видом микро резања утврђено је да се радни век алата повећава у односу на праволинијско вибрационо микро резање. Такође, услед израде жљебова у кртим материјалима, елиптичним кретањем алата, постиже се боља геометрија

жлеба у односу на обраду где алат врши праволинијско осцилаторно кретање [67].

Обрада материјала са израженим пластичним својствима карактерише се добијањем површине бољег квалитета [68]. N. Suzuki и сарадници [69] применом елиптичног кретања алата успели су да остваре обраду калупа за ливење сочива који се израђују од легура Wolframa, а што до тог тренутка није било изводљиво. Са друге стране, С. Ма и сарадници [70] установили су да се код стругања постиже боља тачност обраде у поређењу са конвенционалним стругањем, чак и када алат остварује праволинијско осцилаторно кретање. Поред тога, на овај начин се елиминише могућност појаве пукотина на ивицама издатка [71].

Вредности интензитета сила које се јављају у контакту алата који остварује осцилаторно елиптично кретање и обратка редуковане су у поређењу са вредностима интензитета сила код конвенцијалног кретања алата. Модели за прецизну предикцију интензитета сила представљени су, како од стране N. Negishi [72] тако и од С. Ма [70, 71].

N. Suzuki и сарадници [73] развили су систем за контролу дубине резања уз помоћ варијације амплитуде осциловања. Овом методом постигнуто је повећање ефикасности оваквог система. Развој сличних система се може наћи и код других истраживача [74, 75].

### *2.1.3 Испитивање утицаја геометрије алата на процес микро резања*

Поред испитивања дејства сила током процеса утискивања/микро резања, као и самог процеса одвајања материјала, истраживања су се усмерила и на испитивање утицаја геометрије алата или утискивача на сам процес микро резања/одвајања материјала. За разлику од макро резања, где су дубине резања знатно веће од вредности радијуса заобљења врха алата, па самим тим његов

утицај може бити занемарен, код микро резања то није случај. Заобљење врха алата је веома утицајан фактор који утиче на сам процес микро резања, имајући у виду да је вредност његовог радијуса већа од вредности дубине којом алат продире у материјал. Као последица тога долази до промене вредности грудног угла алата, који је у функцији од дубине обраде и вредности радијуса заобљења врха алата. Промена вредности грудног угла има директан утицај на повећање односно смањење притисних напона у зони резања, услед чега се процес стварања струготине може разликовати у различитим зонама дубине обраде.

Испитивање утицаја геометрије алата на процес микро резања далеко више је истражен на материјалима са израженим пластичним својствима, у односу на материјале који су по својој природи крти.

Z.J. Yuan [76] детаљно је испитивао утицај вредности радијуса заобљења врха алата на критичну дубину продирања за материјал са израженим пластичним својствима. Првенствено је своје истраживање базирао на опсервацији зависности критичне дубине која доводи до стварања струготине у виду екструдирања од вредности радијуса заобљења врха алата. Испоставило се да алат са мањом вредности радијуса заобљења врха доводи до смањења границе испод које није присутно одвајање материјала. Испод критичних вредности дубина микро резања материјал се еластично и пластично деформише. Ово се може објаснити променом ефективне вредности грудног угла коју је у свом раду доказао Z. Fang [77]. Својим истраживањем је показао да ефективна вредност грудног угла која је у функцији од вредности дубине резања и радијуса алата има значајан утицај на правац простирања напонског поља унутар материјала. На сличну тему су спроведена многа следећа истраживања [78–84].

Промена геометрије врха алата, односно вредности радијуса, може имати велики утицај и на интензитете сила које се јављају у току процеса обраде, а самим тим и директан утицај на хабање алата приликом процеса обраде [85].

Имајући то у виду, део истраживања у области микро резања фокусиран је на развој математичког модела предикције сила које настају у зони резања. Једна од таквих истраживања су она спроведена од стране G. Bissacco и сарадника [86] чији је представљени модел узео у обзир вредност радијуса заобљења алата. Са друге стране, истраживањима које је спровео M. Malekian са сарадницима [87], формиран је модел предикције сила у који је, поред вредности радијуса заобљења врха алата, инкорпориран и утицај еластичног враћања материјала. У литератури се могу наћи и истраживања која се односе на формирање модела предикције сила код микро резања коришћењем методе коначних елемената [88].

Геометрија врха алата, такође, може имати значајан утицај и на геометрију обрађене површине. Уколико се говори о обради жлеба методом гребња, различите геометрије алата доводе до промене геометрије формираног жлеба. Једна таква испитивања спроведена су од стране D. Axinte и сарадника [89]. Са друге стране, вредност радијуса заобљења врха алата може имати велики утицај на величину пукни које се формирају на ивицама површине. Смањење вредности односа дубине микро резања и вредности радијуса заобљења врха алата, води до повећања вредности издигнуте ивице дуж трага микрореза [90, 91].

## 2.2 Микро резање материјала на бази камена

Материјали на бази камена као што су гранит или мермер спадају у тешко обрадљиве материјале. Њихова изразита кртост и велика тврдоћа, која је уједно променљива унутар целе запремине, имају велики утицај на процес обраде ових материјала. Варијабилност вредности тврдоће ових материјала доводи до комплексности избора оптималних параметара обраде, као што су дубина и брзина резања, а што за последицу има неефикасност обраде у домену утрошка алата и добијања површине жељеног квалитета. Уколико се узме у обзир све већа примена материјала на бази камена, као и њихов огроман потенцијал за ширу примену, интензивнија истраживања у пољу обрадљивости ових материјала по-

стају оправдана.

Као што је већ наведено, главни циљ код микро резања кртих материјала, је да се добије fino обрађена површина без присутних трагова разарања материјала. Н. Huang и сарадници [92] су у својим истраживањима установили да се гранит, иако је крт по својој природи, може обрађивати у режиму пластичног деформисања, чиме се добија површина високог сјаја. Такође, дошли су до закључка да се са повећањем пластичних деформација у зони обраде, смањује храпавост обрађене површине. У својим истраживањима, до сличних закључака дошли су аутори [93].

Иако постоји велика варијација тврдоће унутар целе запремине гранита због његовог хетерогеног састава, тврдоћа се може и додатно разликовати између различитих типова (сорти) гранита, услед различитих минерала од којих су формиран. Истраживањима је установљено да различита својства материјала, као што је тврдоћа, може утицати на опсег режима пластичног деформисања [78, 94–96]. Модел који би то узео у обзир, а који би служио за одређивање оптималних параметара обраде на основу вредности и варијације тврдоће материјала, представљен је од стране Ј. Хе и Ј. Тамаки [97]. Они су до њега дошли на основу експеримената спроведених на десет различитих типова гранита. Са друге стране, У. Ли и сарадници [98] представили су нову методу обраде гранита којом се повећава постојаност алата тиме што се специјално дизајнираном геометријом алата може утицати на трење које се јавља приликом интеракција алата и обратка.

Мермер, поред гранита, представља један од најприсутнијих материјала на бази камена са све већом применом у индустрији. Слично као и гранит, по својој природи, мермер је веома крт материјал са хетерогеном структуром. У зависности од типа минерала који улазе у састав мермера, његова тврдоћа може знатно варирати. У досадашњим истраживањима, мермер се, као и већина других кртих материјала, може обрађивати, како у режиму кртог лома, тако и у ре-



жиму пластичног деформисања [99], међутим, до сада је објављен мали број истраживања на ову тему.

---

# МЕХАНИЗАМ МИКРО РЕЗАЊА КРТИХ МАТЕРИЈАЛА

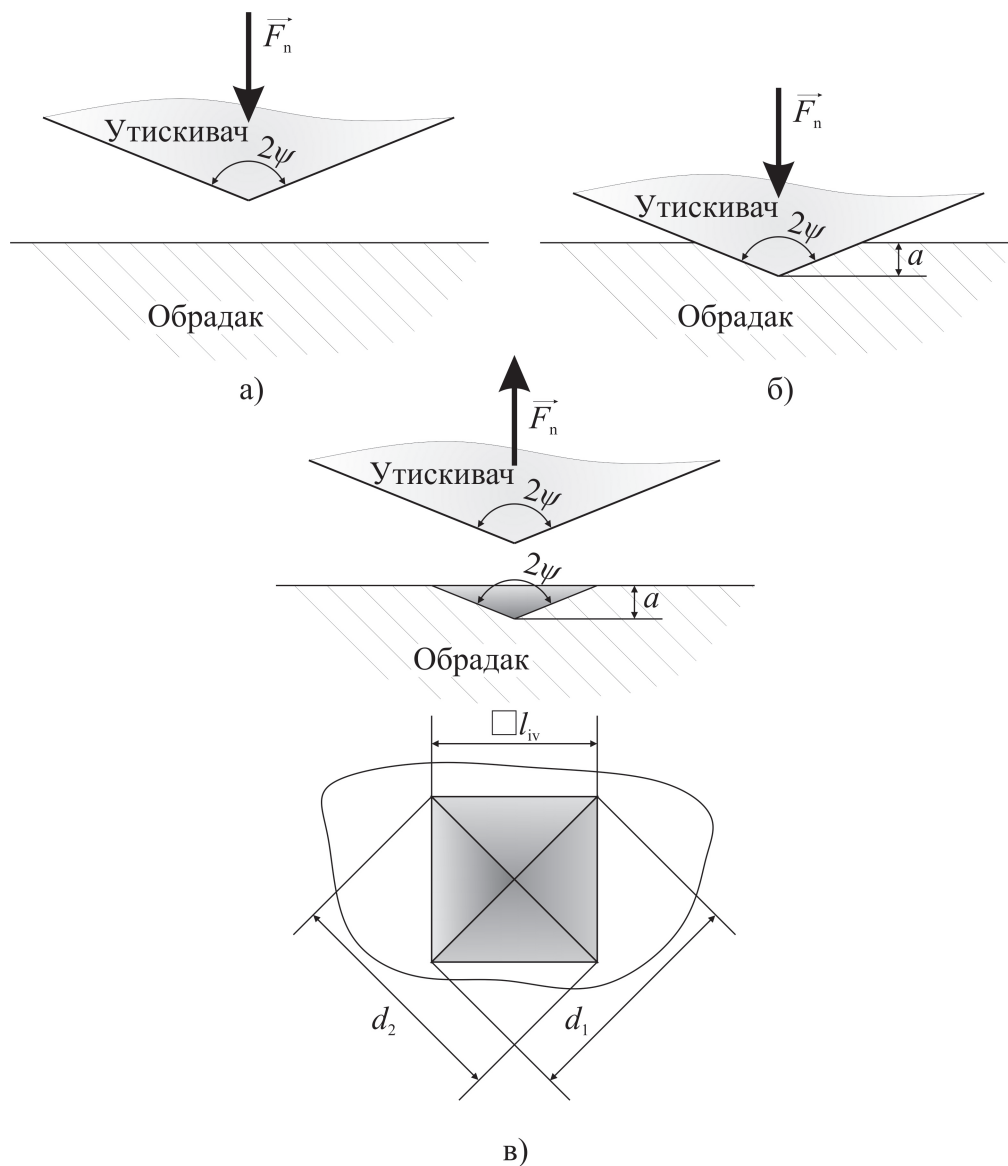
Показатељи квалитета обрађене површине одговарајуће методе обраде уско су повезани са механизмом настанка струготине, елементима режима обраде, геометријом алата, вредностима интензитета сила које се јављају у зони обраде и остало. Међуповезаност наведених утицајних фактора, још увек, не даје јасну слику и научну заснованост када је у питању обрада кртих материјала.

Сва истраживања у домену појашњења механизма микро резања кртих материјала реализују се у два правца. Први правац је базиран на поистовећивању процеса утискивања утискивача при мерењу тврдоће са процесом микро резања, и други који се односи на реално извођење процеса микро резања одговарајућим резним алатом.

## **3.1 Поистовећивање механизма микро резања кртих материјала са утискивањем утискивача при статичком дејству силе**

Утискивање утискивача при статичком дејству силе представља једну од метода којом се настоји могуће поистовећивање са феноменима насталим процесом микро резања. Метод утискивања утискивача се састоји из две фазе. Прва

фаза представља само утискивање дијамантског алата у обрадак, док се друга фазу односи на микроскопску опсервацију формираних отисака на површини обратка. На слици 3.1 приказана је илустрација процеса утискивања.



Слика 3.1: Метод процеса утискивања.

У овој методи присутно је дејство само нормалне сила ( $\vec{F}_n$ ) којом утискивач делује на обрадак. Овом методом добијају се одговарајући резултати, међутим неукључивање тангенцијалне силе ( $\vec{F}_t$ ) од самог почетка обраде доводе до тога да није могуће са сигурношћу прецизно дефинисати механизам микро резања кртих материјала. Са друге стране, овом методом оквирно се може одредити

опсег у којем могу настати прслине при дејству одговарајуће силе утискивања, а познато је да су прслине незаобилазни феномен у процесу настанка струго-тине при обради кртих материјала.

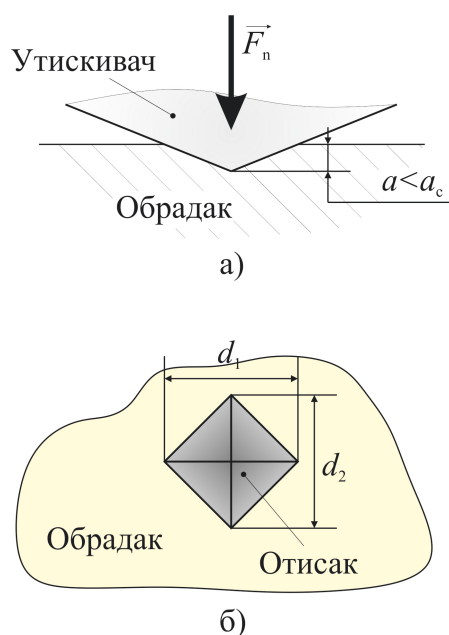
Утискивачи који се користе у овој методи могу бити различитог облика. У литературним изворима најчешће се могу наћи облици: Vickers, Rokwell, Brinell и Кпоор. Не тако ретко помињу се и алати чија геометрија је прецизно дефинирана од стране самог истраживача [49, 100] у зависности од циља експеримента.

Након процеса утискивања, на површини обратка, остаје отисак који у зависности од силе утискивања, односно дубине продирања алата у обрадак, може се сврстати у три групе/фазе:

- Фаза 1: отисак који је настао без присуства разарања материјала;
- Фаза 2: отисак чији настанак је пропраћен развојем прслина унутар материјала;
- Фаза 3: отисак који уз себе носи, не само прслине које се простиру унутар материјала, већ је дошло и до одвајања делова материјала.

Све док је активна фаза 1, односно док вредност интензитета силе утискивања ( $F_n$ ) не пређе своју критичну вредност која се одражава на прекорачење дубине продирања ( $a$ ) преко критичне вредности ( $a_c$ ), процес утискивања пропраћен је само повратним еластичним и пластичним деформацијама (слика 3.2). У овој фази се не уочава разарање материјала, што даље говори о томе да се на дубинама обраде ( $a$ ) које се крећу испод критичне вредности ( $a_c$ ), може очекивати обрада кртог материјала у режиму пластичног деформисања. Опсег фазе 1, не само да зависи од материјала који се обрађује, већ зависи и од геометрије самог утискивача. Како се са повећањем притисног напонског стања унутар обратка, а у зони утискивања, повећава пластична деформабилност материјала [101, 102] применом алата који то и остварују, могуће је утицати на повећање опсега режима пластичног деформисања током микро резања кртих

материјала. На дубинама утискивања које су знатно испод критичне вредности продирања, повратне еластичне деформације преовладавају над пластичним, што може довести до нежељених појава у виду добијања отиска нежељене геометрије који би требало да одговара геометрији самог утискивача.



**Слика 3.2:** Фаза 1 а) на самом крају утискивања и б) изглед отиска након растерећења материјала.

У случају прекорачења интензитета силе утискивања ( $F_n$ ) изнад критичне вредности, односно дубине утискивања ( $a$ ) преко ( $a_c$ ), обрада у режиму пластичног деформисања више није могућа. На овај начин прелази се из фазе 1 у фазу 2, коју карактерише обрада у режиму кртог лома. У овој фази материјал се одваја захваљујући разарању, док је и даље у малом проценту присутан удео пластичних деформација унутар материјала. Сам тренутак преласка из фазе 1 у фазу 2 могуће је одредити методом утискивања тако што се у самом подножју и на ивицама отиска уочавају прслине настале током процеса утискивања (слика 3.3а), као и након рестерећења материјала (слика 3.3б) [30, 31, 33–35]. Ове прслине се деле на медијалне и радијалне прслине. Раст медијалних прслина простире се у правцу дејства утискивача, односно нормално на површину утискивања, док се радијалне простиру у бочном правцу у односу на правац кретања утискивача током процеса утискивања. Прслине настале у овој фази имају највећи утицај

на интегритет конструкције. Њихово присуство након обраде дела, такође може утицати на жељену геометрију и квалитет обрађене површине.

Критична дубина продирања ( $a_c$ ) која раздваја фазу 1 од фазе 2, односно режим пластичног деформисања од режима кртог лома, може се одредити микроскопском опсервацијом формираног отиска. До њене вредности се долази тако што се утврђује тренутак, односно дубина продирања у којем долази до иницијализације првих прелина. Вредност продирања може се одредити на основу познатих вредности дијагонала ( $d_1$  и  $d_2$ ) (слика 3.1), при чему се средња вредност дијагонала може записати као:

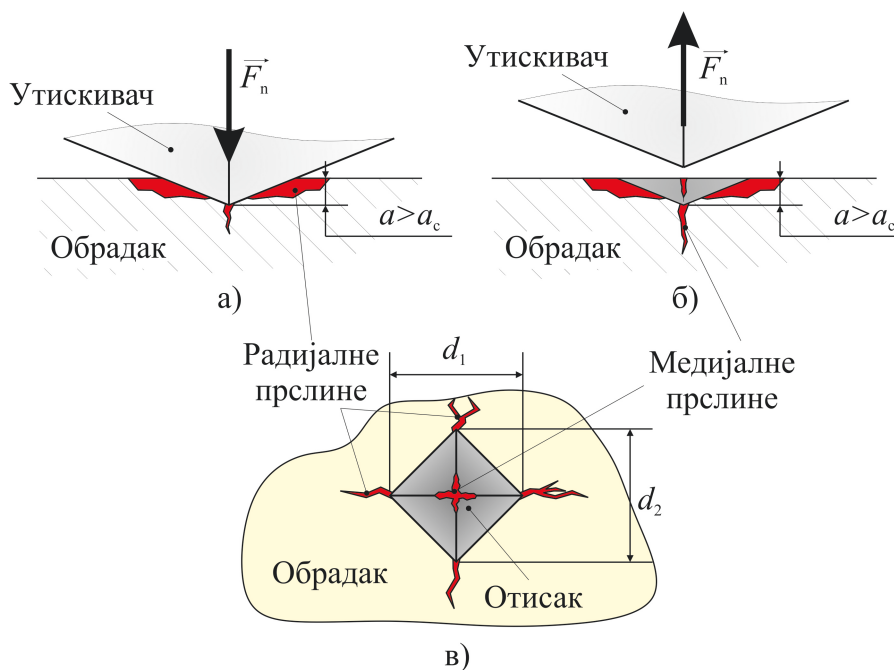
$$d_{sr} = \frac{d_1 + d_2}{2}. \quad (3.1)$$

Пројектовањем средње вредности дијагонала на праву која је колинеарна са ивицом отиска, долази се до средње вредности дужине ивице отиска:

$$l_{iv} = \frac{\sqrt{2} \cdot (d_1 + d_2)}{2}, \quad (3.2)$$

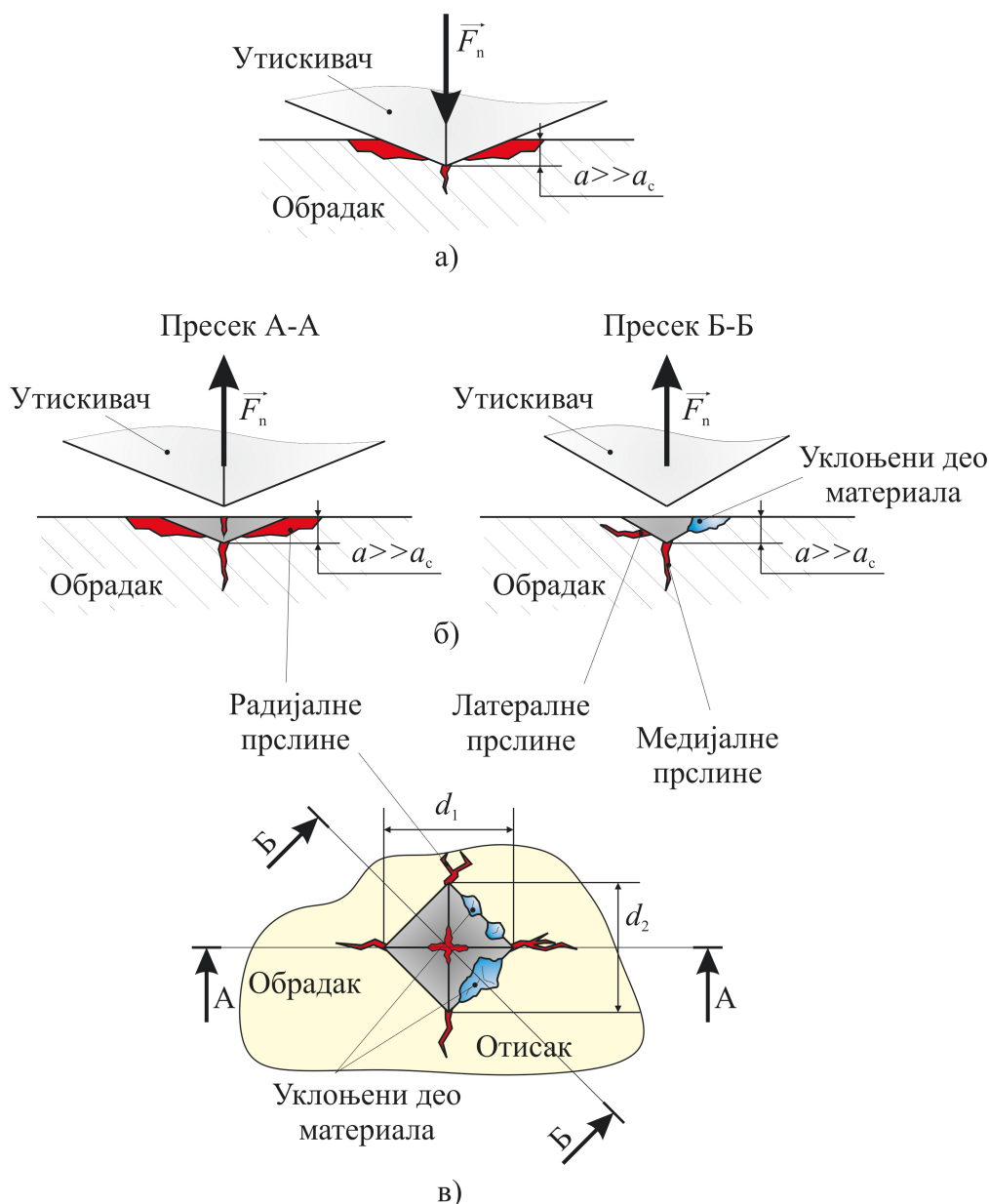
одакле се даље познавањем угла конуса утискивача може извести израз дубине продирања за Vickers утискивач:

$$a = \frac{\sqrt{2} \cdot (d_1 + d_2)}{4 \cdot \operatorname{tg}\psi}. \quad (3.3)$$



*Слика 3.3: Фаза 2 на самом крају утискивања а), након растеређења материјала б) и крајњи изглед отиска утискивача в).*

Даљим повећањем дубине утискивања ( $a$ ) услед повећања вредности интензитета силе утискивања ( $F_n$ ), поред поменутих система медијалних и радијалних прслина, почињу да се јављају и латералне прслине. Иницијализација и неконтролисани раст латералних прслина наступа у тренутку растеређења материјала [38]. Правац простирања латералних прслина усмерен је од дна отиска ка површини на којој се врши утискивање (слика 3.4). Појавом латералних прслина може се очекивати и одвајање материјала дуж ивица отиска, па се може рећи да је систем латералних прслина у директној спрези са количином уклоњеног материјала у режиму кртог лома.



Слика 3.4: Фаза 3 на самом крају процеса утискивања а), након растерећења материјала б) и крајњи изглед отиска утискивача в).

Што се тиче микро резања материјала на бази камена, правац раста сва три система прслина, није могуће прецизно предвидети. Током микро резања ових материјала, услед минијатуризације целокупног процеса, алат је у интеракцији само са једним зрном. Оно што се може јавити је тренутни прелазак са једног зрна на друго. Изражена хетерогеност материјала на бази камена доводи до тога да прелазак алата са једног зрна на друго, са потпуно различитим својствима, доводи до непредвидивог и неконтролисаног раста прслина. Правац



простирања прслина може се јављати кроз сâмо зрно, између зрна, или комбиновано услед гранања прслине.

### 3.2 Истраживање механизма микро резања кртих материјала методом гребања

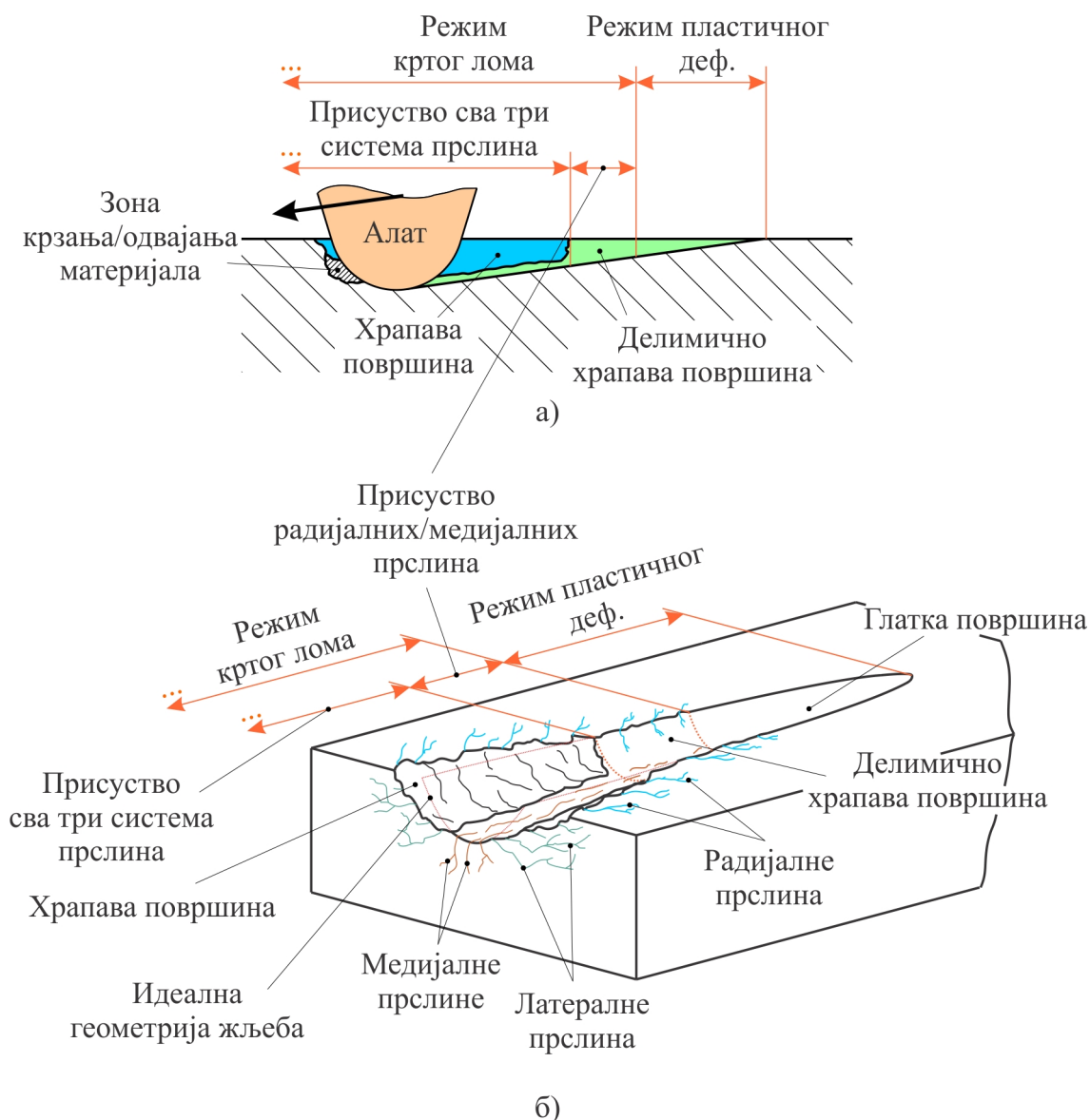
За разлику од методе утискивања утискивача, методом гребања која се изводи дијамантским зрном тачно дефинисане геометрије, поред дејства нормалне компоненте силе резања ( $F_n$ ) присутна је и тангенцијална компонента ( $F_t$ ). Овом методом, такође, могу се испитивати и феномени који се јављају током микро резања материјала са израженим пластичним својствима.

Да би се дошло до механизма микро резања кртог материјала користећи ову методу обраде, на површини обратка формира се жлеб као последица интеракције дијамантског алата са обратком. Током њихове интеракције бележе се интензитети компонената сила резања ( $F_n$  и  $F_t$ ) који се касније сумирају са информацијама добијеним детаљном микроскопском опсервацијом формираног жлеба. На овај начин добија се јаснија слике о начину уклањања материјала приликом процеса микро резања. Формирање жлеба овом методом одвија се кроз три фазе, које су веома сличне фазама формирања отиска методом утискивања утискивача при статичком дејству силе. Ове фазе се могу поделити на следећи начин:

- Фаза 1: део жлеба формиран захваљујући повратним еластичним и пластичним деформацијама без присуства разарања материјала;
- Фаза 2: део жлеба формиран повратним еластичним и пластичним деформацијама, али и, у мањем проценту, развојем медијалних и радијалних прслина;
- Фаза 3: највећи део жлеба формиран захваљујући кртом разарању материјала, а само малим уделом захваљујући дејству повратних еластичних

и пластичних деформација.

Од тренутка започињања интеракције врха дијамантског алата са обратком, па све до тренутка достизања критичне вредности дубине резања (продирања) ( $a_c$ ), материјал се еластично и пластично деформише. Ово се догађа упркос кртој природи самог материјала (слика 3.5). У фази 1 обраде материјала методом гребања, не уочава се развој и неконтролисани раст ниједног од наведена три система прслина. Ова фаза се уједно назива и режим пластичног деформисања. На крају ове фазе, формирана површина обратка је глатка. Код материјала на бази камена, ова фаза је веома битна јер је она доказ да се материјали, крти по својој природи, могу обрађивати и без присуства разарања. На овај начин, не само да се штеди време тако што се елиминише потреба за накнадном обрадом, већ се врши и ојачање материјала.



Слика 3.5: Процес гребњања дијамантским врхом - илустрација

Прекорачењем дубине резања ( $a$ ) изнад критичне вредности ( $a_c$ ), унутар материјала започињу да се развијају прслине, односно долази до преласка из режима пластичног деформисања у режим кртог лома. Режим кртог лома карактерише фаза 2 методе гребњања у којој део жљеба који се формира настаје, не само повратним еластичним и пластичним деформацијама, већ долази и до иницијализације медијалних и радијалних прслина. У овој фази, површина која се добија није глатка, као што је то случај у фази 1, већ је делимично храпава услед новонасталог развоја прслина унутар материјала. У случају да се ради о обради прозирног материјала, ова површина ће бити матирана, као последица заоста-

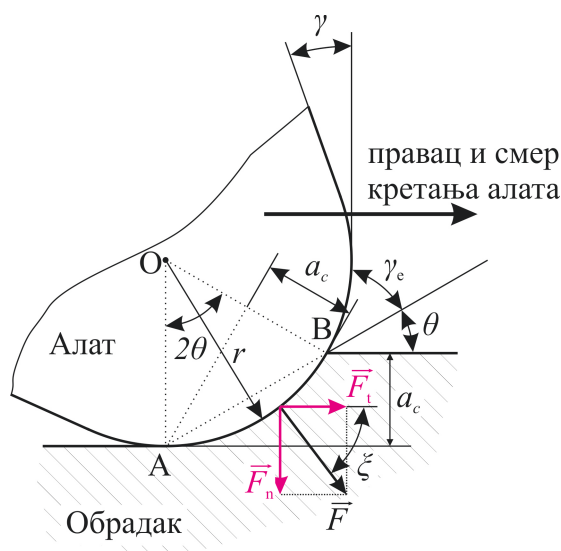
лих прслина унутар материјала. Одвајање материјала се јавља, али у мањем проценту, јер још увек није присутна појава и неконтролисани раст латералних прслина. Правац простирања медијалних прслина усмерен је у правцу кретања алата, а нормално у односу на површину која се обрађује. Са друге стране, радијалне прслине заузимају правац који је под углом у односу на смер кретања алата. Присуство радијалних прслина последица је затежућих напона који се јављају на ивицама жлеба, па им је и правац ширења под благим закошењем у односу на нормалу правца кретања алата.

За разлику од настанка жлеба фазом 1 или 2, формирање жлеба фазом 3 методе гребања, представља најнепожељнији начин обраде самог жлеба. Овом фазом долази до одвајања материјала током микро резања кртих материјала. Такође, у овој фази, поред радијалних и медијалних прслина, присутна је појава и латералних прслина које имају тенденцију раста приближно од корена жлеба, па ка површини обратка. Услед присуства латералних прслина, запремина уклоњеног материјала знатно је већа, него приликом обраде материјала у фази 2, где су присутне само радијалне и медијалне прслине. Штавише, запремина одстрањеног материјала у фази 3 знатно је већа од идеалне запремине коју алат теоријски покрије унутар обратка приликом његовог кретања. Од самог подножја жлеба, па до места формирања латералних прслина, присутна је фаза 2. У режиму кртог лома, одвајање материјала не настаје само као последица присуства латералних прслине, већ као последица интеракције сва три система прслина. Испред самог врха алата може се очекивати и одвајање материјала у виду крзања, дробљења, али и одвајања делова материјала већих запремина. У зависности од саме структуре и природе зрна које се обрађује, фаза 3 се може протезати на већим дубинама од оних на којим се налази алат. Ово доводи до формирања жлеба знатно веће дубине од очекиване.

### 3.2.1 Заобљење врха алата и ефективна вредност грудног угла

Преласком са макро на микро процес резања, врх алата постаје један од фактора који знатно утиче на процес микро резања. Имајући у виду да је код микро резања вредност радијуса заобљења врха алата већа од вредности дубине обраде, врх алата се не може сматрати идеално оштрим. У домену где су вредности дубина резања мање од вредности радијуса заобљења врха алата, почињу да важе нове законитости, које нису присутне код макро резања, то јест, модел одвајања материјала на основу смицања се више не може сматрати валидним.

Како је вредност заобљења врха алата ( $r$ ) већа од вредности дубине продирања алата у материјал ( $a_c$ ), грудна површина не захвата материјал обратка под грудним углом ( $\gamma$ ). Заправо, грудна површина алата не долази у контакт са обратком, већ је њихова интеракција обезбеђена преко самог врха алата. Ово доводи до тога да се вредност грудног угла ( $\gamma$ ) своди на ефективну вредност ( $\gamma_e$ ), а што је приказано на слици 3.6.



Слика 3.6: Компаративни приказ врха алата и дубине обраде  $a_c$  током микро резања.

Ако се узме у обзир да је површина којом алат додирује обрадак лучна, а не равна, могуће је повући тангенту у свакој тачки материјала дуж линије интеракције са алатом. На овај начин може се формирати бесконачан број нових

вредности ефективног грудног угла. Како би се формирала средња вредност ефективног грудног угла ( $\gamma_e$ ), дата је претпоставка да је површина која је оријентисана са ефективном вредношћу грудног угла ( $\gamma_e$ ) површина  $\overline{AB}$ . На основу овога, преко угла  $\theta$ , који је уједно и суплемент угла  $\gamma_e$ , може се написати једнакост:

$$\cos 2\theta = 1 - \frac{a_c}{r}, \quad (3.4)$$

одакле следи да израз за угао  $\theta$  гласи:

$$\theta = \frac{1}{2} \arccos \left( 1 - \frac{a_c}{r} \right). \quad (3.5)$$

Познавајући вредности суплементарног угла  $\theta$  од угла  $\gamma_e$ , може се извести израз за ефективну вредност грудног угла, и он гласи [77]:

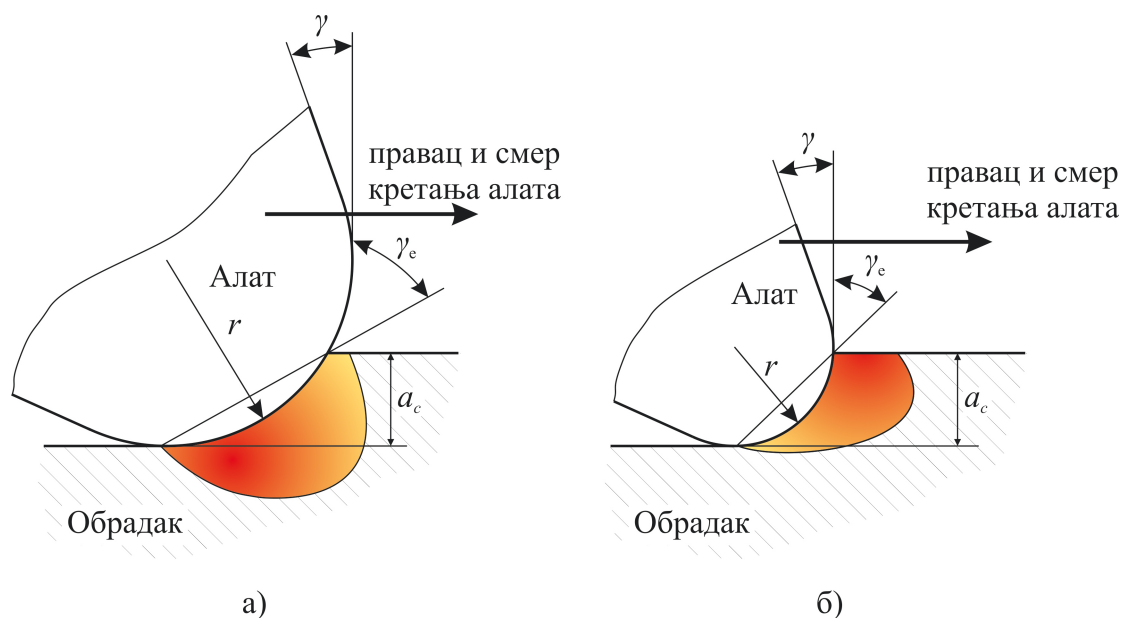
$$\gamma_e = -\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \cos^{-1} \left( 1 - \frac{a_c}{r} \right). \quad (3.6)$$

Ефективна вредност грудног угла није константна, већ је у функцији од вредности дубине придирања ( $a_c$ ) и од вредности радијуса заобљења врха алата ( $r$ ). Њене вредности су изразито негативне. Варијабилност ефективне вредности грудног угла у функцији од вредности дубине продирања ( $a_c$ ) и вредности радијуса заобљења врха алата ( $r$ ), доводи до тога да се посматрано за исту дубину микро резања, приликом обраде истог материјала, али са алатима различитог радијуса, очекује појава различитих феномена, према сличном механизму као што су представили S. Venkatachalam [103] и K. Liu [104].

Микро резање на малим дубинама, али користећи алат са већом вредности радијуса заобљења врха, (слика 3.7а), доводи до изразито негативних вредности ефективног грудног угла, које са друге стране изазивају повишено притисно напонско стање унутар обратка. Овакво напонско стање омогућује да се материјали који су крти по својој природи пластично и еластично деформишу. Другим речима, обрада кртих материјала, у овом случају, одвија се без разарања, то

јест без одвајања материјала. Смањењем вредности радијуса врха алата (слика 3.7б), а без промене дубине микро резања, долази до промене вредности ефективног грудног угла. Поменуто смањење вредности радијуса врха алата доводи до повећања вредности ефективног грудног угла, што последично доводи до промене напонског стања унутар материјала и иницијализације прелина унутар истог, на један од три начина које су представили Е. Orowan [105] и G.R. Irwin [106].

Промене ефективне вредности грудног угла изнад критичних вредности доводи до започињања разарања материјала испред и испод алата. На овај начин долази до стварања нових површина у режиму кртог лома, непознате геометрије. У тренутку контакта алата са неком од новонасталих површина, вредност ефективног грудног угла није позната. Другим речима, ефективна вредност грудног угла у режиму кртог лома не може се тачно одредити услед комплексне геометрије жлеба формираног кртим разарањем материјала, а које није могуће предвидети.



Слика 3.7: Напонско поље унутар обрадка у случају а) већег и б) мањег радијуса алата

---

# МЕТОДОЛОГИЈА И ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНАТА МИКРО РЕЗАЊА КРТИХ МАТЕРИЈАЛА

## 4.1 Експериментална поставка

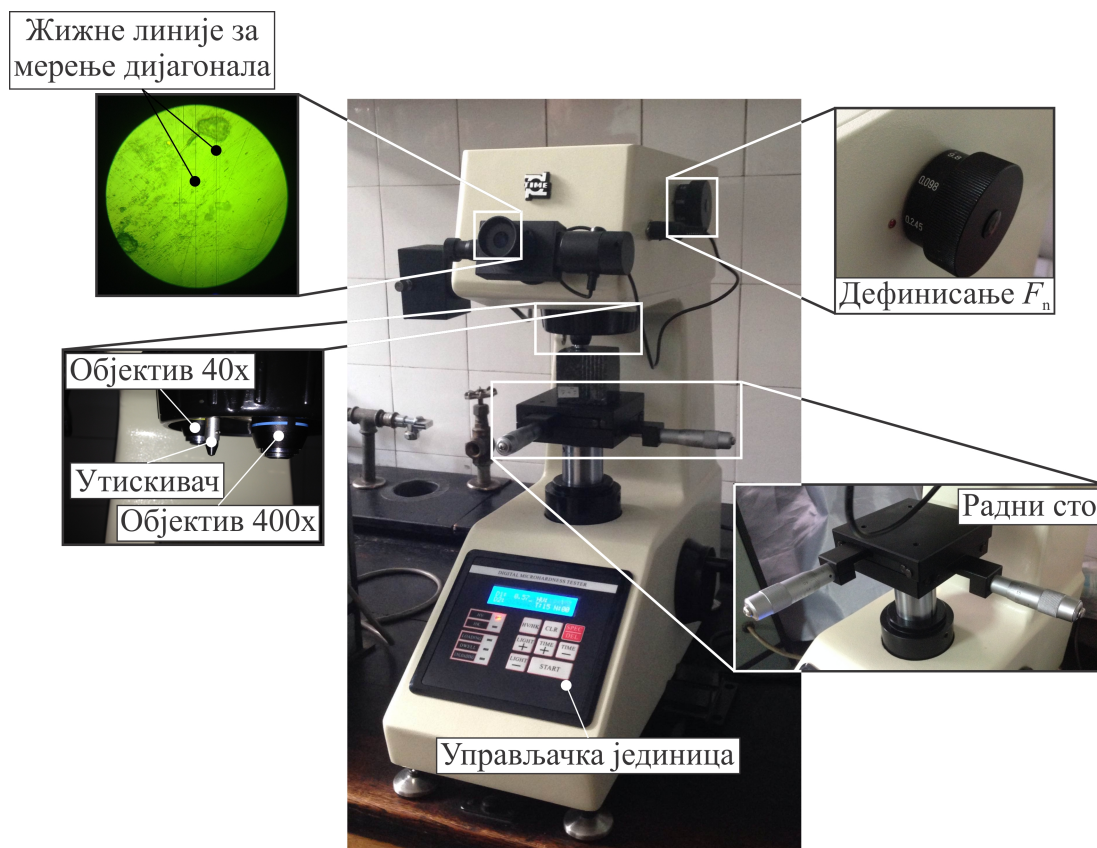
У оквиру докторске дисертације, вршена су истраживања: утискивање при статичком дејству силе утискивања, гребање дијамантским алатом и мерење профила формираних жљебова кртих материјала на бази мермера и гранита. Након ових експеримената, уследила је детаљна анализа добијених резултата, као и микроскопска опсервација формираних површина.

### *4.1.1 Утискивања утискивача при статичком дејству силе*

Експерименти утискивања при статичком дејству силе, чија је методологија детаљно објашњена у претходном поглављу, спроведени су на уређају за мерење тврдоће ТИМЕ-ТН710 (слика 4.1). Уређај се састоји од дијамантског врха (Vickers утискивач) којим се врши процес утискивања, као и микроскопског сочива и окулара који обезбеђују увећања од 40x и 400x, а служе за опсервацију формираног отиска. Одређивање вредности дијагонала отисака ( $d_1$  и  $d_2$ ) врши се уз помоћ жижних линија представљених на слици 4.1. План експеримента



формиран је на основу промене вредности интензитета силе утискивања ( $F_n$ ) од 0,098 до 9,807 N и вредности времена мировања утискивача у материјалу  $T$  од 0 до 15 s. Наведени опсег вредности интензитета силе утискивања ( $F_n$ ) дефинисан је на основу очекиваних вредности критичне дубине продирања испитиваних материјала. Различите вредности интензитета сила утискивања ( $F_n$ ) неопходне су за остваривање промена у вредности дубина продирања утискивача ( $a$ ) у испитивани материјал. Са друге стране, разлог за промену вредности времена мировања утискивача ( $T$ ) у тренутку остваривања жељене силе представља непознато време неопходно за престанак неконтролисаног раста прлина унутар материјала. Другим речима, на овај начин се остварује могућност да се након процеса утискивања, а пре растерећења материјала, процес неконтролисаног раста прлина унутар испитиваног материјала заврши, односно да дође до стабилизације испитиваног материјала.



Слика 4.1: Експериментална поставка методе утискивања утискивача при статичком дејству силе.

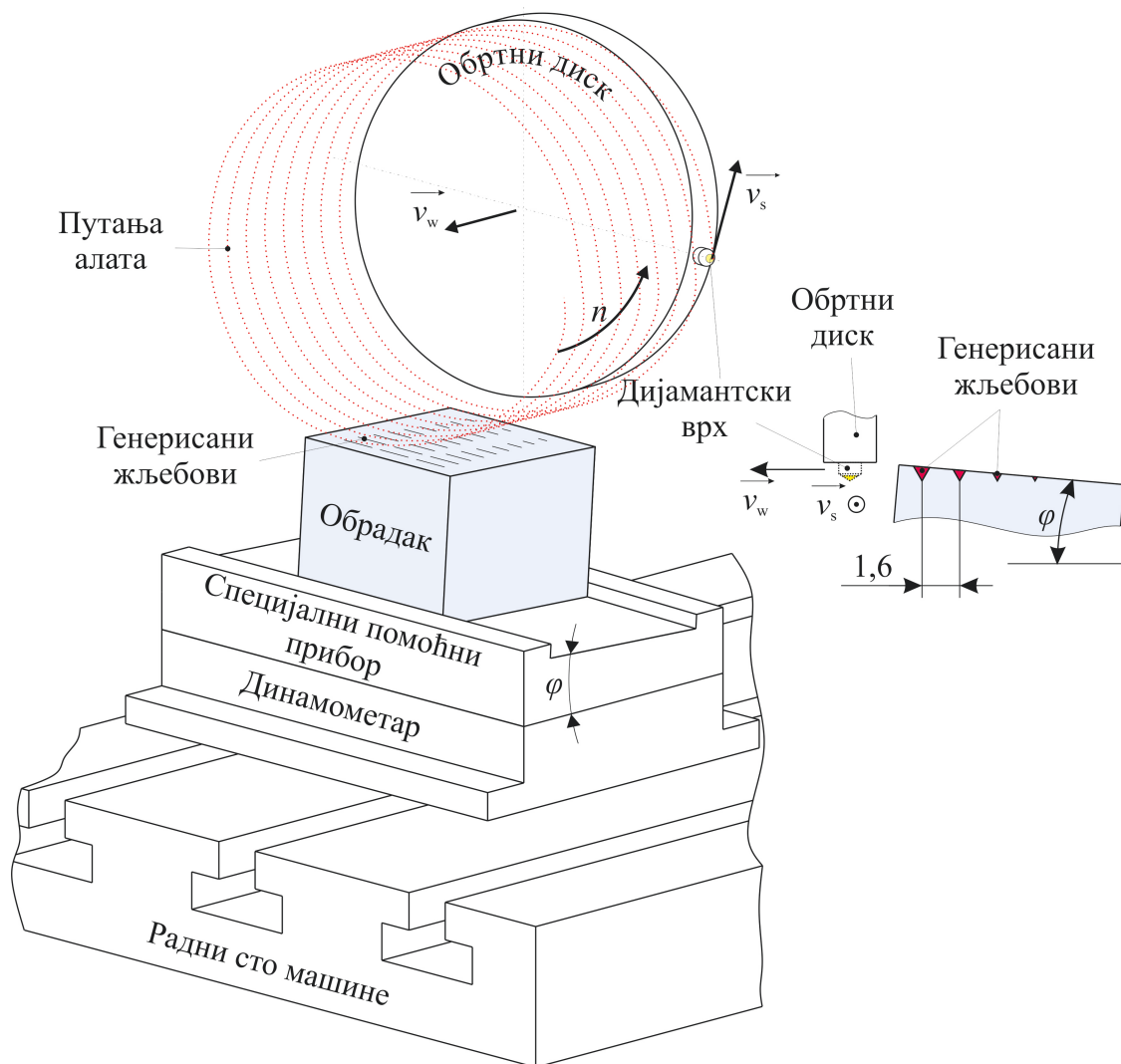
Сви експерименти спроведени у овој докторској дисертацији обављени су на три различита материјала, а који припадају материјалима на бази камена. У питању су гранити *Јошаница* и *Буковик* и мермер *Плави ток*. Сви ови материјали су хетерогени по свом саставу. Непосредно пре започињања експеримента, вршена је припрема испитиваних површина наведених материјала. Ово подразумева да је претходно извршен процес брушења и полирања, чиме су се у великој мери елиминисале неправилности материјала на површини и у њеној ближој зони, а које су проузроковане претходним процесом обраде и током формирања самог материјала.

Експеримент је базиран на томе да се за једну вредност силе утискивања ( $F_n$ ) и времена мировања ( $T$ ), врши више мерења. На овај начин извршена је провера исправности добијених резултата. Како се својства сваког минерала понаособ могу разликовати у великој мери, мерења су вршена на неколико различитих зрна минерала, од којих је материјал састављен. Овим се постиже добијање прецизније слике о могућим/новонасталим појавама унутар материјала. Макроскопском опсервацијом испитиване површине, уочава се да су димензије зрна минерала, далеко веће од димензија формираних отисака. Самим тим, није постојао проблем приликом одабира места утискивања, чиме би се избегло евентуално истовремено утискивање на два минерала.

Користећи микроскопску опсервацију на поменутом уређају, било је могуће одредити вредности дијагонала отисака ( $d_1$  и  $d_2$ ). Захваљујући познатој геометрији утискивача, где је угао између наспрамних ивица, у овом случају, износио  $2\psi = 136^\circ$ , и измерених вредности дијагонала отисака ( $d_1$  и  $d_2$ ), дошло се до вредности дубина продирања утискивача применом израза представљеног једначином (3.3). На основу прикупљених података, као што су вредности дубина продирања и информација о присуству и развоју прелина унутар материјала добијених микроскопском опсервацијом, дефинисана је граница између режима пластичног деформисања и режима кртог лома за сва три испитивана материјала.

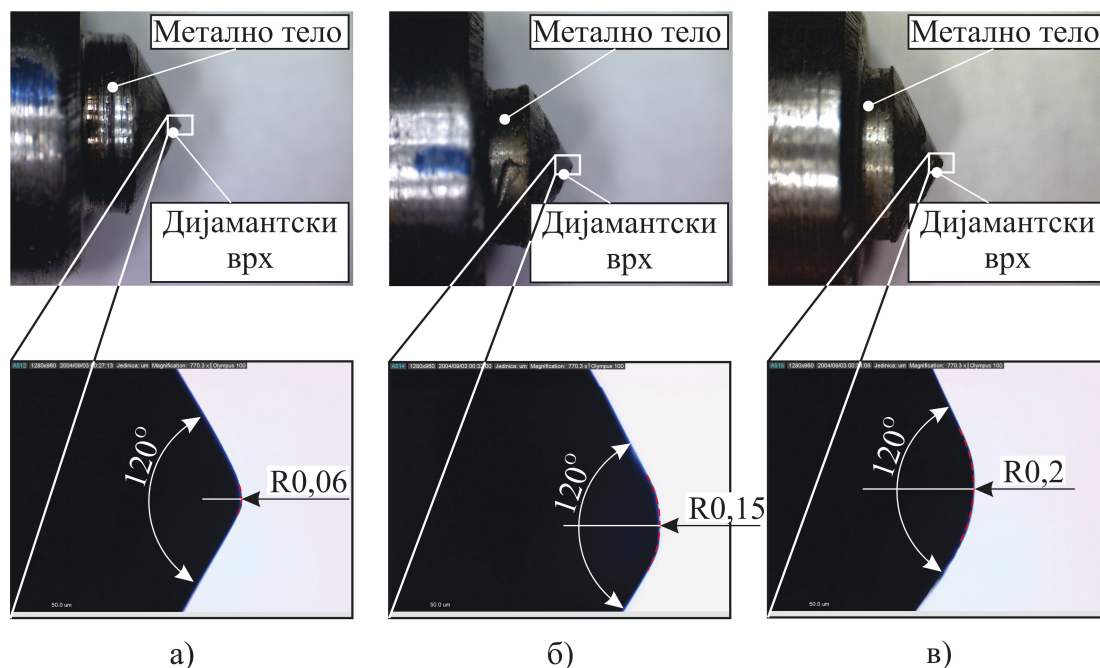
#### 4.1.2 Обрада дијамантским зрном

Обрада дијамантским алатом током процеса гребања подразумева генерисање/формирање жљебова на површини испитиваног материјала. Сви експерименти спроведени су на КНУ (Компјутерски Нумерички Управљаном) обрадном центру ILR НМС-500. Дијамантски врх, познате геометрије, постављен је на обртни диск који врши главно обртно кретање чиме се остварује жељена брзина резања ( $v_s$ ). У циљу постизања формирања више десетина жљебова на једној површини обраде, обртни диск, поред главног обртног кретања, остварује и помоћно праволинијско кретање брзином ( $v_w$ ). Слагање ова два кретања (обртно и праволинијско) доводи до тога да се дијамантски врх креће по завојној путањи. Пречник обртног диска на који је постављен дијамантски врх износио је  $d_d = 150$  mm. Брзина помоћног кретања ( $v_w$ ) дефинисана је тако да са брзином резања ( $v_s$ ) обезбеди растојање између два суседна жлеба од 1,6 mm. Ово растојање је довољно да се избегне преклапање жљебова, а што би утицало на валидност самог експеримента. Комплетан алат, састављен од обртног диска и дијамантског врха, претходно је статички и динамички избалансиран. Шематски приказ експерименталне поставке приказан је на слици 4.2.



Слика 4.2: Експериментални приказ процеса микро резања [1].

За потребе експеримента, да би се испитао утицај радијуса заобљења врха алата на: критичну дубину продирања, вредности интензитета компонената силе резања и специфичне енергије резања, коришћена су три дијамантска врха са различитим вредностима радијуса заобљења:  $R0,2$ ,  $R0,15$  и  $R0,06$  mm. Геометрија сва три дијамантска врха понаособ је проверена уз помоћ оптичког микроскопа Olympus CX 25 и оптичког сензора Dino-Eye AM7023 (слика 4.3).



Слика 4.3: Провере геометрије дијамантских врхова радијуса а)  $R0,06$ , б)  $R0,15$  и в)  $R0,2$   $\mu\text{m}$ .

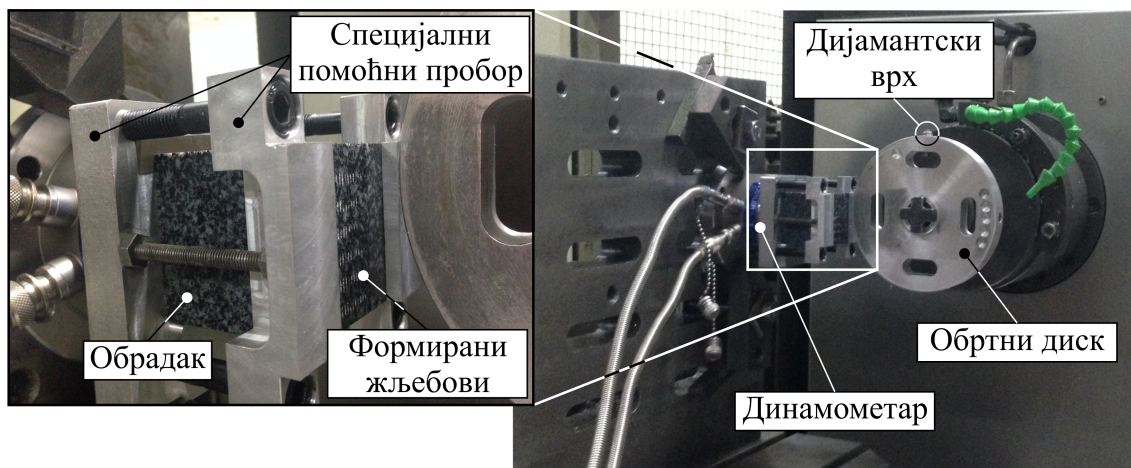
За испитивање утицаја само дела алата који је заобљен, експерименти су постављени тако да вредност максималне дубине обраде никада не пређе преко заобљеног дела алата. У противном, током процеса микро резања, један део материјала би био захваћен заобљеним врхом, док би се други део материјала захватао коничним делом дијамантског врха који је под углом од  $120^\circ$ .

Као и код експеримената утискивања утискивача при статичком дејству силе, сви експерименти спроведени су на гранитима *Јошаница* и *Буковик* и мермеру *Плави ток*. Експериментални припремци формирану су тако да буду призматичног облика димензија  $50 \times 50 \times 50$  mm. Све површине на припремку претходно су обрађене брушењем, а затим полирањем. На овај начин елиминисане су све неправилности на површини дела, настале претходном обрадом или формирањем материјала, али је и обезбеђено да се равност и хрпаовост обрађене површине сведе у жељене границе толеранције. Веза обратка са радним столом машине остварена је преко специјалног помоћног прибора и динамометра.

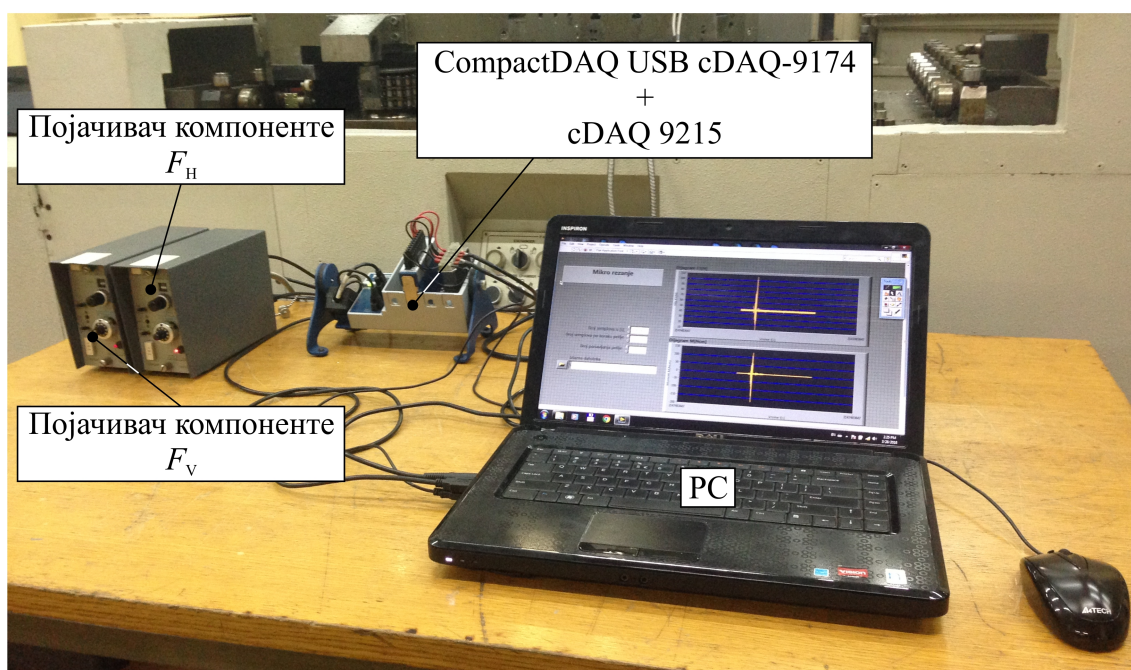
Специјални помоћни прибор, причвршћен за динамометар, поред функције по-

зиционирања и стезања дела, има функцију и да обезбеди угао нагиба ( $\varphi$ ) површине обратка који се обрађује. Закошењем површине под углом  $\varphi$ , остварује се промена (повећање) максималне дубине обраде, односно максималне дубине жлеба ( $a_{\max}$ ) (слика 4.5) при сваком новом пролазу алата. Максимална дубина жлеба који се обрађује у функцији је од угла нагиба обрађиване површине ( $\varphi$ ) и положаја жлеба на површини обратка.

С циљем прикупљања информација о вредностима интензитета компонената сила резања ( $F_n$  и  $F_t$ ), током спровођења експеримента, специјални помоћни прибор на коме је причвршћен експериментални део постављен је на динамометар Kistler 9257B, који је, са друге стране, чврсто везан за радни сто машине. Аналогни сигнали представљају носиоце информација о интензитетима компонената сила резања, а прикупљени су уз помоћ динамометра. Након тога, конвертовани су у дигиталне вредности и складиштени на рачунар коришћењем аквизиционог система који се састоји од National Instruments CompactDAQ USB cDAQ-9174 са аналогно напонским улазним модулом National Instruments 9215 и софтвера LabVIEW (слика 4.4). Током процеса микро резања, вршено је мерење вредности интензитета вертикалне ( $F_V$ ) и хоризонталне ( $F_H$ ) компоненте силе резања. На основу познате вредности растојања дијамантског врха од осе обртања обртног диска, и тренутне позиције алата у захвату, било је могуће извршити трансформацију вертикалне и хоризонталне компоненте на нормални и тангенцијални правац (слика 4.5).



а)

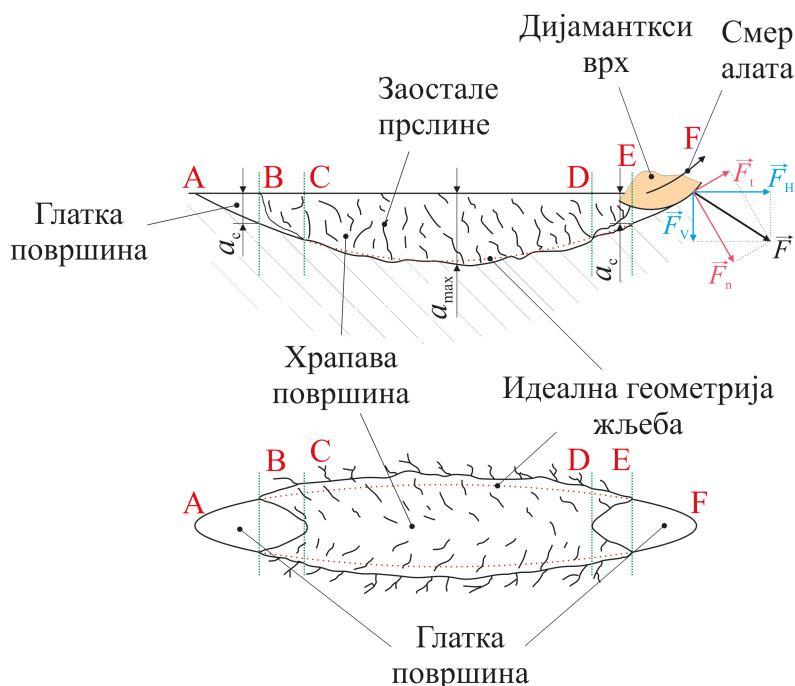


б)

*Слика 4.4: Експериментална поставка сачињена од а) машине - динамометра - специјалног помоћног прибора - обратка - алата и б) система за прикупљање и аквизицију података [1].*

Након завршетка интеракције дијамантског врха и испитиваног дела, алат за собом оставља формирани жлеб лучног облика (слика 4.5). Један од циљева овог експеримента био је да се након микроскопске опсервације жлеба уоче све три фазе његовог формирања. Другим речима, да се установи да ли је могуће ова три материјала, крта по својој природи, обрађивати у режиму пластичног деформисања, и уколико је могуће, одредити критичну вредности дубине ре-

зања у функцији од параметара обраде и геометрије алата. Вредност критичне дубине продирања алата ( $a_c$ ) одређена је на основу познате вредности радијуса алата, дужине формираног жљеба и максималне дубине продирања алата у материјал. На овај начин било је могуће утврдити границу између режима пластичког деформисања и режима кртог лома. Микроскопска опсервација извршена је уз помоћ оптичког микроскопа LEICA DM ILM слика (4.6).

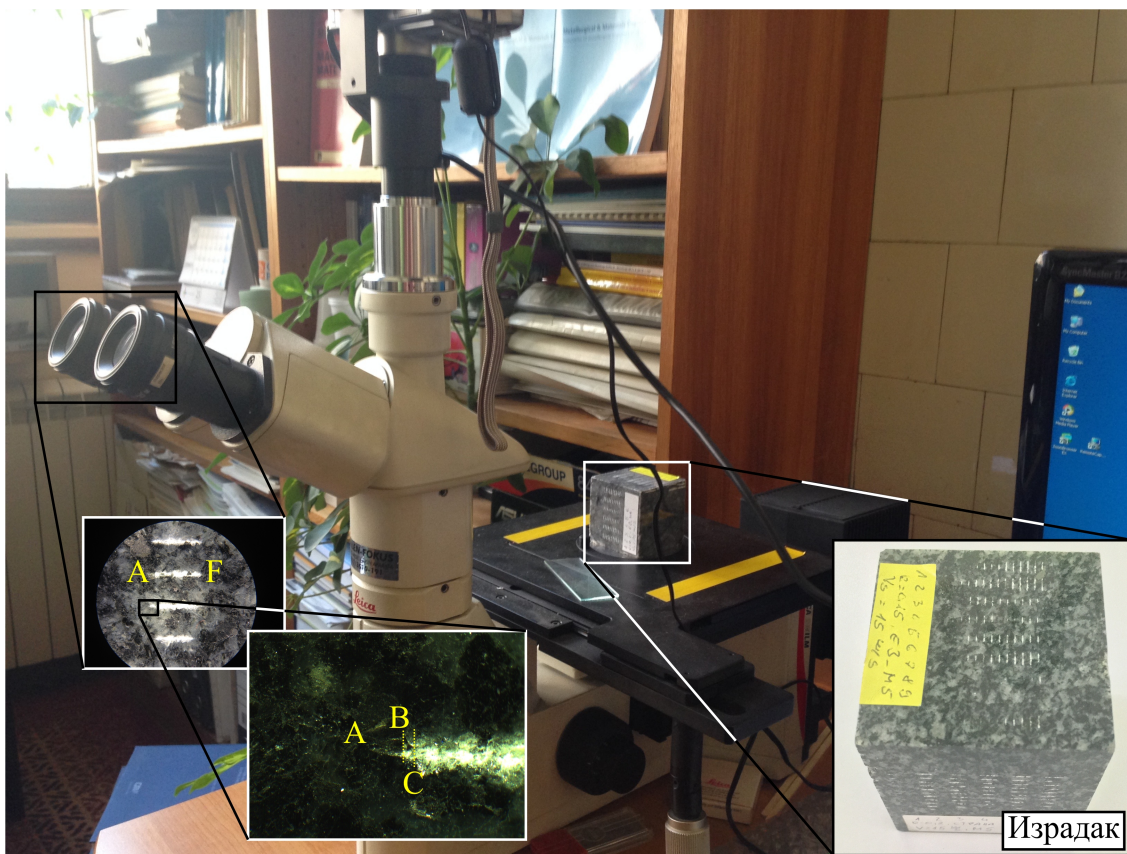


Слика 4.5: Очекивани изглед формираног жљеба.

#### 4.1.3 Мерење профила формираних жљебова

Испитивање понашања материјала приликом обраде, односно начин на који се материјал уклања, извршено је уз помоћ детаљне микроскопске опсервације обрађене површине и мерења њене геометрије. Микроскопском опсервацијом обрађеног материјала (слика 4.6) могуће је установити типове режима обраде у којима се врши обрада, али и вредности критичне дубине продирања као, што је претходно наведено.





*Слика 4.6: Микроскопска опсервација формираних жљебова и одређивање критичне дубине продирања.*

За мерење геометрије профила израђених жљебова коришћен је уређај за мерење храпавости Mahr - MahrSurf PS 10, чија се сонда налази на специјално израђеном помоћном прибору (слика 4.7). Специјални помоћни прибор са својом покретном микро осом има могућност попречног померања испитиваног дела са могућношћу вертикалног померања сонде ради њеног ослањања на испитивану површину. Испитивани део се на покретну осу поставља преко другог специјалног помоћног прибора који је пројектован тако да врши жељено базирање и стегање испитиваног дела, уједно не ометајући мерење геометрије профила жљебова.



Слика 4.7: Експериментална поставка за мерење профила израђених жљебова микро резањем дијамантским алатом.

## 4.2 Извођење експеримента

### 4.2.1 Извођење експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе

Експеримент утискивања утискивача при статичком дејству силе вршен је тако што су током извођења експеримената мењане вредности следећих параметара: силе утискивања ( $F_n$ ) и времена мировања утискивача ( $T$ ). Комплетан план експеримента представљен је у табели 4.1.

**Табела 4.1:** План експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе.

| Материјал | $T$ [sec] | $F_n$ [N] | Број мерења |
|-----------|-----------|-----------|-------------|
| Јопаница  | 0         | 0,098     | 4           |
|           |           | 0,245     |             |
|           |           | 0,490     |             |
|           |           | 0,98      |             |
|           |           | 2,45      |             |
|           |           | 4,904     |             |
|           |           | 9,807     |             |
|           | 15        | 0,098     |             |
|           |           | 0,245     |             |
|           |           | 0,490     |             |
|           |           | 0,98      |             |
|           |           | 2,45      |             |
|           |           | 4,904     |             |
|           |           | 9,807     |             |
| Буковик   | 0         | 0,098     |             |
|           |           | 0,245     |             |
|           |           | 0,490     |             |
|           |           | 0,98      |             |
|           |           | 2,45      |             |
|           |           | 4,904     |             |
|           |           | 9,807     |             |
|           | 15        | 0,098     |             |
|           |           | 0,245     |             |
|           |           | 0,490     |             |
|           |           | 0,98      |             |
|           |           | 2,45      |             |
|           |           | 4,904     |             |
|           |           | 9,807     |             |
| Плави Ток | 0         | 0,098     |             |
|           |           | 0,245     |             |
|           |           | 0,490     |             |
|           |           | 0,98      |             |
|           |           | 2,45      |             |
|           |           | 4,904     |             |
|           |           | 9,807     |             |
|           | 15        | 0,098     |             |
|           |           | 0,245     |             |
|           |           | 0,490     |             |
|           |           | 0,98      |             |
|           |           | 2,45      |             |
|           |           | 4,904     |             |
|           |           | 9,807     |             |

Након извршеног утискивања утискивачем према плану експеримента из табеле 4.1, спроведена је микроскопска опсервација отисака и мерење дијагонала сваког од њих. За једну вредност силе утискивања ( $F_n$ ) и времена мировања ( $T$ ), вршена су четири мерења (утискивања). За свако ново мерење, одабир места утискивања биран је на новом зрну на површини материјала уз претпоставку да то зрно има, или слична, или дијаметрално различита својства од осталих зрна на којима је вршен експеримент. Место утискивања усвојено је тако да отисак буде само на једном зрну, односно испитивања нису вршена на самим границама зрна, где би се отисак једним делом налазио на једном, а другим делом на неком другом зрну.

#### *4.2.2 Извођење експеримента микро резања дијамантским зрном (метода гребња)*

Сви експерименти спроведени су на претходно наведена три материјала, према плану приказаном у табели 4.2. Током експеримената, на свакој испитиваној површини извршено је генерисање већег броја жљебова, где је сваки од њих имао различиту максималну дубину продирања алата ( $a_{\max}$ ) у материјал. За брзину резања узете су две вредности:  $v_s = 15$  m/sec и  $v_s = 25$  m/sec. Вредности ових брзина усвојене су на основу препоручених вредности брзина резања које се користе приликом обраде материјала из исте групе.

Приликом експеримената микро резања (гребња), вршена су мерења вредности вертикалне ( $F_V$ ) и хоризонталне ( $F_H$ ) компоненте силе резања. Поменути компоненте силе резања јављају се као последица интеракције алата и обратка. Експерименти су иницијално спроведени на мермеру *Плави ток* користећи сва три типа алата (R0,2, R0,15 и R0,06). Током његове обраде, испоставило се да услед примене алата вредности заобљења врха R0,06 mm, коришћена експериментална инсталација није у стању да детектује силе које се јављају у току процеса микро резања на малим дубинама, прецизније на оним дубинама на којима је присутан режим пластичног деформисања. Услед немогућности детектовања вредности компонента силе на границама испод критичне вред-

ности продирања алата ( $a_c$ ) у материјал, у даљим експериментима није вршено мерење компонената силе коришћењем алата чија вредност заобљења врха износи R0,06.

**Табела 4.2:** План експеримента микро резања.

| Материјал | $v_s$<br>[m/s] | $D_a$<br>[mm] | $n$<br>[o/min] | $V_w$<br>[mm/min] | Радијус врха<br>алата [mm] |
|-----------|----------------|---------------|----------------|-------------------|----------------------------|
| Јошаница  | 15             | 161,44        | 1775           | 3550              | R0,2                       |
|           |                | 160,6         | 1784           | 2854,4            | R0,15                      |
|           |                | 164,55        | 1741           | 2785,6            | R0,06                      |
|           | 25             | 161,44        | 2957           | 5000              | R0,2                       |
|           |                | 160,6         | 2973           | 4756,8            | R0,15                      |
|           |                | 164,55        | 2957           | 4643,2            | R0,06                      |
| Буковик   | 15             | 161,44        | 1775           | 3550              | R0,2                       |
|           |                | 160,6         | 1784           | 2854,4            | R0,15                      |
|           |                | 164,55        | 1741           | 2785,6            | R0,06                      |
|           | 25             | 161,44        | 2957           | 5000              | R0,2                       |
|           |                | 160,6         | 2973           | 4756,8            | R0,15                      |
|           |                | 164,55        | 2902           | 4643,2            | R0,06                      |
| Плави Ток | 15             | 161,44        | 1775           | 3550              | R0,2                       |
|           |                | 160,6         | 1784           | 2854,4            | R0,15                      |
|           |                | 164,55        | 1741           | 2785,6            | R0,06                      |
|           | 25             | 161,44        | 2957           | 5000              | R0,2                       |
|           |                | 160,6         | 2973           | 4756,8            | R0,15                      |
|           |                | 164,55        | 2902           | 4643,2            | R0,06                      |

---

## УТИСКИВАЊЕ ПРИ СТАТИЧКОМ ДЕЈСТВУ СИЛЕ

### 5.1 Одређивање критичне дубине продирања утискивача, методом утискивања утискивача при статичком дејству силе

#### 5.1.1 Утискивања утискивача при статичком дејству силе на мермеру *Плави ток*

Резултати експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе на мермеру *Плави ток* који су у функцији од вредности силе утискивања ( $F_n$ ) и времена мировања ( $T$ ), приказани су у табелама 5.1 и 5.2. У њима су детаљно представљене вредности дубина продирања ( $a$ ) добијене током сваког утискивања, а мерењем вредности дијагонала ( $d_1$  и  $d_2$ ). Такође, у табелама су приказане и вредности тврдоће сваког зрна на којем је вршен процес утискивања.

На сликама 5.1 и 5.2, у виду графика, приказане су вредности тврдоће материјала *Плави ток* у функцији од дубине продирања утискивача за случајеве времена мировања  $T = 0$  и  $T = 15$  секунди. На поменутиим графицима, може се уочити да се за обе вредности мировања вредности тврдоће подједнако смањују са порастом дубине продирања утискивача. Смањење тврдоће овог мермера

последица је неконтролисаног раста прслина унутар њега од тренутка преласка вредности дубине продирања преко критичне вредности. Микропрслине које настају око места утискивања доводе до повећања дубине продирања утискивача. Сличне појаве јављају се и код осталих материјалима, крних по својој природи, као што су разне врсте керамике [107–109] и стакла [110].

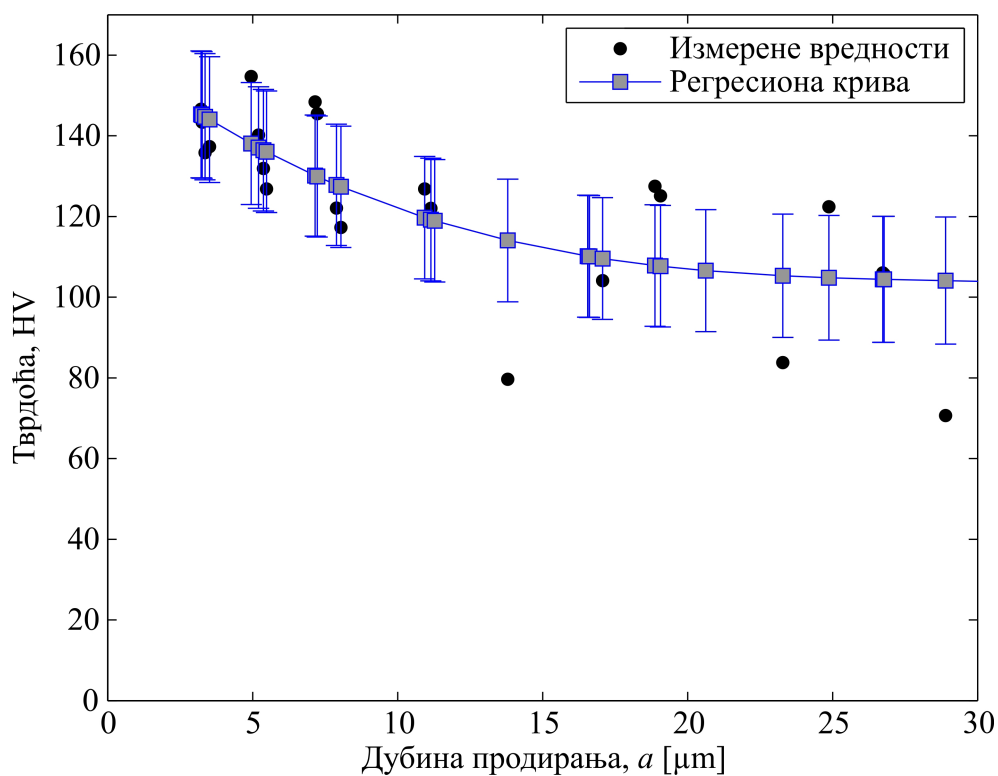
**Табела 5.1:** Резултати експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе у мермеру Плави ток при  $T = 0$  s.

| Материјал | $T$ [s] | $F_n$ [N] | Мерење |  |                       |  |  |                       |  |                       |
|-----------|---------|-----------|--------|--|-----------------------|--|--|-----------------------|--|-----------------------|
|           |         |           | Бр. 1  |  |                       | Бр. 2  |  |                       |  |                       |
|           |         |           | HV     | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] | HV   | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] |  |                       |
| Плави ток | 0       | 0,098     | 137,3  | 12,25  | 3,51                  | 143,4  | 11,38  | 3,25                  |  |                       |
|           |         |           |        | 12,32  |                       |  | 11,38  |                       |  |                       |
|           |         | 0,245     | 131,9  | 17,50  | 5,37                  | 140,2  | 18,00  | 5,20                  |  |                       |
|           |         |           |        | 20,07  |                       |  | 18,38  |                       |  |                       |
|           |         | 0,490     | 122,1  | 27,19  | 7,88                  | 148,4  | 23,63  | 7,15                  |  |                       |
|           |         |           |        | 28,00  |                       |  | 26,44  |                       |  |                       |
|           |         | 0,981     | 122,0  | 39,25  | 11,14                 | 126,8  | 37,13  | 10,93                 |  |                       |
|           |         |           |        | 38,75  |                       |  | 39,38  |                       |  |                       |
|           |         | 1,962     | 109,8  | 58,38  | 16,61                 | 104,1  | 58,07  | 17,06                 |  |                       |
|           |         |           |        | 57,88  |                       |  | 61,38  |                       |  |                       |
|           |         | 2,942     | 83,76  | 77,88  | 23,29                 | 127,5  | 61,88  | 18,87                 |  |                       |
|           |         |           |        | 85,13  |                       |  | 70,25  |                       |  |                       |
|           |         | 4,904     | 122,4  | 85,25  | 24,87                 | 105,7  | 90,57  | 26,78                 |  |                       |
|           |         |           |        | 88,88  |                       |  | 96,88  |                       |  |                       |
|           |         | 9,807     | 101,2  | 126,50   | 37,94                 | 125,8  | 116,75   | 34,70                 |  |                       |
|           |         |           |        | 139,07   |                       |  | 126,19   |                       |  |                       |
|           |         |           |        |  | Мерење                |  |  |                       |  |                       |
|           |         |           |        |  | Бр. 1                 |  |  | Бр. 2                 |  |                       |
|           |         |           |        |  | HV                    | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ]                              | HV                    | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] |
|           |         |           |        | 0,098  | 146,6                 | 11,19  | 3,22   | 135,8                 | 11,57  | 3,35                  |
|           |         | 11,32     | 11,88  |  |                       |  |  |                       |  |                       |
|           |         | 0,245     | 126,8  | 19,69  | 5,47                  | 154,7  | 16,94  | 4,95                  |  |                       |
|           |         |           |        | 18,63  |                       |  | 17,69  |                       |  |                       |
|           |         | 0,490     | 145,5  | 24,63  | 7,22                  | 117,3  | 25,69  | 8,04                  |  |                       |
|           |         |           |        | 25,94  |                       |  | 30,57  |                       |  |                       |
|           |         | 0,981     | 79,66  | 45,88  | 13,79                 | 119,3  | 41,19  | 11,28                 |  |                       |
|           |         |           |        | 50,69  |                       |  | 37,75  |                       |  |                       |
|           |         | 1,962     | 110,5  | 56,13  | 16,55                 | 109,8  | 60,32  | 16,62                 |  |                       |
|           |         |           |        | 59,75  |                       |  | 56,00  |                       |  |                       |
|           |         | 2,942     | 125,1  | 65,44  | 19,06                 | 106,8  | 72,82  | 20,63                 |  |                       |
|           |         |           |        | 68,00  |                       |  | 71,57  |                       |  |                       |
|           |         | 4,904     | 90,67  | 102,32   | 28,90                 | 106,0  | 95,57  | 26,73                 |  |                       |
|           |         |           |        | 100,00   |                       |  | 91,57  |                       |  |                       |
|           |         | 9,807     | 85,23  | 139,32   | 39,81                 | 110,2  | 133,32   | 37,07                 |  |                       |
|           |         |           |        | 139,38   |                       |  | 126,19   |                       |  |                       |

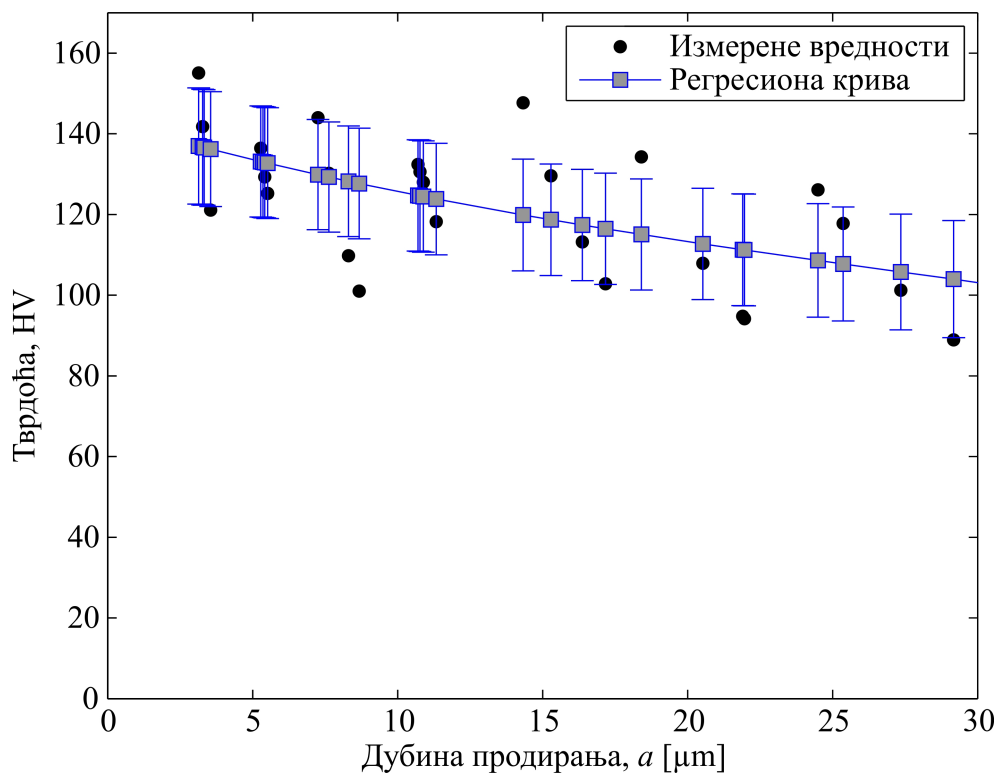


**Табела 5.2:** Резултати експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе у мермеру Плави ток при  $T = 15$  s.

| Материјал | $T$ [s] | $F_n$ [N] | Мерење |  |                       |  |  |                       |  |                       |
|-----------|---------|-----------|--------|--|-----------------------|--|--|-----------------------|--|-----------------------|
|           |         |           | Бр. 1  |  |                       | Бр. 2  |  |                       |  |                       |
|           |         |           | HV     | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] | HV   | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] |  |                       |
| Плави Ток | 15      | 0,098     | 141,8  | 11,25  | 3,27                  | 137,3  | 11,0   | 3,32                  |  |                       |
|           |         |           |        | 11,63  |                       |  | 12,25  |                       |  |                       |
|           |         | 0,245     | 136,4  | 16,75  | 5,28                  | 132,8  | 18,57  | 5,35                  |  |                       |
|           |         |           |        | 20,19  |                       |  | 18,88  |                       |  |                       |
|           |         | 0,490     | 109,8  | 30,25  | 8,30                  | 144,0  | 24,0   | 7,25                  |  |                       |
|           |         |           |        | 27,88  |                       |  | 26,75  |                       |  |                       |
|           |         | 0,981     | 132,4  | 36,25  | 10,70                 | 128,0  | 35,75  | 10,88                 |  |                       |
|           |         |           |        | 38,63  |                       |  | 40,44  |                       |  |                       |
|           |         | 1,962     | 102,8  | 60,75  | 17,17                 | 113,2  | 56,32  | 16,37                 |  |                       |
|           |         |           |        | 59,44  |                       |  | 58,25  |                       |  |                       |
|           |         | 2,942     | 134,3  | 64,0   | 18,40                 | 94,14  | 79,57  | 21,96                 |  |                       |
|           |         |           |        | 64,82  |                       |  | 74,19  |                       |  |                       |
|           |         | 4,904     | 101,2  | 95,75  | 27,35                 | 117,8  | 87,69  | 25,36                 |  |                       |
|           |         |           |        | 95,75  |                       |  | 89,88  |                       |  |                       |
|           |         | 9,807     | 84,31  | 147,5  | 42,37                 | 99,8   | 141,88   | 38,97                 |  |                       |
|           |         |           |        | 149,13   |                       |  | 130,94   |                       |  |                       |
|           |         |           |        |  | Мерење                |  |  |                       |  |                       |
|           |         |           |        |  | Бр. 3                 |  |  | Бр. 4                 |  |                       |
|           |         |           |        |  | HV                    | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ]                              | HV                    | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] |
|           |         |           |        | 0,098  | 155,1                 | 10,5   | 3,13   | 121,1                 | 13,25  | 3,55                  |
|           |         | 11,44     | 11,57  |  |                       |  |  |                       |  |                       |
|           |         | 0,245     | 129,3  | 19,07  | 5,41                  | 125,2  | 19,82  | 5,51                  |  |                       |
|           |         |           |        | 18,82  |                       |  | 18,75  |                       |  |                       |
|           |         | 0,490     | 130,2  | 26,0   | 7,63                  | 101,0  | 28,88  | 8,67                  |  |                       |
|           |         |           |        | 27,38  |                       |  | 31,82  |                       |  |                       |
|           |         | 0,981     | 130,6  | 35,32  | 10,77                 | 118,2  | 39,5   | 11,33                 |  |                       |
|           |         |           |        | 40,07  |                       |  | 39,82  |                       |  |                       |
|           |         | 1,962     | 147,7  | 48,57  | 14,32                 | 129,6  | 52,94  | 15,29                 |  |                       |
|           |         |           |        | 51,69  |                       |  | 54,07  |                       |  |                       |
|           |         | 2,942     | 94,75  | 68,63  | 21,90                 | 107,9  | 71,57  | 20,53                 |  |                       |
|           |         |           |        | 84,69  |                       |  | 72,13  |                       |  |                       |
|           |         | 4,904     | 126,1  | 82,25  | 24,50                 | 88,9   | 98,94  | 29,18                 |  |                       |
|           |         |           |        | 89,25  |                       |  | 105,32   |                       |  |                       |
|           |         | 9,807     | 89,04  | 135,0  | 41,23                 | 104,9  | 131,44   | 37,56                 |  |                       |
|           |         |           |        | 153,63   |                       |  | 131,5  |                       |  |                       |



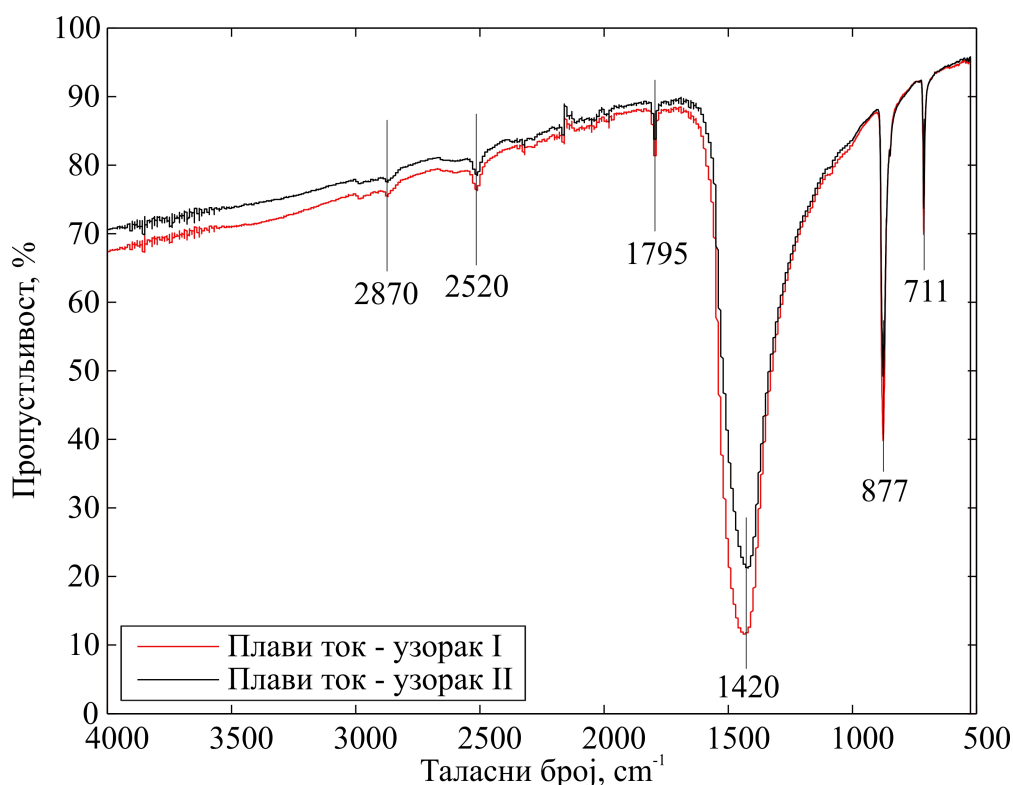
Слика 5.1: Вредности тврдоће мермера Плави ток у функцији дубине продирања, добијени утискивањем утискивача при  $T = 0$  s.



Слика 5.2: Вредности тврдоће мермера Плави ток у функцији дубине продирања, добијени утискивањем утискивача при  $T = 15$  s.

Повећање времена мировања са 0 на 15 секунди није довело до знатнијих одступања у тврдоћи испитиваног материјала. Ово се може објаснити да прслине унутар материјала које у највећој мери утичу на тврдоћу истог, односно на дубину продирања утискивача, настају током самог процеса утискивања. Након растерећења метеријала, ове прслине могу наставити свој раст услед заосталих напона, али оне неће утицати на повећање отиска које је оставио утискивач.

Мермер *Плави ток*, као што је наведено раније у тексту, спада у материјале са хетерогеном структуром. Број минерала који улазе у састав овог мермера одређен је уз помоћ ИР спектроскопије (Infrared spectroscopy/IR spectroscopy), слика 5.3. Као резултат ове методе добијен је број и тип међумолекулских веза унутар материјала. Ради потврде резултата, ИР спектроскопија спроведена је на два различита узорка. Тврдоћа унутар мермера приближно је равномерна упркос чињеници да је састављен од већег броја различитих минерала. Одступање тврдоће између ових минерала унутар мермера *Плави ток* креће се у интервалу до 15 %.



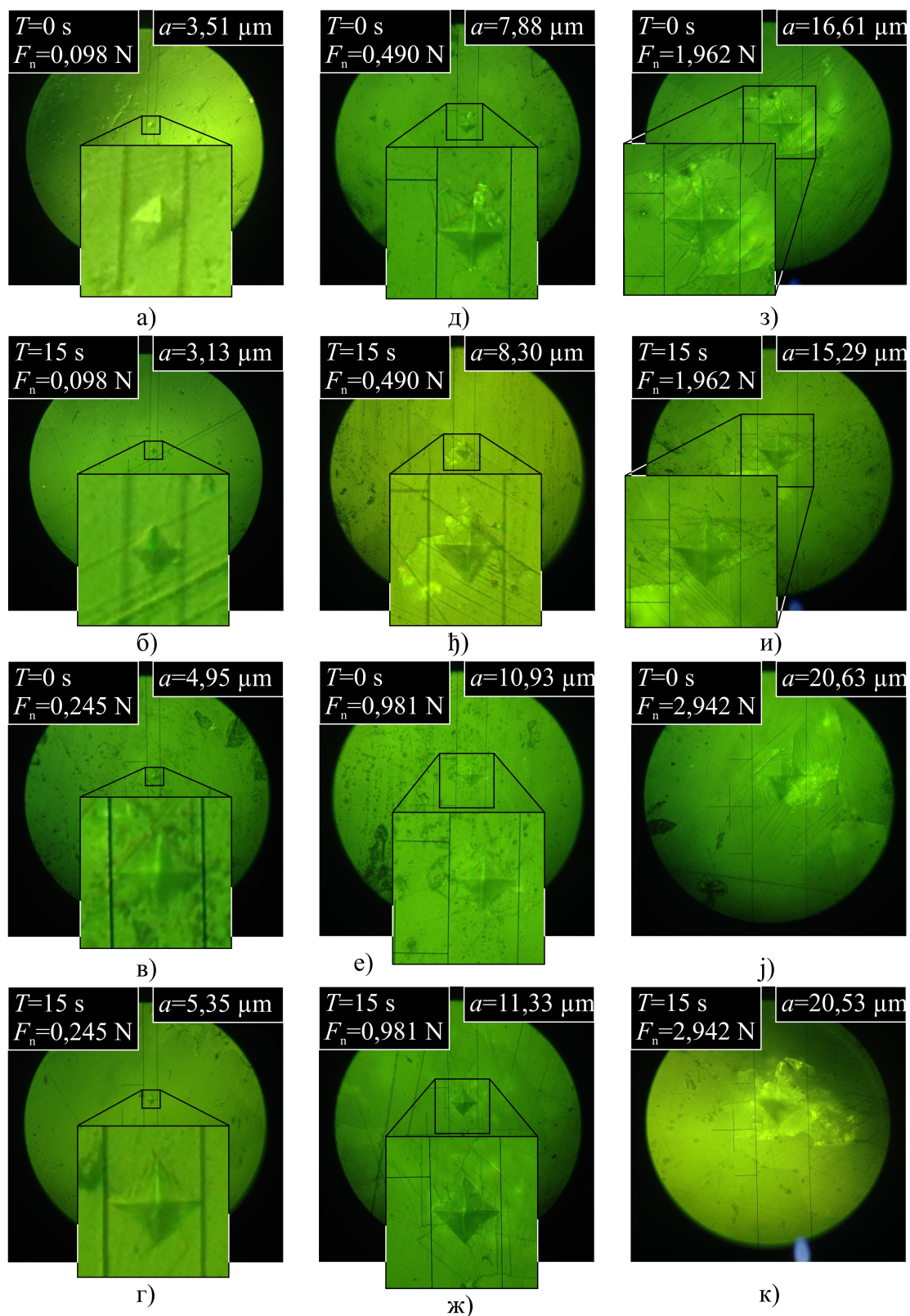
Слика 5.3: Састав мермера *Плави ток*, добијен на основу ИР спектроскопије два узорка материјала.

Због приближно уравнотежене вредности тврдоће минерала у склопу мермера *Плави ток*, очекује се да ће утискивањем утискивача при статичком дејству силе свако зрно имати сличан одзив. Другим речима, прстирање прслина кроз зрно, као и дубина продирања утискивача биће слична између зрна. На сликама 5.4 и 5.5 приказани су неки од отисака добијени методом утискивања при статичком дејству силе Vickers утискивачем на више различитих зрна претходно припремљене површине материјала. Различите вредности силе утискивања, довеле су до формирање отиска у испитиваном мермеру према моделу представљеним кроз три фазе, објашњене у поглављу три.

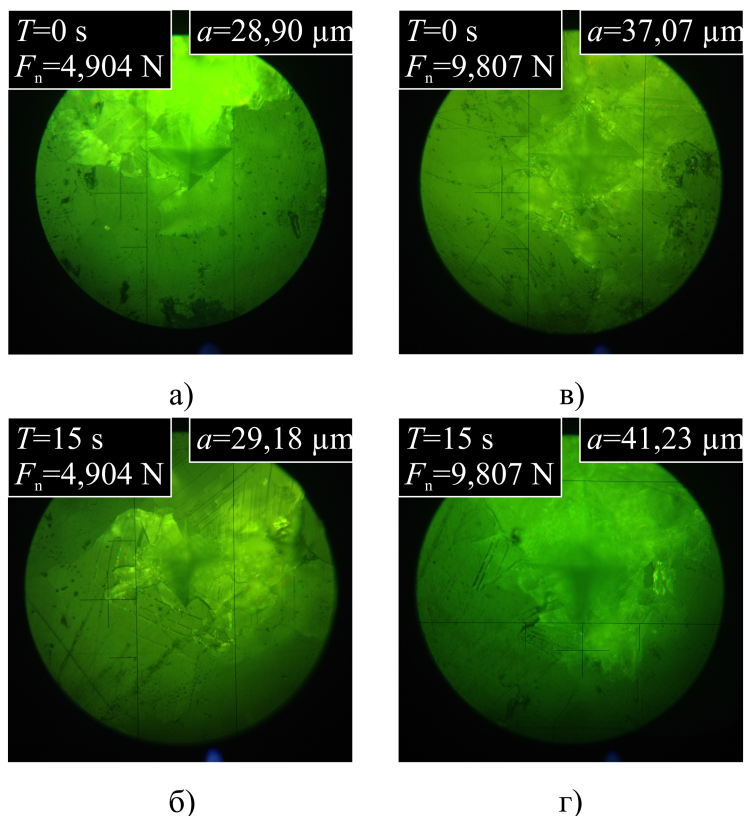
На сликама 5.4а-г јасно се уочавају формирани отисци настали током фазе 1, приликом чијег настанка није дошло до појаве прслина унутар материјала. У овој фази, материјал је чисто пластично деформисан, односно дубина продирања није прешла своју критичну вредност која раздваја режим пластичног деформисања од режима кртог лома. Вредност максималне дубине продирања остварене у овој фази, без појаве прслина, износи  $a = 5,73 \mu\text{m}$ . Међутим, у случају када вредност интензитета силе утискивања износи  $F_n = 0,245 \text{ N}$ , док вредност дубине продирања утискивача преко  $a = 5,74 \mu\text{m}$ , започиње фаза 2. Током ове фазе, као што је већ наведено, формирање отисака, праћено је настанком прслина (медијалних и радијалних) у зони утискивања. Опсег дубина отисака у испитиваном материјалу, а који се формирају у фази 2, креће се све до  $a = 11,33 \mu\text{m}$ . Неки од отисака формираних у фази 2, приказани су на сликама 5.4д-ж. Прекорачењем овог опсега, наступа фаза 3, у којој поред медијалних и радијалних прслина почињу да се јављају и латералне. Током утискивања утискивача при статичком дејству силе, присуство латералних прслина доводи, са једне стране, до одстрањивања делова материјала, док са друге, до делимичног одвајања (издизања) једног дела материјала, као што је представљено на сликама 5.4з-к и 5.5.

Овим експериментом се показало да се за мермер *Плави ток*, који има велику тврдоћу, а по својој природи спада у крте материјале, може очекивати микро

обрада у режиму пластичног деформисања.



Слика 5.4: Отисци формирани на мермеру Плави ток утискивањем при статичком дејству силе Vickers утискивачем са силом утискивања  $F_n = 0,098 \div 2,962 \text{ N}$ .



Слика 5.5: Отисци формирани на мермеру Плави ток утискивањем при статичком дејству силе Vickers утискивачем са силом утискивања  $F_n = 4,904 \div 9,807 \text{ N}$ .

### 5.1.2 Статичко утискивање на граниту Јошаница

Резултати експеримената утискивања утискивача при статичком дејству силе спроведених на граниту Јошаница, приказани су у табелама 5.3 и 5.4. У овим табелама дате су вредности тврдоће и дубине продирања утискивача у функцији од вредности интензитета силе утискивања и времена мировања. Анализом измерених вредности уочава се постојање великог варирања у вредностима тврдоће добијене за овај материјал. На графицима који су приказани на сликама 5.6 и 5.7, јасно се могу разграничити три зоне у које се могу сврстати измерене вредности тврдоћа за случај када вредности времена мировања износе  $T = 0$  и  $T = 15$  секунди. Изразито варирања вредности тврдоће настаје као последица хетерогености самог гранита над којим је вршено испитивање. Како је свако мерење спроведено на различитом зрну на испитиваној површини, различита физичко/механичка својства зрна, директно се одражавају на процес форми-

рања отиска (дубину продирања).

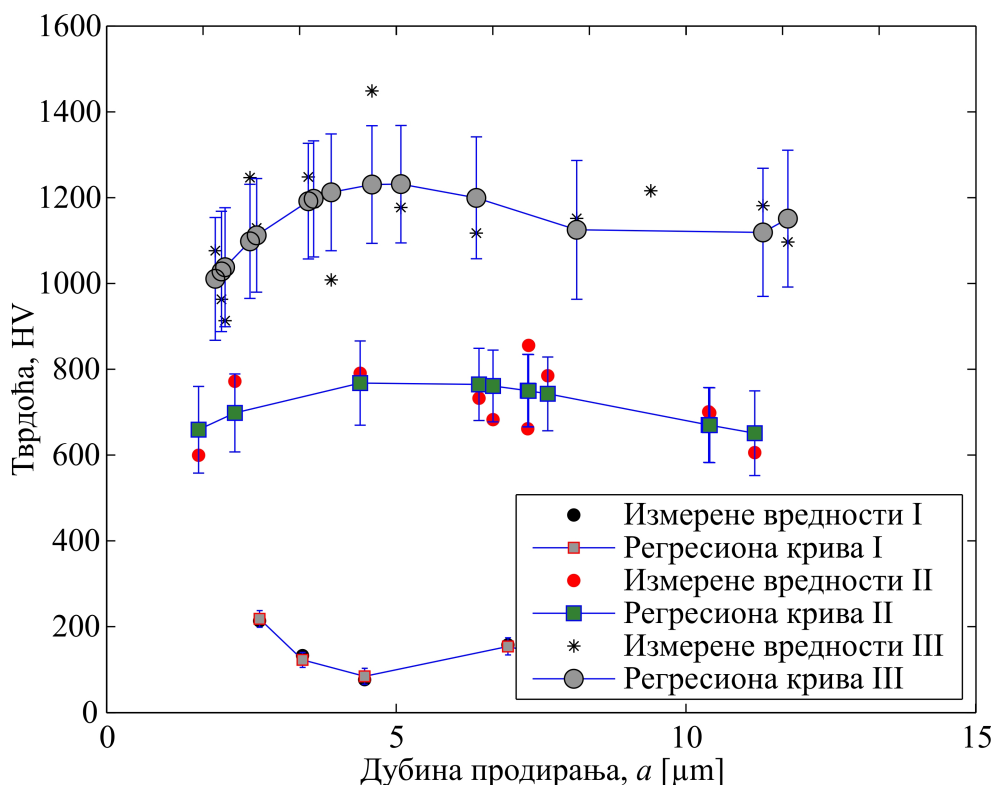
**Табела 5.3:** Резултати експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе у граниту Јошаница при  $T = 0$  s.

| Материјал | $T$ [s] | $F_n$ [N] | Мерење |  |                       |  |  |                       |  |                       |
|-----------|---------|-----------|--------|--|-----------------------|--|--|-----------------------|--|-----------------------|
|           |         |           | Бр. 1  |  |                       | Бр. 2  |  |                       |  |                       |
|           |         |           | HV     | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] | HV   | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] |  |                       |
| Јошаница  | 0       | 0,098     | 132,9  | 13,94  | 3,38                  | 76,57  | 20,25  | 4,46                  |  |                       |
|           |         |           |        | 9,75   |                       |  | 10,94  |                       |  |                       |
|           |         | 0,245     | 913,2  | 8,88   | 2,05                  | 963,2  | 6,94   | 1,98                  |  |                       |
|           |         |           |        | 5,44   |                       |  | 6,94   |                       |  |                       |
|           |         | 0,490     | 121,0  | 27,69  | 7,91                  | 1246,4   | 8,88   | 2,47                  |  |                       |
|           |         |           |        | 27,69  |                       |  | 8,44   |                       |  |                       |
|           |         | 0,981     | 1186,8 | 12,63  | 3,57                  | 1008,2   | 14,32  | 3,88                  |  |                       |
|           |         |           |        | 12,38  |                       |  | 12,82  |                       |  |                       |
|           |         | 1,962     | 1177,2 | 17,38  | 5,08                  | 682,4  | 22,88  | 6,67                  |  |                       |
|           |         |           |        | 18,19  |                       |  | 23,82  |                       |  |                       |
|           |         | 2,942     | 661,5  | 25,44  | 7,27                  | 1117,4   | 22,75  | 6,38                  |  |                       |
|           |         |           |        | 25,44  |                       |  | 21,94  |                       |  |                       |
|           |         | 4,904     | 700,8  | 34,63  | 10,39                 | 605,7  | 39,0   | 11,19                 |  |                       |
|           |         |           |        | 38,13  |                       |  | 39,32  |                       |  |                       |
|           |         | 9,807     | 425,7  | 65,75  | 18,87                 | 1096,5   | 43,5   | 11,76                 |  |                       |
|           |         |           |        | 66,32  |                       |  | 38,82  |                       |  |                       |
|           |         |           |        |  | Мерење                |  |  |                       |  |                       |
|           |         |           |        |  | Бр. 3                 |  |  | Бр. 4                 |  |                       |
|           |         |           |        |  | HV                    | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ]                              | HV                    | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] |
|           |         | 0,098     | 216,8  | 9,5  | 2,64                  | 599,4  | 6,5  | 1,59                  |  |                       |
| 9,0       | 4,63    |           |        |  |                       |  |  |                       |  |                       |
| 0,245     | 1076,5  | 6,07      | 1,88   | 771,9  | 7,57                  | 2,22   |  |                       |  |                       |
|           |         | 7,07      |        |  | 7,94                  |  |  |                       |  |                       |
| 0,490     | 157,7   | 24,57     | 6,93   | 1129,0   | 9,13                  | 2,59   |  |                       |  |                       |
|           |         | 23,94     |        |  | 9,0                   |  |  |                       |  |                       |
| 0,981     | 1248,4  | 12,07     | 3,48   | 790,9  | 15,19                 | 4,38   |  |                       |  |                       |
|           |         | 12,32     |        |  | 15,44                 |  |  |                       |  |                       |
| 1,962     | 1448,7  | 15,32     | 4,58   | 732,6  | 22,07                 | 6,43   |  |                       |  |                       |
|           |         | 16,75     |        |  | 22,94                 |  |  |                       |  |                       |
| 2,942     | 784,8   | 26,82     | 7,62   | 855,5  | 23,13                 | 7,29   |  |                       |  |                       |
|           |         | 26,5      |        |  | 27,88                 |  |  |                       |  |                       |
| 4,904     | 698,4   | 36,07     | 10,41  | 1151,6   | 28,94                 | 8,12   |  |                       |  |                       |
|           |         | 36,82     |        |  | 27,88                 |  |  |                       |  |                       |
| 9,807     | 1181,1  | 40,82     | 11,33  | 99,8   | 135,13                | 38,94  |  |                       |  |                       |
|           |         | 38,5      |        |  | 137,5                 |  |  |                       |  |                       |

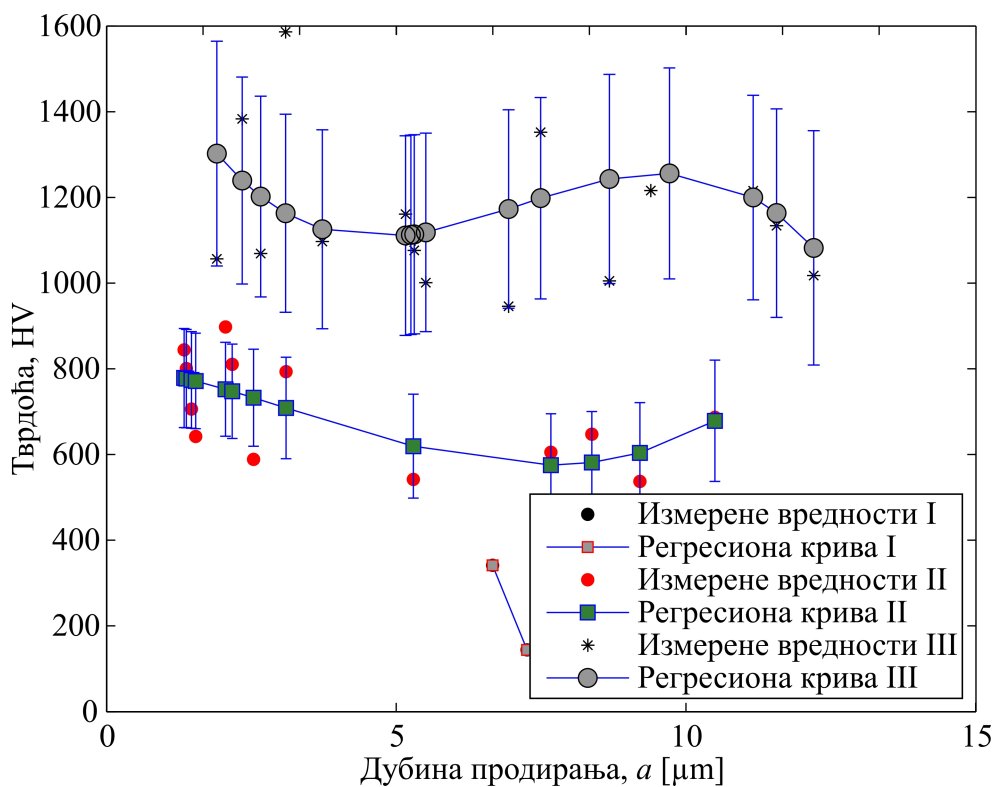
**Табела 5.4:** Резултати експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе у граниту Јошаница при  $T = 15$  s.

| Материјал | $T$ [s] | $F_n$ [N]     | Мерење |  |                       |  |  |                       |  |                       |
|-----------|---------|---------------|--------|--|-----------------------|--|--|-----------------------|--|-----------------------|
|           |         |               | Бр. 1  |  |                       | Бр. 2  |  |                       |  |                       |
|           |         |               | HV     | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] | HV   | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] |  |                       |
| Јошаница  | 15      | 0,098         | 844,0  | 4,13   | 1,34                  | 706,0  | 5,0  | 1,46                  |  |                       |
|           |         |               |        | 5,25   |                       |  | 5,25   |                       |  |                       |
|           |         | 0,245         | 1056,3 | 7,0  | 1,90                  | 897,4  | 6,88   | 2,05                  |  |                       |
|           |         |               |        | 6,32   |                       |  | 7,5  |                       |  |                       |
|           |         | 0,490         | 1069,2 | 9,13   | 2,66                  | 1383,1   | 8,63   | 2,34                  |  |                       |
|           |         |               |        | 9,5  |                       |  | 7,75   |                       |  |                       |
|           |         | 0,981         | 1097,2 | 13,44  | 3,72                  | 541,9  | 16,69  | 5,30                  |  |                       |
|           |         |               |        | 12,63  |                       |  | 20,38  |                       |  |                       |
|           |         | 1,962         | 1000,9 | 19,25  | 5,51                  | 1098,5   | 18,69  | 5,25                  |  |                       |
|           |         |               |        | 19,32  |                       |  | 18,07  |                       |  |                       |
|           |         | 2,942         | 605,5  | 26,82  | 7,67                  | 537,0  | 32,44  | 9,20                  |  |                       |
|           |         |               |        | 26,88  |                       |  | 32,0   |                       |  |                       |
|           |         | 4,904         | 686,6  | 38,63  | 10,50                 | 1352,0   | 26,07  | 7,49                  |  |                       |
|           |         |               |        | 34,88  |                       |  | 26,38  |                       |  |                       |
|           |         | 9,807         | 1017,7 | 40,57  | 12,21                 | 1215,3   | 38,69  | 11,16                 |  |                       |
|           |         |               |        | 44,88  |                       |  | 39,44  |                       |  |                       |
|           |         | <b>Мерење</b> |        |  |                       |  |  |                       |  |                       |
|           |         |               |        |  | <b>Бр. 3</b>          |  |  | <b>Бр. 4</b>          |  |                       |
|           |         |               |        |  | HV                    | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ]                              | HV                    | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] |
|           |         | 0,098         | 800,7  | 4,82   | 1,38                  | 641,9  | 5,63   | 1,54                  |  |                       |
| 4,82      | 5,13    |               |        |  |                       |  |  |                       |  |                       |
| 0,245     | 588,6   | 8,63          | 2,54   | 810,6  | 7,44                  | 2,17   |  |                       |  |                       |
|           |         | 9,13          |        |  | 7,75                  |  |  |                       |  |                       |
| 0,490     | 144,0   | 26,07         | 7,26   | 793,1  | 11,0                  | 3,10   |  |                       |  |                       |
|           |         | 24,75         |        |  | 10,69                 |  |  |                       |  |                       |
| 0,981     | 341,2   | 23,63         | 6,66   | 1586,2   | 10,44                 | 3,09   |  |                       |  |                       |
|           |         | 23,0          |        |  | 11,19                 |  |  |                       |  |                       |
| 1,962     | 1160,7  | 18,38         | 5,16   | 1076,4   | 18,19                 | 5,31   |  |                       |  |                       |
|           |         | 17,75         |        |  | 19,0                  |  |  |                       |  |                       |
| 2,942     | 647,5   | 29,38         | 8,37   | 946,0  | 24,94                 | 6,94   |  |                       |  |                       |
|           |         | 29,25         |        |  | 23,63                 |  |  |                       |  |                       |
| 4,904     | -       | -             | -      | 1004,9   | 29,07                 | 8,68   |  |                       |  |                       |
|           |         | -             |        |  | 31,69                 |  |  |                       |  |                       |
| 9,807     | 1134,1  | 39,88         | 11,56  | 1604,1   | 32,94                 | 9,71   |  |                       |  |                       |
|           |         | 41,07         |        |  | 35,07                 |  |  |                       |  |                       |





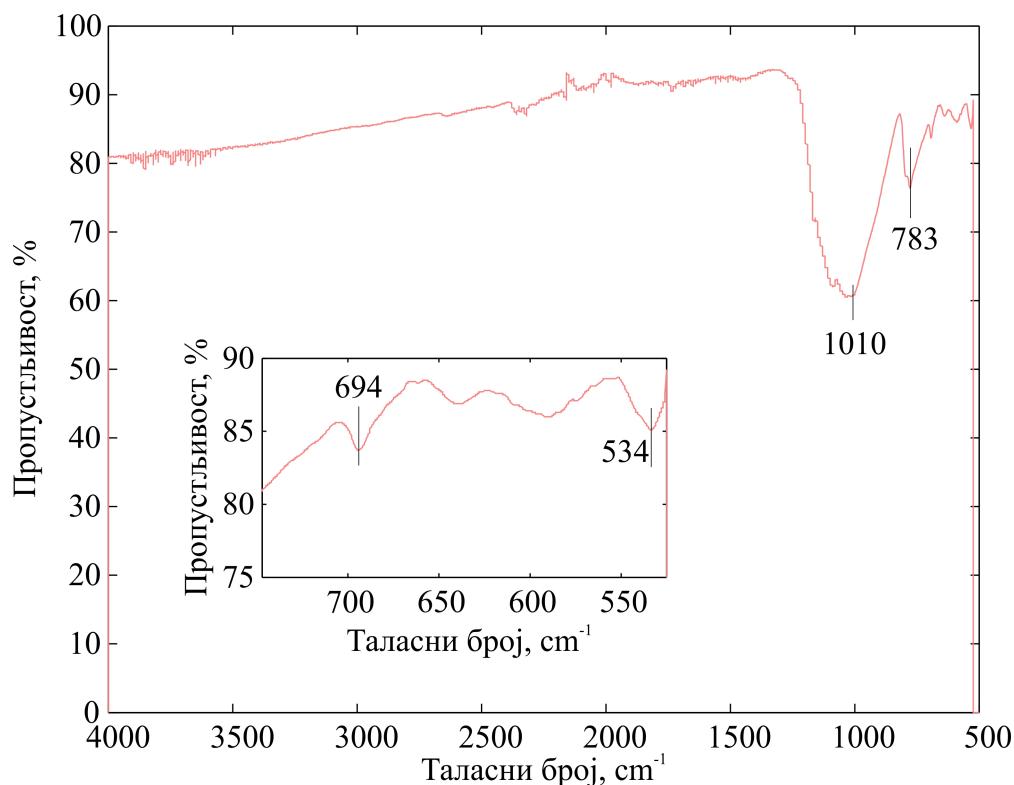
Слика 5.6: Вредности тврдоће гранита Јошаница у функцији од дубине продирања, добијени утискивањем утискивача при  $T = 0$  s.



Слика 5.7: Вредности тврдоће гранита Јошаница у функцији од дубине продирања, добијени утискивањем утискивача при  $T = 15$  s.

Као и код испитивања састава мермера *Плави ток*, тако се и код испитивања састава гранита *Јошаница* приступило ИР спектроскопијом. Овом методом установљено је да је гранит *Јошаница* састављен од четири различита једињења/минерала (слика 5.8). Дијаграми на сликама 5.6 и 5.7 говоре да су три од четири једињења унутар овог гранита доминантна, а где сва три имају различите вредности тврдоће.

Варијабилности у тврдоћи између зрна на површини или унутар гранита *Јошаница* могу значајно утицати на вредности критичне дубине продирања алата. Зона распрострањености прелина која окружује место отиска може бити мања или већа у зависности од самог зрна на којем је вршен експеримент. Као што је био случај код мермера *Плави ток*, и код гранита *Јошаница* могуће је формирати отисак на површини материјала у једној од три фазе. С обзиром да је експеримент понављан четири пута (сваки пут на новом зрну), дубине продирања су варирале у зависности од тврдоће сваког зрна. Као граничне вредности дубина продирања које раздвајају ове три фазе, објашњене у поглављу три, узете су најниже вредности при којима се јавља промена, без обзира у којој зони се налази тврдоћа самог зрна.

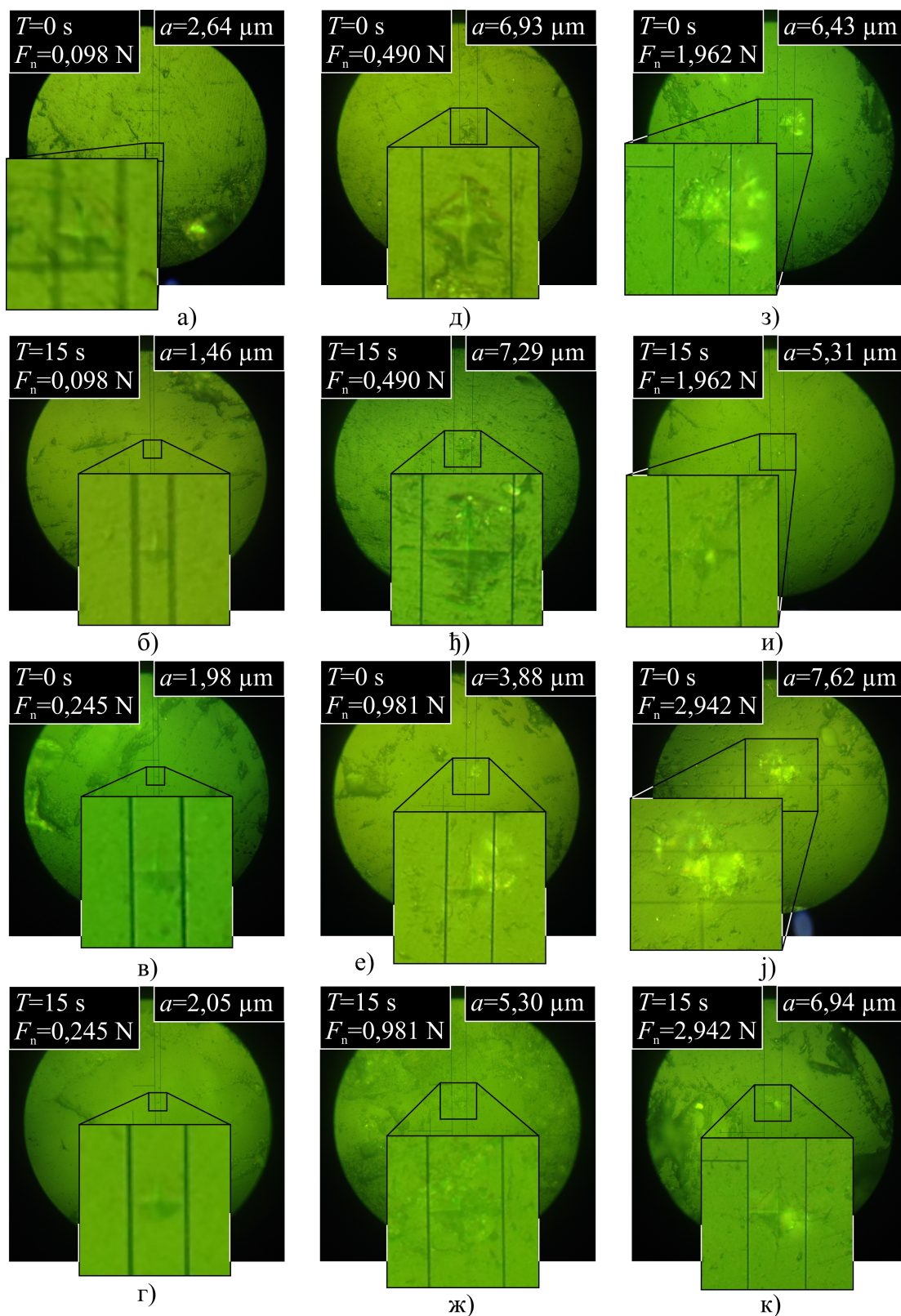


Слика 5.8: Састав гранита Јошаница.

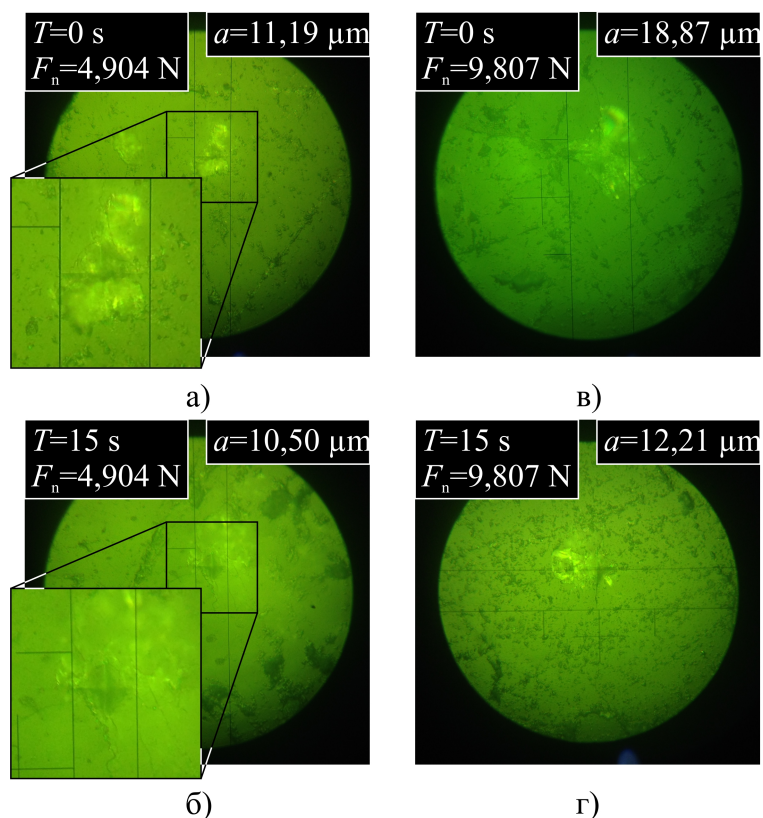
На основу добијених резултата, може се закључити да се област у којој није присутно формирање прелина током утискивања (фаза 1), креће у границама од минималне вредности па до  $a = 3,09 \mu\text{m}$  (слике 5.9а-г). Прекорачењем ове границе, то јест повећањем од  $a = 3,1 \mu\text{m}$ , па све до  $a = 7,26 \mu\text{m}$ , присутна је фаза 2, односно област дубине продирања у којој су, поред пластичних и повратних еластичних деформација, присутне и медијалне/радијалне прелине материјала. Неки од отисака који одговарају фази 2 приказани су на сликама 5.9д-и. Уколико дубина продирања утискивача настави и даље да расте и прекорачи дубину од  $a = 7,27 \mu\text{m}$  (слике 5.9ј, к и 5.10), уочава се неконтролисани раст и латералних прелина, што је основна одлика фазе 3.

Ако се направи компарација гранит *Јошаница* и мермера *Плави ток*, може се уочити да су граничне вредности које раздвајају фазе један, два и три знатно ниже код гранита *Јошаница*, него код мермера *Плави ток*. Област дубине продирања при којој долази до формирања жлеба према фази 1, код гранита *Јошаница* мања је за 46,1 % у односу на мермер *Плави ток*. Такође, макси-

мална дубина у којој се може остварити фаза 2, мања је за 35,9 % код гранита *Јошаница* у поређењу са мермером *Плави ток*. Како тврдоћа наведеног гранита може бити и до 10 пута већа у односу на тврдоћу мермера *Плави ток*, логично је смањење вредности критичне дубине продирања и граничних вредности између фаза.



Слика 5.9: Отисци формирани на граниту Јошаница утискивањем при статичком дејству силе Vickers утискивачем са силом утискивања  $F_n = 0,098 \div 2,962 \text{ N}$ .



**Слика 5.10:** Отисци формирани на граниту Јошаница утискивањем при статичком дејству силе Vickers утискивачем са силом утискивања  $F_n = 4,904 \div 9,807 \text{ N}$ .

### 5.1.3 Статичко утискивање на граниту Буковик

Последњи, трећи материјал на ком је спроведен експеримент утискивања утискивача при статичком дејству силе је гранит *Буковик*. Слично као код утискивања утискивача при статичком дејству силе на претходна два материјала, и код гранита *Буковик* јасно се могу уочити све три фазе формирања отиска методом утискивања утискивача при статичком дејству силе. Вредности дубина продирања утискивача и тврдоће материјала у функцији од вредности интензитета силе утискивања и вредности времена мировања утискивача, приказани су у табелама 5.5 и 5.6.

Као што је био случај са гранитом *Јошаница*, и код гранита *Буковик* јавиле су се зоне тврдоће које одговарају трима доминантним једињењима присутних на површини и унутар самог гранита, слике 5.11 и 5.12.

**Табела 5.5:** Резултати експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе у граниту Буковик при  $T = 0$  s.

| Материјал | $T$ [s] | $F_n$ [N]     | Мерење |  |                       |  |  |                       |  |                       |
|-----------|---------|---------------|--------|--|-----------------------|--|--|-----------------------|--|-----------------------|
|           |         |               | Бр. 1  |  |                       | Бр. 2  |  |                       |  |                       |
|           |         |               | HV     | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] | HV   | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] |  |                       |
| Буковик   | 0       | 0,098         | 941,7  | 4,57   | 1,28                  | 821,9  | 4,82   | 1,36                  |  |                       |
|           |         |               |        | 4,38   |                       |  | 4,69   |                       |  |                       |
|           |         | 0,245         | 810,6  | 8,25   | 2,16                  | 882,0  | 7,57   | 2,12                  |  |                       |
|           |         |               |        | 6,88   |                       |  | 7,0  |                       |  |                       |
|           |         | 0,490         | 724,5  | 11,19  | 3,24                  | 617,9  | 11,19  | 3,50                  |  |                       |
|           |         |               |        | 11,5   |                       |  | 13,32  |                       |  |                       |
|           |         | 0,981         | 222,4  | 27,57  | 8,26                  | 741,7  | 15,63  | 4,52                  |  |                       |
|           |         |               |        | 30,25  |                       |  | 16,0   |                       |  |                       |
|           |         | 1,962         | 956,9  | 20,13  | 5,63                  | 1098,5   | 18,57  | 5,25                  |  |                       |
|           |         |               |        | 19,25  |                       |  | 18,19  |                       |  |                       |
|           |         | 2,942         | 1551,2 | 19,38  | 5,41                  | 98,08  | 74,32  | 21,52                 |  |                       |
|           |         |               |        | 18,5   |                       |  | 76,32  |                       |  |                       |
|           |         | 4,904         | 668,2  | 36,82  | 10,64                 | 414,2  | 44,69  | 13,52                 |  |                       |
|           |         |               |        | 37,69  |                       |  | 49,94  |                       |  |                       |
|           |         | 9,807         | 140,0  | 114,38   | 32,89                 | -  | -  | -                     |  |                       |
|           |         |               |        | 115,88   |                       |  | -  |                       |  |                       |
|           |         | <b>Мерење</b> |        |  |                       |  |  |                       |  |                       |
|           |         |               |        |  | <b>Бр. 3</b>          |  |  | <b>Бр. 4</b>          |  |                       |
|           |         |               |        |  | HV                    | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ]                              | HV                    | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] |
|           |         | 0,098         | 821,9  | 4,44   | 1,36                  | 208,2  | 9,38   | 2,70                  |  |                       |
| 5,07      | 9,5     |               |        |  |                       |  |  |                       |  |                       |
| 0,245     | 1056,3  | 6,5           | 1,89   | 1056,3   | 6,32                  | 1,89   |  |                       |  |                       |
|           |         | 6,75          |        |  | 6,94                  |  |  |                       |  |                       |
| 0,490     | 927,2   | 9,57          | 2,87   | 1283,3   | 8,32                  | 2,43   |  |                       |  |                       |
|           |         | 10,5          |        |  | 8,69                  |  |  |                       |  |                       |
| 0,981     | 718,8   | 14,82         | 4,60   | 859,6  | 14,38                 | 4,21   |  |                       |  |                       |
|           |         | 17,38         |        |  | 15,07                 |  |  |                       |  |                       |
| 1,962     | 766,3   | 21,19         | 6,29   | 882,5  | 21,19                 | 5,87   |  |                       |  |                       |
|           |         | 22,82         |        |  | 19,88                 |  |  |                       |  |                       |
| 2,942     | 742,4   | 25,25         | 7,82   | 1123,7   | 22,25                 | 6,36   |  |                       |  |                       |
|           |         | 29,5          |        |  | 22,25                 |  |  |                       |  |                       |
| 4,904     | 916,2   | 30,0          | 9,09   | 1141,5   | 29,13                 | 8,14   |  |                       |  |                       |
|           |         | 33,63         |        |  | 27,88                 |  |  |                       |  |                       |
| 9,807     | 764,5   | 50,0          | 14,07  | 1247,0   | 39,94                 | 11,02  |  |                       |  |                       |
|           |         | 48,5          |        |  | 37,19                 |  |  |                       |  |                       |

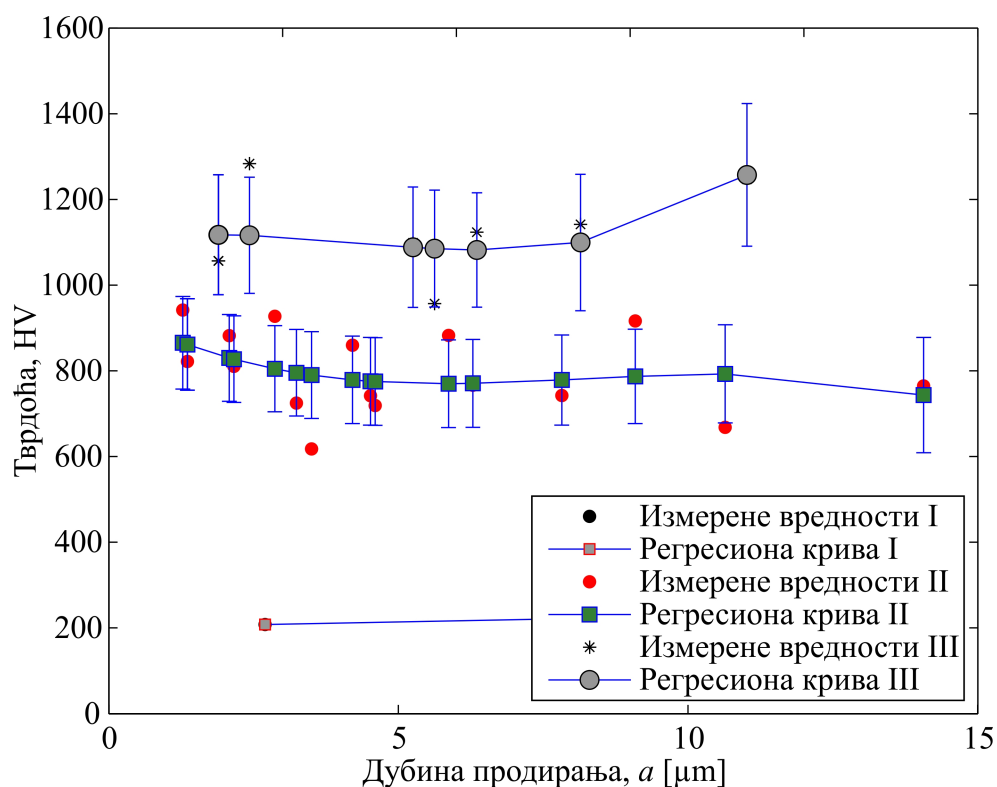
**Табела 5.6:** Резултати експеримента утискивања утискивача при статичком дејству силе у граниту Буковик при  $T = 15$  s.

| Материјал | $T$ [s] | $F_n$ [N]     | Мерење |  |                       |  |  |                       |  |                       |
|-----------|---------|---------------|--------|--|-----------------------|--|--|-----------------------|--|-----------------------|
|           |         |               | Бр. 1  |  |                       | Бр. 2  |  |                       |  |                       |
|           |         |               | HV     | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] | HV   | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] |  |                       |
| Буковик   | 15      | 0,098         | 1057,5 | 4,19   | 1,20                  | 997,1  | 4,44   | 1,23                  |  |                       |
|           |         |               |        | 4,19   |                       |  | 4,19   |                       |  |                       |
|           |         | 0,245         | 605,6  | 8,57   | 2,51                  | 867,0  | 7,82   | 2,10                  |  |                       |
|           |         |               |        | 9,0  |                       |  | 6,88   |                       |  |                       |
|           |         | 0,490         | 821,4  | 10,0   | 3,05                  | 724,5  | 11,82  | 3,24                  |  |                       |
|           |         |               |        | 11,32  |                       |  | 10,88  |                       |  |                       |
|           |         | 0,981         | 724,4  | 16,32  | 4,58                  | 867,0  | 14,69  | 4,18                  |  |                       |
|           |         |               |        | 15,75  |                       |  | 14,57  |                       |  |                       |
|           |         | 1,962         | 836,0  | 20,19  | 6,03                  | 462,7  | 25,38  | 8,10                  |  |                       |
|           |         |               |        | 22,0   |                       |  | 31,32  |                       |  |                       |
|           |         | 2,942         | 1269,0 | 20,07  | 5,99                  | 1365,1   | 19,07  | 5,77                  |  |                       |
|           |         |               |        | 21,88  |                       |  | 21,32  |                       |  |                       |
|           |         | 4,904         | 1454,3 | 25,07  | 7,22                  | 765,1  | 33,94  | 9,95                  |  |                       |
|           |         |               |        | 25,44  |                       |  | 35,69  |                       |  |                       |
|           |         | 9,807         | 543,0  | 60,32  | 16,71                 | 540,7  | 59,44  | 16,74                 |  |                       |
|           |         |               |        | 56,63  |                       |  | 57,75  |                       |  |                       |
|           |         | <b>Мерење</b> |        |  |                       |  |  |                       |  |                       |
|           |         |               |        |  | <b>Бр. 3</b>          |  |  | <b>Бр. 4</b>          |  |                       |
|           |         |               |        |  | HV                    | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ]                              | HV                    | $d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]<br>$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $a$ [ $\mu\text{m}$ ] |
|           |         | 0,098         | 890,8  | 4,38   | 1,31                  | 800,7  | 4,69   | 1,38                  |  |                       |
| 4,82      | 4,94    |               |        |  |                       |  |  |                       |  |                       |
| 0,245     | 867,0   | 7,50          | 2,09   | 1076,5   | 6,44                  | 1,88   |  |                       |  |                       |
|           |         | 7,13          |        |  | 6,69                  |  |  |                       |  |                       |
| 0,490     | 1283,3  | 8,07          | 2,43   | 915,7  | 10,0                  | 2,88   |  |                       |  |                       |
|           |         | 8,94          |        |  | 10,19                 |  |  |                       |  |                       |
| 0,981     | 921,3   | 14,07         | 4,06   | 946,1  | 13,63                 | 4,01   |  |                       |  |                       |
|           |         | 14,32         |        |  | 14,44                 |  |  |                       |  |                       |
| 1,962     | 762,0   | 22,07         | 6,31   | 675,2  | 21,13                 | 6,56   |  |                       |  |                       |
|           |         | 22,07         |        |  | 24,82                 |  |  |                       |  |                       |
| 2,942     | 792,2   | 25,38         | 7,58   | 899,1  | 26,07                 | 7,12   |  |                       |  |                       |
|           |         | 27,69         |        |  | 23,75                 |  |  |                       |  |                       |
| 4,904     | 988,6   | 30,5          | 8,76   | 71,5   | 111,94                | 32,54  |  |                       |  |                       |
|           |         | 30,82         |        |  | 115,88                |  |  |                       |  |                       |
| 9,807     | 119,8   | 117,13        | 35,55  | 997,1  | 38,82                 | 12,32  |  |                       |  |                       |
|           |         | 131,75        |        |  | 47,44                 |  |  |                       |  |                       |

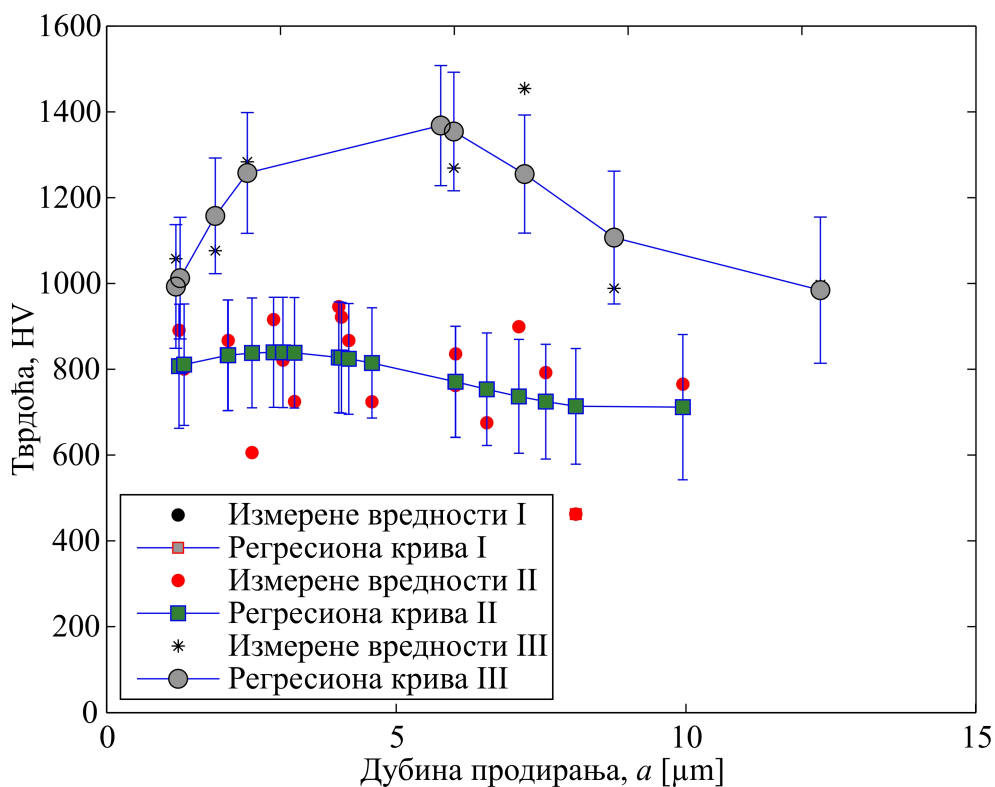
Методом ИР спектроскопије одређено је да се гранит *Буковик* састоји од четири једињења, слично као што је био случај код гранита *Јошаница*. У поређењу са



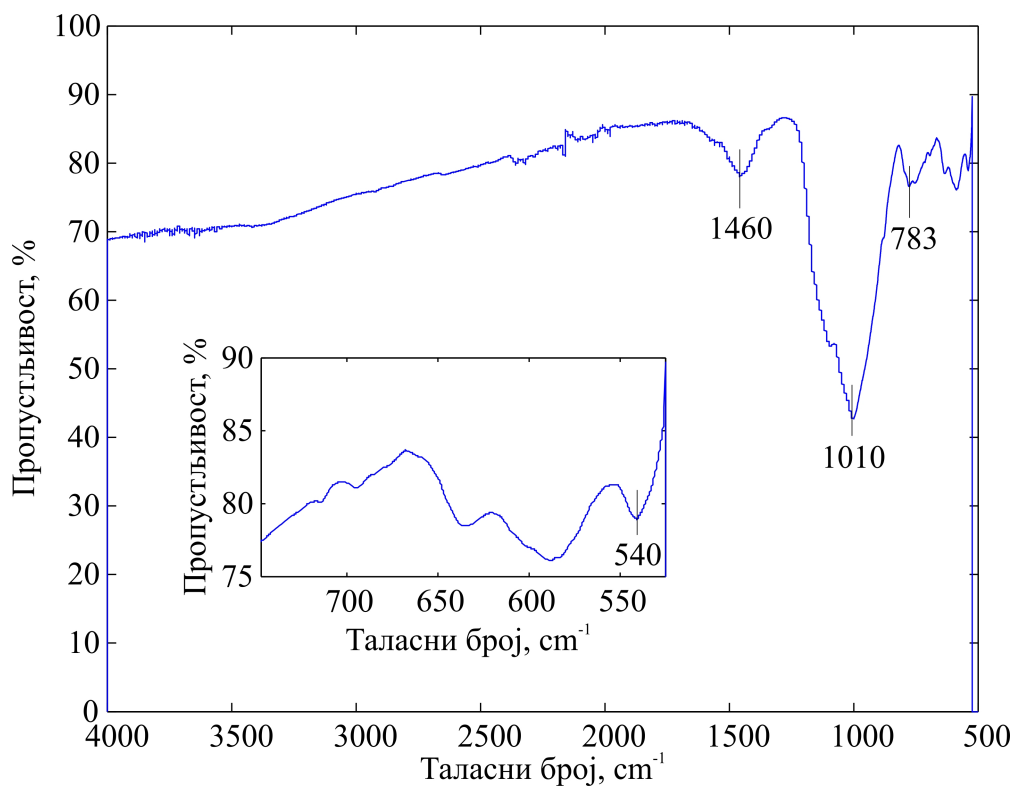
гранитом *Јошаница*, вредности тврдоће најтврђег једињења гранита *Буковик*, мање су за неких 7 %. Друго доминантно једињење око 3,6 % је тврђе код гранита *Буковик*, док је тврдоћа последњег, трећег доминантног једињења знатно већа код гранита *Буковик* у односу на гранит *Јошаница*, и то за неких 45 %. Ове вредности се односе на случај када време мировања износи  $T = 0$  секунди. Приликом повећања времена мировања са 0 на 15 секунди, код прва два једињења, однос тврдоћа се благо мења (на 3,7 % и 8 % респективно), док код последњег једињења ова разлика остаје приближно константна и износи 48 %.



Слика 5.11: Вредности тврдоће гранита *Буковик* у функцији од дубине продирања, добијени утискивањем утискивача при  $T = 0$  s.

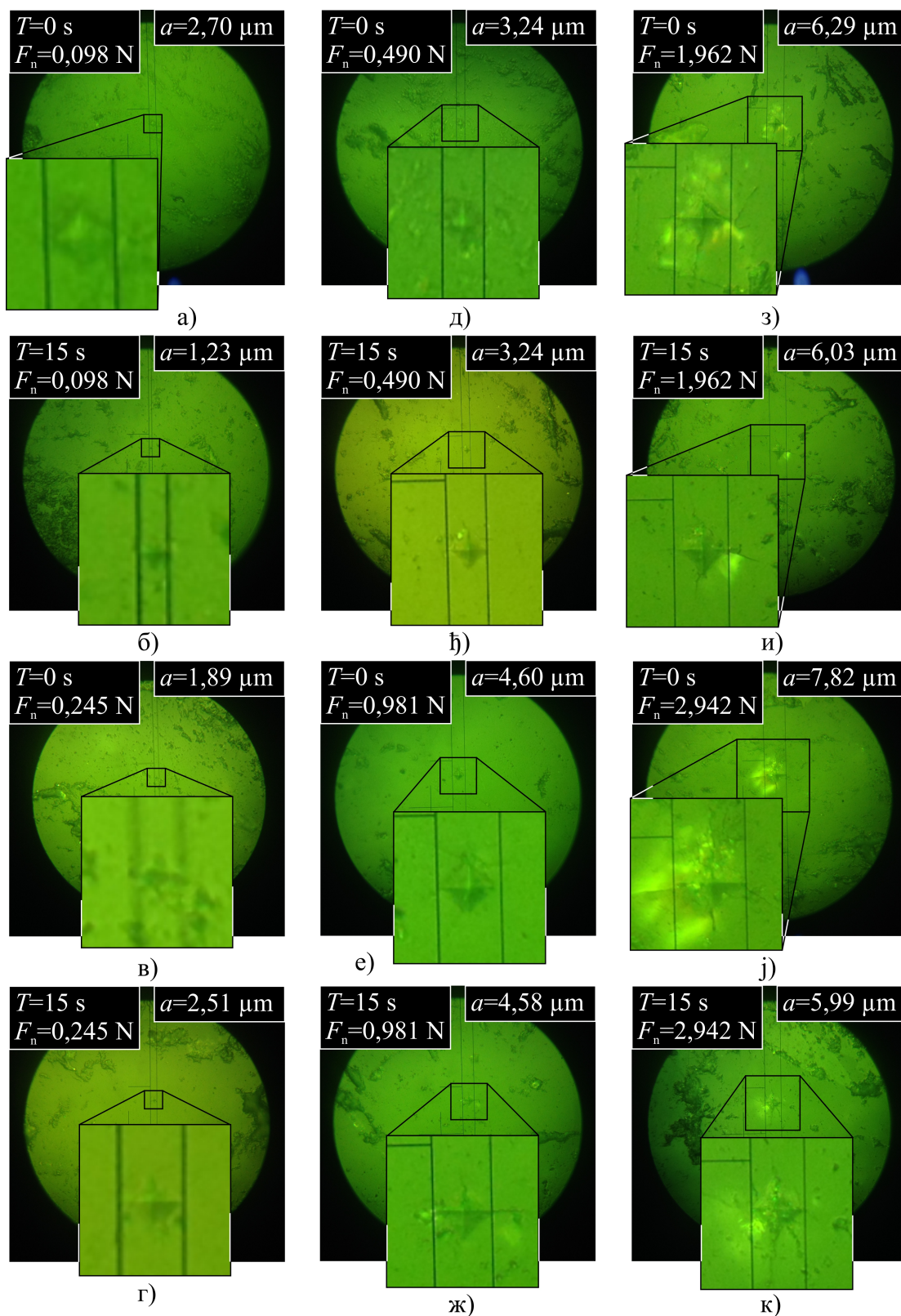


Слика 5.12: Вредности тврдоће гранита Буковик у функцији од дубине продирања, добијени утискивањем утискивача при  $T = 15$  s.

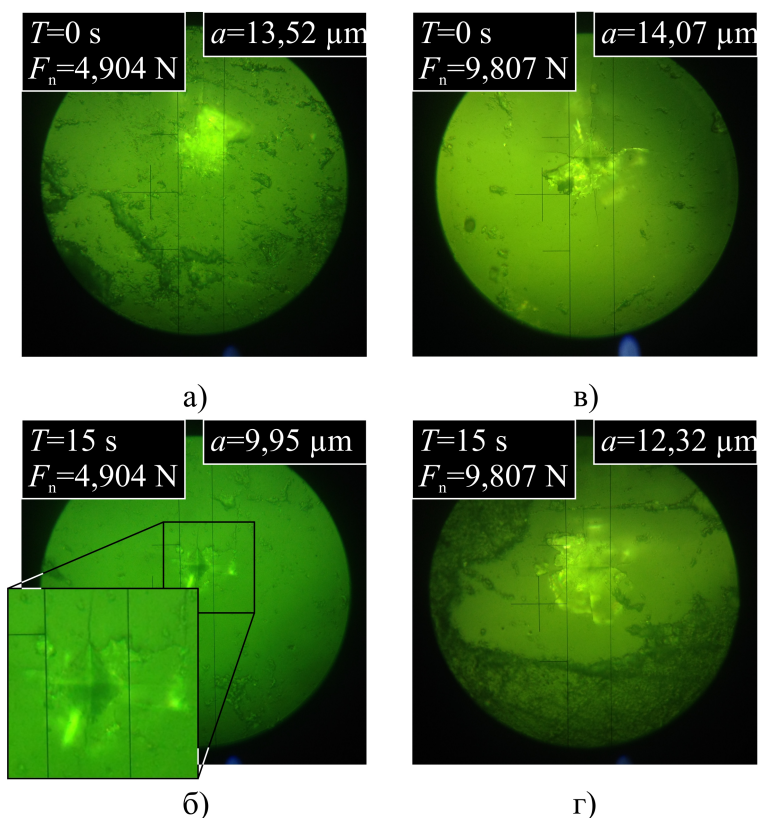


Слика 5.13: Састав гранита Буковик.

Појава режима пластичког деформисања (фаза 1) код гранита *Буковик*, остварива је све док дубина продирања утискивача не пређе вредност  $a = 4,06 \mu\text{m}$ , слике 5.14а-ђ. Од ове дубине, па све до  $a = 5,77 \mu\text{m}$ , формирање отиска праћено је појавом и неконтролисаним растом медијалних и радијалних прелина, слике 5.14е-ж. Чист режим кртог лома, односно када су присутна сва три система прелина унутар материјала, а око зоне формирања жлеба, настаје када дубина продирања пређе вредност од  $a = 5,77 \mu\text{m}$ , слике 5.14з-к и 5.15.



Слика 5.14: Отисци формирани на граниту Буковик утискивањем при статичком дејству силе Vickers утискивачем са силом утискивања  $F_n = 0,098 \div 2,962 \text{ N}$ .



**Слика 5.15:** Отисци формирани на граниту Буковик утискивањем при статичком дејству силе Vickers утискивачем са силом утискивања  $F_n = 4,904 \div 9,807 \text{ N}$ .

#### 5.1.4 Упоредни приказ утискивања утискивача при статичком дејству силе утискивања за сва три испитивана материјала

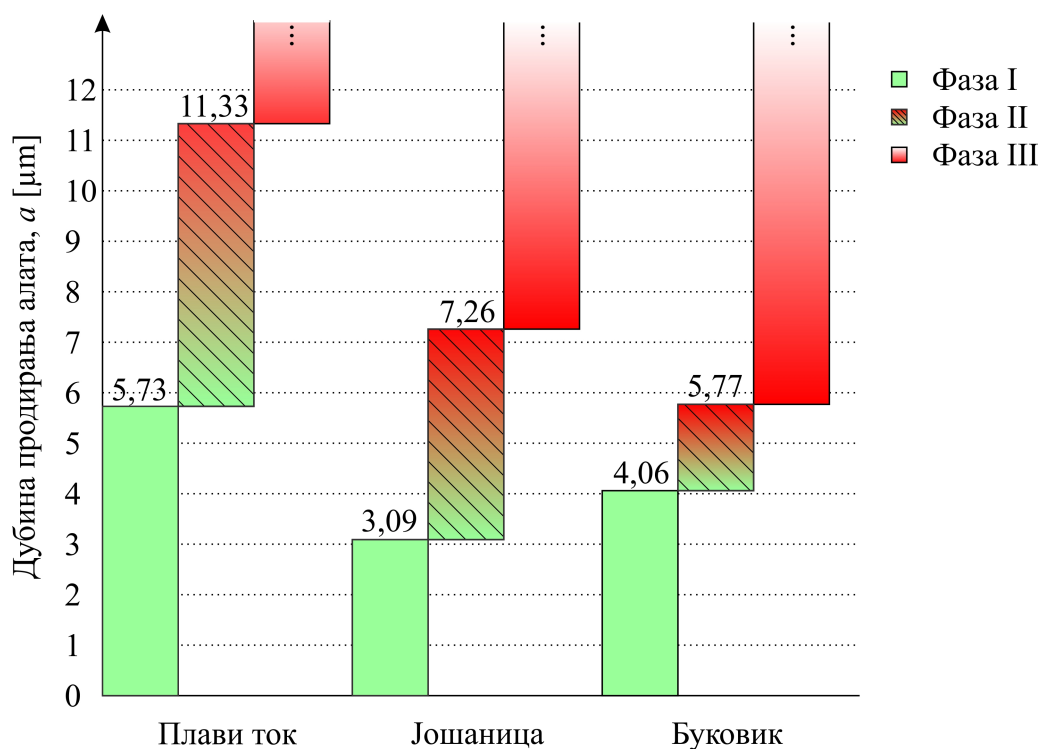
На основу добијених граничних вредности дубина продирања које раздвајају све три фазе, односно вредности критичне дубине продирања која раздваја режим пластичног деформисања од режима кртог лома, формиран је график приказан на слици 5.16.

Највећи опсег фазе 1, у којој се може очекивати обрада заснована на повратној еластичној и пластичној деформацији материјала, а не на разарању, уочава се код мермера *Плави ток*. Гранит *Буковик* има мањи опсег фазе 1 у односу на мермер *Плави ток*, али нешто већи опсег у поређењу са гранитом *Јошаница*. Уколико се погледа редослед материјала дефинисан према вредностима критичних дубина продирања, уочава се њихова корелација са тврдоћама најтврђег једињења присутног у материјалу. Како гранит *Јошаница* има највећу

тврдоћу, његова вредност критичне дубине продирања је најмања, затим следи гранит *Буковик*, па мермер *Плави ток*.

Преласком на фазу 2, започиње обрада у режиму кртог лома, уз присуство медијалних и радијалних прслина унутар материјала. Након анализе изведених експеримената, уочено је да је ова фаза најраспрострањенија код гранита *Јошаница*, док је најмања код гранита *Буковик*.

Чист режим кртог лома, који одговара фази 3 (присуство сва три система прслина), прво настаје код гранита *Буковик*, затим код гранита *Јошаница* и најкасније се може очекивати приликом обраде мермера *Плави ток*.



**Слика 5.16:** Упоредни приказ резултата добијених експериментом утискивања при статичком дејству силе утискивања за мермер *Плави ток* и граните *Јошаница* и *Буковик*.

---

# СИЛЕ ТОКОМ ПРОЦЕСА МИКРО РЕЗАЊА

## 6.1 Вредности интензитета сила током процеса микро резања

### *6.1.1 Вредности интензитета сила током процеса обраде мермера*

#### *Плави ток*

Након експеримената утискивања утискивача при статичком дејству силе чијом анализом се дошло до резултата обрадљивости и критичне вредности продирања алата у случају дејства само једне компоненте силе резања ( $F_n$ ) мермера *Плави ток* и гранита *Јошаница* и *Буковик*, уследио је експеримент микро резања (гребања) дијамантским врхом алата. Овим експериментом, детаљно објашњеним у четвртом поглављу, приликом испитивања обрадљивости, увршћена је још једна компонента силе резања - тангенцијална компонента ( $F_t$ ) као утицајни фактор. Вредности вертикалне ( $F_V$ ) и хоризонталне ( $F_H$ ) компоненте силе резања, мерене током извођења експеримента, пројектоване су на тангенцијални и нормални правац, слика 4.5.

Резултати експеримента, спроведени према плану из табеле 4.2, представљени су графицима на сликама 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 и 6.6.

Иницијални план био је да се експерименти микро резања спроведу са три различита алата:  $R0,2$ ,  $R0,15$  и  $R0,06$  mm. Међутим, испоставило се да мерна опрема, коришћена током извођења експеримента уз помоћ алата чија је вредност радијуса заобљења врха износила  $R0,06$  mm, није у стању да детектује толико мале вредности сила које се овом приликом јављају. Са друге стране, површине генерисане овим алатом, касније су искоришћене за микроскопску опсервацију свих обрађених површина.

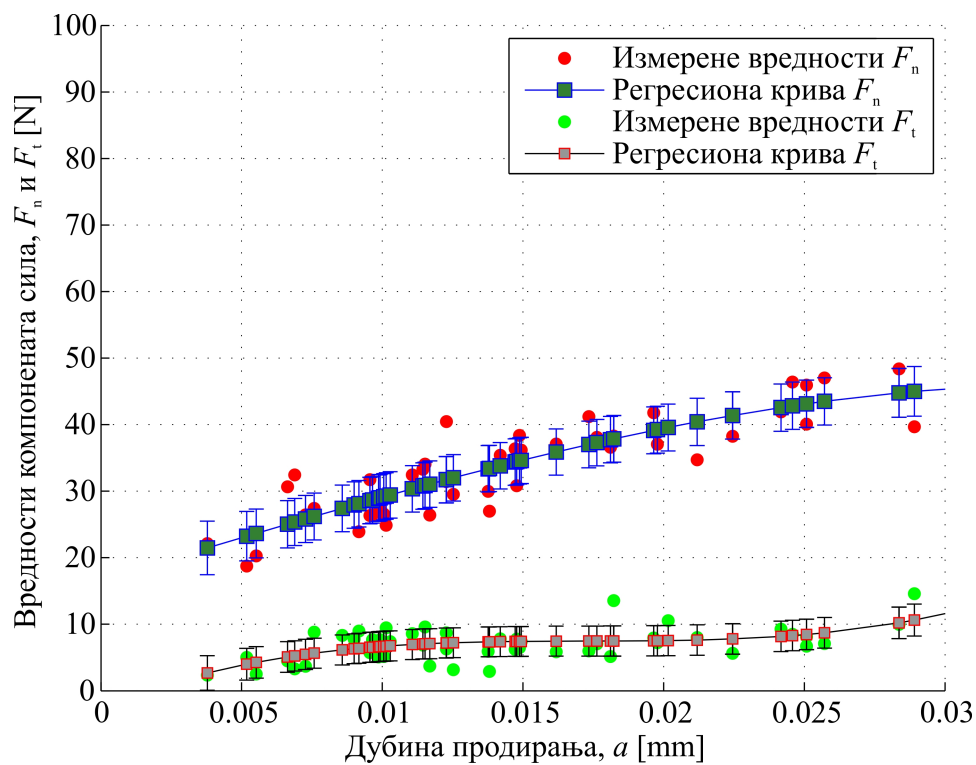
Приликом извођења експеримента током којег је уједно успешно вршено мерење компонената сила, коришћене су две вредности брзине микро резања (15 и 25 m/s) и две вредности заобљења врха алата ( $R0,2$ ,  $R0,15$ ).

Графици на слици 6.1 показују вредности крива за компоненте  $F_n$  и  $F_t$  у функцији од дубине микро резања приликом обраде мермера *Плави ток*, са брзинама микро резања 6.1а) 15m/s и 6.1б) 25m/s, а коришћењем алата чија је вредност заобљења врха  $R0,2$  mm. Када се упореде ова два дијаграма, може се закључити да са повећањем брзине микро резања, расту и интензитети компонената силе које се јављају у зони резања. Испоставља се да вредност интензитета нормалне компоненте силе може бити и до неколико пута већа од вредности интензитета тангенцијалне компоненте. Са повећањем брзине микро резања повећава се и расипање резултата, што је последица повећаног раста прслина унутар материјала које се јављају при тим условима.

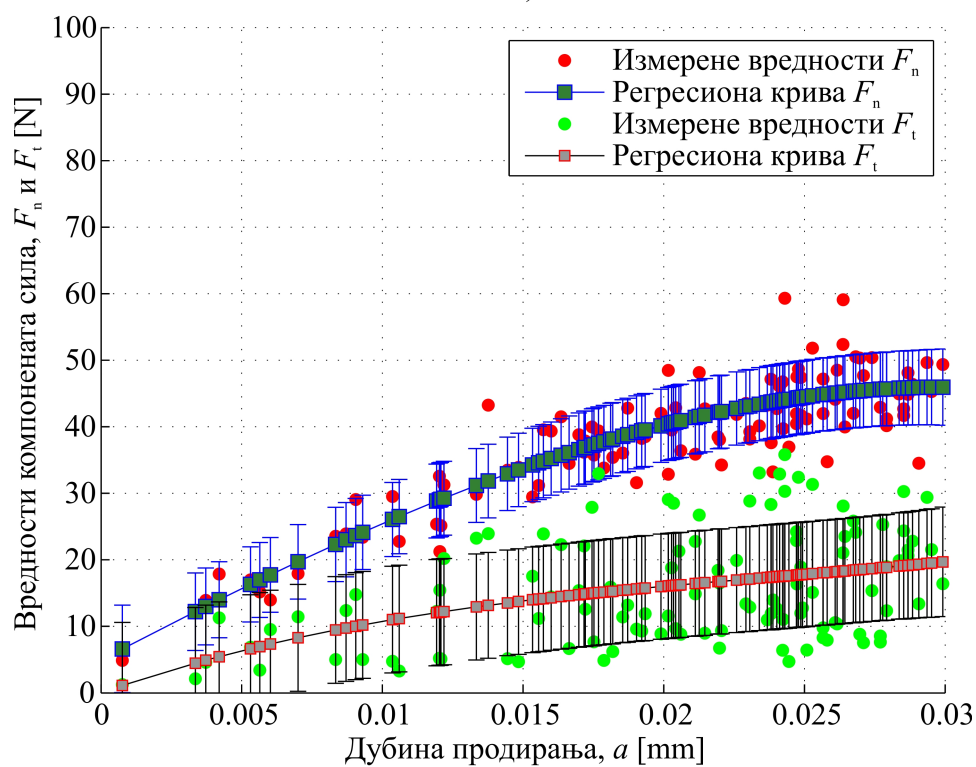
Смањењем радијуса заобљења алата са  $R0,2$  на  $R0,15$ , као последица смањења површине попречног пресека резања, јавља се пад интензитета обе компоненте силе резања. Међутим, повећањем брзине микро резања са 15 на 25 m/s, за случај када је вредност заобљења врха алата  $R0,15$ , забележен је пад вредности интензитета тангенцијалне компоненте ( $F_t$ ) силе резања, док је код нормалне компоненте, као што је то био случај приликом обраде алатом са заобљењем врха  $R0,2$ , забележен благи раст. Како се при смањењу вредности радијуса заобљења врха алата повећава ефективна вредност грудног угла ( $\gamma_e$ ), јавља се



повећање вредности интензитета тангенцијалне компоненте ( $F_t$ ) силе резања. Такође, смањењем брзине микро резања  $v_s$  повећава се опсег режима пластичног деформисања, услед чега не долази до разарања материјала и одвајања истог испред врха алата, чиме би се у супротном случају смањила ефективна дубина микро резања.

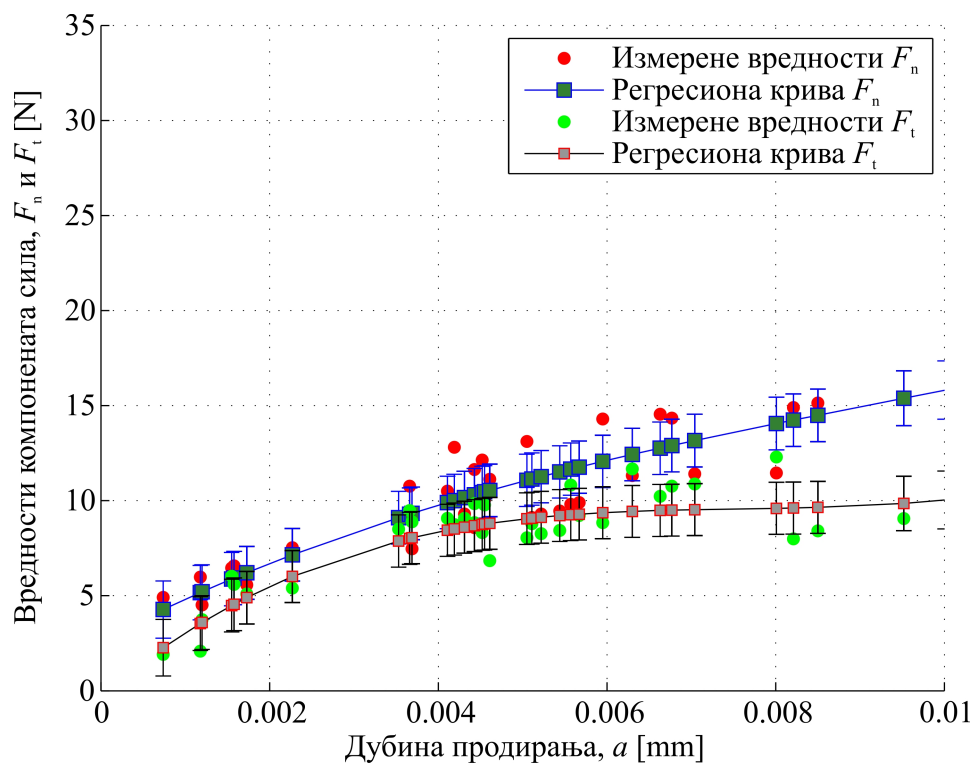


а)

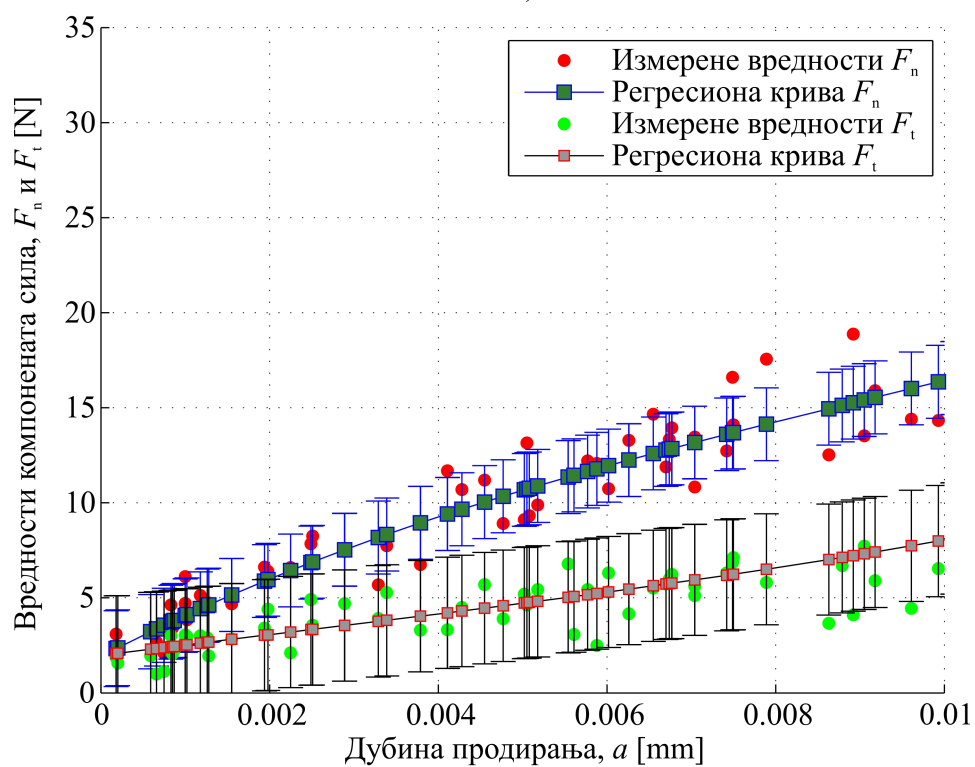


б)

Слика 6.1: Вредности компоната силе резања  $F_n$  и  $F_t$  при микро резању мермера Плави ток алатом радијуса  $R0,2 \text{ mm}$  и брзинама резања а)  $v_s = 15 \text{ m/s}$  и б)  $v_s = 25 \text{ m/s}$ .



а)



б)

Слика 6.2: Вредности компоната силе резања  $F_n$  и  $F_t$  при микро резању мермера Плави ток алатом радијуса  $R0, 15$   $\mu\text{m}$  и брзинама резања а)  $v_s = 15$   $\text{m/s}$  и б)  $v_s = 25$   $\text{m/s}$ .

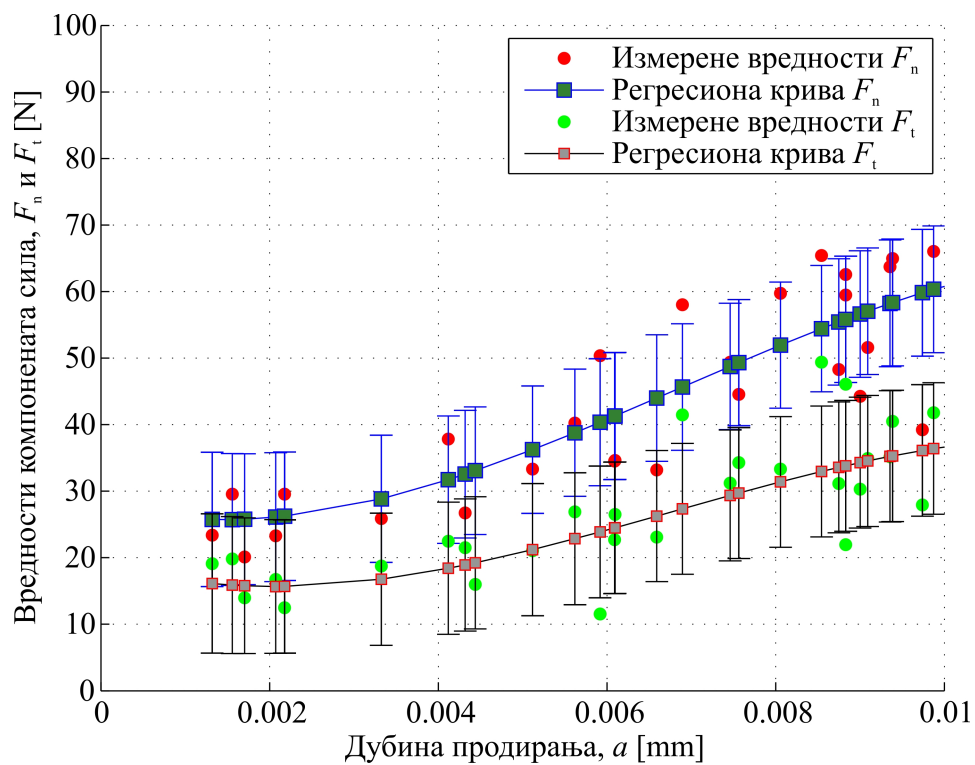
### 6.1.2 Вредности интензитета сила током процеса обраде гранита

#### Јошаница

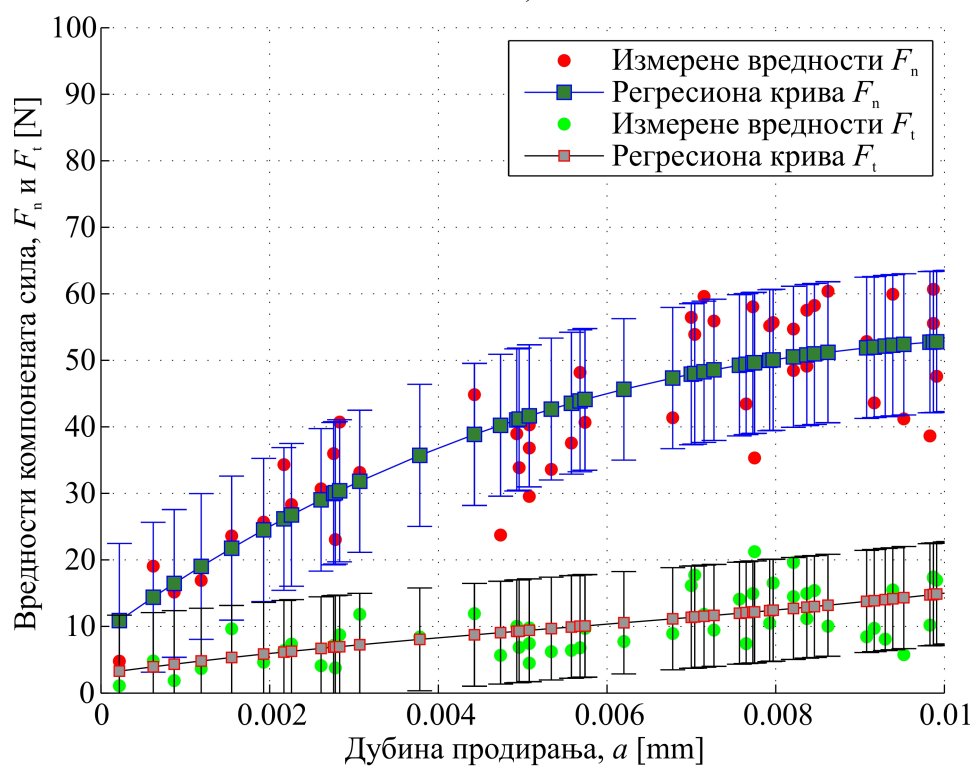
Експерименти су у наставку истраживања спроведени на граниту *Јошаница*. На графицима су приказане измерене вредности интензитета компонената силе резања ( $F_n$  и  $F_t$ ), као и криве које најбоље описују њихову промену при промени дубине микро резања, слике 6.3 и 6.4. У случају када вредност радијуса заобљења врха алата износи  $R0,2$  mm, а брзина микро резања  $v_s = 15$  m/s, интензитет компонената сила резања већи је него што је то био случај при обради мермера *Плави ток* у истим условима обраде. Интензитет нормалне компоненте силе резања ( $F_n$ ) у порасту је до два пута, док је код тангенцијалне компоненте ( $F_t$ ) тај скок и до три пута већи у односу на мермер *Плави ток*. Анализом резултата добијених током експеримената утискивања утискивача при статичком дејству силе, установљено је да је гранит *Јошаница* тврђи у односу на мермер *Плави ток*, па је и очекивано што су силе које се јављају у зони резања већег интензитета.

Повећањем брзине микро резања са 15 на 25 m/s, нормална компонента ( $F_n$ ) заузима приближно исту вредност, али је приметан пад у интензитету код тангенцијалне компоненте ( $F_t$ ) силе резања.

Резултати огледа вршени алатом радијуса заобљења врха  $R0,15$  mm, разликују се од оних добијених алатом  $R0,2$  mm. Међутим, резултати добијени обрадом уз помоћ оба алата, указују на вишеструко већу вредност интензитета сила код гранита *Јошаница* у односу на вредности интензитета сила измерених приликом микро резања мермера *Плави ток*. Дејство алата радијуса заобљења врха  $R0,15$  mm при брзини микро резања  $v_s = 25$  m/s на обрадак, доводи до повећања разарања материјала испред самог врха алата, али до пада вредности интензитета тангенцијалне компоненте ( $F_t$ ) силе резања. И у овом случају, нормална компонента силе резања ( $F_n$ ) остаје приближно константна, као и у случају када је брзина микро резања износила  $v_s = 15$  m/s.

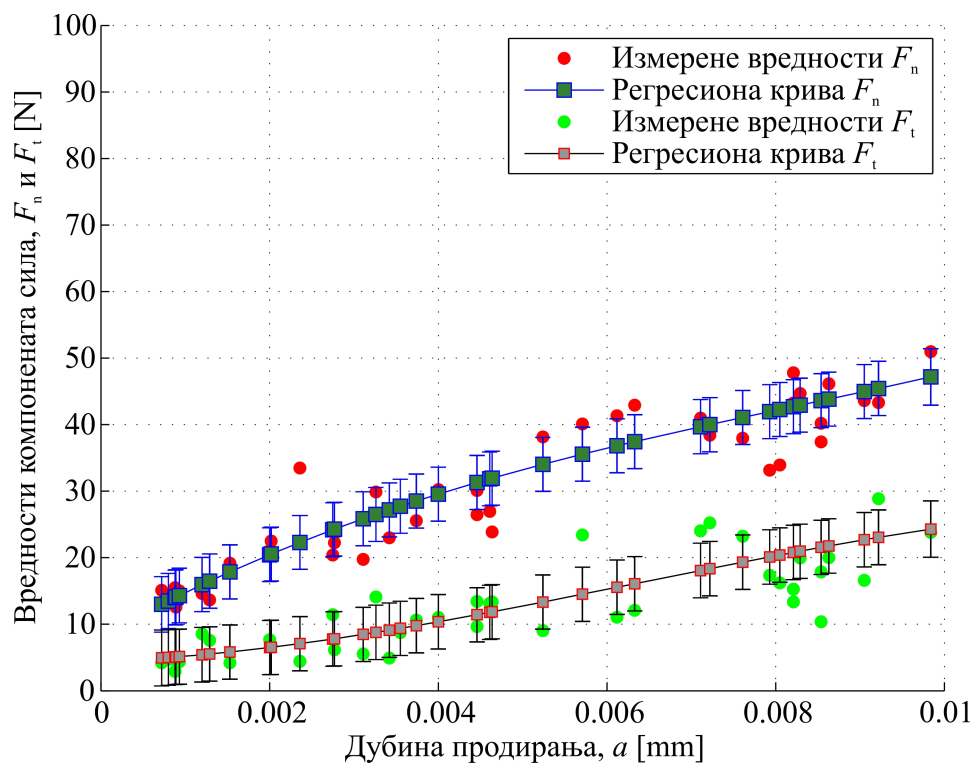


а)

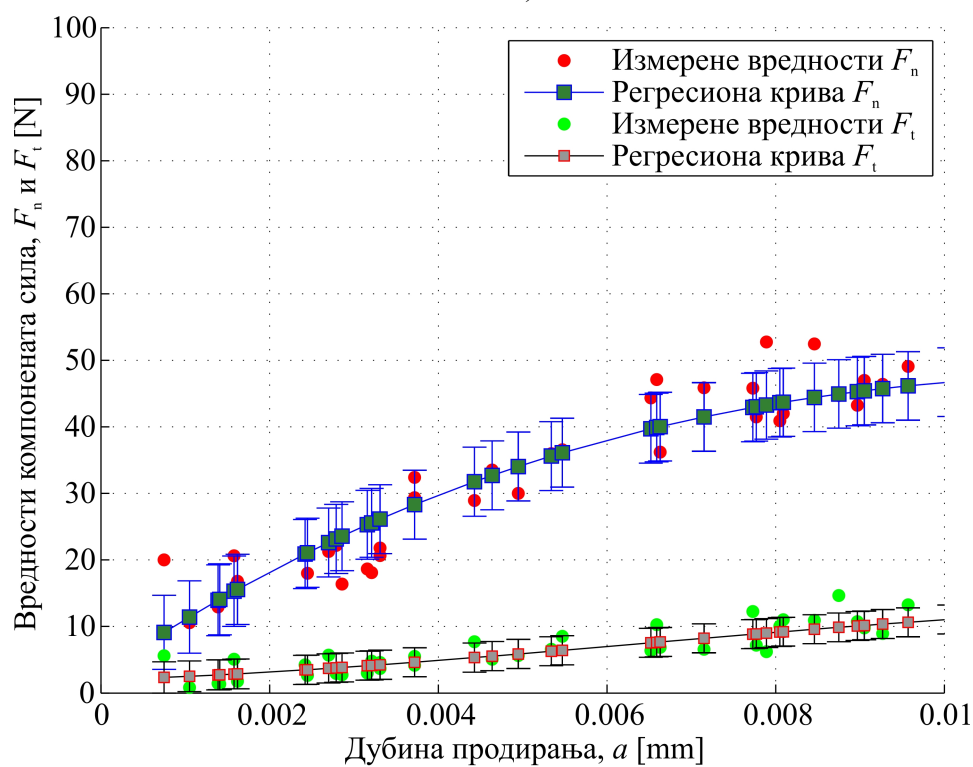


б)

Слика 6.3: Вредности компоната силе резања  $F_n$  и  $F_t$  при микро резању гранита Јошаница алатом радијуса  $R0,2 \text{ mm}$  и брзинама резања а)  $v_s = 15 \text{ m/s}$  и б)  $v_s = 25 \text{ m/s}$ .



а)



б)

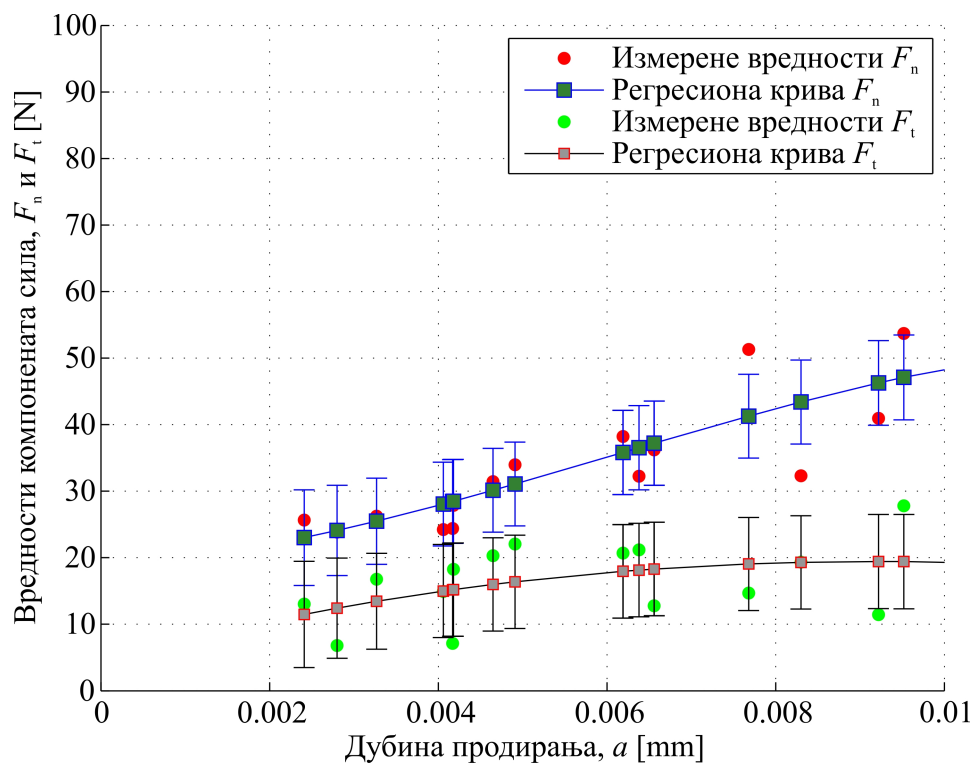
Слика 6.4: Вредности компоната силе резања  $F_n$  и  $F_t$  при микро резању гранита Лошаница алатом радијуса  $R0,15$  mm и брзинама резања а)  $v_s = 15$  m/s и б)  $v_s = 25$  m/s.

### 6.1.3 Вредности интензитета сила током процеса обраде гранита

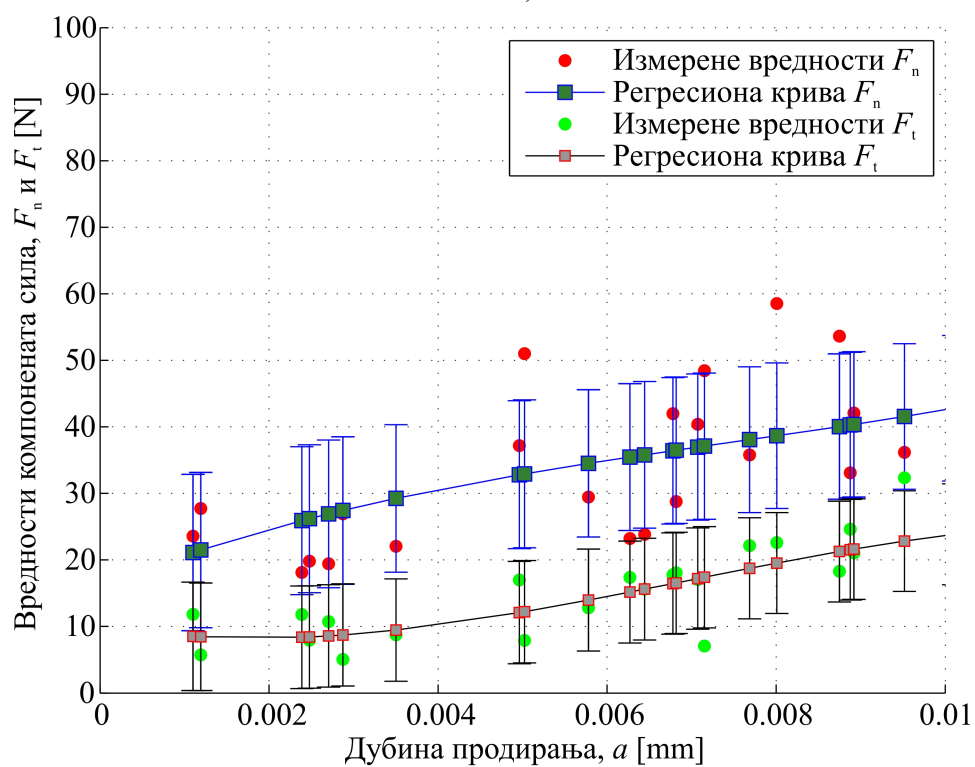
#### *Буковик*

Као и приликом експеримената утискивања утискивача при статичком дејству силе, последњи испитивани материјал током чије је обраде, алатима различитог радијуса заобљења врха ( $R0,2$  и  $R0,15$  mm) и при двама различитим брзинама ( $v_s = 15$  и  $v_s = 25$  m/s), вршено мерење вредности интензитета компонената силе резања, је гранит *Буковик*. Анализом претходног експеримента (утискивање утискивача при статичком дејству силе) утврђено је да је гранит *Буковик* мање тврдоће у односу на гранит *Јошаница*, док је са друге стране, вишеструко тврђи у поређењу са мермером *Плави ток*. Графици приказани на сликама 6.5 и 6.6, односе се на вредности интензитета компонената силе резања при обради гранита *Буковик*. Уколико се направи компарација ових графика са графицима на сликама 6.4 и 6.3, може се уочити да је вредност интензитета компонената силе резања нешто мања, при обраду гранита *Буковик*. Додатно, када се упореди обрада гранита *Буковик* и мермера *Плави ток*, може се, такође, успоставити корелација између вредности интензитета компонената силе резања које се јављају у зони резања са тврдоћом испитиваног материјала, што оправдава веће вредности интензитета компонената силе резања код гранита *Буковик*.

Смањење вредности радијуса заобљена врха алата са  $R0,2$  на  $R0,15$  mm, праћено је смањењем интензитета компонената силе резања, за случај брзине микро резања  $v_s = 15$  m/s. У случају повећања брзине микро резања на  $v_s = 25$  m/s, раст нормалне компоненте ( $F_n$ ) није забележен, штавише јавља се пад вредности интензитета, док тангенцијалну компоненту ( $F_t$ ) карактерише значајан пад вредности интензитета. Овакав тренд промене интензитета тангенцијалне компоненте силе резања, настаје услед истих законитости идентификованих и код гранита *Јошаница*, односно услед повећаног разарања материјала испред самог врха алата.



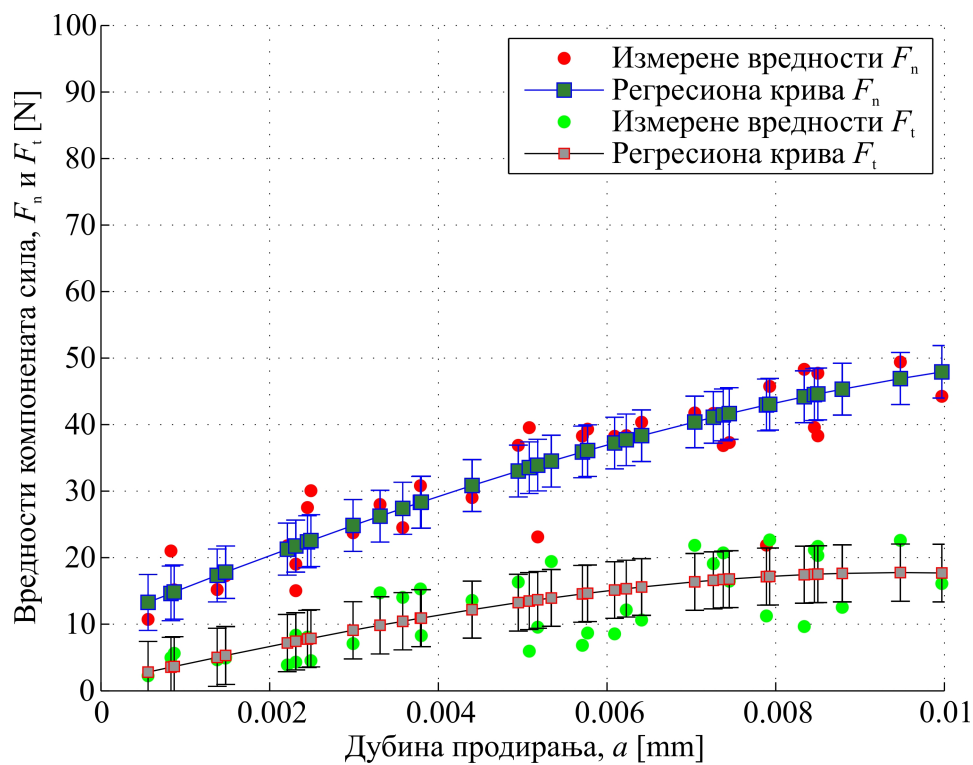
а)



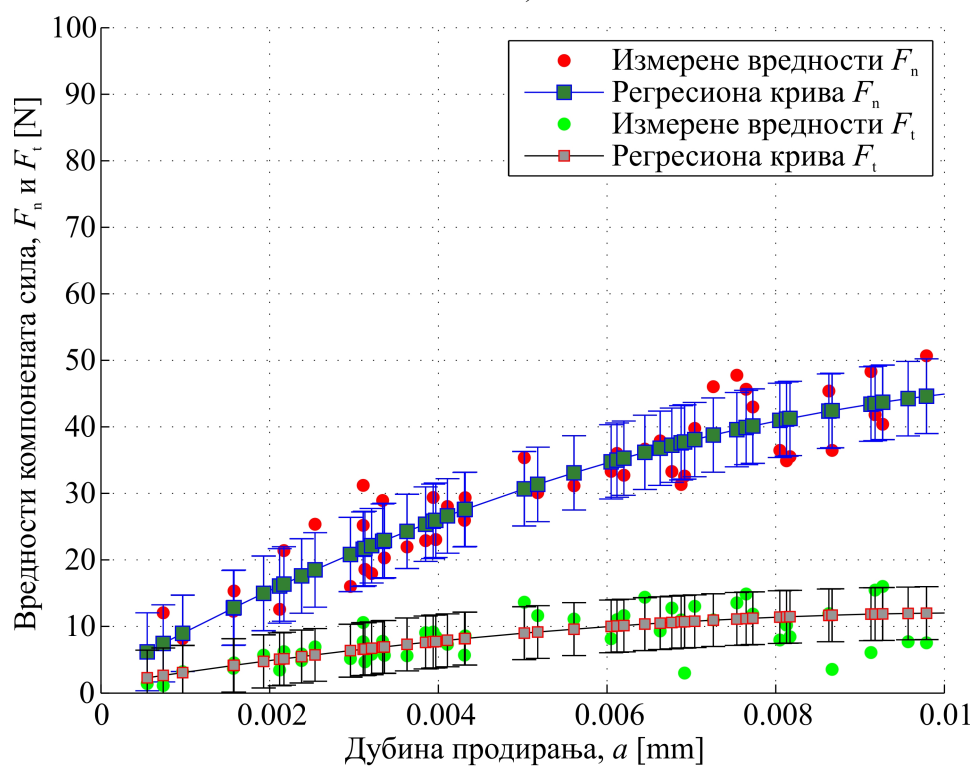
б)

Слика 6.5: Вредности компоната силе резања  $F_n$  и  $F_t$  при микро резању гранита Буковик алатом радијуса  $R0,2$  mm и брзинама резања а)  $v_s = 15$  m/s и б)  $v_s = 25$  m/s.





а)



б)

Слика 6.6: Вредности компоната силе резања  $F_n$  и  $F_t$  при микро резању гранита Буковик алатом радијуса  $R0,15$  mm и брзинама резања а)  $v_s = 15$  m/s и б)  $v_s = 25$  m/s.

---

# ТОПОГРАФИЈА ОБРАЂЕНЕ ПОВРШИНЕ И КРИТИЧНА ДУБИНА ПРОДИРАЊА

## 7.1 Топографија обрађене површине

Микроскопска опсервација обрађених површина, односно жљебова формираних проласком дијамантског врха кроз материјал, извршена је за све обрађиване материјале. Анализа испитиваних материјала вршена је за све услове под којима су они испитивани, односно за случајеве брзина микро резања 15 и 25 m/s, као и за вредности радијуса заобљења врха алата  $R0,2$ ,  $R0,15$  и  $R0,06$ .

### *7.1.1 Анализа површине мермера Плави ток након микро обраде*

Током микро резања мермера *Плави ток* алатом  $R0,2$  mm, јавља се, поред зоне пластичног деформисања и зона кртог лома, како при брзини кретања од 15 m/s, тако и при брзини микро резања од 25 m/s. Повећање брзине резања проузроковало је повећање зоне пластичног деформисања, чиме се вредност критичне дубине продирања ( $a_c$ ) повећала са 8,8 на 9,3  $\mu\text{m}$ , слика 7.1а. Како, у овом случају, раст брзине резања не доводи до пада тангенцијалне компоненте ( $F_t$ ) силе резања, а што је објашњено у претходном поглављу, напонско стање за овај случај погодује расту критичне дубине продирања. Очекивано је

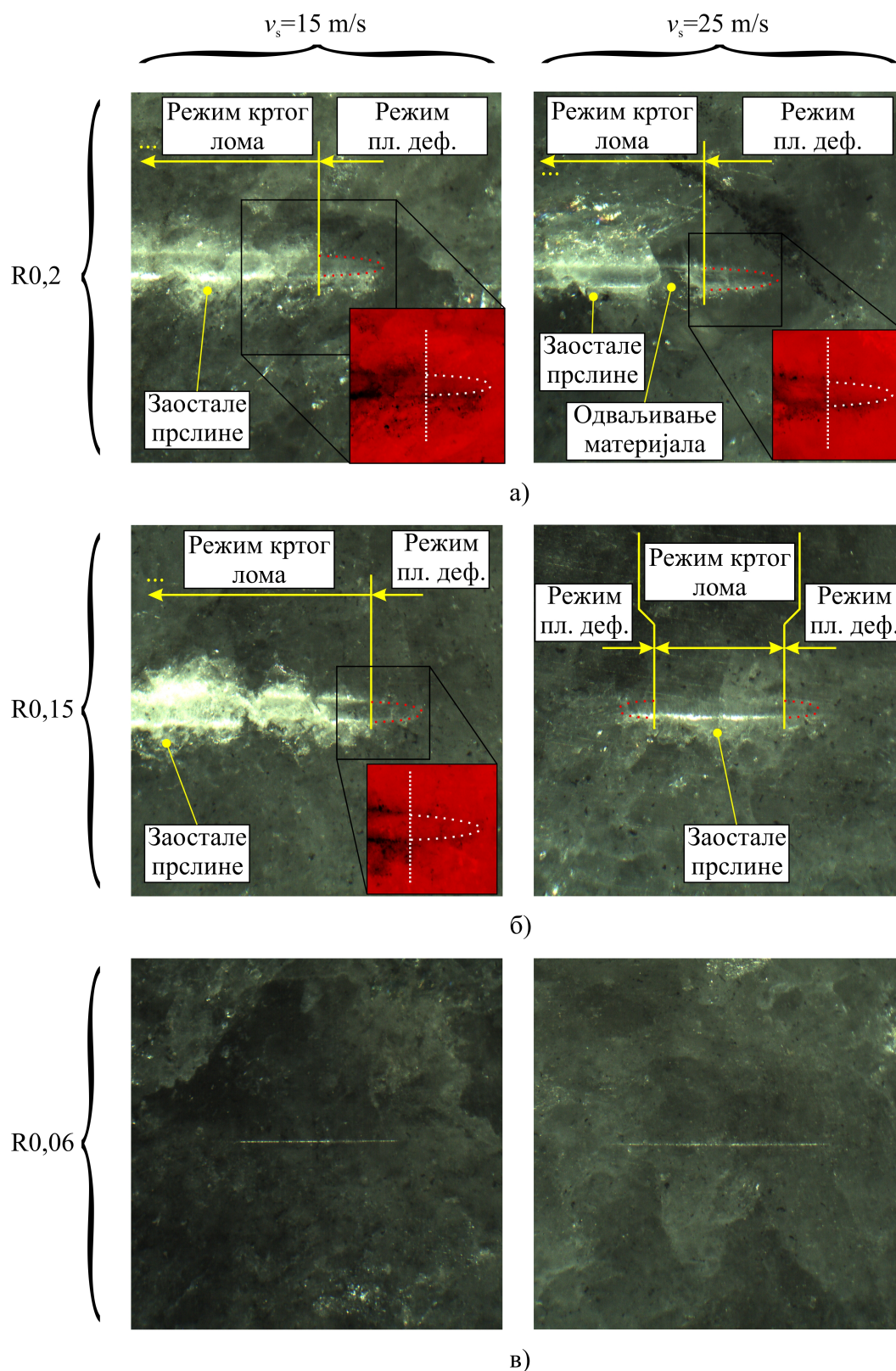
да након неке граничне вредности брзине микро резања, вредност интензитета тангенцијалне компоненте силе резања почне да опада, што последично доводи до промене напонског стања унутар материјала испред самог врха алата, а затим и смањења вредности критичне дубине продирања.

За поменути комбинацију брзина и вредности радијуса заобљења врха алата, на основу израза (3.6), гранична вредност ефективног грудног угла при којима се прелази из једног режима у други износила је  $\gamma_e = -81,47$  и  $\gamma_e = -81,23$ .

Смањењем вредности радијуса заобљења врха алата са  $R0,2$  на  $R0,15$ , долази до свеобухватног смањења критичних дубина продирања, како за случај обраде при брзини микро резања  $15 \text{ m/s}$ , тако и при случају где је вредност брзине микро резања износила  $25 \text{ m/s}$ . У првом случају, где је брзина износила  $15 \text{ m/s}$  дошло је до пада вредности критичне дубине продирања ( $a_c$ ) са  $8,8$  на  $8,6 \mu\text{m}$ . Са друге стране, при брзини микро резања  $25 \text{ m/s}$ , није уочено повећања вредности критичне дубине продирања ( $a_c$ ), штавише забележено је њено смањење са  $9,3$  на  $8,3 \mu\text{m}$ . Промена вредности критичних дубина продирања са променом вредности радијуса заобљења врха алата последица је промене напонског стања унутар материјала, детаљно објашњеном у поглављу три.

Смањења вредности  $a_c$  условљена су смањењем граничне вредности ефективног грудног угла на  $\gamma_e = -80,43$  и  $\gamma_e = -80,25$ , што условљава промену напонског стања унутар материјала.

Даљим смањењем вредности радијуса заобљења врха алата на  $R0,06 \text{ mm}$ , долази до драстичног смањења вредности критичне дубине продирања  $a(c)$ . У овом случају, њену вредност није било могуће прецизно одредити, али је опсервирано да је знатно мања него у претходна два случаја.



Слика 7.1: Изглед жљебова добијених при брзини микро резања  $v_s = 15$  и  $v_s = 25$  m/s у мермеру Плави ток, алатима а)  $R_{0,2}$ , б)  $R_{0,15}$  и в)  $R_{0,06}$  mm.

Повећањем дубине продирања преко своје критичне вредности, у свих шест

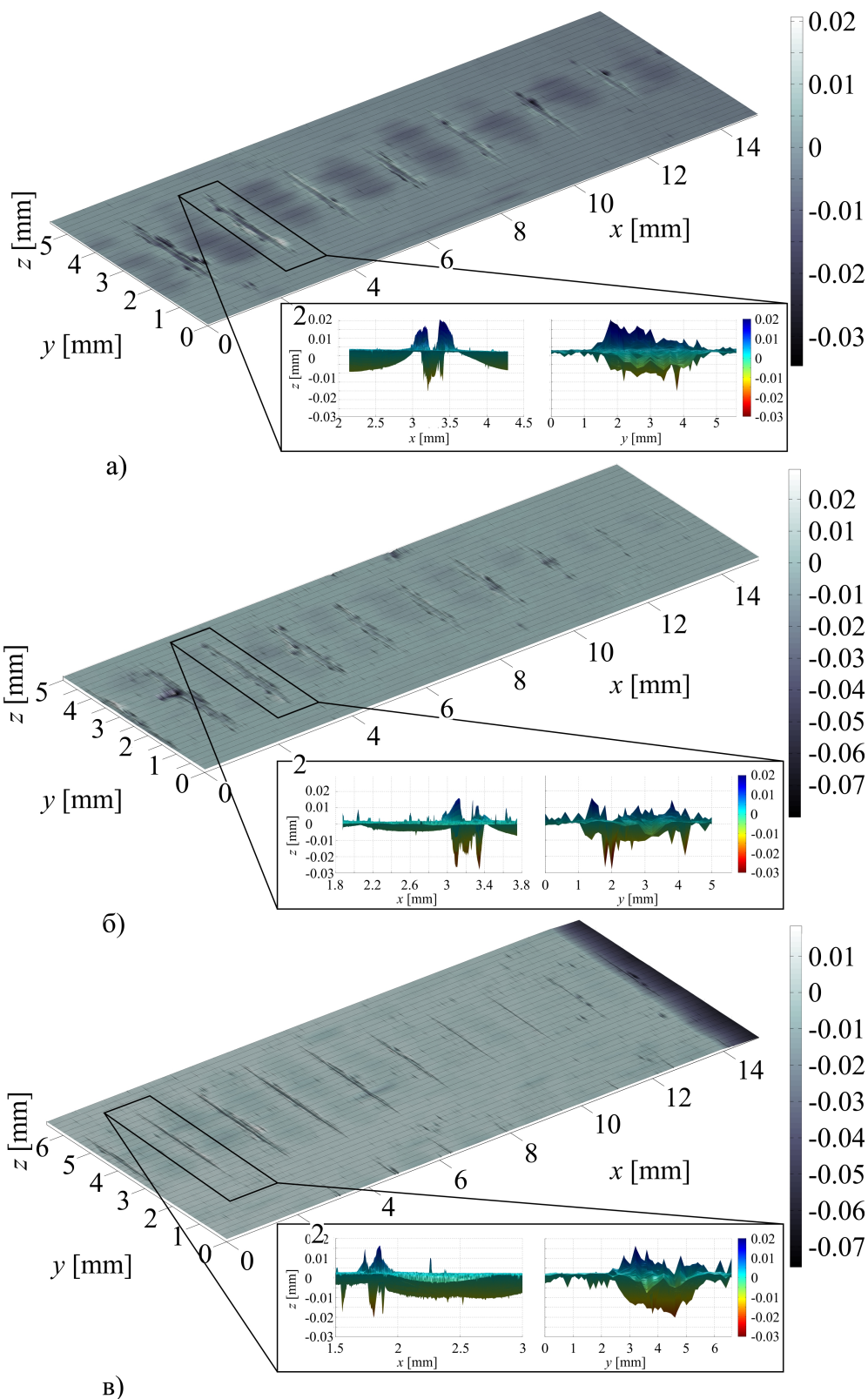
случајева брзина и заобљења врха алата, долази до започињања режима кртог лома при чему се дешава одвајање већих честица материјала чије запремине могу бити веће од идеалне запремине коју би алат уклонио. Другим речима, формиран жљеб је веће запремине од идеалног трага који би оставио алат при режиму пластичног деформисања. Додатно, у овом режиму присутне су и заостале прслине унутар материјала, видљиве поред и дуж дела формираног жљеба који се налази у подручју кртог лома. Да би се установио интензитет бочног разарања у свим коришћеним условима обраде, извршено је скенирање геометрије добијених обрађених жљебова. Жљебови формиран на мермеру *Плави ток* представљени су на сликама 7.2 и 7.3.

Карактер бочног разарања није лако предвидети, јер не зависи само од услова обраде, већ и од стања унутар материјала пре почетка обраде. То подразумева: величину зрна, границе зрна, да ли је минерални састав суседних зрна исти или дијаметрално различит, постојање прслина унутар материјала, а које могу довести до повећања разарања материјала приликом обраде, и друго. Сви наведени параметри утичу на процес обраде тако што доводе до разарања материјала променљивог интензитета дуж жљеба. Међутим, ако се узме у обзир већи број посматраних случајева, долази се до закључка који су то услови обраде при којим долази до мањег или већег бочног разарања материјала, као и интензитета заосталих прслина.

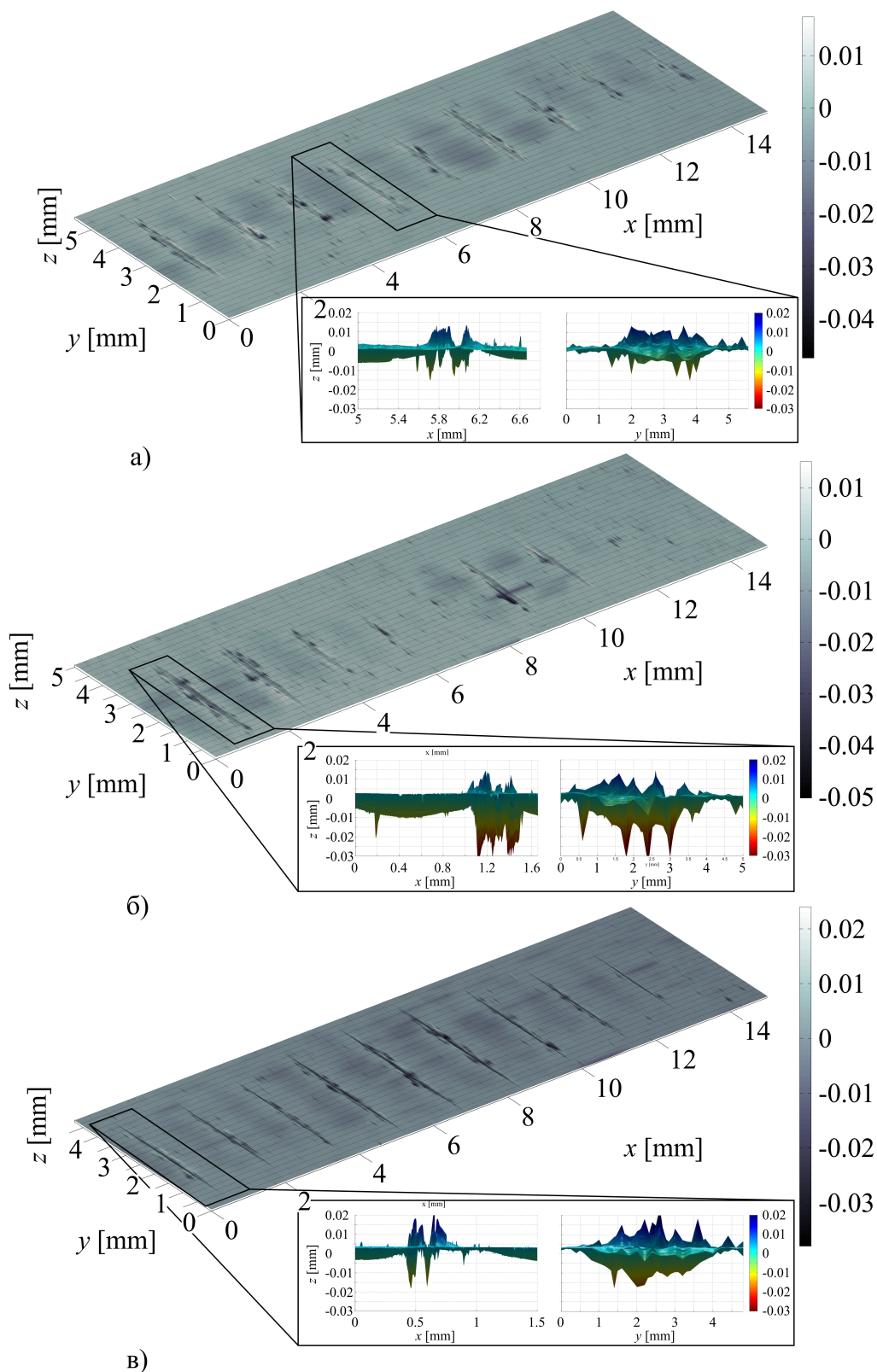
Првом спроведеном анализом алатом  $R0,2$ , може се видети да је бочно разарање, односно запремина формираног жљеба, много већа у случају при већим брзинама микро резања. Смањење вредности радијуса заобљења врха алата на  $R0,15$  mm праћено је смањењем бочног разарања, што је, такође, опсервирано и приликом обраде алатом врха  $R0,06$  mm. Са друге стране, повећање брзине микро резања доводи до повећања интензитета раста прслина унутар самог материјала, доводећи до повећаног разарања при већим брзинама обраде.

Изглед геометрије жљеба насталог у интеракцији алата и обратка приликом ре-

жима кртог лома, приказан је на слици 7.10а. Латералне прслине које се јављају унутар материјала могу се поделити у две групе. Прву групи чине прслине које почињу да се развијају на дубинама мањим од тренутне дубине продирања алата. Овакав тренд раста латералних прслина доводи до одвајања већих комада материјала лоцираних ближе обрађиваној површини, односно присутних на мањим дубинама. Друга група латералних прслина се делимично јавља на већим дубинама резања и својим трендом раста почињу да теже медијалним прслинама. Након јављања ових прслина, долази до издизања материјала око самог жљеба. Издизање материјала, условљено је како растом прслина, тако и услед пластичних деформација које се јављају приликом проласка дијамантског алата кроз материјал. На дубинама већим од зоне где долази до одвајања материјала, јавља се дробљење материјала испред и испод самог алата, као и пластичне деформације материјала обратка. Оваква појава доводи до тога да је површина жљеба добијеног у зони већих дубина обраде, заправо жељене геометрије, међутим, на њој се јасно могу уочити заостале прслине које се налазе у материјалу испод самог жљеба. Зона заосталих радијалних прслина променљивог је интензитета дуж жљеба. Њена промена повезује се са растерећењем материјала након што се одвоје његови већи делови услед латералних прслина.



Слика 7.2: Скенирани жљебови у мермеру Плави ток, добијени алатима а)  $R0,2$ , б)  $R0,15$  и в)  $R0,06$  mm, при брзини микро резања  $v_s = 15$  m/s.



Слика 7.3: Скенирани жљебови у мермеру Плави ток, добијени алатима а)  $R0,2$ , б)  $R0,15$  и в)  $R0,06$  mm, при брзини микро резања  $v_s = 25$  m/s.



### 7.1.2 Анализа површине гранита Јошаница након микро обраде

У односу на мермер *Плави ток*, код гранита *Јошаница* механизам микро резања доста се разликује. Иако су код оба материјала присутна оба режима обраде (режим пластичног деформисања и режим кртог лома), разлика у обради првенствено се односи на начин на који је материјал одстрањен у тренутку започињања и током режима кртог лома. Као последица другачије структуре и различитих својстава, углавном веће величине зрна и тврдоће, у поређењу са мермером, иницијализација латералних прслина започиње на већим дубинама и простире се дубље у материјал приликом обраде гранита *Јошаница*. Услед овога, долази до одвајања делова гранита далеко веће запремине од оне идеалне коју би захватио алат. Запремина уклоњеног материјала у режиму кртог лома, доста је већа код гранита *Јошаница* у поређењу са мермером *Плави ток*. Као резултат обраде, настаје изузетно храпава површина, неправилног облика, где су дубина и ширина жљеба веће од жељене. Зона заосталих прслина мања је, него што је то био случај код мермера.

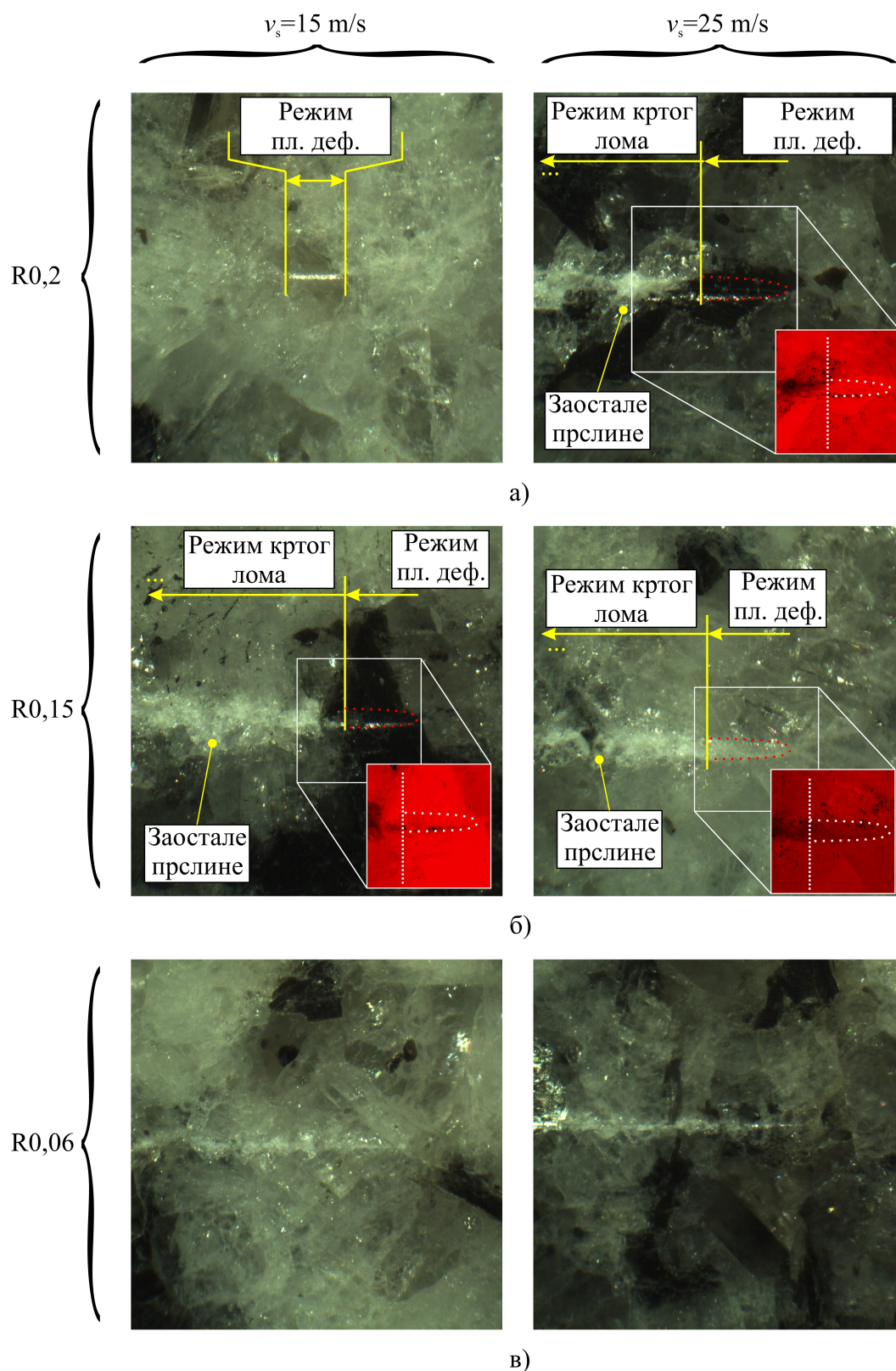
Приликом обраде гранита *Јошаница* алатом  $R0,2 \text{ mm}$ , при брзини микро резања  $15 \text{ m/s}$ , добијена је вредност критичне дубине продирања од  $a_c = 7,3 \text{ }\mu\text{m}$ . Повећањем брзине микро резања на  $25 \text{ m/s}$ , долази до пада вредности критичне дубине продирања на  $a_c = 6 \text{ }\mu\text{m}$ , што је последица већег разарања материјала, односно већег продирања прслина унутар истог.

При обради алатом са мањом вредношћу радијуса заобљења врха ( $R0,15 \text{ mm}$ ), а услед раста ефективне вредности грудног угла ( $\gamma_e$ ), долази до пада вредности критичне дубине продирања. За случај брзине резања  $15 \text{ m/s}$ , ефективна вредност грудног угла износила је  $\gamma_e = -81,67$ , што је довело до тога да је вредност критичне дубине продирања  $a_c = 6.3 \text{ }\mu\text{m}$ . За исте услове микро резања она јесте мања, али уколико се упореди вредностима експеримента где је  $R0,15 \text{ mm}$ , а брзина микро резања износила  $v_s = 15 \text{ m/s}$ , добијена је већа критична дубина резања у односу на обраду алатом  $R0,2 \text{ mm}$ , при брзини микро резања  $v_s = 25$

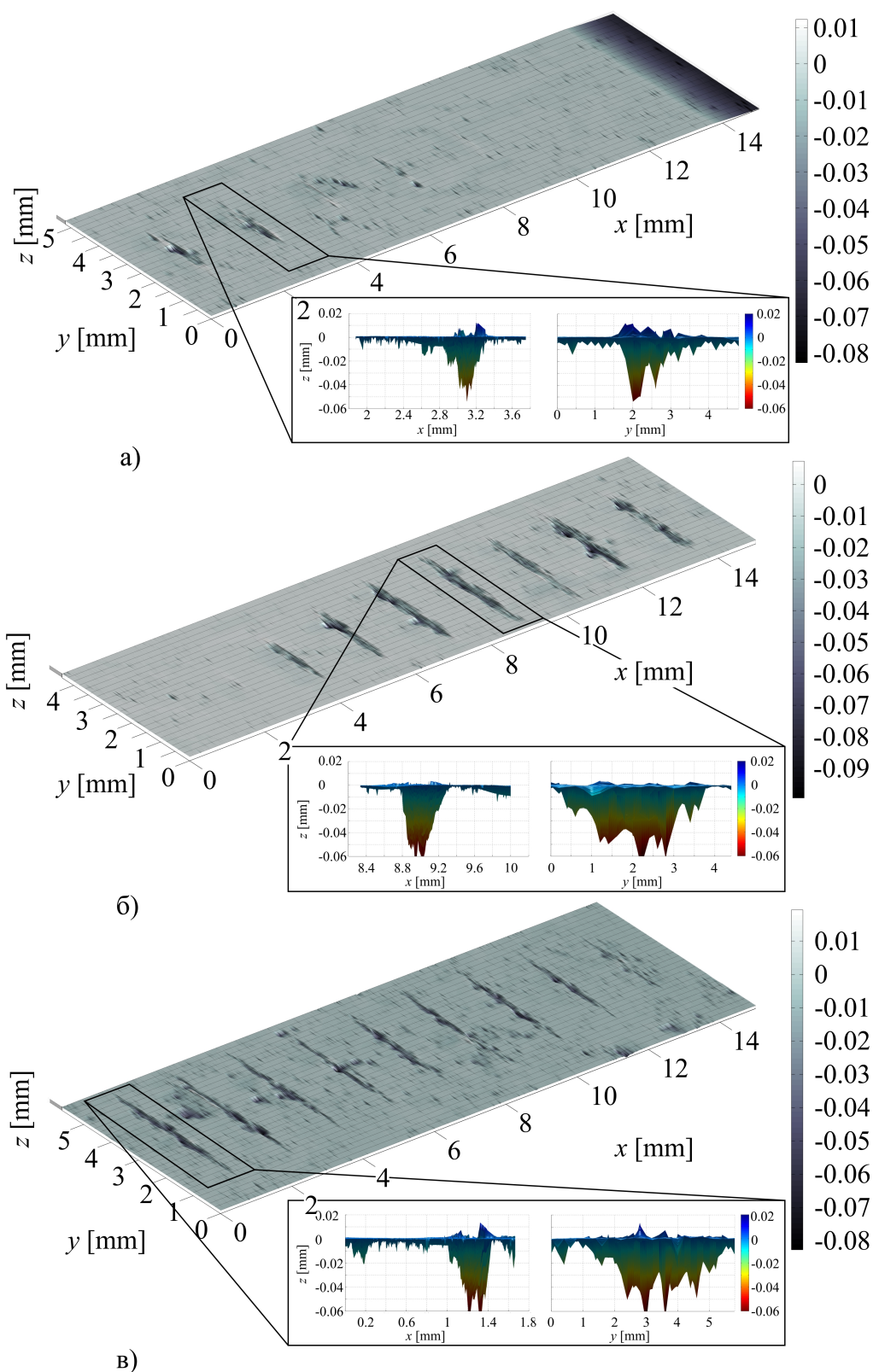
m/s. Оваквом комбинацијом алата и брзине обраде, постиже се мање разарање материјала при интеракцији алата и обратка у режиму кртог лома. Даље повећање брзине на 25 m/s, доводи до даљег смањења критичне дубине продирања на  $a_c = 5 \mu\text{m}$ , што одговара ефективној вредности грудног угла  $\gamma_e = -82,58$ .

У случају коришћења алата најмањег радијуса врха  $R0,06 \text{ mm}$ , разарање материјала далеко је веће у поређењу са разарањем мермера *Плави ток*. Такође, и при обради овим алатом може се уочити присуство оба режима обраде, али није могуће са прецизношћу одредити границу између њих, слика 7.4в.

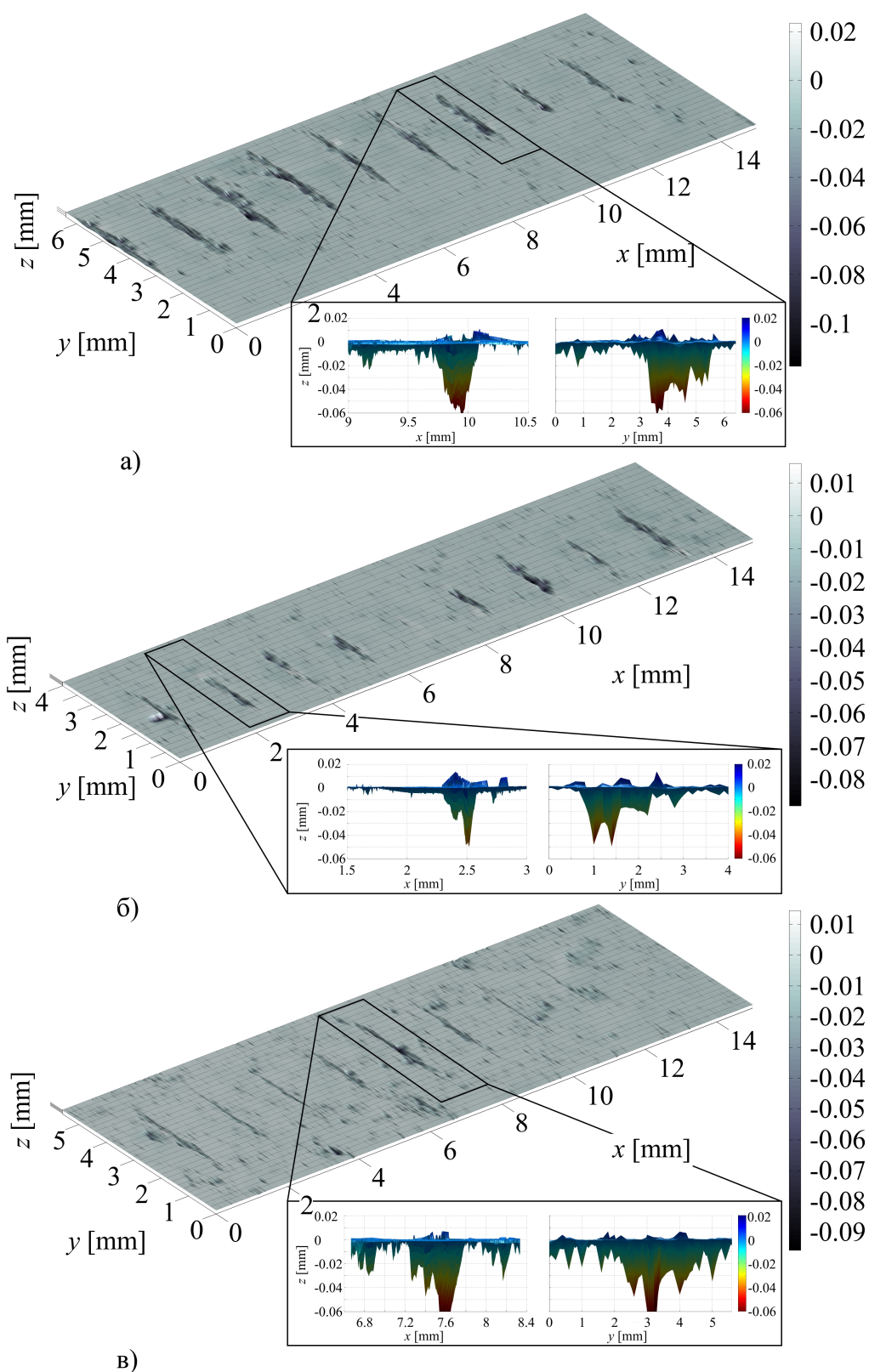
На сликама 7.5 и 7.6 приказани су неки од скенираних жљебова формираних у граниту *Јошаница*, у свих шест случајева обраде. Запажа се да је разарање гранита далеко веће, него што је то био случај код мермера. Уочава се да код гранита *Јошаница* није присутно издизање материјала по ивицама жљебова, али долази до одвајања материјала и изван идеалне границе жљебова, као последица већег интензитета латералних прслина. У режиму кртог лома, дубине жљебова превазишле су жељене дубине. Тренд смањења разарања са смањењем вредности радијуса врха алата и брзине микро резања настављен је на исти начин као и код мермера *Плави ток*.



Слика 7.4: Изглед жљебова добијених при брзини микро резања  $v_s = 15$  и  $v_s = 25 \text{ m/s}$  у граниту Јошаница, алатима а) R0,2, б) R0,15 и в) R0,06 мм.



Слика 7.5: Скенирани жљебови у граниту Јошаница, добијени алатима а)  $R0,2$ , б)  $R0,15$  и в)  $R0,06$  mm, при брзини микро резања  $v_s = 15$  m/s.



Слика 7.6: Скенирани жљебови у граниту Јошаница, добијени алатима а)  $R0,2$ , б)  $R0,15$  и в)  $R0,06$  mm, при брзини микро резања  $v_s = 25$  m/s.

### 7.1.3 Анализа површине гранита Буковик након микро обраде

Као и код претходна два испитивана материјала, и приликом микро резања гранита *Буковик* уочавају се оба режима обраде (дуктилни и режим кртог лома). Зона режима пластичног деформисања уочена је на малим дубинама, међутим, ове дубине ипак су нешто веће него што је то био случај код гранита *Јошаница*. Слична промена могла се видети приликом утискивања утискивача при статичком дејству силе, где је критична дубина продирања била нешто већа код гранита *Буковик* у односу на гранит *Јошаница*. Коришћењем алата вредности радијуса заобљења врха  $R0,2 \text{ mm}$  и при брзини микро резања  $v_s = 15 \text{ m/s}$ , достиже се критична дубина продирања од  $a_c = 7,5 \text{ }\mu\text{m}$ . Повећање брзине микро резања на  $v_s = 25 \text{ m/s}$  праћено је смањењем критичне дубине продирања на  $a_c = 6,5 \text{ }\mu\text{m}$ .

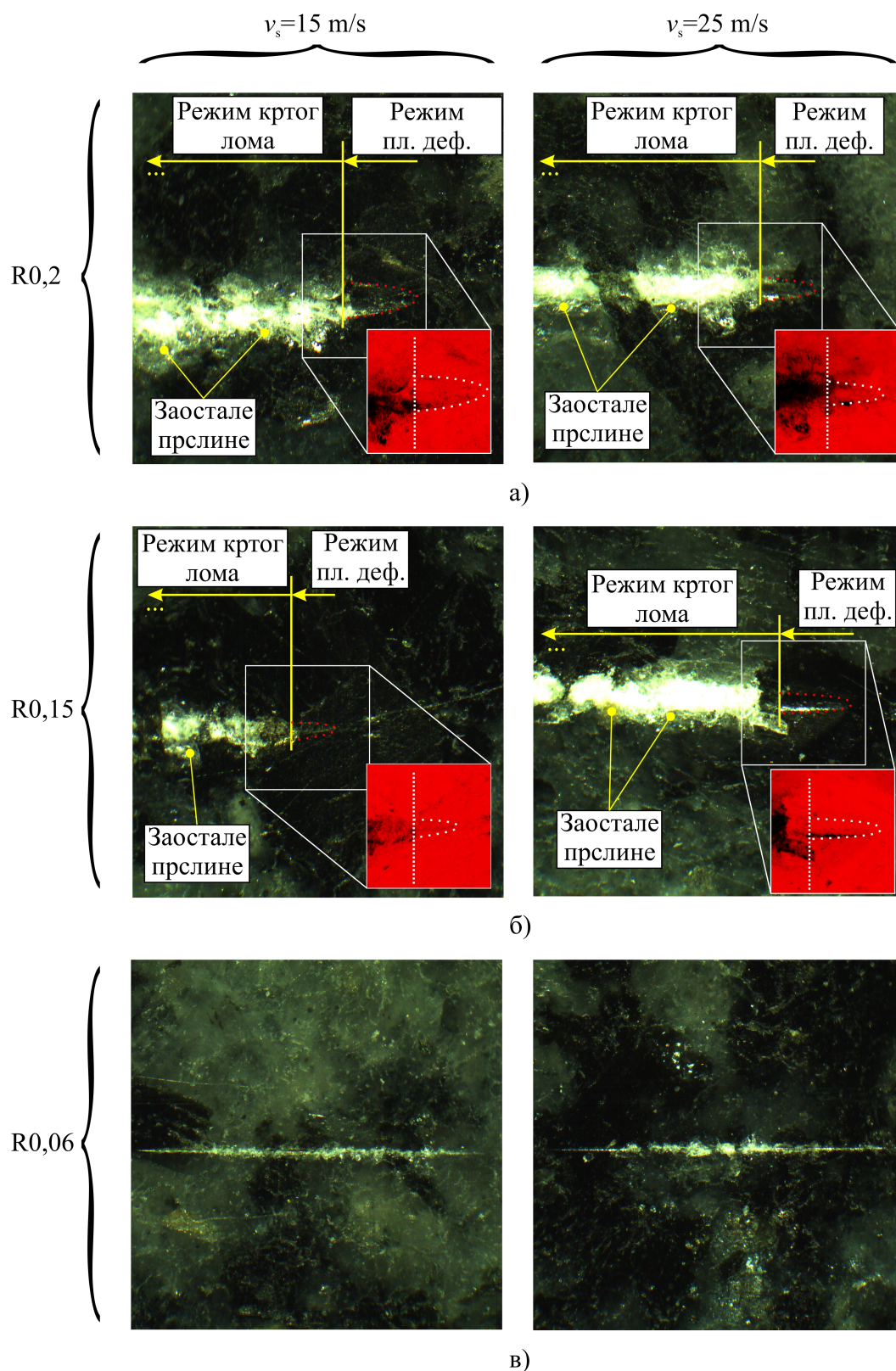
При обради алатом мањег радијуса заобљења врха ( $R0,15 \text{ mm}$ ), вредност критичне дубине продирања смањује се на  $a_c = 6,4 \text{ }\mu\text{m}$  у случају брзине микро резања  $v_s = 15 \text{ m/s}$ , док се при повећању брзине микро резања на  $v_s = 25 \text{ m/s}$  остварује пад вредности критичне дубине продирања на  $a_c = 5,5 \text{ }\mu\text{m}$ .

Слично резултатима добијених микро резањем претходна два материјала, промена вредности критичне дубине продирања условљена је променом ефективне вредности грудног угла, чија је критична вредност за ова четири случаја износила -82,13, -83,68, -81,6 и -82,22, респективно.

Користећи алат најмањег заобљења врха ( $R0,06 \text{ mm}$ ), микроскопском опсервацијом обратка може се уочити, како режим пластичног деформисања слика 7.7в, тако и режим кртог лома. Ипак, због веома уског опсега јављања обраде у режиму пластичног деформисања, није било могуће, са прецизношћу, одредити тачне граничне вредности овог режима.

Преласком са режима пластичног деформисања на режим кртог лома, добијени

жљеб веће је ширине и дубине од жељеног, што је последица повећаног разарања материјала и одвајања крупнијих делова гранита од оних идеалних које би уклонио алат. Зона заосталих прслина око жљеба је присутна, али доста је мања у односу на мермер *Плави ток*.

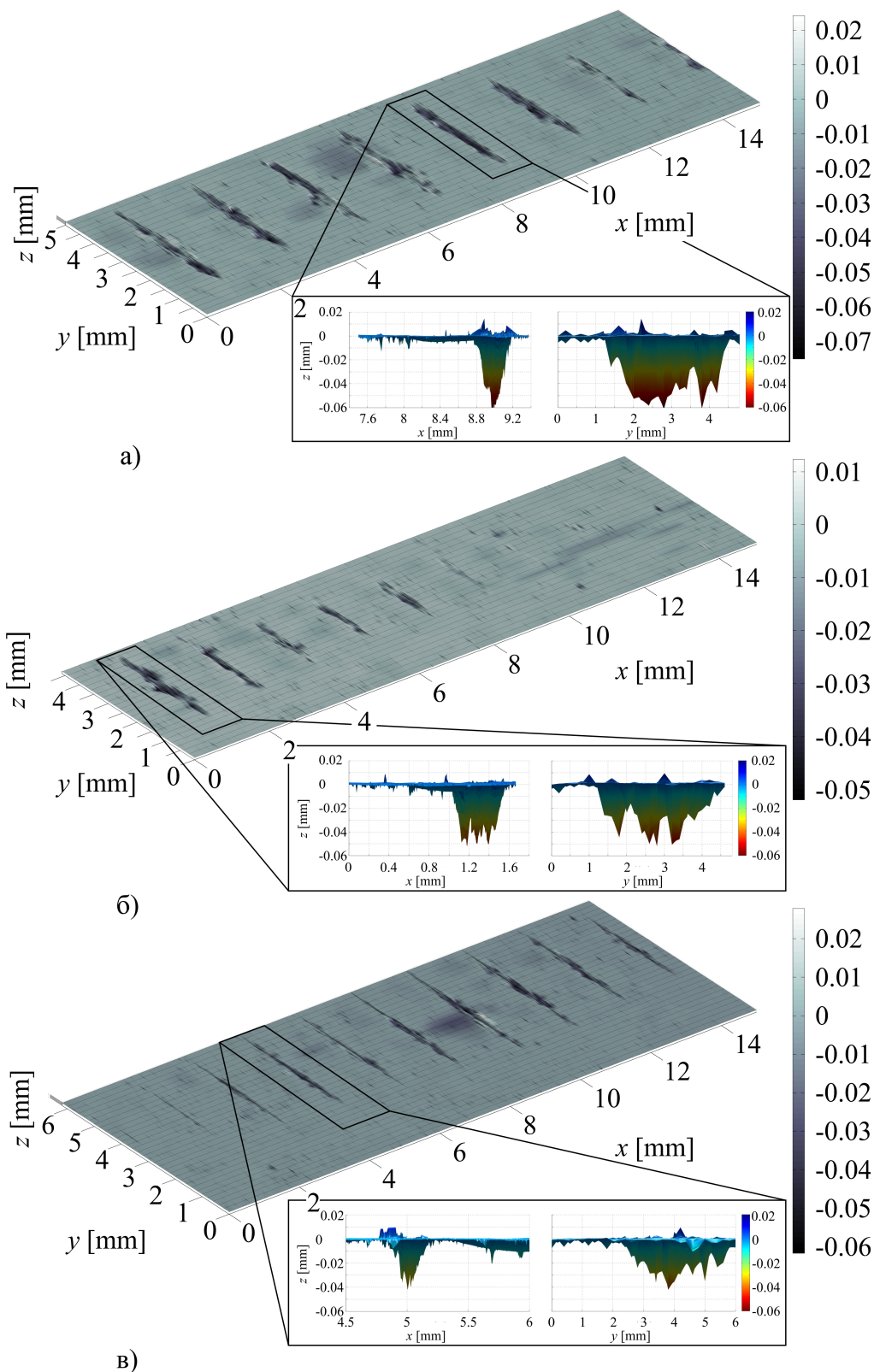


Слика 7.7: Изглед жљебова добијених при брзини микро резања  $v_s = 15$  и  $v_s = 25$   $m/s$  у граниту Буковик, алатима а)  $R0,2$ , б)  $R0,15$  и в)  $R0,06$   $mm$ .

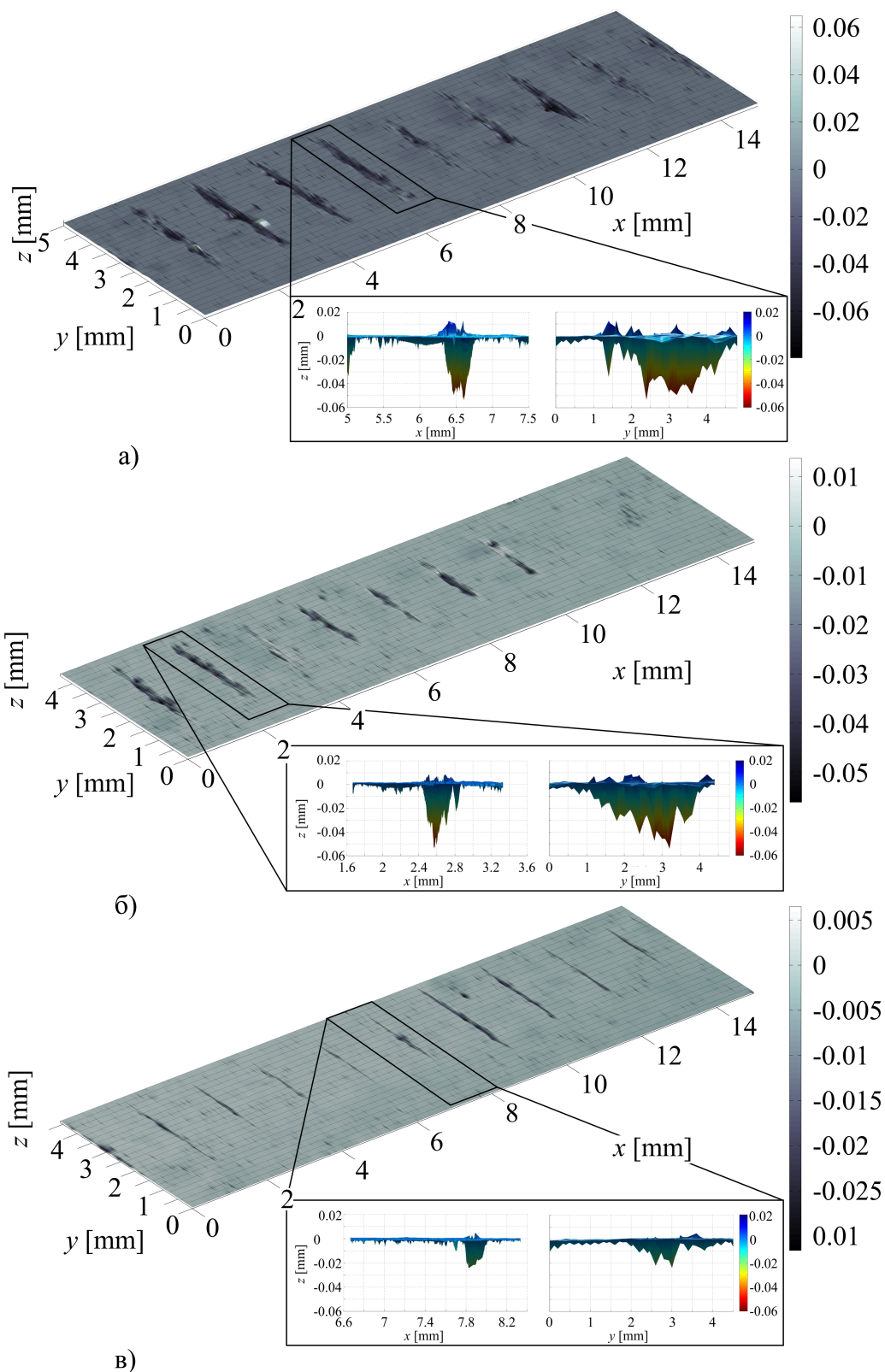
На сликама 7.8 и 7.9, не може се уочити издизање материјала по ивицама жље-



бова, као што се није могло уочити ни након микро резања гранита *Јошаница*. Смањењем вредности радијуса заобљења врха алата дошло је до смањења разарања материјала у режиму кртог лома, при чему се геометрија жљеба приближила оној жељеној. С обзиром на то да је гранит *Буковик* по тврдоћи веома сличан граниту *Јошаница* и његово понашање током и након интеракције са алатом слично је понашању гранита *Јошаница*. Код оба гранита, приликом повећања брзине микро резања, уочено је повећано разарања материјала.



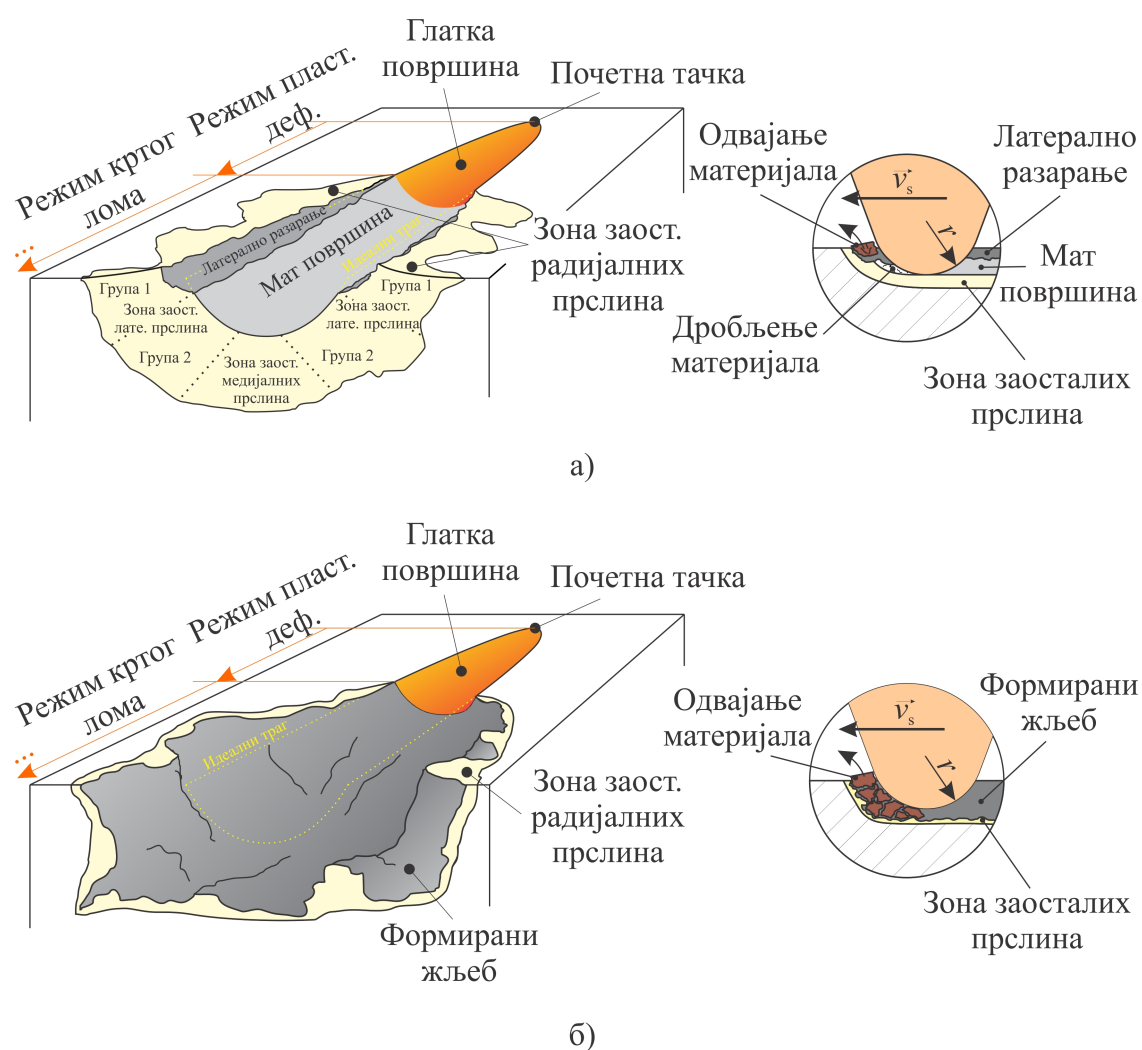
Слика 7.8: Скенирани жљебови у граниту Буковик, добијени алатима а)  $R0,2$ , б)  $R0,15$  и в)  $R0,06$  mm, при брзини микро резања  $v_s = 15$  m/s.



Слика 7.9: Скенирани жљебови у граниту Буковик, добијени алатима а)  $R0,2$ , б)  $R0,15$  и в)  $R0,06$  mm, при брзини микро резања  $v_s = 25$  m/s.

## 7.2 Упоредни приказ механизма микро резања мермера и гранита и корелација са методом утискивања утискивача

Претходно наведено јасно појашњава разлике између механизма микро резања мермера и гранита, што је приказано на слици 7.10. Поред тога што се ова два механизма разликују, оба могу успоставити спрега са процесом утискивања утискивача. Другим речима, методом утискивања утискивача при статичком дејству силе могуће је идентификовати феномене који се јављају током процеса микро резања.



Слика 7.10: Механизам микро резања а) мермера Плави ток и б) гранита Јошаница и Буковик.

Током утискивања утискивача уочено је да је, у зависности од тврдоће минерала на којем је вршено утискивање, дубина продирања утискивача у материјал

варијабилна. Поред наведеног, јављање истоимених фаза које описују појаве одређених типова прслина одвијаће се на различитим дубинама, у зависности од самог минерала. Оваква појава може се поистоветити са феноменом који се јавља током процеса микро резања, а где се при једном проласку алата кроз више различитих минерала, различите тврдоће, може јавити појава различитих типова прслина у њиховој зони, чак и до њиховог одсуства. Штавише, након преласка са режима пластичног деформисања на режим кртог лома могуће је поновно враћање на режим пластичног деформисања без смањења дубине резања. Ово се постиже уколико алат захвати минерал који има таква својства која у комбинацији са режимима обраде и геометријом алата обезбеђују обраду материјала у дуктилном режиму. Међутим, с обзиром да су материјали на бази мермера и гранита хетерогени по саставу, а да се минерал који се у одређеном тренутку обрађује не може предвидети, неопходно је да се за критичну дубину продирања изабере најнеповољнији случај, односно онај где дубине продирања имају минималне вредности. На исти начин и код методе утискивања утискивача при статичком дејству силе утискивања дефинисана је критична дубина продирања утискивача.

---

# СПЕЦИФИЧНА ЕНЕРГИЈА МИКРО РЕЗАЊА

## 8.1 Специфична енергија микро резања

Специфична енергија микро резања добијена је на основу вредности интензитета тангенцијалне компоненте ( $F_t$ ) силе резања, дужине формираног жлеба ( $L$ ) и запремине уклоњеног материјала ( $V$ ):

$$u = \frac{F_t \cdot L}{V}. \quad (8.1)$$

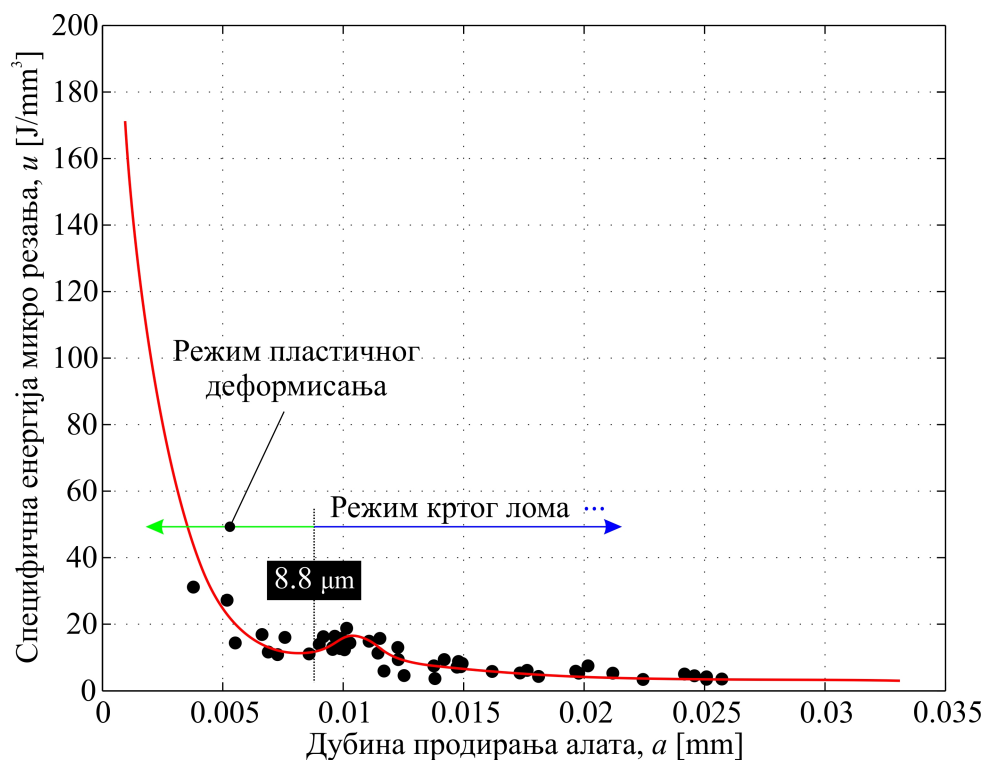
Ова енергија одређена је за сва три материјала коришћењем алата радијуса заобљења врха  $R0,2$  и  $R0,15$  mm и при брзинама микро резања 15 и 25 m/s. Као што је већ објашњено у претходним поглављима, резултати обраде алатом  $R0,06$  mm, изузети су приликом одређивања специфичне енергије микро резања зато што коришћена опрема није била у стању да детектује силе на дубинама јављања режима пластичног деформисања. Приликом одређивања вредности специфичне енергије микро резања, за вредност запремине, коришћена је идеална запремина која би се уклонила приликом проласка дијамантског врха алата кроз материјал. С обзиром да се у току обраде, при режиму кртог лома, одстрањује већа количина материјала од жељене, израчунате вредности специфичне енергије микро резања биле су нешто веће од стварне.

### 8.1.1 Специфична енергија микро резања мермера *Плави ток*

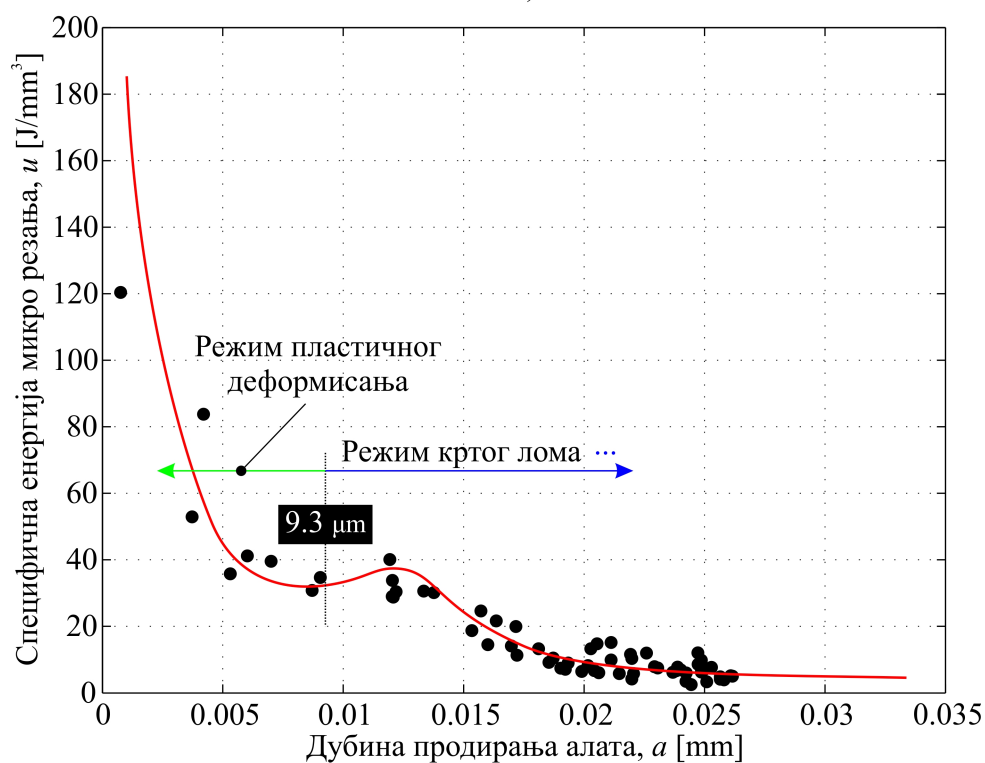
Анализом добијених вредности специфичне енергије микро резања мермера *Плави ток*, приказане графицима на слици 8.1, може се уочити да са повећањем брзине микро резања са 15 на 25 m/s, долази до раста вредности специфичне енергије микро резања. Оба графика односе се за обраду материјала алатом радијуса заобљења врха  $R0,2$  mm.

Такође, на оба графика на слици 8.1, могу се приметити две зоне промене. У првој зони, са повећањем дубине продирања алата у материјал долази до експоненцијалног пада вредности специфичне енергије микро резања. Ова зона одговара обради у режиму пластичног деформисања. Након преласка у режим кртог лома, пад вредности специфичне енергије микро резања драстично је мањи и овај прелазак одговара другој зони. Ове промене одвијају се на критичним вредностима дубина продирања, а које су одређене у претходном поглављу за сва три материјала. Приликом обраде алатом заобљења врха  $R0,2$ , и брзине микро резања  $v_s = 15$  m/s, вредност специфичне енергије микро резања износила је око  $u = 11,33$  J/mm<sup>3</sup>. Повећањем брзине микро резања на  $v_s = 25$  m/s, долази до раста вредности специфичне енергије микро резања  $u = 31,9$  J/mm<sup>3</sup>, при којој долази до преласка из једног режима у други.

Обрада алатом мањег заобљења врха ( $R0,15$  mm), доводи до промене у вредности специфичне енергије микро резања, слика 8.2. Као и приликом обраде алатом већег радијуса заобљења врха ( $R0,2$  mm), и овде се могу раздвојити две фазе обраде у којима се њихова граница поклапа са критичном дужином продирања.



а)



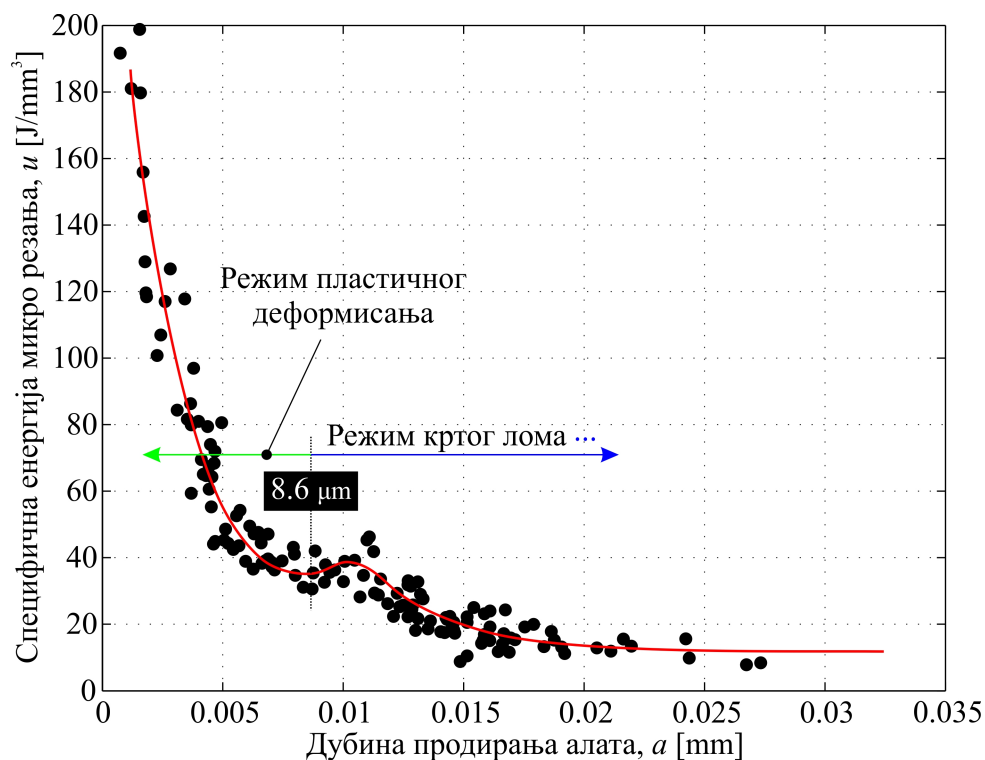
б)

Слика 8.1: Крива специфичне енергије микро резања мермера Плави ток при обради алатом радијуса  $R_{0,2}$  mm и брзинама микро резања а)  $v_s = 15$  m/s и б)  $v_s = 25$  m/s.

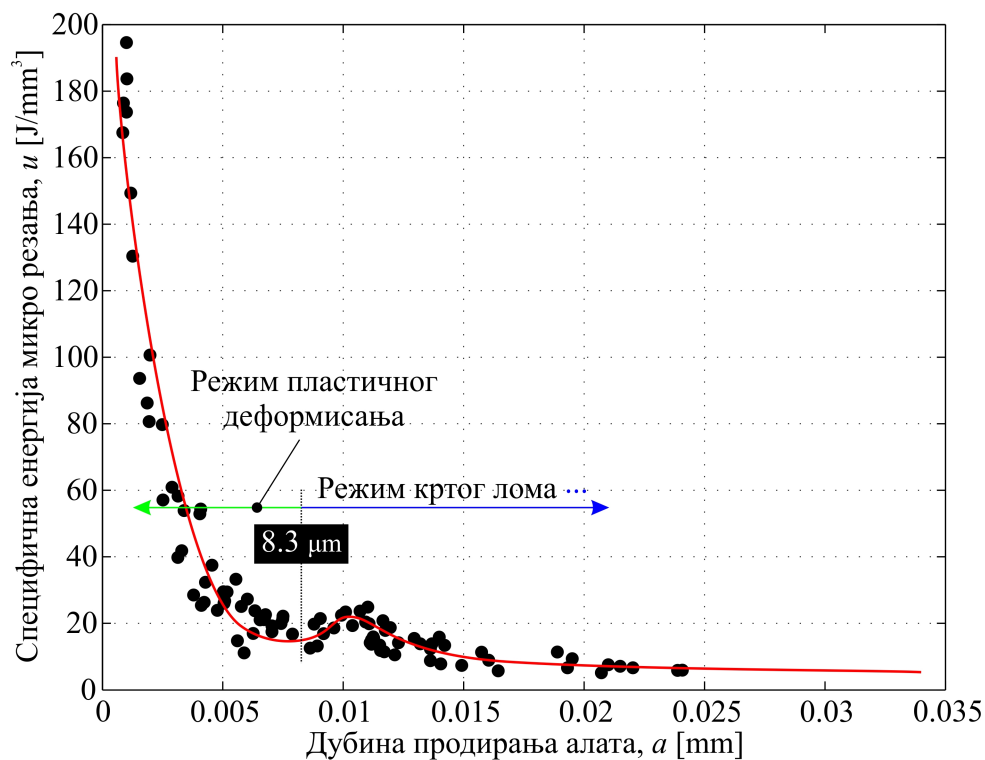


Вредности специфичне енергије микро резања приликом режима кртог лома, иако имају мале вредности, њихова стварна вредност још је мања, јер је у изразу (8.1), преко кога је одређивана вредност специфичне енергије, коришћена идеална запремина формираног жлеба, а не она стварна која се добије приликом проласка алата кроз обрадак.

Експоненцијални раст специфичне енергије микро резања при смањењу дубине продирања показатељ је да се највећи део енергије троши на пластично деформисање материјала, док је само мали проценат енергије утрошен за иницијализацију и ток прслина приликом обраде кртим разарањем материјала.



а)



б)

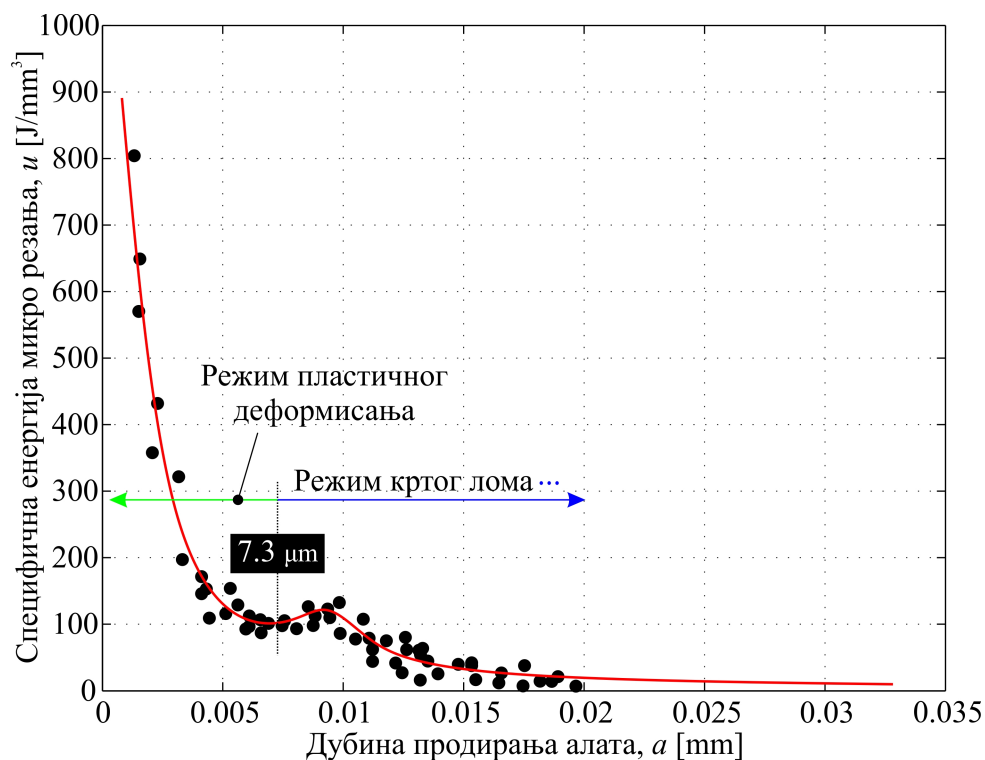
Слика 8.2: Крива специфичне енергије микро резања мермера Плави ток при обради алатом радијуса  $R0,15\text{ mm}$  и брзинама микро резања а)  $v_s = 15\text{ m/s}$  и б)  $v_s = 25\text{ m/s}$ .

### 8.1.2 Специфична енергија микро резања гранита Јошаница

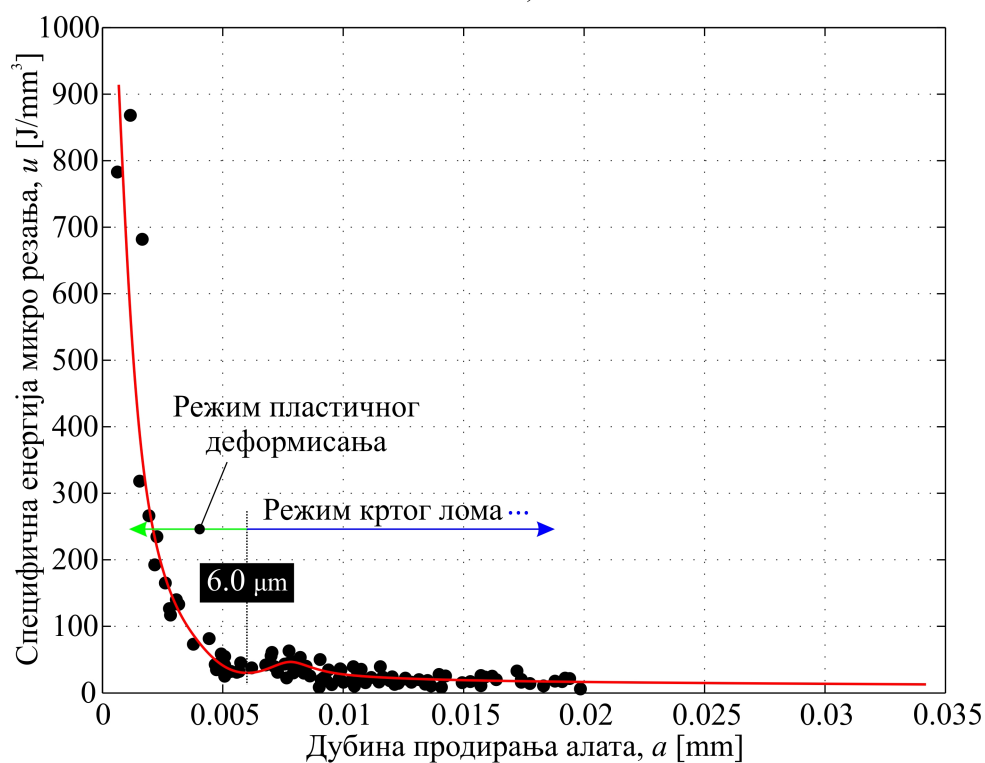
Већа тврдоћа гранита *Јошаница* у односу на мермер *Плави ток*, доводи до тога да је вредност специфичне енергије већа, односно да је више енергије неопходно да се уклони јединична запремина материјала код гранита. Користећи алат радијуса заобљења врха  $R0,2 \text{ mm}$ , слика 8.3, тренд крива специфичних енергија микро резања сличан је тренду забележеном након обраде мермера *Плави ток*. Уочена је нешто већа вредност специфичне енергије на граници између два режима, и она је износила  $u = 101,2 \text{ J/mm}^3$  при обради брзином микро резања од  $15 \text{ m/s}$ , односно  $u = 30,1 \text{ J/mm}^3$  при брзини микро резања  $25 \text{ m/s}$ .

Са повећањем брзине микро резања, долази до повећања разарања материјала, а то доводи до смањења специфичне енергије микро резања. Нагли пад специфичне енергије микро резања уочава се у тренутку преласка из режима пластичног деформисања у режим кртог лома. То се може објаснити чињеницом да интензитет разарања материјала веома брзо достиже свој максимум. Другим речима, у режиму кртог лома, прслине за веома кратко време остваре свој максимални раст, док са даљим повећањем дубине продирања, интензитет раста прслина се успорава.

Смањење вредности радијуса врха алата на  $R0,15 \text{ mm}$ , доводи до смањења разарања материјала приликом обраде, што је објашњено у претходном поглављу. Ово се директно одражава на специфичну енергију микро резања, слика 8.4. При мањим брзинама, пад вредности специфичне енергије микро резања је знатан, при чему на граници између два режима она износи  $u = 48,52 \text{ J/mm}^3$ , што представља пад у вредности специфичне енергије од  $52,1 \%$ . На већим брзинама микро резања ( $25 \text{ m/s}$ ), специфична енергија на граници између два режима приближно је иста за оба алата. Ово се може објаснити доминантном улогом брзине микро резања на интензитет разарања материјала.

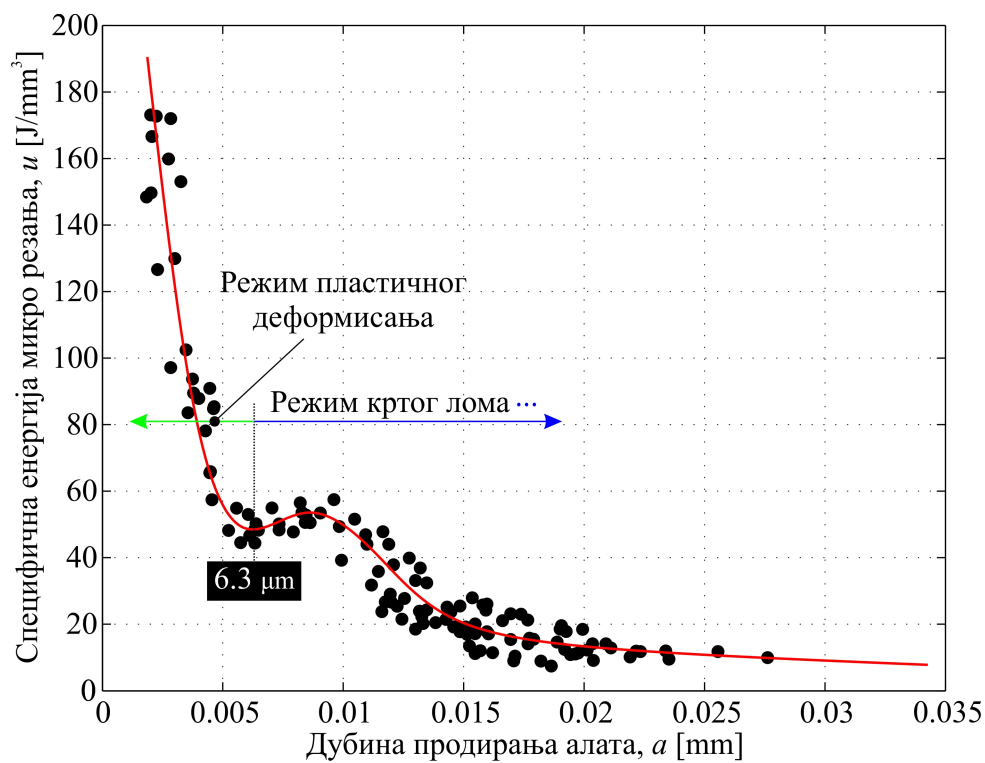


а)

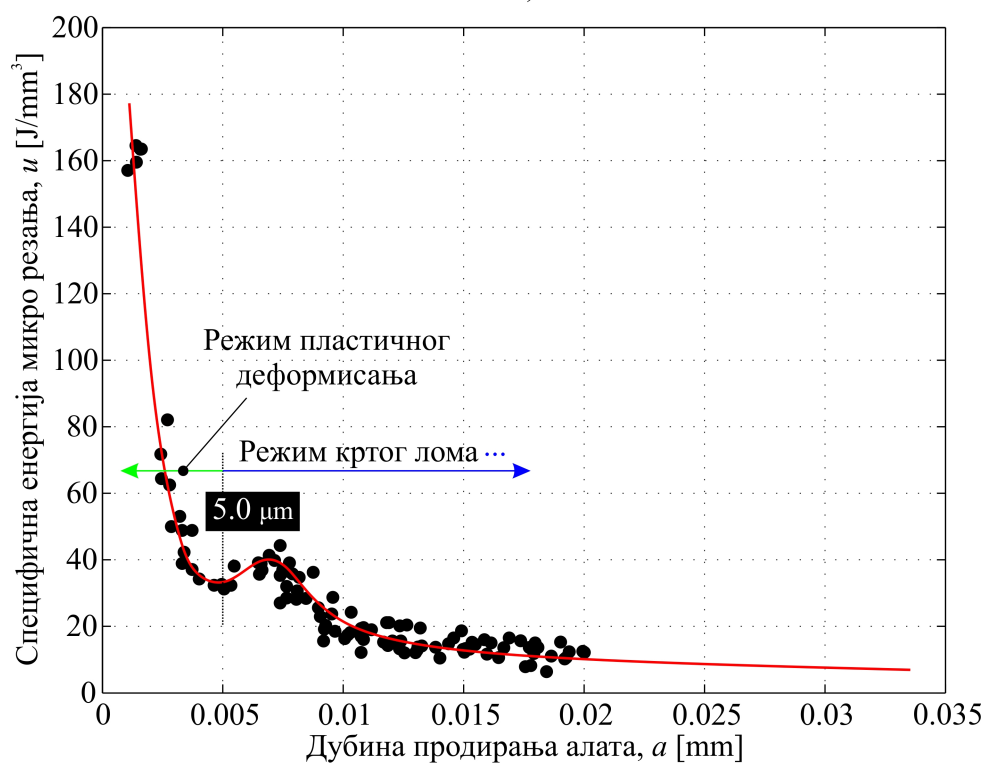


б)

Слика 8.3: Крива специфичне енергије микро резања гранита Јошаница при обради алатом радијуса  $R0,2 \text{ mm}$  и брзинама микро резања а)  $v_s = 15 \text{ m/s}$  и б)  $v_s = 25 \text{ m/s}$ .



а)



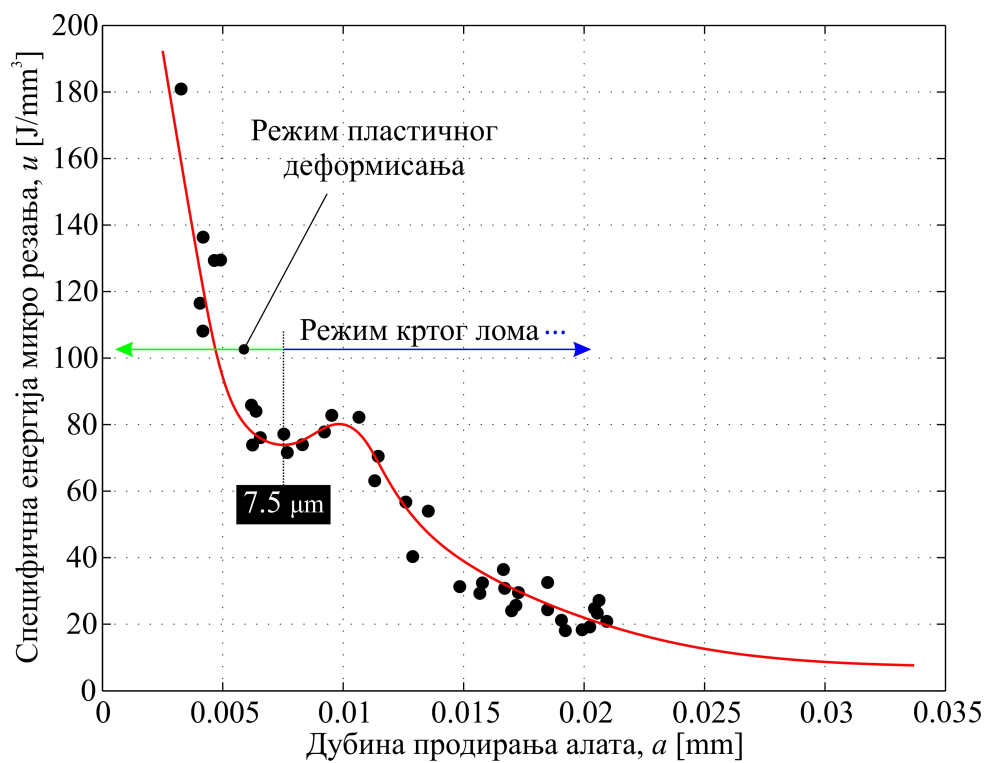
б)

Слика 8.4: Крива специфичне енергије микро резања гранита Јошаница при обради алатом радијуса  $R0,15\text{ mm}$  и брзинама микро резања а)  $v_s = 15\text{ m/s}$  и б)  $v_s = 25\text{ m/s}$ .

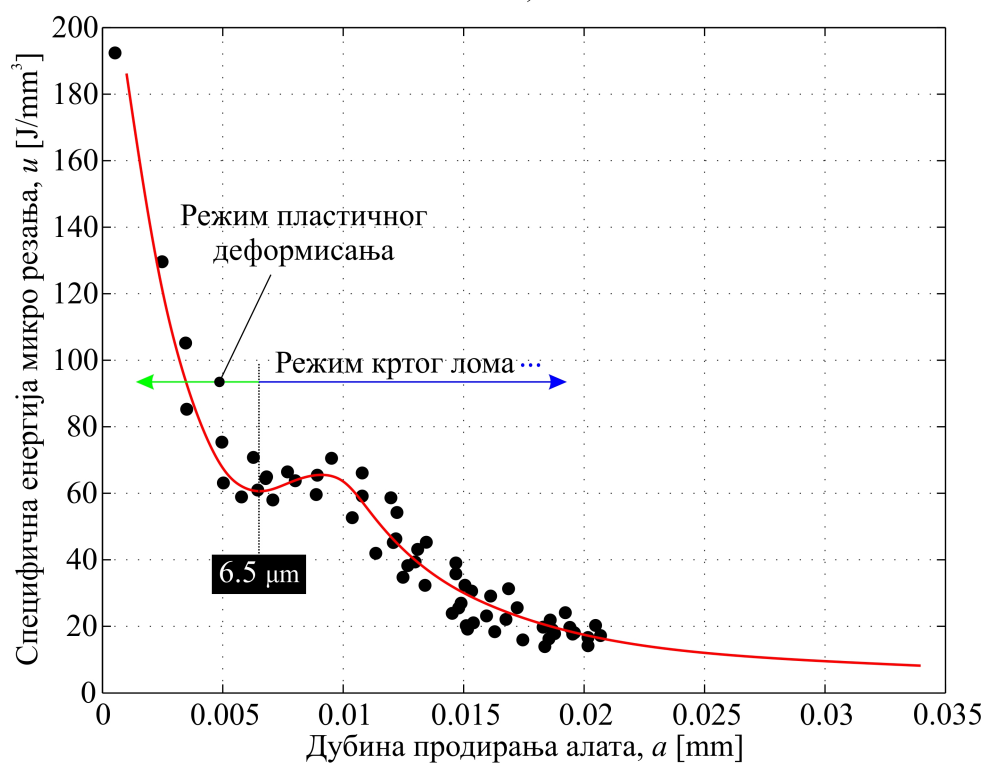
### 8.1.3 Специфична енергија микро резања гранита Буковик

Криве промене специфичне енергије микро резања гранита *Буковик* (слике 8.6 и 8.5), веома су сличне кривама промена специфичних енергија гранита *Јошанице*. При обради овог гранита алатом радијуса заобљења врха  $R0,2$  mm (слика 8.5), на мањим брзинама микро резања ( $v_s = 15$  m/s), вредност специфичне енергије микро резања нешто је мања у поређењу са вредности специфичне енергије микро резања гранита *Јошаница* при истим условима обраде, и она износи  $u = 73,9$  J/mm<sup>3</sup>. При повећању брзине микро резања ( $v_s = 25$  m/s), специфичне енергије приближно су исте код оба гранита, јер, као што је већ наведено, брзина микро резања има доминантну улогу на интензитет разарања материјала у режиму кртог лома. Промена у тренду криве специфичне енергије микро резања тачно се одвија на граници преласка из режима пластичног деформисања у режим кртог лома, а која је претходно одређена и износи  $a_c = 7,5$   $\mu$ m, за случај када је  $v_s = 15$  m/s, односно  $a_c = 6,5$   $\mu$ m, у случају вредности брзине микро резања износи  $v_s = 25$  m/s.

Смањењем радијуса врха алата на  $R0,15$  mm (слика 8.6), остварују се приближно исте вредности специфичне енергије микро резања као код гранита *Јошаница*, за оба случаја брзине микро резања.

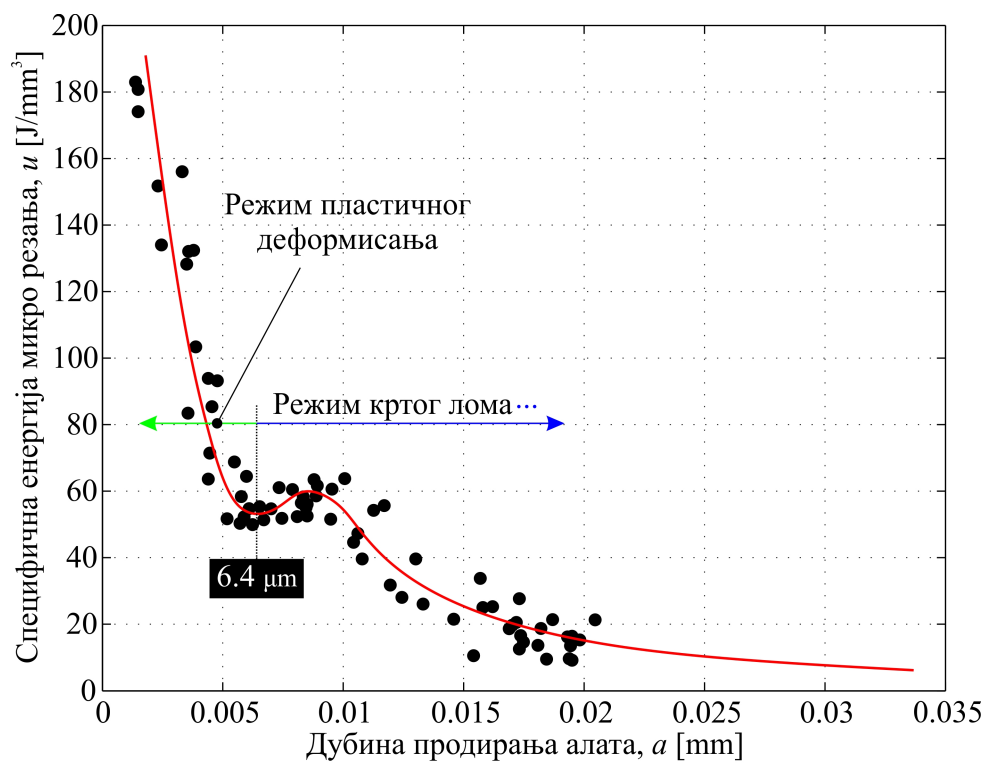


а)

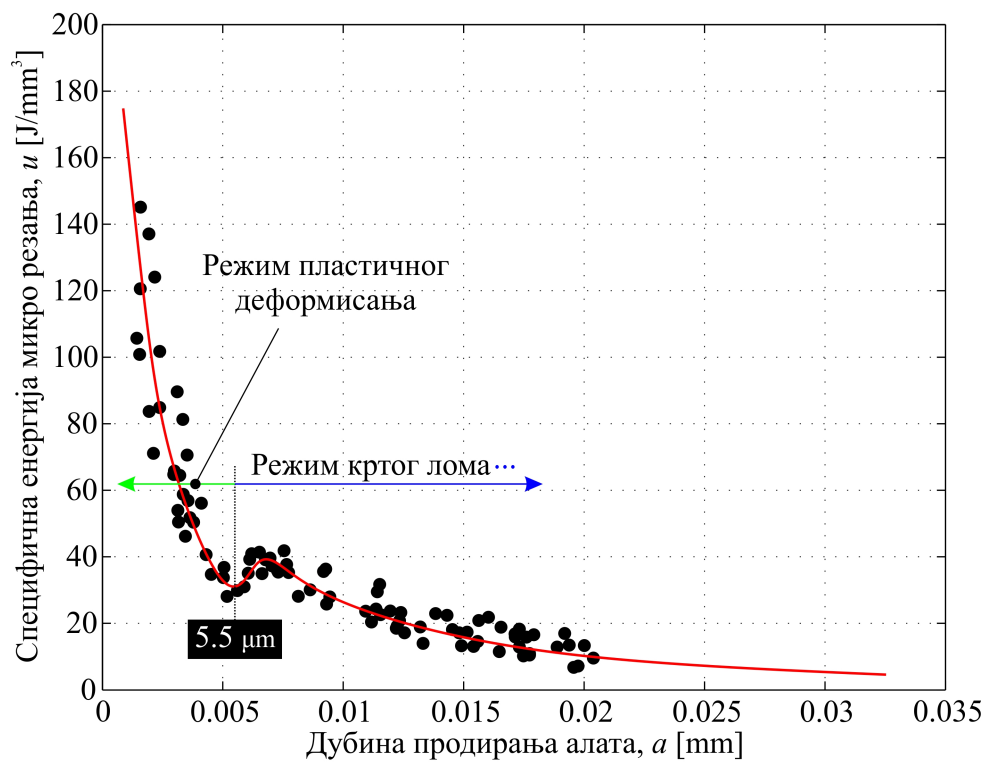


б)

Слика 8.5: Крива специфичне енергије микро резања гранита Буковик при обради са алатом радијуса  $R0,2 \text{ mm}$  и брзинама микро резања а)  $v_s = 15 \text{ m/s}$  и б)  $v_s = 25 \text{ m/s}$ .



а)



б)

Слика 8.6: Крива специфичне енергије микро резања гранита Буковик при обради алатом радијуса  $R0,15\text{ mm}$  и брзинама микро резања а)  $v_s = 15\text{ m/s}$  и б)  $v_s = 25\text{ m/s}$ .



---

# МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ КОМПОНЕНАТА СИЛЕ РЕЗАЊА

## $F_n$ И $F_t$

### 9.1 Формирање математичког модела компонената силе резања $F_n$ и $F_t$

Након спроведених експеримената микро резања и прикупљених података о интензитетима компонената силе резања ( $F_n$  и  $F_t$ ) у функцији од брзине микро резања ( $v_s$ ), дубине продирања алата ( $a$ ) и вредности радијуса заобљења врха алата ( $r$ ), могуће је формирати њихов математички модел у облику степене функције [111]:

$$R = C \prod_{i=1}^k f_i^{p_i}, \quad (9.1)$$

при чему наведене променљиве представљају:

- $C, p_i$  – параметре обрадљивости,
- $f_i$  – вредности фактора,
- $k$  – број фактора.

У овом случају, ради се о трофакторном плану експеримента ( $k = 3$ ), па се једначина (9.1), то јест једначине обрадљивости могу написати у облику:

$$\begin{aligned} F_n^m &= C_n \cdot v_s^{p_{n1}} \cdot a^{p_{n2}} \cdot r^{p_{n3}}, \\ F_t^m &= C_t \cdot v_s^{p_{t1}} \cdot a^{p_{t2}} \cdot r^{p_{t3}}. \end{aligned} \quad (9.2)$$

За одређивање непознатих вредности параметара обрадљивости  $p_{n1}$ ,  $p_{n2}$  и  $p_{n3}$ , односно  $p_{t1}$ ,  $p_{t2}$  и  $p_{t3}$ , било је неопходно спровести  $N = 2^k + n_0 = 2^3 + 4 = 12$  експеримената, међу којима су четири контролна. План експеримента на основу којег се вршило формирање функције обрадљивости приказан је у табели 9.1.

**Табела 9.1:** План експеримента за план типа  $2^3$ .

| Редни бр. експеримента | План матрице експеримената |                          |                  | Резултати експеримената |              |
|------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|-------------------------|--------------|
|                        | Фактори                    |                          |                  |                         |              |
|                        | $v_s$<br>[m/s]             | $a$<br>[ $\mu\text{m}$ ] | $r$<br>[mm]      | $F_n$<br>[N]            | $F_t$<br>[N] |
| E <sub>1</sub>         | $v_{s\text{max}}$          | $a_{\text{max}}$         | $r_{\text{max}}$ | $F_{n1}$                | $F_{t1}$     |
| E <sub>2</sub>         | $v_{s\text{min}}$          | $a_{\text{max}}$         | $r_{\text{max}}$ | $F_{n2}$                | $F_{t2}$     |
| E <sub>3</sub>         | $v_{s\text{max}}$          | $a_{\text{min}}$         | $r_{\text{max}}$ | $F_{n3}$                | $F_{t3}$     |
| E <sub>4</sub>         | $v_{s\text{max}}$          | $a_{\text{max}}$         | $r_{\text{min}}$ | $F_{n4}$                | $F_{t4}$     |
| E <sub>5</sub>         | $v_{\text{ssr}}$           | $a_{\text{sr}}$          | $r_{\text{sr}}$  | $F_{n5}$                | $F_{t5}$     |
| E <sub>6</sub>         | $v_{s\text{min}}$          | $a_{\text{max}}$         | $r_{\text{min}}$ | $F_{n6}$                | $F_{t6}$     |
| E <sub>7</sub>         | $v_{s\text{max}}$          | $a_{\text{min}}$         | $r_{\text{min}}$ | $F_{n7}$                | $F_{t7}$     |
| E <sub>8</sub>         | $v_{\text{ssr}}$           | $a_{\text{sr}}$          | $r_{\text{sr}}$  | $F_{n8}$                | $F_{t8}$     |
| E <sub>9</sub>         | $v_{s\text{min}}$          | $a_{\text{min}}$         | $r_{\text{min}}$ | $F_{n9}$                | $F_{t9}$     |
| E <sub>10</sub>        | $v_{\text{ssr}}$           | $a_{\text{sr}}$          | $r_{\text{sr}}$  | $F_{n10}$               | $F_{t10}$    |
| E <sub>11</sub>        | $v_{\text{ssr}}$           | $a_{\text{sr}}$          | $r_{\text{sr}}$  | $F_{n11}$               | $F_{t11}$    |
| E <sub>12</sub>        | $v_{s\text{min}}$          | $a_{\text{min}}$         | $r_{\text{max}}$ | $F_{n12}$               | $F_{t12}$    |

За њено формирање било је неопходно дефинисати границе интервала променљивих  $v_s$ ,  $a$  и  $r$  на основу којих се могу видети планови експеримената, за сва три испитивана материјала, у табелама 9.3, 9.5 и 9.7. У њима су, такође, приказане измерене вредности компонената силе резања  $F_n$  и  $F_t$  које су добијене приликом микро резања према условима обраде датим у поменутиим табелама.

Следећи корак, неопходан за одређивање вредности параметара обрадљивости, био је да се функција (9.2) логаритмовањем преведе у линеарни облик, након

чега она гласи:

$$\begin{aligned}\ln F_n &= \ln C_n + p_{n1} \cdot \ln v_s + p_{n2} \cdot \ln a + p_{n3} \cdot \ln r, \\ \ln F_t &= \ln C_t + p_{t1} \cdot \ln v_s + p_{t2} \cdot \ln a + p_{t3} \cdot \ln r,\end{aligned}\tag{9.3}$$

или

$$\begin{aligned}y_n &= b_{n0} + b_{n1} \cdot x_{n1} + b_{n2} \cdot x_{n2} + b_{n3} \cdot x_{n3}, \\ y_t &= b_{t0} + b_{t1} \cdot x_{t1} + b_{t2} \cdot x_{t2} + b_{t3} \cdot x_{t3},\end{aligned}\tag{9.4}$$

где су:

$$\begin{aligned}y_n &= \ln F_n, \quad x_{n1} = \ln v_s, \quad x_{n2} = \ln a, \quad x_{n3} = \ln r, \\ b_{n0} &= p_{n0} = \ln C_n, \quad b_{n1} = p_{n1}, \quad b_{n2} = p_{n2}, \quad b_{n3} = p_{n3},\end{aligned}$$

односно:

$$\begin{aligned}y_t &= \ln F_t, \quad x_{t1} = \ln v_s, \quad x_{t2} = \ln a, \quad x_{t3} = \ln r, \\ b_{t0} &= p_{t0} = \ln C_t, \quad b_{t1} = p_{t1}, \quad b_{t2} = p_{t2}, \quad b_{t3} = p_{t3}.\end{aligned}$$

Прорачун коефицијената  $b_{n0}$ ,  $b_{n1}$ ,  $b_{n2}$  и  $b_{n3}$ , односно  $b_{t0}$ ,  $b_{t1}$ ,  $b_{t2}$  и  $b_{t3}$  поједностављује се увођењем нових независно променљивих величина  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ , на три нивоа: +1, -1 и 0 преко једначина трансформације:

$$\begin{aligned}x_1 &= 1 + 2 \cdot \frac{\ln v_s - \ln v_{s\max}}{\ln v_{s\max} - \ln v_{s\min}}, \\ x_2 &= 1 + 2 \cdot \frac{\ln a - \ln a_{\max}}{\ln a_{\max} - \ln a_{\min}}, \\ x_3 &= 1 + 2 \cdot \frac{\ln r - \ln r_{\max}}{\ln r_{\max} - \ln r_{\min}}.\end{aligned}\tag{9.5}$$

На основу једначина трансформације, а с обзиром на услове  $v_{sr}^2 = v_{s\min} \cdot v_{s\max}$ ,  $a_{sr}^2 = a_{\min} \cdot a_{\max}$  и  $r_{sr}^2 = r_{\min} \cdot r_{\max}$ , формиран су следећи односи између природних и кодираних вредности фактора:

$$\begin{aligned}v_{s\max} &= +1, \quad a_{\max} = +1, \quad r_{\max} = +1, \\ v_{sr} &= 0, \quad a_{sr} = 0, \quad r_{sr} = 0, \\ v_{s\min} &= -1, \quad a_{\min} = -1, \quad r_{\min} = -1.\end{aligned}$$

За новонастале вредности, формира се план-матрица  $2^k + n_0 = 2^3 + 4$  приказана у табели 9.2.

**Табела 9.2:** План матрица.

| Редни бр.<br>експеримента | План матрице<br>експеримента |       |       |       | Резултати<br>експеримента |                 |
|---------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|---------------------------|-----------------|
|                           | Кодови                       |       |       |       | $y_n = \ln F_n$           | $y_t = \ln F_t$ |
|                           | $x_0$                        | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ |                           |                 |
| E <sub>1</sub>            | +1                           | +1    | +1    | +1    | $y_{n1}$                  | $y_{t1}$        |
| E <sub>2</sub>            | +1                           | -1    | +1    | +1    | $y_{n2}$                  | $y_{t2}$        |
| E <sub>3</sub>            | +1                           | +1    | -1    | +1    | $y_{n3}$                  | $y_{t3}$        |
| E <sub>4</sub>            | +1                           | +1    | +1    | -1    | $y_{n4}$                  | $y_{t4}$        |
| E <sub>5</sub>            | +1                           | 0     | 0     | 0     | $y_{n5}$                  | $y_{t5}$        |
| E <sub>6</sub>            | +1                           | -1    | +1    | -1    | $y_{n6}$                  | $y_{t6}$        |
| E <sub>7</sub>            | +1                           | +1    | -1    | -1    | $y_{n7}$                  | $y_{t7}$        |
| E <sub>8</sub>            | +1                           | 0     | 0     | 0     | $y_{n8}$                  | $y_{t8}$        |
| E <sub>9</sub>            | +1                           | -1    | -1    | -1    | $y_{n9}$                  | $y_{t9}$        |
| E <sub>10</sub>           | +1                           | 0     | 0     | 0     | $y_{n10}$                 | $y_{t10}$       |
| E <sub>11</sub>           | +1                           | 0     | 0     | 0     | $y_{n11}$                 | $y_{t11}$       |
| E <sub>12</sub>           | +1                           | -1    | -1    | +1    | $y_{n12}$                 | $y_{t12}$       |

Системи општих једначина на основу којих се одређују вредности коефицијената  $b_{n0}$ ,  $b_{n1}$ ,  $b_{n2}$  и  $b_{n3}$ , односно  $b_{t0}$ ,  $b_{t1}$ ,  $b_{t2}$  и  $b_{t3}$  гласе:

$$b_i = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} x_{im} \cdot y_m, i = 0, 1, 2, 3, \quad (9.6)$$

које с обзиром на план-матрицу приказану у табели 9.2, прелазе у облик:

$$b_{n0} = \frac{1}{12}(y_{n1} + y_n + y_{n3} + \dots + y_{n12}), \quad (9.7)$$

$$b_{n1} = \frac{1}{8}(y_{n1} - y_{n2} + y_{n3} + y_{n4} - y_{n6} + y_{n7} - y_{n9} - y_{n12}), \quad (9.8)$$

$$b_{n2} = \frac{1}{8}(y_{n1} + y_{n2} - y_{n3} + y_{n4} + y_{n6} - y_{n7} - y_{n9} - y_{n12}), \quad (9.9)$$

$$b_{n3} = \frac{1}{8}(y_{n1} + y_{n2} + y_{n3} - y_{n4} - y_{n6} - y_{n7} - y_{n9} + y_{n12}), \quad (9.10)$$

ОДНОСНО:

$$b_{t0} = \frac{1}{12}(y_{t1} + y_{t2} + y_{t3} + \dots + y_{t12}), \quad (9.11)$$

$$b_{t1} = \frac{1}{8}(y_{t1} - y_{t2} + y_{t3} + y_{t4} - y_{t6} + y_{t7} - y_{t9} - y_{t12}), \quad (9.12)$$

$$b_{t2} = \frac{1}{8}(y_{t1} + y_{t2} - y_{t3} + y_{t4} + y_{t6} - y_{t7} - y_{t9} - y_{t12}), \quad (9.13)$$

$$b_{t3} = \frac{1}{8}(y_{t1} + y_{t2} + y_{t3} - y_{t4} - y_{t6} - y_{t7} - y_{t9} + y_{t12}). \quad (9.14)$$

Одређивањем коефицијената  $b_{n0}$ ,  $b_{n1}$ ,  $b_{n2}$  и  $b_{n3}$ , односно  $b_{t0}$ ,  $b_{t1}$ ,  $b_{t2}$  и  $b_{t3}$  могуће је доћи до вредности параметара обрадљивости преко израза:

$$\begin{aligned} p_{n1} &= \frac{2 \cdot b_{n1}}{\ln \frac{v_{s\max}}{v_{s\min}}}, \\ p_{n2} &= \frac{2 \cdot b_{n2}}{\ln \frac{a_{\max}}{a_{\min}}}, \\ p_{n3} &= \frac{2 \cdot b_{n3}}{\ln \frac{r_{\max}}{r_{\min}}}, \end{aligned} \quad (9.15)$$

$$p_{n0} = \ln C_n = b_{n0} + b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} - (p_{n1} \cdot \ln v_{s\max} + p_{n2} \cdot \ln a_{\max} + p_{n3} \cdot \ln r_{\max}),$$

↓

$$C_n = e^{b_{n0} + b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} - (p_{n1} \cdot \ln v_{s\max} + p_{n2} \cdot \ln a_{\max} + p_{n3} \cdot \ln r_{\max})}, \quad (9.16)$$

ОДНОСНО:

$$\begin{aligned} p_{t1} &= \frac{2 \cdot b_{t1}}{\ln \frac{v_{s\max}}{v_{s\min}}}, \\ p_{t2} &= \frac{2 \cdot b_{t2}}{\ln \frac{a_{\max}}{a_{\min}}}, \\ p_{t3} &= \frac{2 \cdot b_{t3}}{\ln \frac{r_{\max}}{r_{\min}}}, \end{aligned} \quad (9.17)$$

$$\begin{aligned}
 p_{t0} = \ln C_t &= b_{t0} + b_{t1} + b_{t2} + b_{t3} - (p_{t1} \cdot \ln v_{s\max} + p_{t2} \cdot \ln a_{\max} + p_{t3} \cdot \ln r_{\max}), \\
 \Downarrow \\
 C_t &= e^{b_{t0} + b_{t1} + b_{t2} + b_{t3} - (p_{t1} \cdot \ln v_{s\max} + p_{t2} \cdot \ln a_{\max} + p_{t3} \cdot \ln r_{\max})}.
 \end{aligned}
 \tag{9.18}$$

С обзиром да је за потребе формирања математичког модела било неопходно извршити четири контролна експеримента који се односе на средње вредности  $v_{sr}$ ,  $a_{sr}$  и  $r_{sr}$ , спроведени су додатни (допунски) експерименти, при чему су вредности фактора износиле:  $v_{sr} = 19,4$  m/s,  $r_{sr} = 0,17$  mm и  $a_{sr} = 5,6$   $\mu$ m за мермер *Плави ток*,  $a_{sr} = 2,5$   $\mu$ m за гранит *Јошаница*, као и  $a_{sr} = 3,6$   $\mu$ m за гранит *Буковик*.

Након формирања математичког модела, одређена је његова адекватност, као и сигнификантност параметара модела  $b_{ni}$  и  $b_{ti}$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ ). Сигнификантност се одређује за сваки параметар модела независно од осталих параметара и то према  $F$ -критеријуму, упоређујући однос дисперзије параметара са дисперзијом резултата у нултој тачки, односно:

$$\frac{s_i^2}{s_E^2} > F_{\text{tab}}.
 \tag{9.19}$$

Израз за дисперзију параметара модела гласи:

$$s_i^2 = \frac{S \cdot b_i}{f_i},
 \tag{9.20}$$

где је сума квадрата:

$$\begin{aligned}
 S \cdot b_i &= b_i \sum_{u=1}^{12} x_{iu} \cdot y_u = N_i \cdot b_i^2, \quad i = 0, 1, 2, 3, \\
 i = 0, N_0 &= 12, \\
 i = 1, 2, 3, N_i &= 8,
 \end{aligned}
 \tag{9.21}$$

а степен слободе  $f_i = 1$ .

Дисперзија резултата у нултој тачки гласи:

$$s_E^2 = \frac{S_E}{f_E}, \quad (9.22)$$

где је сума квадрата:

$$S_E = \sum_{u=1}^4 (y_{0u} - \hat{y}_0)^2 = \sum_{u=1}^4 y_{0u}^2 - \frac{1}{n_0} \left( \sum_{u=1}^4 y_{0u} \right)^2, \quad (9.23)$$

а степен слободе  $f_E = n_0 - 1 = 4 - 1 = 3$ .

Параметри модела  $b_{ni}$  и  $b_{ti}$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ ) могу се сматрати сигнификантним уколико је однос дисперзије параметара са дисперзијом у нултој тачки већи од 10,13.

Као што је то био случај са сигнификантношћу, адекватност се, такође, одређује према  $F$ -критеријуму, на оснвоу ког се модел сматра адекватаним уколико је задовољено:

$$F_{\text{rac}} < F_{\text{tab}}. \quad (9.24)$$

Таблична вредност  $F$ -критеријума за степен слободе  $f_{LF} = f_R - f_E = N - k - 1 - (n_0 - 1) = 12 - 3 - 1 - (4 - 1) = 5$  и  $f_E = n_0 - 1 = 4 - 1 = 3$  износи  $F_{\text{tab}} = 9,01$ . Рачунске вредности  $F$ -критеријума одређују се према изразу:

$$F_{\text{rac}} = \frac{S_M^2}{S_E^2}, \quad (9.25)$$

где је  $S_M^2$  дисперзија разлике екперименталних  $y_i$  и рачунских  $\hat{y}_i$  вредности:

$$S_M^2 = \frac{S_{LF}}{f_{LF}} = \frac{S_R - S_E}{f_R - f_E}, \quad (9.26)$$

$$S_R - S_E = \sum_{u=1}^{12} (y_u - \hat{y}_u)^2 - \left| \sum_{u=1}^4 y_{0u}^2 - \frac{1}{n_0} \left( \sum_{u=1}^4 y_{0u} \right)^2 \right|, \quad (9.27)$$

а дисперзија резултата за експерименте средњег нивоа:

$$S_E^2 = \frac{1}{f_E} \left| \sum_{u=1}^4 y_{0u}^2 - \frac{1}{n_0} \left( \sum_{u=1}^4 y_{0u} \right)^2 \right| \quad (9.28)$$



### 9.1.1 Математички модел за мермер *Плави ток*

Након спроведених експеримената на мермеру *Плави ток*, а чији су резултати приказани у табели 9.3, одређене су вредности параметара обрадљивости, како за нормалну компоненту силе резања ( $F_n$ ), тако и за тангенцијалну ( $F_t$ ), након чега њихови изрази имају облик:

$$F_n^m = 904,9322 \cdot v_s^{-0,473} \cdot a^{0,6083} \cdot r^{2,1854}, \quad (9.29)$$

$$F_t^m = 0,3147 \cdot v_s^{-0,0112} \cdot a^{0,7165} \cdot r^{-1,0199}. \quad (9.30)$$

Табела 9.3: План експеримената - мермер *Плави ток*.

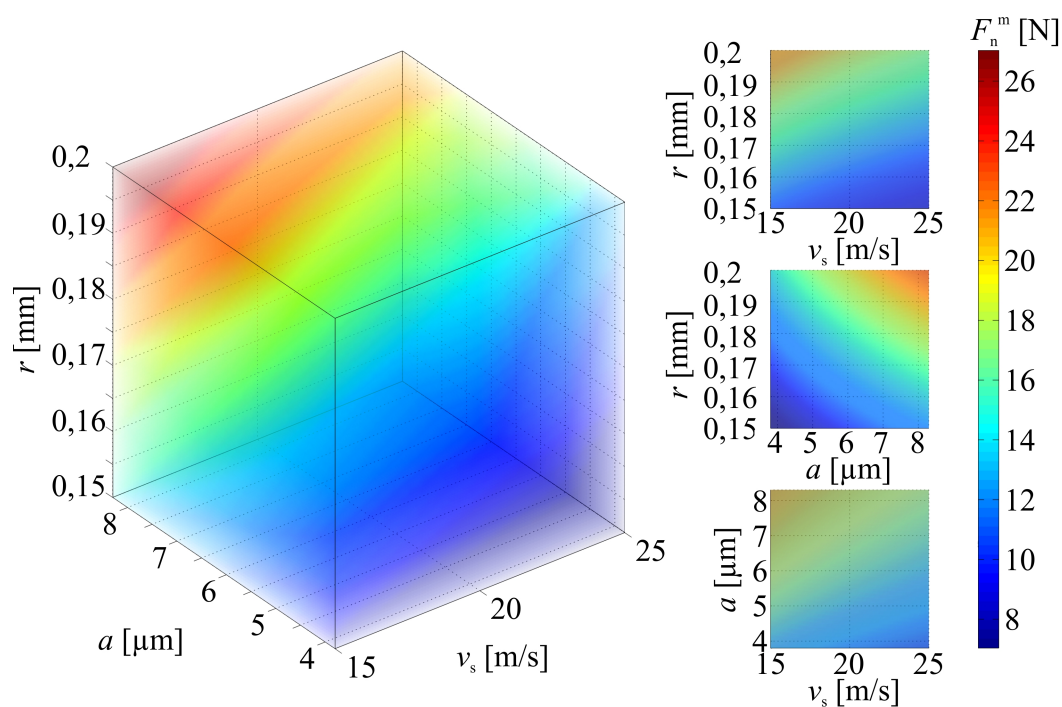
| Р. бр. експ.    | План матрице експеримената |                   |             |        |       |       |       | Резултати експеримената |              |           |           |
|-----------------|----------------------------|-------------------|-------------|--------|-------|-------|-------|-------------------------|--------------|-----------|-----------|
|                 | Фактори                    |                   |             | Кодови |       |       |       | $F_n$<br>[N]            | $F_t$<br>[N] | $\ln F_n$ | $\ln F_t$ |
|                 | $v_s$<br>[m/s]             | $a$<br>[ $\mu$ m] | $r$<br>[mm] | $x_0$  | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ |                         |              |           |           |
| E <sub>1</sub>  | 25                         | 8,3               | 0,2         | +1     | +1    | +1    | +1    | 22,32                   | 9,45         | 3,105     | 2,246     |
| E <sub>2</sub>  | 15                         | 8,3               | 0,2         | +1     | -1    | +1    | +1    | 27,1                    | 6            | 3,299     | 1,792     |
| E <sub>3</sub>  | 25                         | 3,8               | 0,2         | +1     | +1    | -1    | +1    | 13,2                    | 4,9          | 2,58      | 1,589     |
| E <sub>4</sub>  | 25                         | 8,3               | 0,15        | +1     | +1    | +1    | -1    | 14,6                    | 6,8          | 2,681     | 1,917     |
| E <sub>5</sub>  | 19,4                       | 5,6               | 0,17        | +1     | 0     | 0     | 0     | 14,23                   | 6,84         | 2,655     | 1,923     |
| E <sub>6</sub>  | 15                         | 8,3               | 0,15        | +1     | -1    | +1    | -1    | 14,3                    | 9,6          | 2,66      | 2,262     |
| E <sub>7</sub>  | 25                         | 3,8               | 0,15        | +1     | +1    | -1    | -1    | 7                       | 4            | 1,946     | 1,386     |
| E <sub>8</sub>  | 19,4                       | 5,6               | 0,17        | +1     | 0     | 0     | 0     | 9,56                    | 7,95         | 2,258     | 2,073     |
| E <sub>9</sub>  | 15                         | 3,8               | 0,15        | +1     | -1    | -1    | -1    | 9,5                     | 8,2          | 2,251     | 2,104     |
| E <sub>10</sub> | 19,4                       | 5,6               | 0,17        | +1     | 0     | 0     | 0     | 12,03                   | 8,72         | 2,487     | 2,166     |
| E <sub>11</sub> | 19,4                       | 5,6               | 0,17        | +1     | 0     | 0     | 0     | 12,15                   | 4,93         | 2,497     | 1,595     |
| E <sub>12</sub> | 15                         | 3,8               | 0,2         | +1     | -1    | -1    | +1    | 21,5                    | 2,7          | 3,068     | 0,993     |

Графички приказ математичког модела за мермер *Плави ток* приказан је на слици 9.1. Највеће рачунске вредности нормалне компоненте силе резања ( $F_n^m$ ) јављају се у случају када се брзина микро резања ( $v_s$ ) смањује, док са друге стране, дубина продирања ( $a$ ) и радијус заобљења врха алата ( $r$ ) расту (слика 9.1a). За овај материјал, брзина микро резања нема значајног утицаја на рачунске вредности тангенцијалне компоненте ( $F_t^m$ ) силе резања, за разлику где комбинација раста дубине продирања ( $a$ ) и смењење вредности радијуса врха алата ( $r$ ) доводе до њеног екстрема (слика 9.1б). Провером сигнификантности

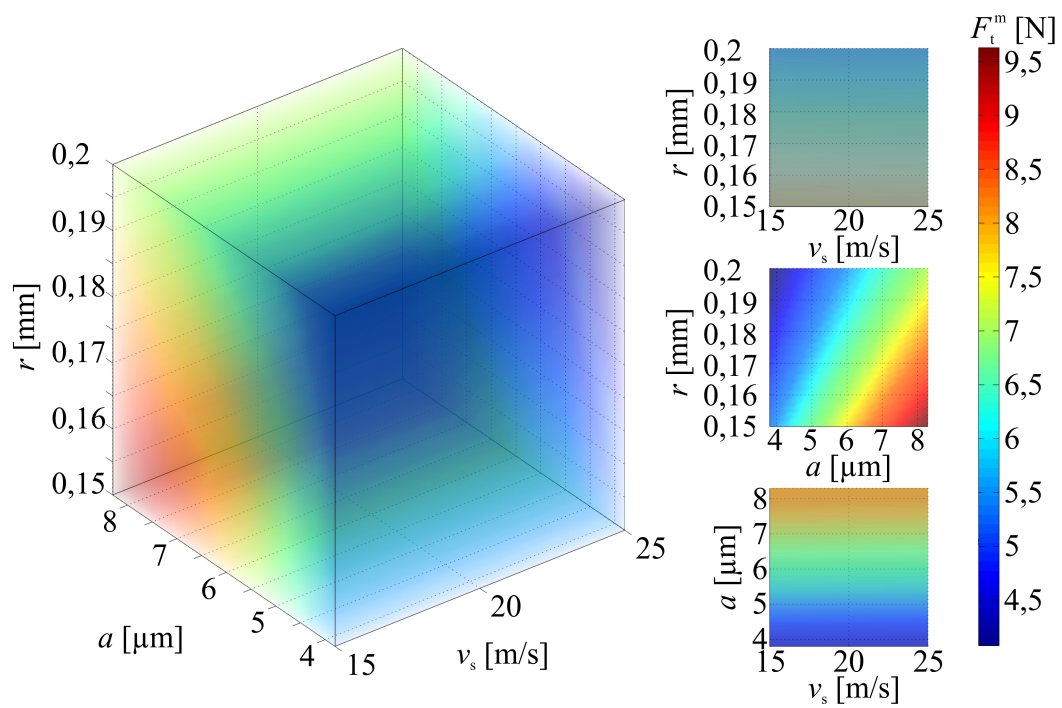
параметара модела, чије су вредности приказане у табели 9.4, потврђено је да брзина микро резања нема утицаја на вредности тангенцијалне компоненте силе резања.

**Табела 9.4:** *Оцена сигнификантности параметара модела и провера адекватности модела - мермер Плави ток.*

|  | $C$             | $v_s$        | $a$           | $r$           | Адекватност<br>[<9,01] |
|--|-----------------|--------------|---------------|---------------|------------------------|
| $F_n^m$                                | 904,9322        | -0,473       | 0,6083        | 2,1854        | <b>6,72</b>            |
| <b>Сигнификантност<br/>[&gt;10,13]</b> | <b>15705,78</b> | <b>22,19</b> | <b>85,84</b>  | <b>150,25</b> |                        |
| $F_t^m$                                | 0,3147          | -0,1112      | 0,7165        | -1,0199       | <b>1,74</b>            |
| <b>Сигнификантност<br/>[&gt;10,13]</b> | <b>7682,02</b>  | <b>0,01</b>  | <b>119,13</b> | <b>32,72</b>  |                        |



а)



б)

Слика 9.1: Рачунске вредности компонента силе резања а)  $F_n^m$  и б)  $F_t^m$  у функцији од вредности брзине микро резања  $v_s$ , дубине продирања  $a$  и радијуса заобљења врха алата  $r$ , за мермер Плави ток.

### 9.1.2 Математички модел за гранит Јошаница

Вредности параметара обрадљивости код гранита *Јошаница* разликовале су се од вредности одређених за мермер *Плави ток*, услед другачијих измерених вредности интензитета сила за исте услове обраде код ова два материјала. Због различитих својстава, за исте услове обраде, ова два материјала показала су потпуно другачије понашање током микро резања. Математички модел компонената сила резања за гранит *Јошаница* гласи:

$$F_n^m = 119,6675 \cdot v_s^{-0,1448} \cdot a^{0,5015} \cdot r^{0,9623}, \quad (9.31)$$

$$F_t^m = 44004,8938 \cdot v_s^{-1,692} \cdot a^{0,464} \cdot r^{2,2972}. \quad (9.32)$$

**Табела 9.5:** План експеримената - гранит *Јошаница*.

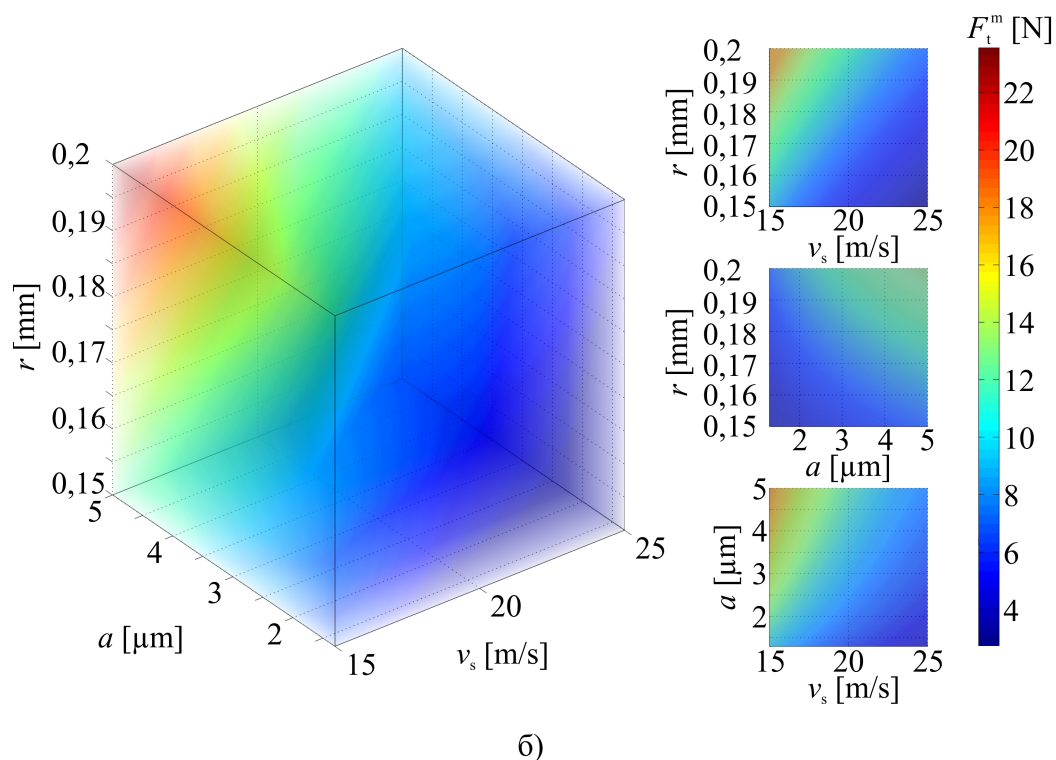
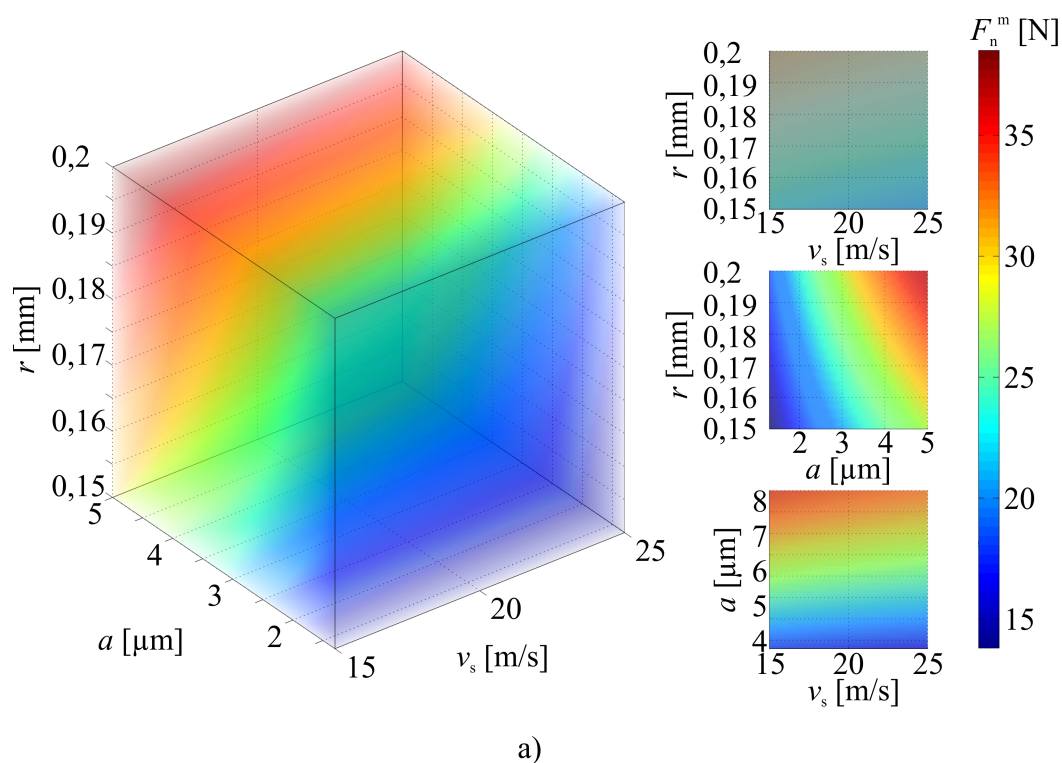
| Р. бр. експ.    | План матрице експеримената |                   |             |        |       |       |       | Резултати експеримената |              |           |           |
|-----------------|----------------------------|-------------------|-------------|--------|-------|-------|-------|-------------------------|--------------|-----------|-----------|
|                 | Фактори                    |                   |             | Кодови |       |       |       |                         |              |           |           |
|                 | $v_s$<br>[m/s]             | $a$<br>[ $\mu$ m] | $r$<br>[mm] | $x_0$  | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $F_n$<br>[N]            | $F_t$<br>[N] | $\ln F_n$ | $\ln F_t$ |
| E <sub>1</sub>  | 25                         | 5                 | 0,2         | +1     | +1    | +1    | +1    | 41,3                    | 9,3          | 3,721     | 2,23      |
| E <sub>2</sub>  | 15                         | 5                 | 0,2         | +1     | -1    | +1    | +1    | 35,7                    | 20,9         | 3,575     | 3,04      |
| E <sub>3</sub>  | 25                         | 1,3               | 0,2         | +1     | +1    | -1    | +1    | 19,9                    | 5            | 2,991     | 1,609     |
| E <sub>4</sub>  | 25                         | 5                 | 0,15        | +1     | +1    | +1    | -1    | 34,2                    | 5,9          | 3,532     | 1,775     |
| E <sub>5</sub>  | 19,4                       | 2,5               | 0,17        | +1     | 0     | 0     | 0     | 19,5                    | 8,1          | 2,97      | 2,092     |
| E <sub>6</sub>  | 15                         | 5                 | 0,15        | +1     | -1    | +1    | -1    | 33,2                    | 12,7         | 3,503     | 2,542     |
| E <sub>7</sub>  | 25                         | 1,3               | 0,15        | +1     | +1    | -1    | -1    | 13,3                    | 2,7          | 2,588     | 0,993     |
| E <sub>8</sub>  | 19,4                       | 2,5               | 0,17        | +1     | 0     | 0     | 0     | 19,5                    | 8,4          | 2,97      | 2,128     |
| E <sub>9</sub>  | 15                         | 1,3               | 0,15        | +1     | -1    | -1    | -1    | 16,5                    | 5,5          | 2,803     | 1,705     |
| E <sub>10</sub> | 19,4                       | 2,5               | 0,17        | +1     | 0     | 0     | 0     | 18,1                    | 7,9          | 2,896     | 2,067     |
| E <sub>11</sub> | 19,4                       | 2,5               | 0,17        | +1     | 0     | 0     | 0     | 17,4                    | 7,8          | 2,856     | 2,054     |
| E <sub>12</sub> | 15                         | 1,3               | 0,2         | +1     | -1    | -1    | +1    | 25,7                    | 16,1         | 3,246     | 2,779     |

Графички приказ математичког модела гранита *Јошаница* приказан је на слици 9.2. Рачунске вредности нормалне компоненте ( $F_n^m$ ) силе резања (слика 9.2а) заузимају екстремне вредности у случају када су дубина продирања ( $a$ ) и вредност радијуса заобљења врха алата ( $r$ ) максималне, док промена вредности брзине микро резања ( $v_s$ ), нема значајног утицаја на рачунску вредност нормалне компоненте ( $F_n^m$ ), што се види и код оцене сигнификантности параме-

тара модела приказаних у табели 9.6. За разлику од мермера *Плави ток*, код гранита *Јошаница*, рачунске вредности тангенцијалне компоненте ( $F_t^m$ ) силе резања екстремне вредности остварују у случају када су дубина продирања ( $a$ ) и вредност радијуса заобљења врха алата ( $r$ ) максималне, а вредности брзине микро резања ( $v_s$ ) минималне. Уколико се упореде ова два материјала (*Плави ток* и *Јошаница*), уочава се разлика утицаја брзине микро резања на вредност компоненти силе резања, при чему се код мермера *Плави ток* уочава да је брзина микро резања сигнификантна само у случају нормалне компоненте силе резања, док је код гранита *Јошаница* тај случај обрнут.

**Табела 9.6:** Оцена сигнификантности параметара модела и провера адекватности модела - гранит *Јошаница*.

|  | $C$             | $v_s$         | $a$           | $r$           | Адекватност<br>[<9,01] |
|--|-----------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|
| $F_n^m$                                | 119,6675        | -0,1448       | 0,5015        | 0,9623        | <b>8,97</b>            |
| <b>Сигнификантност<br/>[&gt;10,13]</b> | <b>16068,21</b> | <b>1,49</b>   | <b>124,16</b> | <b>20,85</b>  |                        |
| $F_t^m$                                | 44004,8938      | -1,692        | 0,464         | 2,2972        | <b>0,5</b>             |
| <b>Сигнификантност<br/>[&gt;10,13]</b> | <b>7091,5</b>   | <b>203,21</b> | <b>106,26</b> | <b>118,80</b> |                        |



Слика 9.2: Рачунске вредности компоната силе резања а)  $F_n^m$  и б)  $F_t^m$  у функцији од вредности брзине микро резања  $v_s$ , дубине продирања  $a$  и радијуса заобљења врха алата  $r$ , за гранит Јошаница.

### 9.1.3 Математички модел за гранит Буковик

Математички модел компонената силе резања ( $F_n$  и  $F_t$ ) код гранита *Буковик* има другачије вредности параметара обрадљивости од гранита *Јошаница*, упркос постојању веома сличних својстава са гранитом *Јошаница*. Изрази за компоненте сила резања гранита *Буковик* гласе:

$$F_n^m = 31,3792 \cdot v_s^{-0,0787} \cdot a^{0,5159} \cdot r^{0,3472}. \quad (9.33)$$

$$F_t^m = 192,2902 \cdot v_s^{-0,6381} \cdot a^{0,6074} \cdot r^{1,1705}. \quad (9.34)$$

Табела 9.7: План експеримената - гранит Буковик.

| Р. бр. експ.    | План матрице експеримената |                   |             |        |       |       |       | Резултати експеримената |              |           |           |
|-----------------|----------------------------|-------------------|-------------|--------|-------|-------|-------|-------------------------|--------------|-----------|-----------|
|                 | Фактори                    |                   |             | Кодови |       |       |       | $F_n$<br>[N]            | $F_t$<br>[N] | $\ln F_n$ | $\ln F_t$ |
|                 | $v_s$<br>[m/s]             | $a$<br>[ $\mu$ m] | $r$<br>[mm] | $x_0$  | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ |                         |              |           |           |
| E <sub>1</sub>  | 25                         | 5,5               | 0,2         | +1     | +1    | +1    | +1    | 33,9                    | 13,3         | 3,523     | 2,588     |
| E <sub>2</sub>  | 15                         | 5,5               | 0,2         | +1     | -1    | +1    | +1    | 33,3                    | 17,1         | 3,506     | 2,839     |
| E <sub>3</sub>  | 25                         | 2,4               | 0,2         | +1     | +1    | -1    | +1    | 25,9                    | 8,4          | 3,254     | 2,128     |
| E <sub>4</sub>  | 25                         | 5,5               | 0,15        | +1     | +1    | +1    | -1    | 32,7                    | 9,5          | 3,487     | 2,251     |
| E <sub>5</sub>  | 19,4                       | 3,6               | 0,17        | +1     | 0     | 0     | 0     | 27,9                    | 5,8          | 3,329     | 1,758     |
| E <sub>6</sub>  | 15                         | 5,5               | 0,15        | +1     | -1    | +1    | -1    | 35,1                    | 14,2         | 3,558     | 2,653     |
| E <sub>7</sub>  | 25                         | 2,4               | 0,15        | +1     | +1    | -1    | -1    | 17,7                    | 5,5          | 2,874     | 1,705     |
| E <sub>8</sub>  | 19,4                       | 3,6               | 0,17        | +1     | 0     | 0     | 0     | 27,4                    | 4,9          | 3,311     | 1,589     |
| E <sub>9</sub>  | 15                         | 2,4               | 0,15        | +1     | -1    | -1    | -1    | 22,2                    | 7,7          | 3,1       | 2,041     |
| E <sub>10</sub> | 19,4                       | 3,6               | 0,17        | +1     | 0     | 0     | 0     | 22,9                    | 4,8          | 3,131     | 1,569     |
| E <sub>11</sub> | 19,4                       | 3,6               | 0,17        | +1     | 0     | 0     | 0     | 20,7                    | 5,1          | 3,03      | 1,629     |
| E <sub>12</sub> | 15                         | 2,4               | 0,2         | +1     | -1    | -1    | +1    | 23                      | 11,5         | 3,135     | 2,442     |

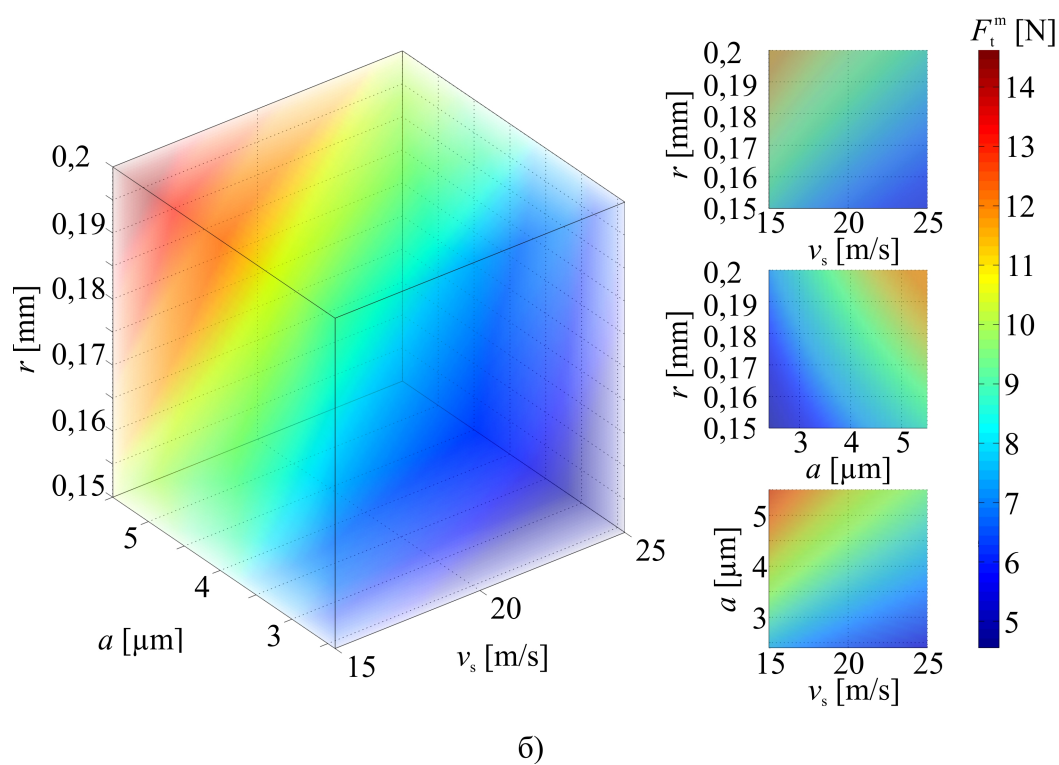
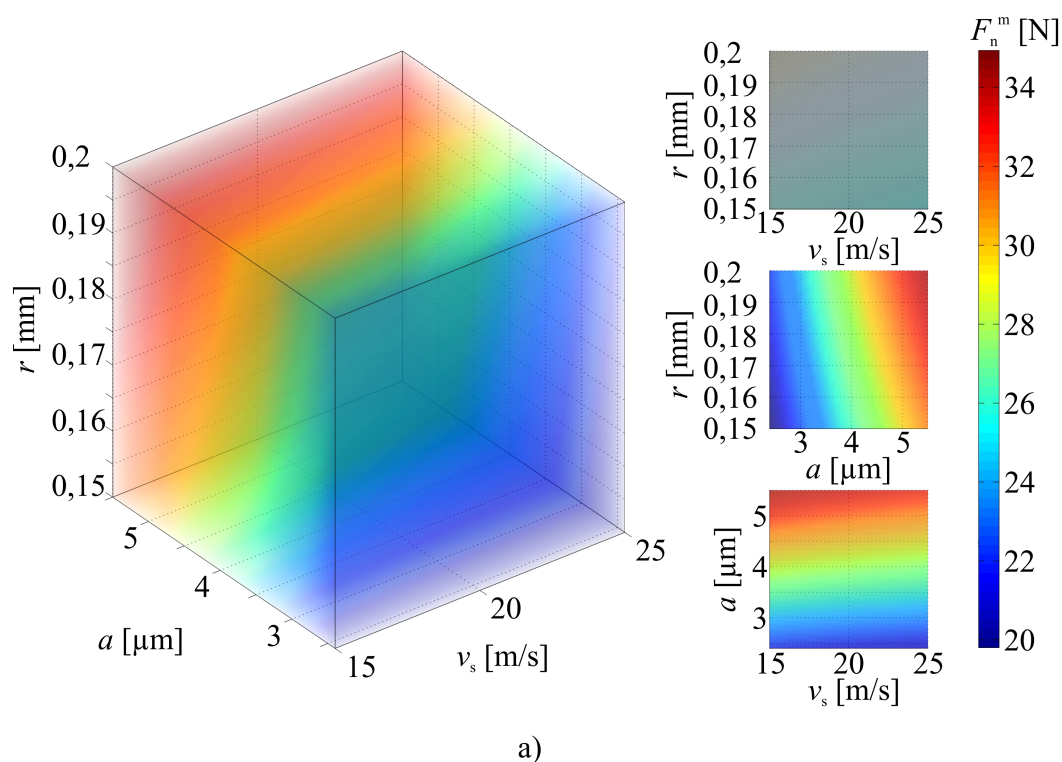
Са друге стране, слична својства ова два гранита (*Јошаница* и *Буковик*) доводе до тога да је тренд промене рачунских вредности компонената силе резања ( $F_n^m$  и  $F_t^m$ ) у функцији од дубине продирања ( $a$ ), вредности радијуса заобљења врха алата ( $r$ ) и брзине микро резања ( $v_s$ ) међусобно сличан (слика 9.3). С обзиром на то да гранит *Јошаница* има већу тврдоћу од гранита *Буковик*, што се и одразило на веће вредности компонената силе резања код гранита *Јошаница*, мерених током процеса микро резања, рачунске вредности компонената силе резања, такође, имају веће вредности код гранита *Јошаница* у поређењу са ра-

чунским вредностима добијених за гранит *Буковик*.

**Табела 9.8:** Оцена сигнификантности параметара модела и провера адекватности модела - гранит *Буковик*.

|                             | $C$             | $v_s$         | $a$           | $r$           | Адекватност<br>[<9,01] |
|-----------------------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|
| $F_n^m$                     | 31,3792         | -0,0787       | 0,5159        | 0,3472        | <b>8,2</b>             |
| Сигнификантност<br>[>10,13] | <b>66637,24</b> | <b>1,68</b>   | <b>190,09</b> | <b>10,36</b>  |                        |
| $F_t^m$                     | 192,2902        | -0,6381       | 0,6074        | 1,1705        | <b>0,1</b>             |
| Сигнификантност<br>[>10,13] | <b>27469,46</b> | <b>110,37</b> | <b>263,55</b> | <b>117,78</b> |                        |





**Слика 9.3:** Рачунске вредности компоната силе резања а)  $F_n^m$  и б)  $F_t^m$  у функцији од вредности брзине микро резања  $v_s$ , дубине продирања  $a$  и радијуса заобљења врха алата  $r$ , за гранит Буковик.

## ЗАКЉУЧАК

У последње време може се приметити експанзија микро резања у домену обраде. Феноменима који се јављају током самог процеса микро резања баве се многе светске лабораторије. На Катедри за производно машинство, Машинског факултета Универзитета у Београду, пратећи актуелне трендове, интензивно се ради на овом пољу. Највећи фокус досадашњих истраживања био је усмерен на микро резању кртих материјала, првенствено разних врста керамике, одакле је проистекао већи број публикација у истакнутим међународним часописима и једна докторска дисертација. Поред керамике, међу савремене материјале, а нарочито због својих физичко/механичких својстава убрајају се и материјали на бази камена. Обрадљивост оваквих материјала методом микро резања није довољно истражена, па самим тим формиран је довољан и рационалан основ за даља истраживања усмерена у овом смеру, као и израду ове докторске дисертације.

Аутор је у оквиру докторске дисертације имао за циљ да јасно опише и експериментално верификује механизам микро резања три различита материјала (један мермер и два гранита). То је подразумевало:

- испитивање обрадљивости наведених материјала у режиму пластичног деформисања методом утискивања при статичком дејству силе утискивања,
- испитивање раста прслина и њихов утицај на одвајање материјала, као

и одређивање критичне дубине продирања методом утискивања при статичком дејству силе утискивања,

- испитивање утицаја геометрије алата на повећање опсега пластичног деформисања материјала методом гребња,
- успостављање корелације између брзине микро резања и критичне дубине продирања,
- мерење компонената сила резања и развој математичког модела за њихову предикцију,
- формирање механизма микро резања.

Да се гранити *Јошаница* и *Буковик*, као и мермер *Плави ток*, могу обрађивати у режиму пластичног деформисања, аутор докторске дисертације експериментално је доказао методом утискивања при статичком дејству силе утискивања у току које је уочио три фазе обраде. Свака фаза је окарактерисана сопственим особеностима, односно фазе су дефинисане у зависности од присуства, или одсуства прслина унутар материјала. Како је област простирања неке од фаза у функцији од силе утискивања и тврдоће минерала на ком се врши утискивање, добијене су граничне вредности између њих. За мермер *Плави ток*, граница између прве и друге фазе налази се на  $5,73 \mu\text{m}$ . Ова вредности уједно представља и критичну дубину продирања алата у испитиваном мермеру. Граница која сепаратише фазу 2 и 3 током утискивања мермера *Плави ток* налази се на  $11,33 \mu\text{m}$ . Код гранита *Јошаница* и *Буковик* вредности критичних дубина продирања износе  $3,09 \mu\text{m}$  и  $4,06 \mu\text{m}$ , док се граница између фазе 2 и 3 налази на  $7,26 \mu\text{m}$  и  $5,77 \mu\text{m}$ , респективно.

На овај начин, дефинисан је опсег и услови у којима се може очекивати појава режима пластичног деформисања. Поред тога, представљен је експериментално верификовани механизам настанка и раста прслина унутар сваког од ова три испитивана материјала, на основу ког долази до одвајања материјала у режиму кртог лома.

За методу гребања дијамантским алатом представљен је механизам микро резања са описаним феноменима који се јављају у зони резања. Представљени механизам експериментално је верификован кроз низ експеримената вршених на сва три материјала. Као и код методе утискивања утискивача при статичком дејству силе, установљено је да се сва три материјала, иако крта по својој природи, могу обрађивати у режиму пластичног деформисања.

Током експеримената вршено је мерење ветрикалне ( $F_V$ ) и хоризонталне ( $F_H$ ) компоненте силе резања које су касније пројектоване на нормални и тангенцијални правац. Уочено је да је карактер промене тангенцијалне компоненте различит код мермера *Плави ток* у односу на граните *Јошаница* и *Буковик*. Како је установљено да вредности компонената сила имају круцијалну улогу, како за постојаност алата, тако и за повећање опсега режима пластичног деформисања, формиран су математички модели за обе компоненте силе резања. Математички модел предикције компонената силе резања у функцији је од фактора за које је испостављено да су доминантни на сам процес микро резања, а то су: брзина микро резања ( $v_s$ ), вредност дубине продирања алата ( $a$ ) и вредност радијуса заобљења врха алата ( $r$ ).

Микроскопском опсервацијом дефинисане су критичне дубине продирања за сва три материјала у функцији брзине микро резања ( $v_s$ ) и вредности радијуса заобљења врха алата ( $r$ ). Потом је извршена анализа оба променљива параметра ( $v_s$  и  $r$ ) на интензитет бочног разарања у режиму кртог лома. Установљено је да се, код сва три материјала, са повећањем брзине микро резања ( $v_s$ ), повећава и бочно разарање материјала. Ово је потенцијално предност са становишта уклоњене запремине материјала, али са становишта квалитета обраде, сматра се нежељеним ефектом. Смањење бочног разарања може се постићи смањењем вредности радијуса заобљења врха алата ( $r$ ).

Вредности специфичне енергије микро резања у функцији од брзине микро ре-

---

зања ( $v_s$ ), вредности дубине продирања алата ( $a$ ) и вредности радијуса заобљења врха алата ( $r$ ) израчунате су за сва три материјала. При дубинама мањим од критичне вредности, јавља се експоненцијални раст специфичне енергије микро резања са смањењем дубине резања. У случају повећања дубине микро резања, специфична енергија заузима приближно константну вредност која је значајно мања од оних које се јављају при мањим дубинама.

---

## БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА

Докторском дисертацијом представљен је механизам микро резања формиран на бази варирања брзине микро резања ( $v_s$ ), вредности дубине продирања алата ( $a$ ) и вредности радијуса заобљења врха алата ( $r$ ). Описани су сви феномени који настају у зони обраде и начин на који се врши уклањање материјала приликом микро резања материјала на бази камена. Даља истраживања која се могу спровести, а којима би ова докторска дисертација била основ, била би у правцу:

- испитивања утицаја путање алата на опсег режима пластичног деформисања,
- редукције неконтролисаног раста прслина у зони резања средствима за хлађење и подмазивање,
- испитивање појаве и раста прслина у случају унакрсног проласка дијамантског алата,
- испитивање интеракције алата и обратка сваког минерала засебно унутар материјала на бази камена, а приликом процеса микро резања.

## Литература

- [1] M. Pjević, L. Tanović, G. Mladenović, and B. Marković, “Experimental examination of the impact of tool radius on specific energy in microcutting of granite,” *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 139, no. 4, p. 041004, 2017.
- [2] M. R. Arsović, *Razvoj i primena dijamantskih alata u tehnologiji obrade mermerna i granita*. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Februar, 2006.
- [3] M. Merchant, “Mechanics of the metal cutting process. i. orthogonal cutting and a type 2 chip,” *Journal of applied physics*, vol. 16, no. 5, pp. 267–275, 1945.
- [4] M. Merchant, “Mechanics of the metal cutting process. ii. plasticity conditions in orthogonal cutting,” *Journal of applied physics*, vol. 16, no. 6, pp. 318–324, 1945.
- [5] G. B.U. and L. I., “Increasing productivity in sculpture surface machining via off-line piecewise variable feedrate scheduling based on the force system model,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, no. 1, pp. 21–28, 2004.
- [6] I. R. W. L., L. H. C. W., and C. F. T. S., “An economical sculptured surface machining approach using fuzzy models and ball-nosed cutters,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 138, no. 1-3, pp. 579–585, 2003.

- [7] L. Z. Z., Z. M., Z. L., W. Z. J., and L. D. C., “A solid model-based milling process simulation and optimization system integrated with cad/cam,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 138, no. 1-3, pp. 513–517, 2003.
- [8] W. K. K., “Solid modeling for optimizing metal removal of three-dimensional nc end milling,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 57–65, 1988.
- [9] Y. Z., K. K. F., M. T., and A. T., “Feed rate optimization based on cutting force calculations in 3-axis milling of dies and molds with sculptured surfaces,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 34, no. 3, pp. 365–377, 1994.
- [10] L. J. Tanović, “Current investigations in the field of micro-grinding,” in *Proceedings of the XIV International Conference Maintenance And Production Engineering „KODIP - 2017“*, pp. 29–35, Engineering Academy of Montenegro, 2014.
- [11] K. Liu, X. P. Li, and M. Rahman, “Characteristics of high speed micro-cutting of tungsten carbide,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 140, no. 1, pp. 352–357, 2003.
- [12] J. D. Kim and I. H. Choi, “Micro surface phenomenon of ductile cutting in the ultrasonic vibration cutting of optical plastics,” *Journal of materials processing technology*, vol. 68, no. 1, pp. 89–98, 1997.
- [13] T. Nakasuji, S. Kodera, S. Hara, H. Matsunaga, N. Ikawa, and S. Shimada, “Diamond turning of brittle materials for optical components,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 39, no. 1, pp. 89–92, 1990.
- [14] J. Yan, K. Syoji, and J. I. Tamaki, “Some observations on the wear of diamond tools in ultra-precision cutting of single-crystal silicon,” *Wear*, vol. 255, no. 7, pp. 1380–1387, 2003.



- [15] M. Arif, M. Rahman, and W. Y. San, "Ultraprecision ductile mode machining of glass by micromilling process," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 13, no. 1, pp. 50–59, 2011.
- [16] A. Simoneau, E. Ng, and M. A. Elbestawi, "Chip formation during microscale cutting of a medium carbon steel," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 5, pp. 467–481, 2006.
- [17] A. Simoneau, E. Ng, and M. A. Elbestawi, "The effect of microstructure on chip formation and surface defects in microscale, mesoscale, and macroscale cutting of steel," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 55, no. 1, pp. 97–102, 2006.
- [18] A. Simoneau, E. Ng, and M. A. Elbestawi, "Surface defects during microcutting," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 12-13, pp. 1378–1387, 2006.
- [19] K. Liu and S. N. Melkote, "Finite element analysis of the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 49, no. 5, pp. 650–660, 2007.
- [20] A. Simoneau, E. Ng, and M. A. Elbestawi, "Grain size and orientation effects when microcutting aisi 1045 steel," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 56, no. 1, pp. 57–60, 2007.
- [21] S. Subbiah and S. N. Melkote, "Effect of finite edge radius on ductile fracture ahead of the cutting tool edge in micro-cutting of al2024-t3," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 472, no. 1-2, pp. 283–300, 2008.
- [22] K. S. Woon, M. Rahman, F. Z. Fang, K. S. Neo, and K. Liu, "Investigations of tool edge radius effect in micromachining: A fem simulation approach," *Journal of materials processing technology*, vol. 195, no. 1-3, pp. 204–211, 2008.

- [23] J. Zhou, J. F. Li, J. Sun, and Z. P. Xu, “The influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process of 7050-t7451 aluminum alloy,” *In Key Engineering Materials*, vol. 375, pp. 31–35, 2008.
- [24] F. Ducobu, E. Filippi, and E. Rivière-Lorphèvre, “Chip formation and minimum chip thickness in micro-milling,” *In Proceedings of the 12th CIRP conference on modeling of machining operations*, pp. 339–346.
- [25] K. S. Woon and M. Rahman, “Extrusion-like chip formation mechanism and its role in suppressing void nucleation,” *CIRP annals*, vol. 59, no. 1, pp. 129–132, 2010.
- [26] L. Zhanqiang, S. Zhenyu, and W. Yi, “Definition and determination of the minimum uncut chip thickness of microcutting,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 69, no. 5-8, pp. 1219–1232, 2013.
- [27] B. R. Lawn and R. Wilshaw, “Indentation fracture: principles and applications,” *Journal of Materials Science*, vol. 10, no. 6, pp. 1049–1081, 1975.
- [28] A. G. Evans and T. R. Wilshaw, “Quasi-static solid particle damage in brittle materials: I,” *Acta Metall*, vol. 24, pp. 939–956, 1976.
- [29] B. R. Lawn and A. G. Evans, “A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields,” *Journal of Materials Science*, vol. 12, no. 11, pp. 2195–2199, 1977.
- [30] B. R. Marshall, D. B. and Lawn, “Residual stress effects in sharp contact cracking: Part 1: Indentation fracture mechanics,” *Journal of Materials Science*, vol. 14, no. 8, pp. 2001–2012, 1979.
- [31] D. B. Marshall, B. R. Lawn, and P. Chantikul, “Residual stress effects in sharp contact cracking: Part 2: Strength degradation,” *Journal of Materials Science*, vol. 14, no. 8, pp. 2225–2235, 1979.
- [32] B. R. Lawn and M. V. Swain, “Microfracture beneath point indentations in brittle solids,” *Journal of Materials Science*, vol. 10, no. 1, pp. 113–122, 1975.

- [33] D. B. Marshall, B. R. Lawn, and A. G. Evans, "Elastic/plastic indentation damage in ceramics: The lateral crack system," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 65, no. 11, pp. 561–566, 1982.
- [34] B. R. Lawn and E. R. Fuller, "Equilibrium penny-like cracks in indentation fracture," *Journal of Materials Science*, vol. 10, no. 12, pp. 2016–2024, 1975.
- [35] B. R. Lawn, A. G. Evans, and D. B. Marshall, "Elastic/plastic indentation damage in ceramics: the median/radial crack system," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 63, no. 9-10, pp. 574–581, 1980.
- [36] D. B. Marshall, "Controlled flaws in ceramics: A comparison of knoop and vickers indentation," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 66, no. 2, pp. 127–131, 1983.
- [37] D. B. Marshall, "Geometrical effects in elastic/plastic indentation," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 67, no. 1, pp. 57–60, 1984.
- [38] A. Chandra, K. Wang, Y. Huang, G. Subhash, M. H. Miller, and W. Qu, "Role of unloading in machining of brittle materials," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 122, no. 3, pp. 452–462, 2000.
- [39] S. Stojadinovic, L. Tanovic, and S. Savicevic, "Micro-cutting mechanisms in silicon nitride ceramics silinit r grinding," *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, vol. 36, no. 4, pp. 291–297, 2015.
- [40] G. Mladenovic, P. Bojanic, L. Tanovic, and S. Klimenko, "Experimental investigation of microcutting mechanisms in oxide ceramic cm332 grinding," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 137, no. 3, p. 034502, 2015.
- [41] S. Malkin and T. W. Hwang, "Grinding mechanisms for ceramics," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 45, no. 2, pp. 569–580, 1996.
- [42] G. Subhash, J. E. Loukus, and S. M. Pandit, "Application of data dependent systems approach for evaluation of fracture modes during a single-grit scratching," *Mechanics of materials*, vol. 34, no. 1, pp. 25–42, 2002.

- [43] D. Ghosh, G. Subhash, R. Radhakrishnan, and T. S. Sudarshan, “Scratch-induced microplasticity and microcracking in zirconium diboride–silicon carbide composite,” *Acta Materialia*, vol. 56, no. 13, pp. 3011–3022, 2008.
- [44] R. Anton and G. Subhash, “Dynamic vickers indentation of brittle materials,” *Wear*, vol. 239, no. 1, pp. 27–35, 2000.
- [45] D. Ghosh, G. Subhash, T. S. Sudarshan, R. Radhakrishnan, and X. L. Gao, “Dynamic indentation response of fine–grained boron carbide,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 90, no. 6, pp. 1850–1857, 2007.
- [46] K. Ueda, T. Sugita, H. Hiraga, and K. Iwata, “A j-integral approach to material removal mechanisms in microcutting of ceramics,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 40, no. 1, pp. 61–64, 1991.
- [47] T. Inamura, S. Shimada, N. Takezawa, and N. Nakahara, “Brittle/ductile transition phenomena observed in computer simulations of machining defect-free monocrystalline silicon,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 46, no. 1, pp. 31–34, 1997.
- [48] S. Subbiah and S. N. Melkote, “Evidence of ductile tearing ahead of the cutting tool and modeling the energy consumed in material separation in microcutting,” *Journal of engineering materials and technology*, vol. 129, no. 2, pp. 321–331, 2007.
- [49] B. Chiaia, “Fracture mechanisms induced in a brittle material by a hard cutting indenter,” *International Journal of Solids and structures*, vol. 38, no. 44, pp. 7747–7768, 2001.
- [50] Y. Tan, D. Yang, and Y. Sheng, “Study of polycrystalline al 2 o 3 machining cracks using discrete element method,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, no. 9, pp. 975–982, 2008.
- [51] L. V. Colwell, “The effects of high-frequency vibrations in grinding,” *Trans. ASME*, vol. 78, no. 4, p. 837, 1956.

- [52] H. G. Dohmen, “Zerspanungsuntersuchungen beim drehen mit periodisch bewegtem schneidwerkzeug,” *Doctoral dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen*, 1964.
- [53] T. Moriwaki and E. Shamoto, “Ultraprecision diamond turning of stainless steel by applying ultrasonic vibration,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 40, no. 1, pp. 559–562, 1991.
- [54] T. Moriwaki, E. Shamoto, and K. Inoue, “Ultraprecision ductile cutting of glass by applying ultrasonic vibration,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 141–144, 1992.
- [55] M. Zhou, X. J. Wang, B. K. A. Ngoi, and J. G. K. Gan, “Brittle–ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 121, no. 2, pp. 243–251, 2002.
- [56] J. Gan, X. Wang, M. Zhou, B. Ngoi, and Z. Zhong, “Ultraprecision diamond turning of glass with ultrasonic vibration,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 21, no. 12, pp. 952–955, 2003.
- [57] K. Liu, X. P. Li, M. Rahman, and X. D. Liu, “Study of ductile mode cutting in grooving of tungsten carbide with and without ultrasonic vibration assistance,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 24, no. 5-6, pp. 389–394, 2004.
- [58] M. Zhou, Y. T. Eow, B. K. A. Ngoi, and E. N. Lim, “Vibration-assisted precision machining of steel with pcd tools,” *Materials and manufacturing processes*, vol. 18, no. 5, pp. 825–834, 2003.
- [59] V. K. Astashev and V. I. Babitsky, “Ultrasonic cutting as a nonlinear (vibro-impact) process,” *Ultrasonics*, vol. 36, no. 1-5, pp. 89–96, 1998.
- [60] L. Han, W. Xu, and S. K. Tso, “Ultrasonically assisted and piezoelectric actuators integrated cutting tool,” *Japanese journal of applied physics*, vol. 37, no. 8R, p. 4616, 1998.

- [61] V. I. Babitsky, A. N. Kalashnikov, and F. V. Molodtsov, "Autoresonant control of ultrasonically assisted cutting," *Mechatronics*, vol. 14, no. 1, pp. 91–114, 2004.
- [62] M. Jin and M. Murakawa, "Development of a practical ultrasonic vibration cutting tool system. journal of materials processing technology," *Journal of materials processing technology*, vol. 113, no. 1, pp. 342–347, 2001.
- [63] E. Shamoto and T. Moriwaki, "Study on elliptical vibration cutting," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 43, no. 1, pp. 35–38, 1994.
- [64] T. Moriwaki and E. Shamoto, "Ultrasonic elliptical vibration cutting," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 44, no. 1, pp. 31–34, 1995.
- [65] E. Shamoto and T. Moriwaki, "Ultraprecision diamond cutting of hardened steel by applying elliptical vibration cutting," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 48, no. 1, pp. 441–444, 1999.
- [66] E. Shamoto, N. Suzuki, T. Moriwaki, and Y. Naoi, "Development of ultrasonic elliptical vibration controller for elliptical vibration cutting," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 327–330, 2002.
- [67] J. S. Lee, D. W. Lee, Y. H. Jung, and W. S. Chung, "A study on micro-grooving characteristics of planar lightwave circuit and glass using ultrasonic vibration cutting," *Journal of materials processing technology*, vol. 130, pp. 396–400, 2002.
- [68] J. H. Ahn, H. S. Lim, and S. M. Son, "Improvement of micro-machining accuracy by 2-dimensional vibration cutting," *In Proc ASPE*, vol. 20, pp. 150–153, 1999.
- [69] N. Suzuki, M. Haritani, J. B. Yang, R. Hino, and E. Shamoto, "Elliptical vibration cutting of tungsten alloy molds for optical glass parts," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 56, no. 1, pp. 127–130, 2007.

- [70] C. Ma, E. Shamoto, T. Moriwaki, and L. Wang, “Study of machining accuracy in ultrasonic elliptical vibration cutting,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, no. 12-13, pp. 1305–1310, 2004.
- [71] C. Ma, E. Shamoto, T. Moriwaki, Y. Zhang, and L. Wang, “Suppression of burrs in turning with ultrasonic elliptical vibration cutting,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 11, pp. 1295–1300, 2005.
- [72] N. Negishi, “Elliptical vibration assisted machining with single crystal diamond tools,” *DEPARTMENT OF MECHANICAL AND AEROSPACE ENGINEERING, Faculty of North Carolina State University*, 2003.
- [73] N. Suzuki, H. Yokoi, and E. Shamoto, “Micro/nano sculpturing of hardened steel by controlling vibration amplitude in elliptical vibration cutting,” *Precision Engineering*, vol. 35, no. 1, pp. 44–50, 2011.
- [74] J. Overcash, J. Анд Cuttino, “Development of a tunable ultrasonic vibration-assisted diamond turning instrument,” *In ASPE Proceedings 2003 Annual Meeting*, pp. 503–506, 2003.
- [75] X. Li and D. Zhang, “Ultrasonic elliptical vibration transducer driven by single actuator and its application in precision cutting,” *Journal of materials processing technology*, vol. 180, no. 1, pp. 91–95, 2006.
- [76] Z. J. Yuan, M. Zhou, and S. Dong, “Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 62, no. 4, pp. 327–330, 1996.
- [77] F. Z. Fang, H. Wu, and Y. C. Liu, “Modelling and experimental investigation on nanometric cutting of monocrystalline silicon,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 15, pp. 1681–1686, 2005.

- [78] S. M. Son, H. S. Lim, and J. H. Ahn, “Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 45, no. 4-5, pp. 529–535, 2005.
- [79] X. Lai, H. Li, C. Li, Z. Lin, and J. Ni, “Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, no. 1, pp. 1–14, 2008.
- [80] G. Bissacco, H. N. Hansen, and L. De Chiffre, “Micromilling of hardened tool steel for mould making applications,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 167, no. 2-3, pp. 201–207, 2005.
- [81] A. Aramcharoen and P. T. Mativenga, “Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel,” *Precision Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 402–407, 2009.
- [82] T. Özel, X. Liu, and A. Dhanorker, “Modelling and simulation of micro-milling process,” *In 4th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds*, pp. 21–23, 2007, June.
- [83] K. Lee and D. A. Dornfeld, “Micro-burr formation and minimization through process control,” *Precision Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 246–252, 2002.
- [84] K. S. Woon, M. Rahman, K. S. Neo, and K. Liu, “The effect of tool edge radius on the contact phenomenon of tool-based micromachining,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, no. 12-13, pp. 1395–1407, 2008.
- [85] A. M. Elkaseer, K. B. Popov, S. S. Dimov, and R. Minev, “Material microstructure effect-based investigation of tool wear in micro-endmilling of multi-phase materials,” *Proceedings of the 7th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, pp. 188–191, 2011.



- [86] G. Bissacco, H. N. Hansen, and J. Slunsky, “Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 57, no. 1, pp. 113–116, 2008.
- [87] M. Malekian, S. S. Park, and M. B. Jun, “Modeling of dynamic micro-milling cutting forces,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no. 7-8, pp. 586–598, 2009.
- [88] S. M. Afazov, S. M. Ratchev, and J. Segal, “Modelling and simulation of micro-milling cutting forces,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 15, pp. 2154–2162, 2010.
- [89] D. Axinte, P. Butler-Smith, C. Akgun, and K. Kolluru, “On the influence of single grit micro-geometry on grinding behavior of ductile and brittle materials,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 74, pp. 12–18, 2013.
- [90] F. Z. Fang and Y. C. Liu, “On minimum exit-burr in micro cutting,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, no. 7, pp. 984–988, 2004.
- [91] T. Zhang, Z. Liu, and C. Xu, “Influence of size effect on burr formation in micro cutting,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 68, no. 9-12, pp. 1911–1917, 2013.
- [92] H. Huang, Y. Li, J. Y. Shen, H. M. Zhu, and X. P. Xu, “Micro-structure detection of a glossy granite surface machined by the grinding process,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 129, no. 1, pp. 403–407, 2002.
- [93] L. J. Tanovic, P. Bojanic, R. Puzovic, and M. Milutinovic, “Experimental investigation of microcutting mechanisms in granite grinding,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 133, no. 2, p. 024501, 2011.
- [94] C. J. Kim, J. R. Mayor, and J. Ni, “A static model of chip formation in microscale milling,” *Journal of manufacturing science and engineering*, vol. 126, no. 4, pp. 710–718, 2004.

- [95] H. Weule, V. Hüntrup, and H. Tritschler, “Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 50, no. 1, pp. 61–64, 2001.
- [96] M. P. Vogler, R. E. DeVor, and S. G. Kapoor, “On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, part i: Surface generation,” *Journal of manufacturing science and engineering*, vol. 126, no. 4, pp. 685–694, 2004.
- [97] J. Xie and J. Tamaki, “Parameterization of micro-hardness distribution in granite related to abrasive machining performance,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 186, no. 1, pp. 253–258, 2007.
- [98] Y. Li, H. Huang, J. Y. Shen, X. P. Xu, and Y. S. Gao, “Cost-effective machining of granite by reducing tribological interactions,” *Journal of materials processing technology*, vol. 129, no. 1, pp. 389–394, 2002.
- [99] L. J. Tanovic, P. Bojanic, R. Puzovic, and S. Klimenko, “Experimental investigation of microcutting mechanisms in marble grinding,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 131, no. 6, p. 064507, 2009.
- [100] W. B. Lee and Y. P. Chen, “Simulation of micro-indentation hardness of fcc single crystals by mechanism-based strain gradient crystal plasticity,” *International Journal of Plasticity*, vol. 26, no. 10, pp. 1527–1540, 2010.
- [101] W. Johnson and P. B. Mellor, *Engineering plasticity*. Horwood, 1983.
- [102] J. Yan, M. Yoshino, T. Kuriagawa, T. Shirakashi, K. Syoji, and R. Komanduri, “On the ductile machining of silicon for micro electro-mechanical systems (mems), opto-electronic and optical applications,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 297, no. -12, pp. 230–234, 2001.
- [103] S. Venkatachalam, X. Li, and S. Y. Liang, “Predictive modeling of transition undeformed chip thickness in ductile-regime micro-machining of single crystal brittle materials,” *Journal of materials processing technology*, vol. 209, no. 7, pp. 3306–3319, 2009.

- [104] K. Liu, X. P. Li, and S. Y. Liang, "The mechanism of ductile chip formation in cutting of brittle materials," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 33, no. 5, pp. 875–884, 2007.
- [105] E. Orowan, "Energy criteria of fracture," *Welding Journal. Res. Sup.*, vol. 34, no. 3, pp. 157–160, 1955.
- [106] G. R. Irwin, "Analysis of stress and strain near the end of a crack traversing a plate," *Trans ASME, J. Appl. Mech.*, vol. 24, pp. 361–364, 1957.
- [107] J. Gong, J. Wu, and Z. Guan, "Examination of the indentation size effect in low-load vickers hardness testing of ceramics," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 19, no. 15, pp. 2625–2631, 1999.
- [108] L. Sidjanin, D. Rajnovic, J. Ranogajec, and E. Molnar, "Measurement of vickers hardness on ceramic floor tiles," *Journal of the European ceramic Society*, vol. 27, no. 2, pp. 1767–1773, 2007.
- [109] J. B. Quinn and G. D QUINN, "Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach," *Journal of Materials Science*, vol. 32, no. 16, pp. 4331–4346, 1997.
- [110] U. Ramamurty, S. Jana, Y. Kawamura, and K. Chattopadhyay, "Hardness and plastic deformation in a bulk metallic glass," *Acta Materialia*, vol. 53, no. 3, pp. 705–717, 2005.
- [111] J. Stanić, M. Kalajdžić, and R. Kovačević, *Merna tehnika u tehnologiji obrade metala rezanjem*. IRO "Građevinska knjiga", 1983.

## Биографија

---

### Општи подаци:

---

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Име и презиме:        | Милош Д. Пјевић                                     |
| Датум и место рођења: | 22.09.1989. године, Ужице                           |
| Садашња позиција:     | Асистент, Универзитет у Београду, Машински факултет |

---

### Образовање:

---

|            |  |
|------------|--|
| 2013.      | Студент Докторских академских студија, Универзитет у Београду, Машински факултет                             |
| 2011-2013. | <b>Мастер инжењер машинства</b> , Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за производно машинство |
| 2008-2011. | <b>Инжењер машинства</b> , Универзитет у Београду, Машински факултет   |
| 2004-2008. | Техничка школа „Јован Жујовић“ у Горњем Милановцу  |
| 1999-2004. | Основна школа „Свети Сава“ у Горњем Милановцу  |
| 1998-1999. | Основна школа „Момчило Настасијевић“ у Горњем Милановцу  |
| 1996-1998. | Основна школа „Мито Игумановић“ у Косјерићу  |

---

### Стипендије:

---

|             |  |
|-------------|--|
| 2011, 2013. | Стипендиста Фонда за младе таленте Републике Србије „Доситеја“ |
|-------------|--|

---

### Награде:

---

|       |  |
|-------|--|
| 2009. | Похвала за одличан успех на првој години Основних академских студија                                 |
| 2010. | Похвала за одличан успех на другој години Основних академских студија                                |
| 2011. | Похвала за одличан успех на трећој години Основних академских студија                                |
| 2011. | Добитник награде „Putujemo u Evropu“ коју додељује невладина организација „Evropski pokret u Srbiji“ |
| 2012. | Похвала за одличан успех на првој години Мастер академских студија                                   |

2012. Захвалница за учешће на конкурсу „Петар Дамјановић“  
2013. Похвала за одличан успех на другој години Мастер академских студија
- 

Професионално искуство:

---

- 2014- Асистент, Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за производно машинство  
2014- Истраживач на пројекту TR-35022, Универзитет у Београду, Машински факултет  
2010, 2012, 2013. Студент демонстратор, Универзитет у Београду, Машински факултет  
2009. Машински техничар, „Metal – Mont“ у Горњем Милановцу
- 

Стручна ангажовања:

---

2014. Учествовао у организацији 39. ЈУПИТЕР конференције  
2014. Учествовао у обуци на курсу за „Autodesk Inventor“ коју организује Машински факултет Универзитета у Београду  
2016. Учествовао у организацији 40. ЈУПИТЕР конференције  
2018. Учествовао у организацији 41. ЈУПИТЕР конференције  
Члан стручног тима за припрему документације за акредитацију ASIIN Машинског факултета Универзитета у Београду  
2019.
- 

Педагошка активност:

---

Као студент демонстратор учествовао у извођењу вежби у периоду од 2010 – 2013. из предмета Инжењерска графика. Од тренутка стицања звања асистента, ангажован у извођењу вежби на предметима са Катедре за производно машинство: Технологија машинске обраде, Алати и прибори, Компјутерска графика, Алати за обликовање лима, Нове технологије

---

Истраживачки рад:

---

Ангажован као истраживач на пројекту „Развој нове генерације домаћих обрадних система“ (пројекат број TR-35022), финансираном од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја. Као аутор и коаутор објавио је преко 20 радова у домаћим и међународним часописима и научним скуповима

---

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а Милош Д. Пјевић

број индекса Д10/2013

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Истраживање утицаја радијуса заобљења врха алата и брзине резања на показатеље квалитета при микро резању материјала на бази мермера и гранита

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 11.06.2019. године

Милош Д. Пјевић

Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Милош Д. Пјевић

Број индекса Д10/2013

Студијски програм Докторске академске студије – Машинско инжењерство

Наслов рада Истраживање утицаја радијуса заобљења врха алата и брзине резања на показатеље квалитета при микро резању материјала на бази мермера и гранита

Ментор Проф. др Љубодраг М. Тановић

Потписани/а Милош Д. Пјевић

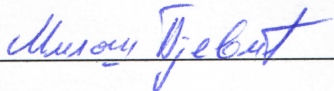
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 11.06.2019. године

  
\_\_\_\_\_

Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Истраживање утицаја радијуса заобљења врха алата и брзине резања на показатеље квалитета при микро резању материјала на бази мермера и гранита

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

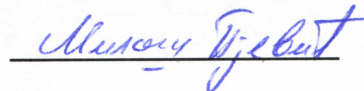
5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 11.06.2019. године





1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.