



**УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ**  
**ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ ЧАЧАК**

**Мр Марко С Поповић**

**Интегрисани приступ конструисања у  
функцији развоја нове генерације резних  
елемената за багере континуалног дејства**

**Докторска дисертација**

**Чачак, 2012.год.**



**УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ ЧАЧАК**

Интегрисани приступ конструисања у  
функцији развоја нове генерације резних  
елемената за багере континуалног дејства

**Докторска дисертација**

**Кандидат:**

**Мр Марко С Поповић дипл.маш.инж.**

**Ментор**

**Проф. др Звонимир Југовић дипл.маш.инж.**

**Чачак, 2012.год.**

<b>1. Аутор</b>	
Име и презиме:	Марко Поповић
Датум и место рођења:	05.01.1976.год., Чачак
Садашње запослење:	Асистент, Технички факултет Чачак
<b>2. Докторска дисертација</b>	
Наслов:	Интегрисани приступ конструисања у функцији развоја нове генерације резних елемената за багере континуалног дејства
Број страница:	149
Број слика:	129
Број библиографских података:	159
Установа и место где је рад израђен:	Технички факултет Чачак
Научна област (УДК):	621.01+621.879.4] (043.3)
Ментор:	Проф.др Звонимир Југовић
<b>3. Оцена и одбрана</b>	
Датум пријаве теме:	30.3.2009.год.
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације	789/5 од 29.4.2009.год. 607/11 од 8.5.2009.год.
Комисија за оцену подобности теме и кандидата:	<ol style="list-style-type: none"> <li><b>1. Проф.др Миломир Гашић</b> Машински факултет, Краљево</li> <li><b>2. Проф.др Радомир Славковић</b> Технички факултет, Чачак</li> <li><b>3. Проф.др Вера Николић</b> Државни Универзитет у Новом Пазару</li> <li><b>4. Проф.др Ненад Марјановић</b> Факултет инжењерских наука, Крагујевац</li> <li><b>5. Проф.др Звонимир Југовић</b> Технички факултет, Чачак</li> </ol>
Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације:	<ol style="list-style-type: none"> <li><b>1. Проф.др Миломир Гашић, Председник</b> Машински факултет, Краљево</li> <li><b>2. Проф.др Звонимир Југовић, Ментор</b> Технички факултет, Чачак</li> <li><b>3. Проф.др Радомир Славковић, Члан</b> Технички факултет, Чачак</li> <li><b>4. Проф.др Драган Игњатовић, Члан</b> Рударско-геолошки факултет, Београд</li> <li><b>5. Проф.др Ненад Марјановић, Члан</b> Факултет инжењерских наука, Крагујевац</li> </ol>
Датум одбране дисертације:	

# ПРЕДГОВОР

У оквиру докторске дисертације разматрана је проблематика увођења системског процеса конструисања резних елемената, кроз концепт интегрисаног развоја производа. Циљ примене интегрисаног приступа конструисања је у томе да пре саме израде резног елемента постоји јасна представа о томе како ће производ изгледати, како и на који начин ће усвојена технологија производње утицати на крајњи квалитет, како ће се понашати у радним условима и др. Применом оваквог концепта утиче се на минимизирање потребе за физичким тестирањем прототипова са једне стране и смањење ризика од неуспеха усвојене концепције и крајње конструкције резног елемента са друге стране. Такође, утиче се на смањење броја понављајућих корака у процесу развоја резних елемената, при чему се повећава поузданост процеса конструисања и продуктивности инжењера, и добија квалитетнији производ са нижим трошковима производње.

И ако сам у предходном периоду био посвећен анализи постојећих знања из ове области, као и синтези закључака кроз чија решења би се генерално унапредила постојећа инжењерска пракса конструисања резних елемената багера, ипак овај рад представља део већег залагања многих мојих колега и сарадника који су у различитим фазама и на различите начине учествовали у његовој изради. Због тога, свом ментору *проф. др Звонимиру Југовићу*, дугујем велику захвалност за актуелни избор теме, брижљиво вођење процеса истраживања, као и за сву неопходну помоћ током десетогодишње заједничке сарадње, која је резултирала овом докторском дисертацијом. Такође, изузетна појединачна захвалност припада и члановима комисије *проф. др Радомиру Славковићу*, *проф. др Миломиру Гашићу*, *проф. др Драгану Игњатовићу*, и *проф. др Ненаду Марјановићу*.

Израду ове докторске дисертације значајно су помогли *ИКГ Фармаком МБ*, *ЈП Површински копови Колубара* и *ЈП Површински копови Костолац*. Овом приликом им захваљујем на несебичној помоћи коју су ми пружили. Посебно се захваљујем шефу службе машинског одржавања на површинском копу Тамнава Западно поље, господину *Драгану Новаковићу дипл.инж.руд.*, за обимну стручну и техничку помоћ указану током израде овог рада.

Такође, захваљујем се својој породици и пријатељима на бескрајној подршци и разумевању.

*Аутор*



## РЕЗИМЕ

Процес копања код багера континуалног дејства непосредно врше ведрице са резним елементима (резни зуби и нож ведрице) који се налазе на фронту резања. Да би се стенски материјал разорио потребно је на њега деловати одређеном силом, која зависи од врсте стенског материјала, технологије ископавања, геометрије резних елемента и др. Резни зуби својом оштрицом доспевају на ограничене површине стенског материјала и врше напрезања довољна за њихово разарање. Применом резних зуба расположива сила резања се концентрише на малу дужину резања, и на тај начин се олакшава продирање комплетне ведрице у материјал. Разорени материјал се преко одговарајућих површина резних елемената транспортује у кашику.

Да би исправно извршили своју основну функцију, резни зуби морају задовољити више захтева, као што су повољна геометрија, висока отпорност на абразивно хабање, велика механичка чврстоћа и жилавост итд. Фактори на које се мора обратити пажња при конструисању су геометрија зуба, димензионисање зуба, избор материјала, монтажа зуба на ведрици и технологија његове израде. Због тога је процес конструисања резних зуба код багера континуалног дејства везан за следеће проблеме: а) Комплексност процеса конструисања везана за висок ниво корелације основних својстава конструкције, због чега су крајњи изглед, димензије и технологија израде резних зуба веома осетљиви на текуће измене током процеса конструисања; б) Велики утицај специфичних захтева корисника и тежња уникатној производњи, због чега је поред флексибилности у технологији израде, неопходно је обезбедити флексибилност у свим фазама реализације резних зуба, почевши од ране фазе развоја и процеса конструисања; ц) Сложеност дефинисања спољашњег оптерећења и усвајање одговарајућих претпоставки, као основа при прорачуну носивости и оптимизације облика резних зуба; д) Специфичност технологије израде резних зуба, која се огледа у дефинисању великог броја комплексних техничко-технолошких параметара ливења; е) Израда физичког прототипа резног зуба захтева значајно време припреме и реализације, док је испитивање физичког прототипа на багеру у експлоатационим условима отежано и захтева значајне временске и финансијске издатке.

Постојећа знања и одговарајућа литература не објашњавају и не дају препоруке за решавање предходних проблема. Због тога не постоји системски приступ, па се процес конструисања изводи на бази искуства и минималних побољшања постојећих решења, користећи се при том грубим претпоставкама и извођењем закључака без улажења у суштину проблема. Овакав приступ представља проблем у тренутку када се жели направити искорак и генерисати конструкционо и технолошки боље решење резних елемената, као што је то случај са развојем нове генерације модуларних резних зуба.

У оквиру докторске дисертације разматрана је проблематика увођења системског процеса конструисања резних елемената, кроз концепт интегрисаног развоја производа. Овакав приступ представља алтернативу постојећем стању процеса развоја резних елемената, који се на релативно једноставан начин може инкорпорирати и применити у производном процесу. Циљ примене интегрисаног приступа конструисања је у томе да пре саме израде резног елемента постоји јасна представа о томе како ће производ изгледати, како и на који начин ће усвојена технологија производње утицати на крајњи квалитет, како ће се понашати у радним условима и др. Такође, обезбеђује се предност која се огледа у смањењу трошкова, самим тим што се у већем делу анализе током конструисања користе *CAD/CAE/CAM* алати, чиме се значајно смањује време потребно за тестирања у лабораторији или експлоатационим условима. Са друге стране, смањује се време од тренутка постављања захтева за производом до његовог доласка на тржиште, јер се смањује број развојних циклуса, аутоматским одбацивањем незадовољавајућих решења конструкције. Тежиште оваквог приступа се преноси на концептуално пројектовање и прелиминарно конструисање, чиме се утиче на касније смањење броја конструкционих измена и измена у производном процесу. Оваквим приступом се обезбеђују основни услови и реализује тежња ка уникатној производњи резних елемената, посебно прилагођених специфичним условима радне средине, багеру, ведрици, итд.

**Кључне речи:** интегрисани приступ конструисања, резни зуби, роторни багер, багер ведричар, *CAD/CAE/CAM*, виртуелни прототип, симулација

# ABSTRACT

The process of digging in continuous excavators is directly performed by the buckets with cutting elements (cutting teeth and bucket knife) which are positioned on the front of excavators. In order to destroy rock material, it is necessary to exert sufficient force on it, which is dependent on the type of rock material, digging technology, shape of cutting elements, etc. The edges of cutting teeth settle on limited surfaces of rock material and exert pressure sufficient for their destruction. By the use of cutting teeth the available cutting force is concentrated on a small cutting length, thus facilitating the penetration of the entire bucket into the material. The destroyed material is lifted into the bucket by way of appropriate surfaces of cutting elements.

In order to properly perform their basic function, cutting teeth must meet several requirements, such as appropriate geometry, high resistance to abrasive wear, high mechanical strength and resilience, etc. The factors that must be considered when designing are teeth geometry, teeth sizing, selection of materials, installation of the teeth on the bucket and its manufacturing technology. Therefore, the process of designing cutting teeth of continuous excavators involves the following issues: a) The complexity of the design process related to the high level of correlation between basic properties of construction, which is why the final appearance, size and manufacturing technology of cutting teeth are very sensitive to the changes in the design process b) Due to strong influence of specific demands of users and tendency towards unique manufacture, it is necessary to ensure flexibility both in manufacturing technology and at all stages of cutting teeth manufacture, starting with the early stages of development and design process; c) The complexity of defining the external load and adoption of appropriate assumptions as the basis for ascertaining the lifting power and optimizing the shape of cutting teeth; d) The specific technology of cutting teeth manufacture, which is reflected in defining a large number of complex technical and technological parameters of casting; e) Manufacture of a physical prototype of the cutting tooth requires considerable time for preparation and implementation, while the testing of the physical prototype on the excavator in exploitation conditions is difficult and requires both longer period of time and considerable financial expenditures.

The existing knowledge and appropriate literature neither explain nor provide recommendations for solving the aforementioned problem. Due to the lack of a systematic approach, the manufacturing process is performed on the basis of experience and minimal improvement of existing solutions, using only rough assumptions and drawing conclusions without addressing the problem itself. This approach presents a problem when a more constructive and technologically advanced solution of cutting elements is to be produced, as is the case with the development of a new generation of modular cutting teeth.

The issue addressed in this PhD thesis refers to the introduction of a systematic process of designing cutting elements, through the concept of integrated product development. Such an approach presents an alternative solution to the current state of the development process of cutting elements, which can be incorporated and applied in the production process comparatively easily. The main goal of applying an integrated approach to constructing is to form a clear idea of how the product will look like prior to manufacturing the cutting elements, how the adopted production technology will affect the ultimate quality, how it will function in working conditions, etc. Moreover, the advantage of this approach is reflected in the reduction of costs, on account of the fact that CAD/CAE/CAM tools are used in the major part of the analysis during the design. This significantly reduces the time required for the testing in laboratory or exploitation conditions. On the other hand, there is a reduction in the time starting from the moment of the product demand to its launch on the market, because the number of development cycles is reduced by automatic rejection of unsatisfactory design solutions. The focus of this approach is transferred to the conceptual design and preliminary construction, which affects the later reduction in the number of structural changes and changes in the production process. This approach provides the basic conditions and enables the tendency towards unique production of cutting elements, specifically tailored to the specific conditions of working environment, excavators, bucket, etc.

**Keywords:** integrated approach to designing, cutting teeth, bucket wheel excavator, bucket chain excavator, CAD/CAE/CAM, virtual prototype, simulation

# САДРЖАЈ

Резиме

Коришћене ознаке

<b>1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА</b>	<b>1</b>
1.1 Резни елементи код багера континуалног дејства	1
1.2 Конструисање и развој производа	3
1.3 Интегрисан приступ конструисања	6
1.4 Проблематика конструисања резних зуба код багера континуалног дејства	8
1.4.1 Дефинисање и корелација основних својстава	8
1.4.2 Развој резних зуба према специфичним захтевима корисника	9
1.4.3 Прорачун носивости	9
1.4.4 Технологија израде	10
1.4.5 Израда и испитивање прототипа конструкције	10
1.5 Полазне хипотезе	11
1.6 Кратак преглед докторске дисертације	13
<b>2. ОПШТА ТЕОРИЈА РАЗАРАЊА ИСКОПАВАНОГ МАТЕРИЈАЛА</b>	<b>15</b>
2.1 Основне фазе процеса копања	15
2.2 Механизам процеса продирања	16
2.3 Механизам процеса резања	18
2.4 Карактеристике ископаног материјала	19
2.4.1 Структурне карактеристике	20
2.4.2 Физичке карактеристике	21
2.4.3 Смичућа чврстоћа	22
2.4.4 <i>Mohr-Coulomb</i> -ов линеаран закон разарања	25
2.4.5 Карактеристике напона	28
2.4.6 Опште претпоставке о понашању ископаног материјала	31
2.4.7 Гранични услови при резању	32
<b>3. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ИНТЕРАКЦИЈЕ РЕЗНОГ ЕЛЕМЕНТА И ИСКОПАВАНОГ МАТЕРИЈАЛА</b>	<b>34</b>
3.1 Различити приступи моделирања интеракције	34
3.2 Емпиријски модели резања	36
3.2.1 Теоријско разматрање	36
3.2.2 Израчунавање силе резања на бази емпиријског модела	39
3.3 Аналитички модели резања	41
3.3.1 Теоријска анализа димензионалног статичког модела резања	42
3.3.1.1 Дефинисање функције кохезије материјале	44
3.3.1.2 Дефинисање функције спољашњег трења	45
3.3.1.3 Дефинисање функције облика површине разарање ископаног материјала	47
3.3.1.4 Анализа утицаја тежине стенског материјала	47
3.3.1.5 Апроксимација облика линије разарања (метод клина захваћеног материјала)	49
3.3.2 Постојећи димензионални статички модели резања	50
3.3.2.1 Модел <i>Gill</i> -а и <i>Vanden Berg</i> -а	50
3.3.2.2 Модел <i>Swick</i> -а и <i>Perumpral</i> -а	50
3.3.2.3 Модел <i>McKyes</i> -а	50
3.3.3 Тростандардни аналитички модели резања	51

3.4	Нумеричке методе	53
3.4.1	Метод коначних елемената	54
3.4.2	Метод дискретних елемената	54
3.5	Критичка анализа приступа за моделирање интеракције	56
<b>4.</b>	<b>ДЕФИНИСАЊЕ МОДЕЛА ЗА ИЗРАЧУНАВАЊЕ ОПТЕРЕЋЕЊА РЕЗНОГ ЗУБА КОД БАГЕРА КОНТИНУАЛНОГ ДЕЈСТВА</b>	<b>58</b>
4.1	Формирање одреска	58
4.2	Анализа сила за случај раванског статичког модела оптерећења ведрице са резним зубима	60
4.3	Анализа доминантних процеса на нивоу резног зуба	63
4.4	Израчунавање оптерећења резног зуба применом специфичне силе резања	67
4.5	Израчунавање оптерећења резног зуба на бази поједностављеног механичког модела резања	71
4.6	Адекватност примене <i>Evans</i> -овог модела и корекција израчунатог оптерећења	76
<b>5.</b>	<b>МЕТОДОЛОГИЈА ИНТЕГРИСАНОГ ПРИСТУПА КОНСТРУИСАЊА РЕЗНИХ ЕЛЕМЕНАТА</b>	<b>79</b>
5.1	Формирање листе захтева	82
5.2	Испитивање конструкције резних зуба	83
5.3	Информатичка основа интегрисаног приступа конструисања	84
5.4	Практична примена усвојене методологије на примеру развоја модуларног резног зуба за багер ведричар <i>ERS1000/20</i>	86
<b>6.</b>	<b>ИНТЕГРИСАНИ CAD/CAE/CAM АЛАТИ У ФУНКЦИЈИ РАЗВОЈА РЕЗНИХ ЕЛЕМЕНАТА</b>	<b>94</b>
6.1	Параметризација виртуелних модела резних зуба	96
6.2	Генерисање функционалног виртуелног прототипа	101
6.2.1	Основни елементи потребни функционалног виртуелног прототипа	102
6.2.2	Функционални виртуелни прототип склопа ведрице и резног зуба	106
6.3	Анализа напонског стања	112
6.3.1	Напонска анализа резних зуба на бази усвојеног функционалног виртуелног прототипа	113
6.3.2	Напонска анализа резних зуба на бази претпостављеног спољашњег оптерећења	118
6.4	Анализа технологичности облика резног зуба	127
6.4.1	Примена интегрисаног приступа у процесу ливења	127
6.4.2	Технологија ливења у пешчаним калупима	128
6.4.2.1	Технологичност облика и грешке одливка	129
6.4.2.2	Конструкција елемената уливног система	131
6.4.3	Симулација процеса ливења модуларног резног зуба	133
<b>7.</b>	<b>ЗАКЉУЧАК</b>	<b>139</b>
	<i>Литература</i>	143
	<i>Прилог</i>	

## КОРИШЋЕНЕ ОЗНАКЕ

$F_P$	[N]	– Сила продирања
$F_R$	[N]	– Сила резања
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	– Густина стенског материјала
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	– Гравитационо убрзање земљине теже
$c$	[N/m <sup>2</sup> ]	– Кохезија
$\phi$	[°]	– Унутрашњи угао трења (трење у стенском материјалу)
$\delta$	[°]	– Спољашњи угао трења
$\tau$	[N/m <sup>2</sup> ]	– Тангенцијални напон
$\sigma$	[N/m <sup>2</sup> ]	– Нормални напон
$\tau_s$	[N/m <sup>2</sup> ]	– Смичућа чврстоћа стенског материјала
$\tau_{sr}$	[N/m <sup>2</sup> ]	– Резидуална чврстоћа стенског материјала
$\Delta$	[m]	– Деформација, померај
$\Delta_s$	[m]	– Смичући померај, деформација смицањем
$\sigma_1$	[N/m <sup>2</sup> ]	– Максимални главни напон
$\sigma_3$	[N/m <sup>2</sup> ]	– Минимални главни напон
$\theta$	[°]	– Угао који максимални главни напон $\sigma_1$ заклапа са хоризонталном осом; Угао разарања (смицања) стенског материјала
$\eta, \xi$	[°]	– Карактеристични правци смицања материјала
$\mu$	[°]	– Угао који заклапају карактеристични правци смицања у односу на правац главног напона
$q$	[N]	– Додатно (спољашње) оптерећење на стенском материјалу
$\tau_{sgr}$	[N/m <sup>2</sup> ]	– Смичућа чврстоћа на граници контакта резног елемента и стенског материјала
$c_a$	[N/m <sup>2</sup> ]	– Адхезија
$\psi$	[N/m <sup>2</sup> ]	– Константа стенског материјала
$\gamma$	[°]	– Леђни угао резног елемента
$\beta$	[°]	– Угао клина (конуса) резног елемента
$\alpha$	[°]	– Угао нагиба грудне површине резног елемента у односу на нормалу
$\delta_z$	[°]	– Нападни угао, угао резања
$d$	[m]	– Дубина резања (рачуната испод површине стенског материјала)
$w$	[m]	– Ширина резног елемента
$b$	[m]	– Ширина реза, ширина хоризонталног профила резног елемента
$l_{sb}$	[m]	– Растојање резног елемента од слободног бока резања
$l_{zah}$	[m]	– Дужина сечива резног елемента у захвату
$L_{IS}$	[m]	– Дужина истуреног дела резног зуба
$F_{uk}$	[N]	– Укупна сила која оптерећује резни елемент током процеса резања

$F_c$	[N]	– Кохезиона сила на површини оштрице резног елемента
$F_H$	[N]	– Хоризонтална компонента укупне силе резања
$F_V$	[N]	– Вертикална компонента укупне силе резања
$\sigma_k$	[N/m <sup>2</sup> ]	– Нормални напон на граници контакта стенског материјала и резног елемента
$\tau_{sk}$	[N/m <sup>2</sup> ]	– Тангенцијални напон на граници контакта стенског материјала и резног елемента
$\varepsilon$	[°]	– Угао који заклапају максимални главни напон и напон на оштрици резног елемента
$F_{ca}$	[N]	– Адхезиона сила на површини оштрице резног елемента
$\varepsilon_s$	[°]	– Угао најниже апроксимативне линије смицања стенског материјала
$\varepsilon_{skr}$	[°]	– Критични угао смицања (одвајања) стенског материјала
$r$	[m]	– Полупречник кривине линије разарања стенског материјала
$v$	[m/s]	– Брзина кретања резног елемента
$F_N$	[N]	– Сила нормална на оштрицу резног елемента
$l_1$	[m]	– Дужина линије додира на месту смицања стенског материјала
$F_{c1}$	[N]	– Кохезиона сила на површини смицања стенског материјала
$F_{grs}$	[N]	– Сила на граници разарања стенског материјала
$W$	[N]	– Укупна тежина клина захваћеног стенског материјала
$F_{bz}$	[N]	– Сила потребна за померање бочних страна стенског материјала за тродимензионални случај резања
$F_{cz}$	[N]	– Сила потребна за померање централне зоне стенског материјала за тродимензионални случај резања
$F_{Hbz}$	[N]	– Хоризонтална компонента силе потребне за померање бочних страна стенског материјала за тродимензионални случај резања
$\varphi$	[°]	– Угао заокретања (нападни угао) ведрице багера континуалног дејства у захвату
$H_T$	[m]	– Висина етаже ископавања
$H_\varphi$	[m]	– Висина ископавања за тренутни угао заокретања ведрице
$d'$	[m]	– Хоризонтална пројекција дубине резања
$F_z$	[N]	– Укупна сила потребна за хоризонтално померање ведрице, погонска сила
$Q_{uk}$	[N]	– Укупна тежина
$Q_{smv}$	[N]	– Тежина стенског материјала који се налази у ведрици
$Q_{ved}$	[N]	– Тежина ведрице са резним елементима
$Q_o$	[N]	– Укупна тежина одреска
$Q_{ov}$	[N]	– Тежина комада стенског материјала, који је одвојен и улази у ведрицу
$Q_{od}$	[N]	– Тежина комада стенског материјала, који се тренутно одваја од стенског масива
$F_c$	[N]	– Кохезиона сила
$F_K$	[N]	– Резултујући отпор копања
$A_{sm}$	[m <sup>2</sup> ]	– Површина равни смицања
$F_L$	[N]	– Укупна сила на леђној површини резног зуба
$F_{Ln}$	[N]	– Нормална компонента силе на леђној површини резног зуба
$F_{Lt}$	[N]	– Тангентна компонента силе на леђној површини резног зуба

$F_G$	[N]	– Укупна сила на грудној површини резног зуба
$F_{Gn}$	[N]	– Нормална компонента силе на грудној површини резног зуба
$F_{Gt}$	[N]	– Тангентна компонента силе на грудној површини резног зуба
$F_{smu}$	[N]	– Укупна сила на површини смицања
$F_{smut}$	[N]	– Тангентна компонента укупне силе на површини смицања
$F_{smun}$	[N]	– Нормална компонента укупне силе на површини смицања
$F_{smo}$	[N]	– Сила смицања одреска
$F_{smon}$	[N]	– Нормална компонента силе смицања одреска
$F_{smot}$	[N]	– Тангентна компонента силе смицања одреска
$F_{hab}$	[N]	– Чеони отпор услед заобљења (хабања) врха резног зуба
$F_{habG}$	[N]	– Чеони отпор са горње површине заобљења (хабања) врха резног зуба
$F_{habD}$	[N]	– Чеони отпор са доње површине заобљења (хабања) врха резног зуба
$\delta_{pom}$	[°]	– Спољашњи помоћни угао трења
$\chi$	[°]	– Угао који заклапају правац максималног главног напона у стенском материјалу и грудна површина резног елемента
$A_s$	[m <sup>2</sup> ]	– Попречни пресек одреска
$k_{AR}$	[N/m <sup>2</sup> ]	– Специфична сила резања
$k_{LV}$	[N/m]	– Специфична сила хабања
$\delta_v$	[°]	– Угао хабања резног зуба
$F_{TG}$	[N]	– Тангеницијална пројекција укупне силе на грудној површини резног зуба
$F_{NG}$	[N]	– Нормална пројекција укупне силе на грудној површини резног зуба
$F_{TL}$	[N]	– Тангеницијална пројекција укупне силе на леђној површини резног зуба
$F_{NL}$	[N]	– Нормална пројекција укупне силе на леђној површини резног зуба
$k_i$	[-]	– Специфична сила резања
$L_{uk}$	[m]	– Укупан обим (дужина раздвајања) одреска
$L_e$	[m]	– Контактна дужина површине хабања резног зуба
$b_{od}$	[m]	– Ширина одреска захваћеног једним резним зубом
$d_{od}$	[m]	– Дубина резања, односно висина одреска захваћеног једним резним зубом
$\psi_k$	[°]	– Угао који заклапају грудна површина резног зуба и укупна сила копања код Merchant -овог и Nishimatsu -овог модела резања
$\beta_E$	[°]	– Помоћни угао којим се дефинише угао клина резног зуба у анализи Evans - овог модела резања
$T$	[N]	– Сила потребна за одвајање захваћеног стенског материјала у Evans- овом моделу резања
$R$	[N]	– Сила на грудној површини резног зуба у Evans- овом моделу резања
$R_t$	[N]	– Сила на површини хабања резног зуба у Evans- овом моделу резања
$\sigma_p$	[N/m <sup>2</sup> ]	– Притисна чврстоћа стенског материјала
$\sigma_z$	[N/m <sup>2</sup> ]	– Затезна чврстоћа стенског материјала

# 1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

## 1.1 РЕЗНИ ЕЛЕМЕНТИ КОД БАГЕРА КОНТИНУАЛНОГ ДЕЈСТВА

На површинским коповима угља за континуално откопавање користи се високо продуктивна механизација, коју у основи чине роторни багери и багери ведричари [1]. Оно што ја за ове багере континуалног дејства карактеристично, и у чему се значајно разликује од других машина, је усклађеност система за откопавање са радном средином тј. са масивом који се откопава [2]. Откопавани материјал, угаљ или јаловина, су врло променљивих особина у откопаном рудном телу, односно, појављују се различите карактеристике материјала по више различитих параметара. Због тога се јављају динамичка оптерећења, па од усклађености система за копање са радном средином доста зависи и дужина радног века носеће челичне конструкције. Растућа концентрација производње на површинским коповима захтева од произвођача рударских машина повећање јединичних капацитета и откопних висина машина, смањење радних маса, боље прилагођавање рударско-геолошким, хидрогеолошким и климатским условима, повећање поузданости, побољшање ергономије уз истовремено смањење времена опслуживања машине. Веома важна чињеница је и та да багери континуалног дејства претстављају први сегмент процеса откопавања угља, па уколику су они ван функције, не ради комплетна линија. Обзиром да су овакви системи предвиђени да раде непрекидно, уз уважавање планских застоја и ремонта, свако непланско заустављање генерише озбиљне проблеме у испуњавању задатог капацитета и прави велике економске трошкове.

Процес копања код багера континуалног дејства непосредно врше кашике са резним елементима (резни зуби и нож ведрице), који се налазе на фронту резања. Да би се ископавани (стенски) материјал разорио, потребно је на њега деловати одређеном силом. У зависности од врсте стенског материјала, потребна је различита сила резања за разарање масива. Површински копови уопште, па и сваки коп појединачно, састоји се од великог броја међусобно различитих стенских материјала који се квалификују механичким, физичким и другим особинама, као што су тврдоћа, чврстоћа, лепљивост, абразивност, итд. Применом резних зуба расположива сила резања се концентрише на малу дужину резања и на тај начин се олакшава продирање комплетне ведрице у материјал. Ово се дешава због тога што резни зуби својом оштрицом доспевају на ограничене површине стенског материјала и врше напрезања довољна за њихово разарање. Разорени материјал се затим преко одговарајућих површина резних елемената транспортује у ведрицу. Може се уочити да је резни зуб елемент склопа ведрице који у процесу откопавања има двојаку улогу: разарање основног материјала и ископавање самог материјала (пропраћено транспортом материјала преко њега). Зуби штите нож ведрице од хабања и преузимају главни део процеса продирања и процеса резања. У зависности од врсте материјала који се откопава користе се и различите геометрије зуба. На пример, код откопавања шљунковитог материјала обично се користе само угаони (лопатасти) зуби, а код откопавања чвршћих материјала стреласти зуби. Број зуба на ведрици такође зависи од врсте ископаног материјала. Да би исправно извршили своју основну функцију, зуби морају задовољити више захтева, као што су повољна геометрија, висока отпорност на абразивно хабање, велика механичка чврстоћа и жилавост, итд. Због тога, фактори на које се мора обратити пажња при конструисању, су [3]: геометрија зуба, димензионисање зуба, избор материјала, монтажа зуба на ведрици и технологија његове израде. Исправним решавањем предходних фактора стичу се услови да током рада не дође до савијања и лома зуба, испадања зуба из лежишта, прекомерног трошења (хабања) зуба и ведрице, пораста отпора резања, а самим тим и ангажоване снаге копања, додатног напрезања коресподентних структура багера, интезивних вибрација и осцилација основне конструкције багера, незадовољавајуће гранулација ископаног материјала и пада ефективности и продуктивности багера. У табели 1. дат је приказ тренутно активних багера континуалног дејства на површинским коповима у Србији, са датим типом стенског материјала који ископавају, и прегледом укупног броја резних зуба по багеру.



Табела 1.1 Активни багери континуалног дејства у Републици Србији [10, 11, 12]

Површински коп	Тип багера	Интерна ознака	Ископавани материјал	Теоретски капацитет [m <sup>3</sup> /h] или [t/h]	Број ведрица	Број зуба на ведрици	Укупно зуба на багери
<b>РОТОРНИ БАГЕРИ</b>							
<b>КОЛУБАРА</b>							
Поље Д	SRs 1200 24/4+VR	Г4	Откривка	3450	8	8	64
	SRs 1200 24/4+VR	Г5	Откривка	3450	8	8	64
	SRs 1200 24/4+VR	Г6	Откривка	3450	8	8	64
	SRs 1200 24/4+VR	Г3	Откривка/Угаљ	3450/2972	8	8	64
	SRs 1201 24/4+VR	Г2	Откривка	3450 (4000)	14	8	112
	SRs 1200 22/2	Г1	Откривка/Угаљ	3450/2972	6	8	48
	SchRs 1760 32/5	Г9	Откривка	6100	20	6	120
	SRs 1300 26/5+VR	Г8	Угаљ	3870	23	9	207
	SchRs 630 25/6	Г7	Угаљ	3526	20	9	180
Тамнава Источно поље	SchRs 900 25/6	Г1	Откривка	4100	20	9	180
	SchRs 630 25/6	Г2	Угаљ	3526	20	9	180
Тамнава Западно поље	SRs 2000 32/5+VR	Г2	Откривка	6600	20	6	120
	SchRs 630 25/6	Г4	Откривка	4100	20	9	180
	SchRs 630 25/6	Г1	Откривка/Угаљ	4100/3526	20	9	180
Поље Б	SchRs C-700s	Г3	Откривка/Угаљ	3024/2600	12	6	72
	SchRs 350 12/5	Г4	Откривка/Угаљ	1260/860	8	6	48
<b>КОСТОЛАЦ</b>							
Дрмно	SRs 470 17/1.5		Откривка/Угаљ	1690/1453	8	6	48
	SRSs 2000 28/3+VR		Откривка	6000	18	2	36
	SRSs 2000 32/5+VR		Откривка	6600	20	2	40
	SRs 1300 26/5+VR		Откривка	4200	23	2	46
	SchRs 800 15/1.5		Угаљ	2600	14	8	112
Ђириковац	SRs 470 14/2 (3)		Откривка	1690	8	6	48
	SRs 470 20/3 (11)		Откривка	1690	8	6	48
	SRs 470 14/2 (4)		Откривка/Угаљ	1690/1453	8	6	48
	SRs 470 20/3 (12)		Откривка	1690	8	6	48
	SRs 400 14/1 (14)		Откривка/Угаљ	2800/2408	12	7	84
	SH 630 15/1.5 (8)		Откривка/Угаљ	2400/2064	14	8	112
	SchRs 300 12/1 (6)		Откривка	1080	8	6	48
<b>БАГЕРИ ВЕДРИЧАРИ</b>							
<b>КОЛУБАРА</b>							
Тамнава Источно поље	ERS 1000/20	В1	Откривка/Угаљ	1800/1548	36	6	216
<b>КОСТОЛАЦ</b>							
Дрмно	ERS 710.17.5	J	Откривка/Угаљ	1400/1204	38	6	228
	ERS 710.17.5	U	Откривка/Угаљ	1400/1204	38	7	266

Током рада резни зуби су изложени интезивном динамичком и ударном оптерећењу у комбинацији са абразивним хабањем. Овакво дејство оптерећења доводи до прогресивног трошења материјала зуба, а у тежим случајевима и до његовог деформисања или лома. Тада зуб не може исправно вршити своју основну функцију, што се директно и индиректно одражава на рад багера, односно на капацитет, оптерећење и потрошњу енергије. Када предходне последице дођу до критичног нивоа, багер се зауставља и замењују се оштећени и дотрајали зуби, што изискује временске застоје, који се обзиром на континуалност процеса, не могу занемарити. Последица свега су умањени економски ефекти производње угља, уз истовремено повећање трошкова услед временског застоја машине и набавке резервних резних елемената. Спровођењем одговарајућих мера на ограничавању хабања и затупљености резних зуба, могу се знатно побољшати услови рада багера. Успоравањем процеса трошења, стварају се услови за непосредно повећање експлоатационог века зуба, а посредно и

осталих елемената подсистема копања. Истраживања која су разматрала ову проблематику [4, 5, 6, 7, 8, 9] указала су да постоји велика могућност уштеде кроз оптимизацију триболошких елемената система, обзиром да су садашњи губици веома велики. Због тога, триболошка унапређења претстављају значајан циљ у решавању проблема уштеде материјала и енергије, повећању поузданости и века трајања резних зуба код багера. Трошкове, услед процеса трошења материјала резних зуба, је немогуће елиминисати, али их је у значајној мери могуће смањити.

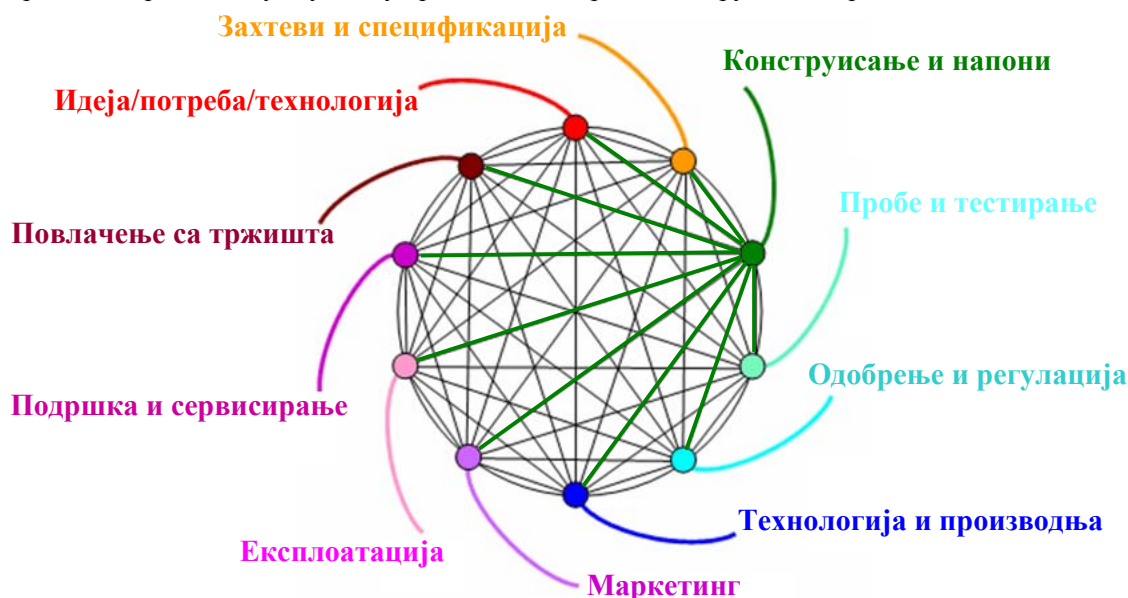
Када се говори о последицама лома и хабања резних зуба код багера континуалног дејства, може се говорити о две врсте последица. У директне последице спадају трошење материјала зуба и време потребно за његову замену. Трошење материјала се манифестује кроз запреминско разарање и/или хабање, односно промену облика и димензија резног зуба. Кад трошење материјала достигне неку критичну вредност, тада резни зуб више није у могућности да исправно врши процес продирања и резања. Због тога он трпи знатно већа оптерећења, па може доћи до деформације и лома зуба, испадања зуба из цепа, промене релативног положаја у односу на нож ведрице и др. Ако се прекорачи гранични степен хабања зуба, ведрица остаје незаштићена, почиње интезивно да се хаба и може доћи до њеног лома. Због губитка резне способности, зуби се благовремено морају заменити у циљу исправног извођења технолошког процеса копања. Услед већег хабања зуба неопходно је чешће вршити замене, што доводи до чешћих застоја и већих трошкова, како услед прекида процеса рада, тако и услед додатног ангажовања радне снаге. Индиректне последице хабања зуба код багера континуалног дејства су: повећање укупних отпора копања, повећање потребне енергије по јединици откопаног материјал, смањење капацитета багера, повећање напрезања преносника и носеће конструкције и др. Промена геометрије, односно затупљење резног дела зуба, доводи до повећања и неравномерне расподела спољашњег оптерећења. Неравномерно хабања зуба на једној ведрици, али и релативно хабање зуба од једне до друге ведрице, такође доводи до неравномерне расподеле отпора резања. Различито похабани зуби имају различите отпоре при копању, што доводи до додатних динамичких оптерећења. Са повећањем степена похабаности расте количина енергије, која се троши у процесу копања. Ово повећање енергије се троши на додатно савлађивање повећаних отпора копања, на расипање услед укупног повећања трења, али и због појаве нових губитака кроз динамичка оптерећења комплетне конструкције багера.

Наваривање тврдог материјала и уградња плочице од тврдог метала су, као приступи у повећању експлоатационог века багерских зуба, истраживане на домаћим површинским коповима [13, 14]. Ова истраживања су дала одређене позитивне резултате, али ипак њихова шира примена је доста ограничена. Постојећа ограничења се односе на врсту ископаног материјала са врстом и обликом зуба, технологију и сву потребну опрему за наваривање, па постигнути ефекти нису адекватни обзиром на трошкове, због чега у домаћој експлоатацији угља немају ширу примену. Овде се неоспорно може добити дужи век трајања зуба, али је поступак за сада скуп и релативно компликован, обзиром на број комада и геометрију која се наварује, тако да економски није оправдан. На садашњем нивоу, истраживања у циљу продужетка експлоатационог века зуба треба усмерити на развијање нових конструкционих решења, и то кроз развој и примену нове генерације зуба засноване на модуларној конструкцији. Предходна истраживања су показала да модуларна конструкција зуба има вишеструке предности по свим утврђеним критеријумима у односу на постојеће зубе, и да је у односу на решења са наваривањем и уграђеним плочицама за сада повољнија за примену на површинским коповима у домаћој површинској експлоатацији угља. Експериментална истраживања која су спроведена у нашој земљи дефинисала су основу за будући развој и унапређење модуларне конструкције зуба. Резултати објављени у домаћим радовима [4, 15, 16, 17] јасно указују да модуларно решење директно има утицај на унапређење процеса копања, како са становишта бољег резања и мањег оптерећења багера, тако и са становишта дужег експлоатационог века зуба.

## 1.2 КОНСТРУИСАЊЕ И РАЗВОЈ ПРОИЗВОДА

Посматрајући укупан животни циклус производа, може се дефинисати десет основних етапа. Идеја настаје као плод потребе, технологије или жеље за неким производом, па се сматра да она представља прву етапу у животном циклусу производа. Друга етапа представља уобличавање те идеје у техничком смислу, а често се реализује процесом пројектовања, након чега се реализује

траћа етапа, односно процес конструисања. Упоредо са овом етапом, али и након ње, спроводе се различита испитивања прототипова и нулте серије производа. Често производи у свом настанку морају бити стандардизовани или одобрени, након чега се детаљно дефинише технологија израде и сама производња дела. Пре појављивања производа на тржишту предходе одређени припремни процеси, у виду маркетинга, а у циљу приближавања и упознавања производа са корисником. Експлоатација производа представља осму етапу, а упоредо се одвија и етапа која обухвата различите процесе намењене техничкој подршци за производ, одржавању, сервисирању и др. Последња етапа у животном циклусу обухвата повлачење производа са тржишта, у оквиру које се реализују процеси демонтаже, одлагања, рециклаже и др. На слици 1.1, шематски је приказан животни циклус производа где се, осим међусобног повезивања две суседне етапе, види међусобна веза између свих етапа. Ова чињеница је веома важна, обзиром да је свака етапа у животном циклусу производа директно или индиректно повезана са свим осталим етапа. Ако се проблем посматра кроз процес конструисања, значи да треба узети у обзир све утицаје из свих осталих етапа, па их као смернице и ограничења укључити у процес конципирања конструкционог решења.



Слика 1.1 Животни циклус производа и међузависност различитих етапа

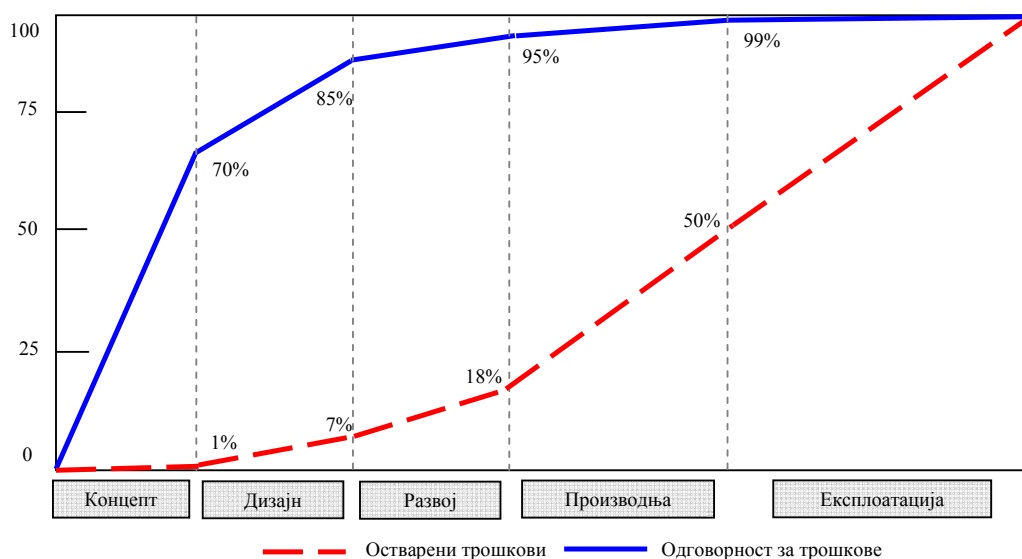
Конструисање, као једна од кључних етапа у целокупном животном циклусу производа, претставља креативан процес код кога се полазећи од идеје о производу, на крају добија конструкционо технолошка документација за његову производњу. Због тога се процес конструисања дефинише као процес трансформације информација из стања на нижем нивоу у виши ниво, са циљем да се кроз постепено уобличавање и задовољавање задатих ограничења дође до пројекта који је подлога за реализацију производа. Основна својства процеса конструисања су систематичност у приступу и поступност у реализацији, што се постиже реализацијом процеса конструисања у више фаза, које се у општем облику, могу дефинисати на следећи начин [18, 19]:

- *Планирање.* Обухвата разраду идеје и прикупљање података како би се дефинисали услови које систем (машина, склоп, подсклоп или део) треба да задовољи. Ови услови, који заправо претстављају строге захтеве и истакнуте жеље, резултат су тренутних потреба тржишта, идеја корисника и производних могућности. У овој фази процеса конструисања, кроз листу захтева се дефинише шта треба урадити.
- *Конципирање решења.* У оквиру ове фазе обезбеђује се одговор на питање како ће, односно на ком принципу ће систем да ради. То је дефинисање принципа рада и структуре делова из којих ће се систем састојати. Комбинацијом појединих принципских решења добија се већи број варијантних решења, након чега се врши њихова оцена на основу техно-економских критеријума и усваја оптимална варијанта.
- *Развој конструкције.* Обухвата развој димензија и облика делова, као извршилаца основних функција. За сваки део се усваја материјал, облик и начин израде, након чега се прецизно

дефинишу димензије. Истовремено, са избором димензија формира се и облик који се усклађује са функцијом, начином израде, оптималним искоришћењем масе и др. Ова фаза обухвата проверу напонских стања, крутости, сигурности и поузданости у раду, вибрације, осциловање и др. Осим тога, често се израђују први прототипови, и извршавају испитивања у лабораторијским и експлоатационим условима.

- *Конечно обликовање конструкције.* У оквиру ове фазе врши се детаљна конструкцијска разрада, односно прецизно дефинисање радионичких цртежа, прописивање толеранција, термичке обраде и др. Ова фаза обухвата и процес оптимизације, и завршну израду прототипова и њихово тестирање. Излаз из ове фазе је коначно одређивање и преиспитивање цене производа, што је и кључна фаза процеса развоја и конструисања.

Да би процес конструисања испунио свој циљ на најбољи могући начин, потребно је реализовати производ са одличним карактеристикама и минималном ценом, при чему тржишту треба да буде на располагању за најкраће могуће време. Да би се понудио такав производ, потребно је скратити време развоја производа, снижити трошкове конструисања и трошкове производње, и обезбедити висок квалитет. Обзиром да је у домену оптимизације процеса производње до данас у свету доста урађено, потребно је нове резерве за постизање наведених циљева потражити у првим фазама развоја, пре свега у фази конструисања производа, али и у фази израде и испитивања прототипа.



Слика 1.2 Зависност трошкова и одговорности за трошкове током животног циклуса производа [20]

Модерни приступи у конструисању производа и методе које се у ту сврху користе, подразумевају интердисциплинарне базе знања и сталну комуникацију између њих. Све то упућује на неколико важних и јединствених захтева које намеће процес конструисања. На првом месту, потребно је да се задовољи захтевана функција, што намеће избор и разумевање физичких принципа по којима производ функционише у свом раду. Конструкциона решења, такође морају да задовоље сложене производне захтеве и захтеве везане за монтажу. Конструктори морају узети у обзир и мноштво осталих аспеката који се односе на инсталирање, одржавање, складиштење, животни век, поузданост, сигурност, рециклажу и др. Производ такође мора бити конструисан тако да оствари профит, али и да задовољи захтеве и корисника и тржишта, односно конструктор увек мора бити свестан шта је то што корисник очекује од производа. На крају, потребно је узети у обзир и то да су процеси у оквиру којих се делови и производ израђују, као и услови под којима се користе, заправо променљиви, па је захтев робустности (чврстоћа, отпорност и др.) производа са овим променљивим условима производње и експлоатације веома важан конструкциони захтев. Колико је важан процес конструисања у целокупном животној циклусу производа, и какав утицај има на генерисање каснијих трошкова, приказано је на слици 1.2. Јасно се види да одлуке донешене у оквиру ове етапе имају огорман утицај на генерисање каснијих трошкова, пре свега у производњи и експлоатацији производа.

Може се закључити да конструисање производа почев од једноставних па све до најсложених форми, уз поштовање свих захтева и ограничења, представља комплексан задатак. Због тога је важно проналажење креативних и ефикасних решења проблема, на које се у процесу развоја, производње и експлоатације производа може наићи. То је јако важно управо у почетној фази конструисања, када се генеришу идејне алтернативе и усвајају одлуке које у основи одређују природу и карактер производа.

Конструисани део, подсклоп или склоп мора задовољити одређене критеријуме као што су облик, димензије и функционалност. Сам димензиони аспект конструисања претставља инжењерски концепт дат кроз облик, димензије и саму потребу конструкције. Процес дефинисања дела одвија се сагласно одређеним распоредом димензионисања и применом одређеног модела израчунавања (отпорност материјала, механика итд.). Са друге стране, могућност извођења експеримента на израђеним деловима може дати одговор који је доста ближи реалности, али уз релативно велики утрошак времена, мануелног рада и одговарајућих трошкова, па овај начин може довести до непрофитабилности конструкције. Постојећа алтернатива овим проблемима је употреба рачунара и адекватних програма за симулацију и функционалну анализу. Ови програми на бази добијених резултата обезбеђују конструктору моћан инструмент за анализу проблема и избор оптималног решења.

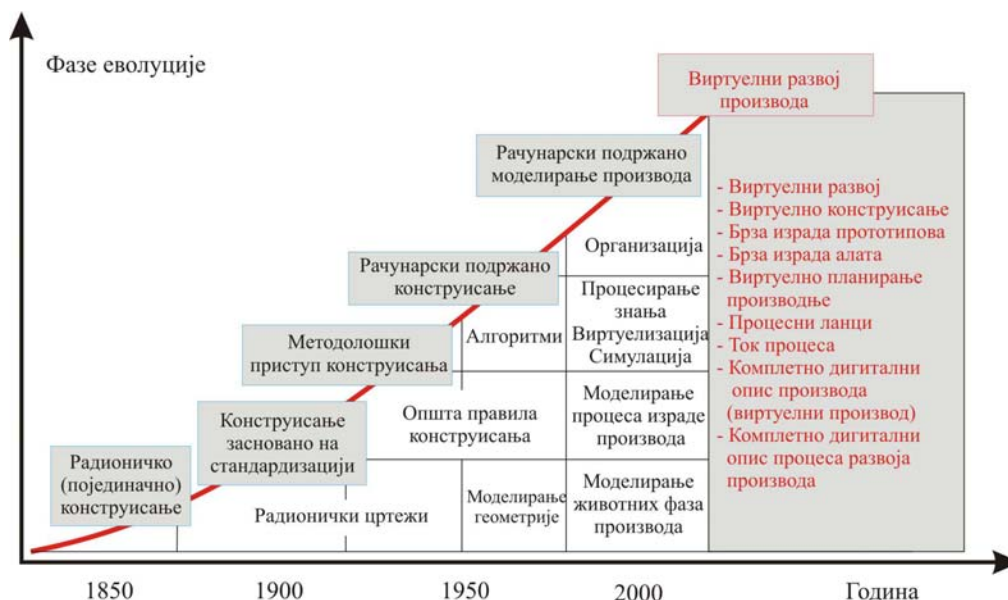
### 1.3 ИНТЕГРИСАН ПРИСТУП КОНСТРУИСАЊА

Конструисање нових или реконструисање постојећих производа, традиционално се изводе на бази искуства конструктора и експериментисањем типа "пробе и грешке". Овакав приступ омогућава инжењерима да дођу до решења, које је најчешће далеко од оптималног. Само у идеалним случајевима би прво решење било оно најбоље. Приступ помоћу кога би могао да се превазиђе предходни проблем полази од тога да се помоћу рачунара заокружи комплетан процес развоја, на почетку од идеје, па све до саме израде. Циљ оваквог приступа је да се пре саме израде створи јасна представа о томе како ће производ изгледати и како ће се понашати у радним условима, што се обезбеђује реализацијом одговарајућих рачунарских анализа и симулација. Са друге стране рачунарске анализе не могу дати апсолутно тачну слику понашања производа у експлоатацији, због чега је још увек неопходно радити завршна испитивања појединих склопова или одговорних делова. Основни разлог је што је материјал од којих је конструкција начињена нехомоген и анизотропан, затим структура није континуална (нпр. шупљине, прскотине у материјалу), онда су ту утицаји предходних обрада (нпр. заостали напони) и утицаји несавршених везе између делова. Сви ти услови доводе до појаве комплексних и недовољно познатих утицајних фактора, као и до појаве сложених утицаја околине (околина и њени утицаји су такође несавршени), па како је такве појаве тешко или практично немогуће описати, то анализе и симулације применом рачунара дају само оквирну слику посматраних појава. Међутим, анализе и симулације које се реализују помоћу рачунара, доприносе бољем предвиђању понашања производа у експлоатацији као и у раном откривању и елиминацији грешака у конструкцији. Према томе, постоји практична потреба да се развојне и истраживачке активности одвијају ван текуће производње, у развојним лабораторијама при фабрикама или у лабораторијама при универзитетима и институтима. Последња фаза у еволуцији процеса конструисања (слика 1.3), заснива се управо на примени концепта виртуелног развоја производа.

Технолошки развој обележен је широком применом информационих технологија у свим сферама производних система, па и у процесу конструисања. Овакав приступ карактерише особине као што су флексибилност, квалитет, агилност, одговорност, тимски рад, истовременост одвијања већег броја активности и интеграција. Један од кључних концепата који је омогућен управо развојем и применом информационих технологија, а усмерен ка испуњавању сложених захтева у процесу развоја производа, односи се на интегрисани приступ развоја производа. Основна карактеристика овог приступа огледа се у истовременом одвијању већег броја активности током развоја производа и пратећих процеса [24]. Циљ интегрисаног приступа је да се скрати време развоја, а производ додатно усаврши још у раној фази конструисања [19]. Реализације ове напредне визије предложене су у многим системским приступима (нпр. конкурентно инжењерство (*Concurrent Engineering*), симултани инжењеринг (*Simultaneous Engineering*), конструисање за извршност (*Design for eXcellence*), колаборативни развој производа (*Collaborative Product*

*Development*), брзи развој производа (*Rapid Product Development*) и др.), који се сведе на симултани и виртуелни концепт.

1. *Симултан концепт* се заснива на потреби за уском комуникацијом између конструкције и технологије. Суштина је у томе да се развој производа и развој технологије одвијају истовремено. Одлуке у конструисању доносе се на основу разраде технологије и обрнуто. На тај начин се скраћује време развоја и избегавају могући неспоразуми у смислу реализације предложених решења. Овакав приступ заправо претставља методологију рада засновану на паралелизацији извршавања различитих инжењерских задатака. Односи се на приступ који се користи у процесу развоја производа, где су различита инжењерска поља, као што су конструкција, анализа, технологија израде и др., интегрисана у циљу скраћивања времена потребног за појављивање производа на тржишту.
2. *Виртуелни концепт* се заснива на обједињавању развоја производа у простору и времену. Модели, моделирање и симулације су основа овог концепта. Производ и његова својства се дефинишу на моделима, израда се симулира на моделима, а симулира се и процес експлоатације. Виртуелни инжењеринг се заправо дефинише као интеграција геометријских модела и одговарајућих инжењерских алата (алати за анализу, симулацију, оптимизацију и др.) у рачунарски генерисаном окружењу, који омогућава мултидисциплинарни колаборативни развој производа.



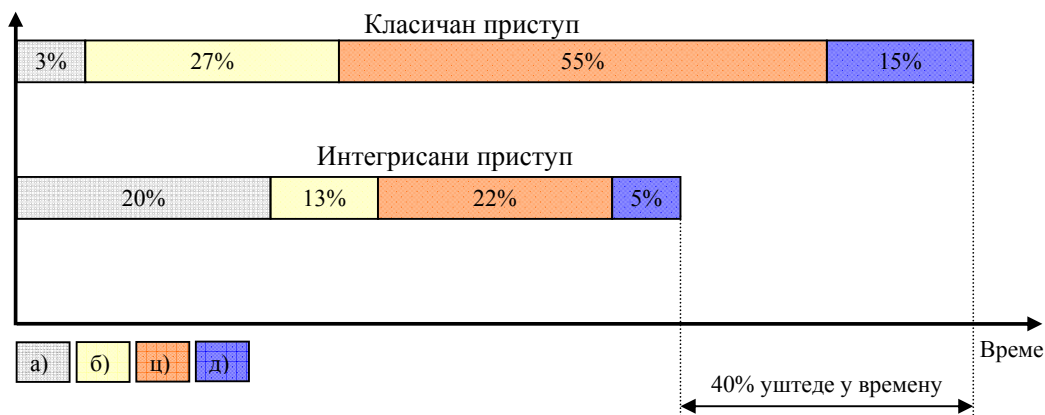
Слика 1.3 Еволуција процеса конструисања [21]

Интегрисани приступ конструисања потенцира рачунарску интеграцију свих активности развоја и реализације производа. Ако се посматрају кроз призму филозофије рада, и симултани и виртуелни концепт треба да омогуће и подстакну интензивну размену података, да користе базе података и базе знања, да користе рачунарски подржане технологије, да обезбеде колаборативни рад и др. Оно што се може дефинисати као њихова разлика, огледа се у степену интеграције савремених рачунарских алата и технологија<sup>1</sup>. Генерално говорећи, интегрисани приступ конструисања претставља систематски приступ развоја производа и са њим повезаних процеса, укључујући производњу и монтажу. Намењен је томе да се у развоју производа обједини све од самог почетка, односно да се укључе у посматрање сви елементи животног циклуса производа, од генерисања идеје до повлачења производа са тржишта. Због тога се може закључити да се интегрисан приступ конструисања као концепт одликује следећим елементима [23, 27]:

- Примена методологије и алата системског инжењерства
- Фокус на управљање целокупним животним циклусом производа

<sup>1</sup> Под појмом интегрисаног приступа, који се разматра у оквиру предметне проблематике, подразумеваће се оба концепта, без раздвајања или наглашавања појединачних особина.

- Аутоматизација инжењерских поступака, чиме се интегрисани приступ непосредно доводи у везу са **CIM** (*Computer Integrated Manufacturing*) концептом и коришћењем **CAx** (*Computer Aided...*) и **KIx** (*Knowledge Intelligence...*) алата
- Коришћење хуманих ресурса (знање, способност учења, креативно понашање), пре свега метода и техника групне динамике и тимског рада подржаног рачунаром
- Повећање квалитета производа, снижавање трошкова на нивоу животног века и скраћење периода развоја (слика 1.4)
- Континуално побољшање свих процеса у току конструисања
- Фокус на корисника и његово укључивање у процес



Слика 1.4 Пример уштеде у времену поређењем класичног и интегрисаног приступа.  
 а) Концептуално пројектовање, б) Прелиминарно пројектовање, ц) Пројектне измене, д) Размена података [25]

## 1.4 ПРОБЛЕМАТИКА КОНСТРУИСАЊА РЕЗНИХ ЗУБА КОД БАГЕРА КОНТИНУАЛНОГ ДЕЈСТВА

Процес конструисања резних зуба код багера континуалног дејства, карактеристичан је због следећих чинилаца [28]:

- а) Комплексност процеса конструисања везана за висок ниво корелације основних својстава конструкције. На тај начин су, крајњи изглед, димензије и технологија израде, веома осетљиви на текуће измене током процеса конструисања.
- б) Велики утицај специфичних захтева корисника и тежња уникатној производњи. Због тога је неопходно остварити велику флексибилност у процесу конструисања и процесу израде.
- в) Сложеност дефинисања спољашњег оптерећења и усвајање одговарајућих претпоставки, које су основа при прорачуну носивости.
- г) Специфичност технологије израде резних зуба, која се огледа у постојању великог броја комплексних техничко-технолошких параметара ливења и њиховој међузависности.
- д) Израда физичког прототипа резног зуба захтева значајно време припреме и реализације. Са друге стране испитивање физичког прототипа у експлоатационим условима је веома отежано и такође захтева значајне временске и финансијске издатке.

### 1.4.1 Дефинисање и корелација основних својстава

Резни зуби, као и други машински делови, су дефинисани скупом својстава. У својства се сврставају све физичке величине, особине и друге карактеристике које у потпуности дефинишу резне зубе. Својства резних зуба могу се разврстати у четири групе, и то: функција, облик, материјал и технологија израде. На тај начин резни зуб је потпуно дефинисан, ако су дефинисана



сва предходна својства. Између својстава једне групе, али и између група, мора постојати потпуна корелација. То значи да се једно својство не може изабрати независно од других. Такође, то значи да је свако од својстава одређено другим својствима која су већ изабрана, односно која су позната (табела 1.2).

**Табела 1.2** Општа зависност функције, облика, материјала и поступка израде у процесу конструисања [19]

Полазећи од	Према →	ФУНКЦИЈИ	ОБЛИКУ	МАТЕРИЈАЛУ	ПОСТУПКУ ИЗРАДЕ
ФУНКЦИЈЕ			1 Хеуристика облика, прави оптерећења, кретања и сл.	2 Чврстоћа, маса, хабање, осетљивос на утицаје	3 Ограничења функције коришћеним методом
ОБЛИКА		10 Проверити да ли облик, материјал и поступак израде задовољава функцију		4 Димензије, комплексност, површине које ће се добити	5 Комплексност, симетричност, заобљеност, димензије, тачност
МАТЕРИЈАЛА	7 Карактеристике материјала и коришћеног облика			6 Метод израде одговара примењеном материјалу	
ПОСТУПКА ИЗРАДЕ	8 Карактеристике поступка израде		9 Погодност за обликовање		

- Одлуке	- Технологичност	- Експлоатација
----------	------------------	-----------------

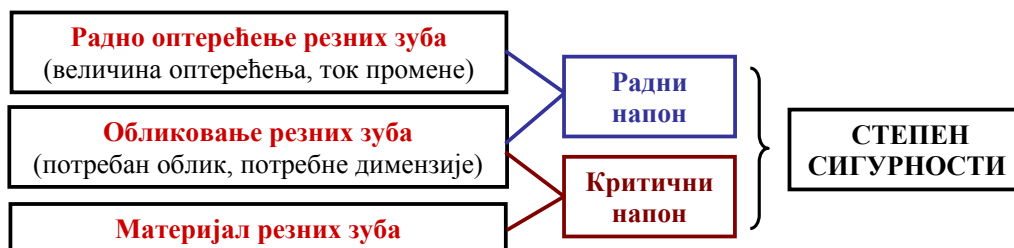
#### 1.4.2 Развој резних зуба према специфичним захтевима корисника

На данашњем нивоу, развој резних зуба треба да се заснива на реализацији производа према индивидуализованим захтевима, укључујући и случај уникатне производње где се резни зуби конструишу и реализују по специфичним захтевима конкретног корисника (карактеристике стенског материјала, конструкција ведрице, специфичност багера и др.). У овом контексту, кроз увођење нове парадигме производних технологија, дефинише се појам масовне персонализације производа, која је по технолошкој ефикасности и по трошковима производње еквивалентна концепту масовне производње [29]. За брзу реакцију на нове захтеве корисника, поред флексибилности у технологији израде, неопходно је обезбедити флексибилност у свим фазама реализације резних зуба, почевши од ране фазе развоја и процеса конструисања.

#### 1.4.3 Прорачун носивости

Процес конструисања, у општем случају, у први план ставља познавање радног оптерећења (слика 1.5), односно познавање правца, смера и интензитета спољашњих сила и момената, али и њиховог утицаја на попречне пресеке елемента који се конструише. Када се говори о конструкцији резних елемената код багера континуалног дејства, на првом месту неопходно је дефинисати спољашње оптерећење, које резни зуби треба да савладају. Приликом конструисања резних елемената тежиште се ставља на грубу процену интензитета, док се правац и смер спољашњег оптерећења дефинише са три међусобно управне компоненте силе у координатном систему, чији се координатни почетак везује за одређени део резног зуба, кашике или неког другог места на самом багеру. Међутим, у циљу генерисања бољих конструктивних решења, неопходно је јасно познавање свих фактора и њихових зависности, који имају утицаја на оптерећење резних зуба. То значи да је потребно прецизније дефинисање спољашњег оптерећења, и то кроз функционалне зависности утицајних фактора, односно дефинисање спољашњег оптерећења у функцији од својстава стенског материјала који се ископава, положаја и оријентације зуба у захвату, технолошких параметара (брзине, дубине резања) и др. Анализирајући како резни зуб делује на стенски материјал, какво понашање стенски материјал показује, и какве отпоре пружа у односу на посматрани резни елемент, могуће је добити значајне информације за конструисање нове и унапређење постојеће конструкције резних зуба.





Слика 1.5 Општа шема прорачуна носивости резних зуба

#### 1.4.4 Технологија израде

Резни зуби се углавном израђују ливењем, при чему се користи завршна обрада резањем, а примењу се и различити поступци термичке обраде. Сложени услови радне средине условљавају прилично компликовану радну геометрију резних зуба, а са тиме и сложен геометријски облик. За производњу резних елемената технолошки процес ливења доста је јефтинији и практичнији од других технолошких процеса (ковање, резање итд.), даје доста добар квалитет истих, па у таквим околностима ливење се може сматрати непревазиђеним технолошким процесом у технологији израде резних зуба багера континуалног дејства [30]. Технологија ливења је специфична због тога што пре самог извођења процеса сви производни и помоћни технолошки параметри морају бити прецизно подешени, уколико се жели висок квалитет одливка. То је битно и због тога, што применом процеса ливења, сами трошкови покретања производње могу бити веома велики. Са друге стране, сваки пут када се резни зуб не одлије правилно, губе се средства утрошена за енергију потребну за топлеење, радну снагу и накнадну машинску обраду. Не треба изгубити из вида да, уколико шкарт пређе пројектовани ниво, може доћи до још већих губитака услед покретања нове серије како би се задовољиле уговорене количине. Такође, резни зуби који нису исправно одливени (укључак, заостали напони, промена геометрије и др.), током рада брзо долазе у критично стање и нису способни да исправно извршавају своју основну функцију, било због лома, прекомерног или неправилног хабања, што посредно има велики утицај на трошкове и одвијање самог процеса копања.

#### 1.4.5 Израда и испитивање прототипа конструкције

Прототип омогућава поуздану проверу адекватности конципираних решења за будући производ како би се избегле корекције, које могу имати озбиљније размере у погледу продужења процеса освајања и задовољења потреба корисника, поред трошкова алата, материјала и других могућих тешкоћа у освајању.

Као што је раније истакнуто, важна карактеристика багера континуалног дејства је та што они претстављају први сегмент у континуалном процесу ископавања и транспорта угља на површинским коповима. Две битне особине које одликују ове машине су капацитет и континуитет ископавања. Обзиром да су овакви системи предвиђени да раде тако рећи непрекидно, уз уважавање планских застоја и ремонта, свако непланско заустављање генерише озбиљне проблеме у испуњавању задатог капацитета, и прави велике економске трошкове. Уско грло, у скоро свим процесима конструкције нових или реконструкције постојећих саставних елемената багера континуалног дејства, представља израда и тестирање физичког прототипа. Са друге стране, прототипови су незаобилазна инстанца, јер имају кључну улогу у крајњој потврди карактеристика усвојеног решења конструкције. Због тога је неопходно наћи алтернативу, у коме би се физички прототип монтирао на багер тек онда када су извршена и испитана сва могућа предходна подешавања и исцрпљене све остале могућности.

## 1.5 ПОЛАЗНЕ ХИПОТЕЗЕ

*Циљ процеса конструисања резних зуба.* Основни циљ процеса конструисања је прорачун и избор димензија и материјала резног зуба, тако да у току пројектованог експлоатационог века не дође до појаве критичних стања. То ће бити обезбеђено уколико у критичним пресецима радни напон не прекорачи дозвољене вредности. Радни напон зависи од врсте напрезања (карактеристике стенског материјала, технологија рада багера, положаја и оријентације резног зуба и др.) и његове промене у времену, док је критични напон везан за облик, димензије и усвојени материјал резног зуба, али и технологију његове израде, заосталих напона и слабих места у конструкцији. Због тога, први корак при прорачуну носивости резног зуба је одређивање оптерећења која се могу јавити у току рада.

Радно оптерећење је познато уколико су познати интезитет, правац и смер оптерећења, и његова промена у току времена. У случају прорачуна резних зуба, код багера континуалног дејства, потребно је идентификовати номиналне силе и моменте који представљају радна оптерећења, а који настају као последица интеракције са стенским материјалом, односно као последица процеса продирања и процеса резања. Други корак је уочавање критичних попречних пресека, и њихова напонска анализа, а све у циљу исправног избора материјала и карактеристичних димензија резних зуба.

*Оптерећење резних елемената.* Силе генерисане током интеракције зуба са стенским материјалом, током процеса продирања и резања, представљају доминирајуће величине оптерећења резних зуба. У општем случају интезитет оптерећења није константан и има стохастичку расподелу у времену. Ако се параметри брзине, геометрија резног зуба, дубина резања и др., не мењају у посматраном периоду времена, може се рећи да сила зависи од својстава стенског материјала, чија је расподела случајна. За прецизно дефинисање оптерећења потребно је утврдити закон промене  $F=f(t)$  и описати га одговарајућом функцијом. Да би се исправно дефинисала сила продирања и сила резања, потребно је проучити механизам разарања стенског материјала, односно анализирати и математички описати доминантне физичке процесе који се јављају у тренутку разарања. Усвајање одговарајуће хипотезе разарања стенског материјала, односно дефинисање општих и посебних услова њихове примене, представља први корак у израчунавању оптерећења.

*Разарање стенског материјала.* Механизам разарања, током процеса продирања и резања, описује се и анализира механиком стенског материјала. Обзиром да постоје три општа приступа за решавање проблема у механици стенског материјала, то је оптерећење резних зуба, који учествују у разарању могуће добити: а) дефинисањем аналитичких израза из теоријских разматрања, б) дефинисањем емпиријских израза, на бази експлоатационих испитивања и лабораторијских анализа, ц) генерисањем симулационог окружења на бази нумеричких метода.

Теоријско разматрање понашања стенског материјала даје само основне хипотезе, због тога што је познавање просечних физичких својстава тла и положаја површина међуграничних слојева непотпуно и често недовољно. Са практичног становишта, ове хипотезе су исто толико корисне као и неке друге хипотезе у машинству (нпр. отпорности материјала). Међутим, за разлику од челика који се у напонском стању налази у области еластичност, не постоји ниједан стенски материјал чија су механичка својства довољно једноставна да би била прихватљива као основа теоријске анализе. Аналитички приступ је подесан за описивање одређених граничних услова помоћу једноставне математичке функције. Са друге стране, за прецизно израчунавање оптерећења резних елемената, може имати ограничену примену. Комплексан број променљивих са недовољно јасним суштинским функционалним зависностима, нехомогена и нелинеарна природа проблема указују на недостатке оваквог приступа.

Свако емпиријско правило које се заснива на предходно изведеним експериментима и мерењима важи само статистички. Другим речима емпиријски израз изражава вероватноћу, а не извесност, па у том погледу емпиријско правило се не разликује од хипотеза које даје механика стенског материјала.

Трећи приступ базира се на израчунавању апроксимативних вредности оптерећења, применом нумеричких метода заснованих на употреби рачунара. Нумеричке методе обезбеђују моћан алат за анализу и синтезу инжењерских проблема са комплексним факторима ког којих није могуће, или је то јако тешко изводљиво, добити адекватне резултате применом само конвенционалних метода које су обично засноване на затвореној форми аналитичких решења.

Практично узевши, сва три приступа заснивају се на скупу претпоставки о физичким својствима стенског материјала. Ове претпоставке се увек у већој или мањој мери разликују од реалности. Обзиром да полазне претпоставке о механичким својствима стенског материјала одређују границе у којима важе изведени закључци за израчунавање оптерећења, неопходно је дефинисати полазне претпоставке и ограничења. Иако се теорија механике стенског материјала усвајањем полазних претпоставки бави само идеалним материјалима и идеалним геолошким условима, она представља кључ за решење комплексних инежењерских проблема везаних за ископавање материјала. То значи, ако је конструктор свестан несигурности које су садржане у фундаменталним претпоставкама прорачуна, као што је то случај са израчунавањем оптерећења резног зуба, у могућности је да предвиди природу и величину разлика које могу постојати између реалности и израчунатих вредности.

*Методолошки приступ.* Када се говори о методолошком приступу, постојећа знања и одговарајућа литература не објашњавају и не дају препоруке у довољној мери за начин и поступак конструисања резних зуба код багера континуалног дејства. Због тога процес конструисања своди се на искуствене информације, претпоставке и прилично апроксимативне закључке без улажења у суштину проблема. Овакав приступ представља проблем у тренутку када се жели направити искорак из постојеће форме и генерисати конструкционо и технолошки боље решење резних елемената, као што је то случај са развојем нове генерације зуба. Предходна истраживања [3, 15, 31] дала су основе овог концепта, развијена су одређена решења, али тренутно не постоји методологија и прописани поступак њиховог конструисања који је проверен у пракси.

*Симулације и анализа.* Алтернатива за решавање проблема у конструисању резних елемената, која се веома једноставно може инкорпорирати и применити у оквиру производног процеса резних зуба за багере континуалног дејства, јесте усвајање и реализација интегрисаног приступа конструисања. Основа оваквог приступа је у развоју и примени виртуелних модела. Виртуелни модели могу се користити за добијање слике о изгледу резног зуба још у раној фази развоја, да се симулирају и провере његова својства пре израде физичког прототипа, чиме се може остварити знатна уштеда или потпуно елиминисање трошкова и времена за израду и модификовање физичких прототипова. Виртуелни модел у овом случају нема задатак само да визуелно прикаже конструкцију резног зуба и његовог окружења, већ и да опише и симулира његово физичко понашање, што је веома битно и у циљу исправног димензионисања и дефинисања технолошког поступка ливења.

Применом интегрисаног приступа, скупе итерације измена на алатима за ливење се из производног погона преносе у рачунар. Предходна прецизна подешавања параметара ливења, кроз различите симулације, имају и додатне предности као што су константан квалитет одливених резних зуба, поштовање рокова и брзина усвајања нове конструкције, могућности прецизног планирања производње и др. Такође, за разлику од физичких прототипова, виртуелни модели могу искористити све предности савремене рачунарске технике, што омогућава да се тежиште процеса конструисања премести из физичког у виртуелно окружење. Имајући у виду сложеност процеса испитивања физичких прототипова код багера континуалног дејства, интегрисани приступ представља велику предност у решавању различитих инежењерских проблема код оваквих машина.

На основу свега што је предходно дефинисано, проистичу полазне хипотезе истраживања ове докторске дисертације:

*Хипотеза 1.* Како би се обезбедила основа за прорачун носивости резних зуба, извршена је анализа процеса који се јављају током интеракције резних елемената и стенског материјала. На тај начин су дефинисана оптерећења којима су изложени резни елементи у захвату. Обзиром да постоје различити приступи у моделирању овог оптерећења, пажња је усмерена на моделе који се у инежењерској пракси могу применити за решавање проблема код багера континуалног дејства. Због тога, посебно је анализирана могућност и адекватност њихове примене у процесу конструисања нове генерације резних зуба.

*Хипотеза 2.* У циљу увођења систематизованог развоја резних елемената код багера континуалног дејства на бази примене савремених рачунарских система, дефинисана је методологија интегрисаног приступа конструисања. Потврда усвојене методологије добијена је развојем модуларног резног зуба за багер ведричар *ERS1000*.

*Хипотеза 3.* Како би се смањила потреба за тестирањем физичких прототипова резних зуба, тежиште је стављено на развој функционалног виртуелног прототипа. Сходно томе, развијен је функционални виртуелни прототип за одређивање носивости резних зуба у оквиру виртуелног извођења експеримента. Верификација усвојеног виртуелног модела извршена је извођењем лабораторијског тестирања физичких прототипова резних зуба до разарања.

*Хипотеза 4.* Да би се извршило исправно димензионисање резног зуба, при чему израчунато спољашње оптерећење представља распон могућих вредности, примењена је метода коначних елемената. Овакав приступ омогућава не само брзу проверу напонског стања резних зуба, анализом екстремних вредности оптерећења и ограничења, већ и њихову оптимизацију, према критеријуму носивости.

*Хипотеза 5.* У циљу исправног пројектовања технологије израде резних зуба, дефинисана је симулација процеса ливења са подешавањем технолошких параметара. На тај начин, свака нова конструкција резног зуба се према утврђеној методологији анализира, чиме се проверава адекватност дефинисане технологије израде. Примена оваквог приступа је оправдана добијањем исправног одливка у најкраћем могућем року, при чему се без утрошка енергије и материјала за извођење пробног процеса ливења, уочавају потенцијалне грешке у одливку резног зуба.

## 1.6 КРАТАК ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

У оквиру *поглавља 2.*, разматрана је теорија разарања ископаног материјала. Обзиром да у току процеса интеракције стенског материјала и резног елемента, највећи утицај на оптерећење има процес продирања и процес резања, то су они детаљно анализирани. Циљ анализе је утврђивање доминантних чинилаца, који представљају основ за дефинисање модела оптерећења. Да би се фазе продирања и резања могле адекватно описати, али и у циљу успостављања јасних релација у оквиру модела оптерећења, дефинисане су основне карактеристике стенског материјала, а посебно су анализиране његове структурне и механичке карактеристике које имају највећи утицај. У оквиру овог поглавља дефинисане су основне карактеристике напона и различити критеријуми разарања стенског материјала, обзиром да се на основу тога дефинише подручје важења и усваја одговарајући модел оптерећења.

Анализа и опис процеса интеракције резног елемента и стенског материјала приказана је у оквиру *поглавља 3.* Проблематика приказана у овом поглављу битна је са аспекта дефинисања свих чинилаца који имају утицај на оптерећење резног елемента. Процес конструисања у општем случају у први план ставља познавање радног оптерећења, односно познавање правца, смера и интензитета спољашњих сила и момената, али и њиховог утицаја на попречне пресеке резних елемената који се конструишу. Силе генерисане током интеракције са стенским материјалом, током процеса продирања и процеса резања, представљају доминирајуће величине оптерећења. Проблем који се овде јавља, је тај, што је сила непозната величина, како по правцу и смеру, тако и по свом интензитету, уз непознати временски ток и расподелу на различите резне елементе. Дефинисање модела за израчунавање спољашњег оптерећења резних елемената, као основа у процесу конструисања, могуће је извршити на више начина. Дефинисањем емпиријских израза, на бази експлоатационих и лабораторијских испитивања, дефинисањем аналитичких израза из теоријских разматрања и развојем симулационог окружења на бази примене рачунара и одговарајућих нумеричких метода. На крају поглавља дат је критички осврт за сваку од наведених метода у погледу њихове примене за израчунавање оптерећења резних елемената.

У *поглављу 4.* дефинисани су модели за израчунавање оптерећења, који се могу применити на резне зубе код багера континуалног дејства. Закључци изведени из опште теорије дате у предходна два поглавља примењени су у анализи проблема интеракције стенског материјала и резног зуба. На бази тога, дефинисан је општи механички модел оптерећења резног зуба у захвату код делимично напуњене ведрице. Решавање овог механичког модела и добијање одговарајућег оптерећења, како је показано у оквиру овог поглавља, могуће је извршити на два начина. Применом приступа на бази специфичне силе и усвајањем једноставног механичког модела резања, базираног на најутицајној карактеристици стенског материјала. Да би се поједноставила проблематика дефинисања укупног оптерећења са једне стране, а у исто време обухватили

основни утицајни параметри чврстоће стенског материјала и геометријски параметри резног зуба, са друге стране, дефинисан је и усвојен једноставан механички модел, базиран на *Evans*-овој интерпретацији сила који се може применити код багера континуалног дејства. *Evans*-ов модел базира се на претпоставци да до разарања стенског материјала долази услед затезања, док се линија разарања дефинише као лук који се протеже до слободне површине ископавања. Изрази за отпоре резања изведени су на бази теорије равнотеже момената сила. Резни зуби, по облику слични облику клина, који се користе као резни елементи на багерима домаћих копова служе за рад у неким стенским материјалима (где се може сврстати и угаљ), па је примена *Evans*-овог модела за израчунавање оптерећења резног елемента у захвату сасвим оправдана. Међутим, оптерећење израчунато на овај начин представља само номинално оптерећење. Да би се израчунало укупно оптерећење, потребно је у обзир узети и утицај динамичких ефеката багера, захватање призме стенског материјала, утицај хабања резног зуба и др.

У оквиру *поглавља 5*, дефинисана је методологија интегрисаног развоја резних елемената код багера континуалног дејства. Приказана методологија повезује све битне чиниоце у животном циклусу резних елемената, од дефинисања техничког задатка, па до повлачења, односно рециклаже. Такође, у оквиру овог поглавља дефинисана су три битна елемента на које се мора обратити посебна пажња, при увођењу интегрисаног приступа. Први елемент представља дефинисање листе захтева, као полазне основе у процесу конструисања. Други елемент се односи на процес испитивања прототипа као последњег чиниоца у развоју конструкције, док је као трећи елемент дефинисана информатичка CAD/CAE/CAM основа на бази које се повезују сви процеси у оквиру интегрисаног приступа конструисања. На основу дефинисане методологије у овом поглављу, приказана је практична реализација развоја модуларног резног зуба за багер ведричар ERS 1000/20.

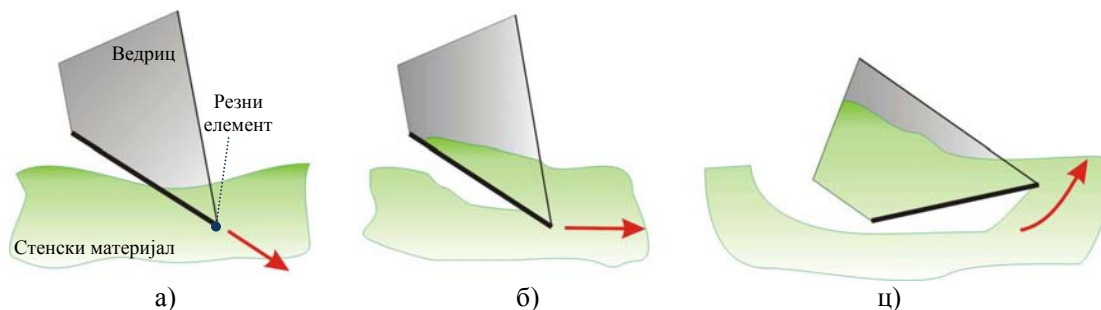
Посматрајући развој резних зуба кроз примену концепта интегрисаног процеса конструисања, у *поглављу 6*, су приказани задаци и проблеми који се помоћу CAD/CAE/CAM алата, системски решавају. Наведена су четири важна поља процеса конструисања, у оквиру којих треба да се разматра и усвоји оптимално решење резног зуба. То су: напонска анализа конструкције резног зуба, допунски критеријуми за дефинисање димензија и облика, испитивање усвојеног решења применом функционалног виртуелног прототипа и технологичност облика и усвајање параметара ливења. У поглављу је детаљно приказана напонска анализа и анализа технологичности за усвојено решење модуларног резног зуба *TF14038* за багер ведричар ERS1000/20. Такође, реализован је и функционални виртуелни прототип, који се користи за анализу носивости резног зуба. У оквиру овог поглавља извршена је верификација усвојеног модела за напонску анализу резних зуба, као и верификација усвојеног модела за симулацију и подешавање технолошких параметара ливења.



## 2. ОПШТА ТЕОРИЈА РАЗАРАЊА ИСКОПАВАНОГ МАТЕРИЈАЛА

### 2.1 ОСНОВНЕ ФАЗЕ ПРОЦЕСА КОПАЊА

Интеракцију између стенског материјала и резног елемента треба посматрати кроз три основне фазе из којих се састоји процес копања. То су продирање (пенетрација), резање и захватање (пуњење) материјала. *Продирање* се дефинише као процес уласка резног елемента непроменљиве оријентације у стенски материјал (слика 2.1.а), при чему је дубина резања контролисана променљива. За анализу ове фазе усваја се да је дубина материјала испред алата који врши продирање бесконачно велика. *Резање* се може описати као равно кретање резног елемента који се у односу на стенски материјал налази под одређеним углом. Дубина резања, као и брзина и нападни угао резног елемента, се сматрају константним (слика 2.1.б). За разлику од фазе продирања, у фази резања стенски материјал испред резног елемента се у разматрању посматра као ограничен. За анализу ефеката који су битни и који се јављају у прве две фазе, ширине резних елемената могу се посматрати на три начина: као веома мале, тачно дефинисане ширине и бесконачно велике. На пример, оштрица резног елемента се сматра широком уколико је њена дебљина минимално два пута већа од дубине резања [37], односно бесконачно широка када је однос њене ширине и дубине резања већи од шест [38]. *Захватање*, као трећа фаза процеса копања, претставља одвајање и одношење стенског материјала помоћу ведрице или неког другог утоварног уређаја. Ова фаза садржи комплексну мешавину продирања, резања и захватања материјала (слика 2.1.ц). За анализу ове фазе усваја се да је ширина ведрице бесконачно велика. На тај начин се уводи претпоставка да се резање, односно кретање стенског материјала, не одвија бочно у односу на нож ведрице [39].



Слика 2.1 Основне фазе процеса копања. а) Продирање (пенетрација), б) Резање, ц) Захватање (пуњење) материјала

Све силе које се супротстављају процесу копања, односно које у фазама продирања, резања, захватања и подизања захваћеног материјала делују на резне елементе и ведрницу, обухватају се појмом „отпори копања“. Како су предмет разматрања овог рада резни зуби, то је у наставку текста већа пажња посвећена опису и анализи појава које се јављају или су последица процеса копања, а директно се односе на ове резне елементе. Обзиром да су процес продирања и процес резања доминантни процеси, који имају највећи утицај на оптерећење, то су они детаљно анализирани и описани. Током ове две фазе, разарање стенског материјала се одвија на следећи начин [39]:

1. Продирање врха резног зуба, при чему долази до концентрације напона у стенском материјалу непосредно испред сечива.
2. Концентрација напона доводи до почетног разарања и деформисања стенског материјала, чиме је омогућено дубље продирање резног зуба

3. Иницијално разарање, које се манифестује дробљењем и еластичним деформисањем стенског материјала испред врха резног зуба, утиче на даље повећање напона.
4. Напон се повећава до граничног напона, односно до вредности која одговара чврстоћи стенског материјала, након чега долази до већег разарања и појаве пукотина.
5. Процес се наизменично понавља током фазе резања.

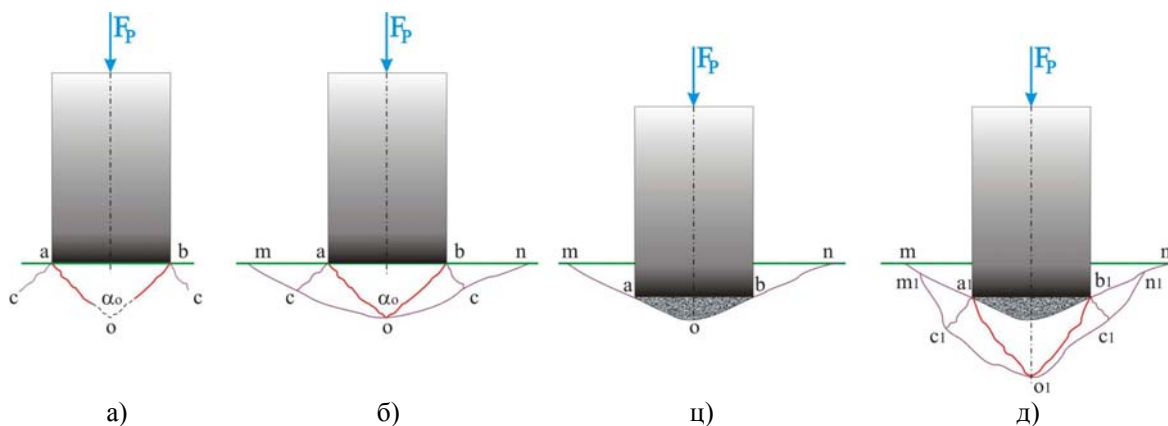
Врх резног зуба има две функције током процеса продирања. То су иницирање пукотине испред врха и одвајање разореног материјала дубљим продирањем сечива зуба. Енергија потребна за вршење ових процеса може се поделити на два дела [3]:

- I. Предходни рад који се утроши на продирање зуба у материјал. Како је зуб у облику клина, већина ове енергије се троши на савлађивање отпора трења.
- II. Производни рад који се утроши на само разарање стенског материјала. Ова фаза почиње онда када је извршено иницијално продирање зуба, односно док се материјал још увек налази у зони еластичних деформација.

Да би се процес продирања и процес резања могли адекватно описати, неопходно је дефинисати основне карактеристике стенског материјала, што је дато у оквиру тачке 2.4 овог поглавља. Дефинисање карактеристика је битно и због успостављања релација са узроцима и последицама процеса разарања, које настаје током интеракције резног зуба и стенског материјала.

## 2.2 МЕХАНИЗАМ ПРОЦЕСА ПРОДИРАЊА

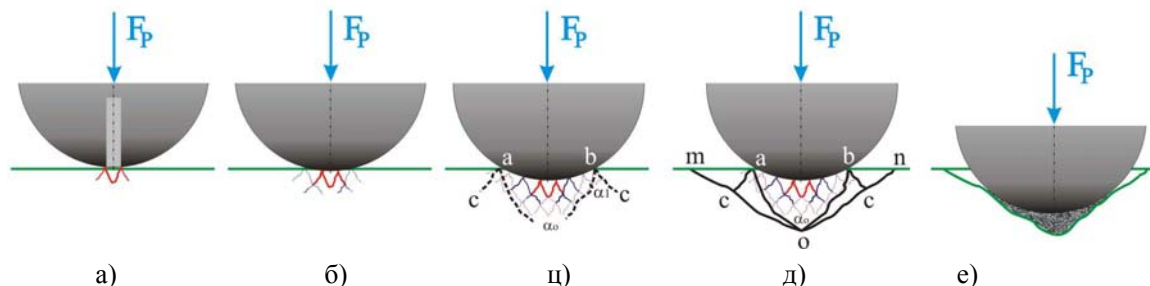
Да би се адекватно описао овај механизам извршена је статичка анализа процеса продирања са три различита попречна пресека, полазећи од једноставног цилиндра, па до сложеног конусног облика, који има највише сличности са резним зубима.



Слика 2.2 Механизам разарања при продирању резног елемента у облику цилиндра

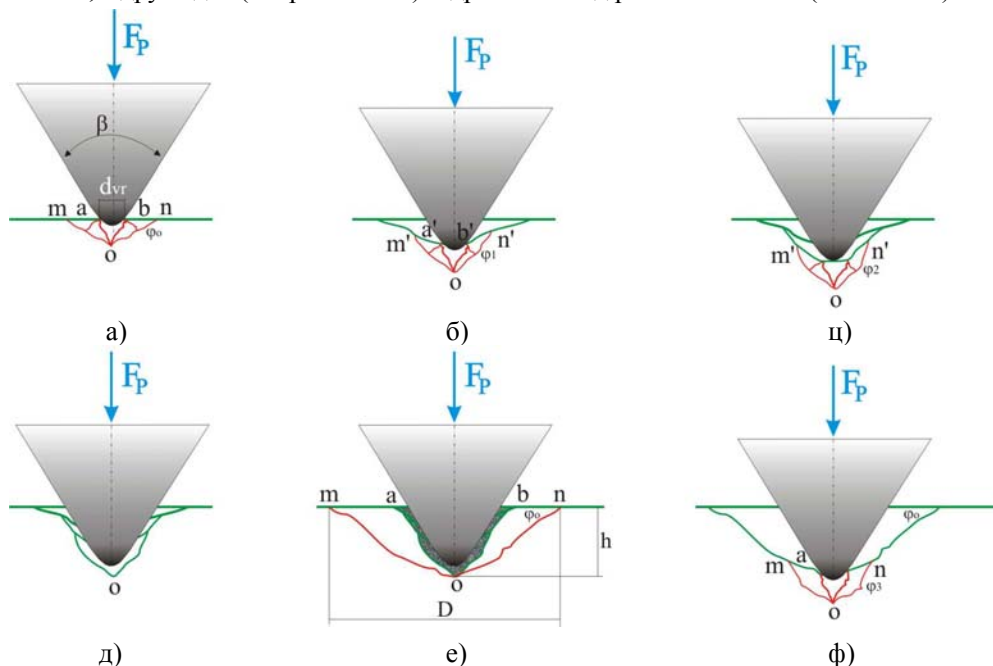
Ако се резним елементом у облику цилиндра на кога делује спољашња сила продирања  $F_P$  (слика 2.2), врши продирање, прво долази до еластичне деформације стенског материјала, затим се јављају пластичне деформације и на крају се појављују пукотине. Примарне пукотине простиру се од спољашњих ивица резног елемента ка његовој оси (правци  $ao$  и  $bo$ ) заклапајући међусобно угао  $\alpha_0$ . Повећање силе  $F_P$  утиче на даље ширење примарних пукотина, све док се у дубини стенског материјала не пресеку. На тај начин, пукотине које се простиру правцима  $ao$  и  $bo$  секу се у тачки  $o$ , при чему се може уочити издвојена површина дата границом  $ao$  и  $bo$ . Преко ове површине, а услед дејства спољашње силе, развијају се секундарне пукотине. Секундарне пукотине дефинисане правцима  $ac$  и  $bc$  почињу да се шире од тачке  $c$  у два правца, према тачки  $o$  и према слободној површини, односно ка тачкама  $m$  и  $n$ . Даље повећање силе  $F_P$ , доводи до одвајања (померања) дела стенског материјала, ограниченог пукотинама  $ao$  и  $on$ . Померај утиче на смањење отпора и дубље продирање резног елемента, при чему долази до дробљења дела стенске масе која је ограничена површином  $ao$ , и истискивања другог већег дела стенске масе изван простора ограниченог пукотинама. Део здробљеног стенског материјала остаје у разореној зони испод површине резног елемента, као што је приказано на слици 2.2.ц. При даљем повећању силе, прво

долази до збијања заосталог дела стенске масе испод контактне површине резног елемента, затим до појаве еласто-пластичних деформација, и на крају до појаве нових пукотина које се простиру примарним  $a_1o_1$ ,  $b_1o_1$  и секундарним  $a_1c_1$ ,  $b_1c_1$  правцима. Ако се сила и даље повећава, тада ће у одређеном тренутку, као и у предходном случају, доћи до одвајања делова стенске масе ограничених површина  $a_1o_1b_1$ ,  $m_1a_1o_1c_1$ ,  $n_1b_1o_1c_1$ . Разарање стенског материјала услед продирања резног елемента, одвија се циклично смењивањем еластичних деформација, пластичних деформација и одвајања дела материјала. Сваки циклус завршава се одвајањем, док резни елемент продира на већу дубину.



Слика 2.3 Механизам продирања резног елемента сферног облика

У случају продирања резног елемента сферног облика (слика 2.3), сила се на почетку преноси по веома малој контактної површини. Са повећањем силе  $F_p$  и повећањем деформације стенског материјала, повећава се и површина контакта. Неравномерност у расподели притиска доводи до појаве смичућих напона и појаве првих пукотина, које се простиру на исти начин као и у случају резног елемента цилиндричног облика. И у овом случају јављају се примарне пукотине под углом  $\alpha_0$  и секундарне пукотине под углом  $\alpha_1$ . Са повећањем спољашње силе, површина контакта (сфере и стенског материјала) се повећава, што изазива нове пукотине чији су правци пружања паралелени са правцима предходних пукотина. Повећањем контактне површине пукотине се развијају према дубини масива на исти начин као у предходном случају, са цилиндричним резним елементом. При довољно великој сили, пукотине орјентисане правцима  $ac$  и  $bc$  развијају се до тачке  $c$ , а пукотине орјентисане правцима  $ao$  и  $bo$  развијају се до тачке  $o$ . Код даљег повећања притиска, пукотине од тачке  $c$  развијају се у два правца, један према тачки  $o$ , а други према тачкама  $m$  и  $n$ , што условљава издвајање дела стенског материјала (површине  $aob$ ,  $aom$  и  $bon$  на слици 2.3.д) Ова запремина материјала се даљим повећањем притиска дроби, при чему се један део материјала истискује из захваћене зоне, а други део (површина  $aob$ ) задржава испод резног елемента (слика 2.3.е).



Слика 2.4 Механизам разарања при продирању резног елемента у облику конуса (клина)

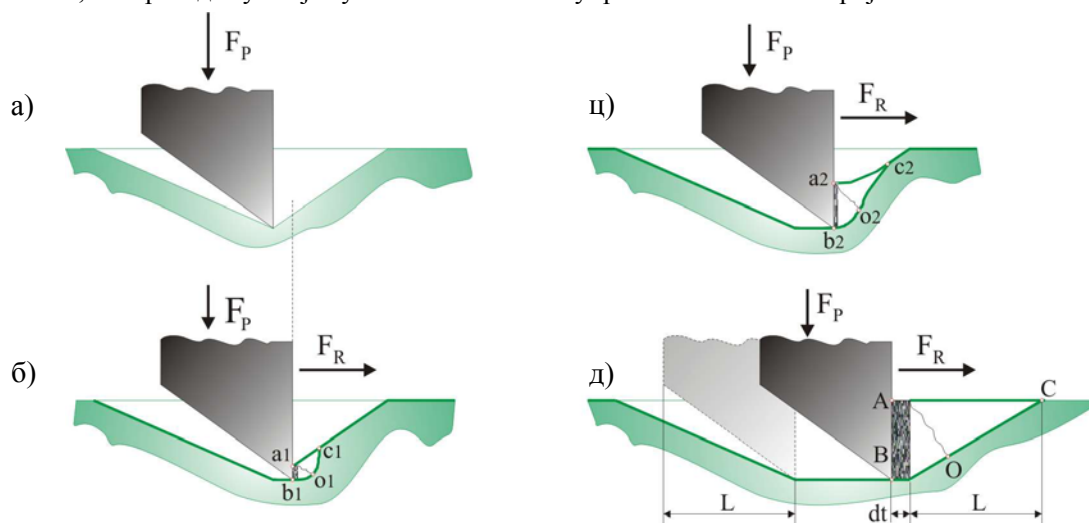


Продирање резног елемента у облику клина (конуса), приказано на слици 2.4, ствара знатно сложеније услове разарања него што је то био случај са сфером и цилиндром, због тога што се притискајућа површина стално повећава, а самим тим и притисак. Међутим, утицај оваквог облика резног елемента на стенски материјал може се посматрати као да врх конусног резног елемента има облик сфере. Овакву претпоставку могуће је прихватити обзиром да се врх резног елемента никада не завршава оштрицом (линијом или тачком), већ увек има одређену ширину  $d_{вр}$ .

Приликом продирања резног елемента у облику клина, као и у предходним случајевима, прво долази до еласто-пластичних деформација, затим до дробљења и одваљивања комадића стенске масе, после чега сечиво продира до одређене дубине. Дубина продирања зависи од угла смицања  $\varphi_0$  и угла клина резног елемента ( $\beta$ ). Са повећањем угла  $\varphi_0$  количина материјала која се задржава испод сечива резног елемента се повећава, а његово продирање смањује. Након примарног долази до секундарног разарања, односно после збијања заосталог материјала испод сечива резног елемента долази до еластично-пластичних деформација, а након тога и до разарања стенске масе (површине  $m'o'a'$  и  $b'o'n$  на слици 2.4.б) под угловима  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  који имају већу вредност од угла  $\varphi_0$ . Циклус секундарног разарања наставља се све док се бокови резног елемента не ослоне својим површинама на неразрушени део стенске масе. Након тога, под притиском бокова резног елемента, долази до одваљивања комадића стенске масе дуж смичућих површина  $om$  и  $on$ , које са слободном површином заклапају угао  $\varphi_0$ . Након овога циклус се понавља.

### 2.3 МЕХАНИЗАМ ПРОЦЕСА РЕЗАЊА

Анализа појава које настају приликом резања стенског материјала још и данас носи извесне поставке које се искључиво односе на технологију резања метала. Метали се током процеса обраде понашају пластично и по законима који су теоријски изведени и доказани. Ово није случај са стенским материјалом, тако да се закони дефинисани за резање метала не могу у потпуности применити. Услови резања стенског материјала су веома различити, што отежава њихово проучавање и доношење једног општег суда о механизму разарања као и распореду и величини отпора којим се стенски материјал супротставља разарању [40]. Процеси резања стенског материјала, најчешће се не одвијају у присуству једне, већ две или више слободних површина, што проузрокује потпуно нове услове о којима се при анализи процеса мора водити рачуна. Такође, у току процеса резања, резни елементи су мање или више похабани, што се опет мора узети у обзир када се процес анализира. При анализи резања стенског материјала, чак и данас, одређени истраживачи се углавном ослањају на законе и поставке изведене за резање метала, обзиром да су своја тумачења засновали управно на таквим теоријама.

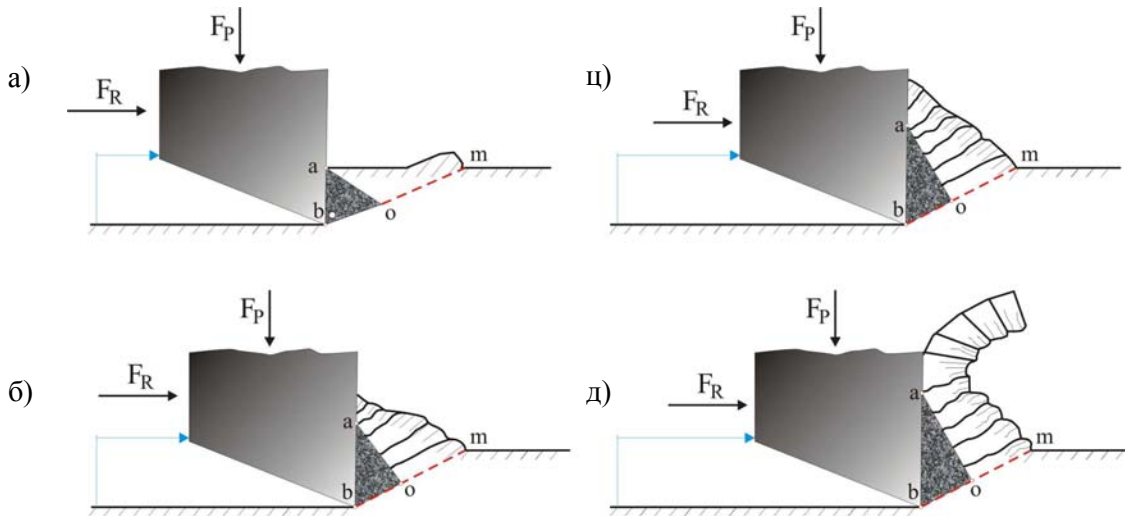


Слика 2.5 Шема резања кртог стенског материјала резањем

Резању предходи процес иницијалног продирања резног елемента у стенски материјал (слика 2.5.а, б, ц), где главну улогу има сила продирања  $F_p$ . Механизам продирања је описан у предходном

делу, па сви закључци важе и у случају резања. Продирање се завршава дробљењем стенског материјала испод и испред резног елемента, након чега он наставља даље кретање, а доминанту улогу преузима сила резања  $F_R$ , при чему сила продирања задржава неку константну вредност. На слици 2.5.б и ц., површином  $a_1-b_1-c_1$  и површином  $a_1-b_2-c_2$  приказана су разарања мањег обима настала услед иницијалног продирања резног елемента.

Под дејством силе  $F_R$  сечиво се помера за неку величину  $dt$ , након чега се појављују прве пукотине у правцу кретања резног елемента (слика 2.5.д). При повећању силе  $F_R$  обим разарања се повећава и резни елемент се помера у правцу деловања силе  $F_R$ , што изазива одвајање већих комада стенског материјала дуж површине  $BC$  (ова површина се назива смичућа површина или раван смичања). После одвајања разореног материјала већег обима (површина  $ABC$ ), процес се понавља, односно следи неколико разарања мањег обима, а затим поново разарање већег обима, што чини један циклус састављен од неколико мањих и једног већег разарања. Током циклуса варира и сила којом је оптерећен резни елемент. Сила расте све до тренутка одвајања стенског материјала већег обима, да би након тога нагло пала до вредности блиске нули. Ово је и разлог што дијаграм отпора резања показује карактеристичне врхове.



Слика 2.6 Шема разарања стенског материјала са својствима пластичности

Када се реже стенски материјал, који има својства пластичности (слика 2.6), онда се преко целокупне грудне површине резног елемента преноси притисак на стенску масу. Под дејством силе  $F_R$  долази до смичања дуж равни  $om$ , с тим што део стенског материјала на сектору  $ao$  претрпи увек разарање. При даљем деловању силе  $F_R$  долази до померања резног елемента и разарање материјала у виду плочица, а како је то приказано на слици 2.6 б,ц,д. У случају да је веза између оваквих плочица довољно чврста, тада се материјал одваја у облику струготине, као што је приказано на слици 2.6.д. Код резања у пластичним стенским материјалима, дијаграм притиска не показује онако карактеристичне врхове као у случају када се реже крт материјал, јер процес резања у овом случају тече континуално, тако да се добијају мања колебања.

Познавање расподеле напона у стенском материјалу испред врха резног елемента има велики значај за дефинисање процеса резања и анализу оптерећења резног елемента. Посебно је значајно познавати расподелу напона у моменту појаве таквих смичућих напона која доводе до разарања и одвајања комада стенског материјала.

## 2.4 КАРАКТЕРИСТИКЕ ИСКОПАВАНОГ МАТЕРИЈАЛА

Карактеристике ископаног материјала имају пресудан утицај на процесе који се одвијају током интеракције са резним елементом. Тај утицај се манифестује кроз појаву сила и понашање материјала током процеса копања, што директно утиче на оптерећење резних елемената. За дефинисање материјала може се узети велики број физичких својстава, као што су

величина зрнасте структуре, кохезија и др. Подела по свим могућим својствима доводи до великог броја категорија стенског материјала. Међутим, са аспекта решавања инжењерских проблема, велики број различитих стенских материјала класификује се у мали број категорија [2, 42], заснованих на функционалној дефиницији анализираних проблема (нпр. ако се глина усвоји као репрезент ископаног материјала онда се такав материјал описује као фино гранулиран материјал са кохезијом и карактеристикама пластичности).

Циљ разматрања основних карактеристика ископаног материјала је дефинисање оних чинилаца који имају пресудан утицај на процес разарања и оптерећење резних елемената. На тај начин обезбеђују се полазни подаци за процес конструисања резних елемената. Без обзира какве су основне карактеристике материјала, са аспекта процеса копања, могу се дефинисати три основне групе: растресити, меки стенски и тврди стенски материјали. У наставку текста, пажња је усмерена на структуру, физичке особине и карактеристике чврстоће ископаног материјала, са освртом на критеријуме разарања.

### 2.4.1 Структурне карактеристике

Приликом теоријских тумачења или квантитативних описа појединих особина, или понашања стенских материјала у различитим условима оптерећења или напонских стања, често се усвајају претпоставке које омогућавају примену математичких модела и одређених теорија, али које у природи нису испуњене. Ове претпоставке зависе од структурних карактеристика стенског материјала и циља примене. Стенски материјал, као реална средина, по правилу је хетероген, анизотропан, са прслинама и налази се у неком природном напонском стању [43].

*Хомогеност и хетерогеност.* Под хомогеним стенским материјалом подразумева се материјал који је у свим својим деловима састављен на исти начин, односно код кога су физичке особине у свакој тачки једнаке. У противном, материјал се назива нехомогеним или хетерогеним. Поред овако дефинисане хомогености може се говорити и о „релативној хомогености“ у односу на одређене особине. Стенски материјал, у погледу једне особине може бити хетероген (нпр. отпорност на притисак), а у погледу друге особине хомоген (нпр. проводљивост топлоте). Хетерогеност стена условљена је неправилним или неуједначеним распоредом, како њихових саставних елемената (слика 2.7.а), тако и њихових механичких особина. У стенским материјалима, по правилу не постоје уједначеност у расподели чврстоће, а ни у расподели природних напона. Такође, оштећења и дисконтинуитети али и нетакнути делови стенског материјала, могу бити распоређени у стенском масиву потпуно произвољно и неуједначено. Даље следи, да стварно понашање стенских материјала може бити различито од понашања описаних и изведених из теоријских разматрања, заснованих на просечним вредностима. Појам хомогености или хетерогеност код стенских материјала везан је и за размеру проблема који се посматра. Због тога се може говорити о „статистичкој хомогености“ или „квазихомогености“ (нпр. узорак који се посматра на површини од једног  $\text{cm}^2$ , може бити веома хетероген, а на површини од неколико десетина или стотина  $\text{cm}^2$  може се сматрати хомогеним). Када се говори о стенским материјалима, појам хомогености односно хетерогености, везан је углавном за следеће особине: структура зрна и њихове везе, слојевитост, испуцалост итд.

*Изотропија и анизотропија.* Под изотропним стенским материјалом подразумева се материјал код кога су физичке особине једнаке у свим правцима (еластичност, ширење на топлоти, кохезија, електропроводљивост и др.). Стенски материјал, код кога различити правци у истој тачки нису еквивалентни у погледу физичких особина, је анизотропан. Појам анизотропије код стенског материјала такође је релативна категорија. Она не мора бити везана за све физичке особине једног материјала, већ може да се ограничи само на неке особине као што су водопропусност, деформабилност, кохезија итд. Стенски материјали у општем случају јесу анизотропни, а анизотропија је условљена испуцалошћу, слојевитошћу и др. Она се нарочито испољава на следећим физичко-механичким особинама: отпорност на смицање, затезање и притисак, еластичност, деформабилност и водопропусност. Најизраженија врста анизотропије стенских материјала је у односу на деформабилност. Доказано је да се стенски материјали по правилу не деформишу подједнако у свим правцима.

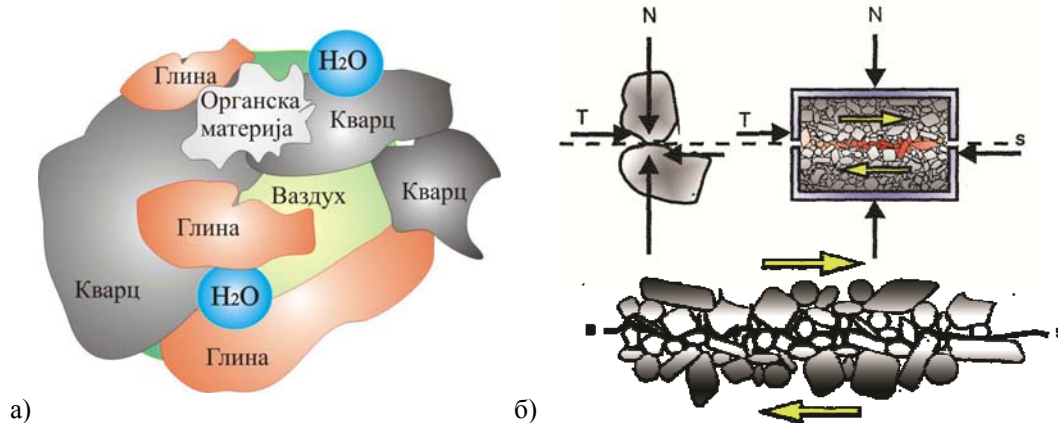
*Континуитет и дисконтинуитет.* Стенски материјал као реална средина се одликује испуцалошћу, која битно утиче на његово механичко понашање. Орјентација, локација,

постојаност и параметри отпорности при смицању критичних дисконтинуитета претстављају најважније индиректне податке при решавању инжењерских проблема. Под појмом дисконтинуитета подразумевају се слојне површине, пукотине и све остале површине на којима је чврстоћа знатно редукована, обзиром на монолитне комаде тог истог стенског материјала и по чијој површини може доћи до смицања стенске масе. Дисконтинуитети се одликују следећим параметрима: положај дисконтинуитета у простору, размак, постојаност, храпавост и валовитост, постојање отвора, испуна, чврстоћа зидова и др.

## 2.4.2 Физичке карактеристике

Основна својства стенског материјала зависе од његових физичких карактеристика као што су густина, адхезија, кохезија и трење. Густина  $\rho$  игра најважнију улогу у интеракцији резног елемента и стенског материјала, тим пре што се непрестано истиче директна унутрашња зависност густине са стањем сажимања и заосталим напонима у материјалу. Адхезија зависи од трења и унутрашњег садржаја воде. Адхезија је параметар који се обично користи за карактеризацију међусобног дејства материјала и резног елемента, а не самог материјала и његових унутрашњих веза.

Кохезија  $c$  је трећи параметар битан за одређивање особина материјала. Кохезија се може посматрати као отпор раздвајању заједничке групе делића. Кохезија је особина ситнозрног материјала, који се због тога назива кохерентним или везаним материјалом. Разлика између некохерентних зрнастих материјала који не садрже много ситних честица и кохерентних, са великим бројем ситних честица, јасно је видљива када су оба сува. Некохерентан материјал је тада скуп расутих зрна без одређеног облика. Кохерентан материјал представља тврде запремине којима се облик не може мењати без употребе веће силе. Применом силе, почетни облици се разарају на мање запремине. Како се смањује величина честица материјала, тако се повећава њихов број у јединици запремине при иначе једнаком коефицијенту пора. Најситније честице састоје се, махом, од минерала глине који су најмање отпорни на механичка дејства. На додирним тачкама између честица делују електричне и међумолекуларне силе. Њихов интезитет је већи што је мањи размак између честица, док је укупан утицај у јединици запремине већи, што у њему има више честица и више међусобних додира.



Слика 2.7 а) Комплексан састав стенског материјала, б) Унутрашње трење у материјалу [44]

Кохезија настаје фиксирањем међусобног положаја честица материјала од стране сила које делују на њиховим контактима, а нису условљене деловањем спољашњих сила. Кохезија ситнозрног материјала зависи од много фактора, од којих су најважнији: величина честица и њихов минеролошки састав дефинисан гранулометријским саставом и границама конзистенције; међусобни размак суседних честица дефинисан коефицијентом пора<sup>2</sup>; електрохемијски састав порне воде. Из бројности и значаја меродавних фактора види се да кохезија не може бити константа стенског материјала, као што је данас опште прихваћено мишљење. Она за сваки материјал зависи од коефицијента пора, временског трајања предходног оптерећења и многих других чинилаца. Због тога су проучавање и дефинисање чврстоће на смицање кохерентних

<sup>2</sup> Пора је међупростор у стенском материјалу испуњен ваздухом.

материјала врло сложени. Механизам смицања код ситнозрнастог тла, у којима преовладавају љуспасти елементи мале дебљине и релативно велике површине, биће различит од модела смицања зрнастог тла [44]. Честице глине изразито су листичаве. Као резултат таложења у води, и постепеног повећања напона и збијања честица, поредак љуспастих честица глине може бити сасвим неправилан (слика 2.7.а). Међутим, након веће тангенцијалне деформације, честице глине формирају се паралелно у односу на смер дејства оптерећења. Деформације у зони смицања настала је због деловања тангенцијалних напона. Отпор клизања у таквом распореду честица биће знатно мањи него у фази када се морају савладати електрохемијске силе међу честицама и отпори услед њихових деформација. Што је материјал предходно био јаче збијен и дуже стајао под притиском то се смањује порозитет и размак међу честицама, а повећавају међумолекуларне силе, при чему се стварају трајне тиксотропне<sup>3</sup> везе, што изазива веће отпоре против разарања везе међу честицама. Мањи порозитет значи и мању слободу помицања и окретања честица, па је потребна и већа тангенцијална сила за савладавање отпора. Након велике деформације, када су честице у тој зони већином оријентисане паралелно, отпор деформисању углавном долази услед трења при клизању.

Трење је веома утицајан параметар у процесу продирања и резања стенског материјала. За два тела која клизају једно по другом, а истог су материјала, дефинише се унутрашње трење  $\phi$  (слика 2.7.б). Ако је једно од два тела резни елемент, користи се термин спољашње трење  $\delta$ . Спољашње трење карактеристично је за разматрање међусобне интеракције резног елемента и материјала, док унутрашње трење претставља битну карактеристику самог материјала. Када се говори о унутрашњем трењу као о карактеристици стенског материјала, говори се о углу унутрашњег трења, односно о углу отпорности на смицање. Овај угао није константа материјала, али се врло често може таквим посматрати. Параметри отпорности на смицање сувог или засићеног некохерентног материјала битно се не разликују, због тога што вода није мазиво за већину материјала које садржи тло, па њена присутност не утиче на величину угла смицања. Појава порног притиска може мењати отпорност на смицање при брзом оптерећењу запремине стенског материјала, односно краткорочно повећати у случају дилатације или смањити ако настају контракција запремине. Код некохерентног тла, угао чврстоће материјала на смицање зависи од следећих особина: чврстоће материјала, облика честица, густине и од садржаја воде у материјалу. Угао унутрашњег трења је већи што су веће честице стенског материјала, што је облик честица неправилнији и оштријих ивица и што је мањи садржај воде.

### 2.4.3 Смичућа чврстоћа

Ако се неко почетно стање напона дефинише тачком на хидростатичкој оси која претставља напон изотропне компресије, при чему су напони смицања у свакој равни једнаки нули, путања напона која би се кретала ка анвелопи напона лома морала би да садржи разлику главних напона, што значи и прираштај напона смицања. Због тога се обично и говори само о смичућој чврстоћи<sup>4</sup> стенских материјала. Смичућа чврстоћа претставља највећи смичући напон који може издржати стенски материјал у одређеном правцу. Када је достигнут највећи могући смичући напон, праћен пластичним деформацијама, каже се да је дошло до лома, при чему је мобилисана сва смичућа чврстоћа стенског материјала. Тада смичући напони имају тенденцију да помере део масе у односу на осталу масу стенског материјала, уколико је лом локализован само у равни смицања, тј. где се појављује клизна површина [45]. Са фундаменталне тачке гледишта механике грануларних средина, проблем смичуће чврстоће стенског материјала је веома сложен. Анализа механизма који служе за описивање компоненти чврстоће сваког материјала показује да чврстоћа зависи од ефективног нормалног напона, трења између појединих честица, кохезије, промене запремине, промене конфигурације скупа зрна, лома појединих зрна, почетне оријентације зрна и промене оријентације при деформисању, и др. Сви ови чиниоци нису подједнако важни за све врсте стенских материјала, а неки се и не могу директно издвојити и квантификовати.

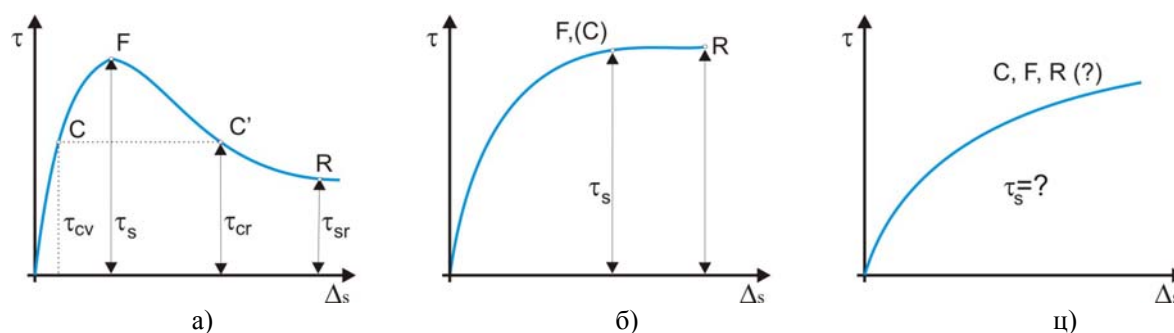
Највећи део смичуће чврстоће потиче од отпора трења по контактима између зрна. Да нема трења стенски материјал би се понашао као тешка течност. Као што напон нормалан на раван

<sup>3</sup> Тиксотропија је појава променљивости параметара густине у функцији мировања, односно кретања честица.

<sup>4</sup> Чврстоћа се у овом случају односи на отпорност материјала у односу на дејство резног елемента.

смицања претставља средњу суму контактних нормалних компоненти сила између зрна у маси тла, тако и смичућа чврстоћа на некој равни зависи од ефективних нормалних напона који на њу делују. Стварна слика механизма смичућег лома стенског материјала је сложенија од упрошћеног клизања блока по косој равни или релативног померања два крута тела по храпавом контакту, јер је стенски материјал скуп релативно чврстих честица различитих величина и облика између којих се налазе шупљине. Смичуће напоне прима само костур чврстих честица. Напрезања се преносе преко сила на контактима суседних зрна (слика 2.7.а). При томе зрна се не само тару, већ могу и ротирати, котрљати се, прескакати једно преко другог, па и дробити у различитој мери. Смичући лом стенског материјала настаје при релативним померањима између зрна по некој "таласастој равни"  $s-s$  која пролази између зрна, као што је приказано слици 2.7.б. При томе се зрна међусобно померају и ломе на веома компликован начин који се не може аналитички описати у облику који би био довољно једноставан за практичну примену.

У неким случајевима се смичућа деформација посматрана са извесног одстојања може видети као пластично течење континуалног материјала. Зона великих деформација у процесу смицања може да мења запремину, сабијајући је при високом нивоу напона или при иницијално растреситом стању (контракција). Могућ је и обрнут случај, када се упркос повећању нивоа нормалних напона, елементарна запремина у зони смичућег лома повећава, што је карактеристично за збијене материјале при нижим нивоима нормалних напона (експанзија-дилатација). Карактеристични облици зависности деформација смицања или релативних смичућих померања  $\Delta_s$  у функцији смичућих напона  $\tau$  приказани су на слици 2.8, где се могу разликовати три квалитативно различита облика лома: крто-пластични, пластични и жилави лом.



Слика 2.8 Понашање стенског материјала при смицању. а) Крто-пластични лом; б) Пластични лом; ц) Жилави лом.

**Крто-пластични лом.** Крто-пластични лом подразумева повећавање смичућег напона до максималне величине  $\tau_s$  (тачка  $F$  на дијаграму), која претставља максималну смичућу чврстоћу, а затим опадање смичућег напона при даљем деформисању до константне вредности  $\tau_{sr}$ , при великим деформацијама. Према томе, у овом случају разликују се најмање две чврстоће тј. вршна и резидуална. Вршна чврстоћа  $\tau_s$ , (тачка  $F$ ) је максимална вредност напона смицања<sup>5</sup>. Резидуална чврстоћа  $\tau_{cr}$ , (тачка  $R$ ), или чврстоћа при великим деформацијама, достиже се уз опадање чврстоће од тачке  $F$  до тачке  $R$  и остаје константна након достизања одређене величине деформација и при даљем деформисању. При томе се разликују два карактеристична облика понашања који највише зависе од збијености и облика зрна тла. Тачки  $C$  одговара напон смицања  $\tau_{sv}$ , за који је градијент промене запремине једнак нули, а чврстоћа до те величине потиче углавном од трења између хаотично оријентисаних зрна тла. Иста величина смичућег напона може се уочити на опадајућем делу криве у тачки  $C'$ . Ово је чврстоћа при константној запремини. Такво стање деформација може се назвати критичним стањем, а одговарајући смичући напон се означити са  $\tau_{cr}$ . Растресита тла са компактним обликом зрна имају особину да су величине смичућих напона у тачкама  $C'$  и  $R$  приближно једнаки, односно да је  $\tau_{cv} \approx \tau_{cr} \approx \tau_{sr}$  (слика 2.8.б). Међутим, ако је тло са зрнима компактнoг облика и веома збијено или алтернативно, ситнозрно тло садржи знатну количину плочастих зрна, након достизања напона смицања у тачки  $C'$ , при даљем деформисању смичући напон и даље опада ка  $R$  (слика 2.8.а). Узроци таквог понашања тла са компактним, односно плочастим зрнима, нису исти. Пад чврстоће збијеног крупнозрног тла са компактним зрнима

<sup>5</sup> Уколико се посебно не нагласи, када се говори о чврстоћи тла, подразумева се вршна чврстоћа.

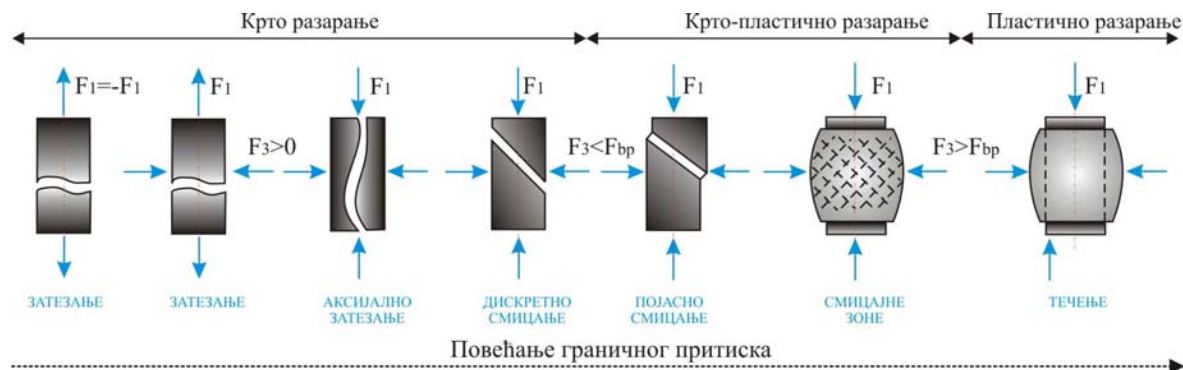


настаје, пре свега, услед промене запремине тла, а ситнозрног тла због промене оријентације плочастих зрна од хаотичног ка уређенијем распореду, када се зрна у подручју великих деформација оријентишу, мање или више, паралелно са равни смицања. Изразито велика разлика између вршне и резидуалне смичуће чврстоће је карактеристична за прекоконсолидоване глине са високим садржајем фракција различитих минерала глине, а није занемарљива ни у случају глина са мањим процентима колоидних или плочастих честица. У овом случају пад чврстоће од вршне ка резидуалној, при порасту смичућих деформација, је последица промене оријентације плочастих и љуспастих зрна глине која заузимају паралелан положај са равни лома тако да је  $\tau_{cv} > \tau_{sr}$  и тло испољава своју минималну, резидуалну смичућу чврстоћу изражену ефективним напонима. Слична појава опадања смичућег напона, са повећањем смичућих деформација, се уочава и код збијених крупнозрних материјала са зрнима компактнoг облика при нижим нивоима нормалних напона. Савладавање отпора при лому збијеног тла праћено је повећањем запремине у зони лома. Градијент повећања запремине у зони лома је позитивна дилатанција. Разлика  $\tau_{sr} - \tau_{cv}$  чији се ефекти могу описати и површином  $CC'F$  на слици 2.8.а, последица је промене запремине, односно утрошеног рада на повећању запремине у зони смичућих деформација. Крто-пластично понашање у дренаираним условима испитивања чврстоће у нижем подручју нормалних напона је наглашено код већине збијених материјала, што је и најсложенији облик понашања тла при лому, између осталог и због тога што веза између напона смицања и смичућих деформација  $\Delta\sigma$  није једнозначна; тачкама  $C$  и  $C'$  одговарају исте величине смичућих и нормалних напона за знатно различите величине деформација и неједнаке запремине у зони лома тла.

**Пластични лом.** Када са порастом деформација смичући напон достигне максималну вредност  $\tau_s$ , а затим са даљим деформисањем овај напон остаје константан, говори се о пластичном лому. При таквом лому, који је карактеристичан за растресита и средње збијена тла, градијент промене запремине је практично једнак нули.

**Жилави лом.** Жилаво понашање стенских материјала се дешава онда када се са порастом дисторзијских деформација повећава смичући напон и не достиже се карактеристична максимална вредност у испитаном интервалу деформација. Ово обично значи да деформације нису биле довољно велике да би се мобилисала сва смичућа чврстоћа материјала. У таквим случајевима чврстоћа није одређена, већ се може само оквирно дефинисати величином напона за неку усвојену величину деформације.

Модел понашања стенског материјала при разарању зависи од врсте, стања материјала и од нивоа нормалних напона. Један материјал може показати целокупан низ облика понашања, од крто-пластичног, преко пластичног, ка жилавом облику, при порасту нивоа нормалних напона при разарању. На слици 2.9 приказани су основни облици напрезања и разарања стенског материјала.



Слика 2.9 Основни облици разарања материјала са карактеристикама главних напрезања

Да би се објаснио проблем разарања материјала, којим се дефинише количина корисне енергије коју је потребно довести кроз резни елемент, посматрају се и примењују различити описи механизма разарања. Неки од њих су:

1. Разарање услед пасивног смицања (*eng. passive shear failure*), које се заснива на теорији пасивног притиска тла.
2. Разарање услед прогресивног смицања (*eng. progressive shear failure*), услед кога се формирају блокови материјала у једнаким интервалима времена. За анализу сила,

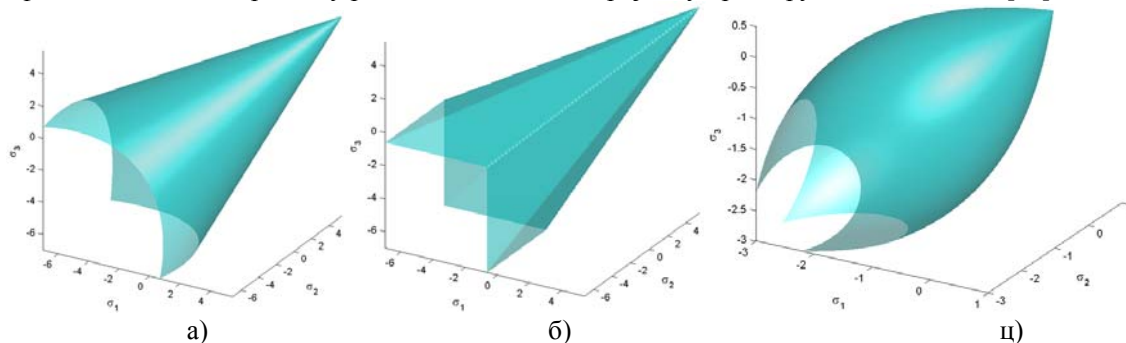
применом овог модела, користи се аналитички приступ који разматра одвајање материјала у облику српастих одрезака.

3. Крто-пластични лом (*eng.rigid-brittle failure*) се разматра у случајевима када садржај воде у материјалу има вредности које се налазе испод зоне пластичности.
4. Разарање услед клизања, односно течења (*eng.flow type*), се узима у разматрање када је садржај воде у материјалу изнад зоне пластичности.
5. Крти лом (*eng.brittle failure*), код кога се формирају јасне зоне смицања, односно формирају се посебни блокови ископаног материјала који се одвајају од стенског масива.
6. Разарање услед слома (*eng.collapse type of failure*) се узима у разматрање у случајевима цикличне природе отпора материјала, са малим померањима, посебно за широке резне елементе.

Стенски материјали који се ископавају механизацијом континуалног дејства, а у које спадају угаљ и јаловина, имају особину да им је вредност притисне чврстоће далеко већа од вредности затезне чврстоће. Ако се разматра проблематика разарања таквог стенског материјала, при чему у разарању учествује алат у облику клина, онда је за дефинисање процеса разарања осим кохезије, веома битан чинилац и трење. Како би се повезало напрезање које настаје дејством резног елемента и напонско стање у стенском материјалу, као његова реакција, у разматрање је потребно укључити одговарајући критеријум разарања. Обзиром на предходне чињенице, а у сагласности са проблематиком овог рада, највише одговара примена *Mohr-Coulomb*-овом критеријума разарања. *Mohr-Coulomb*-ова теорија је математички модел којим се описује реакција ископаног материјала на генерисани тангенцијални и нормални напон, и у наставку је детаљно анализиран.

#### 2.4.4 *Mohr-Coulomb*-ов линеаран закон разарања

Напонско стање у напонском простору ограничено је анвелопом која је за невезани стенски материјал, заједно са класичним теоријама лома материјала, дата на слици 2.11.б. Класичне теорије лома имају заједничку особину да су изводнице површи које описују праве линије. За реални стенски материјал изводница би била блиска правој линији у случају растреситих материјала, док би за збијене материјале изводнице биле криве, што посебно компликује реалан опис анвелопе ефективних напона при лому реалног стенског материјала у простору главних напона [46].



Слика 2.10 Анвелопе напона за различите критеријуме лома [49] а) *Drucker-Prager*, б) *Mohr-Coulomb*, ц) *Bresler-Pister*

У оквиру теоријских истраживања разматран је велики број критеријума, али код инжењерских проблема сви имају ограничену примену [47, 48, 49, 50, 51, 52]. За крте материјале везују се следећи критеријуми разарања:

- Критеријум заснован на инваријанти *Cauchy*-евог тензора напона
- *Tresca*-ин или критеријум максималног напона смицања
- *von Mises*-ов или критеријум максималне енергије еластичне деформације
- *Mohr-Coulomb*-ов критеријум разарања за кохезионо-фрикционе материјале (слика 2.10.б)
- *Drucker-Prager*-ов критеријум разарања за материјале код којих је доминантна отпорност на притисак (слика 2.10.а)



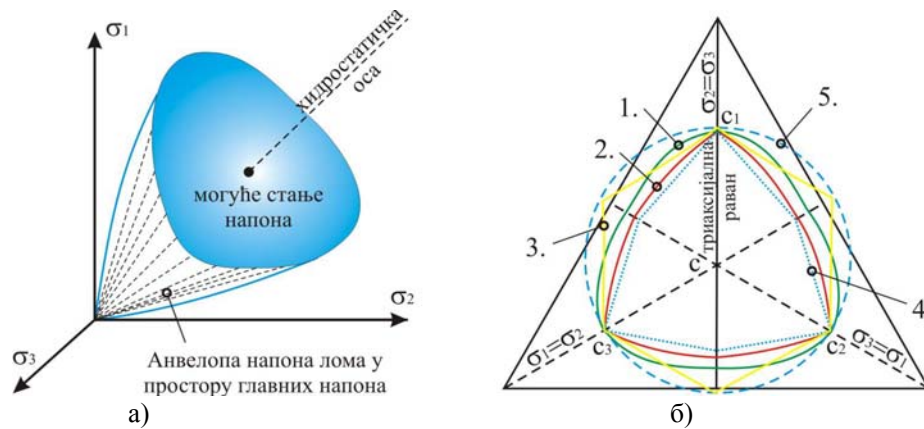
- *Hankinson*-ов критеријум, емпиријски критеријум разарања који се користи ортотропске материјале
- *Hill*-ов критеријум течења за анизотропне материјале
- *Tsai-Wu*-ов критеријум разарања за анизотропне композитне материјале
- *Johnson-Holmquist*-ов модел оштећења за изотропне материјале са великом брзином деформација

За материјале са својствима пластичности, критеријуми разарања, који се још називају и критеријумима течења су:

- *Tresca*-ин или критеријум максималног напона смицања
- *Mises*-ов критеријум течења
- *Gurson*-ов критеријум течења за материјале са доминантним напрезањем на притисак
- *Hill*-ов критеријум течења
- Различити критеријуми засновани на инваријантима *Cauchy*-ов тензора напона

Теорија *von Mises*-а, као и теорија коју је предложио *Tresca*, имају релативно широку примену у опису чврстоће челика и других метала, а могу се употребити и за опис недрениране чврстоће засићених глина, при чему се користе само укупни напони [44].

Теорија *Drucker-Prager*-а и *Mohr-Coulomb*-а, које се са различитим нивоима апроксимације могу употребити за релативно груб опис чврстоће бетона, апроксимирају анвелопу напона лома за стенски материјал тако што им се врх премешта у координатни почетак координатног система простора главних напона, а то значи да стенски материјал нема кохезију изражену преко ефективних напона и не може да прими ефективне напоне затезања. Пресек октаедарске равни и анвелопе напона лома према класичним теоријама приказана је на слици 2.11. У овом случају, параметри су изабрани тако да описују исту величину чврстоће хипотетичког песка при триаксијалној компресији, што на слици 2.11.б, одговара тачки  $C_1$ , а због претпоставке о изотропији, идентична је и у тачкама  $C_2$  и  $C_3$ .



Слика 2.11 а) Реална чврстоћа стенског материјала; б) Класичне теорије лома у октаедарској равни: 1-збијени песак, 2-растресити песак, 3- *Tresca*, 4- *Mohr-Coulomb*, 5- *Drucker-Prager* и *Von Mises* [44]

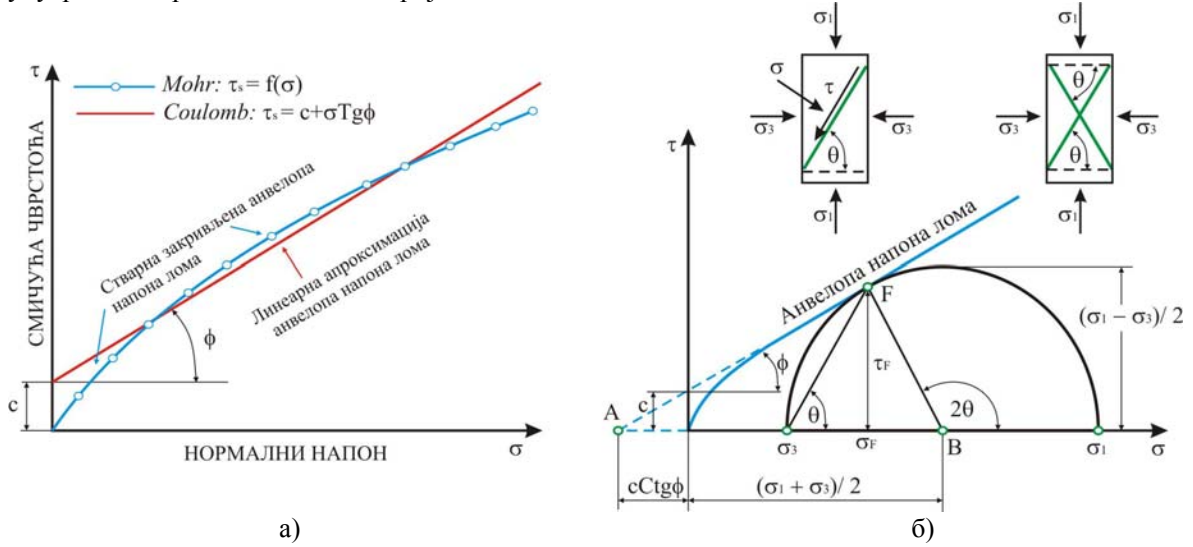
Међутим, разлике које могу настати на овај начин веома су мале и нису од битног утицаја на проблематику која се разматра у оквиру овог рада. За растресити материјал разлика између експерименталних резултата и *Mohr-Coulomb*-ове теорије је релативно мала, што уз релативну једноставност ове теорије може бити разлог за најширу примену у механици стенских материјала. Обзиром да стенски материјал, који се ископава багерима континуалног дејства, одговара карактеристикама материјала који показују слагање теоријских и експерименталних резултата [53], [54], то је ова теорија прихваћена као критеријум разарања током интеракције стенског материјала и резног зуба у оквиру проблематике овог рада. Због тога ће у наставку бити детаљније објашњена.

Први употребљив закон разарања стенског материјала је линеаран и назван по *Coulomb* који је први назначио да чврсти материјали имају кохезију, а да се на контакту два материјала, при

релативном смичућем померању, појављује отпор трења. *Coulomb*-ов закон (слика 2.12) дефинише смичућу чврстоћу тла емпиријским изразом у облику [44, 55]:

$$\tau_s = c + \sigma \cdot \operatorname{Tg}\phi \quad (2.1)$$

где је:  $\tau_s$  - смичућа чврстоћа стенског материјала;  $c$  – кохезија;  $\sigma$  - нормални напон;  $\phi$  - угао унутрашњег трења стенског материјала.



Слика 2.12 а) Зависност смичуће чврстоће од нормалног напона, б) *Mohr*-ов дијаграм напона лома

Израз (2.1) назива се *Mohr-Coulomb*-ов закон лома, јер *Mohr*-ова хипотеза подразумева да смичућа чврстоћа зависи од нормалног напона, што се у општем облику пише као  $\tau_s = f(\sigma)$ . *Coulomb*-ов закон указује да је  $f(\sigma)$  линеарна функција нормалног напона довољно тачан опис величина напона при лому<sup>6</sup>.

Смичућа чврстоћа тла се може изразити и преко главних напона  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  при лому у посматраној тачки. Права линија, описана једначином (2.1) ће тангирати *Mohr*-ове кругове напона, као што је показано на слици 2.12.б. Координате тангентне тачке  $F(\tau_F, \sigma_F)$  су:

$$\tau_F = \tau = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cdot \operatorname{Sin}(2\theta) \quad (2.2)$$

$$\sigma_F = \sigma = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cdot \operatorname{Cos}(2\theta) \quad (2.3)$$

где је:  $\theta$  - угао који максимални главни напон  $\sigma_1$  заклапа са хоризонталном осом.

Обзиром на симетричност *Mohr*-овог дијаграма у односу на осу нормалних напона, постоје две такве равни које заклапају једнаке углове у односу на правац највећег главног напон. Величина угла  $\theta$  се може одредити из односа (слика 2.12.б) и услова да збир унутрашњих углова троугла  $ABF$  износи  $180^\circ$ . Угао у темену  $A$  има величину  $\phi$ , у темену  $B$  угао је  $(\pi - 2\theta)$ , а у темену  $F$  угао је  $90^\circ$ . Из услова да је:

$$\phi + \frac{\pi}{2} + (\pi - 2 \cdot \theta) = \pi$$

Произилази да је:

$$\theta = \pm \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.4)$$

<sup>6</sup> Овај линеарни закон, који подразумева само тоталне напоне, значајно је модификовао *Karl von Terzaghi* [55], који је први уочио значај ефективних напона и потребу увођења величине порног притиска, али је при томе задржао константу, односно кохезију.

Са слике 2.14.б., добија се веза између главних напона и параметара чврстоће:

$$\sin \phi = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2 \cdot c \cdot \operatorname{Ctg} \phi + (\sigma_1 + \sigma_3)} \quad (2.5)$$

Тако да се израз за разлику главних напона у тренутку разарања може написати као:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin \phi + 2 \cdot c \cdot \cos \phi \quad (2.6)$$

Сређивањем предходне једначине добија се зависност максималног и минималног главног напона у тренутку разарања:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \operatorname{Tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) + 2 \cdot c \cdot \operatorname{Tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.7)$$

Приказане једначине (2.1), (2.5), (2.6) и (2.7) на различите начине описују *Mohr-Coulomb*-ов критеријум лома. Ако је познат низ стања напона при разарању ископаног материјала, од којих се свако стање описује *Mohr*-овим кругом напона, постоји заједничка анвелопа за све кругове напона при лому која се назива анвелопом напона лома. *Mohr-Coulomb*-ов критеријум лома се, због линеарности и релативне једноставности [39, 56], широко употребљава у пракси, иако то није ни једини могући, нити најбољи опис односа напона при лому стенског материјала.

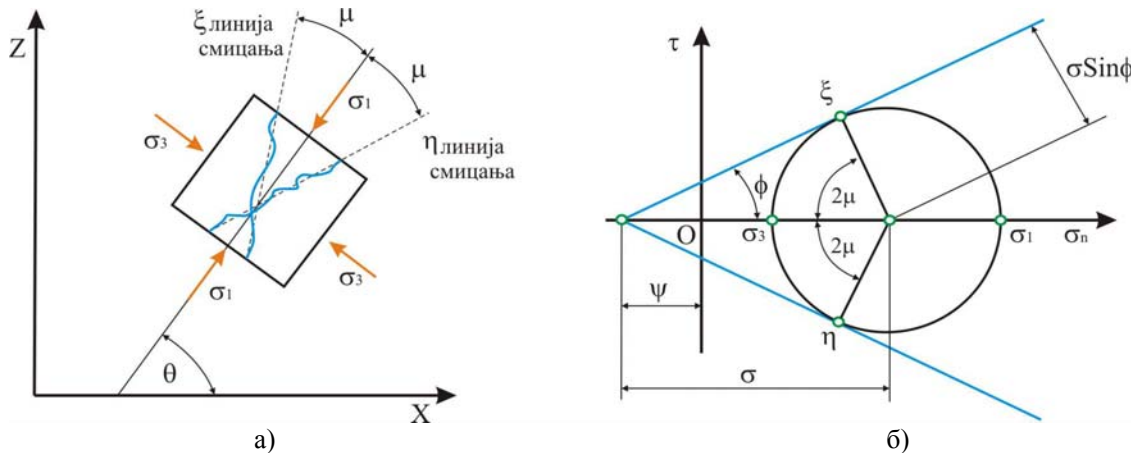
У наставку је детаљно анализиран *Mohr-Coulomb*-ов критеријум лома, обзиром де је коришћен као главни критеријум при дефинисању напонског стања у току разарања стенског материјала.

### 2.4.5 Карактеристике напона

*Mohr-Coulomb*-ов закон лома омогућава да се одреде положаји равни лома у одређеним тачкама стенског материјала који се разара резањем. Осим тога, комбинација услова равнотеже и разарања (граница равнотеже) дефинишу зависност између највећег и најмањег главног напона преко следећег изрази (2.6):

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin \phi + 2 \cdot c \cdot \cos \phi$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \left[ \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right] + 2 \cdot c \cdot \left[ \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$



Слика 2.13 Конвенција за главне напоне и њихове правце у делу материјала који се разара а) Физички простор, б) Простор напона

У комплексним случајевима разарања стенског, које се јављају кроз различите типове резања, вредност напона мења се од тачке до тачке кроз одговарајући део стенског материјала. На тај начин *Mohr*-ови кругови напона обезбеђују информације везане за вредност напона на равнима под различитим угловима у посматраној тачки, и обезбеђују детерминисање променљивих

расподела напона. Познавање промене напона од тачке до тачке у стенском материјалу неопходно је како би се нашла расподела притиска који делује на резни елемент, односно обезбедиле полазне информације за његово конструисање.

Две равни разарања стенског материјала, или две клизне (смичуће) равни, су дефинисане  $\xi$  и  $\eta$  линијама, односно дефинисани су позитиван и негативан смичући напон, респективно. Ове клизне линије леже под углом  $\mu$ , у односу на правац максималног главног напона  $\sigma_1$ . Угао  $\mu$  у функцији од  $\phi$  дефинисан је према геометрији са слика 2.12.б и 2.13.б:

$$2\mu = \pi - 2\theta$$

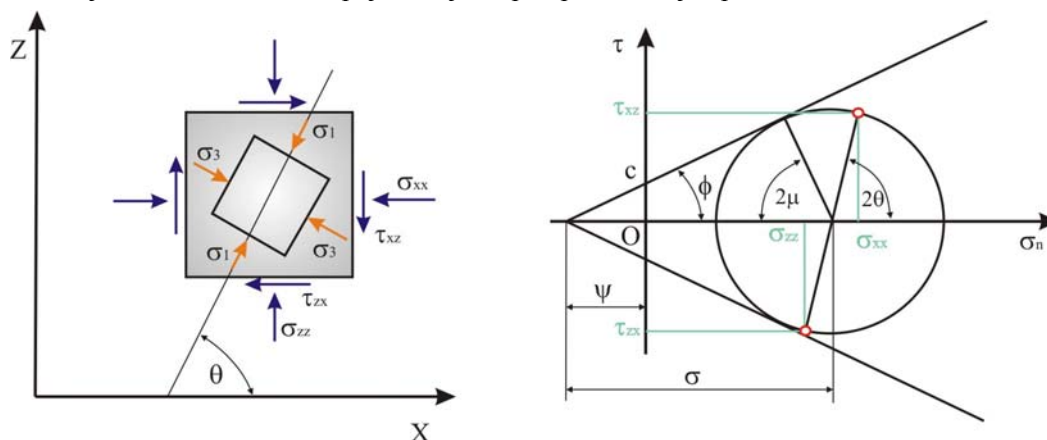
$$\mu = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \quad (2.10)$$

Средњи нормални напон  $\sigma$  у материјалу је вредност коју репрезентује центар *Mohr*-ових кругова напона. Он се налази на средини растојања између максималног и минималног главног напона на графикону напона, или лежи на растојању  $\sigma$  од пресека линија које означавају *Coulomb*-ов чврстоћу и  $\sigma_n$  осе, као што је приказано на слици 2.14. Израз за средњи напон је:

$$\sigma = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} + c \cdot \text{Ctg}\phi = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} + \psi \quad (2.11)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \psi}{1 + \text{Sin}\phi} = \frac{\sigma_3 + \psi}{1 - \text{Sin}\phi} \quad (2.12)$$

Две променљиве  $\sigma$  и  $\theta$  су довољне да би се описало комплетно стање напона у свим правцима у произвољној тачки стенског материјала који се разара, а како је приказано на слици 2.14.



Слика 2.14 Напони на  $x$  и  $z$  равни у односу на главне напоне и у односу на  $\sigma$  и  $\theta$  материјалу који се разара

*Mohr*-овим дијаграмом омогућено је израчунавање напона на равнима  $x$  и  $z$  као функцију променљивих  $\sigma$  и  $\theta$ , на следећи начин:

$$\sigma_{xx} = \sigma(1 + \text{Sin}\phi \cdot \text{Cos}(2\theta)) - \psi \quad (2.13)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma(1 - \text{Sin}\phi \cdot \text{Cos}(2\theta)) - \psi \quad (2.14)$$

$$\tau_{xz} = -\tau_{zx} = \sigma \cdot \text{Sin}\phi \cdot \text{Sin}(2\theta) \quad (2.15)$$

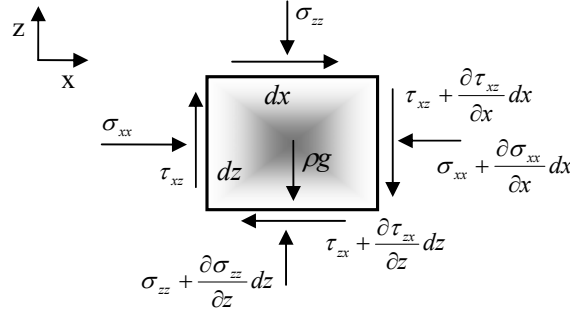
У општем случају, вредности приказаних напона нису константне у свим тачкама већ се мењају од места до места посматрања. Међутим, горње једначине показују да опис поља помоћу напона  $\sigma$  и угла  $\theta$  су довољне за опис комплетног стања напона у свим равнима и у свим тачкама посматраног дела стенског материјала. Све што је потребно за опис промена вредности напона и њихових правца, кроз посматрани део материјала, је скуп диференцијалних једначина које повезују променљиве и напоне са одговарајућим положајем у материјалу.

Посматрајући равнотежно стање у свим тачкама бесконачно малог дела стенског материјала, као што је приказано на слици 2.15, могу се изједначити спољашње и унутрашње силе које делују на делић, по  $x$  и  $z$  правцу, одакле се добијају следећи изрази:

$$\sigma_{zz} \cdot dx + \tau_{xz} \cdot dz + \rho \cdot g \cdot dx \cdot dz - \left( \sigma_{zz} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \cdot dz \right) \cdot dx - \left( \tau_{xz} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot dz = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} = \rho \cdot g \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (2.17)$$



Слика 2.15 Промена напона у бесконачно малом елементу стенског материјала [57]

Једначине (2.16) и (2.17) описују промену поља напона кроз било које континуално тело у равнотежном стању. Ако се сада примене запажања о разарању материјала из једначина (2.13) и (2.15) и убаце у предходне једначине, може се елиминисати једна променљива и систем са три сведе на систем са две независно променљиве ( $\sigma$  и  $\theta$ ) у  $x$  и  $z$  правцу:

$$(1 + \sin \phi \cos(2\theta)) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \sin \phi \sin(2\theta) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial z} - 2\sigma \sin \phi \cdot \left( \sin(2\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} - \cos(2\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.18)$$

$$\sin \phi \sin(2\theta) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial x} + (1 - \sin \phi \cos(2\theta)) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial z} + 2\sigma \sin(\phi) \cdot \left( \cos(2\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} + \sin(2\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = \rho g \quad (2.19)$$

Запажањима изнетим у оквиру [58] ове две парцијалне диференцијалне једначине се могу преформулисати множењем изразима  $\sin(\theta \pm \mu)$  и  $-\cos(\theta \pm \mu)$ , респективно, одакле се добија:

$$\left[ \frac{\partial \sigma}{\partial x} \cdot \cos(\theta \pm \mu) + \frac{\partial \sigma}{\partial z} \cdot \sin(\theta \pm \mu) \right] \pm 2 \cdot \text{Tg} \phi \cdot \left[ \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot \cos(\theta \pm \mu) + \frac{\partial \theta}{\partial z} \cdot \sin(\theta \pm \mu) \right] =$$

$$= \frac{\rho \cdot g}{\cos \phi} \cdot [\sin(\pm \phi) \cdot \cos(\theta \pm \mu) + \cos(\pm \phi) \cdot \sin(\theta \pm \mu)] \quad (2.20)$$

Предходне две једначине су заправо дате у форми крајњих извода дуж углова  $\theta \pm \mu$  у  $x$ - $z$  равни. Разматрајући једначину (2.9) може се уочити да ови појединачни правци одговарају равнима клизања  $\xi$  и  $\eta$ . Математички, ове линије називају се карактеристичним линијама, дуж којих се крајњи изводи независних променљивих могу описати и интегралити. Крајњи изводи променљивих напона и праваца напона су изведени у наредним изразима, за сваки правац карактеристичних линија.

Дуж  $\xi$  линија смицања:

$$\frac{dz}{dx} = \text{Tg}(\theta + \mu) \quad (2.21)$$

$$d\sigma + 2 \cdot \sigma \cdot \text{Tg} \phi d\theta = \rho g \cdot (dz + \text{Tg} \phi \cdot dx) \quad (2.22)$$

Дуж  $\eta$  линија смицања:

$$\frac{dz}{dx} = \text{Tg}(\theta - \mu) \quad (2.23)$$

$$d\sigma - 2 \cdot \sigma \cdot \text{Tg} \phi d\theta = \rho g \cdot (dz - \text{Tg} \phi \cdot dx) \quad (2.24)$$

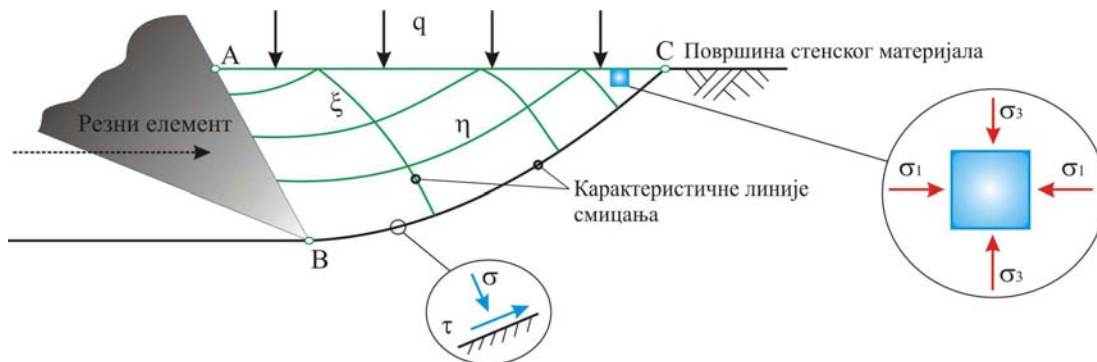




што су истраживања руда и минерала, изучавање природне средине и др. На пример, садржај воде је познати параметар у моделу експеримента, али тај параметар у природи може имати потпуно непознате варијације. Такав је случај са свим физичким особинама стенског материјала. Због тога, један од приступа којим се може превазићи предходни проблем, а који се може применити у инжењерској пракси, заснива се на томе да се стенски материјал описује на основу његовог целокупног понашања, а не раздвајањем и анализом његових појединачних карактеристика [62, 63]. На пример, дефинисањем везе између напона и деформације за одређени стенски материјал, могле би се обезбедити релевантне информације за анализу. У односу на спољашњу силу која доводи до разарања, постављањем овакве везе дефинише се реакција стенског материјала у целини, без обзира какве су физичке карактеристика материјала и да ли су оне променљиве по запремини или не.

### 2.4.7 Гранични услови при резању

На слици 2.17. приказан је општи модел процеса резања стенског материјала у вертикалној равни. Услед праволинијског кретања резног елемента долази до разарања и покретања стенског материјала, у оквиру уоченог региона  $ABC$ . Током овог процеса захваћени стенски материјал смиче се дуж најниже смичуће линије  $BC$ , и деформише се у оквиру региона  $ABC$ . Ако се у обзир узме предходно разматрање може се уочити да је  $BC$  линија карактеристична смичућа линија  $\eta$ , па ће у наставку бити примењена конвенција предходно дата на слици 2.13, која напон дуж овог правца дефинише као негативан смичући.



Слика 2.17 Општи модел разарања током резања стенског материјала резним елементом у облику клина

На површини стенског материјала (линија  $AC$ ) може постојати додатно вертикално оптерећења  $q$ . Ово оптерећење настаје услед тежине предходно разореног и помереног дела стенског материјала, или услед било ког другог спољашњег оптерећења. У случају када је то предходно разорени материјал, онда такав материјал, по својој чврстоћи, мора бити изразито слабији од материјала који је тренутно захваћен (испод линије  $AC$ ), па је за његово разарање потребна занемарљива сила резања. Пошто на стенски материјал вертикално делује пасивна сила притиска, онда притисак који делује са стране, односно хоризонтално, мора бити већи од вертикалног притиска у посматраном делу  $ABC$ . Пошто се изнад линије  $AC$  практично може занемарити вредност смичућег напона, то је притисак од предходно разореног материјала заправо само главни нормални напон, и то минимални главни напон  $\sigma_3$ . Због тога је максимални главни напон  $\sigma_1$  хоризонталан, односно правац тог напона је одређен углом  $\theta=0$ . На површини материјала,  $\xi$  и  $\eta$  карактеристичне линије заклапају углове од  $\theta \pm \mu = \pm \mu$  у односу на хоризонтални правац, па се промена напона  $\sigma$  може израчунати као:

$$\sigma = \frac{(\sigma_3 + \psi)}{(1 - \sin \phi)} = \frac{(q + \psi)}{(1 - \sin \phi)} \quad (2.25)$$

У случају када изнад површине захваћеног материјала нема додатног оптерећења, односно када се оно занемари ( $q=0$ ), тада је:

$$\sigma = \frac{\psi}{(1 - \sin \phi)} \quad (2.26)$$

Друга важна гранична површина је граница између резног елемента и захваћеног материјал (линија  $AB$ ). Да би се добило оптерећење резног елемента неопходно је познавати напон на овој граничној површини. Такође, познавање овог напона омогућава добијање расподеле напона целом захваћеном делу стенског материјала (површина  $ABC$ ). Кад се израчуна вредност нормалног напона  $\sigma$  на површини резног елемента, применом једначина (2.13), (2.14) и (2.15) добија се оптерећење које трпи резни елемент.

Чврстоћа на граници контакта стенског материјала и резног елемента, обично је мања од унутрашње чврстоће материјала. *Coulomb*-ов опис смичуће чврстоће на граници контакта резног елемента и стенског материјал дефинише се на следећи начин:

$$\tau_{sgr} = c_a + \sigma_{gr} \cdot Tg\delta \quad (2.27)$$

где је:  $\tau_{sgr}$  - смичућа чврстоћа на граници контакта;  $c_a$  - адхезија;  $\sigma_{gr}$  - нормални напон на граници контакта;  $\delta$  - спољашњи угао трења.

Различити гранични услови на површини резног елемента и различите поставке поља напона у региону разарања стенског материјала, детаљно су дефинисане у наредном поглављу овог рада.





### 3. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ИНТЕРАКЦИЈЕ РЕЗНОГ ЕЛЕМЕНТА И ИСКОПАВАНОГ МАТЕРИЈАЛА

Током процеса ископавања одвија се интезивна интеракција између стенског материјала и резног елемента. Како је једна од полазних ствари у процесу конструисања одређивање оптерећења, то је у случају конструисања резних елемената неопходна анализа процеса и сила који се јављају током интеракције. На тај начин се у директну везу доводе потребна сила на резном елементу и одговарајући отпор разарања ископаног материјала.

Последње четири деценије већина истраживача бавила се параметарским изучавањем проблема интеракције, при чему су коришћени различити приступи. Параметри су примарно проучавани у оквиру квазистатичких услова, узимајући у обзир стање равнотеже у систему стенски материјал-резни елемент. На тај начин, модели за израчунавање силе ослањају се на класичну теорију разарања за квазистатичке услове. Модели засновани на основама физичких појава имају важну улогу као чиниоци који одређују полазну основу за прорачун оптерећења резних елемената. У последње време истраживања се спроводе узимајући у обзир и динамичку природу интеракције. Ова истраживања у односу на конвенционалне квази-статичке претпоставке у обзир узимају брзине и убрзања резног елемента. Међутим, велике деформације које се јављају код стенских материјала још увек представљају неистражено подручје ове проблематике.

Сагласно основним претпоставкама, апроксимацијама и различитим приступима који се користе у анализи процеса интеракције, проблем се може посматрати и анализирати као:

1. Статички процес, дефинисањем просторног стања напона, са статичким граничним условима, за чије решавање се може применити класична механика стенског материјала.
2. Квазистатички процес, који проблем решава са становишта течења стенског материјала, у коме доминирају силе које се јављају као последица брзине и убрзања.
3. Временски зависни и случајни процес, при чему се за решавање проблема користе случајне променљиве и статистички алати.

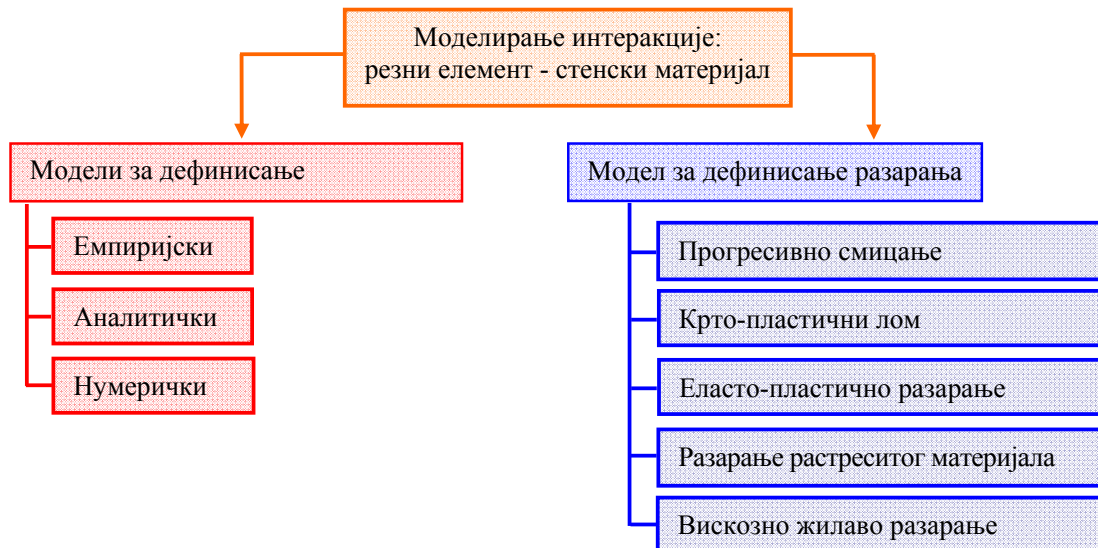
У оквиру овог поглавља дат је преглед конвенционалних приступа на бази статичког моделирања процеса, којима је могуће анализирати интеракцију стенског материјала и резног елемента. На бази тога истражене су могућности за њихову примену у процесу конструисања резних елемената за багере континуалног дејства, односно, на првом месту за израчунавања оптерећења резних зуба на релативно једноставан и довољно поуздан начин.

#### 3.1 РАЗЛИЧИТИ ПРИСТУПИ МОДЕЛИРАЊА ИНТЕРАКЦИЈЕ

Истраживање процеса интеракције има за циљ развој модела за израчунавање оптерећења, узимајући у обзир различите стенске материјале, резне елементе и услове рада (брзина, дубина, орјентација алата и др.). Издвајају се три главна приступа (слика 3.1) помоћу којих се дефинишу одговарајући модели процеса интеракције резног елемента и ископаног материјала, и то су: емпиријски, аналитички и нумерички приступ [68].

1. **Емпиријски (и полуемпиријски) приступ.** Математичка решења заснована на емпиријским моделима, развијена су како би се описала интеракција стенског материјала и резног елемента, тако што су дефинисани различити утицајни параметри. Аналитички модели засновани су на физичким карактеристикама стенског материјала, параметрима резног елемента и полазним претпоставкама. Релације између променљивих су изражене кроз одговарајуће криве зависности које најприближније одговарају експерименталним подацима, на основу чега се развија одговарајући модел.

2. **Аналитички приступ.** Аналитички приступ базира се на анализи репрезентативних параметара процеса интеракције и синтези њихових међусобних релација (густина, притисна чврстоћа, нападни угао резања, врста машине, брзина резања и др.). Аналитички изрази, који се дефинишу као резултат анализе адекватног механичког модела, дефинишу један параметар у функцији од осталих параметара који су обухваћени датим проблемом. На тај начин, анализом процеса интеракције, добија се зависност силе на резном елементу у функцији од карактеристика стенског материјала, геометрије резног елемента и технологије рада багера.



Слика 3.1 Приступу у моделирању интеракције резних елемената и стенског материјала

3. **Нумерички приступ.** Рачунари великих брзина и комерцијални софтвери омогућили су да се кроз различите нумеричке методе развијају модели који ће узети у обзир комплексну геометрију резног елемента и остале параметре који се тешко могу обухватити изразима добијеним из емпиријског или аналитичког приступа. Нумерички приступ може превазићи недостатке предходна два адекватним моделирањем проблема, и добијањем података о свим битним факторима којима се описује процес интеракције (нпр. зона разарања, поље напона, померај, брзина, убрзању итд.).

Силе које прате процес копања, односно њихови модели, треба да повежу елементе којима се описује технологија рада багера, геометрија и кинематика резног елемента и карактеристике ископаног материјала. Понашање багера и резног елемента обично се описује константним параметрима и системом крутих тела. Са друге стране, понашање и основне карактеристике ископаног материјала описују се на неколико различитих начина: применом механике грануларне (растресите) средине (код кога се материјал моделира као скупа партикуларних делова), механиком континуума (међупразнине нису узете у обзир), динамиком више тела (са крутим или деформабилним телима), и моделом јасног раздвајања елемената (екстензија методе коначних елемената која допушта дисконтинуитете) [69]. Основни проблем лежи у спајању ова два модела, односно повезивању багера, резног елемента и ископаног материјала у јединствени динамички модел са скупом параметара који се могу идентификовати и на крају релативно једноставна довести до решења једначине.

Постоји одговарајући уступак између теоријског разматрања модела и његове могућности да ефикасно представе широко поље практичних могућности. Са једне стране, емпиријски модел може бити дефинисан за све изведене експерименте са подацима. Без обзира што се у току креирања оваквог модела испита велики број узорака, његова употреба је ограничена због ограничења у опису прилично широког опсега могућих варијација услова и кретања стенског материјала [70]. Са друге стране аналитички модел може у обзир узети ове варијације, али може описати само једноставне случајеве, као што је пример оштрице резног елемента бесконачне ширине. Без обзира на различите приступе и могућности примене, у наставку текста биће дат преглед моделирања и математичке формулације проблема интеракције стенског материјала и резног елемента.

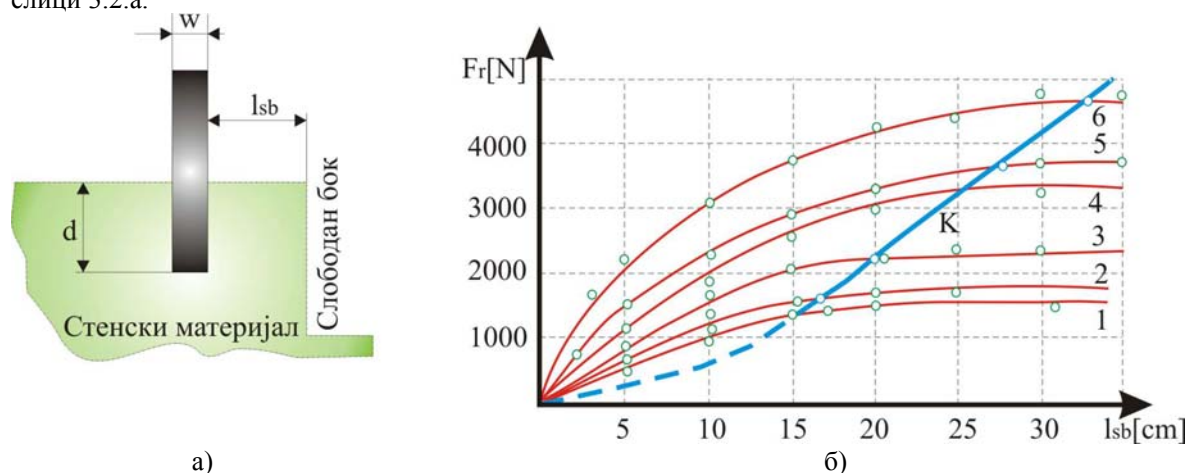
## 3.2 ЕМПИРИЈСКИ МОДЕЛИ РЕЗАЊА

### 3.2.1 Теоријско разматрање

Први модел који објашњава интеракцију резног елемента и стенског материјала је емпиријска формула заснована на експерименталним резултатима [71, 72, 73]. Овај модел дефинише силу отпора резања која узима у обзир факторе као што су стање ископаног материјала, технологија резања и параметри резног елемента. У наставку је приказан начин дефинисања једног емпиријског модела, а у циљу идентификације и објашњења утицајних фактора на процес резања стенског материјала [40]. Основни чиници који утичу на величину отпора резања су:

- Растојање реза од слободног бока  $l_{sb}$  (слика 3.2.а)
- Величина нападног угла резања  $\delta$ , леђног угла  $\gamma$  и угла конуса резног елемента  $\beta$  (слика 3.4)
- Дубина  $d$  и ширина реза  $w$  (слика 3.2.а)

а) *Утицај растојања реза од слободног бока.* На вредност сила које се јављају током процеса резања, поред дубине резања, утиче ширина сечива и растојање сечива од слободног бока материјала (слика 3.2.а). Теоријска разматрања оваквог случаја, када је у питању рад у полуvezаном и неvezаном стенском материјалу (какав је материјал који се углавном сусреће на површинским коповима), још су недовољно истражена и ова појава се веома тешко описује математичким моделом. Са друге стране, да би се на изврстан начин проучио механизам разарања и распоред највећих смичућих напона, врше се истраживања у лабораторијским условима на моделима и у експерименталним условима, при чему се добијени резултати међусобно пореде. За оваква проучавања најчешће се користе елементарни профили сечива, као што је приказано на слици 3.2.а.



Слика 3.2 а) Положај резног елемента у односу на слободан бок резања, б) Утицај удаљења резног елемента од слободног бока на силу резања

Зависност силе резања  $F_R$ , од величина као што су  $w$ ,  $d$  и  $l_{sb}$ , ближе је дефинисана у оквиру [71, 72]. Резултати ових истраживања приказани су на слици 3.2.б, на којој се може уочити да независно од дубине резања  $d$ , и ширине сечива  $w$  при повећању растојања  $l_{sb}$  реза од слободне површине, сила се повећава до једне одређене вредности да би након тога остала приближно константна. Криве које су добијене овим испитивањем у функцији од растојања  $l_{sb}$ ,  $F_R=f(l_{sb})$  понашају се од  $l_{sb}=0$  до неке одређене тачке по некој експлицитној зависности која се може написати у облику:

$$F_R = A \cdot l_{sb}^n \quad (3.1)$$

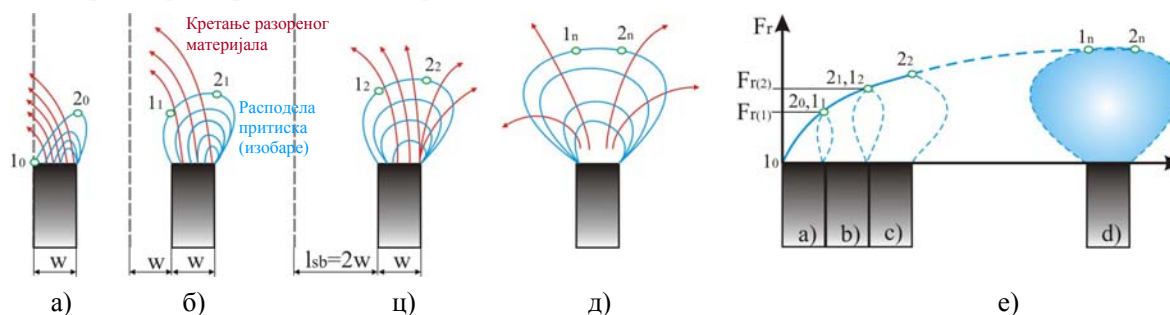
У предходном изразу са  $A$  је означена константа израза, а са  $n$  експонент који је увек мањи од један. Са повећањем  $d$  и  $w$ , област примене зависности (3.1) се повећава на већа растојања  $l_{sb}$ .

Линија  $K$  са слике 3.2.б, одваја две области: леву на коју је могуће применити зависност (3.1) и десну код које је  $F_R = \text{const}$ . Према томе, линија  $K$  може се користити код одређивања граничне вредности  $l_{sb}$  за различите дубине резања и ширине резног елемента.

**Табела 3.1** Експерименталне вредности (линије 1÷6) резултата истраживања са слике 3.2.б

	1	2	3	4	5	6
$d$ [mm]	75	75	100	150	150	200
$w$ [mm]	7	15	10	7	15	10

Може се закључити да ће за разарање стенског материјала, који се налази ближе слободној површини, бити потребна мања сила него за разарање материјала који се налази на већем растојању. Због тога, расподела притиска у стенском материјалу испред врха резног зуба има асиметричан распоред као што је приказано на слици 3.3.

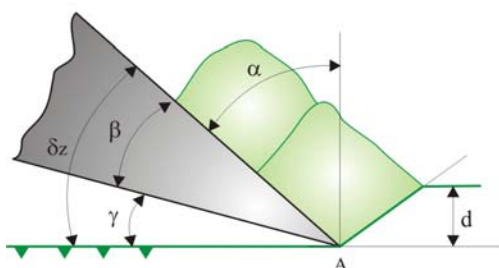


Слика 3.3 Утицај растојања од слободног бока резања ( $l_{sb}$ ) на расподелу притиска у стенском материјалу испред врха резног елемента

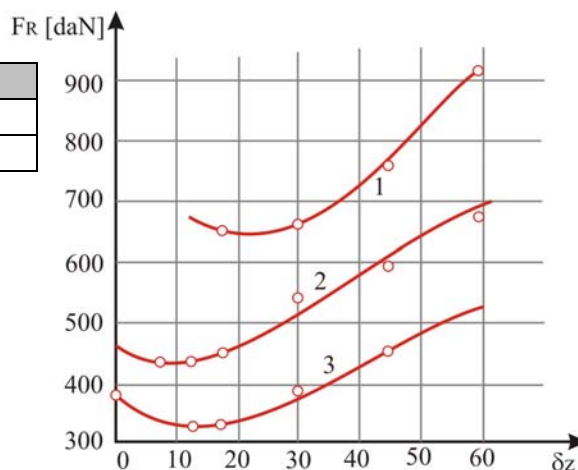
За случај код кога се бочна слободна страна поклапа са ивицом сечива резног елемента, облик изобара се може приказати као на слици 3.3.а. Са удаљењем сечива од слободне површине на растојање  $l_{sb} = w$  (слика 3.3.б) у тачки  $1_1$  јавља се притисак који је по свом интензитету једнак притиску у тачки 2 на слици 3.3.а. У тачки  $2_1$  притисак ће се повећати, што проузрокује нешто мање искошен облик изобара, а што је и природна последица мањег утицаја слободне површине. Даљим повећањем растојања од слободне површине приликом резања појавиће се изобаре код којих ће облик бити нешто више симетричан (слика 3.3.ц), а у случају да је ово растојање такво да слободна површина нема никаквог утицаја на резање тада ће се добити потпуно симетричан облик изобара, што је приказано на слици 3.3.д. Уколико се представи неколико оваквих профила на различитим растојањима од слободне површине и на изобарама означе тачке 1 и 2 (слика 3.3.е), па ако се све тачке повежу једном линијом, добија се крива линија облика  $F_R = A \cdot l_{sb}^n$ , што одговара резултатима приказаним на дијаграму са слике 3.2.б.

**Табела 3.2**

	1	2	3
$d$ [mm]	100	100	150
$C$ [-]	3.5	9.5	3.5



Слика 3.4 Зависност силе резања од угла резања  $\delta_z$  [40]



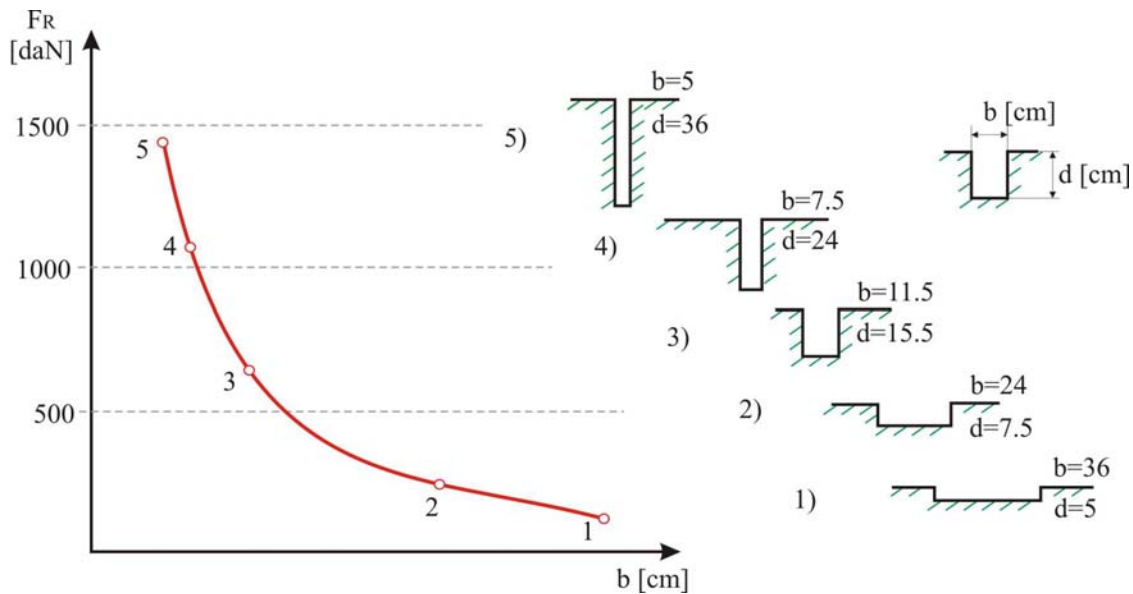
б) Утицај угла резања, леђног угла и угла конуса резног елемента. Утицај нападног угла резања  $\delta_z$ , као функције леђног угла  $\gamma$  и угла конуса  $\beta$  на вредност силе, приказан је на слици 3.4. Може се уочити да се са порастом угла  $\delta_z$  од  $0^\circ \div 20^\circ$  сила резања смањује. При повећању угла резања преко  $20^\circ$  сила резања се нагло повећава по некој линеарној зависности. Сагласно добијеним резултатима оптимални угао резања креће се око  $20^\circ$ , и при овом углу сила резања смањује се за  $25 \div 35\%$ , у поређењу са силом код угла резања од  $\delta_z = 45^\circ$ .

У сагласности са дијаграмом приказаним на слици 3.4, сила  $F_{\delta_z}$  у функцији од угла резања  $\delta_z$  може се дефинисати преко силе  $F_1$  и угла  $\delta_z$  следећим изразом:

$$F_{\delta_z} = F_1 \cdot (1 + 0.0075 \cdot \delta_z) \quad (3.2)$$

У предходном изразу  $F_1$  је сила резања код оптималног угла, тј. када је  $\delta_z = 20^\circ$ , док је  $\delta_z$  угао резања чија се вредност креће у границама од  $20^\circ \div 60^\circ$ . Као гранични угао резања код копања багерима континуалног дејства, усваја се угао резања од  $60^\circ$ , јер код рада са оваквим машинама већи угао нема практичног значаја.

Леђни угао  $\gamma$ , односно угао између леђне површине резног елемента и површине резања, утиче на промену величине силе трења између сечива и стенског материјала, а самим тим и на величину силе резања. Веза између угла резања, угла конуса  $\beta$  и леђног угла може се приказати као:  $\gamma = \delta_z - \beta$ . Оптимална вредност леђног угла за багере континуалног дејства налази се у распону  $5^\circ \div 7^\circ$ .



Слика 3.5 Зависност силе резања и ширине реза при константној површини резања  $S=180\text{cm}^2$

ц) Утицај дубине и ширине реза. Испитивања која су вршена у циљу дефинисања зависности између силе резања и дубине реза показала су да се ова зависност може приказати следећим изразом:

$$F_R = k \cdot d^n \quad (3.3)$$

Ако се као средња вредност за експонент  $n$  усвоји вредност  $n=1,35$  (случај резања глине) и ако се коефицијент  $A$  изрази у облику:

$$A = 1 + \varphi_r \cdot b \quad (3.4)$$

Коефицијент  $\varphi_r$  одређује се емпиријски и износи  $\varphi_r=0,026$  [22]. Зависност између силе резања и дубине реза и ширине хоризонталног профила сечива  $b$ , која важи за случајеве када је  $b=0 \div 150\text{cm}$ , може се написати као:

$$F_R = C \cdot d^{1.35} \cdot (1 + 0.026 \cdot b) \quad (3.5)^7$$

Испитивања која су вршена у циљу утврђивања зависности између силе резања и дубине и ширине реза код константне површине резања  $S$ , дала су резултате који показују да се сила резања мења по закону:

<sup>7</sup> Вредност коефицијента  $C$  одређује се помоћу динамичког пенетрометра.

$$F_R^m \cdot l_{sb}^n = const. \quad (3.6)$$

У предходном изразу, експонент  $m < n$ . Резултати једног оваквог испитивања приказани су на слици 3.5, а добијени су при варирању ширине и дубине реза, при чему је површина реза била константна. Са дијаграма се види да се са повећањем ширине за константан попречни пресек реза, сила смањује у сагласности са хиперболичким законом датим изразом (3.6).

### 3.2.2 Израчунавање силе резања на бази емпиријског модела

Многобројни резултати добијени експерименталним испитивањем копања омогућили су да се код највећег броја утицајних фактора успостави одређена законитост, у облику образаца који се могу користити за одређивање силе резања. Овакви изрази омогућавају израчунавање силе за различите услове резања, а у зависности од облика резног елемента, категорије стенског материјала, дубине резања, површине разарања и других не мање важних фактора. Одређивање силе резања, код багера континуалног дејства, обухвата решавање следећих проблема:

- Резање елементарним профилем
- Резање ведрицом која није опремљена резним зубима
- Резање ведрицом која је опремљена резним зубима

*a) Сила резања код примене елементарног профила.* Елементарним профилем сматра се нож ведрице и резни зуб, односно њихова основна геометрија (слика 3.4). Као што је речено, основни чиниоци који утичу на промену вредности силе резања код елементарног профила су: дубина резања  $d$ , ширина профила  $w$ , угао резања  $\delta_z$ , угао конуса  $\beta$  и карактеристика стенског материјала дата коефицијентом  $C$ . Ако се усвоји, да је ширина елементарног профила  $w=1cm$ , угао резања  $\delta_z=90^\circ$  и угао конуса  $\beta=180^\circ$ , зависност између силе резања  $F_R$  и дубине резања  $d$ , код различитих стенских материјала, може се дефинисати на следећи начин [71, 72]:

$$F_R + F_{tr} = C \cdot d^{1.35} \quad (3.7)$$

Силе  $F_R$  и  $F_{tr}$  изражене су у  $[daN]$ , дубина резања у  $[cm]$ , а за експонент  $n$  усвојена је средња вредност  $n=1.33$ . Обзиром да је сила трења  $F_{tr}$  у овом случају, у односу на силу  $F_R$  мала и износи свега 2÷3%, то због једноставнијег израчунавања могуће је силу резања приказати у облику:

$$F_R = C \cdot d^{1.35} \quad (3.8)$$

Овако добијену вредност затим треба повећати за 2÷3%. У случају да се користи елементарни профил чија је ширина већа од  $1cm$ , тада се сила резања може написати у облику:

$$F_R = C \cdot d^{1.35} \cdot (1 + 0.1 \cdot w) \quad (3.9)$$

Ширина профила  $w$  је дата у  $[cm]$ . Образац (3.9) се може користити само у случајевима када је  $\delta_z=90^\circ$  и  $\beta=180^\circ$ . У пракси случај када је угао  $\delta_z > 90^\circ$  се не примењује, док случај када је  $\delta_z < 90^\circ$  има утицаја на смањење силе резања.

Промене силе  $F_R$  у функцији угла  $\delta_z$ , за интервал  $30^\circ \div 90^\circ$ , могуће је приближно одредити помоћу емпиријске формуле дате обликом:

$$F_R = C \cdot d^{1.35} \cdot (1 + 0.1 \cdot w) \cdot \left( 1 - \frac{90^\circ - \delta_z}{180^\circ} \right) \quad (3.10)$$

У случају да је угао  $\beta < 180^\circ$ , тада је израз (3.10) потребно кориговати коефицијентом  $k_\beta$ , односно, добија се:

$$F_R = C \cdot d^{1.35} \cdot (1 + 0.1 \cdot w) \cdot \left( 1 - \frac{90^\circ - \delta_z}{180^\circ} \right) \cdot k_\beta \quad (3.11)$$

Последња једначина даје везу између силе  $F_R$  и свих најважнијих параметара који одређују њену величину. Функционална зависност између величине угла  $\beta$  и коефицијента  $k_\beta$  дата је у табели 3.3:

**Табела 3.3** Зависност угла конуса  $\beta$  у коефицијента  $k_\beta$

Угао конуса $\beta$	180°	120°	90°	60°	50°-15°
Коефицијент $k_\beta$	1	0.96	0.9	0.83	0.81



б) Сила резања код примене ведрице без резних зуба. Израз за силу резања, сагласно једначини (3.3), може се написати као:

$$F_R = A \cdot C \cdot d^{1.35} = k \cdot d^{1.35} \quad (3.12)$$

У овом случају, на основу великог броја резултата, добијена је вредност коефицијента  $A$  која се дефинише као:

$$A = 1 + 0.026 \cdot b$$

Параметар  $b$  представља укупну резну дужину дату у [cm], док је у предходној једначини, коефицијент  $k=A \cdot C$ . Сила из израза (3.12) зависи и од промене угла резања  $\delta_z$ , па се додаје и коефицијент угла  $k_{\delta_z}$  који се изражава као:

$$k_{\delta_z} = 1 + 0.0075 \cdot \delta_z \quad (3.13)$$

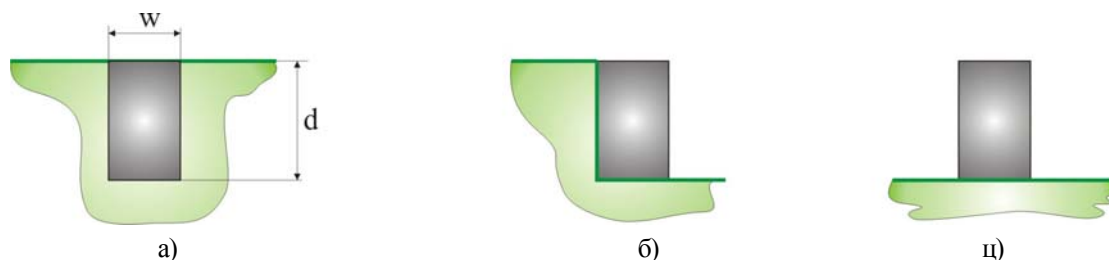
Предходни израз важи само за углове резања веће од  $20^\circ$ . Ако је ширина профила резања већа од 1cm, израз за силу се множи и са поправним коефицијентом за  $k_w$ , који се може написати као:

$$k_w = 1 + 0.03 \cdot w \quad (3.14)$$

Уколико постоји угао конуса ножа неопходно је увести још један поправни коефицијент, односно  $k_\beta$ , који се израчунава сагласно вредностима датим у табели 3.4.

Табела 3.4 Зависност угла конуса  $\beta$  у коефицијента  $k_\beta$

Угао конуса $\beta$	$45^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$180^\circ$
Коефицијент $k_\beta$	1	1.01	1.03	1.05



Слика 3.6 Шема резања. а) Блокиран, б) Полублокиран, ц) Слободан рез

За величину силе резања такође је од значаја да ли се резање врши у условима блокираног, полублокираног или слободног реза (слика 3.6), тако да у коначном билансу постоји утицај положаја реза који се изражава коефицијентом  $k_r$ , и који код блокираног реза износи  $k_r=1$ . Усвајајући све предходне констатације могуће је, зависност силе резања и свих утицајних фактора који могу битно да измене њену вредност, изразити на следећи начин:

$$F_R = C \cdot d^{1.35} \cdot (1 + 0.026 \cdot b) \cdot (1 + 0.0075 \cdot \delta_z) \cdot (1 + 0.03 \cdot w) \cdot k_\beta \cdot k_r \quad (3.15)$$

ц) Сила резања код примене ведрице са резним зубима. У предходној анализи добијена решења важе у случају ако се при копању користе ведрице без резних зуба, односно када се резање стенског материјала одвија резном ивицом ножа, и то читавом дужином ножа. У случају да је ведрица опремљена резним зубима, као што је случај на багерима континуалног дејства на домаћим површинским коповима, тада се сила резања рачуна на сличан начин као у предходном случају, само што овде извесни чланови морају бити изостављени, тако да је израз за силу резања:

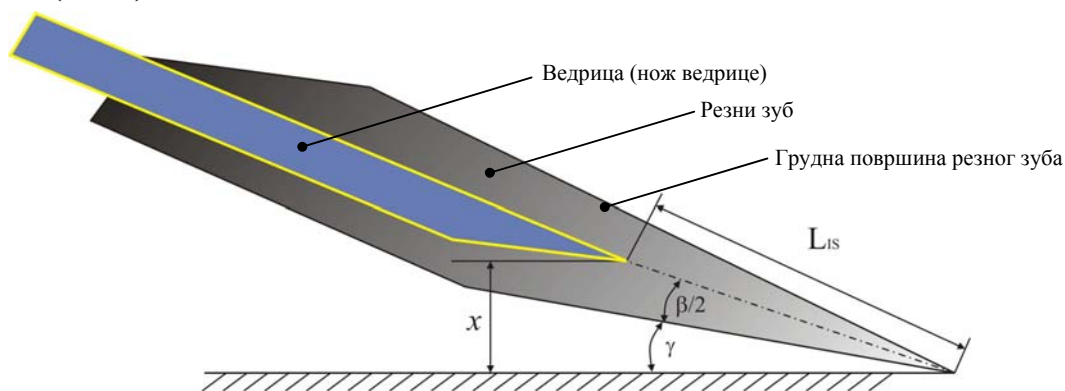
$$F_r = C \cdot d^{1.35} \cdot (1 + 0.026 \cdot b) \cdot (1 + 0.0075 \cdot \delta_z) \cdot z \quad (3.16)$$

У овом изразу изостављени су коефицијенти  $k_w$  и  $k_\beta$  пошто је утицај бокова у овом случају сведен на најмању могућу меру, али се зато уводи нови коефицијент  $z$  ( $z=0.6 \div 0.8$ , за  $b=25 \div 150$  cm), који зависи од озубљености сечива ведрице. Величина  $z$  је величина која не зависи од угла резања, али се зато мења са променом дубине резања, дужине хоризонталног профила и распореда зуба на резној ивици.

Код копања стенског материјала применом ведрице са резним зубима, дубина резања је обично већа од величине  $d$  (која одговара дубини реза код резања без примене зуба) за неку

вредност  $x$ . Ова појава је случај који се среће код свих багера који врше ископавања ведрицом са резним зубима. Обзиром да је са становишта проблематике овог рада битна управо ова величина  $x$ , то се она може израчунати сходно шеми са слике 3.7. на следећи начин:

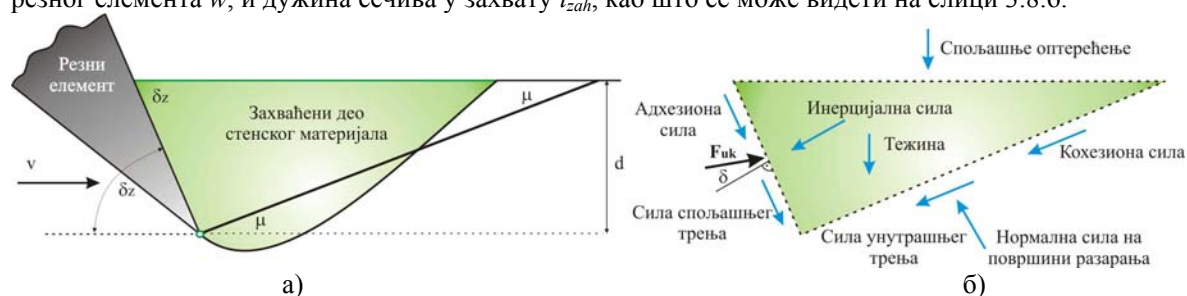
$$x \geq L_{IS} \cdot \sin\left(\gamma + \frac{\beta}{2}\right) \quad (3.17)$$



Слика 3.7 Шема за одређивање дубине резања резног зуба на ведрици

### 3.3 АНАЛИТИЧКИ МОДЕЛИ РЕЗАЊА

Да би се дефинисао било који аналитички модел резања, неопходно је размотрити основне физичке процесе који се одвијају током процеса интеракције резног елемента и стенског материјала. Сила на резном елементу која доводи до разарања пре свега зависи од чврстоће стенског материјала и његових унутрашњих пукотина [74]. Када се говори о дефинисању аналитичких модела резања, говори се заправо о одређивању вредности силе, њеног правца и смера, и дефинисању геометријске функције пукотине којом се описује линија (раван) разарања. Сматра се да пукотина има облик криве ( $I$ ) (логаритамска) или равне површине ( $II$ ), што је приказано на слици 3.8.а. Други облик криве је апроксимација и претставља приближну вредност прве. Крива разарања се одликује великим бројем параметара који су изведени графички или емпиријски, док је равна линија разарања описана помоћу мањег броја променљивих, као што су брзина  $v$ , угао смицања  $\mu$ , угао резања  $\delta_z$ , дубина резања  $d$ , спољашње оптерећење  $q$ , ширина резног елемента  $w$ , и дужина сечива у захвату  $l_{zah}$ , као што се може видети на слици 3.8.б.



Слика 3.8 а) Основни механички модел резања резним елементом у облику клина,  
б) Анализа сила код механичког модела резања

Као што је приказано у предходном делу рада, *Mohr-Coulomb*-ов критеријум лома дефинише смичућу чврстоћу помоћу унутрашњег трења и кохезије стенског материјала. Како су током интеракције присутна два физичка процеса, један који се одвија у самом стенском материјалу (карактерише га угао унутрашњег трења  $\phi$  и кохезија  $c$ ), и други који се одвија на граници контакта резног елемента и стенског материјала (карактерише га спољашњи угао трења  $\delta$  и адхезија  $c_a$ ), смичућа чврстоћа се може дефинисати помоћу израза (2.1) и (2.27):

$$\tau_s = c + \sigma \cdot Tg\phi$$

$$\tau_s = c_a + \sigma \cdot Tg\delta$$



Reece [75] је преопознао да је механика копања у више аспеката слична проблемима оптерећења у темељима тла, као што их је предходно описао Terzaghi [55]. Квантитативни утицаји тежине тла на максимални притисак темеља, кохезија и притисак услед додатног терета испод темеља, може се раздвојити и посебно алгебарски сабрати. Да би се описале све силе неопходне за резање стенског материјала помоћу резног елемента, Reece је предложио универзалну једначину за ископавање материјала:

$$F_{uk} = (\rho \cdot g \cdot d^2 \cdot N_\rho + c \cdot d \cdot N_c + q \cdot d \cdot N_q) \cdot w \quad (3.20)$$

где је:  $\rho$  - густина стенског материјала,  $g$  - гравитационо убрзање земљине теже,  $d$  - дубина резања,  $c$  – кохезија,  $q$  - додатно (спољашње) оптерећење на стенском материјалу.

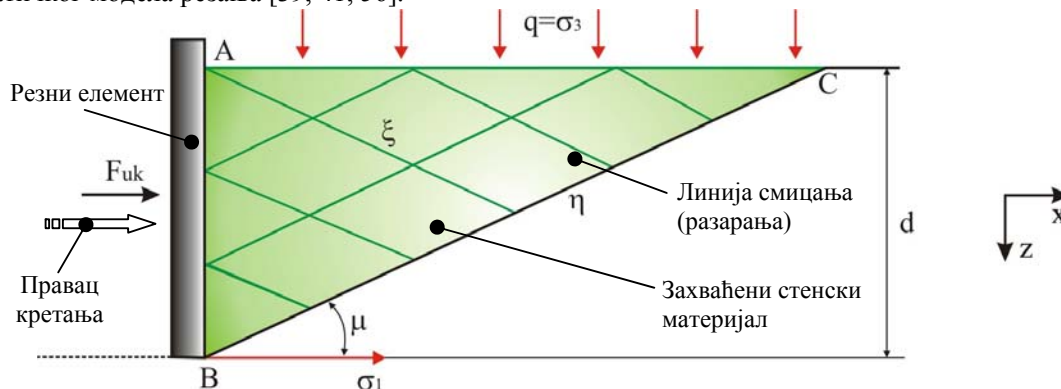
Аналитички модел се изводи из Terzaghi-јеве теорије пасивног разарања материјала. Једнозначно одређена линија клизања је апроксимирана правом линијом под углом  $\theta$  разарања стенског материјала. Тако се укупна сила  $F_{uk}$ , која оптерећује резни елемент током процеса резања, може израчунати сабирањем силе резања  $F_R$  која делује у хоризонталном и силе продирања  $F_P$  која делује у вертикалном правцу, што даје решење једначине у облику (3.20). Једначина у себи садржи променљиве ( $N_\rho$ ,  $N_c$ ,  $N_q$ ), које у обзир узимају угао резања, угао смицања стенског материјала, спољашњи угао трења, унутрашњи угао трења и др. Поређење различитих аналитичких модела врши се, на тај начин, што се променљиве групишу тако да одговарају форми универзалне једначине копања (3.20).

Генерално, аналитички модели полазе од претпоставке да се разарање јавља услед дејства резног елемента док се он креће унапред (слика 3.8.а). Осим тога, уводи се претпоставка да површина разарања потиче од врха резног елемента и сече површину стенског материјала под углом разарања (смицања)  $\theta$ . Решавањем полигона сила за случај статичке равнотеже добија се укупни отпор резања, односно укупна сила која оптерећује резни елемент током захвата. Аналитички модели могу се користити само како би се добила информација о максималној сили која се генерише током интеракције резног елемента и стенског материјала, без обезбеђивања осталих информација (нпр. како се разарани материјал деформише током резања).

У наставку рада детаљно су објашњени дводимензионални статички модели интеракције резног елемента и стенског материјала. Разматрање полази од једноставног модела резања глатким вертикалним резним елементом, да би се на крају дефинисао комплексан аналитички модел резања који укључује произвољан нападни угао и храпаву оштрицу резног елемента. Такође, дате су основе тродимензионалног решавања проблема резања. Разлика која се јавља у анализи 2D и 3D модела је у томе што 3D модели свеобухватније објашњавају укупно оптерећење резног елемента, јер узимају у обзир и додатно оптерећење услед бочног кретања стенског материјала.

### 3.3.1 Теоријска анализа дводимензионалног статичког модела резања

Како је приказано у оквиру поглавља 2, метод напонских карактеристика може се применити за решавање проблема расподеле напона у делу ископаног стенског материјала код кога је познат довољан број одговарајућих карактеристика и граничних услова. У наредном делу текста приказан је системски приступ у генерисању једног аналитичког дводимензионалног статичког модела резања [39, 41, 56].



Слика 3.9 Модел резања стенског материјала вертикалном глатком оштрицом резног елемента

На слици 3.9. приказан је бочни поглед глатке широке оштрице која разара стенски материјал, укључујући и дубину  $d$  захваћеног материјала. У овом примеру напон је познат на површини  $AC$  материјала, пошто је минимални главни напон  $\sigma_3$  једнак површинском оптерећењу  $q$ , које је једнако или веће од нуле. Да би се извршило померање резног елемента у десну страну неопходно је довести силу  $F_{uk}$ . Познато је да је ова сила нормална на оштрицу због тога што постоји претпоставка да идеално глатка оштрица резног елемента нема смичућу силу паралелну са овом површином. Напон на површини контакта оштрице резног елемента и стенског материјала је због тога максимални главни напон  $\sigma_1$ , и он је хоризонталан дуж целе вертикалне оштрице  $AB$ . На површини  $AB$  и  $AC$  укупни главни напон је хоризонталан, а угао главног напона  $\theta=0$ .

Како нема разлога за промену угла  $\theta$  (главни напон се не мења по целом региону  $ABC$ ), он је константно једнак нули, и карактеристичне линије напона имају константан угао ( $\pm\mu$ ) у односу на хоризонталу, као што је приказано на слици 3.9. Једначине (2.22) и (2.24) из предходног поглавља, могу се упростити обзиром да нема промене угла  $\theta$  дуж карактеристичних линија, па је  $d\theta=0$ .

$$d\sigma = \rho \cdot g \cdot (dz + Tg\phi \cdot dx) - \text{дуж } \xi \text{ линија} \quad (3.21)$$

$$d\sigma = \rho \cdot g \cdot (dz - Tg\phi \cdot dx) - \text{дуж } \eta \text{ линија} \quad (3.22)$$

Дељењем једначине (3.22) са  $dz$ , добија се:

$$\frac{d\sigma}{dz} = \rho \cdot g \cdot \left(1 - Tg\phi \cdot \frac{dx}{dz}\right) = \rho \cdot g \cdot \left(1 + \frac{Tg\phi}{Tg\mu}\right) \quad (3.23)$$

(обзиром да је  $dx/dz$  инверзно од  $tg(\mu)$ ). Вредност функције напона  $\sigma$  је позната на површини материјала  $AC$ , за непроменљиви притисак  $q$  на површини ископаног материјала, из једначине (3.12):

$$\sigma = \frac{(\sigma_3 + \psi)}{(1 - \text{Sin}\phi)} = \frac{(q + \psi)}{(1 - \text{Sin}\phi)} \quad (3.24)$$

Да би се нашао напон на врху оштрице, односно у тачки  $B$ , неопходно је интегралити једначину (3.23), од тачке  $C$  до тачке  $B$  дуж линије  $\eta$ . У тачки  $B$ :

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{q + \psi}{1 - \text{Sin}\phi} + \int_0^d \frac{d\sigma}{dz} \cdot dz = \frac{q + \psi}{1 - \text{Sin}\phi} + \int_0^d \rho \cdot g \cdot \left(1 + \frac{Tg\phi}{Tg\mu}\right) \cdot dz \\ \sigma &= \frac{q + \psi}{1 - \text{Sin}\phi} + \rho \cdot g \cdot \left(1 + \frac{Tg\phi}{Tg\mu}\right) \cdot d \end{aligned} \quad (3.25)$$

Напон на оштрици у тачки  $B$  је максимални главни напон  $\sigma_1$ , који је добијен из једначине (2.12) на следећи начин:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma \cdot (1 + \text{Sin}\phi) - \psi \\ \sigma_1 &= (q + \psi) \cdot \left(\frac{1 + \text{Sin}\phi}{1 - \text{Sin}\phi}\right) + \rho \cdot g \cdot d \cdot \left(1 + \frac{Tg\phi}{Tg\mu}\right) \cdot (1 + \text{Sin}\phi) - c \cdot \text{Ctg}\phi \end{aligned} \quad (3.26)$$

У општем случају, дуж оштрице  $AB$ , напон зависи од дубине  $z$ :

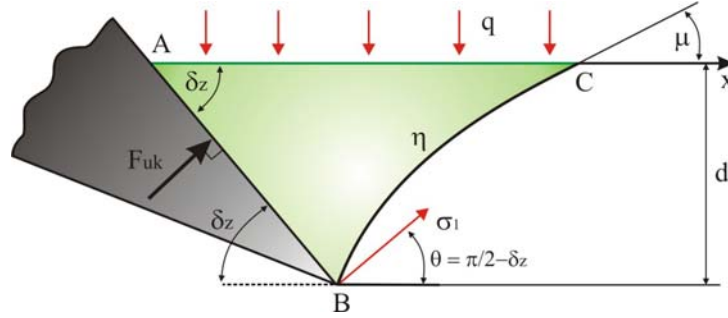
$$\sigma_1 = (q + \psi) \cdot \left(\frac{1 + \text{Sin}\phi}{1 - \text{Sin}\phi}\right) + \rho \cdot g \cdot z \cdot \left(1 + \frac{Tg\phi}{Tg\mu}\right) \cdot (1 + \text{Sin}\phi) - c \cdot \text{Ctg}\phi \quad (3.27)$$

На тај начин укупна сила на резном елементу  $F_{uk}$ , по јединици његове ширине, је:

$$\begin{aligned} F_{uk} &= \int_0^d \sigma_1 dz = \int_0^d \left( (q + \psi) \cdot \left(\frac{1 + \text{Sin}\phi}{1 - \text{Sin}\phi}\right) + \rho \cdot g \cdot z \cdot \left(1 + \frac{Tg\phi}{Tg\mu}\right) \cdot (1 + \text{Sin}\phi) - c \cdot \text{Ctg}\phi \right) dz \\ F_{uk} &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot d^2 \cdot (1 + \text{Sin}\phi) \cdot \left(1 + \frac{Tg\phi}{Tg\mu}\right) + c \cdot d \cdot \text{Ctg}\phi \left[ \left(\frac{1 + \text{Sin}\phi}{1 - \text{Sin}\phi}\right) - 1 \right] + q \cdot d \cdot \left(\frac{1 + \text{Sin}\phi}{1 - \text{Sin}\phi}\right) \end{aligned} \quad (3.28)$$

## 3.3.1.1 Дефинисање функције кохезије материјала

На слици 3.10 приказана је глатка широка оштрица резног елемента у захвату под углом  $\delta_z$  у односу на хоризонталу и на дубини  $d$  у односу на површину материјала. Гранични услови су слични наведеним условима за вертикалну глатку оштрицу, осим што напон на оштрици  $\sigma_1$  није хоризонталан, већ је под неким углом  $\theta = \pi/2 - \delta_z$ . Угао  $\theta$  не остаје константан у стенском материјалу, па се апроксимација  $d\theta = 0$  у овом случају не може применити.



Слика 3.10 Модел резања косом глатком оштрицом резног елемента у кохезионом стенском материјалу

У складу са експлицитним решавањем карактеристичне једначине неопходно је другачије поједностављење. У овом случају, може се применити претпоставка да је кохезиони део чврстоће стенског материјала доста већи од сила трења потребних за покретање масе захваћеног материјала. Угао трења стенског материјала још увек одређује облик карактеристичних линија лома, па је претпоставка да ће тежина материјала безначајно утицати на додатни отпор смицању. Ова претпоставка је и практично валидна за резне елементе који раде на релативно малим дубинама резања (нпр. резање стенских материјала са великом кохезионом чврстоћом). Једначина (2.24) дуж  $\eta$  карактеристичне линије се поједностављује, па се сагласно уведеној претпоставци усваја да је густина стенског материјала једнака нули. Дефинише се следећи израз:

$$d\sigma - 2 \cdot \sigma \cdot \text{Tg}\phi \cdot d\theta = 0 \quad (3.29)$$

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = 2 \cdot \text{Tg}\phi \cdot d\theta$$

$$\ln \sigma = 2 \cdot \theta \cdot \text{Tg}\phi + C_1$$

$$\sigma = C_2 \cdot e^{2\theta \cdot \text{Tg}\phi} \quad (3.30)$$

Константе  $C_1$  и  $C_2$  су константе интеграције, и добијају се из граничних услова. На површини  $AC$  (слика 3.10), функција напона  $\sigma$  има исту вредност као и у случају вертикалне глатке оштрице [39]:

$$\sigma = \frac{q + \psi}{1 - \text{Sin}\phi} = C_2 \cdot e^0 = C_2 \quad (3.31)$$

Због тога, функција напона на површини оштрице, односно дуж  $AB$ , дата је следећом једначином:

$$\sigma = \frac{q + \psi}{1 - \text{Sin}\phi} \cdot e^{2 \cdot \text{Tg}\phi \cdot \left(\delta_z - \frac{\pi}{2}\right)} \quad (3.32)$$

Након тога, могуће је добити и напон на површини оштрице резног елемента  $\sigma_1$ , користећи једначину (2.12):

$$\sigma_1 = \sigma \cdot (1 + \text{Sin}\phi) - \psi = (q + \psi) \cdot \left(\frac{1 + \text{Sin}\phi}{1 - \text{Sin}\phi}\right) \cdot e^{(2 \cdot \delta_z - \pi) \cdot \text{Tg}\phi} - c \cdot \text{Ctg}\phi \quad (3.33)$$

Овај напон оштрице је независан од дубине и константан је у свим тачкама. Неопходно је само да буде увећан услед дужине оштрице, како би се израчунала укупна сила  $F_{uk}$ , по ширини сечива резног елемента:

$$F_{uk} = \frac{\sigma_1 \cdot d}{\text{Sin}\delta_z}$$

$$F_{uk} = c \cdot d \cdot \frac{Ctg\phi}{Sin\delta_z} \cdot \left[ \left( \frac{1+Sin\phi}{1-Sin\phi} \right) \cdot e^{(2\delta_z-\pi)Tg\phi} - 1 \right] + q \cdot d \cdot \left( \frac{1+Sin\phi}{1-Sin\phi} \right) \cdot \frac{e^{(2\delta_z-\pi)Tg\phi}}{Sin\delta_z} \quad (3.34)$$

### 3.3.1.2 Дефинисање функције спољашњег трења

У случају храпаве косе оштрице уводи се претпоставка да је, чврстоћа на граници контакта стенског материјала и резног елемента, једнака чврстоћи стенског материјала. Тангенцијални напон, који се јавља на сечиву резног елемента у тренутку разарања стенског материјала, изражава се:

$$\tau_{sk} = c + \sigma_k \cdot Tg\phi \quad (3.35)$$

Напон  $\sigma_k$  једнак је нормалном притиску на оштрицу резног елемента. Због овога, површина резног елемента се поклапа са карактеристичним линијама разарања стенског материјала као што је приказано на слици 3.11, а угао главних напона  $\sigma_l$  дуж оштрице сечива се може израчунати као:

$$\theta = \delta_z - \mu \quad (3.36)$$

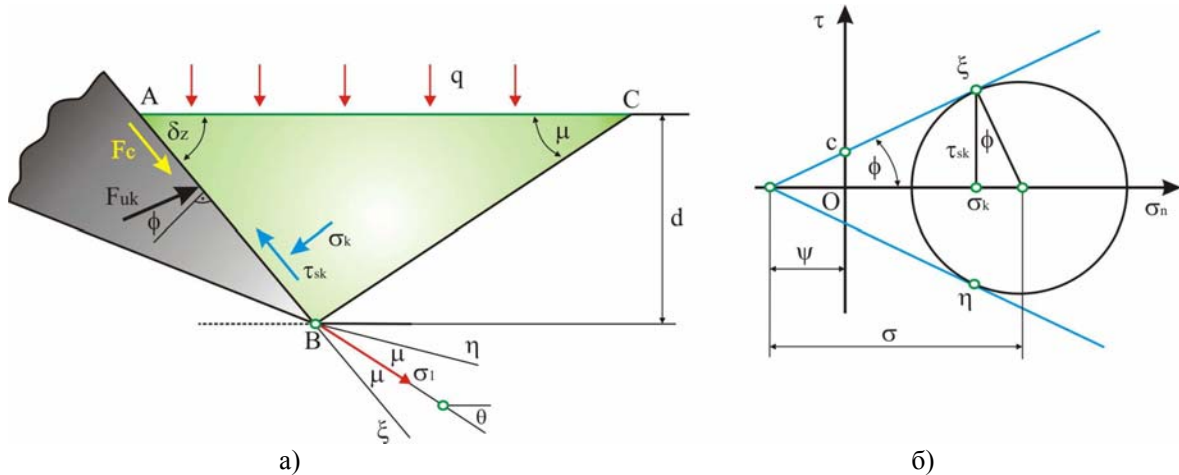
Функција напона на површини захваћеног материјала  $AC$  је иста као у предходна два случаја, а претпоставка о незнатној тежини захваћеног материјала омогућава коришћење једначине (3.31) за дефинисање функције напона дуж  $AB$ , на следећи начин:

$$\sigma = \frac{q + \psi}{1 - Sin\phi} \cdot e^{2(\delta_z - \mu)Tg\phi} = C_2 \quad (3.37)$$

Из *Mohr*-овог круга напона са слике 3.11.б могу се израчунати нормални и тангенцијални (смичући) напон на оштрици резног елемента:

$$\sigma_k = \sigma \cdot Cos^2\phi - \psi \quad (3.38)$$

$$\tau_{sk} = \sigma \cdot Sin\phi \cdot Cos\phi \quad (3.39)$$



Слика 3.11 а) Модел косе храпаве оштрице, б) *Mohr*-ов круг напона у тачки В

Да би се добиле компоненте силе које делују на оштрицу (једна делује паралелено, а друга управно на њу), врши се интегралнење једначина (3.38) и (3.39) по површини оштрице. Међутим, применом методе комбиновања граничних напона, омогућава се раздвајање компоненти трења и кохезије у односу на остале силе, а у исто време израчунавају се две непознате силе у два позната правца. На слици 3.11. приказана је сила  $F_{uk}$  тако да је нагнута у односу на нормалу оштрице за угао унутрашњег трења  $\phi$ , и сила  $F_c$  чија се вредности добија из израза:  $F_c = c \cdot l_{zah}$  (дужина  $l_{zah}$  једнака дужини оштрице у захвату), која је паралелна са оштрицом. Сила  $F_{uk}$  обухвата силу нормалну на површини оштрице и компоненту трења отпора смицања, док  $F_c$  обухвата само кохезиону силу дуж површине оштрице.

$$F_{uk} = \frac{\sigma_k \cdot l_{zah}}{\cos \phi} = cd \cdot \left[ \left( \frac{\cos^2 \phi \cdot e^{2(\delta_z - \mu)Tg\phi}}{1 - \sin \phi} \right) - 1 \right] \cdot \left[ \frac{1}{\sin \phi \cdot \sin \delta_z} \right] + qd \cdot \left( \frac{\cos \phi}{\sin \delta_z} \right) \cdot \left[ \frac{e^{2(\delta_z - \mu)Tg\phi}}{1 - \sin \phi} \right] \quad (3.40)$$

Сила резања  $F_R$  претставља збир хоризонталних компоненти сила  $F_{uk}$  и  $F_c$ , док сила продирања  $F_P$  претставља њихове вертикалне копоненте, па се за ове силе по јединици ширине резног елемента могу написати следећи изрази

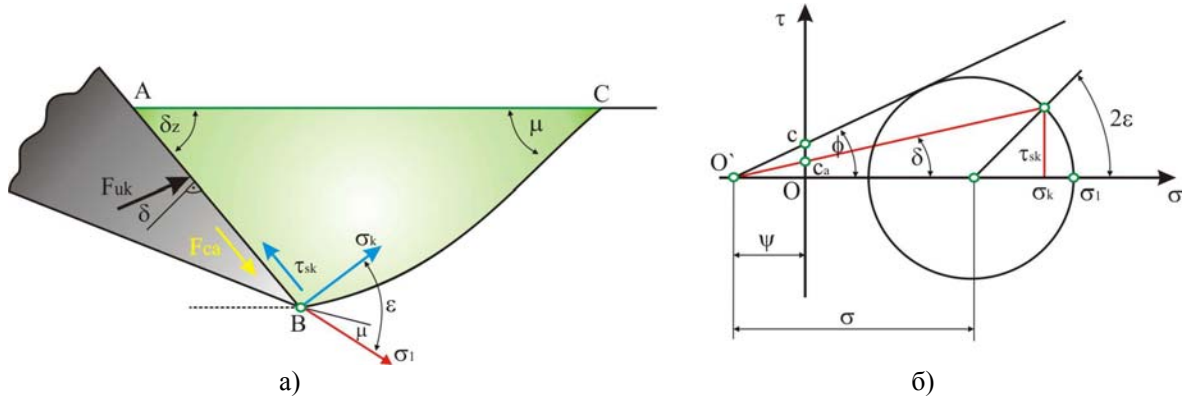
$$F_R = F_{uk} \cdot \sin(\delta_z + \phi) + c \cdot d \cdot \text{Ctg} \delta_z \quad (3.41)$$

$$F_P = F_{uk} \cdot \cos(\delta_z + \phi) - c \cdot d \quad (3.42)$$

Материјали од којих се израђују резни елементи (различите врсте челика) не могу се сврстати ни у једну групу, обзиром да нису ни потпуно глатки, ни веома храпави у поређењу са стенским материјалом. Генерално говорећи, угао спољашњег трења је мањи од угла унутрашњег трења и из практичног искуства код челика је  $\delta = (0.5-0.875) \cdot \phi$  [79]. На слици 3.12 је дат општи приказ проблема разарања стенског материјала за случај када је:  $0 < \delta < \phi$ , док су на истој слици приказани  $\sigma_k$  и  $\tau_{sk}$ , односно нормални и тангенцијални напон на површини оштрице резног елемента. Такође, могу се видети и на *Mohr*-овом кругу напона где права линија контакта *резни елемент-стенски материјал*  $\tau = c_a + \sigma \cdot Tg \delta$ , сече *Mohr*-ов круг са десне стране. Због тога, максимални напон  $\sigma_I$  може се наћи под неком углом  $\varepsilon$  од напона  $\sigma_k$ , који је нормалан на површину оштрице, и због тога је угао  $2\varepsilon$ , угао између специфичне комбинације напона ( $\sigma_k$ ,  $\tau_{sk}$ ) на оштрици резног елемента и главног напона  $\sigma_I$  на *Mohr*-овом кругу на слици 3.12.

Угао  $\varepsilon$  се може израчунати само уколико оба напона, (унутрашња чврстоћа материјала и чврстоћа на граници резни елемент – стенски материјал) у *Mohr*-овом кругу напона, секу хоризонталну осу у истој тачки  $O'$  као што је приказано на слици 3.12. Ова чињеница дефинише вредност адхезије између резног елемента и стенског материјала, и угао трења као:

$$\psi = c \cdot \text{Ctg} \phi = c_a \cdot \text{Ctg} \delta \quad (3.43)$$



Слика 3.12 а) Разарање стенског материјала за опште граничне услове, б) *Mohr*-ов круг напона на површини резног елемента у тачки В

Ако се горња претпоставка прихвати, онда се угао  $\varepsilon$  може израчунати из геометрије *Mohr*-овог круга:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \left[ \delta + \sin^{-1} \cdot \left( \frac{\sin \delta}{\sin \phi} \right) \right] \quad (3.44)$$

А угао  $\theta$  који дефинише положај напона  $\sigma_I$  у односу на хоризонталу је:

$$\theta = \delta_z + \varepsilon - \frac{\pi}{2} \quad (3.45)$$

Једначина (3.45) се поклапа са ограничењима угла  $\varepsilon$  за два предходна случаја где је  $\varepsilon=0$  или  $\varepsilon=(\pi/4+\phi/2)$  за идеално глатку и храпаву оштрицу респективно. Користећи једначину (3.30) за дефинисање напона, уз претпоставку о занемаривању тежине стенског материјала, нормални напон на оштрици и укупна сила  $F_{uk}$  се израчунавају на следећи начин:

$$\sigma = \left( \frac{q + \psi}{1 - \sin \phi} \right) \cdot e^{2 \cdot \theta \cdot \text{Tg} \phi}$$

$$\sigma_k = \sigma \cdot (1 + \sin \phi \cdot \cos(2\varepsilon)) - \psi$$

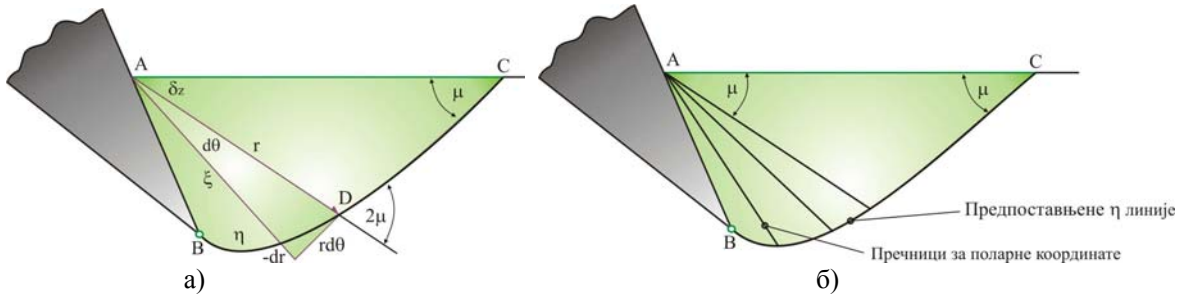
$$F_{uk} = \frac{\sigma_k \cdot d}{\cos \delta \cdot \sin \delta_z}$$

$$F_{uk} = cd \left( \frac{\text{Ctg} \phi}{\cos \delta \cdot \sin \delta_z} \right) \left( \left[ \frac{1 + \sin \phi \cdot \cos(2\varepsilon)}{1 - \sin \phi} \right] e^{2\theta \text{Tg} \phi} - 1 \right) + qd \left( \frac{1 + \sin \phi \cdot \cos(2\varepsilon)}{(1 - \sin \phi) \cos \delta \cdot \sin \delta_z} \right) e^{2\theta \text{Tg} \phi} \quad (3.46)$$

Сила  $F_{ca} = c_a \cdot l_{zah}$ , паралелна са оштрицом је такође једна од сила потребних за померање резног елемента кроз стенски материјал, док се параметри  $c_a$  и  $\delta$  користе у једначинама (3.41) и (3.42) уместо  $c$  и  $\phi$ .

### 3.3.1.3 Дефинисање функције облика површине разарања ископаног материјала

Имајући у виду претпоставку да је тежина стенског материјала до сада била занемаривана, слика 3.13 приказује општи облик линије  $\eta$  у случају пасивног разарања материјала. Ако се посматра елементарни део запремине, онда угао  $\theta$  тежи да остане константан на граници и у региону  $ABC$  дуж сваке линије  $\xi$  (нпр. линија  $AD$  са слике 3.13.а). Модел претпоставља да су  $\xi$  линије праве, и да у пресеку са  $\eta$  линијама у свакој тачки на граници разарања генеришу угао од  $2\mu$ .



Слика 3.13 а) Облик карактеристичних линија разарања стенског материјала, б) Израчунавање најниже карактеристичне линије  $\eta$  [80]

У веома малом троуглу који је дефинисан страницама  $-dr$  и  $rd\theta$  је:

$$-dr = r \cdot d\theta \cdot \text{Ctg}(2\mu) = r \cdot d\theta \cdot \text{Tg} \phi \quad (3.47)$$

$$r = C_3 \cdot e^{-\theta \cdot \text{Tg} \phi} \quad (3.48)$$

У предходном изразу  $C_3$  је константа интеграције и добија се из граничних услова. Једначином (3.48) описује се *Terzaghi*-јев логаритамски спирални облик разарања материјала [55, 67].

### 3.3.1.4 Анализа утицаја тежине стенског материјала

Када је при разматрању проблема резања немогуће занемарити тежину ископаног материјала или кад се разматрају велике дубине резања, основне диференцијалне једначине, дуж карактеристичних линија разарања материјала једначине (2.22) и (2.24), постају немогуће за егзактно интеграње. У литератури [58, 81] је показано како интегрисати напоне и углове напона у простору карактеристичних линија стенског материјала, применом нумеричке методе. Да би се добило решење на овај начин потребно је извршити конверзију једначина (2.21)÷(2.24) у формат коначних разлика, како би се израчунале промене дуж карактеристичних линија за мале промене у правцима  $x$  и  $z$  (слика 2.15).

У литератури [82, 83] приказан је метод који се заснива на развоју скупа графикана, који се користе за брзо решавање партикуларних проблема. Применом методе *Sokolovski*-ог, сила резања  $F_{uk}$  је израчуната и претстављена у форми једначине (3.20), при чему је додат фактор  $N_a$  којим се дефинише адхезија између резног елемента и стенског материјала. У литератури [80]



приказана је интеграција методом коначних разлика, при чему је у прорачун укључена променљива брзина појединих делова стенског материјала. Овако добијени резултати дају веома добру корелацију са експерименталним мерењима сила у одговарајућим стенским материјалима. Истраживања у оквиру [80], која у основи садрже једначине (2.21) и (2.24), дефинисала су теоријски облик линије разарања у песковитом стенском материјалу испред резне оштрице (слика 3.13.б). Тако добијена крива разарања веома је блиска облику који је добијен експерименталним мерењима [84]. Хоризонталне и вертикалне компоненте силе резања, које се могу израчунати на основу ове методе, су веома блиске резултатима који су измерени на моделима у лабораторијским условима.

Узимањем у обзир додатне тежине стенског материјала може се направити апроксимација, модификовањем раније дефинисаних претпоставки за стенски материјал без тежине. На слици 3.14 област  $ACD$  се може разматрати као правилна зона пасивног притиска, као што је приказано на слици 3.9, где је у целом подручју  $\theta=0$ , а  $\sigma_3=\sigma_{zz}=\rho \cdot g \cdot z+q$ .

За површину  $ABC$  се претпоставља да има радијални облик зоне смицања, као што је случај код стенског материјала код кога је занемарена тежина (слика 3.13.а). Узимајући у обзир величину  $ABC$  и углове максималних главних напона, вредност напона се може добити преко следећих израза:

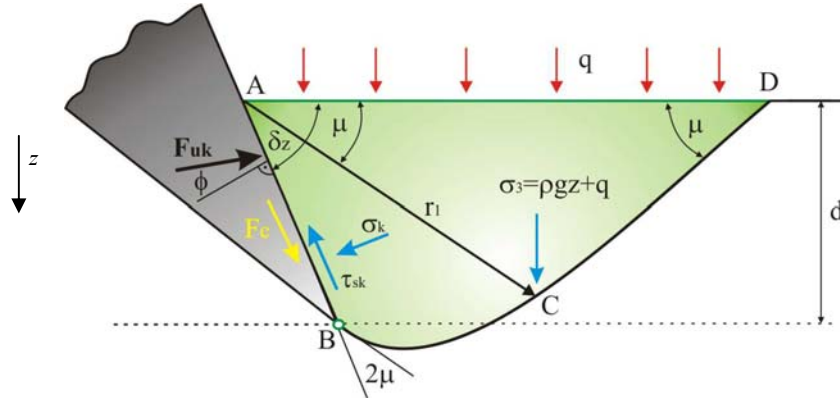
$$r_1 = AC = AB \cdot e^{(\delta_z - \mu) Tg\phi} = d \cdot \left( \frac{e^{(\delta_z - \mu) Tg\phi}}{\sin \delta_z} \right) \quad (3.49)$$

У тачки  $B$ ,  $\theta = \alpha - \mu$ .

$$\sigma = \left( \frac{\rho \cdot g \cdot z + q + \psi}{1 - \sin \phi} \right) \cdot e^{2\theta Tg\phi} = \left( \frac{\rho \cdot g \cdot r_1 \cdot \sin \mu + q + c \cdot \text{Ctg} \phi}{1 - \sin \phi} \right) \cdot e^{2(\delta_z - \mu) Tg\phi}$$

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \sigma \cdot \cos^2 \phi - c \cdot \text{Ctg} \phi \\ &= \left[ \frac{\rho \cdot g \cdot d \cdot \frac{\sin \mu}{\sin \delta_z} \cdot e^{(\delta_z - \mu) Tg\phi} + q + c \cdot \text{Ctg} \phi}{1 - \sin \phi} \right] \cdot \cos^2 \phi \cdot e^{2(\delta_z - \mu) Tg\phi} - c \cdot \text{Ctg} \phi \end{aligned} \quad (3.50)$$

$$\tau_{sk} = \sigma_k \cdot Tg\phi + c \quad (3.51)$$



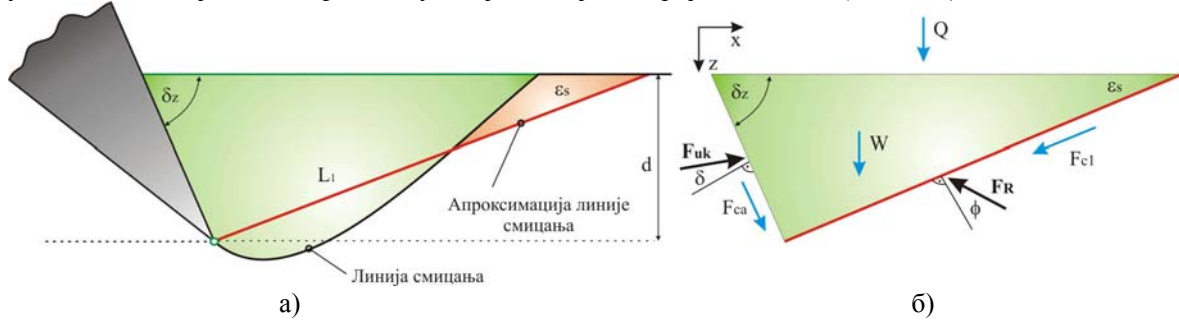
Слика 3.14 Апроксимација тежине ископаног материјала, при резању са хрпавом оштрицом

Овде се јавља линеарно повећање напона притиска на сечиву резног елемента (од  $A$  ка  $B$ ), идући вертикално наниже координатом  $z$ . Укупна (нормална) сила на резном елементу добија се из просечне вредности напона притиска. Просечна вредност добија се заменом  $d$  у једначини (3.50) са  $d/2$ . Примењујући предходно са одговарајућим сабирањем нормалне и смичуће компоненте силе, добија се укупна сила  $F_{uk}$  која се дефинише следећим изразом:

$$\begin{aligned} F_{uk} &= \rho \cdot g \cdot \frac{d^2}{2} \left[ \frac{\sin \mu \cdot \cos \phi \cdot e^{3(\delta_z - \mu) Tg\phi}}{\sin^2 \delta_z \cdot (1 - \sin \phi)} \right] + \frac{c \cdot d}{\sin \delta_z \cdot \sin \phi} \left[ \left( \frac{\cos^2 \phi \cdot e^{2(\delta_z - \mu) Tg\phi}}{1 - \sin \phi} \right) - 1 \right] \\ &+ q \cdot d \left[ \frac{\cos \phi \cdot e^{2(\delta_z - \mu) Tg\phi}}{\sin \delta_z \cdot (1 - \sin \phi)} \right] \end{aligned} \quad (3.52)$$

## 3.3.1.5 Апроксимација облика линије разарања (метод клина захваћеног материјала)

У циљу једноставније анализе сила *Terzaghi* уводи апроксимацију, којом се логаритамске спиралне клизне линије дефинишу као праве. На слици 3.15.а тачан облик најниже линије смицања стенског материјала, које изазива резни елемент током резања, је апроксимативно замењена правом линијом под углом  $\varepsilon_s$  у односу на хоризонталу, чију вредност тек треба дефинисати. Основа овог модела почива на чињеници да се део захваћеног стенског материјала посматра као троугао који својим катетама належе на грудну површину резног елемента и на смичућу површину стенског материјала. Усвајањем претпоставке да се овај троугао ослања, односно клиза по овим равнима, уводе се компоненте сила  $F_{uk}$  и  $F_{grs}$ , којима се замењује утицај остатка система на посматрани троугао стенског материјала. Такође, на одговарајућим равнима уводе се силе којима се дефинише утицај кохезије материјала  $F_{ca}$  и  $F_{cl}$  ( $F_{cl}=c \cdot l$ ).



Слика 3.15 Теорија клина и пасивно разарање материјала а) Апроксимација линије смицања стенског материјала, б) Пројекција сила на захваћени део стенског материјала у облику клина

Основни модел (слика 3.15) може се једноставно проширити, како би се описали и остали утицаји као што су: различити слојеви стенског материјала, косе површине материјала, облик резног елемента, површинско концентрисано оптерећење и др., које је тешко укључити у анализу напонског стања стенског материјала. Збир свих сила у хоризонталном и вертикалном правцу је једнак нули обзиром на стање равнотеже. Сила  $F_{uk}$  за јединичну ширину резног елемента, израчунава се на следећи начин:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= F_{uk} \cdot \sin(\delta_z + \delta) + F_{ca} \cdot \cos \delta_z - F_{grs} \cdot \sin(\varepsilon_s + \phi) - F_{cl} \cdot \cos \varepsilon_s = 0 \\ \sum F_z &= -F_{uk} \cdot \cos(\delta_z + \delta) + F_{ca} \cdot \sin \delta_z - F_{grs} \cdot \cos(\varepsilon_s + \phi) + F_{cl} \cdot \sin \varepsilon_s + W + Q = 0 \\ F_{uk} &= \frac{W + Q + c \cdot d [1 + \text{Ctg} \varepsilon_s \cdot \text{Ctg}(\varepsilon_s + \phi)] + c_a \cdot d [1 + \text{Ctg} \delta_z \cdot \text{Ctg}(\varepsilon_s + \phi)]}{\cos(\delta_z + \delta) + \sin(\delta_z + \delta) \text{Ctg}(\varepsilon_s + \phi)} \end{aligned} \quad (3.54)$$

Тежина захваћеног дела стенског материјала и додатно континуално површинско оптерећење  $q$  дефинишу се на следећи начин:

$$W = \rho \cdot g \cdot \frac{d^2}{2} \cdot (\text{Ctg} \delta_z + \text{Ctg} \varepsilon_s) \quad (3.55)$$

$$Q = q \cdot d \cdot (\text{Ctg} \delta_z + \text{Ctg} \varepsilon_s) \quad (3.56)$$

Ако се посматра једначина (3.54) види се да се по форми уклапа у форму универзалне једначине копања дате изразом (3.20). Одговарајуће  $N$  променљиве дефинисане су на следећи начин:

$$N_\rho = \frac{1}{2} \cdot \frac{\text{Ctg} \delta_z + \text{Ctg} \varepsilon_s}{\cos(\delta_z + \delta) + \sin(\delta_z + \delta) \text{Ctg}(\varepsilon_s + \phi)} \quad (3.57)$$

$$N_c = \frac{1 + \text{Ctg} \delta_z \cdot \text{Ctg}(\varepsilon_s + \phi)}{\cos(\delta_z + \delta) + \sin(\delta_z + \delta) \text{Ctg}(\varepsilon_s + \phi)} \quad (3.58)$$

$$N_q = 2 \cdot N_\rho \quad (3.59)$$

$$N_{ca} = \frac{1 - \text{Ctg} \delta_z \cdot \text{Ctg}(\varepsilon_s + \phi)}{\cos(\delta_z + \delta) + \sin(\delta_z + \delta) \text{Ctg}(\varepsilon_s + \phi)} \quad (3.60)$$



Како је већ показано у поглављу 3.3.1.3, карактеристике чврстоће и трења стенског материјала одређују облик зоне разарања током процеса резања, па онда линије смицања материјала не зависе од величине кохезије материјала нити од додатног оптерећења  $q$ . Да би се нашао најприкладнији угао којим би се дефинисао модел одвајања клинасте запремине материјала неопходно је одредити критични угао  $\varepsilon_{skr}$ , који доводи до тога да променљива  $N_p$  буде минимална, користећи једначину (3.57). Овим поступком се заправо одређује положај апроксимативне праве линије којом је одређен најмањи отпор разарању, сагласно моделу приказаном на слици 3.15. Тако добијена вредност угла се затим користи за израчунавање остале три променљиве дате једначинама (3.58), (3.59) и (3.60).

### 3.3.2 Постојећи дводимензионални статички модели резања

Сличним поступцима, као што је предходно показано, развијен је већи број дводимензионалних модела резања. Сви модели на одређени начин дефинишу укупну силу у функцији од најугицајних параметара резања, са већом или мањом тачношћу. Допуну оваквих модел чине експериментални подаци, којима се дефинишу константе у једначинама. У наставку текста приказани су неки од најзначајних дводимензионалних модела за израчунавање силе резања.

#### 3.3.2.1 Модел *Gill* -а и *Vanden Berg* -а

Истраживање спроведено у оквиру [64] дефинише израз за одређивање силе резања на следећи начин:

$$F_R = F_N \cdot \sin \delta_z + \delta \cdot F_N \cdot \cos \delta_z$$

Предходна једначина се прецизније може написати као:

$$F_R = \left[ \rho \frac{\sin(\delta_z + \varepsilon_s)}{\sin \varepsilon_s} \left( l_{zah} + \frac{d \cdot \cos(\delta_z + \varepsilon_s)}{2 \sin \varepsilon_s} + \frac{d \cdot \sin(\delta_z + \varepsilon_s) \operatorname{Tg} \delta_z}{2 \sin \varepsilon_s} \right) + \frac{c}{\sin \varepsilon_s \cdot (\sin \varepsilon_s + \phi \cdot \cos \varepsilon_s)} \right] \cdot \left( \frac{\rho \cdot v^2 \sin \delta_z}{g \cdot \sin(\delta_z + \varepsilon_s) (\sin \varepsilon_s + \phi \cdot \cos \varepsilon_s)} \right) \cdot \left( \frac{wd (\sin \delta_z + \delta \cdot \cos \delta_z) (\sin \varepsilon_s + \phi \cdot \cos \varepsilon_s)}{\sin(\delta_z + \varepsilon_s) (1 - \phi \delta) + \cos(\delta_z + \varepsilon_s) (\phi - \delta)} \right) \quad (3.61)$$

Моделом је обухваћена тежина ископаног материјала и ефекат инерције.

#### 3.3.2.2 Модел *Swick*-а и *Perumpral*-а

Истраживања која су спроведена у оквиру [60] довела су до једначине за дефинисање укупне силе  $F_{uk}$  коју генерише резни елемент у следећој форми:

$$F_{uk} = \frac{wd}{\sin(\delta_z + \phi + \varepsilon_s + \delta)} \cdot \left[ \frac{-c_a \cos(\delta_z + \phi + \varepsilon_s)}{\sin \delta_z} + \frac{\rho \cdot d^2}{4} (\operatorname{Ctg} \delta_z + \operatorname{Ctg} \varepsilon_s) \sin(\phi + \varepsilon_s) \right] + \frac{qd}{2} (\operatorname{Ctg} \delta_z + \operatorname{Ctg} \varepsilon_s) \sin(\phi + \varepsilon_s) + \frac{c \cdot \cos \phi}{\sin \varepsilon_s} + \frac{\rho \cdot v^2}{g} \cdot \frac{\sin \delta_z \cdot \cos \phi}{\sin(\delta_z + \varepsilon_s)} \quad (3.62)$$

Сила резања добија се из израза:

$$F_R = F_{uk} \cdot \sin(\delta_z + \delta) \quad (3.63)$$

У односу на модел дат у оквиру [64], овај израз обухвата ефекте адхезије, тежине, преоптерећења, кохезије и инерције.

#### 3.3.2.3 Модел *McKyes*-а

Модел резања који се базира и представља проширење *Reese*-ове универзалне једначине копања, дефинисана је у оквиру [39]. Овај модела резања који обухвата тежину  $N_p$ , кохезију  $N_c$ , адхезију  $N_{ca}$ , додатно оптерећење  $N_q$  и инерцију  $N_a$  и дефинише се у следећем облику:

$$F_{uk} = (\rho \cdot g \cdot d^2 \cdot N_p + c \cdot d \cdot N_c + c_a \cdot d \cdot N_{ca} + q \cdot d \cdot N_q + \rho \cdot v^2 \cdot d \cdot N_a) \cdot w \quad (3.64)$$

Проширени израз предходне једначине има следећи облик:

$$F_{uk} = \frac{w \cdot d}{\cos(\delta_z + \delta) + \sin(\delta_z + \delta) \operatorname{Ctg}(\varepsilon_s + \phi)} \cdot \left[ \frac{\rho \cdot g \cdot d \cdot (\operatorname{Ctg} \delta_z + \operatorname{Ctg} \varepsilon_s)}{2} + q \cdot (\operatorname{Ctg} \delta_z + \operatorname{Ctg} \varepsilon_s) + c \cdot (1 + \operatorname{Ctg} \varepsilon_s \cdot \cos(\varepsilon_s + \phi)) + c_a \cdot (1 - \operatorname{Ctg} \delta_z \cdot \operatorname{Ctg}(\varepsilon_s + \phi)) + \frac{\rho \cdot v^2 \cdot (\operatorname{Tg} \varepsilon_s + \operatorname{Ctg}(\varepsilon_s + \phi))}{1 + \operatorname{Tg} \varepsilon_s \cdot \operatorname{Ctg} \delta_z} \right] \quad (3.65)$$

Сила резања добија се на следећи начин:

$$F_R = F_{uk} \cdot \sin(\delta_z + \delta) \quad (3.66)$$

Предходне једначине (3.61), (3.62) и (3.65), али и методологија извођења која је приказана у предходном делу поглавља, указују на могућност њихове примене за различите процесе интеракције. На пример, усвајајући карактеристичне параметре сваког процеса посебно једначине могу бити примењене на различите поступке резања сечивом, вибрациона сечења, процесе набијања, као и резање клинастим резним елементима и алатима пробирјачима.

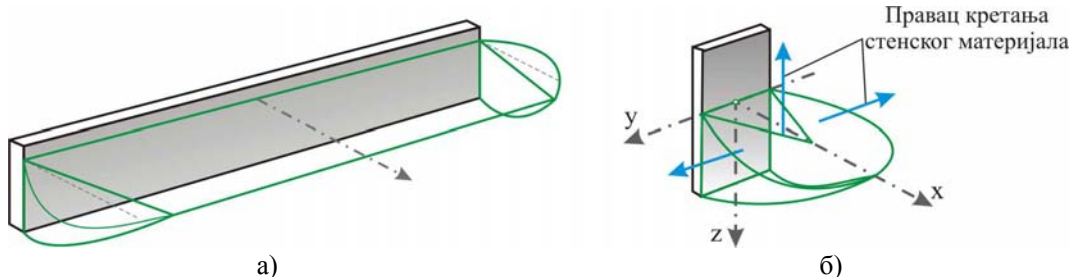
### 3.3.3 Тродимензионални аналитички модели резања

Анализа приказана у оквиру дводимензионалних модела резања апроксимативно је добра за резне елементе, који имају релативно широко сечиво у односу дубину резања. Већ у првим истраживањима [85] је установљено да, када резни елемент није много широк (што је случај са резним зубима), велики део разореног стенског материјала се креће са стране, у односу на вертикалну раван захвата која је дефинисана  $x$  и  $z$  правцем, као што је приказано на слици 3.16.а и б. Због тога, у овом случају потребно је померити више стенског материјала по јединици ширине резног елемента, па се претпоставља да је неопходна и већа погонска сила по јединици ширине него када се ради са бесконачно широким резним елементима. Због тога је потребно извршити корекцију постојећих дводимензионалних аналитичких модела, како би се у обзир узели и ови бочни услови.



Слика 3.16 а) Кретање материјала око резног елемента, б) Попречни пресек разореног стенског материјала који је био у интеракцији са резним елементом

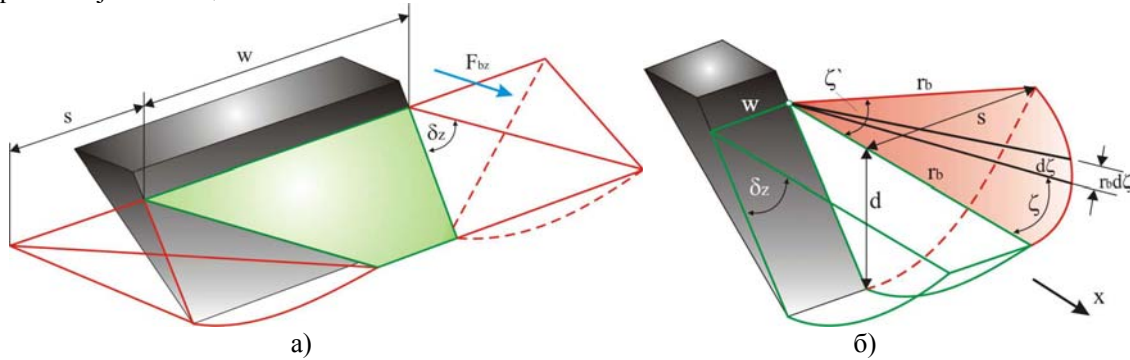
Обзиром на предходни закључак, неопходно је проширити разматрања везана за дводимензионалне случајеве резања и увести нове параметре, како би се адекватно описале силе резања у случају када се материјал креће у три правца. На слици 3.17 приказана је основна разлика у дефинисању дводимензионалних и тродимензионалних аналитичких модела резања. Код тродимензионалних проблема, који у обзир узимају све оно што је дефинисано за 2D моделе, пажња је усмерена на адекватно моделирање запремине захваћеног стенског материјала испред резног зуба. У наставку су приказани 3D модели резања, који на различити начин дефинишу ову запремину.



Слика 3.17 Модел кретања стенског материјала. а) Испред бесконачно широког резног елемента, б) Испред резног елемента мале ширине

Модел који је предложен у оквиру [82] приказан је на слици 3.18.а. Модел дефинише једну зону која је ширине као и резни елемент  $w$ , која се у основи креће напред и ка горе, и где се за одређивање потребне силе померања примењују изрази за дводимензионални случај резања. Са бочних страна оштрице резног елемента дефинисана је по једна зона пирамидалног облика ширине  $s$ . Анализом сила долази се до једначине за израчунавање резултантне силе. Резултантна сила је управна на површину сечива, и то је сила потребна да би се покренуо додатни стенски материјал.

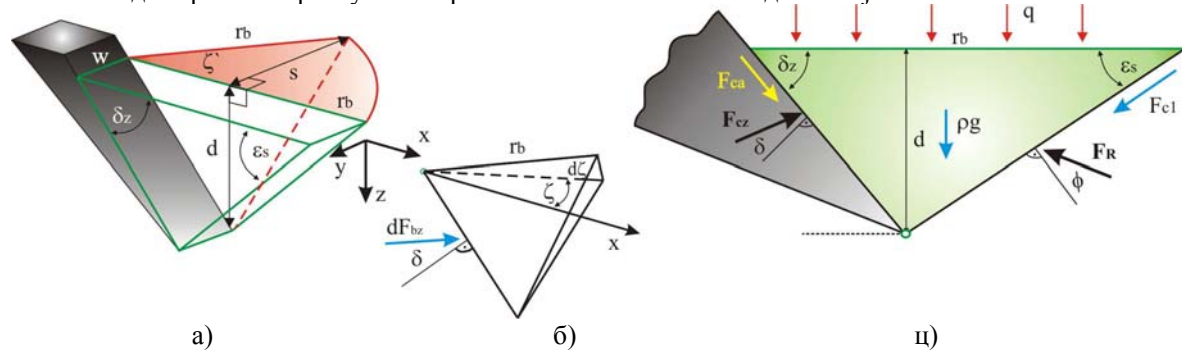
Други модел, који је дат у оквиру [86], [87], дефинише да је облик разарајуће површине са бочних страна резног елемента елиптичан, али веома близак кружном облику. Модел полази од претпоставке о кружном облику бочне зоне стенског материјала, а одговарајући механички модел приказан је на слици 3.18.б.



Слика 3.18 а) Тродимензионални модел за дефинисање силе резања према [82], б) Тродимензионални модел разарања према [87]

Истраживања која су накнадно изведена [89] ишла су у циљу развоја независног аналитичког модела за опис резања материјала стреластим резним елементом, без потребе за експерименталним вредностима о геометрији разарања материјала (слика 3.19.а). Претпостављен је клинасти облик зоне материјала испред резног елемента ширине  $w$ , укључујући и недефинисан угао разарања материјала  $\epsilon_s$ . Са сваке стране оштрице налази се кружни сегмент са полупречником  $r_b$ , и продужава се према споља до тачке супротне у односу на најнижи врх оштрице. Димензије  $r_b$  и  $s$  зависе од угла клина материјала  $\epsilon_s$ , који је функција нападног угла резног елемента и чврстоће стенског материјала. И у овом случају, као и у случају дводимензионалног модела, успостављају се адекватне функционалне зависности и израчунава критични угао  $\epsilon_{skr}$ .

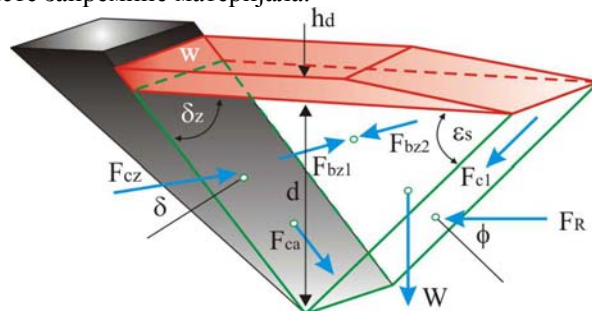
Да би се покренула централна зона стенског материјала на резни елемент је потребно довести силу  $F_{cz}$ , која је дата једначином (3.54), а изведена је за дводимензионални модел резања (слика 3.19.ц). За покретање елементарног дела бочних сегмента дефинисаних углом  $d\zeta$  потребно је довести силу  $dF_{bz}$ . За добијање укупне бочне силе врши се интеграљење по одговарајућој запремини (слика 3.19.б) Површина горње и бочних страна сваког сегмента су троугаоног облика и имају вредност пола дужине од њихове максималне ширине. Запремина сегмента је једна шестина од запремине правоугаоне призме истих максималних димензија.



Слика 3.19 Тродимензионални модел резања према [89]

Модел који је дефинисан у оквиру [90], [91] за разматрање ове проблематике укључује равну површину у материјалу која се протеже од врха резне оштрице до површине стенског материјала

под непознатим углом  $\varepsilon_s$ , као што је раније дефинисано. Уместо да се бочне стране дефинише у облику кружног одсечка, додаје се централна зона разарања ширине  $w$  и силе  $F_{bz1}$  и  $F_{bz2}$ , које делују на свакој од страна клинасте запремине захваћеног материјала. Силама се описује хоризонтални притисак (утицај остатка стенског материјала на посматрану површину) и смичуће силе супротне од правца кретања клинастог дела материјала. На слици 3.20 приказане су адхезивне и кохезионе силе отпора на оштрици и дну клинастог материјала, док је са  $W$  дата тежина захваћене клинасте запремине материјала.



Слика 3.20 Тродимензионални модел резања према [90], [91]

### 3.4 НУМЕРИЧКЕ МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ ПРОЦЕСА РАЗАРАЊА СТЕНСКОГ МАТЕРИЈАЛА

Комплексност решавања проблема у оквиру механике стенског материјала захтева примену и савремених нумеричких метода. Нумеричке методе могу обезбедити моћан алат за анализу проблема и синтезу решења са комплексним факторима, код којих није могуће (или је то јако тешко изводљиво) добити адекватне резултате применом само конвенционалних метода које су засноване на затвореној форми аналитичких решења. Ретко се јављају случајеви када се само аналитички или емпиријски приступ може употребити у решавању проблема механике стенског материјала, а да се добију решења која ће бити од практичног значаја. Комплексан број променљивих са недовољно јасним суштинским функционалним зависностима, нехомогена и нелинеарна природа проблема, указују на недостатке у емпиријским и аналитичким решењима. До апроксимативних решења се може доћи и применом симулација заснованих на некој од нумеричких метода [93].

У последње три деценије направљени су значајни помаци у решавању проблема механике стенског материјала применом рачунара. Нумеричке методе и рачунарске технике су постали алати за формирање концептуалних модела и математичких теорија на тај начин што су интегрисале информације из геологије, физике, техника конструисања и др., дајући адекватан опис граница и унутрашњих функција система. Суштина примене нумеричких метода за опис и решавање проблема интеракције је у одређивању напонског стања у стенском материјалу. Познавањем облика и начина разарања, може се израчунати спољашња сила која доводи до разарања.

Стенски материјал је дисконтинуалан, анизотропан и нехомоген. Овакве комплексне и неповољне геолошке особине, као и начин конституисања и историја формирања, чине стенски материјал веома неповољан са аспекта математичког описа у оквиру нумеричког моделирања. У складу са дефинисањем проблема, стенски материјал се може класификовати као: континуалан (а), дисконтинуалан (б) и привидно континуалан (ц). Тип (а) припада групи нетакнутог стенског материјала, (б) спада у групу везаног материјала, док (ц) спада у групу растреситог или предходно разореног материјала. Понашање материјала типа (а) може се анализирати моделима заснованим на механици континуума, док дисконтинуални модели могу бити коришћени за анализу стенског материјала типа (б) [94]. Дисконтинуални модели могу се користити и за стенски материјал типа (ц), применом одговарајућих сличности. Немогуће је истражити и дефинисати све варијације система међувеза које се могу јавити у материјалу типа (б) и (ц), па су напори усмерени на објашњење глобалног понашања ових материјала, које се у извесном смислу може сматрати да се понаша као континуално тело. Због тога, модели механике континуума се могу користити и за овакве типове, с тим што се на адекватан начин (применом техника хомогенизације) морају размотрити ефекти дисконтинуитета. Концепти континуума и дисконтинуитета нису апсолутни већ релативни. Избор између методе континуума и дискретне (дисконтинуитета) методе зависи од специфичности

проблема, а највише од опсега и геометрије дефеката (геометрије дисконтинуитета). Не постоји апсолутна предност једне методе у односу на другу, али одређени недостаци сваког од ова два приступа могуће је превазићи применом хибридних нумеричких модела (модели настали спајањем два и више нумеричких метода).

За анализу проблема разарања стенског материјала може се применити нека од следећих нумеричких метода:

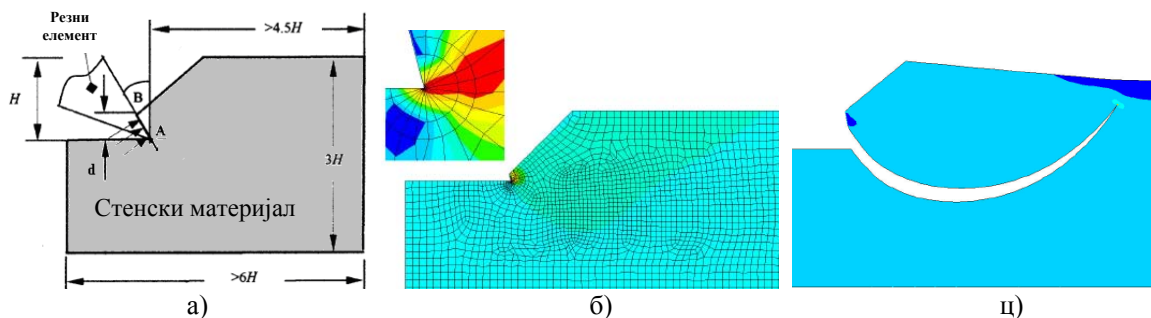
- Метод коначних елемената (*Finite Element Method – FEM*)
- Метод коначних разлика (*Finite Difference Method – FDM*)
- Метод граничних елемената (*Boundary Element Method – BEM*)
- Метод дисконтинуитета помераја (*Discontinuity Displacement Method – DDM*)
- Метод решеткастих модела (*Lattice Model – LM*)
- Метод дискретних мрежних прлина (*Discrete Fracture Network – DFN*)
- Метод дискретних елемената (*Discrete Element Method – DEM*)

Са становишта проблематике која се разматра у оквиру овог рада треба издвојити *FEM* и *DEM* методу, које су детаљније описани у наставку.

### 3.4.1 Метод коначних елемената

Метода коначних елемената је нумеричка метода која се може применити у разматрању проблематике добијања оптерећења резног зуба. Метода се заснива на физичкој дискретизацији континуума (у овом случају стенског материјала), деловима коначних димензија и једноставног облика (коначним елементима). Основу за разматрање представља коначни елемент за који се успостављају основне статичке, кинематичке, динамичке и друге везе. Потом се те везе проширују на цео домен, односно до границе континуума. Силе се преносе кроз континуум преко чворних тачака, па се проблем анализира у функцији скупа чворних сила и њихових помераја.

Компоненте релативног помераја у оквиру коначног елемента се добијају у зависности од помераја његових чворних тачака. Дефинисањем првог извода ових помераја, израчунава се релативна деформација коначног елемента. Вредност напона добија се повезивањем релативног помераја и крутости разматраног континуума. Укупна крутост добија се сабирањем појединачних крутости свих коначних елемената којима је дискретизован разматрани континуум. Овако добијена крутост повезује се са спољашњим оптерећењем (у овом случају то је сила на режном елементу) и укупним померајем континуума. На слици 3.21 приказан је пример разматрања проблема интеракције стенског материјала и резног елемента, применом методе коначних елемената.



Слика 3.21 МКЕ анализа процеса разарања, а) Геометријски модел, б) Иницијално разарање стенског материјала и ширење прсине, ц) Завршно разарање и одвајање комада стенског материјала [95]

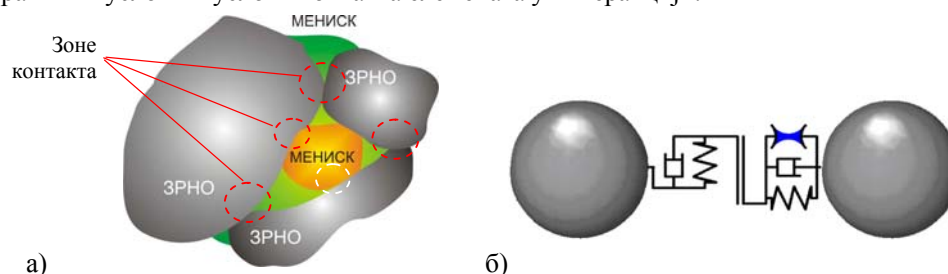
### 3.4.2 Метод дискретних елемената

Метод дискретних елемената је подручје са најбржим развојем у оквиру нумеричких метода, са могућностима примене у великом броју проблема механике стенског материјала. Ова



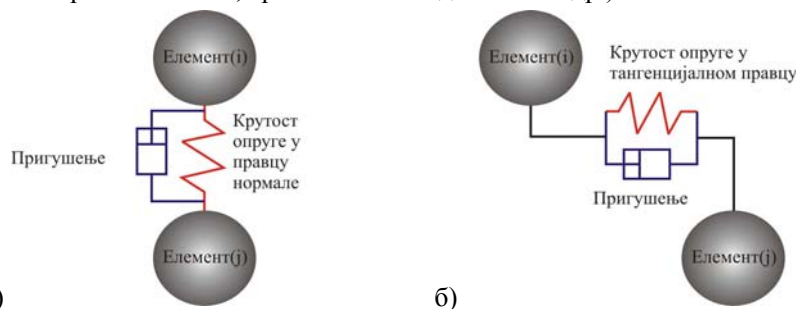
метода је релативно нова и влада мишљење да још увек није потврђена у пракси, као нумерички приступ за анализу и синтезу проблема у механици стенског материјала. Формулација и развој методе дискретних елемената има свој почетак у 1971. години, када је и први пут разматрана од стране *Cundall*-а [98]. Ова метода је у међувремену проширена за примену и у другим областима, и ако је развијена првенствено за примену у области механике стенског материјала. Метода је у почетку развијена за 2D описивање везаног стенског материјала, али је данас проширена и примењује се у истраживању тока расутих материјала [98], истраживању грануларних честица [94], анализи настанка и понашања пукотине у стенама и бетону [99].

Метод дискретних<sup>8</sup> елемената посматра домен као дисконтинуитет, уместо као континуитет (што је случај код методе коначних елемената). У овом случају стенски материјал (слика 3.22.а) се разматра као систем састављен од чврстих или деформабилних елемената (слика 3.22.б). Услед спољашњег контакта између два дискретна елемента у додиру долази до одговарајућег релативног помераја, који је пропорционалан сили између њих. Ови помераји се помоћу конститутивних модела идентификују и непрекидно израчунавају све до завршетка деформационог процеса, чиме се посредно израчунава и одговарајућа контактна сила. Једначине равнотеже се решавају све док су испуњени гранични услови и услови контакта елемената у интеракцији.



Слика 3.22 а) Структура стенског материјала са зонама контакта; б) Моделирање везе два суседна елемента применом методе дискретних елемената

Помоћу ове методе могуће је анализирати проблеме код којих се јавља истовремена интеракција више дискретних елемената. Могу се разматрати континуални и дисконтинуални проблеми, затим проблеми пукотина уз могућност анализе и великих помераја и ротације елемената. Динамичка једначина равнотеже се решава за сваки елемент посебно, и то у односу на силе које се јављају на границама елемената услед интеракције. Нема ограничење по питању места контакта једног и другог елемента, и чворне тачке могу имати интеракцију и са чворним тачкама другог елемента или са површином тог елемента. Силе које су настале у контакту између два елемента дефинишу се тако да задовоље различите услове контакта, што зависи до физичке природе симулације (нпр. интеракциони модел којим се описује веза у неком стенском материјалу може укључити кохезију, дилатацију, неравномерна оштећења, трење зависно од напона и др.).

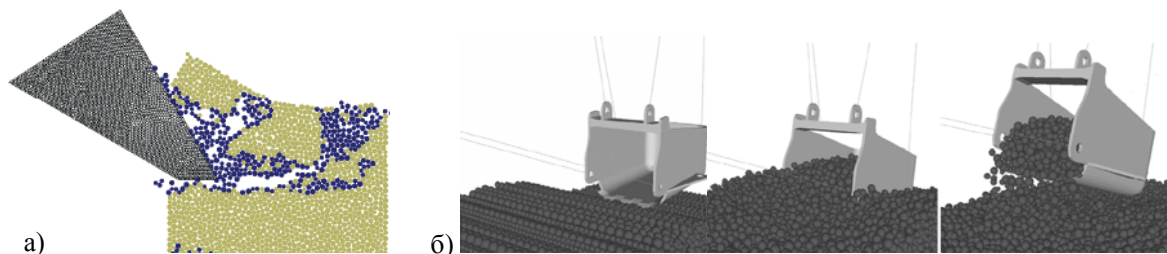


Слика 3.23 Механички модел за дефинисање интеракције два крута елемента у контакту, који је описан пригушењем и крутошћу у а) нормалном и б) тангенцијалном правцу

Теоријска основа ове методе заснива се на томе да се било који елементарни део, који се узима у разматрање, посматра као крути (или деформабилни) елемент, а понашање сваког елемента изражава кроз једначине кретања материјалне тачке. Између елемената који се налазе у тренутном

<sup>8</sup> Осим појма *Discrete*, користи се још енглески изрази као што су *Distinct*, *Particle* итд. Сви појмови се односе на исто значење: одвојен, раздвојен, јасан, посебан, изолован и др. [100]

контакту (слика 3.23) дефинише се веза по одговарајућем моделу, која служи за генерисање израза за израчунавање силе између њих. Контактне тачке у интеракцији два елемента се могу описивати теоријом еластичности, *Columb*-овим законом трења, једначинама међумолекуларних сила и другим законима, а све у циљу адекватног описа физичких појава на нивоу контакта два елемента. Појаве које се у том случају разматрају су еластичност, трење, кохезија, пригушење и др. Као последњи корак израчунава се једначина кретања сваког елемента, и интегралом добијених решења у времену анализира понашање сваког елемента посебно. На слици слици 3.24 су приказани примери решавања два различита проблема који се јављају код процеса копања, помоћу методе дискретних елемената.



Слика 3.24 а) Анализа процеса резања стенског материјала резним елементом [102],  
б) Анализа пуњења ведрине стенским материјалом [103]

### 3.5 КРИТИЧКА АНАЛИЗА ПРИСТУПА ЗА МОДЕЛИРАЊЕ ИНТЕРАКЦИЈЕ

*Емпиријски модели*, генерално, имају велике недостатке да би се применили у егзактном одређивању оптерећења потребних за конструисање резних елемената. Основни недостатак емпиријских модела је у томе што они немају могућност да симулирају широк дијапазон потреба, обзиром да постоји ограничена прилагодљивост модела. Такође, није дефинисано какве су природе силе које су укључене у модел. У изразима нема (или је веома оскудно) основних геотехничких параметара, као што су унутрашњи угао трења и кохезија. Употреба ове две величине је неопходна како би модел могао релативно једноставно да рефлектује карактеристике стенског материјала, које се могу добити лабораторијским мерењем узоркованог стенског материјала. Важно је истаћи и то да, пошто су модели засновани на експериментима, валидација модела зависи од тога колико су слични разматрани услови са условима који су били при извођењу експеримента.

Погодности употребе емпиријских израза леже у чињеници да се релативно лако може израчунати отпор резања, као и да имају задовољавајућу тачност израчунавања у ограниченим условима, као што су услови експеримента.

*Аналитички модели* превазилазе ограничења емпиријских израза, међутим могућност њихове употребе за решавање проблема оптерећења у процесу конструисања су такође ограничене из више разлога, од којих су два важна. Прво, модели нису у могућности да дају адекватан резултат отпора резања за различите облике резног елемента. То је зато што се заснивају на резном елементу који најчешће има облик клина са неограниченом ширином, што само делимично има сличности са стварним облицима резних елемената који се користе. Други важан недостатак ових израза лежи у чињеници да модели не узимају у обзир разарање стенског материјала које је настало услед других процеса. Већина аналитичких модела у обзир узима само механизам резања.

Предност аналитичких модела је у томе што јасно приказују и описују силе које се јављају у процесу ископавања, затим прецизно дефинишу зону разарања, а у разматрање могу да укључе и одговарајући положај стенског материјала у захвату. Наведени модели суштински не узимају у обзир механизме разарања стенског материјала, који укључују варијацију нападног угла, утицај влажности, густину земљишта и др.

Недостатак у примени *методе коначних елемената* односи се на решавање проблема пукотине и разарања, највише због ограничења у величини коначних елемената, могућности континуалне промене дискретизације услед пукотине, усклађености путање пукотине и ивица коначног елемента. Међутим, превазилажење ових ограничења могуће је применом функције дисконтинуитета облика, која се користи у симулирању настанка пукотине и њеног раста

применом теорије гранања. Метода коначних елемената је рачунарски посматрано веома скупа. Потребно је истовремено решавање великог броја једначина како би се добила одговарајућа решења. Ако је проблем нелинеаран, време израчунавање рапидно расте, зато што скуп симулационих једначина треба решити више пута.

Упркос наведеним недостацима, метод коначних елемената се доста користи због могућности генерализације и флексибилности у решавању хетерогености, нелинеарности и граничних услова стенског материјала, са веома добро развијеним комерцијалним софтверским решењима и њиховим релативно једноставним коришћењем. Метода коначних елемената је метода која може обезбедити корисне информације за решавање проблема површинске и подземне експлоатације. Могуће је изводити како статичке, тако и динамичке симулације у 2Д и 3Д домену. Једна од највећих предности коришћења методе коначних елемената је у могућности директног укључивања геолошких информација у анализу. Геометријска комплексност, правци различитих стенских карактеристика и различите литолошке целине повезане са површинском топологијом, зоне ломова, зоне укључака, предходна ископавање са нарушавањем континуума и др., су параметри које је могуће описати у једној анализи помоћу методе коначних елемената.

Због своје концептуалне привлачности у експлицитном представљању пукотине, *метода дискретних елемената* има широку примену у решавању проблема као што су: динамика стена, рударски радови и проблеми ископавања, ломови и пукотине стенског материјала, проблеми косина, лабораторијске тест симулације, консолидација стена, симулације резервоара, бризгање флуида, повезивање напона и течења, стабилност отвора и темеља, акустичне емисије у стенском материјалу, израчунавање карактеристика разореног стенског материјала и др. Обзиром да је метод дискретних елемената применљив на велики број проблема, флексибилан је и моћан алат за анализу дисконтинуалног стенског материјала, мада има недостатака у његовој примени као стандардног метода анализе.

Основни недостаци се односе на обезбеђивање свих потребних података о локацији која се анализира, као што су тачна оријентација и постојаност дисконтинуитета. Ту је такође непостојање довољно информација о понашању материјала у контакту, као и на који начин дефинисати пригушење система. Са друге стране, ова метода захтева значајно време за израчунавање чак и једноставних проблема. Ипак, метода дискретних елемената представља веома користан алат у анализи проблема деформације и разарања груписаног стенског материјала, обзиром да обезбеђује увид у сам механизам настанка и ширења пукотине.

Упркос великом напретку у разноврсности и комплексности описа проблема копања, генерално се није пуно одмакло у решењима. И данас пракса се, у процесу конструисања резних елемената за процесе копања, првенствено заснива на различитим емпиријским знањима. Међутим, за примену системског приступа у процесу конструисања треба наћи оптимално решење. Такво решење треба да буде између потребе да се процес израчунавања оптерећења поједностави и потребе да се узме у обзир што већи број параметара који имају утицај на вредност оптерећења. Такав приступ би се могао заснивати на примени једног једноставног аналитичког модела који би служио за добијање номиналног оптерећења, које би се затим кориговало одговарајућим коефицијентима добијеним емпиријским приступом. За проверу и оцену конструкционог решења резног зуба могао би се применити нумерички приступ, базиран на хибридној примени методе коначних елемената и методе дискретних елемената.





## 4. ДЕФИНИСАЊЕ МОДЕЛА ЗА ИЗРАЧУНАВАЊЕ ОПТЕРЕЋЕЊА РЕЗНОГ ЗУБА КОД БАГЕРА КОНТИНУАЛНОГ ДЕЈСТВА

Основни аналитички модели који су изведени у предходном поглављу представљају општа разматрања у оквиру статичког моделирања процеса интеракције стенског материјала и резних елемената. Такви општи модели су применљиви у различитим областима (нпр. копање, претовар, браздање, скреповање и др.) и њихова сврха је анализа и објашњење основних физичких процеса који се дешавају током интеракције. Општи модели се, у зависности од области примене, прилагођавају специфичним условима и потребама при израчунавања оптерећења.

Сагласно проблематици која се разматра у оквиру овог рада, потребно је дефинисати изразе за израчунавање оптерећења резног зуба који су на једноставан начин применљиви код багера континуалног дејства. Израчунавањем оптерећења за различите услове рада багера добијају се полазни подаци који се користе у прелиминарним прорачунима при конструисању резних зуба. Тако добијене вредности би се даљим развојем конструкције оптимизовале и анализирале применом рачунара. Због тога, да би се поједноставила проблематика дефинисања укупног оптерећења резног зуба са једне стране али у исто време обухватили основни утицајни параметри чврстоће стенског материјала, геометријски параметри резног зуба и параметри његовог кретања, даља анализа у овом раду усмерена је на усвајање једноставног механичког модела који је применљив код багера континуалног дејства.

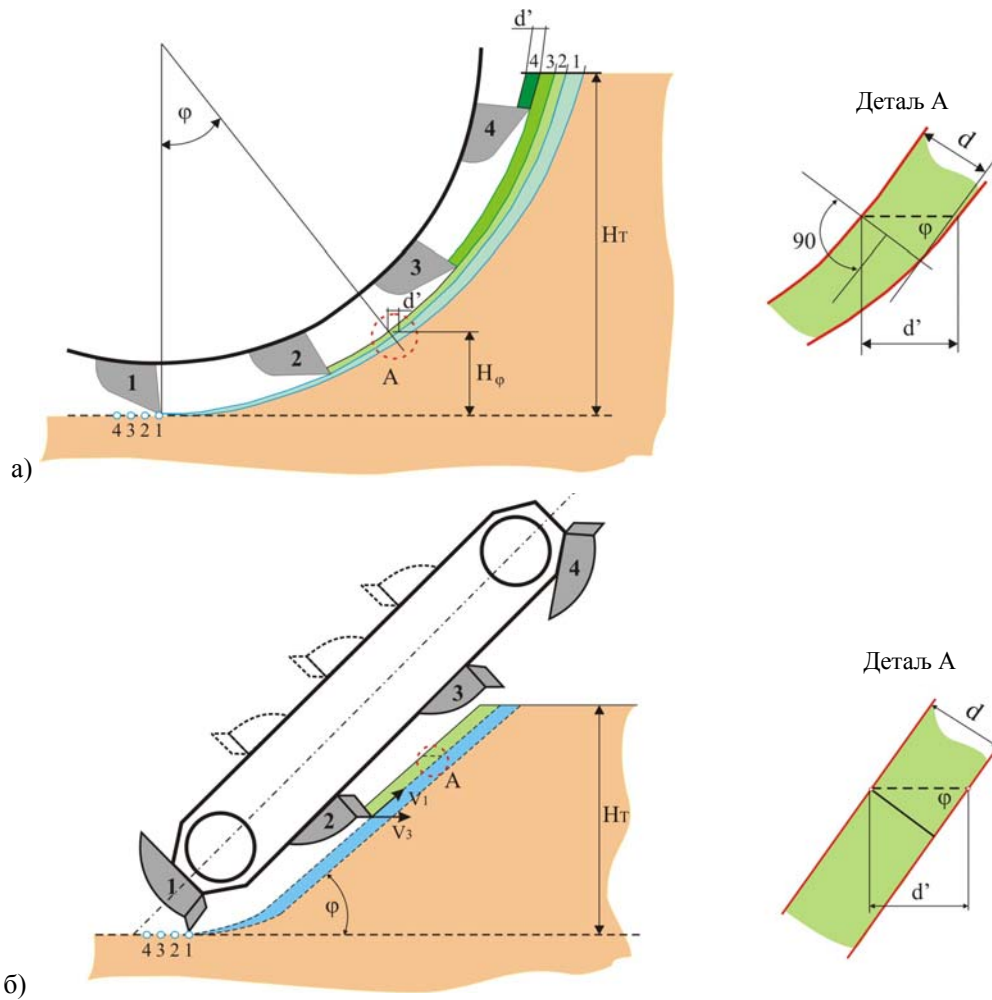
Са друге стране, применом поједностављеног механичког модела прави се груба апроксимација процеса копања, при чему се значајно одступа од обухватања свих утицаја који фигурирају у вредности укупног оптерећења, како је то дефинисано у предходном делу рада. Међутим, како је у овом раду већ више пута истакнуто, а у циљу тачнијег и свеобухватнијег описа процеса копања, користе се подаци добијени из аналитичких теорија, емпиријских метода и практичних мерења. Упркос великом напретку у разноврсности и комплексности описа проблема копања, генерално се није пуно одмакло у решењима. И данас, пракса у конструисању багера и резних елемената за процесе копања, првенствено се заснива на различитим емпиријским знањима. Из тог разлога, аутор сматра да за примену системског приступа у процесу конструисања резних зуба, модели који су приказани у наставку претстављају оптимално решење између потребе да се процес израчунавања оптерећења поједностави и потребе да се у почетном разматрању ипак обухвати што већи број параметара који имају утицај на вредност оптерећења.

### 4.1 ФОРМИРАЊЕ СТРУГОТИНЕ

Када се врши ископавање материјала симултано се одвија више различитих процеса, као што су продирање и резање резног елемента у стенски материјал, разарање и одношење стенског материјала из захваћене зоне, пуњење ведрице багера и др. Као резултат ових процеса образује се струготина веома различитог облика и димензија. Због карактеристичне интеракције резних елемената и стенског материјала, процес стварања струготине може се дефинисати као просторно одређен и временски зависан. Највећи утицај на овај процес имају:

- Карактеристике стенског материјала (чврстоћа, конзистентност)
- Конструкција резних елемената (ведрица, нож, резни зуби)
- Режим рада багера (дубина копања, брзина, захват)
- Техничке карактеристике и тип багера

На слици 4.1 приказани су модели којима се дефинише основни принцип рада роторног багера и багера ведричара и одговарајуће израчунавање укупне дубине резања  $d$ .

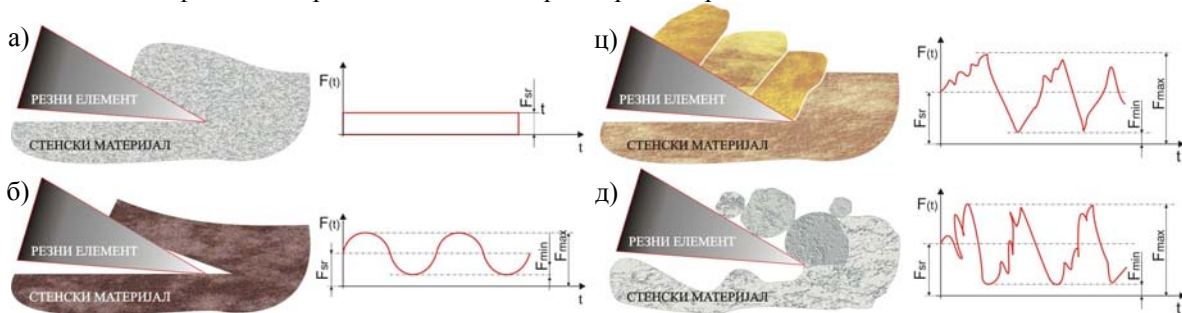


Слика 4.1 Модел копања код багера континуалног дејства [53], а) Роторни багер, б) Багер ведричар

Сагласно предмету истраживања у оквиру овог рада разматра се комбиновани процес разарања и захватања материјала, али само у делу у коме такви процеси утичу на укупно оптерећење резног зуба. Резни зуб пластично деформише слој материјала који му стоји на путу, до границе отпорности на разарање, тако да у том слоју настаје пукотина. На тај начин, са горње стране резног зуба се формира комад стенске масе који пуни ведрницу, а испод резног зуба настаје нова горња површина. Одсечени комад стенске масе, дејством резног зуба (и ножа кашике), гура се не само по његовој грудној површини већ и по смицајној површини материјала која је настала услед разарања. При даљем кретању, сечиво резног зуба опет сабија масу стенског материјала испред себе, па се следећег тренутка појављује нова смицајна површина, односно ови поступци се периодично понављају.

Струготина се формира када дође до разарања унутрашњих веза стенског материјала. Физичка позадина процеса са одговарајућим описом помоћу Mohr-ових кругова напона, ближе је објашњена у оквиру поглавља 2. и поглавља 3, где су дефинисани услови генерисања напона и границе по којој настаје разарање ископаног материјала на овај начин. Код стенских материјала сличних карактеристика, јављају се слични облици струготине. На слици 4.2 приказани су основни типови облика струготине, и одговарајућа промена оптерећења на резном елементу који врши разарање. Континуална струготина (слика 4.2.а, б) нема јасну линију смицања, али има континуалну зону деформисања. Код струготине у облику сегмената (слика 4.2.ц) уочава се периодично појављивање смичућих линија или површина. Код стенских материјала, чија се струготина разбија и формира од ситних комада материјала (слика 4.2.д), уочен је пораст силе резања који се скоро поклапа са правцем кретања резног елемента. Дубље продирање резног елемента доводи до извијања струготине и њено секундарно разарање, које је нормално на правац кретања алата. На тај начин,

стругодина се формира од мање-више повезаних индивидуалних блокова. Отпор копања, посматрано у времену, је јако променљива величина, па су емпиријске и аналитичке једначине изведене за дефинисање проблема копања заправо средње вредности величина.



Слика 4.2 Принципи формирања стругодине и генерисање одговарајућих отпора, за различите стенске материјале

## 4.2 АНАЛИЗА СИЛА ЗА СЛУЧАЈ РАВАНСКОГ СТАТИЧКОГ МОДЕЛА ОПТЕРЕЋЕЊА ВЕДРИЦЕ СА РЕЗНИМ ЗУБИМА

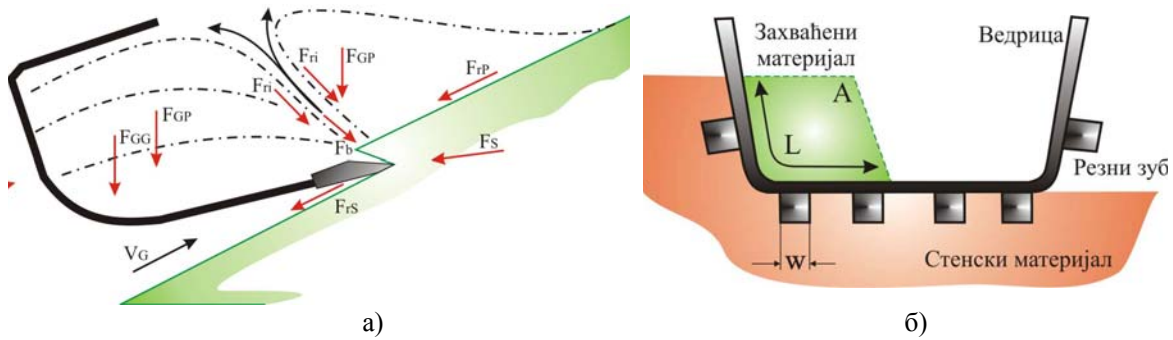
Сваки процес који се јавља током ископавања троши одређени део енергије. Поред примарних процеса разарања и захватања, енергија се расипа и на нежељене процесе као што су трење, инерцијалне силе од гурања и превртања стенског материјала и др. Силе које настају током процеса копања су (слика 4.3.а):

- Укупна сила која представља збир силе резања и силе продирања ( $F_S$ )
- Силе трења између резних елемената и ископаног материјала ( $F_{rs}$ )
- Унутрашње силе трења у материјалу, које се јављају услед његовог кретања и померања ( $F_{ri}, F_{rp}$ )
- Сопствена тежина нагомиланог материјала и материјала који формира чеону призму и тежина ведрице са припадајућим резним елементима ( $F_{GG}, F_{GP}$ )
- Инерцијалне силе

Ове компоненте све заједно одређују укупно оптерећење ведрице и радног органа багера, а део њих утичу на оптерећење резног елемента у захвату. Услед велике комплексности процеса копања, а обзиром да се његови просторни и временски ефекти не могу адекватно снимити нити мерити, врши се апроксимација процеса помоћу одговарајућих модела. У том смислу врши се превођење у одговарајући равански модел, одакле се даље разматрају силе и укупно оптерећење.

Када се говори о процесу копања багерима континуалног дејства, говори се о једностраном резању стенског материјала. У овом случају, резање врши хоризонтални део и бочна страна ножа са припадајућим бројем и распоредом резних зуба (слика 4.3.б). Осим овог случаја постоји и случај ограниченог резања, али се он не јавља код разматраних типова багера. Код багера ведричара и роторних багера ширина отцепљеног комада је битно мања од ширине ведрице. Ако се посматра ведрица која је опремљена резним зубима, дата на слици 4.3.б, може се закључити да у захвату она изводи полублокирани рез, док се резни зуби налазе у блокираном реду. Када се анализира оптерећење резних елемената значајно је уочити ову чињеницу, обзиром да потребна сила резања расте са степеном блокираности реза (Поглавље 3.).

Као што је показано у предходном поглављу, теоријско израчунавање отпора при копању је врло комплексно, обзиром да овај отпор зависи од више фактора који су међусобно повезани, а чије везе нису најјасније дефинисане. Пошто су процеси који се јављају при копању веома комплексни, то доводи до веома сложених и недовољно јасних теоријских објашњења, па битну улогу код израчунавања отпора копања имају емпиријске једначине изведене из експериманата. Међутим, ни овде не важе генерални закони сличности, па се емпиријске једначине ограничавају само на оне случајеве које приближно одговарају измереним вредностима. Сложене међузависности утицајних параметара воде ка томе да се и код експерименталних мерења врше поједностављења, па се у обзир узимају само најважнији фактори, односно они фактори који имају највећи утицај на разматрани проблем.



Слика 4.3 Равански модел захватања стенског материјала, а) Силе током процеса захватања, б) Чеони поглед у случају када се нож ведрице налази у полублокираном, а резни зуби у блокираном захвату

Обзиром да је разматрање у овом раду усмерено на дефинисање једноставног и применљивог начина за одређивање оптерећења резних зуба за потребе њиховог конструисања, проблем се решава применом механичке анализе. На тај начин, кроз анализу појединачних сила, узимају се у обзир различити чиниоци процеса копања (нпр. тежине, кохезија, трење и др.). Да би се добило оптерећење резног зуба у захвату, у наставку рада извршена је анализа:

1. Проблема укупног оптерећења ведрице која се креће хоризонтално и праволинијски
2. Проблема адекватног описа процеса механичког разарања стенског материјала и оптерећења на врху похабаног резног зуба
3. Основног механичког модела, који обухвата предходна два проблема

На слици 4.4, приказан је модел за решавање једноставног раванског модела оптерећења ведрице која је опремљена резним зубима. Модел полази од претпоставке да се ведрица креће хоризонтално и праволинијски. Осим тога, усвојено је да ведрица добија погон нпр., преко вучног ланца ведрице, што би одговарало конструкцији и технологији рада багера дреглајна. Када се не одвија процес, нормална компонента отпора копања, односно сила продирања  $F_P$  једнака је сопственој тежини ведрице са захваћеним стенским материјалом  $Q_{uk}$ , при чему је сила  $F_z$  једнака нули (вучни ланац је олабављен јер нема силе). Посматрањем проблема преко модела вучне ведрице у старту се може одредити сила продирања, обзиром да се код других типова багера, као што је случај код багера ведричара и роторног багера, она не може јасно дефинисати пошто је регулише радник на багеру. Из познате сопствене тежине ведрице  $Q_{ved}$  израчунавају се све остале силе.

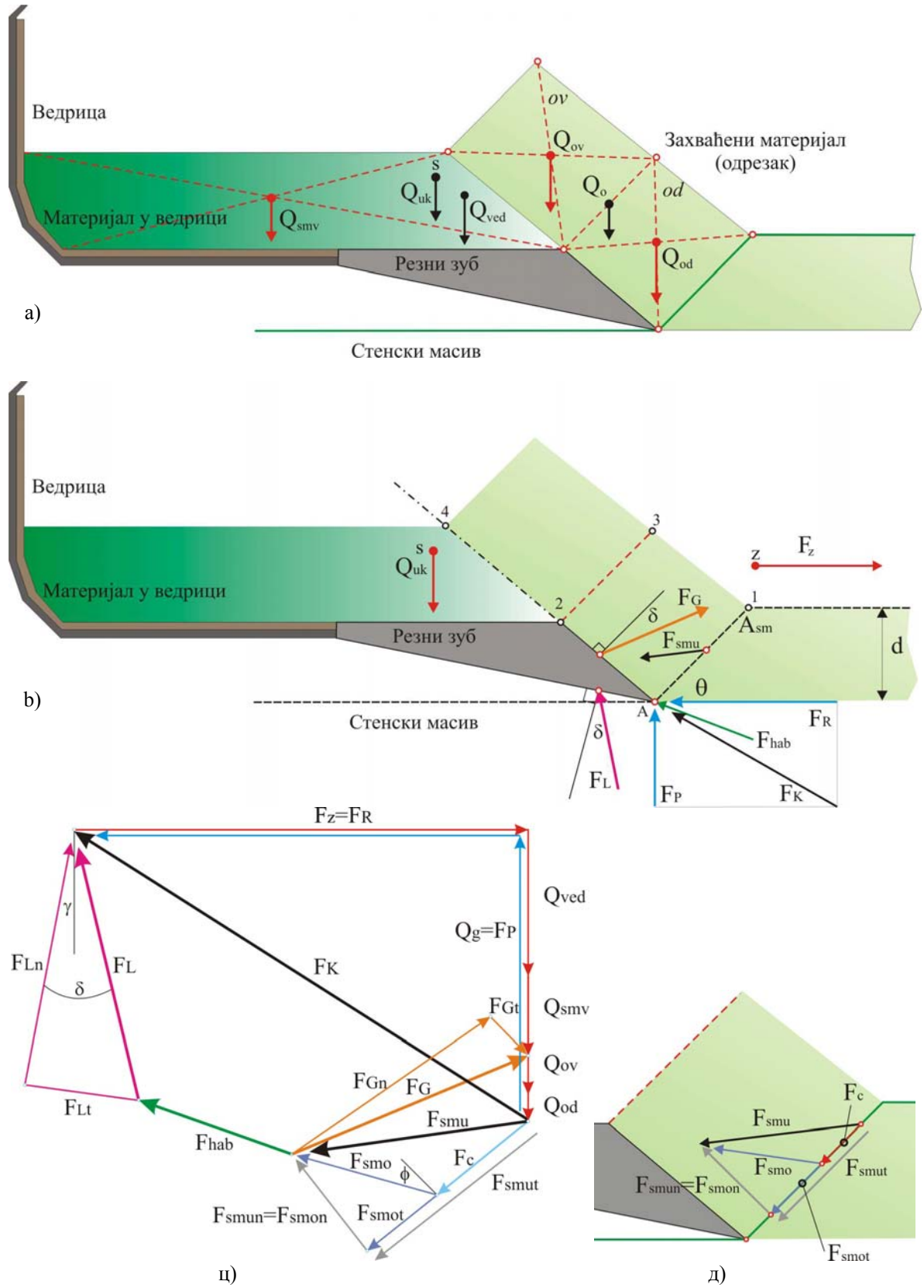
Анализа сила које потичу од тежина одговарајућих елемената приказана је на слици 4.4.а. У циљу једноставнијег решавања проблема извршено је раздвајање на: тежину ведрице са резним елементима, тежину стенског материјала који се већ налази у ведрици и тежину одреска захваћеног материјала. Тежина одреска захваћеног материјала подељена је на два дела, један који се одвојио од масива и улази у ведрицу и други код кога тек настаје одвајање. Раздвајање на овај начин је извршено због анализе сила трења које се јављају током кретања одреска. На слици се може уочити да се горњи одрезак дат ознаком ( $ov$ ) креће преко стенског материјала који се већ налази у ведрици, па је трење дефинисано са углом унутрашњег трења  $\phi$ , док се део одреска дат ознаком ( $od$ ) креће преко грудне површине резног зуба, па се трење у овом случају описује преко угла спољашњег трења  $\delta$ .

Укупна тежина ведрице са захваћеним стенским материјалом може се изразити на следећи начин:

$$\bar{Q}_{uk} = \bar{Q}_{sm} + \bar{Q}_{ved} + \bar{Q}_o \quad (4.1)$$

$$\bar{Q}_o = \bar{Q}_{ov} + \bar{Q}_{od}$$

Укупна тежина одреска  $Q_o$ , преноси се преко следећих површина: преко смицајне површине  $A_{sm}$  (А-1), преко грудне површине резног елемента (А-2) и преко горње површине пуњења ведрице (2-4), тј. преко површине које образује стенски материјал који се налази у ведрици, а може се апроксимирати као наставак грудне површине резног зуба, као што је приказано на слици 4.4. Дужина ове површине зависи од степена испуњености ведрице.



Слика 4.4 Анализа сила код раванског механичког модела оптерећења, а) Силе које потићу од сопствених тежина, б) Механички модел оптерећења склопа ведрице и резног зуба (без хабања) [54], в) Полигон сила изведен из механичког модела, д) Силе које делују на површини смицања

Код спољашњих сила, сила  $Q_{uk}$  стоји у равнотежи са погонском силом  $F_z$  и са резултујућим отпором копања  $F_K$ . Хоризонтална (тангенцијална) компонента силе копања, односно сила резања  $F_R$ , једнака је сили која је потребна за покретање ведрице  $F_z$ . Разарање, односно смицање стенског материјала, генерише се дејством тангенцијалне компоненте укупне силе на смичућој површини  $F_{smut}$ , као што је приказано на слици 4.4.д. На тај начин дефинисани су следећи изрази:

$$\begin{aligned}\vec{F}_{smu} &= \vec{F}_{smut} + \vec{F}_{smun} \\ \vec{F}_{smo} &= \vec{F}_{smot} + \vec{F}_{smon} \\ \vec{F}_{smun} &= \vec{F}_{smon} \\ F_{smut} &= A_{sm} \cdot \tau = A_{sm} \cdot (c + \sigma \cdot Tg\phi) = A_{sm} \cdot c + \mu \cdot \sigma \cdot Tg\phi = F_c + Tg\phi \cdot F_{smon} = F_c + F_{smot}\end{aligned}\quad (4.2)$$

Како кохезија није константно својство стенског материјала, мора се узети као променљива вредност. Због тога, уместо разматрања кохезије у анализу сила, уводи се кохезиона сила  $F_c$ . Кохезиона сила може да се посматра као отпор који се јавља приликом одвајања одреска по површини (линији) смицања. Према томе, резултујућа сила смицајне површине  $F_{smu}$  претставља збир кохезионе силе (на посматраној површини) и силе унутрашњег трења некохезионог дела стенског материјала, која са нормалом ове површине заклапа угао унутрашњег трења  $\phi$ . Анализа сила на овај начин има предност за једноставно решавање проблема, пошто позната резултанта сопствене тежине одреска као активна сила и кохезиона сила као пасивна сила могу да се разложи на силе које делују на граничној површини безкохезионог отцепљеног комада (А-1). Силе на овој површини даље зависе само од одговарајућих углова трења.

Сила трења која се генерише на горњој површини пуњења ведрице (2-4) израчунава се помоћу угла унутрашњег трења на исти начин као што је дефинисано на површини смицања, али без кохезионе силе, пошто одрезак није слепљен са стенским материјалом који се већ налази у ведрици. Сопствена тежина одреска израчунава се на основу дебљине одреска и фактора растреситости стенског материјала. Због различитих карактеристика контактних површина потребно је одредити две компоненте тежине одреска  $Q_o$ :  $Q_{od}$  – компонента која се преноси преко грудне површине резног зуба (А-2) и површине смицања (А-1) и  $Q_{ov}$  – компонента, која се преноси преко горње површине пуњења ведрице (2-4) и површине (2-3). Пошто је сила услед убрзања масе одреска занемарљиво мала, као активне силе узимају се у обзир сопствена тежина одреска и сила на грудној површини резног зуба и сила на горњој површини пуњења. Резултујућа сила  $F_{smu}$  на смичућој површини претставља пасивну силу. Из полигона сила сада је могуће израчунати силе на одговарајућим равнима. Сила ослањања на горњој површини пуњења добија се из нормалне компоненте сопственог терета  $Q_{ov}$ , узимајући у обзир и угао унутрашњег трења  $\phi$ . У њеној почетној тачки је крајња тачка силе ослањања на грудној површини резног зуба. Правац дејства дат је преко угла спољашњег трења  $\delta$ . Сагласно анализи сила датој на слици 4.4.ц, могу се дефинисати следећи изрази:

$$\vec{F}_K = \vec{F}_R + \vec{F}_P = \vec{F}_z + \vec{Q}_{uk}\quad (4.3)$$

$$\vec{F}_K = \vec{F}_{smu} + \vec{F}_{hab} + \vec{F}_L\quad (4.4)$$

$$\vec{F}_L = \vec{F}_{Ln} + \vec{F}_{Lt}\quad (4.5)$$

$$\vec{F}_G = \vec{F}_{Gn} + \vec{F}_{Gt} = \vec{F}_{smu} + \vec{Q}_o\quad (4.6)$$

Са  $F_{hab}$  је означена сила која узима у обзир повећање укупног оптерећења услед хабања резног дела зуба. Ова сила анализирана је у наставку рада, при чему је тежиште анализе на процесима који се одвијају на самом врху сечива.

### 4.3 АНАЛИЗА ДОМИНАНТНИХ ПРОЦЕСА НА НИВОУ РЕЗНОГ ЗУБА

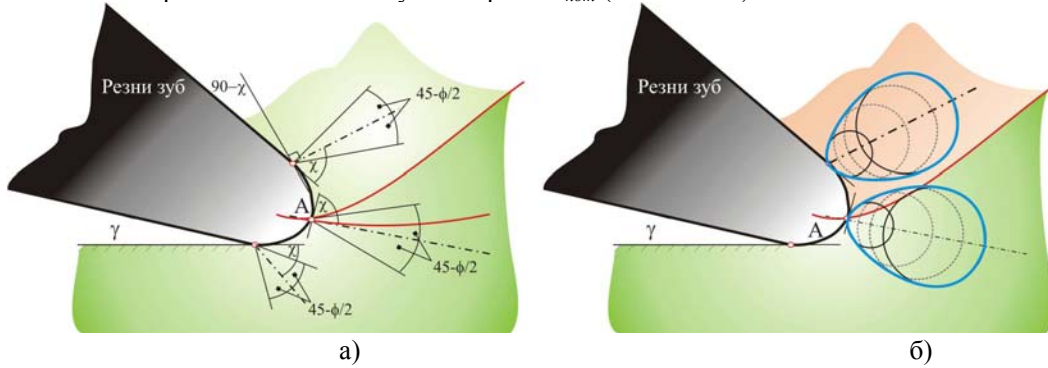
Током процеса копања, стенски материјал мирује, а креће се ведрица. За разматрање проблема оптерећења, а у циљу једноставнијег дефинисања, усваја се кретање стенског материјала и непокретна ведрица (резни зуб). На тај начин, стенски материјал се креће према фиксираном резном зубу, све до зауставне тачке А на врху клина (слика 4.5.а). У тој тачки делује највећи притисак  $n_{max}$ ,







Угао смицања игра веома важну улогу у разматрању оптерећења током процеса копања. Обзиром да је (Поглавље 2.) усвојен *Mohr-Coulomb*-ов критеријум разарања, неопходно је дефинисање угла смицања у простору напона. Како су напрезања на притисак, која потичу од сопствене тежине одреска, мала у односу на напрезања која потичу од кохезије стенског материјала, то се напон у стенском материјалу на грудној површини резног зуба може приказати *Mohr*-ових круговима напона за сваку тачку на грудној површини појединачно. Приближавањем врху резног зуба може се уочити најмањи *Mohr*-ов круг који тангира  $\tau$  осу (слика 4.6.а). Грудна површина по којој се одрезак креће дефинисана је тачком О на *Mohr*-овом кругу напона, одговарајућим углом спољашњег трења  $\delta$  и помоћним углом трења  $\delta_{nom}$  (слика 4.6.б).



Слика 4.7 а) Правци пружања главних напона за карактеристичне тачке на површини резног зуба, б) Поларни дијаграм притисака

Да би се дефинисао правац оптерећења, потребно је одредити угао  $\chi$  који заклапају правац максималног главног напона  $\sigma_{max}$  у стенском материјалу и одговарајућа површина резног зуба, као што је приказано на слици 4.7.а. Раван нормална на површину резног зуба заклапа угао  $90^\circ - \chi$ , са правцем главног напона. У *Mohr*-овом кругу одговарајући централни углови су два пута већи, као што је приказано на слици 4.6.б. Ако се уместо спољашњег угла трења  $\delta$  уведе помоћни угао трења  $\delta_{nom}$  и за радијус *Mohr*-овог круга дефинише израз  $r = m \cdot \sin \phi$ , онда се из троугла *EFO* са слике 4.6.б, а према [105] добија:

$$Tg \delta_{pom} = \frac{\sin \delta_{pom}}{\cos \delta_{pom}}$$

$$Tg \delta_{pom} = \frac{\tau_w}{c \cdot \cos \phi + \sigma_w} \quad (4.8)$$

$$\tau_w = r \cdot \sin 2(90^\circ - \chi) \quad (4.9)$$

$$Tg \delta_{pom} = \frac{r \cdot \sin 2(90^\circ - \chi)}{m + r \cdot \cos 2(90^\circ - \chi)} = \frac{m \cdot \sin \phi \cdot \sin 2(90^\circ - \chi)}{m(1 + \sin \phi \cdot \cos 2(90^\circ - \chi))} = \frac{\sin \phi \cdot \sin 2(90^\circ - \chi)}{1 + \sin \phi \cdot \cos 2(90^\circ - \chi)}$$

$$\frac{\sin \delta_{pom}}{\cos \delta_{pom}} = \frac{\sin \phi \cdot \sin 2(90^\circ - \chi)}{1 + \sin \phi \cdot \cos 2(90^\circ - \chi)} \quad (4.10)$$

Из последње једначине следи:

$$\sin 2(90^\circ - \chi) \cdot \cos \delta_{pom} - \cos 2(90^\circ - \chi) \cdot \sin \delta_{pom} = \frac{\sin \delta_{pom}}{\sin \phi}$$

Даљим сређивањем, добија се:

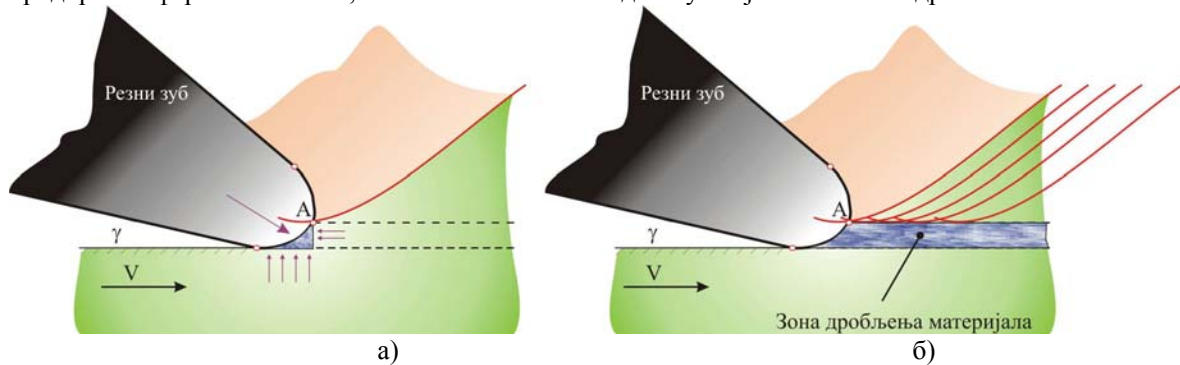
$$\sin [2(90^\circ - \chi) - \delta_{pom}] = \frac{\sin \delta_{pom}}{\sin \phi}$$

$$\chi = 90^\circ - \frac{1}{2} \left[ \delta_{pom} + \arcsin \left( \frac{\sin \delta_{pom}}{\sin \phi} \right) \right] \quad (4.11)$$

<sup>9</sup> Индекс w указује да се ради о грудној површини резног елемента

Помоћни угао трења  $\delta_{\text{ном}}$  изводи се из угла спољашњег трења  $\delta$ , постављањем одговарајућих геометријских релација. На горњем делу лука заобљења (од тачке  $B$  до тачке  $A$ ) врха резног зуба, угао  $\chi$  остаје константан све до зауставне тачке  $A$ . У зауставној тачки, као што је већ приказано, стенски материјал се грана на два тока. Пошто у зауставној тачки нема кретања, не може да делује никакво трење. Због тога се правац главног напона поклапа са правцем нормале у тачки  $A$  заобљења. Обе клизне линије са правцем максималног главног напонем заклапају угао  $\pm(45^\circ - \phi/2)$ . Пошто у зауставној тачки  $A$  нема кретања материјала, у њој влада и највећи отпор, односно максимални притисак стенског материјала. Због тога се горња клизна линија претвара у смицајну линију. Пошто ова смицајна линија у односу на правац кретања заклапа угао  $\theta$ , онда почетак смицајне линије мора да буде конкавно закривљен. Због једноставности, а без утицаја на тачност добијених резултата, ово закривљење се занемарује у анализи сила.

На слици 4.7.б за две тачке заобљења сечива приказани су поларни дијаграми конструисани из *Mohr*-ових кругова пасивних притисака земљишта. На слици 4.8, приказан је модел који разматра раздвајање стенског материјала у зауставној тачки  $A$ . Стенски материјал изнад зауставне тачке има простор да „тече”, па се преко равни смицања и грудне површине одводи из зоне разарања. Материјал испод зауставне тачке (лук од  $A$  до  $C$ ) нема простор где да оде, јер је ограничен са свих страна (слика 4.8.а). Сагласно закључцима изведеним у поглављу 2., код посматрања проблема продирања сферног елемента, може се констатовати да ће у овој зони настати дробљење.



Слика 4.8 а) Иницијално дробљење материјала као последица ограниченог простора испред зоне резања, б) Зона дробљења стенског материјала током процеса резања

Предходна анализа показује да је, при дефинисању механичког модела, оправдано увођење апроксимације по којој се комплетно оптерећење резног зуба може приказати помоћу две концентрисане силе, при чему, једна делује на грудној, а друга на леђној површини. На слици 4.9.а, приказан је модел којим се дефинишу напрезања и зоне разарања стенског материјала, током захвата похабаним резним зубом.

Да би се у анализи оптерећења обухватио и утицај похабаности, механички модел са слике 4.4 (посматрајући само резни зуб) се прошируј додавањем изводнице на леђној површини, којом се описује зона хабања. Изводница са хоризонталом (правцем кретања) заклапа угао  $\delta_i$ , који се дефинише као угао хабања, што је приказано на слици 4.9.б.

Силе  $F_G$  и  $F_L$  представљају резултантне силе на грудној, односно леђној површини. Свака од ових сила се може пројектовати на два међусобно управна правца. Према слици 4.9.б, дефинишу се следећи изрази:

$$\vec{F}_G = \vec{F}_{TG} + \vec{F}_{NG} = \vec{F}_{Gn} + \vec{F}_{Gt} \quad (4.12)$$

$$\vec{F}_L = \vec{F}_{TL} + \vec{F}_{NL} = \vec{F}_{Ln} + \vec{F}_{Lt}$$

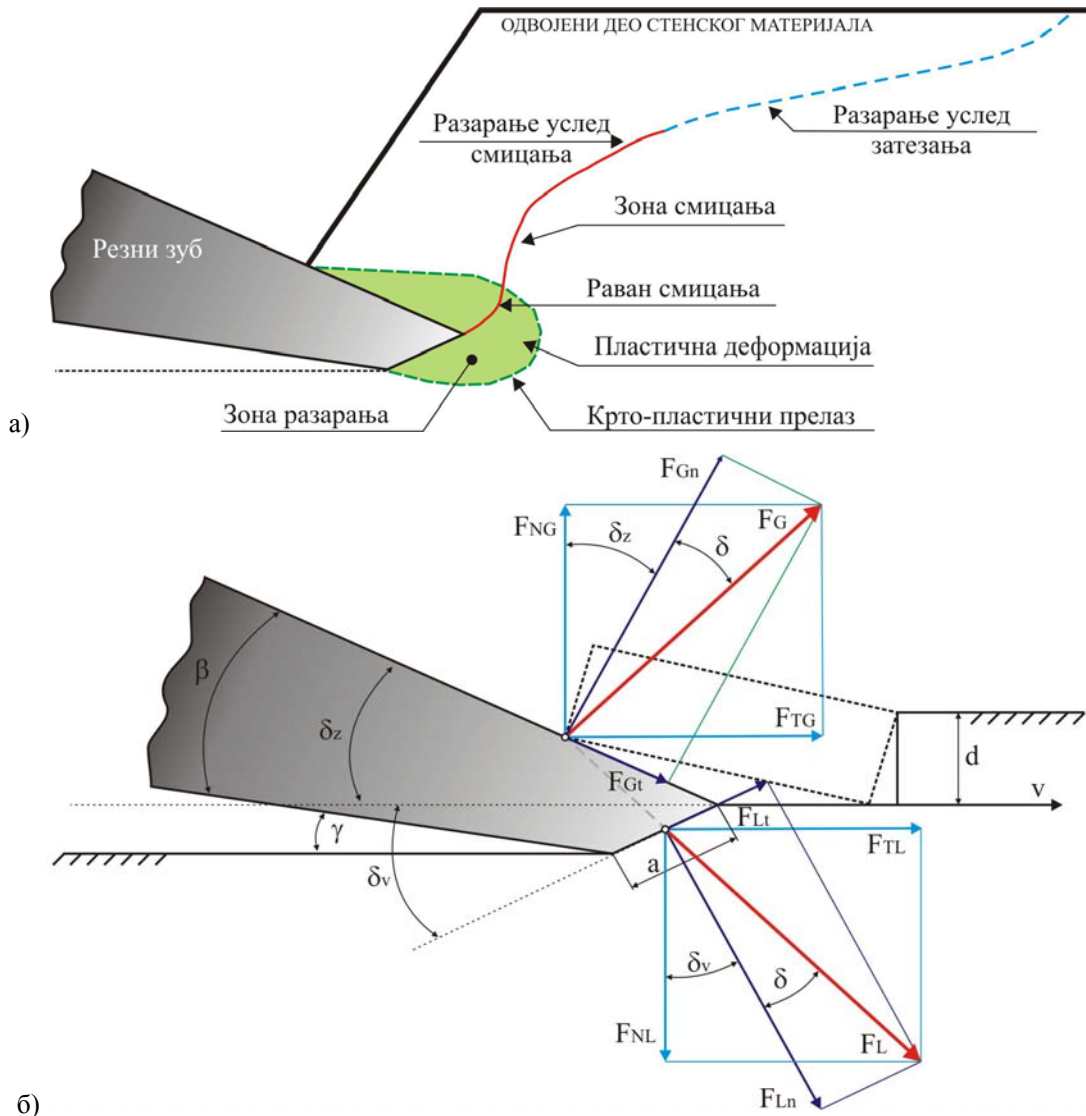
Повезивањем компоненти сила са грудне и леђне површине, долази се до закључка да се тангенцијалне компоненте силе  $F_{TL}$  и  $F_{TG}$  у тангенцијалном правцу (правац кретања резног зуба) поклапају, док су нормалне компоненте силе  $F_{NL}$  и  $F_{NG}$  супротног смера.

То значи да се резултантне силе за одговарајући правац добијају као збир или као разлика компоненти сила:

$$F_R = F_T = F_{TG} + F_{TL} \quad (4.13)$$

$$F_P = F_N = F_{NG} - F_{NL}$$

Да би се предходни механички модел могао применити и ставити у функцију процеса конструисања резних зуба, потребно је израчунати компонентне силе.



Слика 4.9 а) Модел разарања стенског материјала, б) Механички модел оптерећења похабаног резног зуба

Обзиром да проблематика прецизног дефинисања ових сила није још увек решена, то се у циљу добијања оптерећења према приказаном механичком моделу могу применити две апроксимативна приступа. То су:

1. Израчунавање оптерећења резног зуба применом специфичне силе резања
2. Израчунавање оптерећења резног зуба на бази примене поједностављеног механичког модела резања

#### 4.4 ИЗРАЧУНАВАЊЕ ОПТЕРЕЋЕЊА РЕЗНОГ ЗУБА ПРИМЕНОМ СПЕЦИФИЧНЕ СИЛЕ РЕЗАЊА

Изрази који се користе за израчунавање силе копања или унутрашњих сила које прате овај процес, а које су приказане у оквиру поглавља 3., имају узак опсег деловања и обично се односе на одређену групу стенског материјала, облик резног елемента и параметре копања који су, као што је раније објашњено, увек идеализовани. Карактеристике стенског материјала су предмет

значајних просторних и временских варијација, па багер није намењена само једном тачно утврђеном материјалу већ служи за рад са једном одређеном групом стенских материјала. На тај начин, на пример багер континуалног дејства са одговарајућим технолошким параметрима и карактеристичним резним елементима, подешава се за рад у различитим окружењима стенског материјала. Истраживања која се данас спроводе иду ка томе да се добију генерално употребљиви коефицијенти који на свеобухватнији начин изражавају карактеристике стенског материјала. На тај начин би било обезбеђено једноставно израчунавање вредности силе која би се користила у процесу конструисања (димензионисања) багера континуалног дејства у целини или његових компоненти, па и резних зуба. Општи израз за израчунавање силе на овај начин може се дефинисати као:

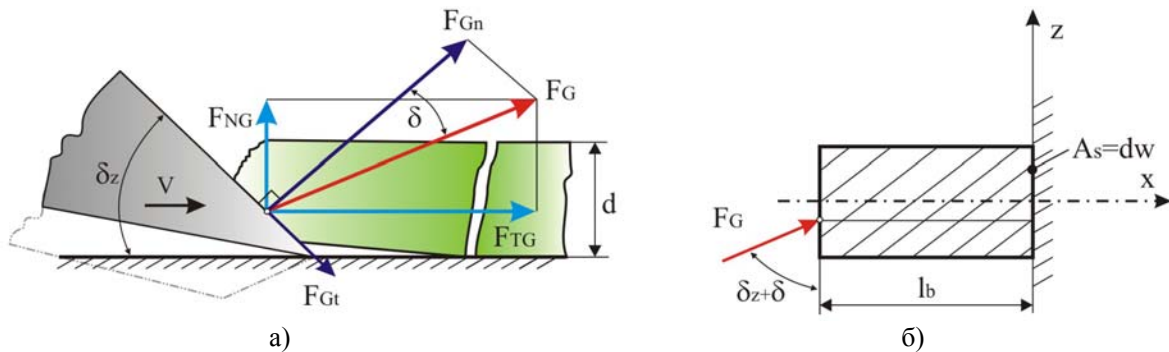
$$k_i = \frac{F}{B_i} \quad (4.14)$$

Носилац функције  $B_i$  може бити попречни пресек или дужина. На тај начин, специфична сила  $k_i$  обухвата све унутрашње силе које се јављају током процеса копања и представља аритметичку средину максимално измерених вредности. Мерење и дефинисање специфичних сила зависи од контекста у коме се применљују.

Модел оптерећења приказан на слици 4.9.б, у циљу адекватније анализе може се раздвојити на два парцијална модела, и то на модел који ће узети у обзир оптерећење које долази преко грудне површине, и други који ће обухватити оптерећење са леђне површине резног зуба. На тај начин могу се посматрати два одвојена случаја:

1. Оптерећење које делује на грудној површини код потпуно оштрог резног зуба - моделирање силе на грудној површини (слика 4.10)
2. Промена оптерећења настала услед хабања резног зуба (промена геометрије) – моделирање силе на леђној површини (слика 4.11)

Обзиром да се процес иницијалног разарања стенског материјала (поготову код кртих и чврстих материјала) може описати као процес који се одликује малом почетном деформацијом, то се уноси као полазна претпоставка у анализу механичког модела. На тај начин, захваћени део стенског материјала се апроксимира конзолом која је на слободном крају оптерећена одговарајућом концентрисаном силом (слика 4.10.б). Дужина конзоле је дефинисана са  $l_b$ , што је заправо растојање од тренутне тачке додира стенског материјала и грудне површине зуба, и тачке почетка линије смицања материјала. Ако се проблем посматра са становишта чврстоће материјала, може се констатовати да постоји однос између силе разарања и напонске карактеристике материјала (нпр. напон смицања, напон савијања и др.). Са друге стране, сила разарања зависи и од попречног пресека (у овом случају попречног пресека одреска  $A_s$ ).



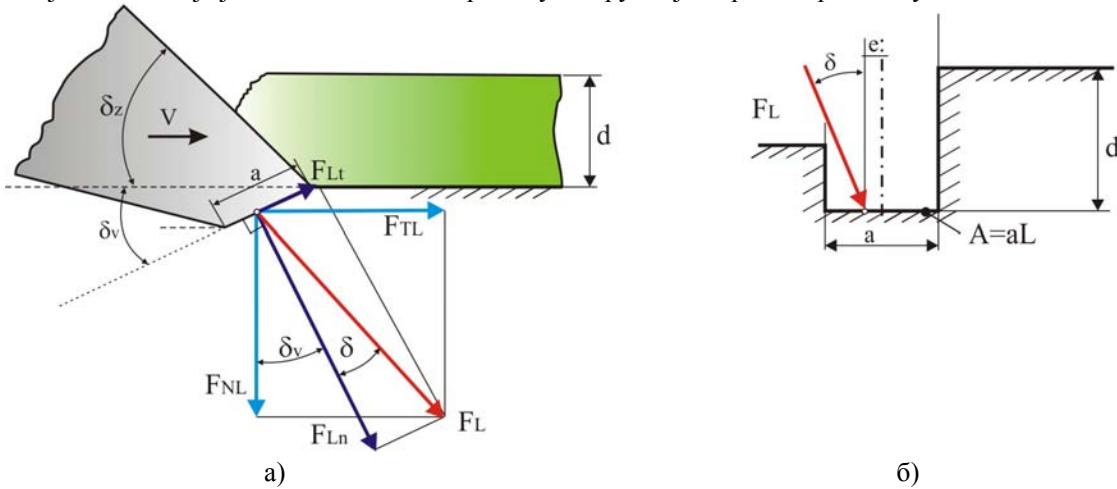
Слика 4.10 а) Разарање стенског материјала оштрим резним зубом, б) Механички модел

На основу предходног, може се дефинисати следећи израз:

$$F_G = k_{AR} \cdot A_s \quad (4.15)$$

Фактор пропорционалности  $k_{AR}$  представља специфичну силу резања. Овде се поставља питање на који начин специфична сила резања директно зависи од карактеристика стенског материјала и нападног угла резања  $\delta_z$ . Обзиром да је захваћени део стенског материјала са свих страна ограничен масивом, онда се спољашње оптерећење може апроксимирати силом која се поставља у

угао, дијагонално у односу на укљештење (слика 4.10.б). На тај начин, само супротног смера, добија се сила која је еквивалентна оптерећењу на грудној површини резног зуба.



Слика 4.11 а) Моделирање ефекта који настаје услед хабања резног зуба, б) Механички модел

Због карактеристичног стања у коме се налази материјал испод похабаног дела резног зуба (дробљење), класична теорија разарања у овом подручју није применљива. Због тога модел који је примењен за дефинисање оптерећења на грудној површини у овом случају није погодан, обзиром да у овој зони владају потпуно другачији услови, односно услови великог притиска. Сила у овом случају је пропорционална генерисаном притиску и величини налегајуће површине. Како је површина хабања дефинисана константном ширином похабане зоне (може се усвојити да је  $a=cons.$ ), онда је сила пропорционална дужини контакта  $L$  који се оствари између резног елемента и стенског материјала (слика 4.11.б).

Сагласно предходном, може се дефинисати следећи израз:

$$F_L = k_{LV} \cdot L \quad (4.16)$$

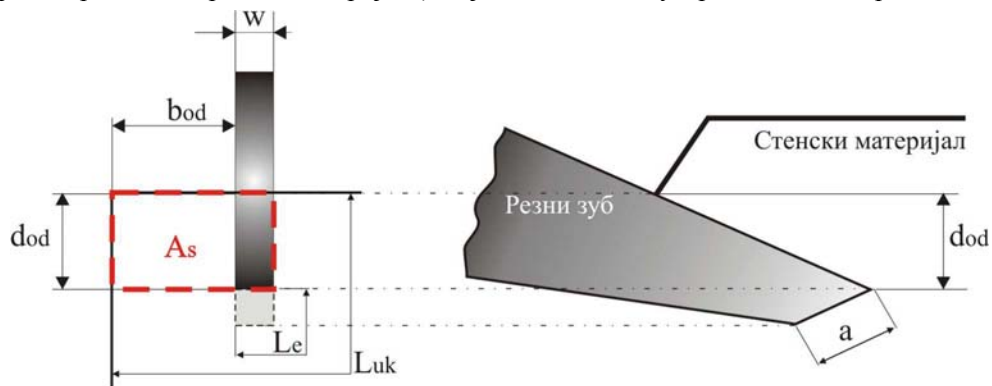
Фактор пропорционалности  $k_{LV}$  назива се специфична сила хабања. Специфична сила хабања зависи од карактеристика стенског материјала и вредности угла хабања  $\delta_v$ .

За разлику од дефинисања укупне силе копања за багере у целини, где се као носилац функције  $B_i$  усваја или попречни пресек одреска или укупна дужина резања по ведрици, код дефинисања оптерећења само једног резног зуба има више приступа, који су међусобно слични. У наставку су приказане две методологије.

Литературом [105], а у сагласности са сликом 4.12, сила резања дефинисана изразом (4.13) изражава се у следећем облику:

$$F_R = F_T = F_{TG} + F_{TL} = k_{AR} \cdot A_s + k_{LV} \cdot L_e \quad (4.17)$$

Проширење предходног израза иде у смеру да се специфична сила изрази у функцији од једне доминантне карактеристике стенског материјала (на пример, често се дефинишу изрази у функцији од притисне чврстоће материјала), која се лако може узорковати и измерити на терену.

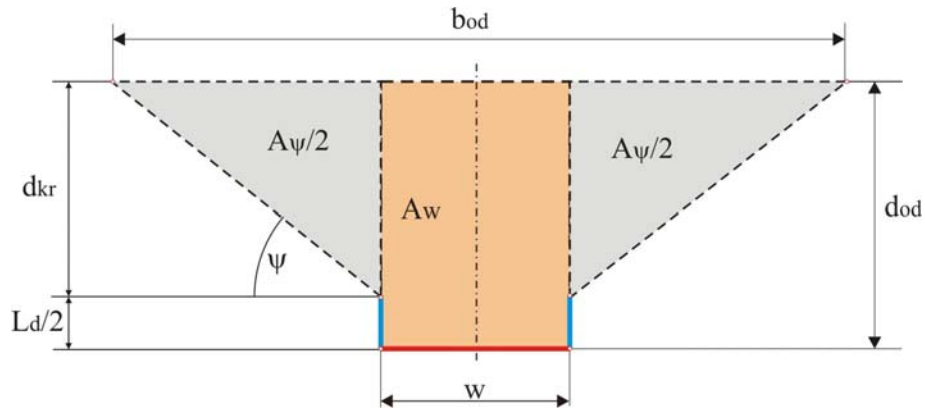


Слика 4.12 Основне геометријске величине за дефинисање оптерећења на бази специфичне силе резања



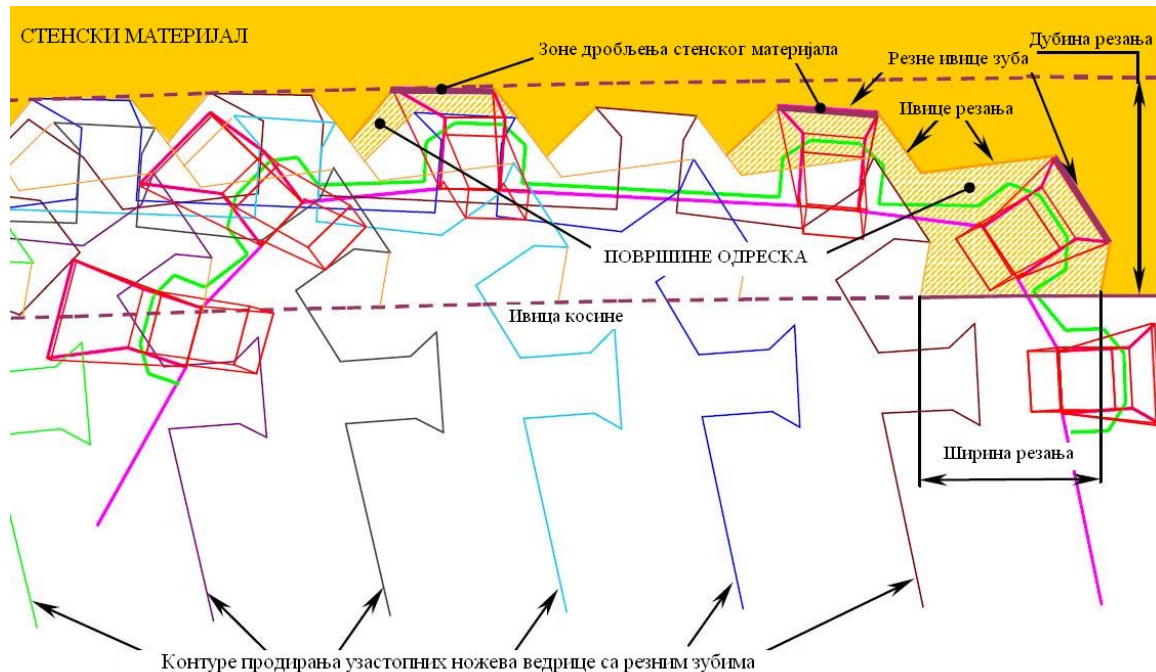
И ако се предходним изразом, на релативно једноставан начин, може израчунати вредност силе резања уколико је позната специфична сила, намеће се питање решавања проблема блокираног реза који изводи резни зуб (слика 4.3.б). То значи да он захвата и додатни стенски материјал који по својој ширини превазилази ширину зуба. Дефинисање модела за израчунавање силе, узимајући у обзир предходну чињеницу, дато је у оквиру приказа 3D модела резања у поглављу 3. Показано је да је оптерећење по јединици ширине резног зуба значајно веће од оптерећења по јединици ширине бесконачно широке оштрице. Да би се узео у обзир и утицај блокираног реза на силу резања, и да би се она израчунала користећи приступ на бази специфичне силе, у оквиру [106, 107] сила резања  $F_R$  се може написати као збир четири компоненте:

$$F_R = F_{Aw} + F_{A\psi} + F_{Ld} + F_{Lw} = k_{Aw} \cdot A_w + k_{A\psi} \cdot A_\psi + k_{Ld} \cdot L_d + k_{Lw} \cdot w \quad (4.18)$$

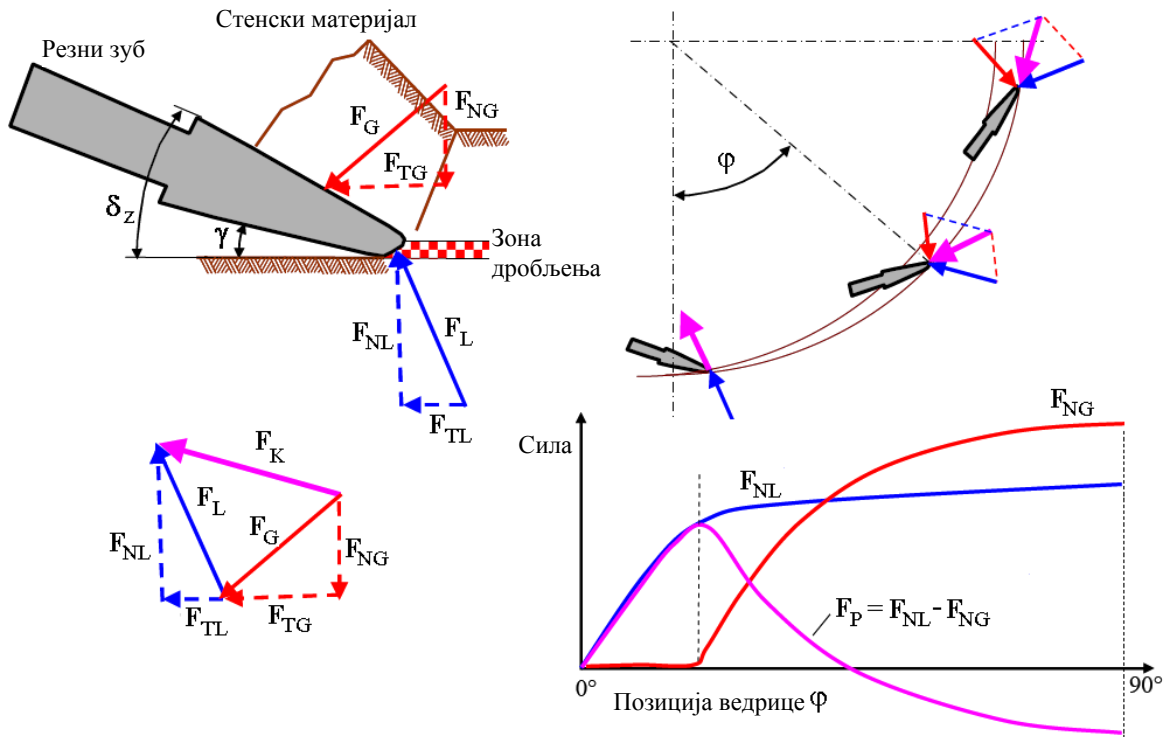


Слика 4.13 Захваћена површина стенског материјала са бочном блокираном секцијом [107]

Коефицијенти  $k_{Aw}$ ,  $k_{A\psi}$ ,  $k_{Ld}$ ,  $k_{Lw}$  представљају специфичне параметре одговарајућих компоненти сила резања. Ако се погледа предходни израз, може се закључити да је укупна сила изведена као збир појединачних компоненти сила. Постоје четири такве силе, при чему две ( $F_{Aw}$  и  $F_{A\psi}$ ) узимају у обзир захваћену површину, а друге две ( $F_{Ld}$  и  $F_{Lw}$ ) узимају у обзир одговарајуће дужине, као што је приказано на слици 4.13. Специфичне силе које фигуришу у изразу, такође се мере и дефинишу сагласно проблему који описују.



Слика 4.14 Графичко одређивање попречног пресека захваћеног стенског материјала појединачним режним зубима при заокретању катарке радног точка роторног багера на десно [108]



Слика 4.15 Одређивање оптерећења резног зуба код роторног багера, применом приступа на бази специфичне силе [109]

Предходни изрази (4.17) и (4.18) на релативно једноставан начин омогућавају израчунавање силе резања, међутим намећу се два питања. Прво питање везано је за могућност и тачност мерења парцијалних специфичних сила. Пошто се дефинисање специфичних сила мора реализовати кроз лабораторијска или експлоатациона мерења, то овакав приступ са собом носи све предности и недостатке једног емпиријског приступа.

Други проблем везан је за дефинисање носилаца функције, односно исправно израчунавање одговарајућих попречних пресека и дужина резања. Литературом [108, 109, 110] дефинисана је методологија која овај проблем решава на бази графичког приступа, применом рачунара (слика 4.14). У оквиру ових истраживања дато је решење проблема код роторних багера, чиме се поступак дефинисања спољашњег оптерећења резног зуба прилично поједностављује. Наиме, након графичког одређивања захваћеног попречног пресека и дужине хабања, применом одговарајућих специфичних сила у складу са карактеристикама стенског материјала, одређује се и оптерећење резног зуба. Силе које се на тај начин дефинишу приказане су на слици 4.15.

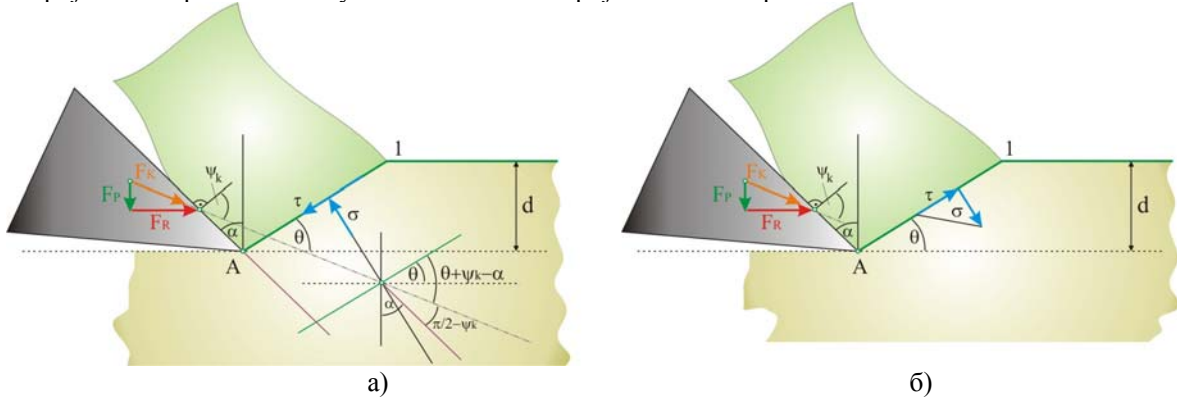
#### 4.5 ИЗРАЧУНАВАЊЕ ОПТЕРЕЋЕЊА РЕЗНОГ ЗУБА НА БАЗИ ПОЈЕДНОСТАВЉЕНОГ МЕХАНИЧКОГ МОДЕЛА РЕЗАЊА

Увођење поједностављених механичких модела, као крајњи циљ дефинише оптерећење резног зуба у два међусобно управна правца. Израчунавање израза за  $F_R$  и  $F_P$  (4.13) врши се директно, без декомпоновања и дефинисања појединачних сила. Овакав приступ има за последицу већу апроксимацију, али са друге стране обезбеђује једноставан начин израчунавања оптерећења у функцији од најугачајних параметара резања (нпр. нападни угао, угао клина, чврстоћа стенског материјала и др.). У наставку су приказана три једноставна механичка модела резања. Основа сваког модела је разматрање доминантног напрезања које доводи до разарања.

Поједностављени механички модел за израчунавање оптерећења први пут је примењен за анализу процеса резања еласто-пластичних метала [111], па је касније модификован и примењен у разматрању процеса резања стенског материјала. *Merchant*-ов модел заснива се на претпоставци да до разарања долази услед смицања, и дефинише се на основу *Mohr-Coulomb*-овог критеријума лома (слика 4.16.а). Експериментално је доказано да се процес разарања стенског материјала



дешава и онда када су присутни само напони смицања. То се често дешава код малих нападних углова резних зуба, тако да се теорија резања метала могла применити и на разматрање стенских материјала. Општи закључак је да процес настајања пукотине, услед затезања или смицања, зависи директно од тога која од две чврстоће има пресудан утицај: затезна или смицајна. *Merchant* је увео и претпоставку да се линија смицања дефинише од врха резног зуба ка слободној површини резања. Међутим, овај модел се може користити само у случају када се пластично течење (деформација) материјала поклапа са овом линијом. У том случају усваја се да је угао унутрашњег трења стенског материјала  $\phi$  веома мали или једнак нули. Експерименти су доказали да се ова теорија може применити на угаљ и стенске материјале на бази кречњака.



Слика 4.16 Поједностављени механички модели резања, а) *Merchant*-ов модел, б) *Nishimatsu*-ов модел

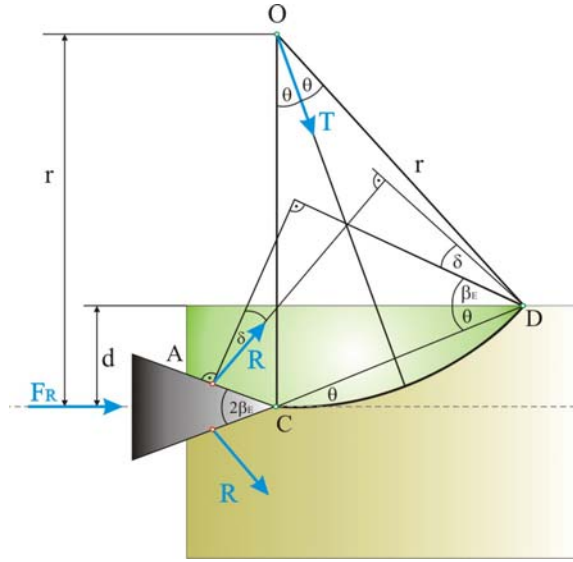
Модел оптерећења дат у оквиру [112] указује да се највећи напони у стенском материјалу генеришу око врха резног елемента. *Nishimatsu*-ов модел (слика 4.16.б) је дефинисао да до разарања стенског материјала долази услед дејства напона затезања и напона притиска. Правац резултантног напона је дуж линије (A-1), и опада идући од A ка 1. Интеграцијом напона дуж линије (A-1) добија се равнотежно стање са резултантном силом резања  $F_R$ . Пукотина у материјалу се, као и код *Merchant*-овог модела, генерише услед тангенцијалног напона између врха резног зуба и налегле слободне површине стенског материјала. Пукотина настаје када максимални напон у стенском материјалу достигне граничну вредност према *Mohr-Coulomb*-овом критеријуму, с тим што је нормални напон који делује дуж линије смицања (A-1) напон притиска. На тај начин, *Nishimatsu*-ов модел укључује претпоставку да се стенски материјал одликује кртим разарањем, без било какве предходне пластичне деформације (не постоји жилава зона разарања), а да разарање одговара линеарној *Mohr*-овој анVELOПИ.

Разматрања која су извршена у оквиру [113] дефинисала су први модел резања који је примењен у опису процеса ископавања угља и сличних стенских материјала. Овим истраживањем теоријски је прву пут показано да затезна и притисна чврстоћа стенског материјала представљају доминантне карактеристике у прорачунима оптерећења при разарању стенског материјала резним елементом у облику клина. Накнадна експериментална истраживања [114, 115] су потврдила да се ова теорија може применити и код кртих стенских материјала, као што су кречњак и песак. *Evans*-ов теоријски модел до данас је додатно усавршен и експериментално потврђен. Побољшања овог модела углавном су ишла у смеру решавања одређених партикуларних проблема [116, 117, 118], али је основна филозофија и приступ остао исти. Због своје једноставности и широког опсега примене код различитих стенских материјала, овај модел је у наставку рада детаљно анализиран.

Током продирања резног елемента (путања зуба је постављена нормално у односу на материјал), а услед генерисаног напона у стенском материјалу, ствара се пукотина која се простире радијално од врха резног елемента до слободне површине материјала (слика 4.17). Теорија се заснива на следећим претпоставкама:

- Сила  $R$  делује под углом  $\delta$  (угао спољашњег трења) у односу на нормалу површине AC резног елемента
- Резултантна сила затезања стенског материјала  $T$  делује на симетрици угла  $2\theta$  луку CD
- Дубина продирања резног елемента у тренутку разматрања је веома мала у односу на дубину резања  $d$ .

- Ширина резног елемента је много већа од дубине ( $w \gg d$ ), односно може се применити модел димензионалне теорије резања
- Важи закон раванског напона



Слика 4.17 Evans-ова теорија разарања услед напона затезања

Резни зуб тежи да раздвоји стенски материјал и истовремено ротира око тачке  $D$ . Због тога је претпостављено да сила  $C$  делује кроз тачку  $D$ . Дуж линије разарања  $CD$  важе претпоставке закона раванског напона, односно, једнакост сила разматра се по јединици ширине резног зуба.

Функција силе и затезне чврстоће стенског материјала, може се дефинисати следећим изразом:

$$T = \sigma_z \cdot r \cdot \int_{-\theta}^{\theta} \cos \omega d\omega = 2 \cdot \sigma_z \cdot r \cdot \sin \theta \quad (4.19)$$

Члан  $r d\omega$  је елементарни део лука  $CD$ . Овај елементарни део лука, са симетралом угла заклапа угао  $\omega$ . Дубина продирања врха резног елемента у стенски материјал у тренутку разматрања може се занемарити у односу на дубину резања. То значи да ће нападна тачка силе  $R$  бити око тачке  $C$ . Постављајући моментну једначину за тачку  $D$ , добија се:

$$\sum M_D = 0$$

$$R \frac{d}{\sin \theta} \cdot \cos(\theta + \beta_E + \delta) = T \cdot r \cdot \sin \theta$$

Сагласно геометријској релацији  $r \cdot \sin \theta = \frac{d}{2 \sin \theta}$ , даље следи:

$$R = \frac{\sigma_z \cdot d}{2 \sin \theta \cdot \cos(\theta + \beta_E + \delta)} \quad (4.20)$$

Хоризонтална компонента силе  $R$  је  $R \cdot \sin(\beta_E + \delta)$ , па је, обзиром на симетричност, укупна сила резања која оптерећује резни зуб:

$$F_R = 2 \cdot R \cdot \sin(\beta_E + \delta) = \sigma_z \cdot d \cdot \frac{\sin(\beta_E + \delta)}{\sin \theta \cdot \cos(\theta + \beta_E + \delta)} \quad (4.21)$$

Сила нормална на правац силе резања, односно сила продирања, добија се из израза:

$$F_P = R \cdot \cos(\beta_E + \delta) = \sigma_z \cdot d \cdot \frac{\cos(\beta_E + \delta)}{2 \cdot \sin \theta \cdot \cos(\theta + \beta_E + \delta)} \quad (4.22)$$

Угао смицања  $\theta$  одређује уз услов да је  $F_R$  минимално, односно:

$$\frac{dF_R}{d\theta} = 0$$

$$\frac{\sigma_z \cdot d \cdot \sin(\beta_E + \delta)}{\sin \theta \cdot \cos(\theta + \beta_E + \delta) \cdot d \theta} = 0$$

$$\cos \theta \cdot \cos(\theta + \beta_E + \delta) - \sin \theta \cdot \sin(\theta + \beta_E + \delta) = 0$$

$$\cos(2\theta + \beta_E + \delta) = 0$$

Одакле се добија вредност угла смицања као:

$$\theta = \frac{\pi}{4} - (\beta_E + \delta) \quad (4.23)$$

Сада се може написати:

$$\sin \theta \cdot \cos(\theta + \beta_E + \delta) = \sin\left(\frac{1}{2}\left[\frac{\pi}{2} - \beta_E - \delta\right]\right) \cos\left(\frac{1}{2}\left[\frac{\pi}{2} + \beta_E + \delta\right]\right) = \frac{1}{2} \left[ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \sin(\beta_E + \delta)\right) \right]$$

Усвајајући претходно, израз за укупну силу резања може се написати као:

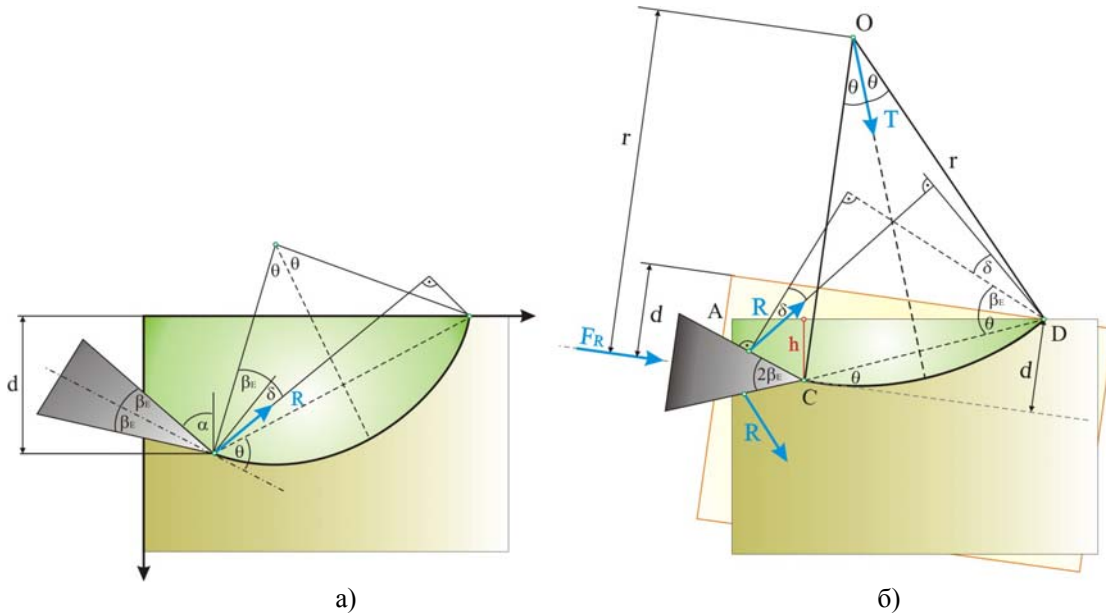
$$F_R = 2 \cdot \sigma_z \cdot d \cdot \frac{\sin(\beta_E + \delta)}{1 - \sin(\beta_E + \delta)} \quad (4.24)$$

Нормална сила на једној страни резног зуба је:

$$F_n = \sigma_z \cdot d \cdot \frac{\cos(\beta_E + \delta)}{1 - \sin(\beta_E + \delta)} \quad (4.25)$$

Укупна сила продирања једнака је нули, због симетричне геометрије и положаја резног зуба. Ако се трење између резног зуба и стенског материјала занемари ( $\delta=0$ ), онда се израз за силу резања и силу продирања може написати као:

$$F_R = 2 \cdot \sigma_z \cdot d \cdot \frac{\sin \beta_E}{1 - \sin \beta_E} \text{ и } F_P = 0$$



Слика 4.18 а) Модел резног елемента багера у захвату са материјалом, б) Примењен Еванс-ов модел за дефинисање оптерећења

Ако би се анализирао проблем оптерећења резних зуба код багера континуалног дејства, који се у захвату могу дефинисати као на слици 4.18.а, онда се *Evans*-ов модел може применити у нешто измењеном стању, као што је приказано на слици 4.18.б. Сагласно геометријским релацијама са слике, може се написати:

$$h = 2 \cdot r \cdot \sin \theta \cdot \sin(\theta - \alpha) \text{ и } d = 2 \cdot r \cdot \sin^2 \theta \quad (4.26)$$

Односно,

$$d = h \cdot \frac{\sin \theta}{\sin(\theta - \alpha)}$$



Укупна сила  $F_K$  је:

$$F_K = 2 \cdot R \cdot \text{Cos} \left[ \theta + \left( \frac{\pi}{2} - \theta - \beta_E - \delta \right) \right] = 2 \cdot R \cdot \text{Sin}(\beta_E + \delta)$$

$$F_K = \sigma_z \cdot d \cdot \frac{\text{Sin}(\beta_E + \delta)}{\text{Sin}(\theta - \beta_E) \cdot \text{Cos}(\theta + \beta_E + \delta)} \quad (4.32)$$

Угао  $\theta$ , се дефинише при минималној вредности  $F_K$ , па је:

$$\frac{dF_K}{d\theta} = 0$$

$$\text{Cos}(\theta - \beta_E) \cdot \text{Cos}(\theta + \beta_E + \delta) - \text{Sin}(\theta - \beta_E) \cdot \text{Sin}(\theta + \beta_E + \delta) = 0$$

$$\text{Cos}(2\theta + \delta) = 0$$

Одакле се добија вредност угла:

$$2 \cdot \theta + \delta = \frac{\pi}{2} \quad \text{или} \quad \theta = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \delta \right) \quad (4.33)$$

Убацавањем израза (4.33) у једначину (4.32), добија се :

$$F_K = \sigma_z \cdot d \cdot \frac{\text{Sin}(\beta_E + \delta)}{\text{Sin}\left(\frac{\pi}{4} - \beta_E - \frac{\delta}{2}\right) \cdot \text{Cos}\left(\frac{\pi}{4} + \beta_E + \frac{\delta}{2}\right)} = \sigma_z \cdot d \cdot \frac{\text{Sin}(\beta_E + \delta)}{\frac{1}{2} \left[ \text{Sin}\left(\frac{\pi}{2}\right) - \text{Sin}(2\beta_E + \delta) \right]}$$

$$F_K = 2 \cdot \sigma_z \cdot d \cdot \frac{\text{Sin}(\beta_E + \delta)}{1 - \text{Sin}(2\beta_E + \delta)} = 2 \cdot \sigma_z \cdot d \cdot \frac{\text{Sin}\left(\frac{\beta}{2} + \delta\right)}{1 - \text{Sin}(\beta + \delta)}$$

Сила резања је:

$$F_R = 2 \cdot \sigma_z \cdot d \cdot \frac{\text{Sin}\left(\frac{\beta}{2} + \delta\right)}{1 - \text{Sin}(\beta + \delta)} \cdot \text{Cos}\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (4.34)$$

Сила продирања је:

$$F_P = 2 \cdot \sigma_z \cdot d \cdot \frac{\text{Sin}\left(\frac{\beta}{2} + \delta\right)}{1 - \text{Sin}(\beta + \delta)} \cdot \text{Sin}\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (4.35)$$

Од дефинисања првог модела па до данас, истраживањима је потврђено да док се разарање стенског материјала одвија услед напона затезања, *Evans*-ов модел и израчуната сила резања имају веома велико подударење са резултатима добијеним експерименталним мерењима. Накнадно добијени резултати и спроведена истраживања такође указују на то да се приказани модел боље показао за израчунавање сила резања при откопавању јаловине, него код угла, иако је за њега првобитно и развијен.

#### 4.6 АДЕКВАТНОСТ ПРИМЕНЕ *EVANS*-ОВОГ МОДЕЛА И КОРЕКЦИЈА ИЗРАЧУНАТОГ ОПТЕРЕЋЕЊА

Процес копања багерима континуалног дејства, са становишта врсте ископаног материјала и његовог облика разарања, може доста варирати између веома пластичног разарања меких стенских материјала као што су глина, иловача итд., до кртих ломова код веома кртих материјала као што су угаљ и стене различитог састава. Ако се проблем посматра са становишта деформације стенског материјала, може се уочити следеће. Код стенских материјала као што су глина и лигнит, резна ивица ножа ведрице служи за резање у области пластичног разарања. Код тврдих стенских материјала, резни зуби на ведрицама служе како би

се поспешии процес продирања, односно како би се обезбедили довољни нормални и тангенцијални напони неопходни за иницијално разарање стенских материјала. Управо та чињеница оправдава примену *Evans*-овог модела у процесу конструисања резних зуба. При конструисању, треба узети у обзир она оптерећења која би могла довести до неког од критичних стања резног зуба током процеса експлоатације. Та оптерећења су краткотрајна и углавном се генеришу током интеракције са стенским материјалима веће чврстоће, за чији је опис и дефинисање силе адекватна примена *Evans*-овог модела.

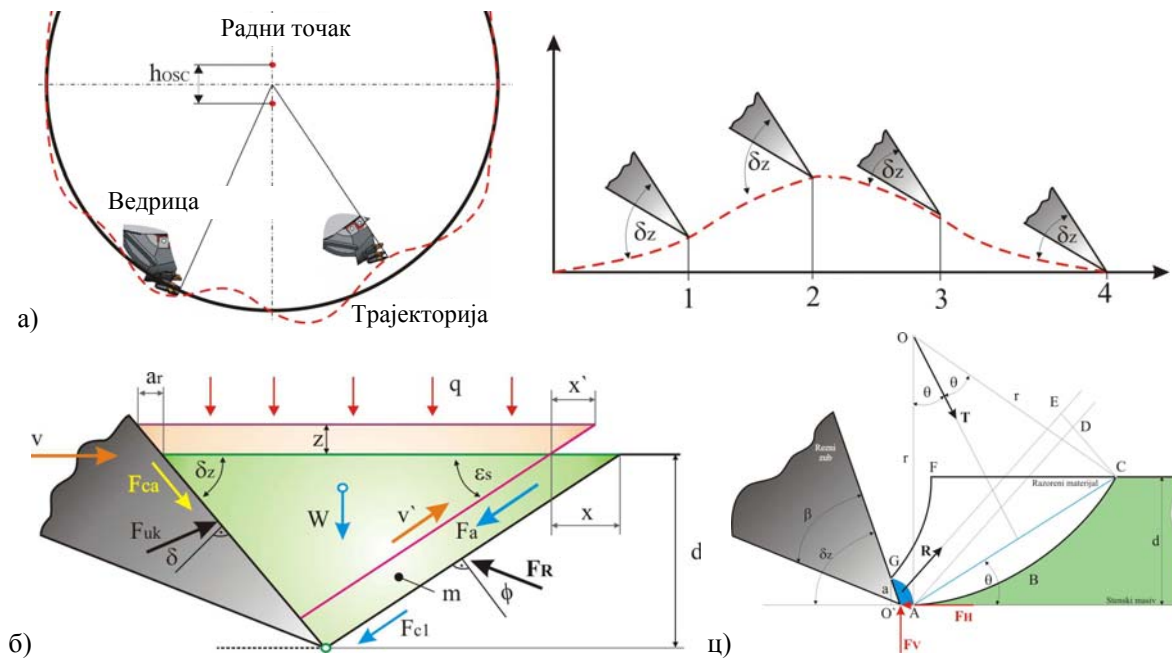
Оптерећење које се добија помоћу *Evans*-овог модела могло би се дефинисати као *номинално оптерећење*. Наиме, ако се као аналогија узме методологија дефинисања спољашњег оптерећења при конструисања зупчаника, онда се може издвојити следеће. При прорачуну се из основних величина, као што су пречник зупчаника, обртни момент и снага, дефинише номинално оптерећење односно сила на зупцу. Тако добијено оптерећење се, сходно условима рада, спољашњим утицајима, захтеваном тачношћу итд., коригује увођењем коефицијената. Коефицијенти служе како би се тачније дефинисало оптерећење, узимајући у обзир различите парцијалне утицаје. Укупно оптерећење добија се тако што се номинално оптерећење повећава или смањује, зависно од утицаја, односно вредности одговарајућих коефицијената.

Ако би се слична методологија применила и на конструисање резних зуба код багера континуалног дејства, онда би се могла предпоставити следећа функција:

$$F_{uk} = F_j \cdot f(k_i) \quad (4.35)$$

У предходном изразу, са  $F_j$  је дефинисана сила резања, продирања или било која друга сила која има утицај на оптерећење резног зуба. Са  $f(k_i)$  се дефинише заједнички утицај свих парцијалних фактора који могу имати утицаја на укупно оптерећење. Ако се са  $k_i$  обележе посебно парцијални утицаји, без разматрања њихових међусобних релација, онда се неки од њих могу дефинисати као:

- $\kappa_1$  - утицај призме стенског материјала који се формира испред сечива резног зуба (слика 4.20.ц)
- $\kappa_2$  - утицај динамичких ефеката рада багера (слика 4.20.а)
- $\kappa_3$  - утицај динамичких ефеката услед померања стенског материјала (слика 4.20.б)
- $\kappa_4$  - утицај суседних резних зуба на ведрици на оптерећење посматраног резног зуба
- $\kappa_5$  - утицај максималног степена похабаности резног зуба итд.



Слика 4.20 а) Осциловање катарке радног точка багера и трајекторија резног зуба са променом леђног угла [119], б) Модел захваћеног стенског материјала резним зубом са анализом инерцијалних сила [39], ц) Анализа сила применом *Evans*-овог модела који укључује постојање призме стенског материјала [120]

Приказани парцијални фактори имају утицаја на укупно оптерећење резног зуба. Осим наведених, који не представљају коначан списак фактора, потребно је анализирати и дефинисати њихову међусобну зависност, или доказати да се могу посматрати као одвојене појаве. Обзиром на тематику овог рада, наведени допунски коефицијенти нису разматрани и нису узети у обзир за дефинисање оптерећења резног зуба у наредном поглављу. Са друге стране, будућа истраживања која се буду бавила овом проблематиком, требало би да иду у смеру њиховог дефинисања и експерименталне потврде. На тај начин би се могао извести општи израз за израчунавање оптерећења резног зуба, који би у обзир узео највећи број утицајних фактора. Тиме би се извршила надоградња Еванс-ов модела, чиме би се обезбедио адекватан и довољно тачан аналитички приступ за инжењерску примену у конструисању резних зуба за багере континуалног дејства.





## 5. МЕТОДОЛОГИЈА ИНТЕГРИСАНОГ ПРИСТУПА КОНСТРУИСАЊА РЕЗНИХ ЕЛЕМЕНАТА

Постојећа знања и одговарајућа литература не објашњавају и не дају препоруке у довољној мери за начин и методологију конструисања резних зуба код багера континуалног дејства, па се процес конструисања своди на искуствене информације, претпоставке и прилично апроксимативне закључке, без улажења у суштину проблема. Овакав приступ претставља проблем у тренутку када се жели направити искорак из постојеће форме и генерисати конструкционо и технолошки боље решење резних елемената, као што је то случај са развојем нове генерације зуба. Са друге стране, модификовање и прилагођавање постојећих резних зуба, традиционално се изводе на бази искуства пројектаната и експериментисањем типа "пробе и грешке". Овакав начин омогућава да се дође до решења које најчешће одступа од оптималног, и са техничког и са економског аспекта.

На сликама 5.1 и 5.2 приказан је животни циклус резних зуба за багере континуалног дејства, посматрано кроз примену интегрисаног развоја, почев од идеје па до рециклаже.

Полазна идеја у интегрисаном развоју резних зуба јесте интезивна комуникација између три главна носиоца, односно између:

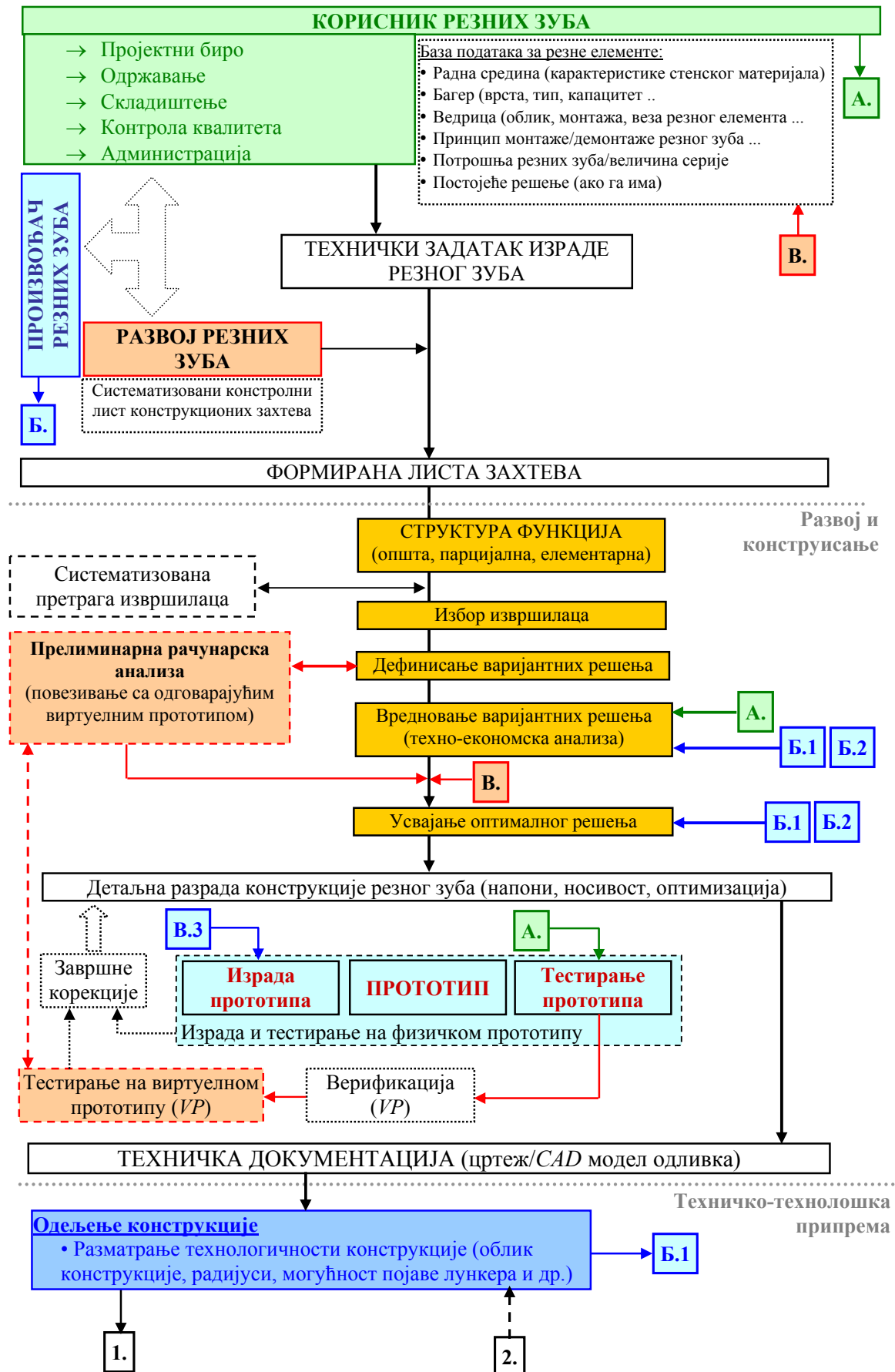
1. корисника
2. произвођача
3. развоја

Овакву комуникацију је могуће остварити применом савремених рачунарских система (софтвера и хардвера) и њиховим међусобним повезивањем са свим битним местима у ланцу животног циклуса резног зуба, како је то приказано на дијаграму са слике 5.1 и 5.2. Може се уочити неколико важних целина, а то су:

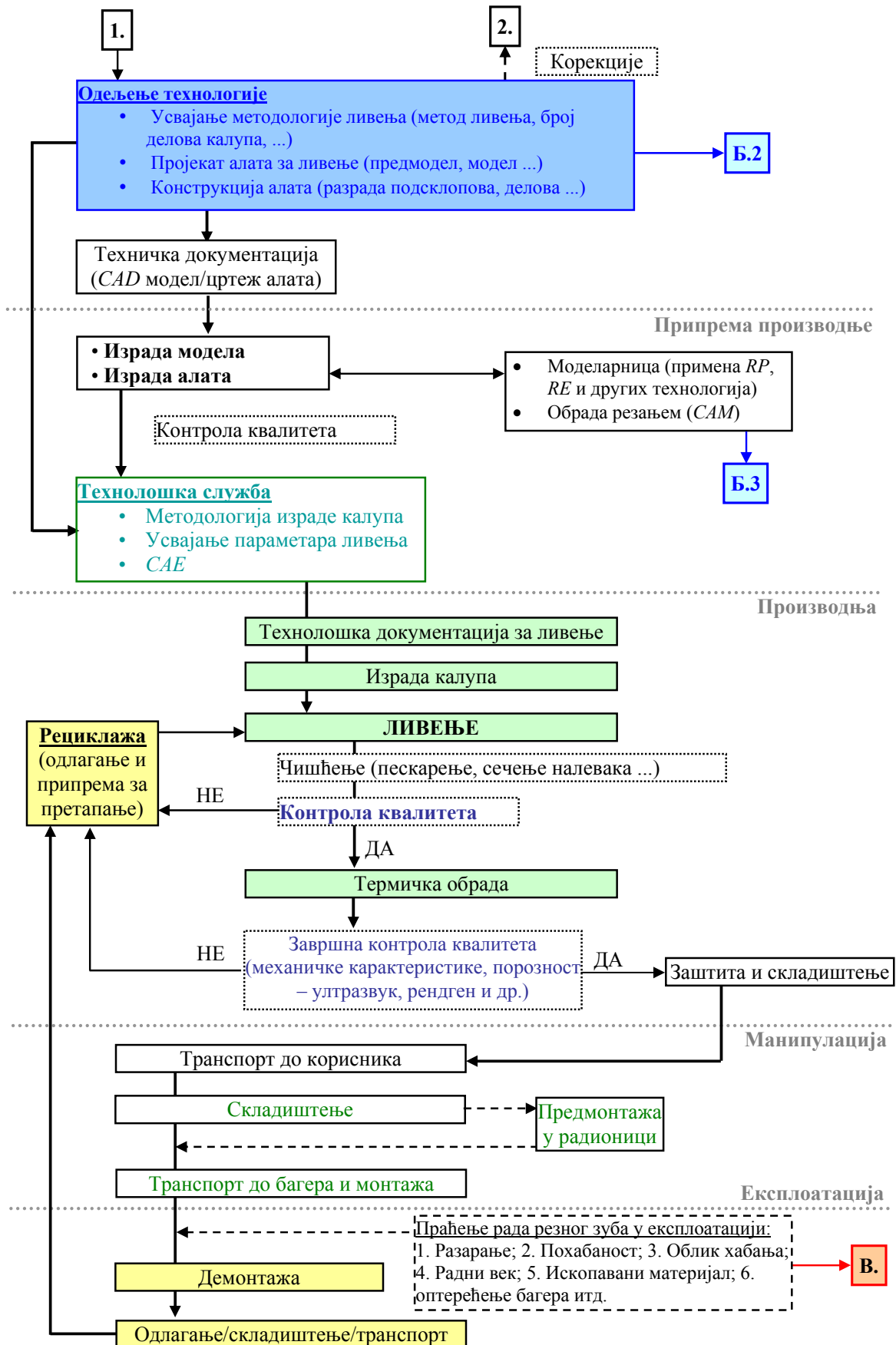
- дефинисање техничког задатка и формирање листе захтева
- конструисање и испитивање конструкције
- техничко-технолошка припрема производње
- производња
- експлоатација и рециклажа

Да би се интегрисани приступ развоја резних елемената могао увести и адекватно применити, потребно је информационо повезити ове целине. На тај начин се обезбеђује проток информација у реалном времену, а подаци битни за будући развој (база знања) се системски уносе и складиште. Такође, у оквиру сваке целине могуће је извршити анализу припадајућег дела проблема и системски донети одговарајуће закључке, помоћу унапред дефинисаних процедура.

Информационо повезивање заснива се на изградњи појединачних рачунарских модела (функционалних виртуелних модела), којима се описује одговарајућа целина и њихово повезивање како би се обухватио целокупан животни циклус. На пример, дефинисање модела за анализу напонског стања, модел за симулацију ливења, модел за анализу носивости, модел за типизацију и унификацију итд. Верификацијом модела дефинише се подручје њиховог важења и одређује тачност у решавању проблема. Када се овакви модели развију и верификују, додатно се унапређују на основу информација које се системски сакупљају током животног циклуса резног зуба. Повезивањем модела обезбеђује се реализација интегрисаног приступа конструисања, јер се будући развој заснива на примени предходних (верификованих) модела и системски прикупљеног знања.



Слика 5.1 Методологија интегрисаног развоја резних зуба за бегере континуалног дејства



Слика 5.2 Методологија интегрисаног развоја резних зуба за бегере континуалног дејства (наставка)

## 5.1 ФОРМИРАЊЕ ЛИСТЕ ЗАХТЕВА

У току процеса развоја резних зуба, конструктор мора узети у обзир већи број различитих конструкционих захтева и ограничења, које намећу корисници кроз своје потребе и произвођачи сагласно својим технолошким могућностима. Захтеви и ограничења одређују основне карактеристике резних зуба и могу се дефинисати сходно основним начелима опште теорије конструисања [19]. Пример контролне листе за дефинисање конструкционих захтева за развој резних елемената приказан је у табели 5.1

**Табела 5.1** Пример контролне листе за дефинисање конструкционих захтева за развој резног зуба

Основна карактеристика	ПРИМЕР
Геометрија	Величина, дужина, ширина, простор, број, распоред
Кинематика	Начин кретања, правац кретања, брзина, убрзање
Силе	Правац деловања, интезитет, тежина, укупно оптерећење
Енергија	Степен искоришћења, трење
Материјал	Карактеристике, термичка обрада
Ергономија	Начин опслуживања, радна сигурност
Израда	Захтеви квалитета, поступак израде, потребни алати
Контрола	Могућност мерења, стандарди
Монтажа и транспорт	Место монтаже, транспортни пут, време монтаже, складиштење
Експлоатација	Радни век, радна сигурност, тип багера
Цена	Дозвољени трошкови израде, цена алата, амортизација
Рокови	Коначни рокови развоја, израде, испоруке
Остало	Услови испоруке, предвиђена испитивања, транспортни услови

Општа функција резних зуба се мора детаљно дефинисати уз навођење улазних и излазних чинилаца, као што су врста стенског материјала, тип и технологија рада багера, начин уградње и др. Уз основни опис функције дефинишу се основни облик и димензије резног зуба, као и његова основна техничка својства, као што су физичке карактеристике материјала, технологија израде и др. Дефинисање ових података требало би да проистекне из предходно дефинисане базе знања, која обухвата анализе предходних решења истих или сличних резних зуба, њихово понашања у експлоатацији, запажања о врсти и облику хабања, времену рада, али и запажања произвођача, која се пре свега односе на могућности примене различитих технолошких процеса производње. Од тога како је дефинисана општа функција новог резног зуба, у високом степену ће зависити и његова прилагођеност условима рада, типу багера, технологији производње и др.

Радна својства резних зуба потребно је дефинисати према потребама и начину извршавања функције разарања стенског материјала, начину руковања, одржавања, потребној сигурности и поузданости у раду, радном веку и др. Дефинисањем радних својстава заправо се дефинишу полазни услови за усвајање оптималне конструкције резног зуба, обзиром да се дефинише потребна носивост, радни век, начин везивања за ведрицу, и др.

Ергономска својства резних зуба су од значаја из разлога њихове манипулације. Ако резним зубима, током монтаже и демонтаже, транспорта и контроле, треба да рукује један или више послужилаца онда то у листи захтева треба да буду јасно дефинисано. Ови услови при развоју резних зуба могу бити важна ограничења и важни чиниоци за самог корисника.

Технолошка својства резних зуба су значајно ограничење и водич у његовом развоју. Треба конструисати оно што је могуће реализовати у производњи на економски прихватљив начин. На првом месту треба предвидети оне технологије којима произвођач тренутно располаже уз што мање захтева за набавком специфичне опреме, помоћних прибора и алата. У листи захтева треба

прописати технологију која је у првом реду конвенционална (резање, ковање, ливење, заваривање), а тек онда разматрати примену специјалних технологија израде (очвршћавање експлозијом, специјалне легуре). Међутим, ако се уводе нове технологије, неопходно је да на одговарајући начин буду дефинисане у листи захтева на самом почетку процеса развоја.

Облик резних зуба је у уској вези са његовом функцијом. У листи захтева потребно је да се дефинишу циљеви, значај и ефекти које треба постићи посредством одговарајућег облика резног зуба, поготову ако се разматра увођење потпуно нове конструкције.

Монтажа и демонтажа резних зуба у току експлоатације су веома битан чинилац са становишта корисника. Замена резног зуба на бегеру у првом реду мора бити једноставна. Потреба да се за ту сврху користи специјална опрема, специјализовано обучени радници и/или обимно расклапање елемената ведрице и др., су фактор који утиче на ефикасност и ниво трошкова код корисника. Монтажа и демонтажа резних зуба има велики утицај на облик и цену крајње конструкције. Трошкови монтаже и демонтаже резних зуба, са већим бројем делова који имају компликовано спајање и подешавање, могу бити веома високи, поготову када током монтаже систем није у процесу производње, као што је то случај са багерима континуалног дејства. У том смислу, потребно је да број саставних делова резних зуба буде што је могуће мањи, операције додатне обраде у току монтаже такође буду смањене, подешавања у току монтаже поједностављена, а процес монтаже дефинисан као једнозначан.

Услови транспорта, као и складиштење резних зуба применом интегрисаног приступа конструисања, треба да буде окренуто филозофији „*just in time*”. На тај начин се могу значајно смањити тршкови складиштења, а време управљања залихама значајно оптимизовати. Дефинисањем основних захтева, услова и начина транспорта, као и складиштење резних зуба треба укључити у разматрање. На пример, то значи да се унапред прецизно дефинише место предмонтаже, принцип контроле квалитета и одговорност за квалитет, док се са друге стране тачно дефинише начин и време допреме резног зуба до самог багера.

Економска ограничења у листи захтева одређују подручје за реализацију свих других услова и жеља. Циљ је добити резни зуб са што нижим трошковима производње, како би позитивна разлика између цене на тржишту и трошкова била што већа. Избор материјала, технологије, сложености конструкције и др., усмерени су ка повећању ове разлике. Одлуке се доносе између крајности да се одаберу унифициране компоненте које су познате и нису скупе (нпр. резни део модуларног резног зуба са малом запремином), или нове које су скупе за развој, али на тржишту могу бити веома тражене (специфични облици врхова резних зуба у комбинацији са допунским наваривањем тврдог слоја или резних плочица). Те околности треба да буду дефинисане у листи захтева, а нарочито треба да буду дефинисане максималне цене коштања које су прихватљиве за кориснике, како би се анализирао економска оправданост будућег решења.

## 5.2 ИСПИТИВАЊЕ КОНСТРУКЦИЈЕ РЕЗНИХ ЗУБА

Испитивања се у суштини заснивају на мерењу одговарајућих величина које одређују квалитет, односно својство посматране појаве и утврђују њихове величине, одступања од прописаних региструју поремећаје у систему, стање оштећења појединих елемената и склопова и узроке отказа [124]. На основу тога, испитивања претстављају методологију објективног утврђивања квалитета испитиваног објекта или испитиване појаве. Како испитивања претстављају методологију која се паралелно са другим поступцима примењује у свим фазама процеса генерисања конструкције резног зуба, почев од развоја, затим производње до коначно експлоатације, могу се и основна испитивања конструкције поделити на развојна, производна и експлоатациона испитивања.

Развојна испитивања могу бити веома сложена, како у погледу техничке изводљивости, тако и у односу на студије и анализу конструкције, посебно у вези са проблематиком чврстоће и поузданости, а такође и у односу на резултате добијене при испитивању, њихову обраду и верификацију. Развојна испитивања резних зуба могу се посматрати кроз испитивање прототипа, које треба да обухвати испитивања и проверу елемената и појединачних склопова, процену квалитета конструкције резног зуба и склопа резног зуба и ведрице у целини у радним условима и под дејством радних оптерећења и напрезања. Осим тога, јако су битна испитивања у преоптерећеном стању, скраћена испитивања експлоатационог века, испитивања при променљивим

условима рада и др. Испитивања прототипа су углавном везана за лабораторијске услове, дају све потребне податке о функцији и квалитету конструкције, и усмерена су на обезбеђивање тачности и поузданости одговарајућих информација.

Производна испитивања резног зуба се реализују увођењем решења (са или без склопа ведрице) у серијску производњу, при чему предходи испитивање прве, односно „нулте“ серије, које има задатак да поред провере функционалности, носивости и поузданости, оцене квалитета конструкције, верификује примењену технологију израду и поступке и уређаје за контролу квалитета, затим проверу могућности монтаже и демонтаже елемената и склопова, као и пробни рад у условима радних оптерећења и напрезања.

Експлоатациона испитивања резних зуба пружају значајне податке и дају укупне информације о понашању зуба у току рада указујући на битне параметре економичности, могућности преоптерећења конструкције, затим дају податке о оправданости примене одговарајућег конструктивног решења или увођења одговарајуће иновације у конструкцију. Експлоатациона испитивања се обављају у радним условима, на терену или у лабораторијским условима уз симулацију реалних режима рада конструкције. Од великог су значаја експлоатациона испитивања која се обављају одмах након монтаже зуба на багер. У том периоду резни зуб заузима положај у радном стању под дејством радних оптерећења и напрезања и том приликом се највећи број недостатака и грешака у конструкцији могу регистровати и добрим делом отклонити.

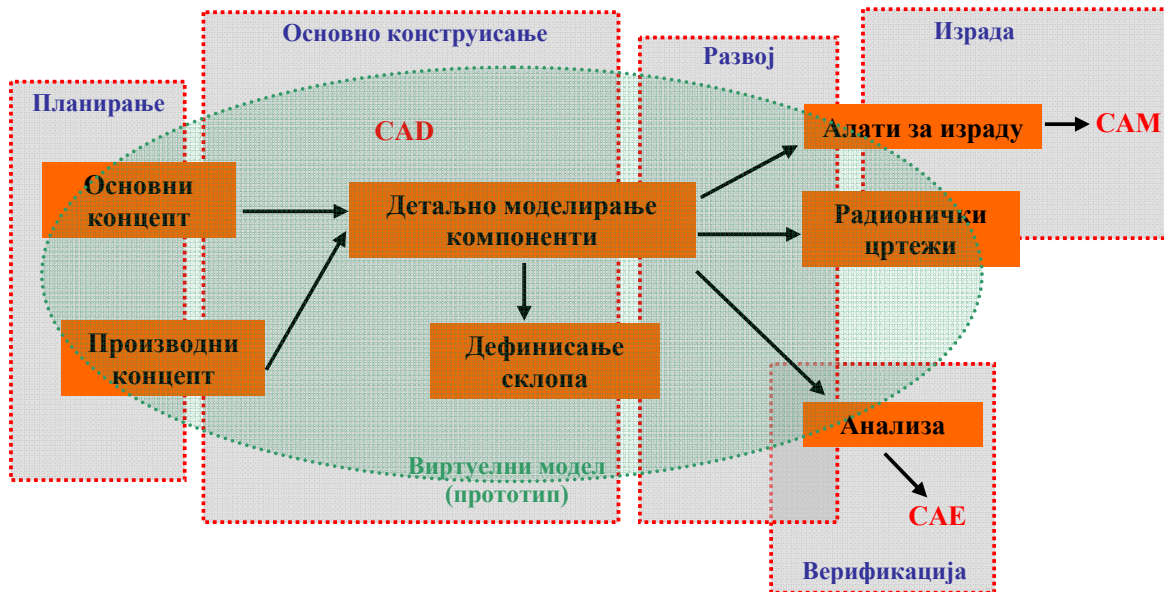
Са аспекта карактера тражених информација, сва испитивања резних зуба могу се поделити на: а) испитивање перформанси (функционалних карактеристика) појединачног резног зуба или склопа резних зуба и ведрице, б) испитивање радних оптерећења и услова под којима се резни зуб и комплетан склоп експлоатишу и ц) испитивање поузданости, односно способности очувања излазних функционалних карактеристика у одређеном периоду времену, под одређеним оптерећењем и условима рада, што се углавном дефинише кроз анализу слике хабања и/или разарања резних зуба.

### 5.3 ИНФОРМАТИЧКА ОСНОВА ИНТЕГРИСАНОГ ПРИСТУПА КОНСТРУИСАЊА

Информатичка основа на којој се заснива интегрисани приступ конструисања су интегрисани CAD/CAE/CAM алати (слика 5.3). Први корак у њиховој примени је генерисање виртуелног модела. Добијање виртуелног модела може се извршити на више начина, као што су директно 3D софтверско моделирање нове конструкције, измена постојећег параметарског 3D модела, превођење постојеће 2D документације у 3D солид модел, применом реверзног инжењеринга, односно различитим методама дигитализације и др. Када се једном генерише виртуелни модел резног зуба, током целог века његовог трајања, претставља средиште за управљање информацијама о његовој геометрији. Израђени виртуелни модел може се користити за оптимизацију, анализу методом коначних елемената, израду документације, симулације, анимације, презентације, израду, брзу израду прототипова и др. Осим тога накнадне промене конструкције, реконструкције и унапређења, у случају потребе, могу се спровести брзо и за све процесе који прате развој производа, стајати конзистентно на располагању. Без обзира да ли се ради о варијантном решењу или усвојеној конструкцији, корисно је одмах по изради основног модела конструкције резног зуба испитати његово понашање при задатом оптерећењу, и утврдити да ли се напони и деформације крећу унутар дозвољених граница.

Након тога, даља анализа треба да обухвати симултану употребу алата за оптимизацију конструкције, симулацију процеса ливења, симулацију термичке обраде, детаљну анализу напрезања и др, али и њихову интеграцију у цео циклус конструисања и израде. Тиме се осигурава да услови технолошког поступка израде резног зуба буду рано интегрисани у процес његовог конструисања, и да се потпуно искористи стварни потенцијал процеса ливења. При пројектовању технологије ливења значајна пажња поклања се елиминисању могућности настанка било видљивих или невидљивих грешака у одливку, због тога што исте могу бити главни узрочник лома резних зуба у процесу експлоатације [20]. С друге стране усвајање филозофије испоруке производа одређеног датума (*just in time*) код монтаже, како би се смањили трошкови складиштења и залиха, захтева од ливница да испоручују одливке тачно на време (често тачно одређеног датума, времена, и локације). Концепт виртуелне израде одливака омогућује ливници непосредну кооперацију с купцем одливака, у смислу оптимизације дизајна и функционалности

одливка [125]. На основу добијених резултата из предходних анализа, могу се изградити алати и модели за одабране конструкције резних зуба.



Слика 5.3 Опште теоријско разматрање CAD/CAE/CAM интеграције у развоју производа

Комплетне анализе, које се данас изводе помоћу рачунара, доприносе бољем предвиђању понашања производа у експлоатацији као и у раном откривању и елиминацији грешака у конструкцији. Циљ оваквог приступа производним технологијама јесте у томе да пре саме израде дела постоји јасна представа о томе како ће производ изгледати и како ће се понашати у радним условима. При пројектовању производа и његовој каснијој анализи, услови рада и његова околина су фактори које треба предвидети и описати на начин разумљив рачунару. Код инжењерских и других проблема, код којих се општа решења не могу добити у затвореном облику, индуктивни приступ је од посебног значаја. Овакав приступ заснива се на примени методе коначних елемената (МКЕ) у току процеса развоја конструкције.

Обзиром да није могуће прецизно дефинисати спољашње оптерећење резног зуба, али и због великог расипања и распона израчунатих вредности оптерећења, посматрано чак и у једном захвату (дефинисано у оквиру овог рада), примена индуктивног приступа у конструисању резних зуба представља адекватан компромис између сложеног израчунавања спољашњег оптерећења и његове примене у анализи напонског стања са једне стране, и израчунавања екстремних вредности оптерећења на бази једноставних механичких модела и већег броја анализираних сценарија оптерећења са друге стране. Међутим, решења која се добијају МКЕ су приближна или апроксимативна. Зато треба поставити питање њихове тачности, стабилности и конвергенције. Са практичног гледишта треба знати са које су стране приближна решења у односу на тачно решење, односно да ли су добијени резултати на страни сигурности.

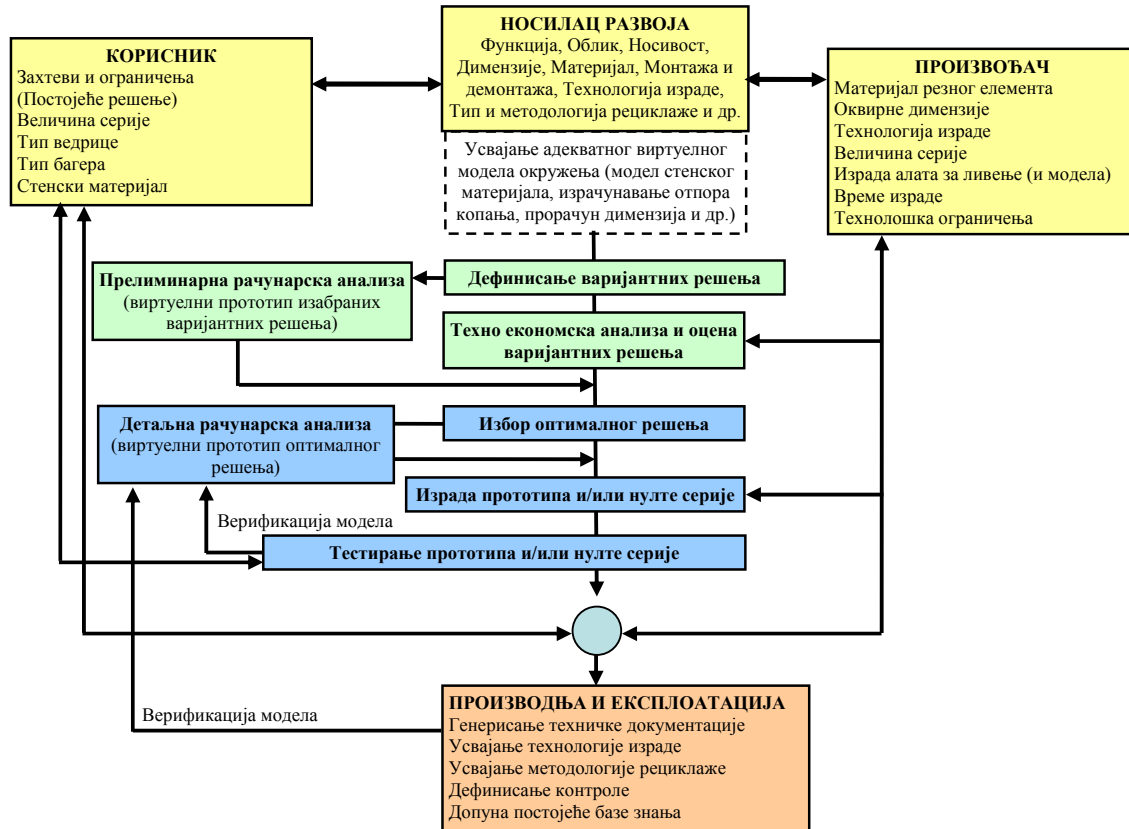
Како се МКЕ може применити код врло комплексних облика конструкције са великом статичком неодређеношћу изложених сложеним оптерећењима, то је примена ове методе у развоју резних зуба потпуно оправдана. Веома важна улога интегрисаног приступа конструисања се огледа кроз унапређење конструкције резног зуба његовим брзим тестирањем (могућност тестирања великог броја концепција), што омогућава доношење боље одлуке о финалном облику и димензијама, а уједно оставља довољно времена за развој сасвим нових концепција. Циљ свих анализа је да се из великог броја различитих конструкција изабере оптимално решење и оно накнадно тестира у експлоатационим условима. На тај начин приступ развоја резних зуба, на бази интегрисаног конструисања кроз примену индуктивног приступа, дао би следеће позитивне ефекте:

- Минимизирање ризика неуспехе усвојене концепције и крајње конструкције резних елемената
- Скраћење времена развоја и тестирања прототипа
- Смањење броја и боља организација понављајућих корака у конструисању и тестирању



- Повећање поузданости процеса конструисања
- Поновљивост тестирања сличних конструкција, као и могућност проширења за тестирање осталих компоненти багера
- Генерисање оптималног решења за почетно дефинисана ограничења. Променом ограничења, могуће је једноставно добити следеће оптимално решење.

На слици 5.4, шематски је приказан поступак који је коришћен за развој модуларног резног зуба *TF14038*, за багер ведричар *ERS1000/20* [31]. Обзиром да је предходни поступак потврђен у пракси и кроз развој резних зуба за роторни багер [126], може се усвојити као полазна основа у развоју резних зуба за багере континуалног дејства. Приказани поступак заснива се на примени интегрисаног конструисања, при чему информатичку базу чине интегрисани *CAD/CAE/CAM* алати. Овакав концепт омогућава укључивање и повезивање свих елемената дефинисаних у оквиру предходно приказане методологије интегрисаног развоја резних зуба.



Слика 5.4 Шематски приказ поступка интегрисаног развоја резних зуба за багере континуалног дејства

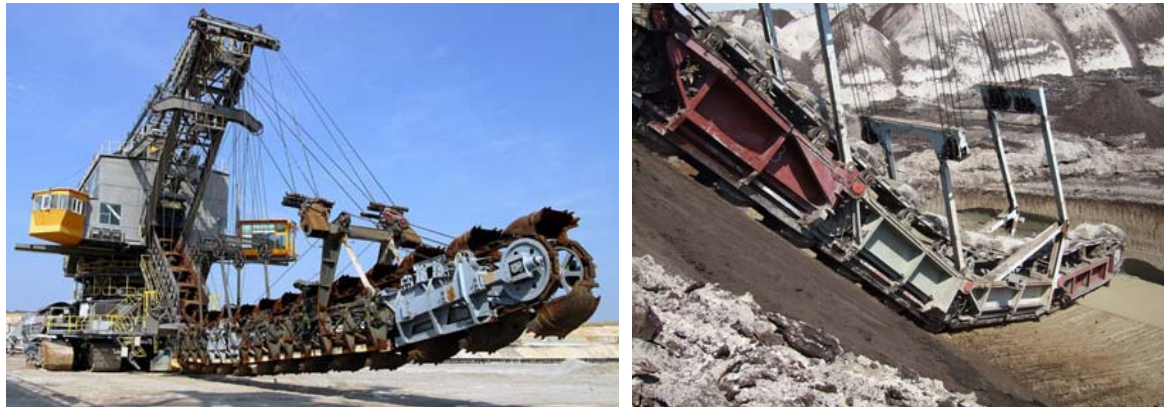
## 5.4 ПРАКТИЧНА ПРИМЕНА УСВОЈЕНЕ МЕТОДОЛОГИЈЕ НА ПРИМЕРУ РАЗВОЈА МОДУЛАРНОГ РЕЗНОГ ЗУБА ЗА БАГЕР ВЕДРИЧАР

На основу предходно дефинисане методологије извршен је развој модуларног резног зуба за багер ведричар *ERS1000/20* (слика 5.5). У наставку рада приказане су фазе и активности, које су спроведене током развоја модуларног резног зуба.

Табела 5.2 Основне техничке карактеристике багера ведричара *ERS1000/20*

Номинални капацитет	1400 [m <sup>3</sup> /h]
Максимални капацитет	2250 [m <sup>3</sup> /h]
Специфична сила копања	1170 [kN/m <sup>2</sup> ]
Висина копања	19 [m]
Дубина копања	16 [m]

Дужина носача ланца са ведрицама	23.5 [m]
Инсталисана снага на погонском мотору ланца	630 [kW]
Укупан број ведрица	36 [kom]
Номинални капацитет ведрице	1000 [l]
Брзина ланца са ведрицама	1.22 [m/s]
Укупна тежина багера	1150 [t]



Слика 5.5 Багер ведричар ERS1000/20

### 1. ФАЗА: Дефинисање захтева и спецификација ограничења

Интеграцијом информација од стране корисника, произвођача и носиоца развоја, поставља се циљ, дефинишу се захтеви и израђује спецификација ограничења. Интеграцију информација, осим директног приступа, могуће је обезбедити развојем адекватне интернет апликације и одговарајућом софтверском и серверском подршком. На слици 5.6 приказано је постојеће стање резних зуба на ведрици багера ведричара, где се може уочити веома неповољна слика хабања.



Слика 5.6 Постојеће стање хабања једноделних резних зуба на багеру ведричару ERS1000/20

У оквиру ове фазе врши се разрада идеје и прикупљање података како би се дефинисали основни услови које будућа конструкција модуларног зуба мора да задовољи. Ове услове неопходно је увек јасно дефинисати, обзиром да се током времена могу мењати, чак и у случају развоја резних зуба за исти или сличан багер. Та промена условљена је сталним променама у радном окружење багера, унапређењу технологије производње, постојањем специфичних захтева итд. На основу ових разматрања формира се листа захтева, којом се дефинишу основне карактеристике резног зуба, као што је приказано у табели 5.1

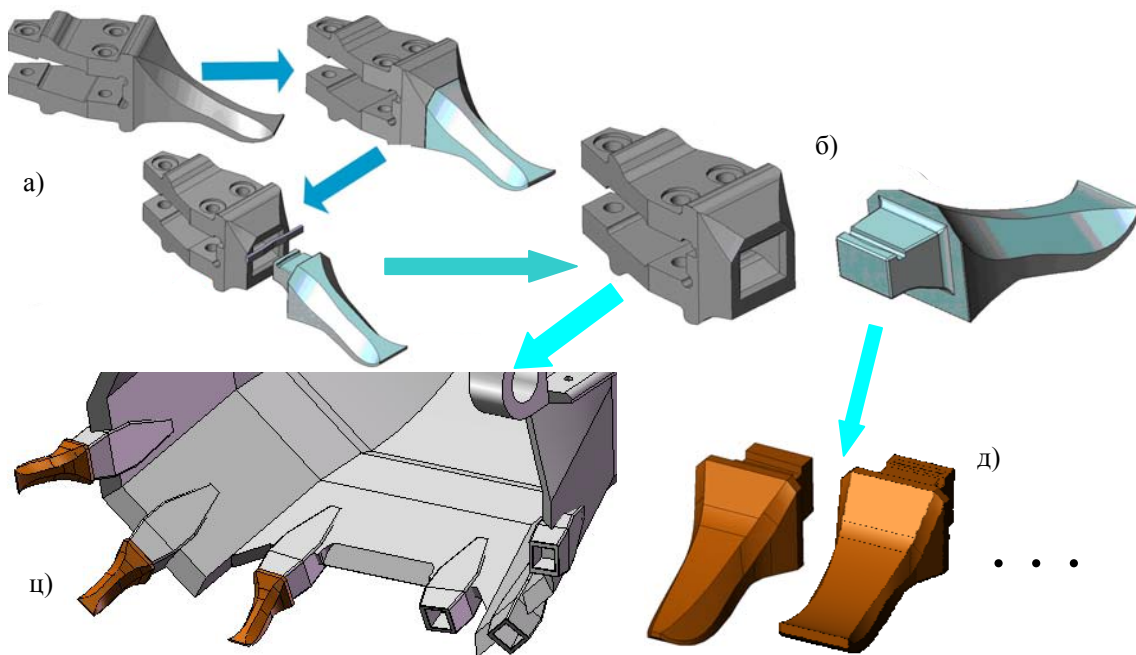
Прикупљање података, у конкретном примеру, обухватило је и анализу битних фактора постојећег стања рада багера са једноделним резним зубима, и то:

- a) Анализу радне средине багера
- b) Анализа подсистема копања багера ведричара
- c) Анализа стања постојећих резних зуба на багеру
- d) Предлог и анализа могућих праваца решавања уочених проблема на резним зубима

## 2. ФАЗА: Конципирање идејног решења и конструкционо технолошка идентификација модуларног зуба

У овим фазама урађено је више конструкционих варијантних решења, па је на бази предходно дефинисаних техничких и економских критеријума, извршен избор конструкције модуларног зуба за израду прототипа. Усвојено оптимално решење је у овој фази конструкционо детаљно разрађено. На тај начин, овом фазом су обухваћени следећи чиниоци:

- a) Формирање варијантних решења модуларног зуба
- b) Дефинисање техно-економских критеријума за оцену конструкције
- c) Избор оптималног решења
- d) Детаљно конструисање усвојене концепције
- e) Дефинисање монтажано-демонтажног подскопа модуларног зуба
- f) Пројектовање технологије израде
- g) Анализа технологичности и симулација технологије израде



Слика 5.7 а), б), ц), д) Усвојена структура развоја модуларних резних елемената за багере континуалног дејства

На слици 5.7.а приказана је примењена структура развоја резних елемената. Формирање основне концепције базирано је на постојећем једноделном резном зубу (слика 5.7.а). На тај



начин формирају се две конструкционе целине, резни део и носач резног дела, што је приказано на слици 5.7.б. Раздвајањем се постиже дубља анализа појединачних конструкционих проблема, јер су оптерећења и ограничења у оба случаја потпуно различити. Следећи корак је решавање проблема конструкције ведрице (слика 5.7.ц), која се заснива на сједињавању ножа ведрице и држача резног дела зуба. Основни циљ је уклањање постојећег масивног држача из употребе, заменом специјалних држача, који би се одговарајућом технологијом ливења израђивали заједно са једним делом ножа ведрице. Тиме се постиже не само боља конструкција са аспекта носивости, већ и са аспекта резања стенског материјала, монтаже и демонтаже резног елемента, одржавања ведрице и др. Са друге стране, упоредо се решава проблематика резног дела (слика 5.7.д) са аспекта оптимизације, типизације и применом концепта модуларног конструисања. То доприноси бољем прилагођавању појединачних резних елемента условима копања. Такође, омогућава се примена различитих облика и врста резних врхова на истој ведрици багера.

За оцену варијантних решења, коришћени су следећи критеријуми:

*a) Технички критеријуми*

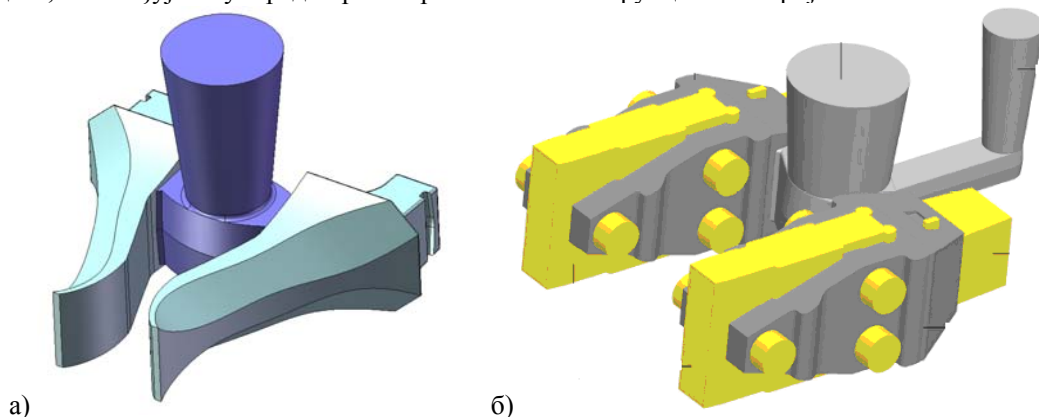
- |                               |  |
|-------------------------------|--|
| → Укупна носивост             | → Модуларност                                |
| → Сложеност монтаже/демонтаже | → Поузданост конструкције                    |
| → Место монтаже/демонтаже     | → Облик хабања/самооштрење                   |
| → Утицај грешке ливења        | → Могућност коришћења на различитим багерима |
| → Сигурност везе              |  |
| → Комплексност геометрије     |  |

*b) Економски критеријуми*

- |                           |                            |
|---------------------------|----------------------------|
| → Време монтаже/демонтаже | → Накнадна обрада одливака |
| → Укупна цена зуба        | → Ангажованост радне снаге |
| → Број елемента везе      | → Експлоатациони век       |

Конструкција модуларног резног зуба у оквиру ове фазе додатно је усаглашена према усвојеној технологији израде. Усвојено је да се и резни део зуба и носач израде ливењем, па је сходно томе, дефинисан технолошки поступак израде и предлог конструкције алата за ливење.

На слици 5.8 приказани су *CAD* модели одливака резног дела и држача резног дела зуба. Модели су формиран на бази усвојеног оптималног решења, и коришћени су у анализи технолошких параметара и симулацији процеса ливења (слика 5.9). Усаглашавањем *CAD/CAE* алата и повезивањем преко солид модела омогућавају се брзе измене на конструкцији резног зуба, али и њихова провера са аспекта технологичности израде. Такође, дефинисањем еталон солид модела, обезбеђује се упоредно разматрање више конструкционих варијанти.

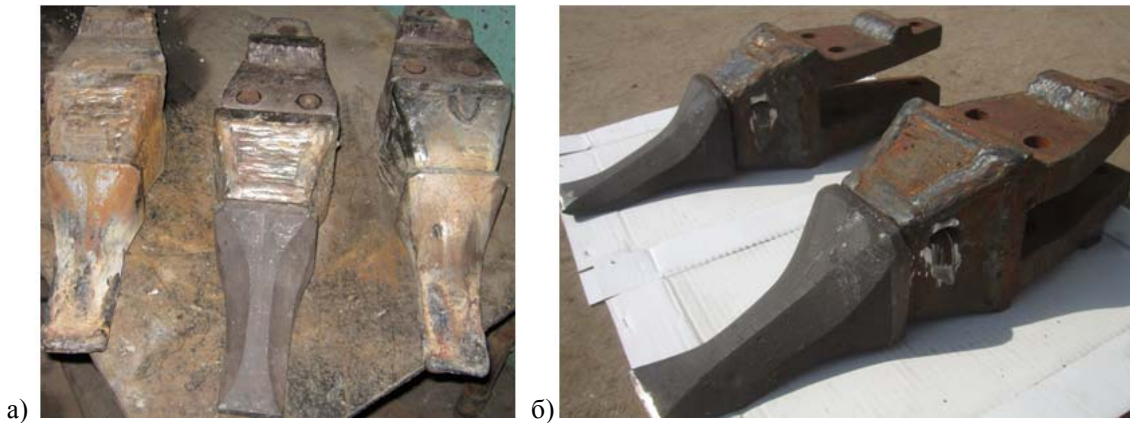


Слика 5.8 *CAD* модел комплетног одливка. а) Резног дела, б) Носача резног дела

### 3. ФАЗА: Израда и верификација физичког прототипа модуларног зуба

За усвојено оптимално решење конструкције модуларног зуба извршена је израда физичког прототипа. Физички прототип направљен је тако што је носач израђен комбиновањем технологије обраде резањем и заваривања, док је резни део израђен ливењем (због чега је извршена израда и

предмодела резног дела модуларног зуба). Крајња конструкција физичког прототипа модуларног зуба приказана је на слици 5.9.б.



Слика 5.9 а) *Израда и подешавање прототипа, б) Усвојени прототип резног зуба*



Слика 5.10 *Монтажа и експлоатационо испитивање прототипа*

У циљу верификације техничко-технолошких карактеристика прототипа у експлоатационим условима, извршена је монтажа зуба на багер. Зуби су монтирани у пару на фронту резања, односно по два централна чеона зуба на ведрици, као што је приказано на слици 5.10. Након извршене припреме и монтаже приступило се континуираном праћењу понашања конструкције у радним условима. На основу добијених резултата извршена је анализа носивости и анализа хабања прототипа. Пре реализације експлоатационог испитивања, анализиране су механичке, хемијске и металографске карактеристике узорака материјала резног зуба.

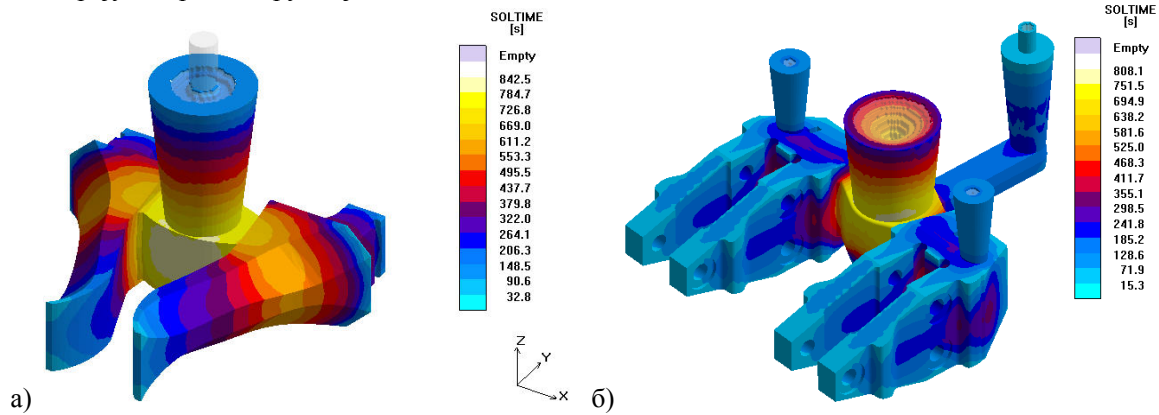
#### **4. ФАЗА: Подешавање технолошких параметара ливења и пројектовање алата за израду „нулте“ серије модуларних резних зуба**

У оквиру ове фазе подешена је технологија израде компоненети модуларног резног зуба, при чему су разматрани сви фактори битни, са аспекта пројектовања и конструисања алата за ливење. Такође, анализирани су и усвојени технолошки параметри процеса ливења.

Приликом пројектовања технологије ливења резних зуба тежиште је стављено на три кључна захтева. То су анализа технолоичности конструкције, дефинисање методологије ливења и методологија израде калупа и на крају дефинисање технолошких параметара лива. Предходни захтеви су разматрани у циљу добијања потребних техничко-технолошких карактеристика лива, а евентуелне видљиве и/или невидљиве грешке у одливку свеле на што је могуће мању меру. Ово је битно, обзиром да су предходни чиниоци главни узрочници лома резних зуба у процесу експлоатације.

У оквиру ове фазе извршена је рачунарска симулација технолошког процеса ливења (брзина ливења, време очвршћавања, појава лункера и др.), и анализа добијених резултата.

Пример анализе, у којој је разматрано време очвршћавања лива, приказана је на слици 5.11. На основу изведених закључака дефинисани су могући узроци грешака, који се могу јавити током процеса ливења. На тај начин извршена је корекција технологије и параметара процеса ливења, а грешке настале као последица конструкционог облика алата за израду калупа су исправљене одговарајућом реконструкцијом.

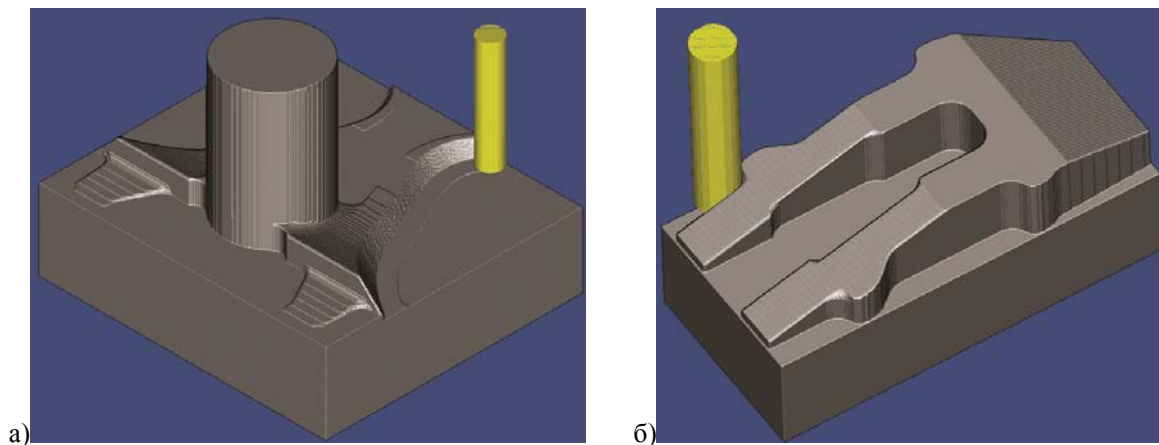


Слика 5.11 Симулација ливења и одређивање времена очвршћавања лива за а) Резни део и б) Носач резног дела

Ова фаза је обухватила следеће:

- Дефинисање процеса експлоатације релевантних за пројектовање алата
- Пројектовање алата за израду резног дела и носача модуларног зуба
- Анализа технолоичности конструкције одливака и алата
- Дефинисање технологије израде алата
- Дефинисање технологије израде прибора за добијање монтажано-демонтажног склоп
- Симулација процеса ливења и анализа технолошких параметара

У оквиру ове фазе размотрени су и усвојени начин и поступак израде компоненти модуларног зуба, али и начин и поступак израде алата за ливење компоненти модуларног зуба. На слици 5.12 приказан је пример генерисања путање алата, потребне у току машинске израде предмодела за ливење.



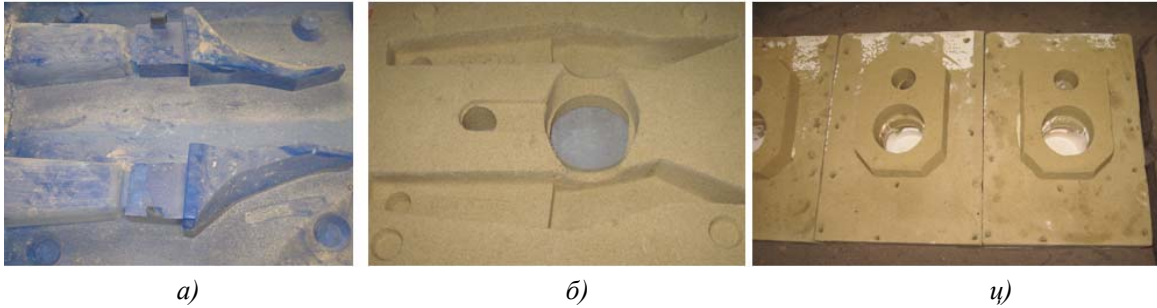
Слика 5.12 Генерисање путање алата за израду модела за калупе а) Резног дела, б) Носача резног дела

## 5. ФАЗА: Израда и монтажа пробне серије модуларног зуба

У оквиру ове фазе извршена је израда и монтажа алата, као и одливање пробне серије модуларних резних зуба. Реализовани су сви производни и помоћни процеси, извршена је контрола процеса израде, контрола квалитета, као и извођење и контрола термичке обраде компоненти модуларног



зуба. На слици 5.13.а приказан је израђен предмодел, на бази кога је израђен и формиран калуп за ливење, што је приказано на слици 5.13.б и ц.



Слика 5.13 а) Модел за израду калупа резног дела, б) Део калупа, ц) Припрема калупа за уливање метала

Након примарног процеса израде реализована је завршна обрада и монтажа модуларног зуба у радионичким условима, што је приказано на слици 5.14. Током процеса израде уочени су и кориговани одређени делови алата за ливење.



Слика 5.14 Одливена и монтирана пробна серија модуларних резних зуба

#### 6. ФАЗА: Верификација пробне серије модуларног зуба у лабораторијским и експлоатационим условима

У оквиру ове фазе, извршена је експериментална, лабораторијска и рачунарска анализа модуларног резног зуба, односно урађена је:

- а) Механичка анализа (затезање и ударна жилавост) материјала резног зуба (дато у Прилогу 4., овог рада).
- б) Анализа микроструктуре материјала резног зуба [147], након технологије израде и након реализоване термичке обраде (дато у Прилогу 2., овог рада).
- в) Детаљна рачунарска симулација и анализа понашања склопа модуларног зуба у условима статичког и динамичког оптерећења, а у циљу верификације виртуелног модела (детаљно приказано у поглављу 6.2 и 6.3, овог рада)
- г) Лабораторијско испитивање носивости модуларне конструкције зуба [158] (детаљно приказано у поглављу 6.3, овог рада)
- д) Верификација трибо-механичких карактеристика модуларног зуба [28] (дато у Прилогу 1. овог рада)

У лабораторијским условима, склоп модуларног зуба оптерећиван је до границе разарања (слика 5.15). Циљ је био дефинисање критичног оптерећења које доводи до разарања, али и уочавање најслабије компоненте склопа. Такође, било је битно и добити слику иницијалног и коначног разарања модуларног резног зуба.





Слика 5.15 Статичко оптерећење модуларног зуба до границе разарања

У експлоатационим условима, комплетна пробна серија од 50 комада модуларних резних зуба монтирана је на ведрицу багера и праћена у експлоатационим условима. Монтажа је извршена тако што су на ведрицу постављена по два централна резна зуба (најоптерећенија и највише изложени резни елементи).

За анализу хабања „нулте“ серије модуларног резног зуба у експлоатационом условима, примењен је приступ на бази реверзног инжењеринга (*eng.Reverse Engineering*). Солид модели, добијени на овај начин, коришћени су у процесу конструисања за оптимизацију облика резног зуба и дефинисање његовог положаја и орјентације на ведрици.

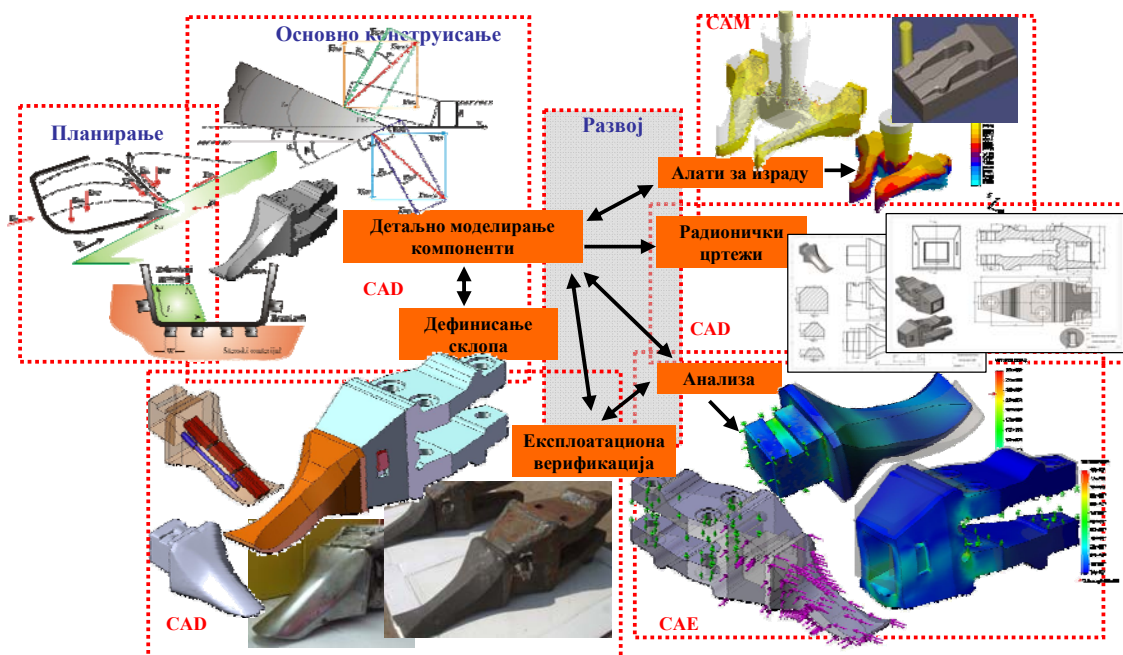
## 7. ФАЗА: Предлог крајњег решења

У последњој фази, која обухвата детаљно конструисање, усвојена је техничко технолошка документација и методологија контроле квалитета модуларног резног зуба. Такође, подешен је верификован виртуелни експеримент за рачунарску симулацију и анализу оптерећења. Осим тога, дефинисана су варијантна решења крајње конструкције ведрице, са имплементираним модуларним резним зубима.



## 6. ИНТЕГРИСАНИ CAD/CAE/CAM АЛАТИ У ФУНКЦИЈИ РАЗВОЈА РЕЗНИХ ЕЛЕМЕНАТА

Основу интегрисаног приступа конструисању, али и окосницу приступа развоја на бази управљања животним циклусом производа, чини интеграција CAD/CAE/CAM софтверских алата који се везују за поједине фазе развојног циклуса [24]. На слици 6.1 приказан је пример ове интеграције, који је у оквиру овог рада примењен у развоју резних елемената. CAD алати претстављају скуп софтверских алата и технологија који инжењерима пружају одређене погодности током рада на развоју конструкције производа, а које се пре свега односе на аутоматизацију конструкторских операција. Засновани су на тродимензионалном моделирању, а ефекти примене ових система огледају се у повећању ефективности, креативности и квалитета. Пре започињања развоја технологије израде, или паралелно са тим активностима, потребно је извршити напонску анализу и симулацију понашања производа у експлоатационим условима. Обзиром да током рада код резног зуба не сме доћи до критичног стања, потребно је прорачунати радне напоне и исте упоредити за дозвољеним вредностима. Комплексност повезана са обликом резних зуба и њиховом везом са ведрицом и осталим подсклоповима, подразумева да се у великом броју случајева систем мора анализирати у целини. Прорачуни спроведени без примене рачунара, у оваквим случајевима су неуправљиви и осетљиви на грешке. Рачунари се веома ефикасно могу користити у оваквим прорачунима, и то почев од најједноставних задатака па до најкомплекснијих проблема, па у ту сврху се користе CAE. CAE системи се састоје од једног или више софтверских алата који се примењују у анализи и симулацији физичких карактеристика производа, али и процесу оптимизације конструкционих решења.



Слика 6.1. Примењен концепт CAD/CAE/CAM интеграције у процесу конструисања модуларних резних зуба

По завршетку развоја конструкције производа приступа се његовој производњи. У циљу рачунарске подршке и интеграције релевантних функција и активности, за ову намену користе се CAM алати.

Они имају веома широко значење, обзиром да у општем случају покривају велики број функција и активности које припадају различитим областима производних система, техника и технологија. То значи да се на основу CAD модела могу извршити пројектовање и симулација обрадног процеса, генерисање програма за нумеричко управљање CNC машина, праћење и управљање процесима, управљање производном и помоћном опремом и др.

CAD/CAE/CAM алати претстављају део укупне подршке процесима конструисања и производње. Срж њихове примене чини *модел производа*, односно рачуарска представа реалног производа. Суштина приступа и поступака развоја производа и процеса помоћу рачунара, огледа се у стварању модела. У различитим фазама развоја, модел има различито специфично значење, које је повезано са карактеристикама и потребним активностима које се спроводе у циљу стварања готовог производа. Све ово указује да су интегрисани CAD/CAE/CAM алати у функцији развоја производа, процеса израде и пратећих процеса, засновани на стварању компонентних рачуарских модела, као организованих скупова релевантних података и информација.

Генерално говорећи, концепт интегрисаног конструисања резних зуба усмерен је ка томе да се у развоју производа обједине сви процеси који на сам производ могу и имају неки утицај. На тај начин се у анализи обухватају сви елементи животног циклуса производа, од генерисање идеје до рециклаже производа. Тежиште практичне реализације интегрисаног приступа заснива се на изградњи одговарајућих виртуелних модела (прототипова) [128]. Виртуелни модел нема задатак само да визуелно прикаже производ, већ и да опише и симулира његово физичко понашање. На тај начин добија се могућност да се на конструкцији испитају функционалне и техничке карактеристике у виртуелној околини, а непосредни ефекат таквог приступа је мањи број физичких прототипова које треба произвести и испитати. За разлику од физичких прототипова, виртуелни прототипови користе све предности савремене рачуарске технике и играју фундаменталну улогу у развојном процесу, због своје флексибилности и могућности брзе визуелизације процеса у случају промене одређених карактеристика прототипа. Осим моделирања појединачних геометријских особина производа, могуће је моделирати и комплексно физичко понашање производа у виртуелној околини [20] (динамичко понашање, расподела оптерећења, напонско стање и др.).

Интегрисани CAD/CAE/CAM алати, који претставља информациону основу предложене методологије интегрисаног развоја са слике 5.2, треба да омогуће анализу и синтезу свих битних чинилаца у животном циклусу резних зуба. На тај начин, посматрајући развој резних зуба кроз примену концепта интегрисаног процеса конструисања, извршавају се и/или решавају следећи битни чиниоци [28]:

#### **CAD**

1. Генерисање 3D солид модела резног зуба
2. Генерисање 3D солид модела окружења: ведрице, подсистема копања, комплетног багера, стенског масива, захваћеног материјала и др.
3. Анализа кинематике багеровања
4. Добијање геометријских параметара копања, као што су карактеристични углови (грудни и леђни угао резног зуба, угао ножа и др.), дубина резања, облик реза, дефинисање карактеристичних попречних пресека реза и др.
5. Израда подлоге (параметаризованог представника) за типизацију и унификацију резног зуба
6. Аутоматска израда техничке документације резног зуба
7. Генерисање зависног 3D солид модела алата за ливење резног зуба (са или без израде модела)
8. Израда подлоге за типизацију и унификацију алата за ливење
9. Аутоматска израда техничке документације алата за ливење
10. Примена реверзног инжењеринга у генерисању 3D солид модела
11. Примена реверзног инжењеринга у процесу контроле (одливени припремци, хабање и др.)

#### **CAE**

1. Анализа МКЕ (прорачун носивости резног зуба, склопа резног зуба и ведрице и др.)
2. Симулација захватања стенског материјала и одређивање отпора копања
3. Оптимизација облика и димензија резног зуба
4. Динамичка анализа подсистема копања

#### **CAM**

1. Симулација и анализа процеса ливења резног зуба
2. Симулација и анализа комплетног процеса производње резног зуба

3. CNC програмирање путање за израду алата за ливење резног зуба
4. Брза израда предмодела за израду алата за ливење резног зуба
5. Брза израда прототипа резног зуба и склопа резног зуба и ведрине

Солид (виртуелни) модел резног елемента је виртуелна представа која омогућава развој, трансформацију и манипулацију обликом, развој и чување документације, развој технологије израде, развој модела за анализу стања у експлоатацији (напон, вибрације, поузданост и др.). Ови модели су резултат синтезе конструкције резних елемената и полазна су основа за развој модела за анализу стања [129].



Слика 6.2 Могућности примене виртуелних модела резних елемената

## 6.1 ПАРАМЕТРИЗАЦИЈА ВИРТУЕЛНИХ МОДЕЛА РЕЗНИХ ЗУБА

У критеријуме, по којима се дефинишу димензије током процеса конструисања, спадају критеријум функције, критеријум чврстоће, критеријум крутости и допунски критеријуми. Основни критеријуми служе да се на основу спољашњих оптерећења, функционалних карактеристика и специфичних захтева конструкције, израчунају основне вредности попречних пресека, дужине и осталих функционалних димензија. Са друге стране, допунски критеријуми користе се за усклађивање израчунатих димензија и у њих спадају стандардизација, типизација, унификација и модуларно конструисање. Са аспекта развоја резних зуба то значи да се на основу типа багера и његове технологије рада, карактеристика стенског материја, положаја и орјентације резног зуба у захвату, а на основу модела оптерећења израчунавају карактеристичне димензије и дефинишу основни облици. Тако добијене вредности се затим усклађују применом једног или више допунских критеријума. Циљ примене допунских критеријума је обезбеђивање значајних повољних економских ефеката, боље комуникације и размене техничких информација, примене проверених решења и др.

Типизација је развој фамилије производа истог типа. Детаљно се разрађује конструкција једног члана фамилије, а остали се добијају применом геометријске сличности и стандардних геометријских бројчаних низова. Због тога се постиже значајна уштеда у процесу конструисања, испитивању производа и његовој изради. Фамилија истоветног производа се формира полазећи од одговарајуће физичке карактеристике по којој је фамилија препознатљива. То је по правилу носивост, капацитет, снага и др. Унификација је сједињавање (изједначавање) типизираних компоненти у једном машинском систему. Минимизација броја типизираних компоненти остварује се уградњом истих компоненти и тамо где оне неће по

својим карактеристикама бити у потпуности искоришћене. На тај начин се повећава број истих делова, подклопова и склопова у једној конструкцији. Комбиновањем типизације и унификације, као допунских критеријума за дефинисање димензија, могу се постићи значајни економски, конструкциони и технолошки позитивни ефекти. Модуларно конструисање је проширени приступ типизације и унификације на машинске системе вишег нивоа комплексности. Сложенији машински системи се при конструисању разлажу на шире целине – модуле. Они се формирају тако да се међусобно могу компоновати на различите начине. Различитим комбинацијама добијају се различити машински системи. Модули, као основни елементи, израђују се у већим серијама, а затим се различитим комбинацијама добијају различити машински системи у малом броју комада. На овај начин се решава проблем економичности производње машинских система који се израђују у различитим варијантама, али у малим серијама. Са становишта примене интегрисаног приступа конструисања резних елемената веома је важно да се дефинисање виртуелних модела резних елемената, било да се они посматрају кроз варијантна решења или крајње усвојено решење, базира управо на основним начелима примене допунских критеријума конструисања.

Аксиоми пројектовања обезбеђују принципе којима се процес пројектовања чини управљивим и конвергентним. Први аксиом односи се на дефинисање независних функционалних захтева будућег производа, на начин који води добијању једнозначног пројектног решења. При овоме, неопходно је тежити да се задовољи само есенцијални скуп функција, како би се комплексност решења свела на минимум. Испуњење захтева из прве аксиоме у великој мери могуће је обезбедити применом принципа *модуларне градње*. Овим се постиже да уградбени модули и подсистеми, који са аспекта примене аксиоматске теорије претстављају параметре пројектовања, буду међусобно независни, али независни и од неких основних карактеристика комплетног производа, као што су на пример габаритне мере или величина радног простора [19], [29]. Друга аксиома указује на то да информациони садржај процеса пројектовања мора бити минималан. Информациони садржај дефинише се као мера потребног знања да се задовољи дати функционални захтев на одређеном нивоу хијерархије функционалних захтева. Захтев из ове аксиоме може се испунити *унификацијом делова* при пројектовању комплетног производа, као и максималном применом стандардних елемената. На овај начин обезбеђује се да циљ који се жели остварити (то је могућност брзих измена неких од параметара производа на основу жеље корисника), има импликације већ на најранију фазу реализације, фазу конструисања.

У контексту предходног разматрања посебно је значајан приступ базиран на *параметаризацији конструкционог решења резних елемената*. Остваривањем функционалних захтева и минимизацијом информационог садржаја, формирају се модули и подсистеми који уз унификацију компонената омогућују да резни зуб буде параметаризован. Са друге стране, применом савремених CAD алата обезбеђује се структура информационог садржаја (облик, димензије, саставне компоненте итд.) који се повезују помоћу параметара. Поред тога, још једна битна карактеристика CAD алата је могућност визуелизације производа пре почетка реализације, чиме се постиже да корисник унапред има увид у изглед производа чије је карактеристике специфицирао, тако да може потврдити своје захтеве или евентуално изразити нове жеље.

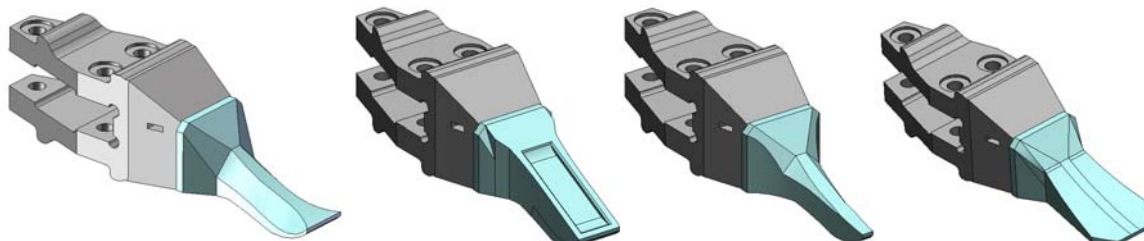
Примена типизације, унификације и модуларног конструисања у суштини се своди на дефинисање фамилије производа. Постоје два основна приступа у дефинисања фамилије производа [130]. Први приступ је одозго на доле (проактивна платформа), која обухвата развој фамилије производа, засновану на платформи производа и њених деривата. Други приступ је приступ одоздо на горе (реактивни редизајн), у оквиру кога се реконструише или консолидује група различитих производа, применом стандардизације појединих компоненти у циљу унапређења економских ефеката. На тај начин фамилије производа се могу поделити на два основна типа: фамилије засноване на модулим и фамиље засноване на параметризацији димензија. Код фамилије производа засноване на модулима (конфигурабилне), чланови фамилије се генеришу додавањем, заменом и/или уклањањем једног или више модула са платформе. Модуларно конструисање заснива се на изградњи блокова са специфичним интерфејсом који се могу повезати на различите начине, чинећи при томе различите конструкције. Модуларизација није исто што и стандардизација, у смислу редуковања избора [131]. Уместо тога, модуларизација значи управљање и контролу варијација на тај начин што се генерише интелигентна структура производа. Када се говори о модулима, говори се о два њихова битна аспекта. То су број функција које извршава један модул и начин њиховог међусобног повезивања.



Табела 6.1 Примена модуларности у развоју резних елемената

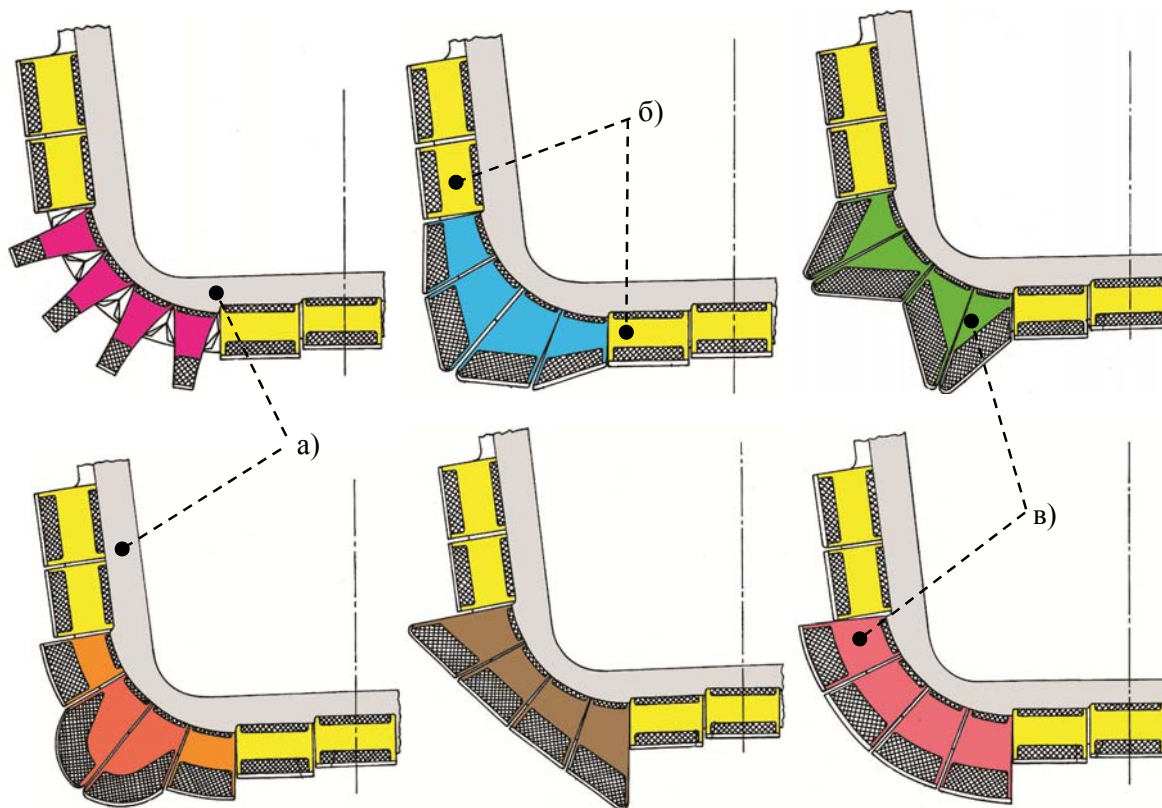
Категорија модуларне архитектуре	Теоријска шема повезивања	Опис категорије	Примена у развоју резних елемената
Заједничка компонента		Иста модуларна компонента, уграђује се у више различитих производа	Склоп модуларног резног елемента се користи на више типова конструкције ведрице
Заједничко језгро		Примењује се иста основа, на коју се уграђују различите компоненте у зависности од концепта производа	Конструкција носача резног елемента се користи као основа за више резних врхова
Скалирана компонента		Користи се иста конструкција, при чему су у различитим производима, користи тако што јој се варирају одговарајуће димензије	На бази оновне конструкције носача и резног дела, омогућава се примена на различитим ведрицама, типовима багера и стенским материјалима
Заједничка основа		Повезивање различитих модула врши се на истој основној конструкцији	Различити облици и димензије резних елемената се модуларно компоњују на истој конструкцији ведрице
Регионална модуларност		Обезбеђује се могућност међусобног повезивања више компоненти на различите начине	Примена истих модула резних елемената, који међусобним повезивањем на различите начине образују резне зубе, нож ведрице, комплетан резни фронт итд.
Миксована модуларност		За нове компоненте или њихово повезивање користе се добре особине предходних категорија.	Примена која подразумева прилагођену комбинацију предходних модуларних архитектура

На слици 6.3, приказана је примена различитих модула резног врха, за исти носач. Избор модуларног врха зависи од врсте стенског материјала, типа багера и примењених параметара копања.



Слика 6.3 Модуларни резни зуб TF14038 са различитим модулима резног дела

Примена концепта модуларног конструисања у оквиру интегрисаног развоја резних зуба, има велики број предности које се огледају у мањим трошковима развоја и мањим трошковима израде, уз истовремено унапређење процеса копања и повећање експлоатационог радног века. Применом модуларног конструисања скраћује се време лансирања нове (модуларне) конструкције резног зуба, развојем само одређених компоненти. Такође, омогућава се паралелизација тимова и примена конкурентног инжењеринга, док се у исто време конструкција резног зуба “прилагођава” великом броју различитих захтева и индивидуалним потребама корисника. Варијантност, која се може јавити током разматрања потпуно нове конструкције резног зуба у производњи или у развоју, применом овог концепта обезбеђује се брже решавање проблема и подешавање процеса. Већа ефикасност административних послова управљања техничко технолошком документацијом уз повећање ефикасности у пословима логистике, снабдевања и пословима рационализације добављача, али и боље управљање залихама и складиштењем су побољшања која се огледају у помоћним и пратећим процесима током модуларног развоја и експлоатације резних зуба.



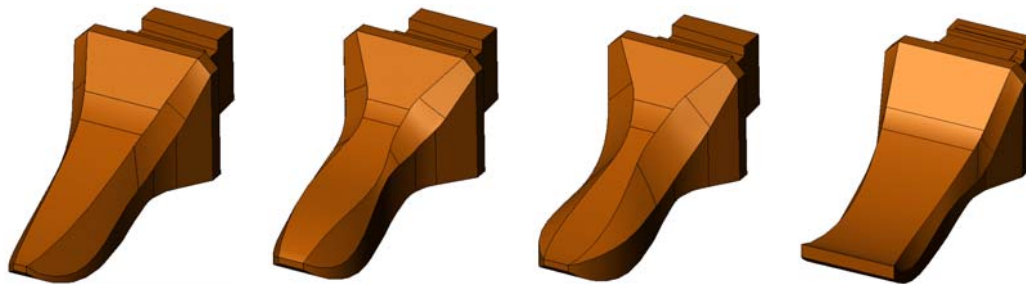
Слика 6.4 Концепт примене модуларних резних елемената на ведрици багера континуалног дејства [132]

Примена модуларног конструисања приказана на слици 6.4, односи се на унапређење перформанси резања и копања комплетног склопа ведрице. Унапређење се постиже на тај начин што се врши прилагођавање нападне линије резања постојећим условима и технологији рада багера, тако што се монтирају различити модули резних елемената, при чему се задржава иста конструкција ведрице. На слици је приказана ведрица (а), на којој се, у зависности од потребе, монтирају сегменти који формирају нож ведрице (б), и модуларни елементи који појединачно или у склопу чине резне зубе (ц).

Код фамилије производа засноване на параметризацији димензија (димензионо подесиве), једна или више параметарских променљивих се користи за “развлачење” или “стежање” платформе у једној или више димензија, како би се задовољиле различите тржишне потребе. Пример примене овог концепта у конструисању резних зуба приказан је на слици 6.5 .

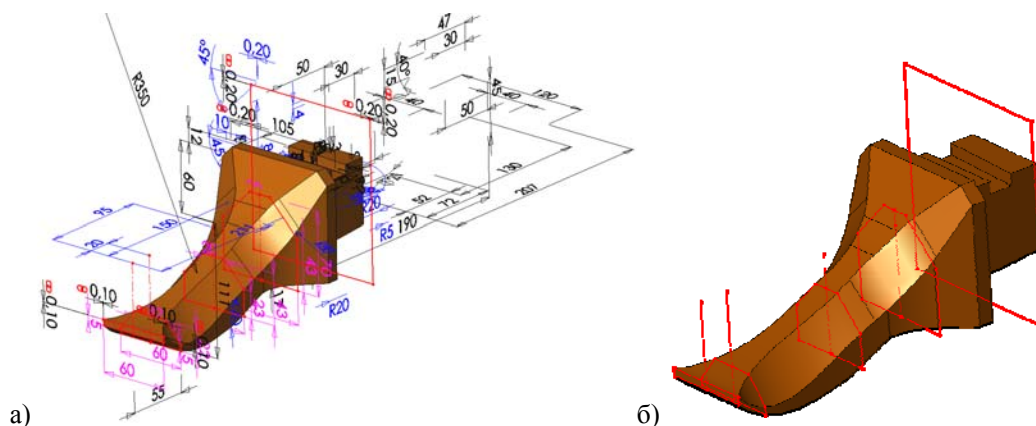
Димензије резних елемената значајне за функцију и чврстоћу могу бити изабране за параметре преко којих се могу израчунавати остале димензије. Варијацијом параметара мења се однос димензија у истом облику резног елемента.





Слика 6.5 Конструкционе варијације облика резног дела, применом параметризације, а према таб.6.2

Ако се примени ова филозофија у оквиру параметарског моделирања резног дела модуларног зуба, онда се сагласно приказаном примеру са слике 6.6. може урадити следеће: дефинише се облик резног дела, којим се дефинише претставник одређене фамилије резних врхова. Карактеристичне димензије овог представника нису фиксне, већ се дефинишу као параметарске променљиве. На тај начин формирањем упоредне табеле, где се врши дефинисање ових променљивих тако што се задају потребне димензије, формира се база података која садржи само један модел резног дела зуба и групу параметара на основу којих је могуће добити било коју варијанту из изабране фамилије, а чији су параметри дефинисани табелом. На овај начин се добија да се уместо моделирања великог броја сличних резних врхова, поступак конструисања своди на избор основне концепције резног врха (избор представника фамилије, према потребама корисника) и дефинисање потребних параметарских величина. Тако добијену конструкцију резног елемента накнадно треба "дорадити" у зависности од општих и посебних захтева конструисања.



Слика 6.6 а) Еталон модел резног дела модуларног зуба, б) Спецификација променљивих попречних пресека зуба

Осим једноставног дефинисања димензија и облика могуће је поставити релације које би се исказале математички или постављањем одговарајућих ограничења, која би се односила на процес саме уградње (ограничавајући фактори за уклапање). У овом случају при уметању делова у склопове, софтвер идентификује потенцијалне референце за склапање дела чиме се процес "монтаже" и добијање крајњег склопа модела резни врх-носач-ведрица знатно убрзава. Још једна од предности оваквог приступа конструисања резних елемената може се видети кроз накнадно пројектовање алата за ливење. Пројектовање алата изводи се само за изабраног представника фамилије, при чему се детаљно изврши анализа и дефинисање техничко технолошке документације. Променом, односно избором одређене конструкције резног елемента из припадајуће фамилије, аутоматски се генерише цео поступак добијања техничко-технолошке документације (нпр. CNC код, технички и монтажни цртежи и др.).

Две основне предности приступа конструисања на бази развоја фамилија су смањење времена и смањење трошкова развоја резних елемената. На пример, време потребно да се развије појединачни резни део модуларног зуба значајно је дуже од времена развоја резног дела који припада одређеној фамилији.

**Табела 6.2** Дефинисање параметарских димензија за еталон модел резног дела у оквиру CAD алата

Конструкциона варијација на бази унетих вредности димензија (слика 6.6.ц)	Параметарска димензија (слика 6.6.а и б)	Висина@Профил 0	Ширина@Профил 0	ШиринаГ@Профил 1	Ширина@Профил 1	Висина@Профил 1	ВисинаГ@Профил 1	Ширина@Профил 2	ШиринаГ@Профил 2	Висина@Профил 2	ВисинаГ@Профил 2	Ширина@Профил 3	ШиринаГ@Профил 3	Висина@Профил 3	ВисинаГ@Профил 3
		[mm]													
Основна верзија		5	60	32	60	5	22	20	60	23	43	20	74	43	70
Верзија01		10	80	40	50	5	22	20	60	23	43	20	74	43	70
Верзија02		5	20	30	50	20	22	20	60	23	43	20	74	43	70
Верзија03		5	20	30	50	10	30	40	50	40	43	20	74	43	70
Верзија04		5	10	20	40	5	22	40	60	23	43	60	80	43	70
Верзија05		10	70	60	70	10	20	60	70	20	30	80	90	30	60
Верзија06		5	5	10	10	5	10	30	30	20	30	60	60	30	60

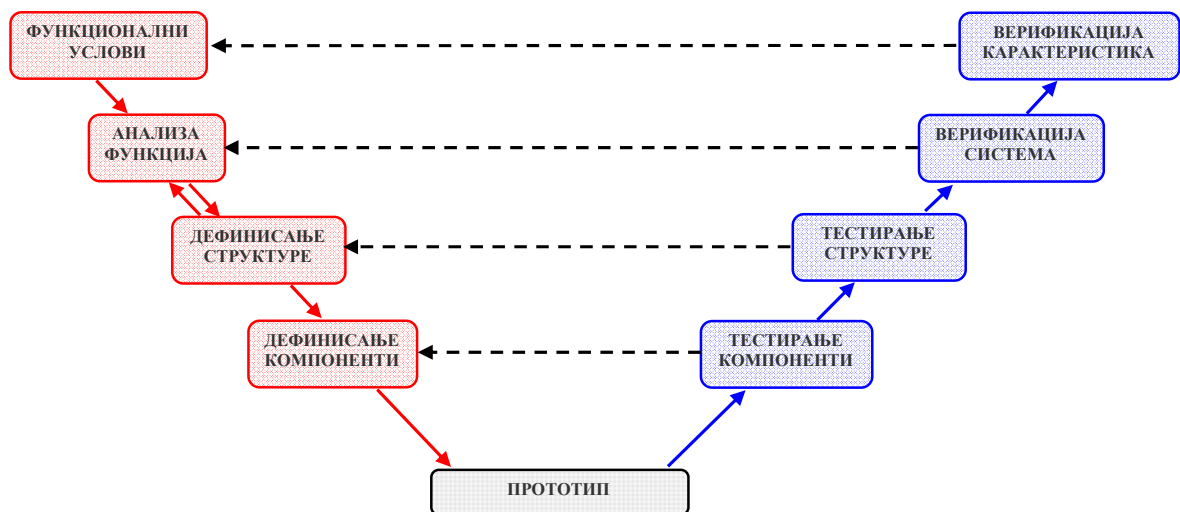
Повећање броја варијанти резних елемената и смањење времена развоја нису једине предности модуларног конструисања. Једна од главних предности јесте и смањење трошкова везаних за сам процес развоја [131]. Такође је значајно уочити да се параметарским конструисањем и применом принципа модуларности постиже и то да се на основу жеље корисника процес конструисања не враћа на почетак, већ само у одређене завршне фазе које су уз примену савремених CAD алата аутоматизоване. Примена наведеног приступа омогућује да се конструисање резних елемената почне реализовати већ у фази разговора са будућим корисником. То значи да се на основу захтева корисника, који се уносе као иницијални параметри конструкције, процес конструисања конкретног решења реализује потпуно аутономно до нивоа спецификације стандардних компоненти и техничке документације, практично све што је потребно за лансирање производње и процену цене коштања. На овај начин производња резних елемената по захтеву, без обзира на њену техничку сложеност, може да се реализује веома брзо, уз минималне трошкове конструисања персонализованог решења. Оваквом брзином реаговања на жеље корисника практично се успоставља нови приступ за ефикасну и ефективну реализацију производа – *rapid to market* концепт. Поред тога, врло значајан моменат је и минимизација простора за стварање грешке, јер је већина процеса аутоматизована и вођена применом рачунара.

## 6.2 ГЕНЕРИСАЊЕ ФУНКЦИОНАЛНОГ ВИРТУЕЛНОГ ПРОТОТИПА

Обзиром да интегрисани приступ конструисања у први план ставља савремене рачунарске системе, то је у оквиру овог дела рада разматран концепт развоја функционалног виртуелног прототипа, и могућност његове примене у развоју резних елемената за багере континуалног дејства. Како је већ раније напоменуто, уско грло у скоро свим процесима конструкције нових или реконструкције постојећих саставних елемената багера континуалног дејства претставља израда и тестирање физичког прототипа. Поставља се питање због чега је то тако?

Багери континуалног дејства представљају прву карику у ланцу континуалног процеса ископавања и транспорта угља, па уколико било који елемент овог система не ради, не ради комплетна линија. Обзиром да су овакви системи предвиђени да раде непрекидно, уз уважавање планских застоја и ремонта, свако друго заустављање генерише озбиљне проблеме у испуњавању задатог капацитета и прави велике економске трошкове [3]. Са друге стране, током рада багера присутни су веома неповољни радни услови. Такође, постоји опасност везана за габаритне димензије компоненти багера и начин његовог рада. Са аспекта испитивања важно је утврдити и тренутно стање машине, и њен утицај на понашање физичког прототипа током експлоатације (нпр. прототип може бити и добар, али због релативно лошег стања посматраног склопа или подскопа не могу се добити валидни резултати). У разматрање се мора узети у обзир и квалитет израђеног прототипа и његова монтажа, затим утицај евентуалног отказа израђеног прототипа на остале елементе машине (на пример, истовремени лом више резних зуба може довести до оштећења

ведрице). Са друге стране, прототипови су незаобилазна инстанца, јер имају кључну улогу у крајњој потврди карактеристика усвојеног решења.



Слика 6.7 Класичан V приступ у конструисању са употребом физичког прототипа [133]

Због свега наведеног, неопходно је наћи алтернативу у коме би се физички прототип монтирао на багер тек онда када су извршена и испитана сва могућа предходна подешавања и исцрпљене све остале могућности. Једна од алтернатива је у развоју и примени функционалног виртуелног прототипа. На слици 6.8. приказан је пример комплексног виртуелног прототипа роторног багера, који је намењен за обуку радника који га опслужују.



Слика 6.8 Основни концепт физичког и виртуелног прототипа роторног багера [135]

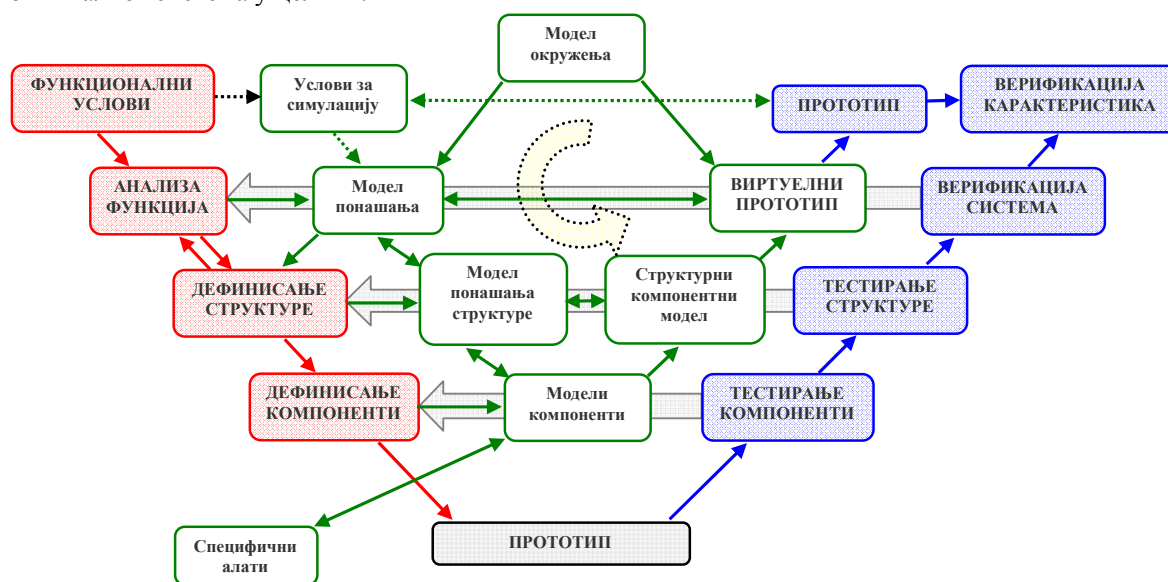
Виртуелни прототипови се у оквиру развоја производа користе за добијање слике о изгледу производа још у раној фази развоја, да се симулирају и провере својства производа пре израде физичког прототипа чиме се остварује знатна уштеда, или потпуно елиминисање трошкова и времена за израду и модификовање физичких прототипова. Виртуелни прототип нема задатак само да визуелно прикаже производ већ и да опише и симулира његово физичко понашање [20], [23]. За разлику од физичких прототипова, виртуелни прототипови користе све предности модерне рачунарске технике, па се тежиште процеса конструисања помера из физичког у виртуелно окружење, што је веома велика предност за решавање проблема код багера на површинским коповима.

### 6.2.1 Основни елементи функционалног виртуелног прототипа

Ток процеса конструисања, познат и као V процес (слика 6.7.), састоји се из две јасно одређене фазе. Прва фаза је анализа „одозго на доле“ која води ка поступној и хијерархијској дефиницији функција система и његових компоненти све до најнижег нивоа, односно до нивоа основног физичког

разматрања. Друга фаза обухвата систематску понављајућу серију тестова прототипа са корекцијама, све дотле док се не изврши потпуна валидација система.

Класичан СА-х приступ обухвата рачунарски подржане технологије усмерене на генерисање модела производа, његове анализе стања и касније дефинисања потребних технолошких параметара обраде. Такав приступ назива се још „art to part“. Решења која се добијају на овај начин задовољавају решавање проблема у случајевима конструисања мање комплексних система (производа и процеса). Појам комплексности не везује се за број и сложеност компоненти, већ на могућност и адекватан опис унутрашњих и спољашњих интеракција система. Генерисањем комплексних системима, где се елементи на најнижем нивоу повезују помоћу основних мултифизичких појава, рана идентификација недостатака постаје практично немогућа, па је успех „прве“ конструкције тешко достижан. Са друге стране, што се проблем на систему током тестирања касније очу, то су потребни већи трошкови да се они исправе (на пример, уочавање грешака у компонентама везе резног зуба повољније је него уочавање грешака у верификацији усвојене концепције резног елемента). Треба још напоменути да се оптималном конструкцијом појединих компоненти система не решава проблем изградње оптималног система у целини.



Слика 6.9 Шематски приказ концепта функционалног виртуелног прототипа [134]

Због тога је неопходно дефинисати нови хоризонт у области постојећих технологија и направити искорак у исте. То је могуће урадити развојем нових алата, али и инеграцијом и модификацијом постојећих технологија као што су CAD/CAE/CAM, тако да се њихово поље разматрања прошири на комплексан систем. Концептом Функционални Виртуелни Прототип-ФВП (слика 6.9) омогућава се сагледавање функције целог система и његових оперативних перформанси, а не само функција појединих његових компоненти. Приступ заснован на ФВП је скуп добро организованих задатака који се користе у процесу конструисања или побољшања постојећег система, кроз склапање појединачних модела којима се описује дати систем. Анализом функција система и категоризацијом према спецификацији извршења, може се изградити комплексан модел који ће у највећој могућој мери реално представити разматрани физички систем. У основи, овај концепт је заснована на описним и предиктивним моделима објеката, делова система и њиховог окружења. На овај начин у први план се ставља рачунарска симулација и тестирање, док се физичка производња и тестирање користе као крајњи алат за верификацију конструкције и усавршавање симулационих модела.

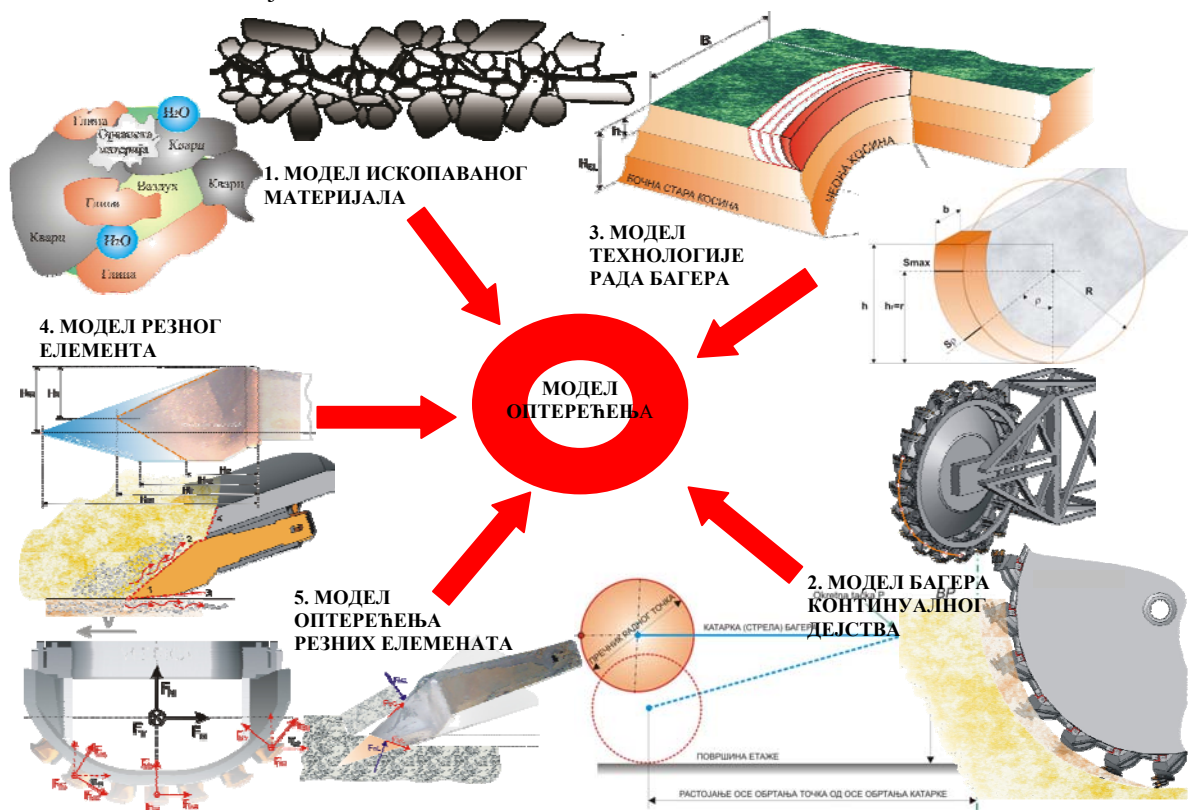
Процес моделирања у општем случају садржи три основна корака:

1. Генерални опис понашања система, што укључује изградњу симулационе спецификације према претходно дефинисаном циљу симулације, дефинисање главних функција система и изградњу модела окружења.
2. Структурни описи система, што укључује дефинисање различитих подсистема и њихових веза са описом понашања која су независна од технолошког избора.



3. Ниво најнижег физичког описа компоненти система. Овај део садржи интегрисане физичке ефекте компоненти у моделу система. Овај корак дозвољава идентификацију физичких и технолошких ограничења изабраног решења. Овај корак може да укључи резултате и/или симулације између описа система и специјализованих алата као што је, на пример МКЕ.

На слици 6.10 приказан је пример генерисања комплексног модела, на основу кога би се израчунавало оптерећење резног елемента узимајући у обзир све релевантне факторе. Сваки утицајан фактор (нпр. ископавани материјал, геометрија резног елемента и др.), дефинише се одговарајућим моделом. Ови модели се затим међусобно повезују одговарајућим релацијама, да би се добили комплекснији модели вишег нивоа.



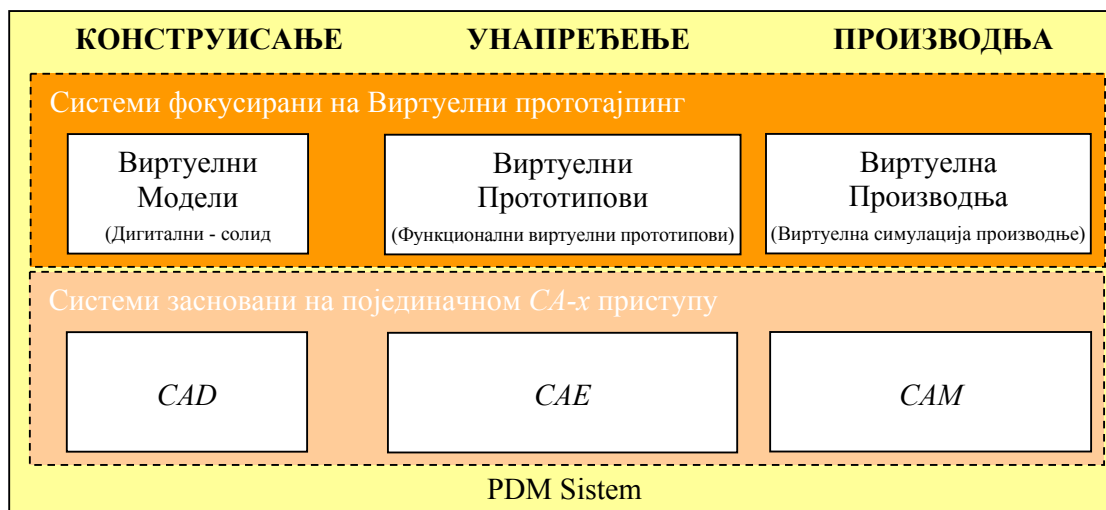
Слика 6.10 Дефинисање утицајних фактора у компоновању комплексног модела за одређивање оптерећења резног зуба код роторних багера

Генерално посматрајући, повећањем комплексности производа и захтевом за смањењем времена њиховог развоја, израда физичких прототипова и њихово тестирање претставља највеће уско грло у процесу брзог лансирања производа на тржиште. Посматрајући развој и унапређење делова багера континуалног дејства, осим предходног закључка, веома важну улогу игра могућност тестирања прототипова у експлоатационим условима, као и висина трошкова потребних за реализацију тестирања. Због тога се може извући закључак, да током развоја делова за багере континуалног дејства у фазама пројектовања и конструисања, треба у што већој мери „подесити“ производ и његове перформансе, а израду и тестирање прототипа треба увести само за крајњу потврду конструкције, пре пуштања производа у серијску производњу.

Реализација овог циља спроводи се сагласно глобалним трендовима у процесу развоја производа, односно развоју заснованом на симулацијама и пракси примене функционалних виртуелних прототипова. На тај начин перформансе будућег производа и његов квалитет се значајно унапређују, трошкови и време развоја смањују, а уско грло превазилази израдом и тестирањем усавршеног физичког прототипа. На слици 6.11. приказана је веза између појединачних СА-х алата и њихове примене у оквиру концепта виртуелног прототипинга.

Сваки машински део је у општем случају дефинисан скупом својстава. Према теорији техничких система у својства се сврставају све физичке величине, особине и друге карактеристике које дефинишу машински део [19]. Својства се могу разврстати у четири групе, односно у својства у

вези са: функцијом, обликом, материјалом и начином израде (Табела 1.2). Машински део је потпуно дефинисан ако су дефинисана сва предходна својства. Између својстава једне групе и између група мора постојати потпуна корелација. То значи да се једно својство не може изабрати независно од других. Такође, то значи да је свако од својстава одређено другим својствима која су већ изабрана, односно која су позната. Развој производа заснован на релизацији симулација омогућавају конструкторима брзу реализацију облика, функције и технологичности новог производа кроз све фазе процеса развоја, од концептуалног и детаљног конструисања, до развоја и подешавања технологије израде. Основна идеја оваквог приступа лежи у томе што се уместо развоја физичког прототипа на почетку, тежиште ставља на развој и унапређење што тачнијег виртуелног прототипа. На тај начин се реализује велики број рачунарских тестирања на различитим варијацијама производа при чему се оптимизује облик, функција и технологичност израде.

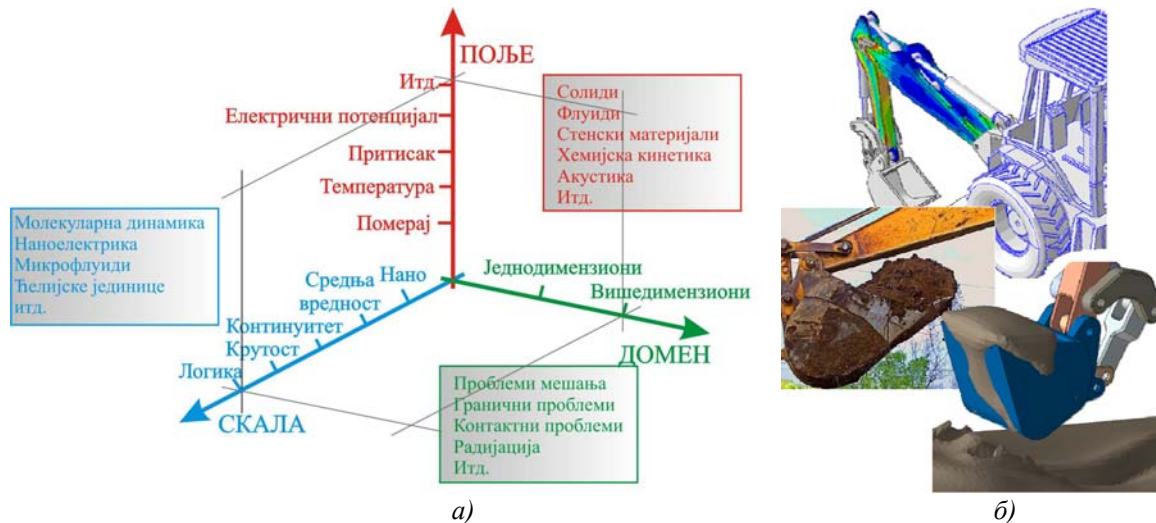


Слика 6.11 Интегрисани CAD/CAE/CAM алати базирани на концепту виртуелног прототајпинга [136]

На данашњем нивоу најефикаснији процес развоја производа и смањења времена и трошкова развоја, претставља ефективна примена развоја заснована на симулацијама кроз развој виртуелних прототипова којима се обухвата цео систем. Овакав приступ заснива се на реализацији три основна елемента, и то: дигитални модел (*DMU - Digital Mock Up*), функционални виртуелни прототип (*FVP - Functional Virtual Prototyping*) и виртуелна симулација производње (*VFS - Virtual Factory Simulation*). Дигитални модел претставља виртуелно описивање производа током конструисања, унапређења и производње, и интегрише све остале технологије виртуелног инжењеринга. Применом дигиталног модела конструктор је у могућности да реализује облик и уклапање разматраног дела конструкције (појединачног дела), разматрајући целокупан производ (склоп). У исто време, развојем функционалног виртуелног прототипа обезбеђује се реализација и подешавање функције дела, посматрано кроз функцију и понашање целог склопа и окружења коме тај део припада. На тај начин, комбиновањем тродимензионалних солид модела и модела окружења, кроз примену методе коначних елемената, обезбеђује се могућност веома тачног предвиђања понашања конструкције и одређивања њених оперативних перформанси, реализацијом виртуелних лабораторијских или виртуелних експлоатационих тестирања.

Виртуелна симулација производње, са друге стране обезбеђује да се разматрани део сагледа и из перспективе начина и технологије израде, узимајући у разматрање такође комплетан склоп и окружење посматраног дела. На тај начин се обезбеђује подешавање технолошких параметра и оптимизује процес производње. На слици 6.12.а приказане су могућности данашњих симулација, посматрано у односу на различите физичке процесе, домене и размере посматраног проблема. На слици 6.12.б дат је пример напонске анализе стреле и руке утоваривача, применом виртуелног прототипа. Дефинисањем карактеристика стенског материјала (густина, трење, кохезија итд) и технологије рада (врста захвата, дубина, брзина итд), помоћу ове симулације је могуће добити расподелу напона која би се јавила у експлоатационим условима.





Слика 6.12 а) Простор решавања проблема применом различитих врста симулација, б) Пример напонске анализе применом одговарајућег функционалног виртуелног прототипа [137]

## 6.2.2 Функционални виртуелни прототип склопа ведрнице и резног зуба

Када се говори о интегрисаном приступу конструисања резних зуба код багера континуалног дејства, основни задатак виртуелног прототипа је да се фазе пројектовања, конструисања, избора технологије израде и тестирања прототипа комплетно спроведу на рачунару, чиме би се утицало на скраћење времена и смањење трошкова развоја. Да би се то постигло, у првом кораку је неопходно изградити адекватан функционални виртуелни прототип. У складу са тематиком овог рада, циљ је развој и верификација виртуелни прототип ведрнице за багер ведричар, чија је основна намена рачунарско тестирање и напонска анализа будућих конструкција резних зуба. За дефинисање виртуелног модела примењена је општа шема развоја дата на слици 6.13.

У првој фази врши се креирање виртуелног прототипа комплетног система. У овој фази се врши дефинисање структуре и разлагање на саставне подсистеме и компоненте. Јасне везе које се у овој фази креирају између саставних компоненти допуштају развој верног и комплексног модела са могућим варијацијама. Цео систем виртуелног модела подељен је на следеће подсистеме: 1) подсистем ведрница-резни зуба, 2) подсистем ведрница-подлога и везивање за подлогу, 3) подсистем ведрница-инсталација за задавање оптерећења и 4) инсталација за задавање оптерећења, као што је приказано на слици 6.14.б. Солид модели генерисани су сагласно постојећој техничкој документацији. Анализа међусобних веза, које се јављају између ових подсистема, резултирала је њиховим повезивањем у једну функционалну целину. На тај начин су моделирани процеси и утицаји који се јављају као веза између компоненти, али и између комплетних подсистема.

Друга фаза изградње функционалног виртуелног модела је формирање виртуелног еквивалента за лабораторијско тестирање и тестирање на терену. У оквиру лабораторијског тестирања, виртуелни прототип захтева да се дефинише виртуелна тест опрема за репродуковање процедуре и услова који се остварују применом реалних уређаја и машина за испитивање. Након тога врши се дефинисање теста који одражава актуелне или потребне експлоатационе услове. За успешан функционални виртуелни прототип, појединачно посматрано, најважније је дефинисање симулације на начин на који се изводе реални тестови на физичком прототипу. Тестирање физичких прототипова углавном обухвата тестирање и у лабораторији и у експлоатационим условима. Применом виртуелног прототипа, неопходно је направити виртуелни еквивалент лабораторијског теста и теста у експлоатационим условима. Ово је веома важно, обзиром да се на овај начин значајно олакшава верификација дефинисаног модела, накнадним тестирањем. У складу са лабораторијским тестирањем, успешан виртуелни прототип подразумева да се у њега унесе и моделира и постојећа опрема на којој се тестови реализују, као и гранични услови које та опрема производи, као што је случај код везивања ведрнице за подлогу, повезивање инсталације за генерисање силе, процес задавања силе итд. Функционални виртуелни модел ведрнице припремљен је за лабораторијско испитивање постојећег једноделног резног зуба до границе разарања, како је то приказано на слици 6.14.а. Са друге стране,

посматрајући експлоатационо тестирање, у оквиру модела виртуелног прототипа неопходно је описати све тренутне услове рада који произилазе из радног окружења. За разлику од експлоатационог испитивања, испитивања у лабораторијским условима су строго контролисана и управљива, па се као таква директно могу контролисати и поредити на виртуелном прототипу, што значајно олакшава ствар при верификацији виртуелног прототипа, па је због тога лабораторијско испитивање ведрице усвојено као верификатор виртуелног модела.

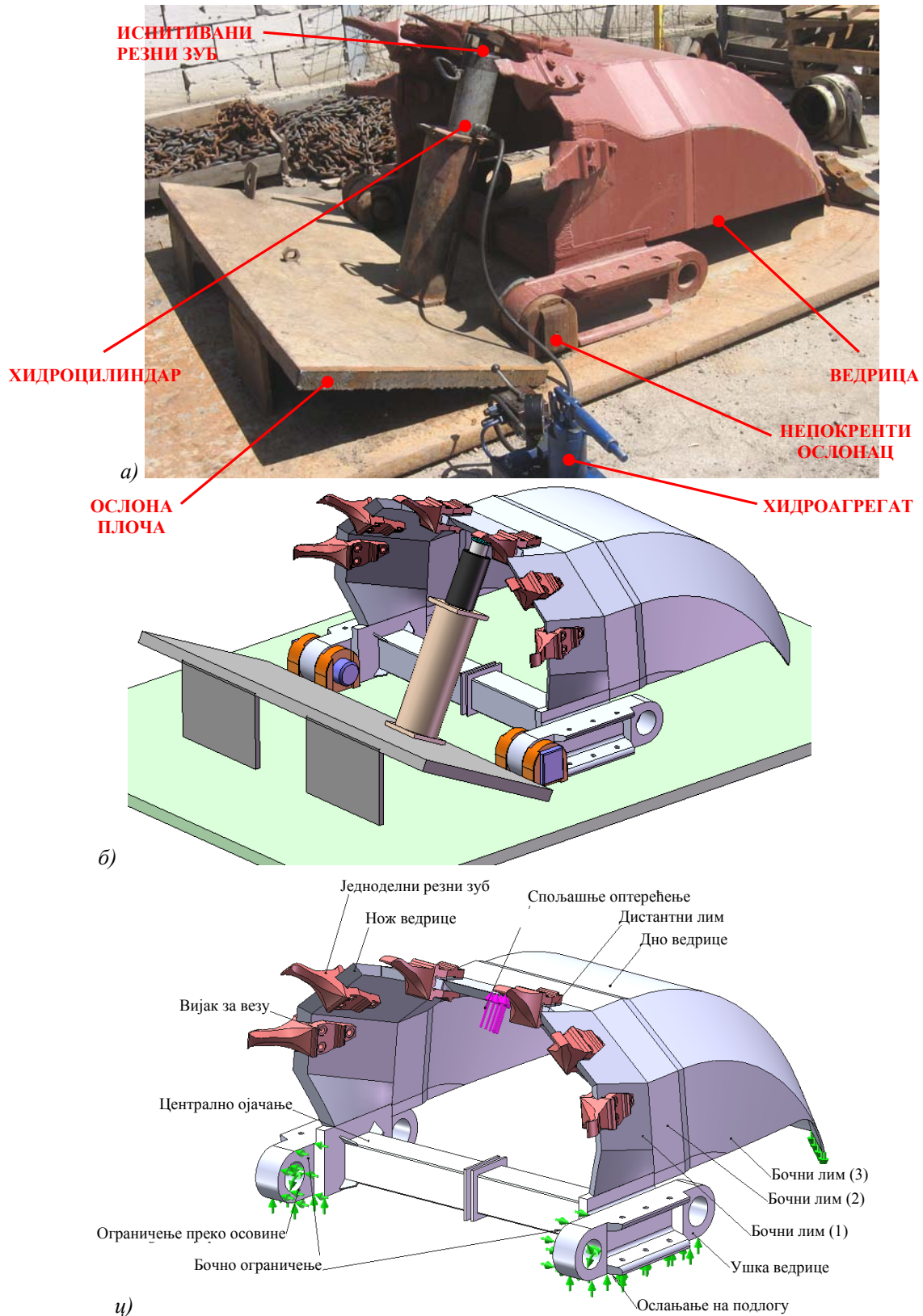


Слика 6.13 Шематски приказ развоја функционалног виртуелног прототипа [136]

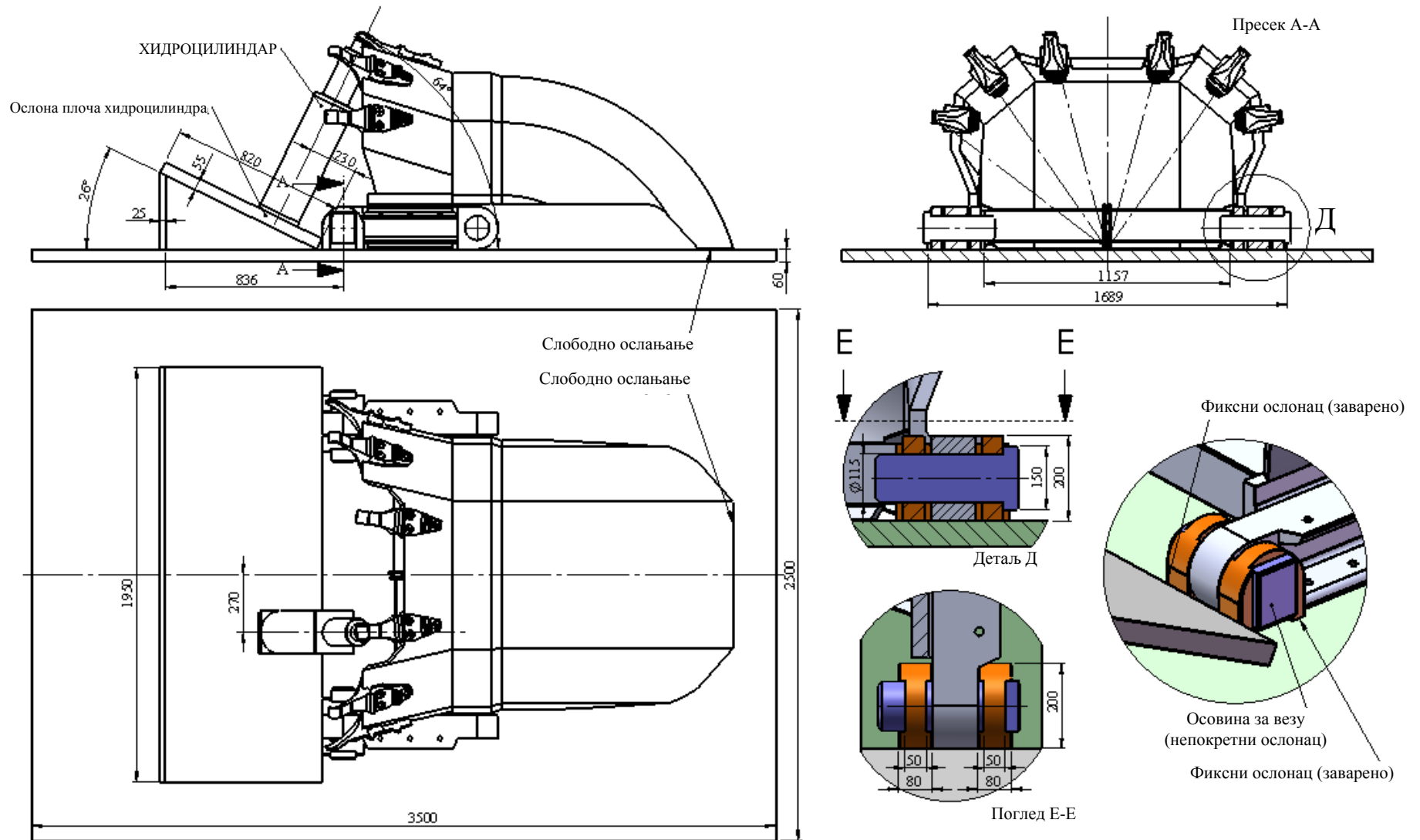
У наредном кораку врши се верификација, односно, виртуелни и физички модели се тестирају на идентичан начин, а након тога се врши упоређивање и изводе закључци. Накнадним подешавањем виртуелног теста добија се поуздани модел за будућа тестирања. Исправно моделиран и верификован функционални виртуелни модел претставља значајну базу знања, на основу које се могу доносити значајне одлуке везане за конструкционо решење. У складу са тим, неопходно је осигурати, да подаци добијени симулацијама и анализом виртуелног модела одговарају ономе што се дешава у реалним процесима. Типичан процес верификације заснива се на поређењу резултата добијених тестирањем виртуелног и физичког прототипа на скоро идентичан начин. У току процеса верификације, уочавају се они параметри и/или процеси који имају пресудну улогу на разматрану конструкцију, и као такви детаљно анализирају и упоређују.

Током примене функционалног виртуелног прототипа врши се његова надоградња, усавршавање и подешавање. У оквиру овога, једноставнији иницијални виртуелни прототипови се компонују у комплексне функционалне виртуелне прототипове (на пример, подсистем модуларног резног зуба, који се затим проширује на ведрицу или цео подсистем копања багера). На овај начин добијају се модуларна решења која могу знатно проширити поље деловања основног функционалног виртуелног прототипа, при чему се накнадна подешавања односе само на поједине ново додате сегменте. (нпр. испитивање ведрице, тако што се осим резних зуба додају специјали секачи у облику ножа, у том случају може се искорити виртуелни модел ведрице са резним зубима, коме се додају нови модули, који са касније подешавају). Усавршавање увек иде у два правца, у правцу усавршавања тачности и верности модела, и у правцу усавршавања самог решења производа. Виртуелни прототипови, генерално посматрано, могу имати различите нивое комплексности и могу бити изграђени од одговарајућих подсистема. Због тога, подешавањем појединих подсистема виртуелних прототипова, односно дефинисањем њихове тачности и опсега деловања и њиховим повезивањем у системе, могу се добити веома комплексни модел (нпр.

виртуелни прототип комплетног багера ведричара би се могао моделирати тако што би се реализовали и подесили виртуелни подсистеми вучног ланца, ведрице, резног зуба итд.).



Слика 6.14 Лабораторијско тестирање физичког прототипа, б) Изградња виртуелног прототипа лабораторијског тестирања, ц) Основни елементи ведрице и дефинисање почетних услова ограничења и оптерећења



Слика 6.15 Основни параметри за дефинисање виртуелног и физичког теста разарања резног зуба на ведрици



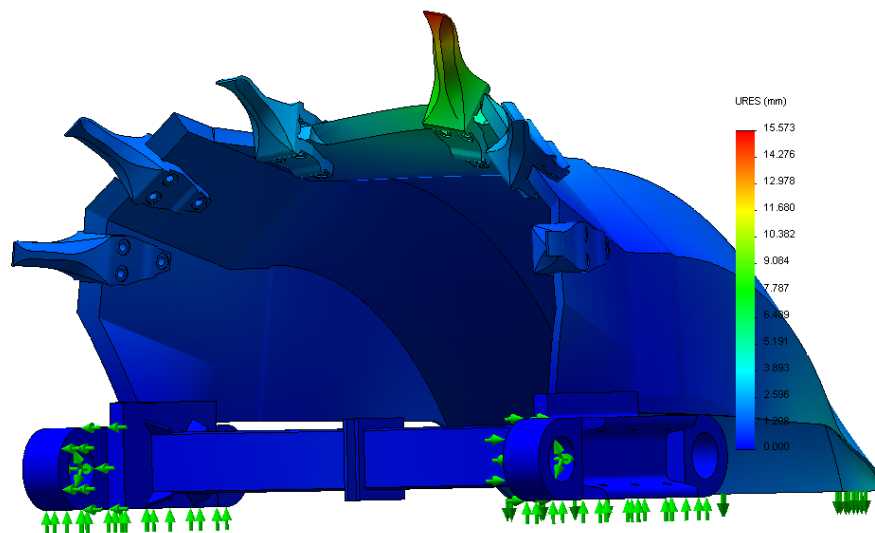
Завршна фаза у изградњи јесте аутоматизација процеса изградње сличних виртуелних прототипова. Основни циљ примене функционалног виртуелног прототипа огледа се у значајном смањењу трошкова развоја производа. Како би се у исто време смањило и време развоја, неопходно је аутоматизовати процесе којима се дефинише један функционални прототип. Овој фази се може приступити тек онда када се обезбеди довољно „знања“ и „искуства“ са предходно развијеним моделима. Аутоматизацијом се постиже да се нови слични виртуелни прототипови генеришу за доста краће време, на тај начин што се „позајмљује“ структура и већина постојећих компоненти. Додатна подешавања се односе само на оне сегменте који се разликују од предходно развијеног виртуелног прототипа. Коришћење може бити аутоматизовано онда када већ постоји урађен и кроз више циклуса вреднован модел виртуелног прототипа, и када је он „увежбан“ кроз промену сопствених карактеристичних параметара. Аутоматизација процеса подразумева да се постављена и верификована правила, уграђују у исте или сличне моделе, без или са веома малом накнадном провером.

Функционални виртуелни прототип за анализу носивости резних зуба приказан је на слици 6.14.б и 6.14.ц. Подешавање виртуелног и физичког теста реализовано је као што је приказано на слици 6.15. Анализом носивости обухваћена су два предња чеона резна зуба, али је због каснијег проширења функционалног виртуелног прототипа и на остале зубе, извршено моделирање комплетног система (ведрица-резни зуби).

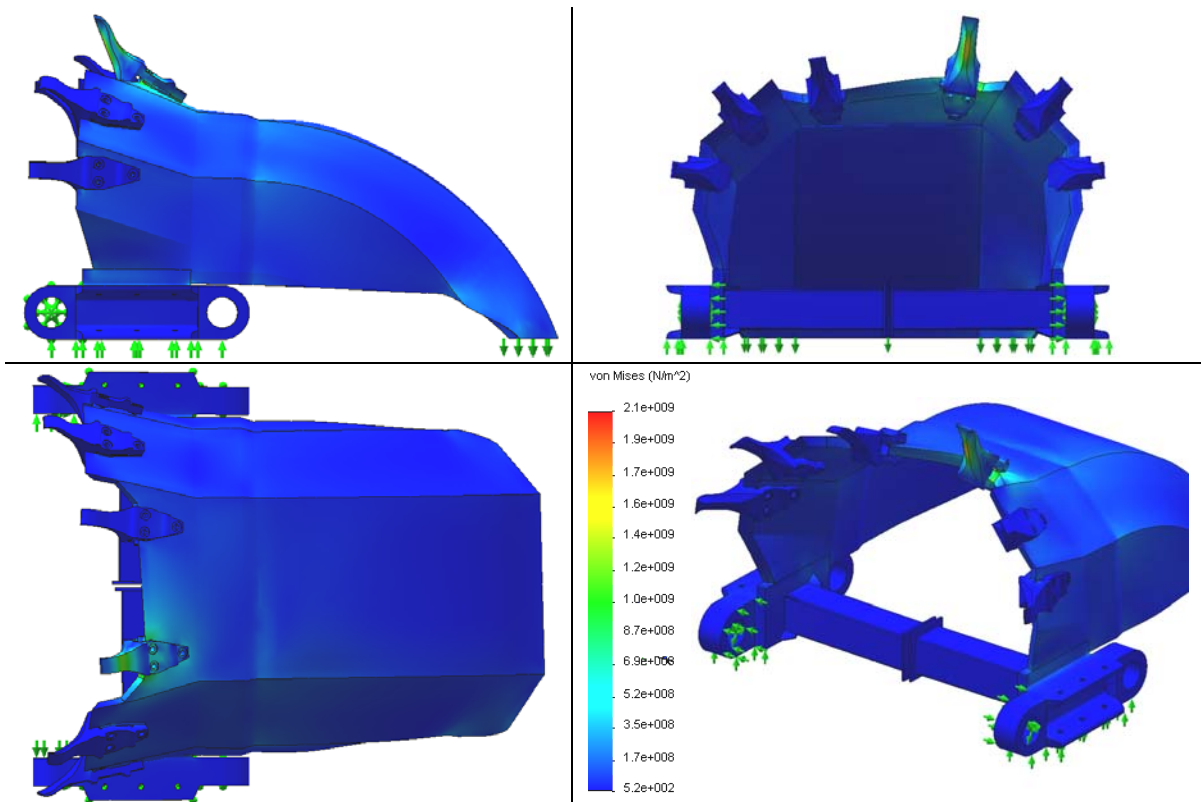
Спољашње оптерећење дефинисано је на врху резног зуба, под углом од  $\sim 60^\circ$  у односу на хоризонталу. Овакав начин дефинисања силе представља критичан случај, и дешава се када резни зуб улази у захват током заокретања ведрице око спољашње звезде багера. На исти начин, дефинисана је сила на виртуелном моделу. На виртуелном моделу, моделирање ослањања реализовано је као на слици 6.14.ц. Овај модел одговара случају везивања ведрице за вучни ланац багера преко одговарајућих ушки. Ослањање ведрице током физичког теста реализовано је на исти начин, помоћу осовина којима је ведрица преко ушки и крутих ослонаца везана за подлогу, чиме се постигло ослањање као у експлоатационим условима. Техничке карактеристике опреме која је коришћена за задавање силе дате су у прилогу овог рада.

Након подешавање реализовано је физичко тестирање, а затим идентичним поступком и виртуелно тестирање, у циљу верификације виртуелног прототипа. Основни циљ анализе носивости је утврђивање вредности максималне силе коју може да пренесе склоп резни зуб-ведрица, а при коме наступа запреминско разарање. Током физичког тестирања сила је постепено повећавана (слика 6.18.а) до тренутка разарања. Током експеримента праћене су и мерене вредности насталих деформација.

У анализи функционалног виртуелног прототипа, интезитет спољашње силе на моделу задат је сходно добијеној максималној вредности силе при тестирању физичког прототипа. На сликама 6.16. и 6.17, приказани су добијени резултати анализе током виртуелног експеримента.



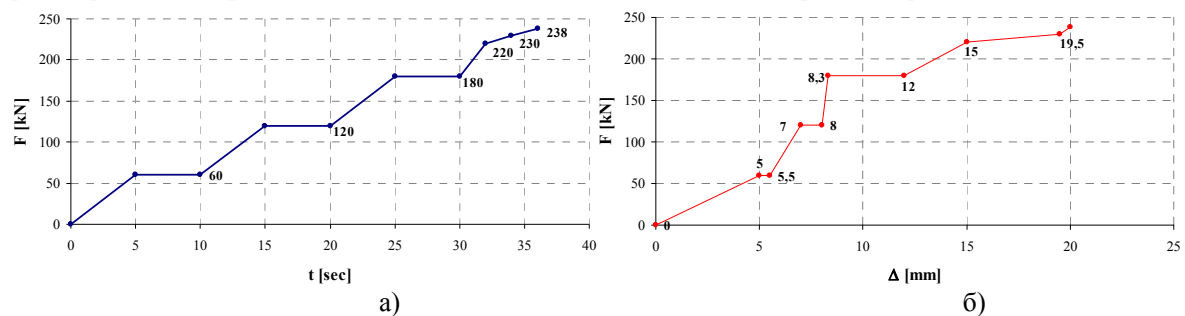
Слика 6.16 Анализа помераја посматране тачке на врху резног зуба, у тренутку мало пре разарања



Слика 6.17 Напонска слика добијена испитивањем функционалног виртуелног прототипа у оквиру виртуелног експеримента

Поређењем резултата лабораторијског тестирања физичког модела и виртуелног теста развијеног функционалног виртуелног модела, долази се до следећег закључка. Добијени резултати имају веома велики степен поклапања, који се пре свега односи на моменат пре самог разарања резног зуба. Измерене вредности максималног помераја ( $\Delta$ ), мерено на месту дејства силе, били су у распону од  $16 \div 19\text{mm}$  (слика 6.18.б), док је рачунарском анализом добијено да су износили око  $16\text{mm}$  (слика 6.16). Разарање једноделног резног зуба наступило је при спољашњој сили на врху резног зуба од  $\sim 240\text{ kN}$ . Убацивањем ове вредности оптерећења у виртуелни модел, добијено напонско стање са слике 6.17. указује да су нивои напона на критичном месту, а за предходно дефинисане материјале ведрице и резног зуба на граници критичних напона разарања.

Анализом понашања ведрице и резног зуба у оба случаја, и поређењем добијених резултата додатно је подешен виртуелни модел. Подешавања су углавном ишла у правцу адекватнијег моделирања међусобних везе компонената виртуелног модела (нпр. моделирање везе резног зуба и ведрице). Може се закључити да је примена овако дефинисаног виртуелног прототипа који се користи за анализу носивости резних зуба, обзиром на разматрану проблематику, потпуно адекватна. Такође, у циљу валидности добијених резултата и у циљу обезбеђивања сигурности при рачунарском тестирању носивости, неопходно је увести степен сигурности у распону  $1.1 \div 1.2$ .



Слика 6.18 а) Дијаграм спољашњег оптерећења, б) Дијаграм измерених вредности помераја у тачки задавања силе



### 6.3 АНАЛИЗА НАПОНСКОГ СТАЊА

Напони и промене напона су основни узрок замарања структуре материјала резних зуба, њиховог деформисања, настајања напрелина и ломова. Напони по запремини резног зуба су по правилу распоређени неравномерно. Степен неравномерности је у непосредној зависности од величине и расподеле спољашњег оптерећења, од облика и начина везивања резног зуба на ведрицу, али и од позиције и оријентације резног зуба у тренутку захвата. Величине напона и њихова расподела су од пресудног значаја за развој и анализу стања и радне способности резних зуба. Применом интегрисаног приступа обезбеђује се симултана анализа, која за циљ има генерисање облика резног зуба и његових димензија, а на основу анализе добијених резултата о величини и расподели напона. На тај начин, на виртуелном моделу могуће је веома брзо извршити адекватне измене и оптимизовати облик и димензије, све до постизања оптималне расподеле и величине напона и деформација.

Напони у машинским деловима током радног времена по правилу су променљиви. Промене су углавном стохастичког карактера. У зависности од циља анализе, стохастичка промена напона се може апроксимирати неком од аналитичких функција. Ако је оптерећење такво да током експлоатационог века доведе до свега неколико хиљада промена напона, или ако су амплитуде промене напона мале, онда се у тим случајевим проблем посматра као да је статички. Напони и оптерећења могу се мењати на исти начин, односно промена напона се остварује сразмерно оптерећењу. То су сагласне промене код којих се и оптерећење и напон мења на исти начин и могу се поистоветити. У случају да није тако, односно да промена напона одступа од промене оптерећења, говори се о несагласним променама. Из тог разлога, за анализу је погодније дефинисање спектра напона од спектра оптерећења. На слици 6.19. приказани су чиниоци у анализи напона и примена анализа у процесу конструисања.



Слика 6.19 Структура подручја конструисања и напони (*Design for stress*) [19]

Основне зависности између геометријских и физичких величина у механици континуума свде се углавном на постављање веза између стања напона и стања деформације, и спољашњег оптерећења. Методе структурне анализе које се користе за решавање постављених једначина, односно одређивање потребних параметара, могу се сврстати у две групе: аналитичке и нумеричке. Аналитички приступ, односно решавање диференцијалних једначина којима се описује стање напона и стање деформација, код сложенијих структура, геометријских облика и компликованих контурних услова као што је случај резних зуба, најчешће не дају задовољавајуће решење. Други приступ користи методу коначних елемената и претпоставља дискретизацију у физичком моделу, а крајњи резултат се добија решавањем система алгебарских једначина.

Да би се дефинисао облик и димензије резног зуба, али и да би се дефинисао њихов положај, оријентација и распоред на ведрици багера, потребно је јасно дефинисати величину, карактер, учесталост и трајање оптерећења, које се јавља као последица интеракције са стенским материјалом. Ако ови подаци нису познати конструктор се мора ослањати на претпоставке,

апроксимације, податке добијене мерењима и очекивани век конструкције [36]. У сваком случају, мора се на неки начин доћи до оптерећења које се јављају при различитим условима експлоатације. Постоје стања и процеси који нису до краја теоријски разрађени, или су толико сложени да не дају задовољавајуће резултате. У таквим случајевима се користе емпиријске формуле или резултати експеримента. Без обзира да ли су сва питања теоријски разјашњена, конструктор мора наћи начин да дефинише све димензије. Спољашња оптерећења и карактеристике изабраних материјала представљају главне ограничавајуће факторе за избор димензија резних зуба.

### 6.3.1 Напонска анализа резних зуба на бази усвојеног функционалног виртуелног прототипа

Најчешће коришћени материјали за израду резних зуба који се користе код багера континуалног дејства су високолегирани мангански челици отпорни на хабање, нисколегирани мангански и други нисколегирани челици отпорни на хабање и високолегирани хромни челици [11, 138, 139].

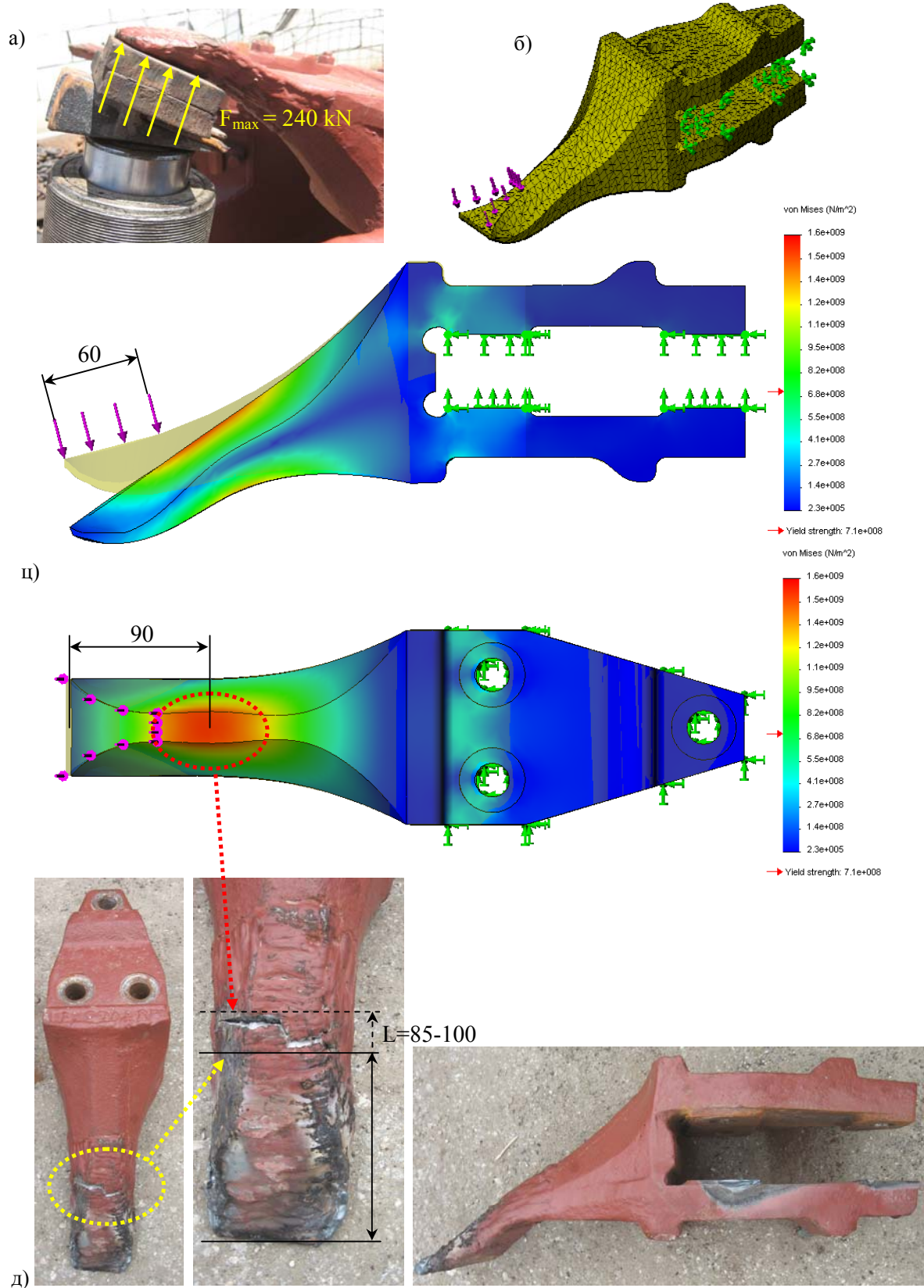
Обзиром да су резни зуби изложени хабању у условима високих притисака и удара, то се за њихову израду користе високолегирани мангански челици аустенитне структуре, као што је *Č.3160* (1,2% *C*, 12,5% *Mn*). Структура овог челика после ливења састоји се од аустенита и веће количине мешовитих карбида, распоређених по границама аустенитних зрна, што смањује чврстоћу и жилавост. Због веће количине карбида ливени делови се термички обрађују. Процес тзв. гашења обухвата загревање до температуре 1050÷1100°C, а затим хлађење у струји воде, услед чега се разлаже карбид, а челик добија потпуну аустенитну структуру. Основни недостатак ове врсте челика је у чињеници да се веома тешко обрађује резањем. Нисколегирани мангански и други нисколегирани челици, као што је *Č.3132* (0,5% *C* и 1,8% *Mn*), употребљавају се у случајевима када је примена високолегираних манганских челика отпорних на хабање нецелисходна из економских разлога или због тешке обраде. Отпорност нисколегираног манганског лива на хабање заснива се на отпорности фаза добијених отпуштањем мартензита. Ова група челика у каљеном и отпуштеном стању има, поред добре отпорности на хабање, и високу пластичност. Отпорност високолегираних хромних челика на абразију, заснива се на структури која се састоји из високог садржаја карбидне фазе и високолегираног мартензита, уз присуство заосталог аустенита. За израду висококвалитетних резних зуба који се користе за ископавање јаловине, добри резултати се постижу применом челика са садржајем више од 1,65% *C* и више од 12% *Cr*, који припадају групи ледебуритних челика. Ови челици имају одличну издржљивост и постојаност резне ивице, отпорност на хабање, као и постојаност облика и димензија, уз одговарајућу жилавост. Њихова одлична резна постојаност заснива се на присуству у структури и до 30% карбидне фазе (легираног цементита и карбида хрома). Поред хрома ови челици се често легирају са *Mo*, *W*, *V* и др, што им повећава отпорност на хабање и способност резања.

У табели 6.3. дати су напон течење и затезна чврстоћа материјала од којих су израђени резни зуби и ведрица, а који су коришћени у анализи напонског стања.

**Табела 6.3** Напон течења и затезна чврстоћа делова резног зуба и ведрице

Део/склоп	Ознака материјала	Напон течења [N/mm <sup>2</sup> ]	Затезна чврстоћа [N/mm <sup>2</sup> ]
Једноделни резни зуб	<b>42CrMo4</b>	710	1100
Модуларни зуб (резни део)	<b>42CrMo4</b>	710	1100
Модуларни зуб (носач)	<b>CK45</b>	530	650
Ведрица и ојачања	<b>EN S355J2G3</b>	300	580
Ушке на ведрици	<b>EN C35E</b>	170	580
Вијак М20* (к.ч 10.9)	<b>34Cr4</b>	900	1000

\* за везу резних зуба и ведрице



Слика 6.20 а) Површина преко које се преноси спољашње оптерећење, б) Дефинисање модела, ц) Напонска слика након максималног оптерећења, д) Разорени резни зуб након експеримента

Применом функционалног виртуелног прототипа, извршена је анализа напонског стања резног зуба у два случаја. У првом случају је анализиран постојећи једноделни резни зуб (слика 6.20), док је у другом случају анализиран модуларни резни зуба *TF14038* (слика 6.21÷6.22).

Приликом дефинисања правца, вредности и нападне тачке силе, којом је оптерећен физички прототип, разматране су три важне чињенице. Прва је везана за правац силе, друга за њен интензитет, а трећа на основни принцип дејства силе на резни зуб. Правац силе је дефинисан тако да приближно одговара најнеповољнијем случају захвата стенског материјала. То је случај када ведрица бегера ведричара заокреће око спољне звезде и улази у први захват. Подешавање правца силе на физичком прототипу изводи се задавањем положаја, и оријентације хидроцилиндра и његовог ослонца (слика 6.15). Обзиром да је експеримент имао за циљ разарање резног зуба, интензитет силе је постепено повећаван до тренутка разарања. Измерена сила у том тренутку, је узета као сила за коју је извршена напонска анализа. Током рада у експлоатационим условима, резни зуб није оптерећен концентрисаном силом, обзиром да се оптерећење увек преноси преко једне или више површина. Због тога се у лабораторијском експерименту сила на резни зуб преноси посредно, како је приказано на слици 6.20.а и слици 6.21. На исти начин је моделирана сила у оквиру функционалног виртуелног прототипа.

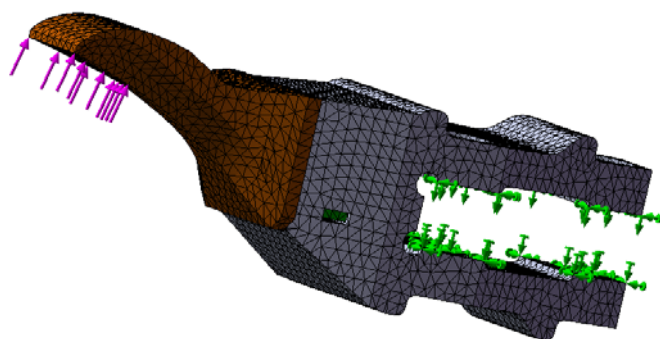
Резни зуб се за ведрицу везује преко три завртња, па је у току виртуелног експеримента разматрано неколико модела везе. Модел везе је додатно усаглашен након извођења лабораторијског тестирања. На слици 6.20, приказан је један од резултата анализе у оквиру виртуелног и физичког тестирања носивости једноделног резног зуба.

Разарање једноделних резних зуба, током лабораторијског експеримента, настаје на растојању  $85\div 100\text{ mm}$ , рачунато од врха резног зуба (слика 6.20.д). Пре разарања долази до значајне пластичне деформације врха резног зуба. На слици 6.20.ц, може се уочити да је максимална вредност напона генерисана на растојању  $90\text{ mm}$  од врха резног зуба. Може се уочити да је вредност напон на овом месту у распону од  $1200\div 1500\text{ N/mm}^2$ . Ове вредности су веће од вредности затезне чврстоће резног зуба која износи  $1100\text{ N/mm}^2$ , што указује на то да ће на овом месту највероватније доћи до разарања.

Након верификације виртуелног модела са једноделним зубом реализован је виртуелни експеримент на модуларном резном зубу *TF14038*. Дефинисање оптерећења и ограничења на виртуелном моделу, извршено је на исти начин како је то реализовано са једноделним резним зубом (слика 6.21.б). Током напонске анализе уочено је да је критичан елемент носач резног зуба. У овом случају варирано је спољашње оптерећење у распону од  $150$  до  $250\text{ kN}$ . Расподела напона на носачу резног зуба, при оптерећењу од  $220\text{ kN}$ , приказана је на слици 6.22. Са слике се јасно уочава зона (доњи део носача) у којој се генеришу напони од приближно  $400$  до  $500\text{ N/mm}^2$ . Ова вредност напона је веома блиска напону течења материјала носача ( $530\text{ N/mm}^2$ ), што указује на постојање деформације конструкције. На слици 6.23.а приказана је расподела степена сигурности, а на слици 6.23.б одговарајући померај конструкције респективно.



а)

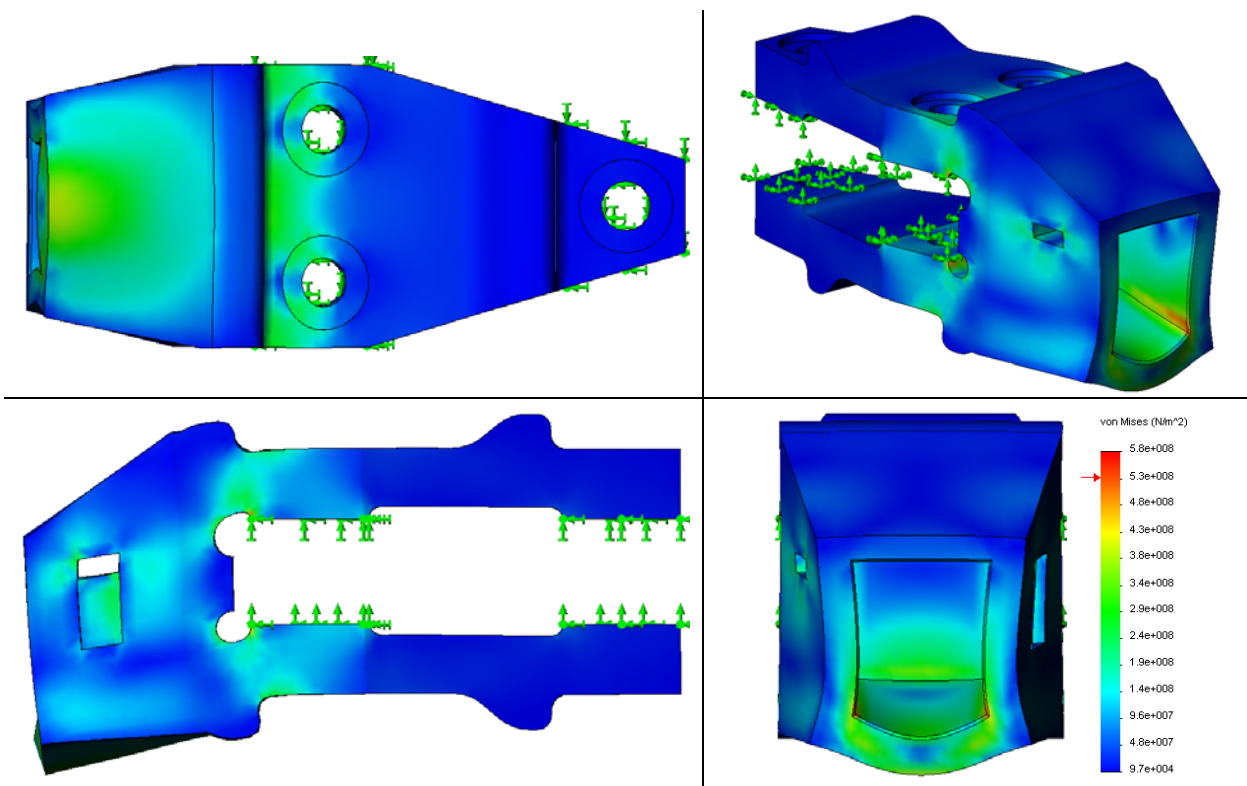


б)

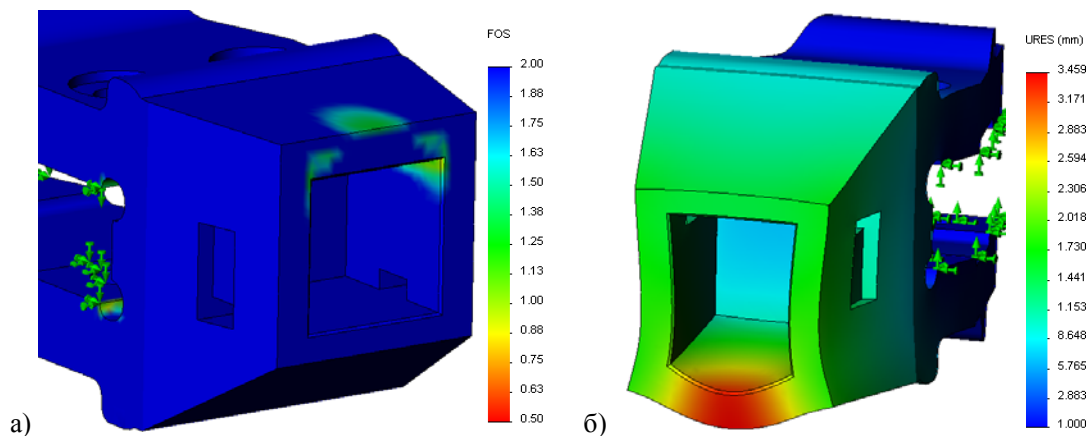
Слика 6.21 Дефинисање оптерећења и ограничења за извођење експеримента на а) Физичком прототипу, б) Виртуелном прототипу



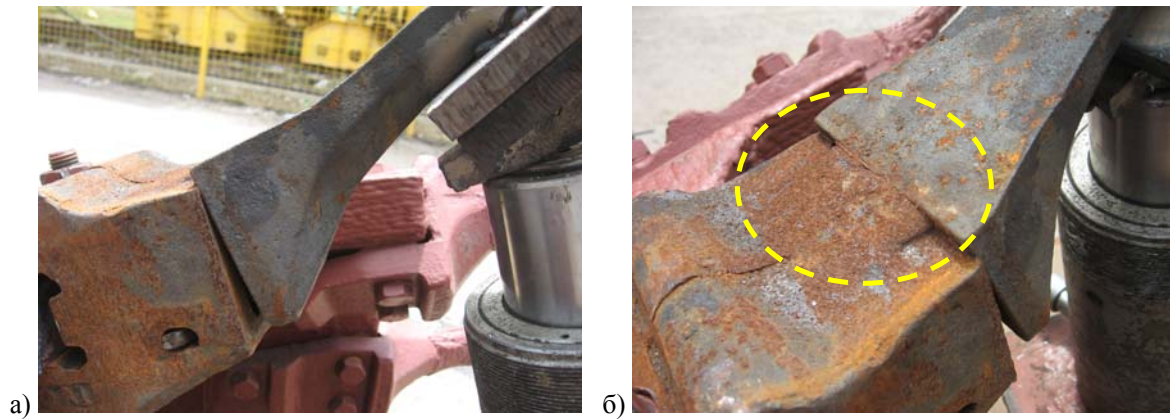
Узорковање комада за испитивање носивости модуларног резног зуба *TF14038*, у оквиру лабораторијског тестирања, извршено је из „нулте“ серије. При тестирању је коришћен иста опрема и идентичан поступак, као што је урађено током испитивања једноделног зуба. Просечна вредност оптерећења, при коме је долазило до разарања, износила је  $190\text{kN}$ . До разарања је долазило на носачу резног зуба, као што је приказано на примеру са слике 6.24 а и б. Поређењем резултата који су добијени напонском анализом функционалног виртуелног прототипа и лабораторијском анализом физичког прототипа модуларног резног зуба *TF14038*, може се уочити велики степен поклапања. Резултати виртуелног експеримента указују на област у којој ће највероватније доћи до разарања, што је и потврђено током реализације лабораторијског тестирања (слика 6.22 и 6.24). Одступање које се овде јавља односи се на вредност спољашњег оптерећења, које доводи до разарања. У виртуелном експерименту оптерећење је износило  $210\div 230\text{kN}$ , а у лабораторијском експерименту износило је  $190\div 200\text{kN}$ . Због тог у циљу валидности добијених резултата, и у циљу обезбеђивања сигурности при рачунарском тестирању носивости, неопходно је увести степен сигурности у распону  $1.2\div 1.3$ .



Слика 6.22 Напонско стање носача модуларног резног зуба при оптерећењу од  $220\text{kN}$

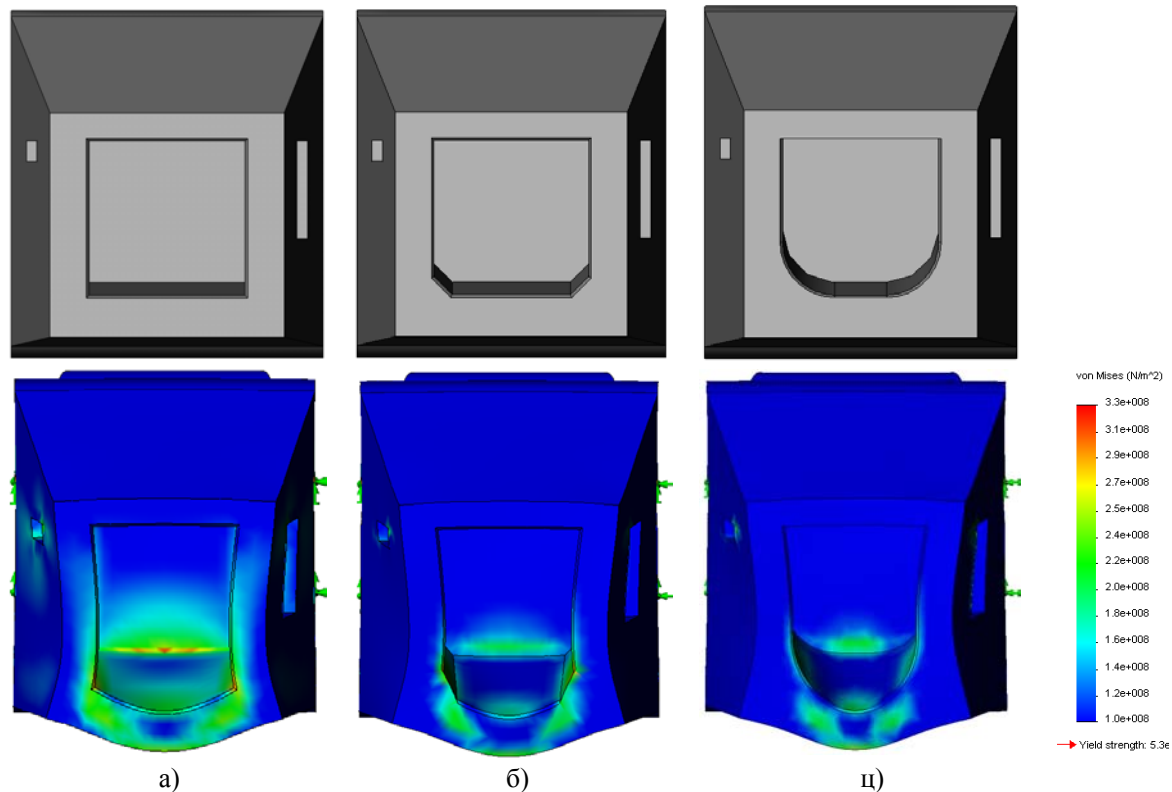


Слика 6.23 а) Расподела степена сигурности, б) Расподела помераја на носачу



Слика 6.24 а) Разорени физички прототип, б) Критична места на носачу на коме су се дешавала разарања

Основни узрок разарања носача резног зуба је постојање концентрације напона. Да би се отклонили ови недостаци и добила равномернија расподела напона, извршена је геометријска оптимизација ових места.



Слика 6.25 Оптимизација носача резног елемента након уочавања критичних места на конструкцији. а) Постојеће решење са концентрацијом напона, б) Оптимизација обореном ивицом 10mm x45°, ц) Оптимизација радијусом заобљења  $r=20\text{mm}$

Уопштено говорећи о оптимизацији, заправо се мисли на побољшане почетне конструкције кроз итеративни поступак, да би се као резултат добило оптимизовано решење по неком унапред дефинисаном критеријуму. Метод коначних елемената се у овом случају може користити за оцену решења према том задатом критеријуму [140]. Постоје различити приступи оптимизације, али посматрањем проблематике у оквиру овог рада могу се издвојити три. То су оптимизација уклањањем материјала, оптимизација подешавањем мера и оптимизација подешавања облика.

Оптимизација уклањањем материјала базира се на уклањању оних делова почетног масива конструкције који у предходној итерацији нису имали напон изнад дозвољене границе. Ова метода



може специјално бити корисна у одређивању почетног облика конструкције резног зуба. У случају када је основни облик конструкције познат или када је велики део конструкције већ дефинисан, прикладније је користити оптимизацију подешавања мера која дозвољава промену облика само у дефинисаним границама. У овом случају, да би била извршена оптимизација, потребно је увести конструкционе променљиве које ће се варирати. Конструкционе променљиве описују систем, усваја их конструктор, а њихов утицај се добија помоћу анализе осетљивости. Оптимизација подешавањем облика базира се на аналогiji са одређеним облицима који се јављају у природи. У поступак оптимизације је укључен принцип раста прилагођен оптерећењу, који биолошке структуре користе да смање концентрацију напона, методом додавања, односно одузимања чија је функција циља уједначавање интезитета напона. Поступак ове методе се састоји у итеративној процедури кориговања облика модела, док се напони не уједначе или док конструктивни захтеви ограниче померања.

На слици 6.25. приказани су резултати оптимизације која је извршена у циљу елиминисања концентрације напона на доњем делу носача модуларног зуба. Анализом различитих утицаја који доводе до разарања зуба на овом месту извршена је конструкциона оптимизација како би се добила равномернија расподела напона, а без великих измена конструкције и технологије израде носача. У овом случају усвојено је спољашње оптерећење од  $190kN$ , које је добијено као просечна вредност разарања у лабораторијском експерименту.

### 6.3.2 Напонска анализа резних зуба на бази претпостављеног спољашњег оптерећења

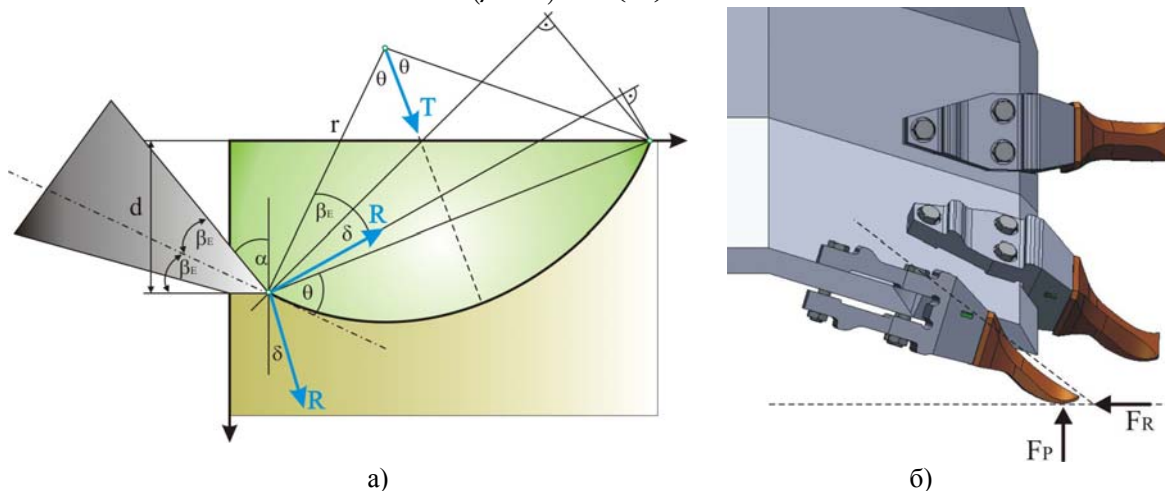
Разматрање, оцена и усвајање конструкције резних зуба за багере континуалног дејства су процеси који изискују доношење одлука са некомплетним подацима, јер претпоставке које се односе на униформност материјала, варијабилност склопова, карактеристике стенских материјала и општој непредвидљивости самог процеса копања, су непогодне са становишта мерења, квалификовања и документовања. У односу на ову несигурност, конструктор мора користити идеализовани компјутерски модел са јасним граничним условима којима се описује процес разарања стенског материјала резним зубима. Кључ успеха у светлу ове три наизглед неконтролисане околности је научна квалификација од укључених несигурности. То значи да основне поставке проблема процеса копања и разумевање потребних претпоставки, уз адекватну анализу напонских стања резних зуб за различите услове оптерећења и ограничења, могу омогућити лакше доношење основних конструкционих одлука на основу некомплетних података.

Да би се реализовала комплетна напонска анализа конструкције модуларног резног зуба, неопходно је извршити симулације које би узеле у обзир услове сличне онима који се јављају током рада резног зуба у експлоатацији. То значи да је потребно моделирати спољашње оптерећења и услове ограничења, које се могу појавити у реалним условима. Када се говори о циљу овакве анализе треба размотрити неколико веома важних питања. Прво, да ли је важније предвидети тачно решење проблема или је довољно предвидети његове трендове? Друго, који ће специфични подаци помоћи у доношењу потребне инжењерске одлуке и оцени конструкцијског решења резног зуба? Када се анализа завршава, и како и на који начин се резултати анализе интерпретирају? Које апроксимације се могу искористити да би се решио дати проблем? Сва ова питања су важна, имајући у виду сложеност проблема копања и могућност да се такав проблем моделира и примени на довољно тачан начин.

На слици 6.26.a приказан је модел на основу кога је добијен израз за израчунавање оптерећења на резном елементу применом *Evans*-овог модела. На слици 6.26.b дат је модел модуларног резног зуба *TF14038* у захвату, са означеним одговарајућим оптерећењем у правцу кретања и нормално у односу на њега. У оквиру поглавља 4., анализирани су једноставни механички модели резања који су адекватни за израчунавање номиналног оптерећења резних зуба код багера континуалног дејства. Како је већ констатовано, примена *Evans*-овог модела за разматрање оптерећења је сасвим задовољавајућа, при чему су дефинисане једначине (4.34) и (4.35) за силе резања и силу продирања у облику:

$$\text{Сила резања: } F_R = 2 \cdot \sigma_z \cdot d \cdot \frac{\sin\left(\frac{\beta}{2} + \delta\right)}{1 - \sin(\beta + \delta)} \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot w$$

$$\text{Сила продирања: } F_p = 2 \cdot \sigma_z \cdot d \cdot \frac{\sin\left(\frac{\beta}{2} + \delta\right)}{1 - \sin(\beta + \delta)} \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot w$$



Слика 6.26 а) Evans-ов механички модел резања, б) Модел резног зуба у захвату

Примењујући предходне једначине и усвајањем потребних параметра процеса резања, израчунато је номинално оптерећење којима су изложени модулари резни зуби за посматрани случај копања. У табели 6.4 дат је преглед просечних физичко-механичких карактеристика стенског материјала на површинском копу „Тамнава-Западно поље“, на коме је реализован експериментални део тестирања „нулте“ серије резних зуба *TF14038*. Стенски материјал је сложене грађе и укључује угљене слојеве између којих се налазе прослојци глине и ситнозрни пескови. У оквиру експеримента резни зуби су радили на откопавању јаловине, која се углавном састоји од невезаних стена, глина, прашинастих глина, пескова и шљункова. У табели 6.5. приказане су усвојене вредности параметара, на основу којих је добијена вредност номиналног оптерећења резних зуба.

**Табела 6.4** Физичко-механичке карактеристике стенског материјала на „Тамнави-Западно поље“

Литолошки чланови, комплекс	Влажност [%]	Запреминска тежина [ $kN/m^3$ ]	Угао унутрашњег трења $\phi$ [°]	Кохезија $c$ [ $kN/m^2$ ]
Квартних глина (А)	25,00	19,90	25°	16,00
Пескова алувијалних(Б/1)	22,00	18,10	26°	1,00
Шљункова алувијалних	30,00	19,00	28°	0,00
Алувијалних шљункова и пескова (Б/1 и Б/2)	29,00	18,60	30°	2,00
Понтских глина (Ц <sub>1</sub> )	31,00	18,60	25°	20,00
Угља (Д)	-	11,50	39°	30,00
Понтских пескова (Ц/2)	20,00	17,10	28°	4,00
Угљевита глина (Ф/2)	58,00	16,40	16°	15,00

**Табела 6.5** Усвојене вредности величина за израчунавање силе применом *Evans*-овог модела

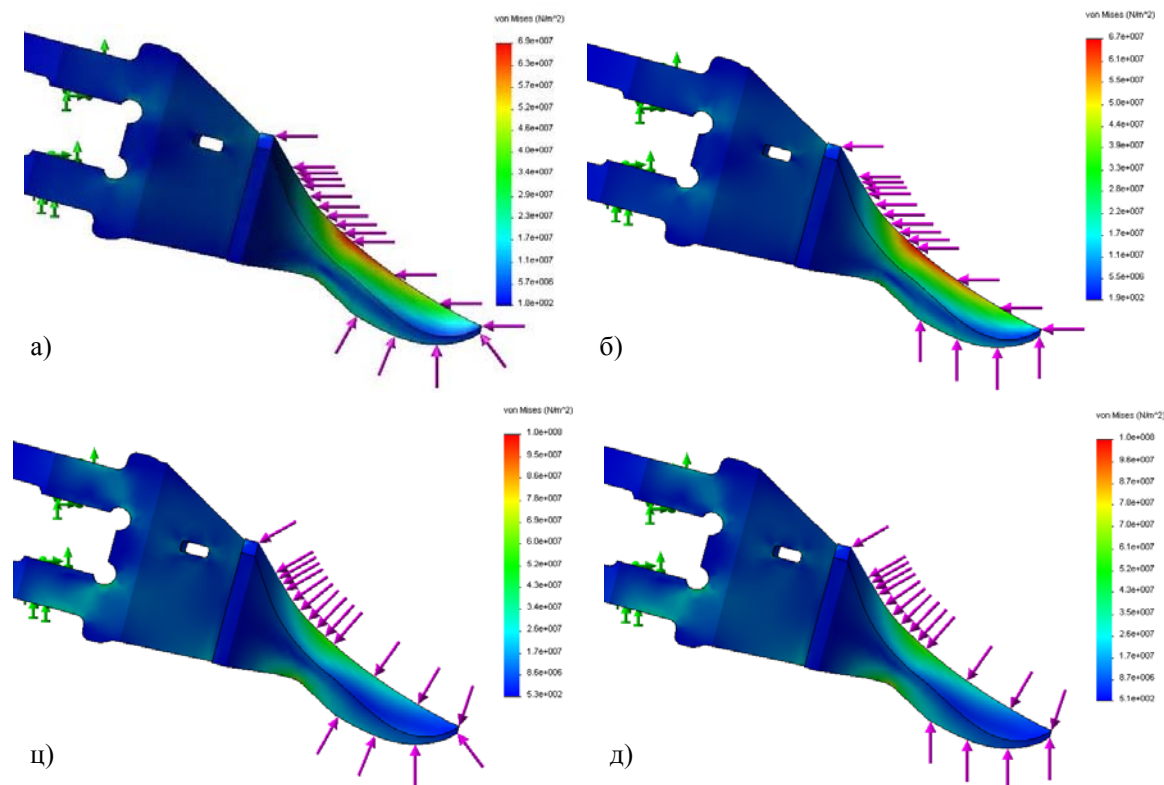
Назив	Ознака	Вредност
Ширина резног зуба (нов, делимично похабан)	$w$ [mm]	60÷120
Дубина резања, захват са резним зубом*	$d$ [mm]	40÷80
Угао клина резног зуба	$\beta$ [°]	22÷30
Униаксијална чврстоћа на притисак стенског материјала	$\sigma_p$ [ $N/m^2$ ]	5÷10
Униаксијална чврстоћа на затезање стенског материјала	$\sigma_z = (0.1) \cdot \sigma_c$	0.5÷1

Коефицијент спољашњег трења		$\mu$	0.4÷0.5
Угао спољашњег трења		$\delta = \arctg(\mu) [^\circ]$	21.8÷26.6°
ИЗРАЧУНАТА ВРЕДНОСТ СИЛЕ	Резања	$F_R$ [kN]	4.15÷74.35
	Продирања	$F_P$ [kN]	0.81÷19.92
	УКУПНО	$F_{uk}$ [kN]	4.22÷76.98

Анализом резултата из предходне табеле може се уочити велико расипање добијених вредности оптерећења. Због комплексности проблема дефинисања оптерећења на резном зубу, затим услед усвајања великог броја полазних претпоставки и немогућности егзактног израчунавања, добијене вредности не треба да буду пресудне у доношењу конструкционих одлука. Како је и раније истакнуто, израчунате вредности оптерећења треба да послуже као смерница у процесу конструисања, и водила при дефинисању димензија и облика резног зуба.

Вредности оптерећења које би се добиле директним мерењем (нпр. применом мерних трака) на резном зубу у самом процесу експлоатације, партикуларно гледано, могле би утицати на реализацију адекватнијих и тачних модела за симулацију. Међутим, опште решење проблема моделирања и поставке симулације копања не би било решено, јер постоји велики број других утицаја које није могуће измерити (нпр. одређивање тачног правца дејства оптерећења, број површина преко којих се оптерећење преноси, моделирање ослоњања резног зуба, карактеристике захваћеног стенског материјала, динамички утицаји и др.)

Пример расподеле напона за усвојене вредности отпора резања  $F_R=50kN$  и отпора продирања  $F_P=15kN$ , уз услов да се модулари резни зуб везује круто за ведрицу чиме се остварена веза може описати моделом конзоле, приказан је на слици 6.27.



Слика 6.27 Расподела напона за различито дефинисање спољашњег оптерећења и исте услове ослањања (сила резања  $F_R=50kN$ , сила продирања  $F_P=15kN$ )

Анализа је извршена како би се уочио утицај дефинисања правца спољашњег оптерећења на моделу (сила резања  $F_R$  и сила продирања  $F_P$ ) на укупну напонску слику, без промене интезитета и смера оптерећења. Разматрана су 4 случаја (слика 6.27.а÷д):

- а) Правац силе  $F_R$  поклапа се са правцем кретања; Сила  $F_P$  делује нормално у свакој тачки на

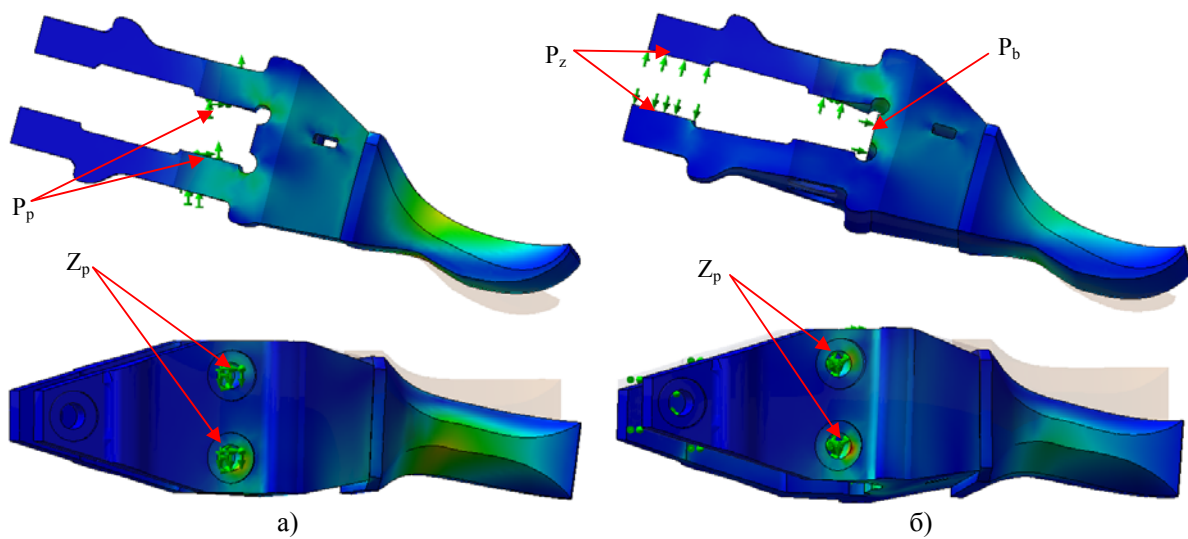
- леђној површини
- Правац силе  $F_R$  поклапа се са правцем кретања; Сила  $F_P$  делује у вертикалном правцу
  - Сила  $F_R$  делује нормално у свакој тачки на грудној површини; Сила  $F_P$  делује нормално у свакој тачки на леђној површини
  - Сила  $F_R$  делује нормално у свакој тачки на грудној површини; Сила  $F_P$  делује у вертикалном правцу

Добијени резултати указују на то да максимални напон на резном зубу варира у распону од  $70 \div 100 \text{ MPa}$ , за исти интезитет оптерећења и исти усвојени материјал зуба, а различите правце дејства оптерећења. На тај начин се види колики утицај на расподелу напона има не само вредност интезитета оптерећења, већ и начин његовог дефинисања у симулацији. Са становишта сигурности, у анализи носивости треба усвојити неповољнији случај, па је силу на грудној површини потребно моделирати као у случају ц) и д). Посматрајући само ова два случаја може се извући закључак да варијација правца силе  $F_P$  нема већег утицаја на укупну напонску слику.

У предходном случају веза између резног зуба и ведрице је посматрана као апсолутно крута. Уколико би носач резног дела био заварен за ведрицу, у том случају би модел круте везе био адекватан. Међутим, тренутно се у пракси користи веза са три завртња и одговарајућим подметачима. Због тога постоји велики број модела којима би се та веза могла описати. Обзиром да то захтева дубљу анализу и излази изван тематике овог рада, на слици 6.28 су приказана два карактеристична примера. У оба случаја интезитет оптерећења је исти, док је за правац и смер оптерећења усвојен модел са слике 6.27.ц, при чему се веза резног зуба и ведрице моделира на следећи начин:

- Веза се остварује круто преко два предња завртња ( $Z_p$  на слици 6.28.), и преноси преко предњих површина за ослањање  $P_p$
- Веза се остварује преко два предња завртња (није крута веза)  $Z_p$ , при чему се оптерећење преноси преко задњих површина  $P_z$  и делимично преко бочне површине, преко које се носач наслања на ведрицу  $P_b$ .

Модел ослањања дат на слици 6.28.б, има неповољнију деформациону слику од модела ослањања датог на слици 6.28.а. Са друге стране, у моделу са слике 6.28.б, може се уочити да је максимални напон сконцентрисан око два предња завртња, и релативно посматрано је  $\sim 30\%$  већи од вредности напона код модела са слике 6.28.а. Иако оба предходна случаја представљају апроксимацију реално остварене везе, ипак указују на потребу да се током анализе, као ограничења уведе модел везе. На пример, дефинисањем модела везе и анализом тако добијеног напонског стања, могуће је извршити поређење са резултатима добијеним из лабораторијског тестирања (нпр. применом мерних трака за добијање промене напона). На тај начин се може дефинисати стандардни модел за адекватан опис везе ведрице и резног зуба.

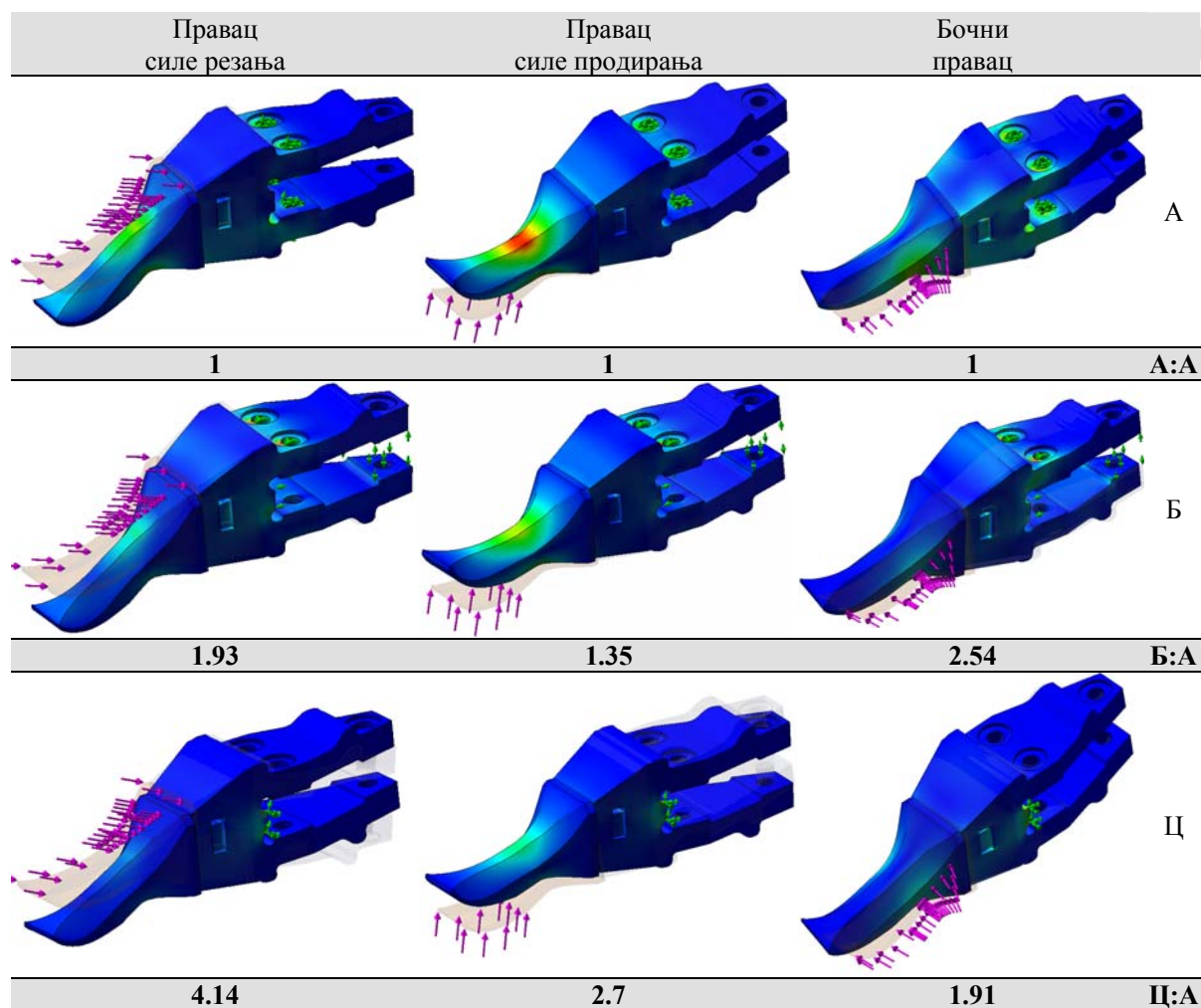


Слика 6.28 Напонска слика модуларног резног зуба за исто спољашње оптерећење и два начина моделирања везе између резног зуба и ведрице

Ако се предходна разматрања узму у обзир, онда је у процесу конструисања резних елемената за багере континуалног дејства, боље пажњу усмерити на анализу тренда промене напонског стања, него ка тежњи да се добије тачна напонска слика конструкције. Геометрију и граничне услове у процесима разарања стенског материјала практично је немогуће тачно моделирати јер су непознати, веома променљиви и изван контроле конструктора. У оваквим случајевима, анализа тренда је ефикасна техника која обезбеђује конструктору битне информација, значајне за доношење одлука у процесу конструсања. Јасно је да анализа тренда неће увек дати податке којима се дефинишу стварне перформансе, али ће показати какав утицај имају промене спољашњих фактора (особине материјала, ниво оптерећења, технологија копања и др.) и геометријске измене конструкције, на крајње решење резног зуба.

У наставку је дата упоредна анализа тренда промене напона, у оквиру које је разматран утицај различитог дефинисања везе између резног зуба и ведрице, на напонску слику резног зуба. Спољашње оптерећење на резном зубу, задато је у три међусобно управна правца: правац силе резања, правац силе продирања и бочни правац са јединичним интезитетом у односу 1:0.3:0.1, респективно. Веза између резног зуба и ведрице моделирана је као (слика 6.29):

- А. Непокретни ослонац је дефинисан притезањем вијака преко одговарајућих површина,
- В. Покретни ослонац преко унутрашњих површина ослањања носача зуба на ведрицу и површине за вијке као граничних површина.
- С. Укљештење са бочним наслањањем резног зуба на нож ведрице.



Слика 6.29 Напонска слика за различита јединична оптерећења и различите моделе ослањања резног зуба на ведрицу

Да би се процениле перформансе конструкционог решења анализом тренда промене напонског стања, посматра се утицај јединичног оптерећења за различите моделе ослањања резног зуба. На

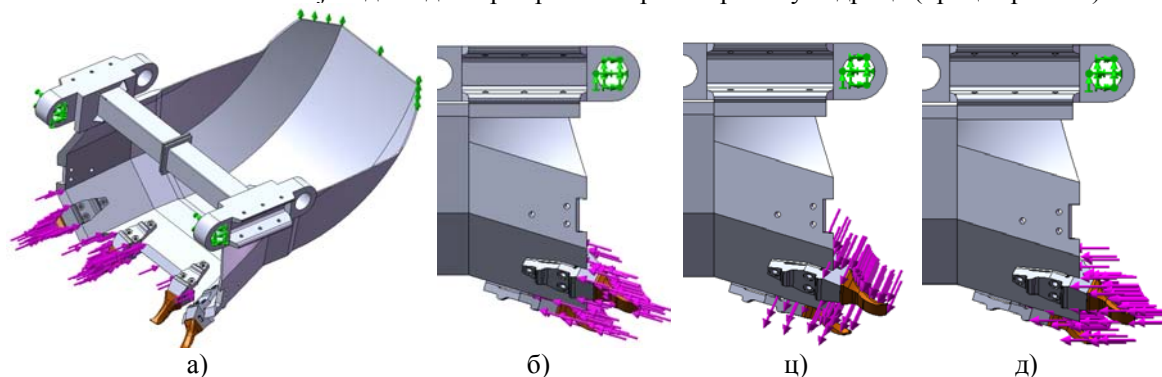


слици 6.29. се види промена напонског стања под утицајем задавања јединичног оптерећења, у различитим правцима за различите усвојене моделе ослонца (А, Б и Ц). На слици 6.29. је приказан и однос израчунатих максималних вредности напона на конструкцији. Одавде се јасно види да, ако би се веза резног зуба и ведрице дефинисала моделом (Ц), добила би се најнеповољнија напонска слика. У овом случају се за јединичну силу дефинисану у правцу резања добија напон који је 4.14 пута већи (јавља се концентрација напона) у односу на напон добијен применом модела везе (А). Такође, дефинисањем јединичне силе у правцу продирања, вредност напона је 2.7 пута већа применом модела везе (Ц) него у случају примене модела везе (А).

Из предходне анализе, показано је колико одступање у вредности напона може настати применом различитих модела везе елемената у склопу. Из тог разлога, доношење одлуке на основу добијених вредности напона треба да буде изведено условно уз навођење усвојених ограничења. Због тога, а и због недовољно јасног познавања спољашњег оптерећења као и његове тачне расподеле и места дејства у конструкционој анализи резних зуба, адекватније је применити анализу тренда промене напона, деформације и др. Анализом тренда омогућено је уочавање параметара који имају највећи утицај на конструкцију, као и одређивање параметара осетљивости за различите моделе оптерећења и ограничења. Овако добијени параметри имају велики утицај током процеса развоја конструкције, али и на самом крају током усвајања и дефинисања крајњег конструкционог решења резног зуба.

У наставку је приказана анализа тренда промене напона и степена сигурности склопа ведрице и модуларних резних зуба, варијацијом правца спољашњег оптерећења. Укупно спољашње оптерећење дефинисано је као на слици 6.30 а÷д. Усвојено је да се комплетно оптерећење преноси преко два резна зуба у захвату (најоптерећенији), који су појединачно оптерећени силама од  $240kN$  (вредност оптерећења добијена из лабораторијског експеримента, која доводи до разарања једноделног зуба). За дефинисање везе између резног зуба и ведрице усвојен је модел са слике 6.28.б, док је за дефинисање везе између ведрице и багера усвојен модел дефинисан у оквиру виртуелног прототипа. Анализом су разматрана три случаја оптерећења:

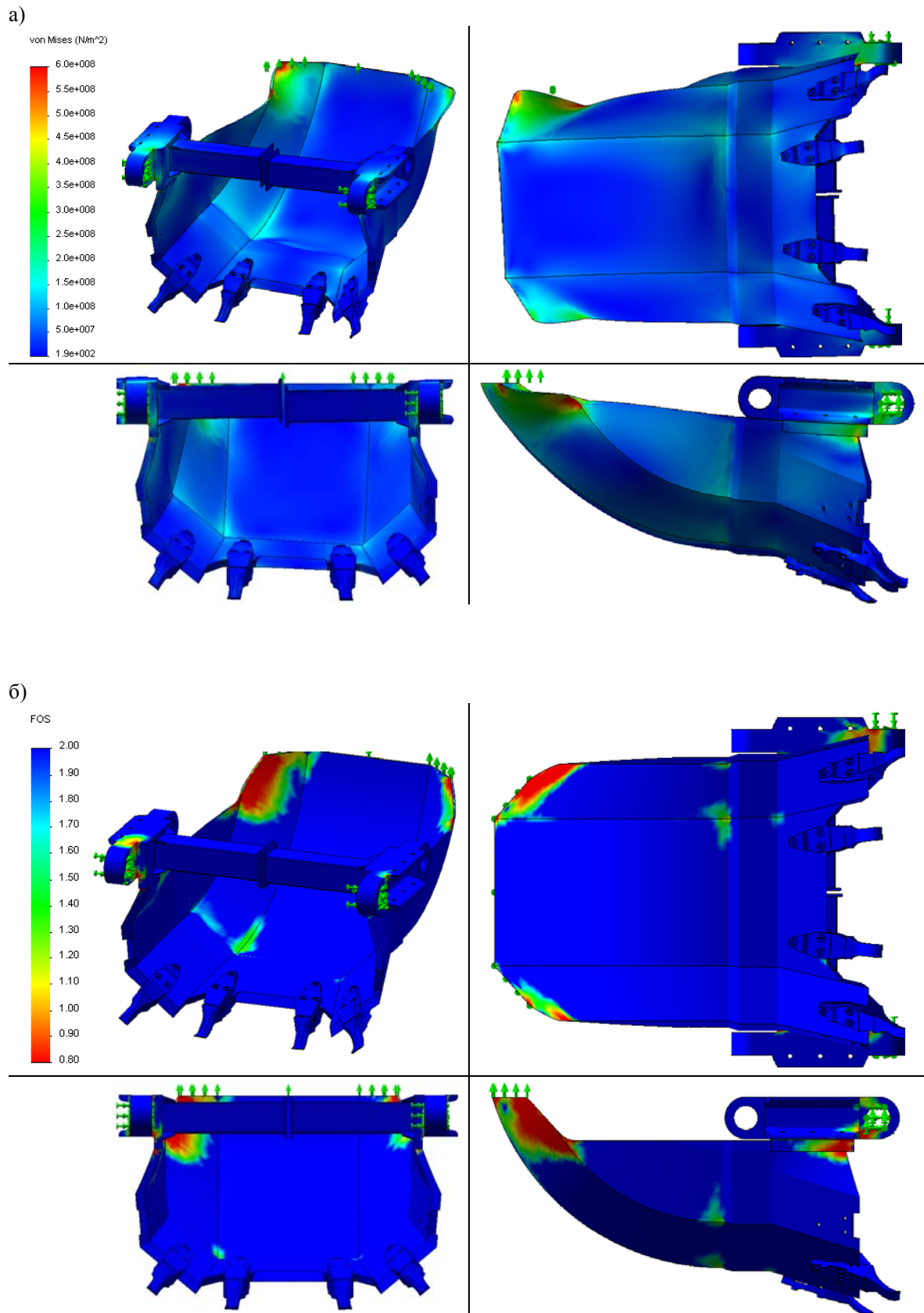
- 1) Слика 6.30.б, где се правац оптерећење поклапа са укупном силом током процеса иницијалног продирања, односно у тренутку првог контакта ведрице и стенског материјала током захвата (процес продирања).
- 2) Слика 6.30.ц, оптерећење делује нормално на резне елементе, што одговара случају завршетка иницијалног разарања стенског материјала, у тренутку када ведрице излази из обртног кретања и прелази у транслаторно кретање (процес продирања и процес резања).
- 3) Слика 6.30.д, где се правац спољашњег оптерећења поклапа са правцем кретања ведрице током захвата. Овај модел одговара транслаторном кретању ведрице (процес резања).



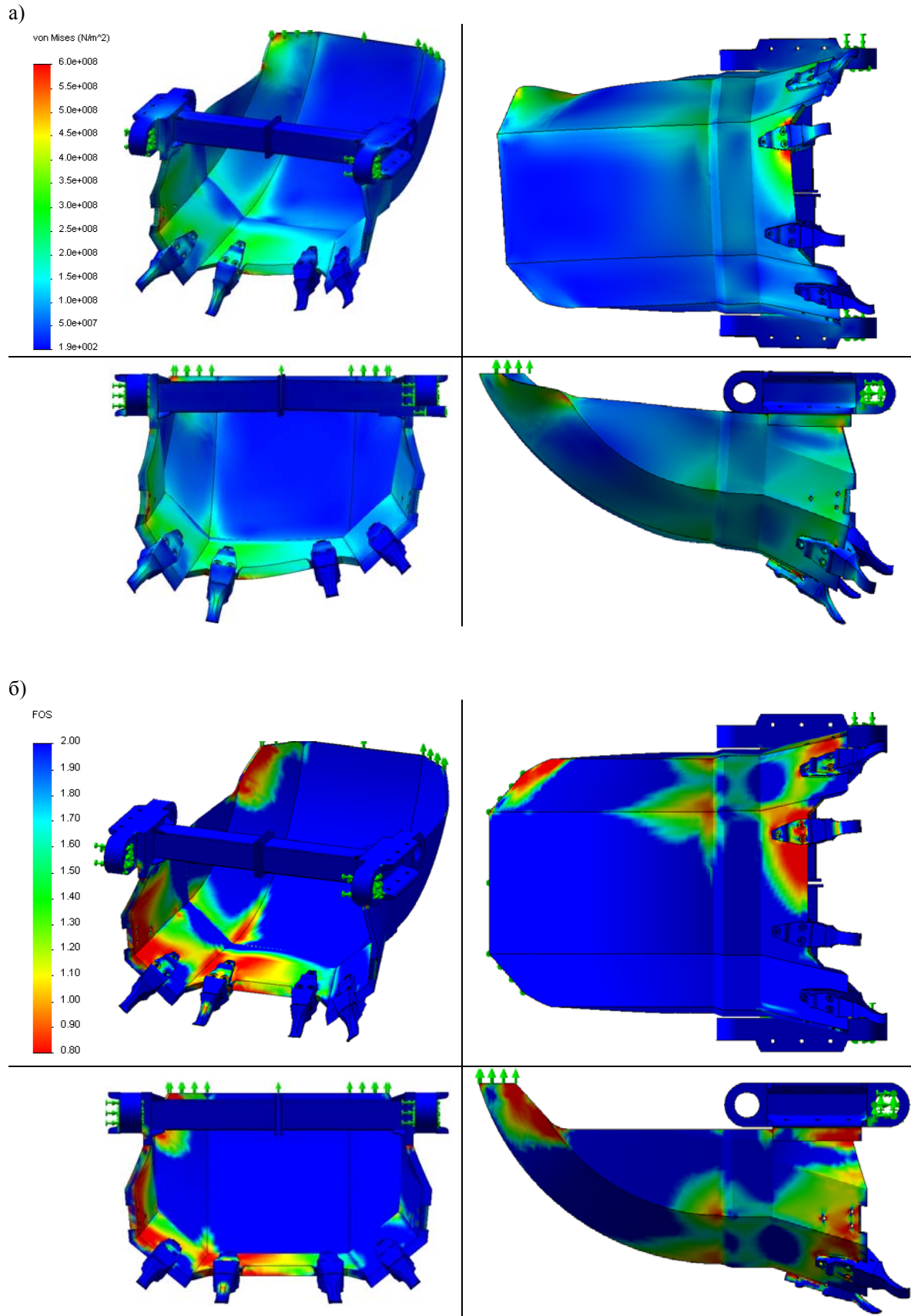
Слика 6.30 Дефинисање спољашњег оптерећења за анализу напонског стања склопа ведрице и резних зуба

На сликама 6.31÷6.33, приказани су добијени резултати. Анализом ових резултата могу се уочити потенцијално слаба места, и области разарања ведрице током достизања екстремних вредности спољашњег оптерећења. Усвојена вредност оптерећења знатно је већа од оптерећења које се јавља у „нормалним“ експлоатационим условима рада багера, али те вредности оптерећења могу бити достигнуте у неком специфичном тренутку (стенски прослојак, велике вибрације багера и др.).

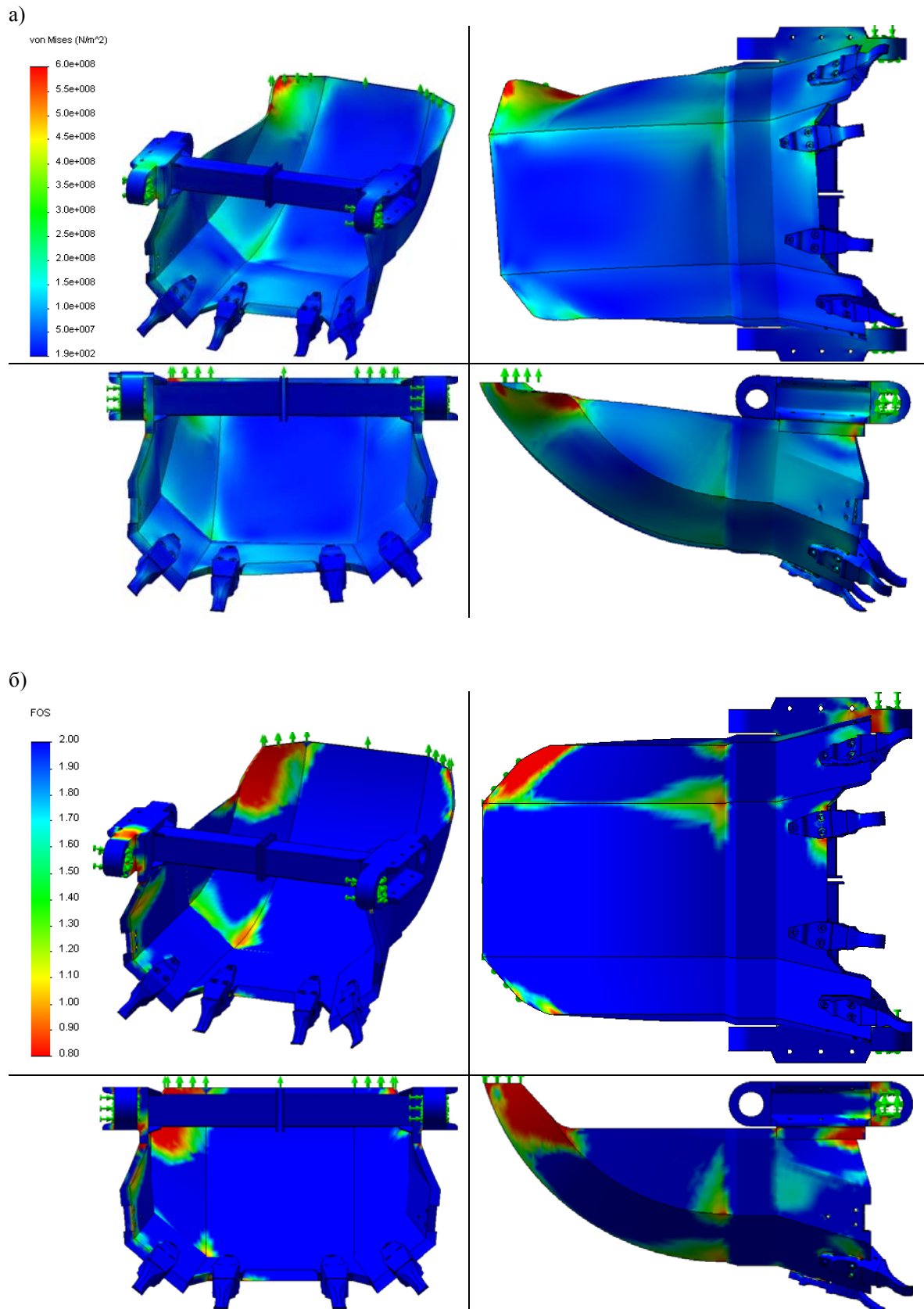




Слика 6.31 а) Расподела напона, б) расподела степена сигурности у случају модела оптерећења 1)



Слика 6.32 а) Расподела напона, б) расподела степена сигурности у случају модела оптерећења 2)



Слика 6.33 а) Расподела напона, б) расподела степена сигурности у случају модела оптерећења 3)

## 6.4 АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ОБЛИКА РЕЗНОГ ЗУБА

Облик машинског дела је технолоичан ако је погодан за израду предвиђеном технологијом. Прихватљиви је онај облик до којег се долази на технолошки једноставнији и економски повољнији начин. Једноставност облика са овог аспекта постиже се прилагођавањем конструкцијских датаља потребама поједностављања поступка израде с тим да се не угрози функција, чврстоћа или неки други услов. У производњи резних зуба користи се технолошки поступак ливења у песку. Ливење овим поступком подразумева израду пешчаног калупа, уливање растопљеног метала и његово хлађење, затим рушење пешчаног калупа и чишћење одливка. За израду калупа користи се модел који је израђен од дрвета (често и од легура лаких метала или пластике), и који својим обликом са адекватно увећаним димензијама (због скупљања током хлађења метала) потпуно одговара усвојеној конструкцији резног зуба. При пројектовању технологије ливења значајна пажња поклања се елиминисању могућности настанка било видљивих или невидљивих грешака у одливку, односно у предвиђању и решавању потенцијалних проблема који се могу јавити током процеса ливења. Коначне особине одливка могуће је предвидети уколико се познају следећи параметри процеса ливења: масени ток материјала, топлотни ток лива, хлађење уливеног материјала, процес очвршћавања, напони, гасови, термичка обрада, деформације, конвекција, сегрегација, хемија и металургија. Применом интегрисаног приступа конструисања резних зуба обезбеђује се адекватан избор предходних параметара, као и њихова провера помоћу симулација на виртуелним моделима. На тај начин се обезбеђује прецизно подешавање свих релевантних фактора ливења и утиче на отклањање могућих грешака у одливеном резном зубу. Такође, овим приступом се обезбеђује симултани развој облика и технологије израде резних зуба.

За сваку нову конструкцију резног зуба врши се провера дефинисане технологије ливења метала, а након тога симулацијом се проверава квалитет дефинисане технологије, мењају се уочене грешке и поново врши симулација. Примена оваквог приступа је оправдана добијањем исправног одливка у најкраћем могућем времену. На тај начин се без утрошка енергије за топљење метала, без утрошка метала и без утрошка времена за пробе чине видљивим све грешке. Конструктор је у могућности да у било ком делу одливка утврди да ли постоји порозност или шупљина, може да прати процес пуњења калупа, процес очвршћавања, заостале напоне, металуршку структуру одливка и још много тога. Применом интегрисаног приступа конструисања у процесу развоја резних зуба и технологије њиховог ливења, елиминише се потреба за експерименталним ливењем, скраћује се време добијања нове или измењене конструкције и нема неизвесности у погледу квалитета одливка [125].

### 6.4.1 Примена интегрисаног приступа у процесу ливења

Трошкови који су битни са аспекта процеса ливења могу се поделити у неколико група, од којих су неки: трошкови шкарта, трошкови покретања нове производње, трошкови израде и реконструкције алата за ливење, трошкови услед неадекватног искоришћења енергије, људи и материјала, итд. Сваки пут када се одливак не одлије правилно, губе се средства утрошена за енергију потребну за топљење, радну снагу и евентуалну машинску обраду. Осим тога, уколико шкарт пређе пројектовани ниво, може доћи до још већих губитака услед покретања нове серије како би се задовољиле уговорене количине, при чему трошкови покретања производње такође нису занемарљиви. Без употребе софтвера за моделовање мора се користити конвенционална метода пробе и грешке. Код оваквог приступа, инжењер пројектује алат на основу сопственог искуства и препоручених правила (кокила, језгрена кутије, или сл., зависно од коришћеног поступка ливења) који се у великом броју случајева у итерацијама на основу пробних одливака мора дорађивати како би се постигао жељени квалитет. Применом интегрисаног приступа, скупе итерације измена на алатима се из производног погона преносе на рачунар. Овде постоје и додатне предности које нису тако очигледне, а могу бити исто толико, ако не и значајније од горе наведених. То су константан квалитет производа, поштовање рокова и брзина усвајања новог производа, могућности прецизног планирања производње, итд. Данас у ливницама влада уверење да им је проценат шкарта веома мали. Међутим, у таквим ливницама шкартом се

сматрају само они одливци који се морају претопити, а уколико се он може дорадити заваривањем и сличним методама онда се одливак не сматра шкартом чак и ако неки пут треба дорадити скоро сваки одливак.

У поређењу са историјом ливења метала, употреба рачунара у процесу ливења метала је тек у зачетку, и користе се мање од три деценије [141]. Пошто ливење захтева експертско знање, биће у великом добитку од развоја и примене наменских софтверских алата за пројектовање и оптимизацију процеса ливења метала. С обзиром на продуктивност, количину шкарта, утрошак енергије по килограму одливка, применом софтверских алата у производњи одливака битно се утиче на побољшање економских услова производње. Примена *CAE* у симулацији процеса ливења, рачунарске оптимизације конструкције одливака и оптимизацији процеса ливења, промениле су значајно ливарско окружење [142]. Стално растући захтеви купаца одливака за смањењем цене, уз повећање квалитета и перформанси, захтевају да се ливене компоненте оптимално конструишу. Оптимални облик одливка с најтањим зидовима и одговарајућим механичким својствима, која ће задовољити очекивана оптерећења и напрезања, мора се предвидети у раном стадијуму конструкције. То се обично може постићи једино онда кад су ливци присутни током процеса конструисања, или кад је уз помоћ *CAE* технологија могуће интегрисати оптимизацију процеса ливења и оптимизацију конструкције одливка. У претходне две деценије приметан је изузетан напредак софтвера за рачунарску симулацију ливничких процеса, како у погледу перформанси тако и погледу тачности добијених резултата [143].

Интегрисани приступ развоја производа и савремене технологије његове израде морају се користити у свим фазама развоја резних елемената, почевши од конструкције одливка, припреме ливачке технологије до крајње обраде и контроле. Применом *CAE* технологије оствариће се ефекти у управљању, инжењерству, производњи и продаји кроз:

- Смањење трошкова
- Повећање квалитета
- Померање граница процеса ливења и његова оптимизација
- Омогућавање ливницама производњу већег броја технолошки сложенијих резних елемената
- Брже присуство на тржишту
- Побољшање организације и осталих пратећих процеса

## 6.4.2 Технологија ливења у пешчаним калупима

Сложени услови радне средине условили су прилично компликовану радну геометрију модуларних резних зуба, а са тиме и сложен запремински облик. За производњу резних елемената технолошки процес ливења доста је јефтинији и практичнији од технолошког процеса ковања (који се такође може применити), даје доста добар квалитет истих, па у таквим околностима ливење се може сматрати непревазиђеним технолошким процесом у технологији израде резних елемената багера континуалног дејства [144].

Циклус ливења модуларних резних зуба, као и сваки процес ливења у пешчаним калупима, састоји се из шест основних фаза:

1. **Израда калупа.** Први корак у процесу ливења у песку је израда калупа. Како је калуп потрошни елемент, ова фаза се понавља за сваки циклус ливења. За израду калупа потребни су модели који се израђују у моделарници уобичајено од дрвета, пластике, метала итд. Ако одливак има унутрашњу шупљину, користе се језгреници за израду језгара. У одељену за калуповање ливнице, помоћу модела и језгреника израђују се калуп и језгро које је углавном од песка одређене врсте и квалитета, уз још неки додатак. На плочама за калуповање се поставе одговарајући модели, који се запраше прахом који се зове ликаподијум. Запрашивање се врши да се влажан песак не би залепио за модел. Затим се калупна мешавина ручним набијачима или помоћу калупарских машина сабија у металне оквире тзв. калупнике. Након сабијања песка обезбеде се канали за одвођење гасова из калупа (звани одушци) који могу да проузрокују порозност одливака и самим тим га учине неупотребљивим. Тако сабијен један део калупа се окреће, на њега се поставља други део или делови модела, уливни системи, системи за прикупљање шљаке и системи за храњење одливака који обезбеђују доток течног метала приликом хлађења одливака. Следећа операција је сабијање песка у горњем делу



калупа. Када се и ова опреција заврши калупи се раставе и из њих изваде модели. Ако одливак има и неку унутрашњу шупљину у калуп се улаже једно или више претходно припремљених језгара.

2. **Стезање.** Када се калуп изради, врши се његово припремање за ливење. Површина калупне шупљине се најчешће заштите премазом, ради лакшег течења метала и касније уклањања одливеденог комада. Након тога врши се позиционирање калупних шупљина, њихово затварање и на крају везивање једне за другу. Током извођења процеса уливања материјала неходно је обезбедити да калупне шупљине остану потпуно затворене.
3. **Ливење.** Растопљени метал припрема се и одржава у растопљеном стању у ливачкој пећи. Након везивања калупа истопљени метал се улива у калуп. Уливање може бити ручно или машински. Улива се довољно растопљеног метала да би се попунила калупна шупљина и сви канали у калупу. Време ливења треба да је кратко, у циљу спречавања очвршћавања било којег уливеденог дела метала.
4. **Хлађење.** Растопљени метал, који је изливен у калупну шупљину, почиње да се хлади и да очвршћава. Када је испуњена цела калупна шупљина и ливени метал завршио процес очвршћавања (солидификације), формира се каначан облик процеса ливења. Калуп се не отвара док не прође време очвршћавања. Већина дефеката који се јављају у процесу ливења су последица процеса солидификације. Ако се неки делови калупа брже хладе од осталих, може доћи до појаве пукотине, промене облика и непотпуних испуна калупа.
5. **Уклањање одливка.** Када је прошло предвиђено време за хлађење, калуп се руши и из њега се вади одливени део. Често на површини одливка остају делови песка и различитих оксида, због чега се изводе различити помоћни процеси (најчешће пескарење) за њихово уклањање.
6. **Одсецање.** Током хлађења, материјал из помоћних канала калупне шупљине су такође очврсли и сједињени су са одливком. Овај вишак материјала се уклања машинском обрадом одливака и након рециклаже поново употребљава у процесу ливења.



Слика 6.34 Основни захтеви при пројектовања технологије ливења модуларних резних елемената

Приликом пројектовања технологије ливења модуларних резних зуба треба обратити пажњу на три кључна захтева (слика 6.34) [145], како би се добио одливак потребних техничко-технолошких карактеристика, а евентуалне видљиве и/или невидљиве грешке у одливку свеле на што је могуће мању меру, јер исте могу бити главни узрочник лома резних елемената у процесу експлоатације.

#### 6.4.2.1 Технолоичност облика и грешке одливка

Конструкција одливка треба да буде таква да омогући слободно пуњење шупљина калупа течним металом, што значи да се мора водити рачуна о довољним попречним пресецима и равномерној расподели метала у калупу. У случају танких зидова постоји опасност од хлађења метала још у току поступка ливења, чиме се спречава даље испуњавање калупа. Нагле промене правца и брзине кретања истопљеног метала у калупу су такође неповољне и треба их избегавати. Осим тога треба избегавати велике површине (нагло се хладе и због тога мењају структуру, гасови и шљака остају заробљени у структури) и веће хоризонталне површине при врху калупа.

Најчешћа грешка код одливака је стварање шупљина у унутрашњости, и пукотина на површини услед смањивања одливка приликом хлађења. Очвршћавање се врши по слојевима, и то тако да се најпре хладе тањи спољашњи слојеви. Идући ка унутрашњости хлађење је теже, а очвршћавање све спорије. Главна маса се хлади споро и има велико скупљање. Као последица овог

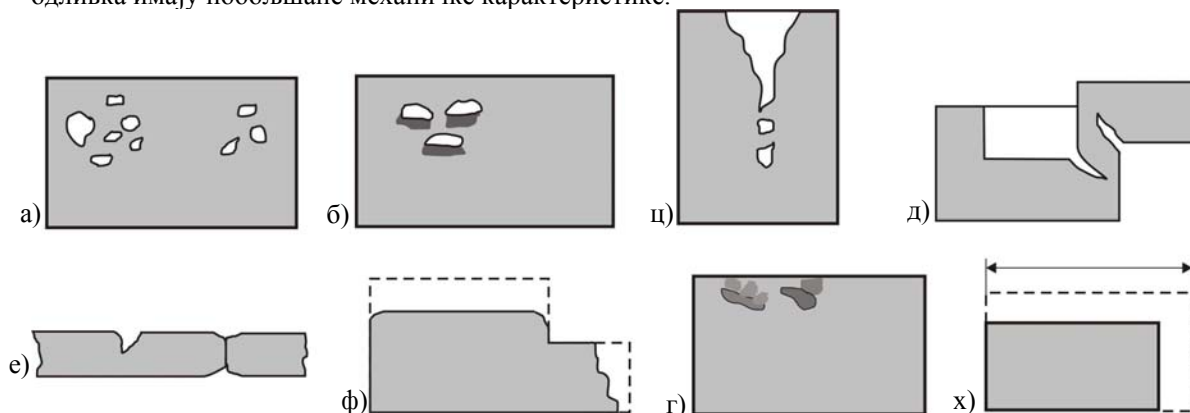


процеса појављују се шупљине које смањују активни пресек одливка у односу на задати, а тиме и његову чврстоћу. Услед скупљања, у материјалу се појављују заостали напони и деформације. Унутрашњи напони се јављају у ливеним зидовима чије је скупљање онемогућено или отежано због отпора елемената калупа или зидова који се налазе до њих. Шупљине настале скупљањем и порозност, јављају се код оних елемената одливка који се последњи хладе, односно код делова са дебелим зидовима код којих је одвођење топлоте отежано. Повећани унутрашњи (заостали) напони могу изазвати кривљење одливка, а у појединим случајевима и до појаве пукотина. Они могу бити толико велики да изазову ломљење одливака још у току хлађења или касније у току рада. Због тога се, нарочито ако је челични лив у питању, одливци обавезно подвргавају термичкој обради. При конструкцији одливака треба се придржавати неких основних принципа:

- Тежити да зидови одливка буду приближно исте дебљине
- Код елемената који се спорије хладе треба тежити смањењу попречног пресека
- Прелази између зидова различитих дебљина треба да буду постепени
- Зидови одливака не смеју имати оштре прелазе
- Места на којима се нагомилава материјал треба избегавати
- Места где се спајају зидови мање са зидовима веће масе, треба изводити са благим прелазом у правцу повећања масе
- Облик одливка треба да омогући слободно пуњење калупа металом

Накнадна машинска обрада ливених делова треба да буде сведена на минимум, не само због смањења производних трошкова већ из разлога чврстоће. Обрада стругањем резултира скидањем чврстих површинских слојева са одливка.

Облик одливка треба да обезбеди једноставну и погодну производњу калупа. Одливак мора бити такав да се лако може извадити из калупа, језгро се мора лако лити у кутијама за ливење језгра, а облик и очвршћавање језгра не сме утицати на растављање калупа. Када се одливак конструише, мора се имати јасна идеја о начину постављања дела у калуп и о полагају равни раздвајања. Као правило треба усвојити да се делови лију тако да критичне површине иду ка дну калупа јер је метал у доњим слојевима калупа гушћи него у горњим, па самим тим ови слојеви одливка имају побољшане механичке карактеристике.



Слика 6.35 Грешке у одливку које се могу јавити током ливења модуларних резних зуба (табела 6.6)

Када се посматра процес ливења модуларних резних зуба, може се говорити о појави неколико типова грешака, битних са аспекта задовољења квалитета одливених комада [146]. Могуће грешке дате су у табели 6.6, а шематски су приказане на слици 6.35.

Табела 6.6 Грешке које се могу јавити током ливења модуларних резних зуба

Назив грешке и опис	Узрок	Спречавање
а) Шупљине, гасни мехури. Округле шупљине са глатким површинама у унутрашњости одливка. Понекад читава структура порозна.	Мехури настају због издвајања гасова за време стврдњавања	Побољшати одвођење гасова, провера уливног система
б) Мехури од шљаке. Као и код претходног, али у мехурима налази се и шљака	Оксидација лива, негодна шаржа	Провера састава, повећање температуре, уливање без вртлога

ц) <i>Улегнуће, усахлине.</i> Отворна шупљина у облику левка, која према унутрашњости може наставити у облику затворене шупљине. Најчешће настаје на горњем делу.	Недовољно напајање одливка у току скупљања	Избегавати велике разлике у дебелини зида, потребно поставити одговарајући хранитељ, ради усмереног стврдњавања, поставити хладилице.
д) <i>Топлотне пукотине.</i> Пукотине које продиру до мање или веће дубине, неправилних облика. Настају на деловима одливка који се последњи стврдњавају, и на прелазима.	Ометано скупљање (велике разлике у зиду, мали радијуси, крут лив)	Отклањањем узрока променом облика, постављањем ребара, хладилице.
е) <i>Хладни вар.</i> Прекид масе са заокруженим ивицама. Најчешће на истуреним деловима одливка. Може настати по целом пресеку или само до одређене дубине. Настаје на одливцима великих површина на мањим дебелинама зида.	Два одвојена улаза метала због ниске температуре непотпуно или се уопште не стопе	Повећати температуру лива, побољшати уливни систем
ф) <i>Непотпуна изливеност – недоливеност.</i> Један део одливка недостаје. Непотпуни одливак има заобљене ивице. Вертикални уливни канал је пун. Најчешће настане на одливцима са малом дебелином зида, са великом површином, на горњим површинама најудаљеније од уливног канала (ушћа).	Ниска температура уливања, недовољна ливкост метала, мала површина уливног система	Повећање температуре ливења, реконструкције уливног система.
г) <i>Укључци и неправилна структура - укључак шљаке.</i> Неметални укључци неправилних облика који потичу из пећи. Појављују се или на површини или на зиду. Обично на горњим површинама.	Продор шљаке у одливак	Испуштати метал са већом пажњом, користити лонац са сифонским ливењем, процедити растопљени метал; ливачка сита на улазу система
х) <i>Нетачне мере или облик - нетачно скупљање.</i> Не одговарају мере одливка мерама на цртежу и моделу. Јавља се код свих димензија.	Скупљање према којем је израђен модел не одговара скупљању одливка односно лива.	Спречавање: треба пробом установити стварно скупљање; утицати на брзину хлађења.



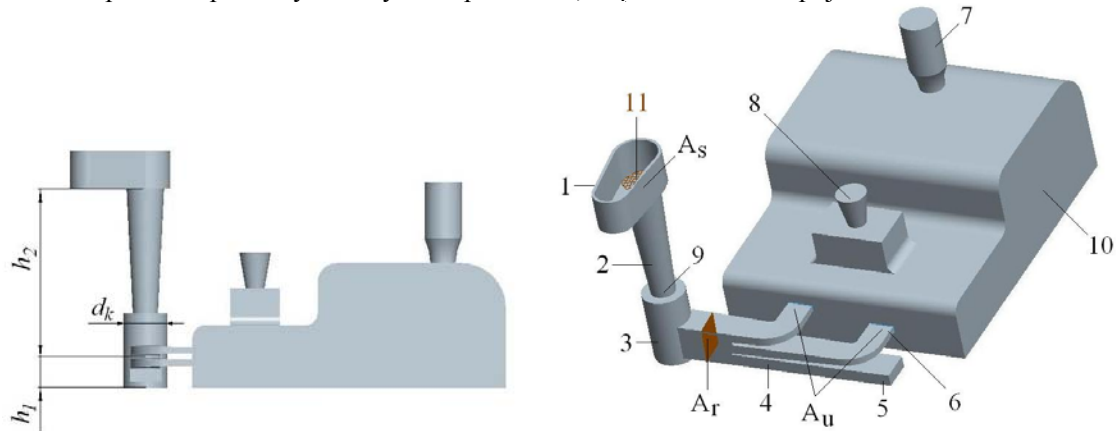
Слика 6.36 Примери неправилности одливака носача модуларног резног зуба

#### 6.4.2.2 Конструкција елемената уливног система

Уливни систем чине низ канала повезаних у једну целину, са задатком спровођења течног метала у калупну шупљину. Основни елементи уливног система за одливак (10) дати су на слици 6.37: (1) уливна чаша, (2) спроводник, (3) колектор, (4) разводник, (5) слепи крај разводника, (6) уливник, (7) хранитељ, (8) одводник гасова, (9) пригушник, (11) решетка (спречава улазак шљаке). Исправно конструисан уливни систем треба да осигура мирно пуњење калупне шупљине без захватања гасова, онемогући уношење неметалних укључака у калуп, омогући истискивање гасова из калупне шупљине и осигура довољно брзо пуњење калупне шупљине. Прорачун уливног система своди се на израчунавање попречних пресека елемената уливног система и базира се на основним законима хидраулике.

*Уливна чаша* треба да има довољну дубину, како би се елиминисао вртлог изнад спроводника који би увлачио ваздух и шљаку са површине растопа. Ако дубина није довољна, струја растопа ће захватити ваздушне мехуриће и шљаку и уносити их са собом у калупну шупљину. *Спроводник* је углавном кружног или квадратног попречног пресека. Горњи попречни

пресек одговара излазном пресеку уливне чаше и већи је од пречника пригушника колико захтева конусност спроводника. Димензије *колектора* су углавном конструкционе, али се препоручује да попречни пресек колектора буде 20÷25% већи од попречног пресека спроводника. Висина колектора треба да буде нешто већа од одговарајуће висинске димензије разводника. *Разводник и уливници*, изводе се попречним пресецима различитих облика (троугаони, трапезасти, правоугаони, кружни и други слични пресеци), при чему треба да буду задовољени одређени односи попречник пресека у односу на спроводник, за различите материјале ливења.

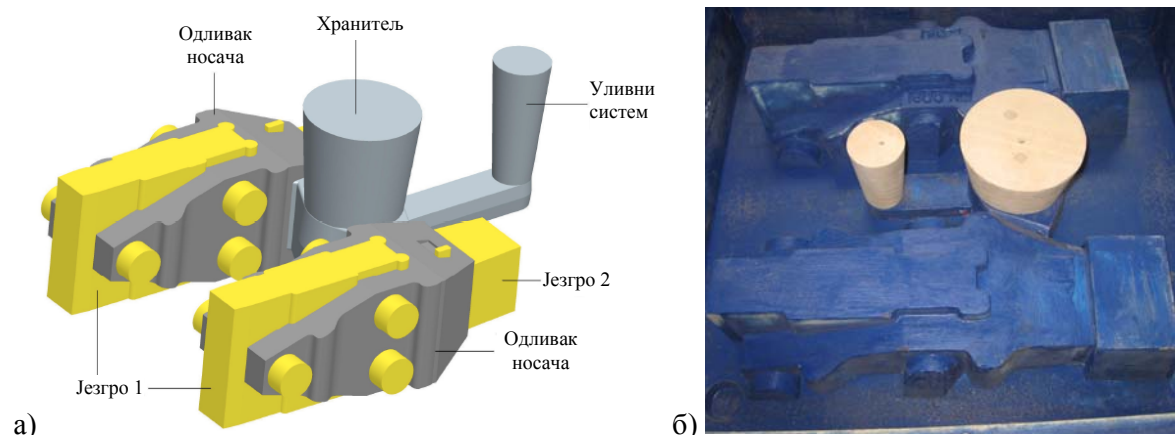


Слика 6.37 Основни елементи уливног система [144]

Услед запреминског скупљања течног метала које настаје при хлађењу одливка, долази до смањења његове запремине. Овај ефекат узрокује стварање усахлина (лункера) на местима која последња очвршћавају. У таквим случајевима конструишу се *хранитељи* са основном функцијом да током очвршћавања надокнаде одливку мањак течног метала који омогућује очвршћавање без усахлина. При констрисању хранитеља основни задатак је одређивање његовог места, броја и димензија. Место хранитеља одређује се искуствено и углавном је лимитирано обликом одливка (његов најмасивнији део). Одређивање броја хранитеља добија се израчунавањем подручја утицаја хранитеља. Прорачун димензија хранитеља заснива се на испуњавању основног услова да време очвршћавања хранитеља мора бити мало дуже од времена очвршћавања одливка или дела одливка који хранитељ храни течним металом.

*Одводници гасова* спречавају стварање ваздушних цепова у калупној шупљини и постављају се на одговарајућим местима ради одзрачавања истих. Обавезно се постављају на највишим местима одливка. Места појаве ваздушних цепова дефинишу се на основу анализе струјања течног метала кроз калупну шупљину.

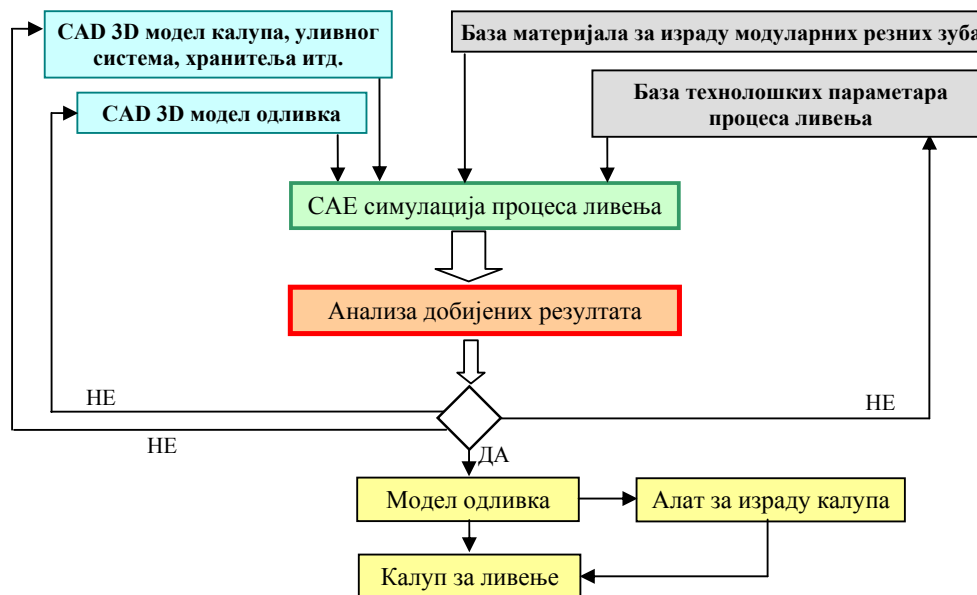
На слици 6.38.а приказан је солид модел алата за израду носача. Овај модел је у директној вези са моделом носача резног дела, па се конструкционе измене резног зуба директно преносе на солид модел алата. На слици 6.38.б приказан је направљен предмодел од дрвета, који се користи за израду калупа за ливење носача резног дела модуларног зуба.



Слика 6.38 а) 3D солид модел алата за израду носача, б) Одговарајући физички модел израђен од дрвета за израду калупа за ливење носача

### 6.4.3 Симулација процеса ливења модуларног резног зуба

Уместо производње на принципу „покушаја и грешке”, резултати пуњења, очвршћавања или заосталих напона се оптимизирају у виртуалном окружењу рачунара уз различита ограничења. Осим тога, употреба симулације ливења код развоја технологије ливења не само што скраћује време развоја производа, већ смањује трошкове и умањује ризик од појаве шкарта. На слици 6.39, дефинисана је методологија која је примењена током анализе технологичности конструкције резног зуба, и током подешавања технолошких параметара ливења.



Слика 6.39 Методологија анализе технологичности усвојене конструкције резног зуба, и подешавање параметара ливења применом одговарајуће симулације

Нумеричка симулација на добијеном одливку, односно интеграција CAE у процес развоја модуларног резног зуба и савремених техника компјутерске симулације ливења и очвршћавања метала, омогућује директно поређење резултата, а у првом реду скраћење времена до добијања прототипа и/или готовог производа. Компјутерском симулацијом процеса ливења и очвршћавања метала још у фази пројектовања одливка и пројектовања технологије ливења могуће је преко праћења задатих параметара уочити и отклонити грешке, те за краће време и без утrophка материјала и енергената усвојити оптималну технологију израде одливака. Коришћењем параметризоване геометрије, може се варирати облик и локација хранитеља на одливку. На овај начин могуће је конкурентно постићи минимум порозности и максимум изратка одливка.

У оваквим условима производње, пре приступа непосредној изради алата за ливење, односно калупа, потребно је извршити симулацију технолошког процеса ливења. Након симулације процеса (брзина ливења, време очвршћавања, појава лункера и др.), а у случају појаве грешке у одливку, потребно је дефинисати узроке грешке. Ако су грешке у технологији ливења неопходно је поправити технологију ливења, а ако су грешке последица конструкционог облика алата за израду калупа исти треба конструкционо изменити.

За симулацију процеса ливења у оквиру овог рада примењен је софтверски пакет *MAGMASoft*. Софтвер омогућује симулирање процеса ливења и очвршћавања одливка. То је врло моћан и поуздан софтвер за симулацију који се користи при параметарској анализи побољшања и оптимизацији процеса ливења. На тај начин омогућава се брзо и ефикасно тестирање широког избора могућности и варијанти унутар граница процеса ливења и избор оптималне комбинације технолошких параметара. Потенцијални проблеми се лако откривају и одстрањују већ у фази пројектовања облика одливка, што пројектанту/технологу омогућава оптимизацију процеса ливења. Резултати симулације приказују се у 3D графичком облику, где се рентгенским погледом у калуп види ток пуњења ливне шупљине, брзина пуњења калупа као и температурне области.



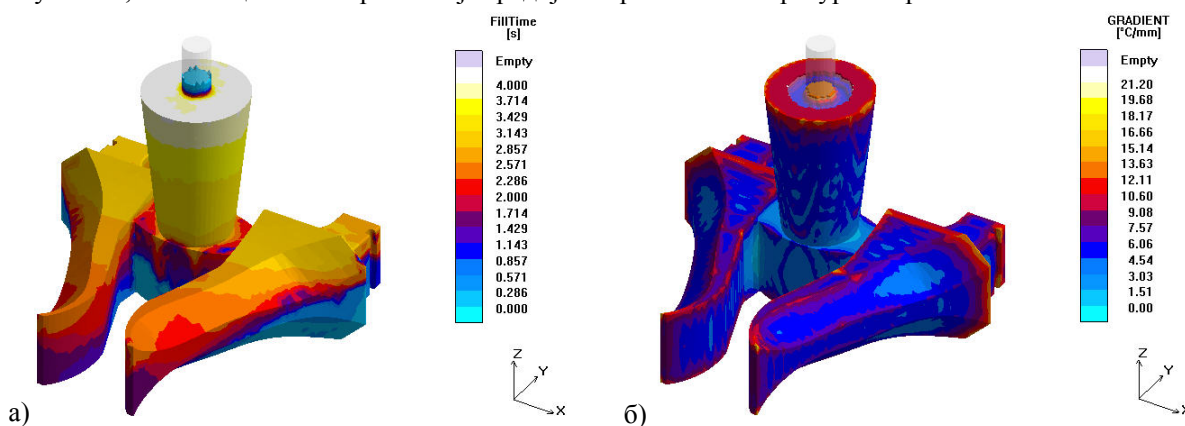
Пресецима кроз одливак добија се фронт очвршћавања и могућа места порозности услед очвршћавања метала.

За извођење симулације потребно је обезбедити: 3D геометријски модел одливка и осталих компонената (алат за ливење, уливни систем, хранитељ, места хлађења и др.), технолошке параметре (температура ливења, време ливења, састав легуре, и др.). На тако припремљеном 3D моделу врши се дискретизација<sup>10</sup>. Сам софтвер аутоматски генерише мрежу коначних запремина, али тако што дозвољава подешавање броја и величине запремине. Што је мрежа финија, односно што има више елемената, то је тачнији прорачун, али је време симулације дуже. Код компликованијих и/или танкозидних одливка потребно је дефинисати финију мрежу. За сваку коначну запремину помоћу диференцијалних једначина израчунавају се физичко-термички параметри, а добијени резултати су гранични услови за прорачун параметара у суседном елементу. На тај начин рачунар врши прорачун од запремине до запремине у 3D координатама, и на крају све парцијалне резултате интегрални за целокупну геометрију.

Табела 6.7 Подаци за одливак резног дела модуларног зуба

Материјал одливка:	X120Mn12 (ХРОМОСИЛ)
Хемијски састав материјала	C=0.3-0.4%, Si=1.4-1.7%, Mn=1-1.4%, P <sub>max</sub> =0.020%, S <sub>max</sub> =0.020%, Cr=1.25-1.5%, Ni=0.4-0.6%, Mo=0.17-0.22%
Калупа за ливење:	Калуп је од: CO <sub>2</sub> песка Калуп се премазује: цирконским премазом
Почетна температура лива:	t=1560-1580°C
Ливање:	Гравитацијско, у пешчани калуп
Врста лонца:	Нагибни лонац

Резултати симулације дати се у облику 3D дијаграму, а добијене вредности симулације представљају [144]: временски или процентуални део попуњавања ливног отвора са изотермама по запремини, брзина и притисак ливења, вектора брзине, резултате очвршћавања, односно фазе очвршћавања, са изотермама по температурним пољима, приказ течног, тестастиг или чврстог стања метала, приказ температурног градијента и др. На слици 6.40. приказани су резултати симулације ливења резног дела зуба. На слици 6.40.а приказано је потребно време пуњења калупне шупљине, а на слици 6.40.б приказан је градијент промене температуре очвршћавања.



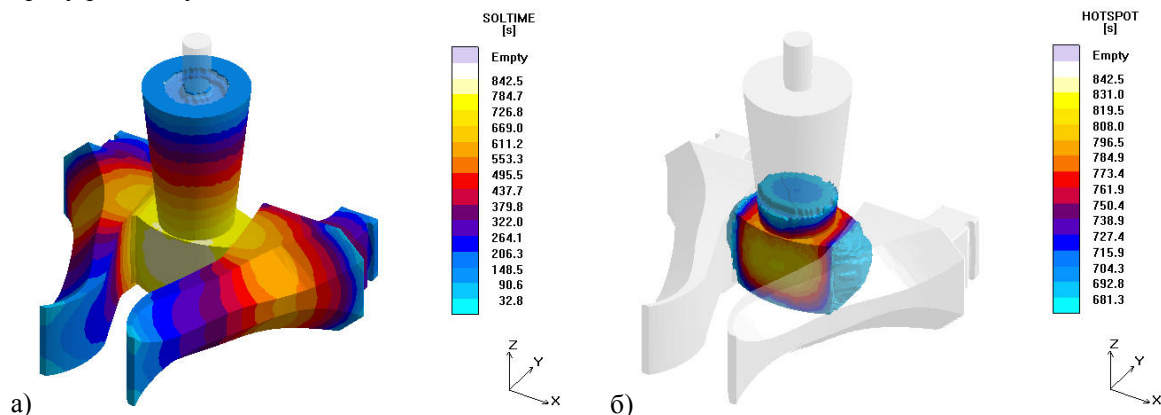
Слика 6.40 а) Време пуњења, б) Градијент промене температуре очвршћавања

Прва фаза у развоју технологије ливења је симулација процеса очвршћавања одливка у пешчаном калупу, што је приказано слици 6.41.а. Циљ симулације очвршћавања је установити критична подручја у одливку, односно тзв., топла места (*eng.hotspot*). Коришћењем овог критеријума уочавају се подручја заосталог метала у течном стању у току фазе очвршћавања, односно показује се у ком временском периоду ће доћи до очвршћавања заосталих подручја течног метала.

Јако значајан показатељ који се добија из симулације је и расподела топлотних места на одливку (слика 6.41.б). Ова анализа омогућава проверу успешног храњења одливка, за усвојени

<sup>10</sup> Примењује се метод коначних запремина

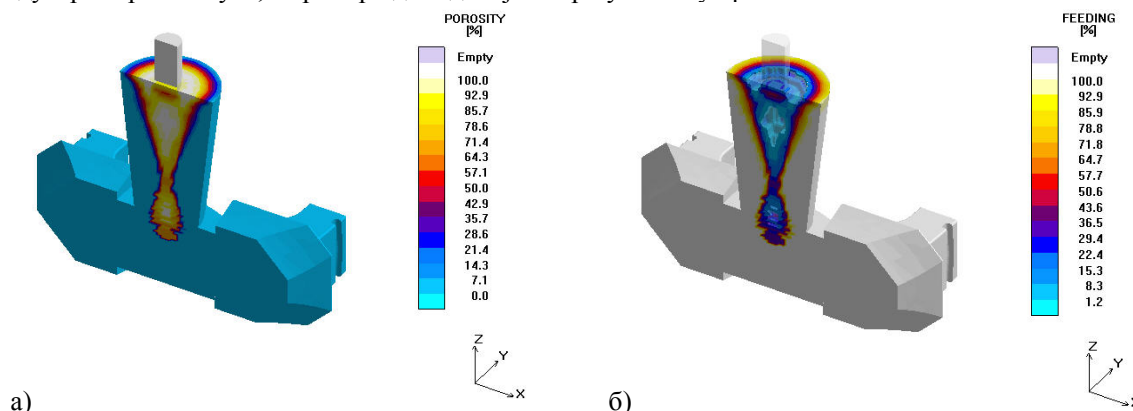
облик и место хранитеља. Анализом добијених резултата доноси се одлука о евентуалном дефинисању одговарајућих хранитеља за подручја у одливку која је неопходно додатно хранити. Ова анализа је посебно битна за ливењу у песку, управо за технологију каква се примењује за израду резних зуба.



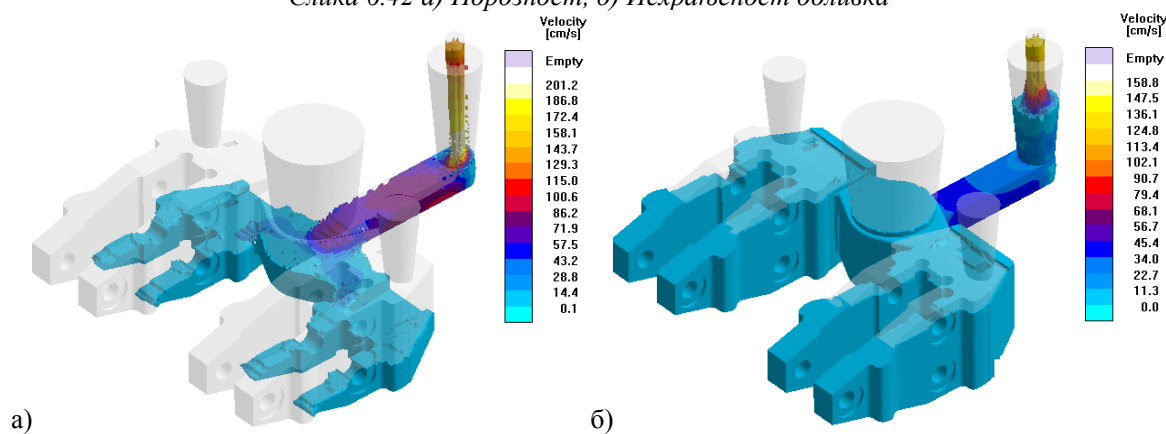
Слика 6.41 а) Време очвршћавања, б) Топла места у одливку (места која последња очвршћују)-Hotspot

Друга фаза је одређивање облика и димензија хранитеља. Уколико је хранитељ малих димензија јавиће се порозност у одливку, што је ситуација која се мора избећу пре почетка производног процеса. Резултати анализе порозности показали су како је одабрани хранитељ одговарајуће величине (слика 6.42.а). Са слике се јасно уочава да је порозност извучена из зоне одливка у хранитељ. Правилно дефинисан хранитељ мора садржати течни метал након што је одливак комплетно очврснуо, као што је приказано на слици 6.42.б.

На исти начин спроведена је симулација ливења и анализа технолоичности носача модуларног резног зуба, а примери дела добијених резултата су приказани на сликама 6.43÷6.45.

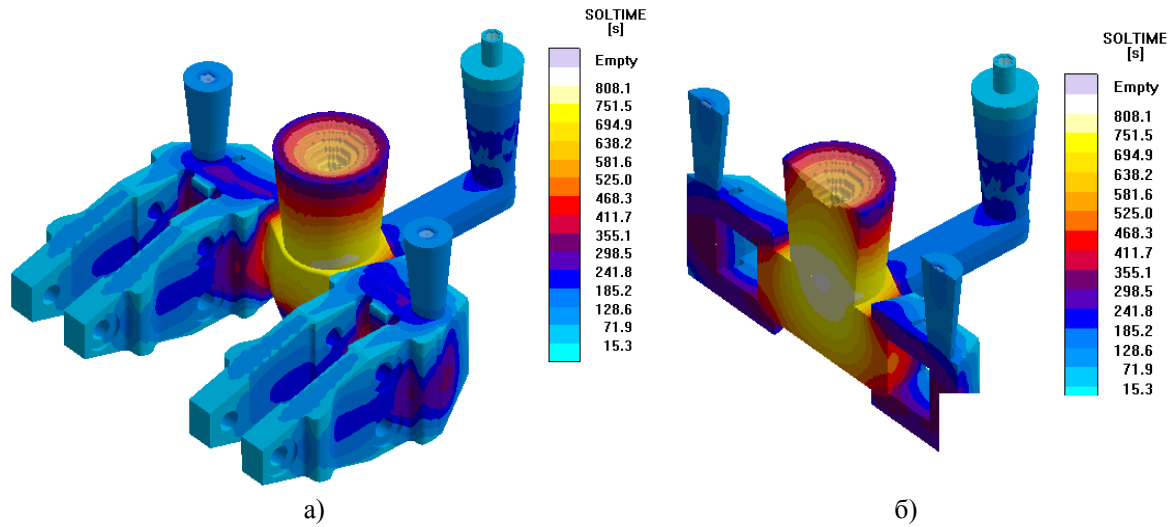


Слика 6.42 а) Порозност, б) Исхрањеност одливка

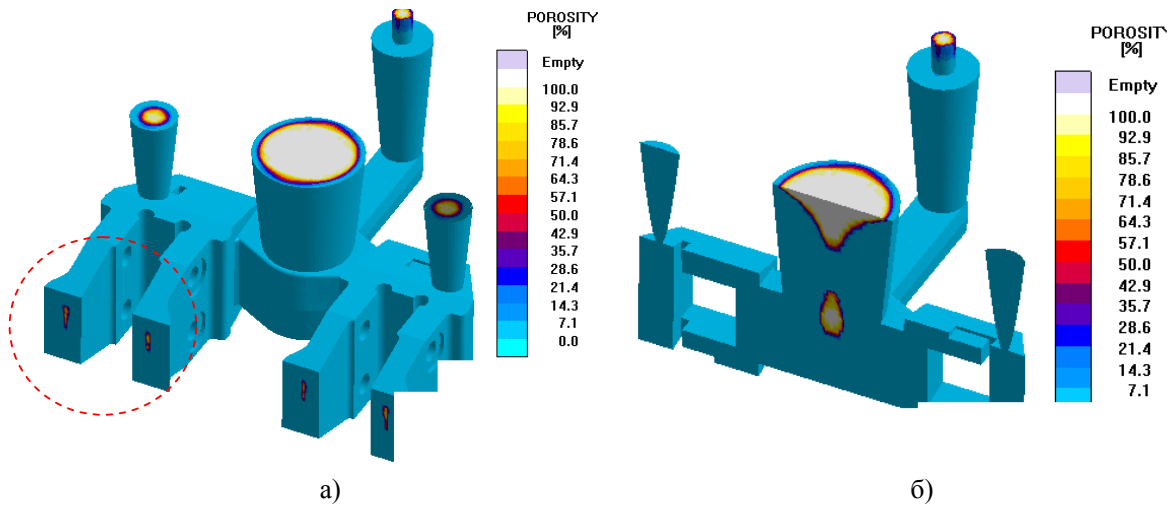


Слика 6.43 Брзина пуњења. а) при 20% и б) при 60% попуњености калупа

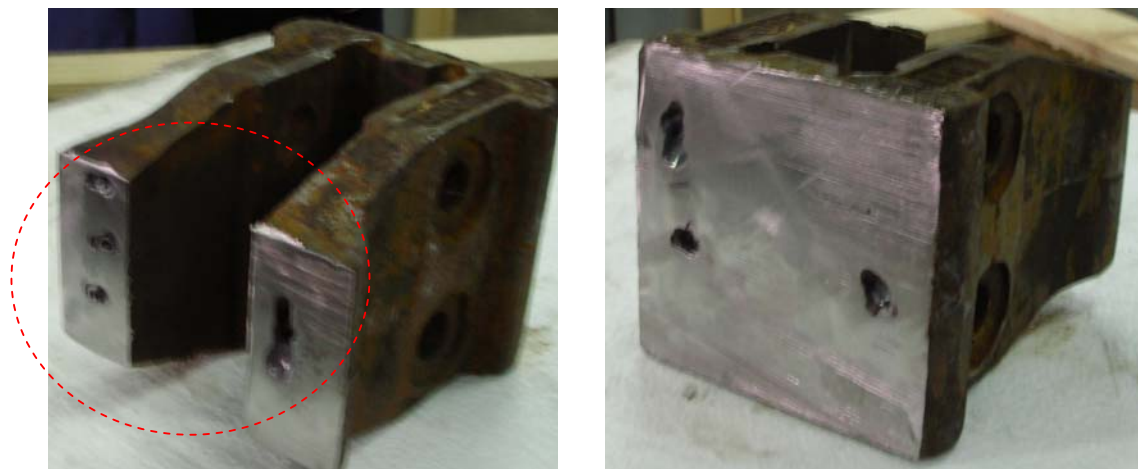




Слика 6.44 Време очвршћавања одливка. а) у 3D приказу одливка б) пресек кроз хранитељ



Слика 6.45 Порозност одливка а) основни изглед, б) пресек кроз хранитељ



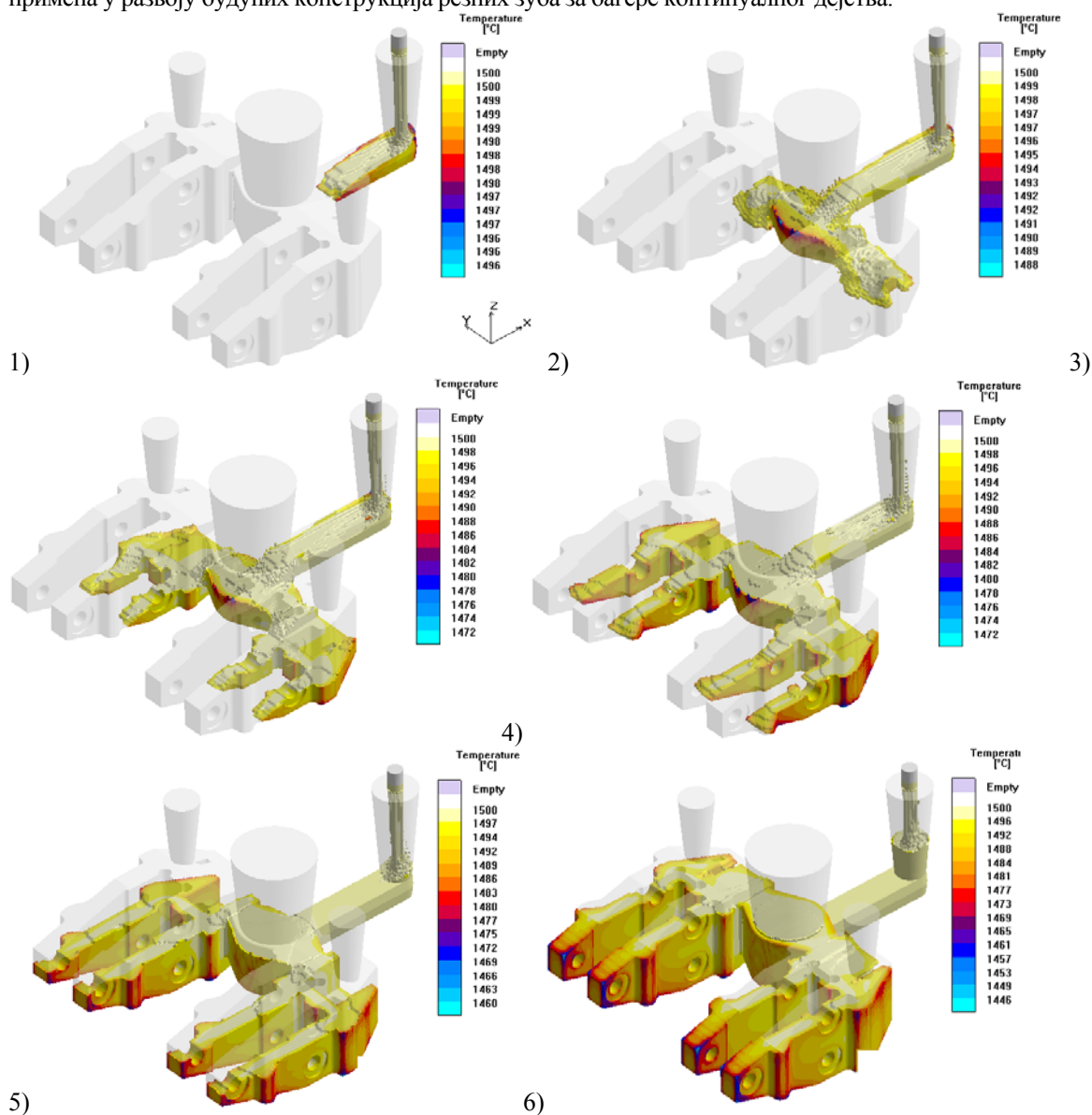
Слика 6.46 Пример сечења одливака након пробног ливења и појава порозности

Током симулације процеса ливења носача, а како је приказано на слици 6.45, уочени су одређени недостаци, везани за појаву порозности у запремени носача резног зуба. Без корекције уочених недостатака и усвојених технолошких параметара ливења, извршено је

ливење пробне шарже одливака. Циљ оваквог приступа је био у потреби да се изврши верификација усвојеног модела ливења.

Процес ливења пробне шарже носача резног зуба реализован је на исти начин, уз усвајање истих параметара као што је то урађено у оквиру симулације. Након тога одливци су на произвољним местима сечени и анализирани [151]. Уочено је да су одливци у неким попречним пресецима остајали порозни, као што је приказано на слици 6.46, чиме је извршена верификација усвојеног модела за симулацију ливења. На бази верификованог модела за симулацију извршена је корекција одливка и технолошких параметара ливења, након чега је одливена „нулта“ серија модуларних резних зуба. Детаљна анализа и симулација ливења, модификованог одливка којим се решава проблем порозности, дата је у Прилогу 3. овог рада.

На слици 6.47, у секвенцама од 1) до 6), приказана је комплетна симулација процеса ливења носача зуба, док је на слици 6.48, приказана одговарајућа симулација ливења резног дела. Овом симулацијом се анализира степен испуњености запремине калупа и одговарајућа расподела температуре у одливку у различитим временским периодима, а у исто време се добија увид у сваки детаљ процеса ливења. Дефинисањем и верификацијом модела за симулацију процеса ливења, омогућена је његова примена у развоју будућих конструкција резних зуба за багере континуалног дејства.



Слика 6.47 Симулација процеса ливења са температурним пољем пуњења калупа носача модуларног резног зуба



## 7. ЗАКЉУЧАК

Процес копања код багера континуалног дејства непосредно врше ведрице са резним елементима (резни зуби и нож ведрице) који се налазе на фронту резања. Да би се стенски материјал разорио потребно је на њега деловати одређеном силом, која зависи од врсте стенског материјала, технологије ископавања, геометрије резних елемента и др. Резни зуби својом оштрицом доспевају на ограничене површине стенског материјала и врше напрезања довољна за њихово разарање. Применом резних зуба расположива сила резања се концентрише на малу дужину резања, и на тај начин се олакшава продирање комплетне ведрице у материјал. Разорени материјал се преко одговарајућих површина резних елемената транспортује у кашику.

Да би исправно извршили своју основну функцију, резни зуби морају задовољити више захтева, као што су повољна геометрија, висока отпорност на абразивно хабање, велика механичка чврстоћа и жилавост итд. Фактори на које се мора обратити пажња при конструисању су геометрија зуба, димензионисање зуба, избор материјала, монтажа зуба на ведрици и технологија његове израде. Због тога је процес конструисања резних зуба код багера континуалног дејства везан за следеће проблеме:

- a) Комплексност процеса конструисања везана за висок ниво корелације основних својстава конструкције. На тај начин, крајњи изглед, димензије и технологија израде резних елемената је веома осетљива на текуће измене током процеса конструисања.
- b) Велики утицај специфичних захтева корисника и тежња ка уникатној производњи. За брзу реакцију на нове захтеве корисника, поред флексибилности у технологији израде, неопходно је обезбедити флексибилност у свим фазама реализације резних зуба, почевши од ране фазе развоја и процеса конструисања.
- c) Сложеност дефинисања спољашњег оптерећења и усвајање одговарајућих претпоставки, које су основа при прорачуну носивости.
- d) Специфичност технологије израде резних зуба, која се огледа у постојању великог броја комплексних техничко-технолошких параметара ливења и њиховој међузависности.
- e) Израда физичког прототипа резног зуба захтева значајно време припреме и реализације. Са друге стране испитивање физичког прототипа у експлоатационим условима је веома отежано и такође захтева значајне временске и финансијске издатке.

Постојећа знања и одговарајућа литература не објашњавају и не дају препоруке за решавање предходних проблема. Због тога не постоји системски приступ, па се процес конструисања изводи на бази искуства и минималних побољшања постојећих решења, користећи се при том грубим претпоставкама и извођењем закључака без улажења у суштину проблема. Овакав приступ представља проблем у тренутку када се жели направити искорак и генерисати конструкционо и технолошки боље решење резних елемената, као што је то случај са развојем нове генерације модуларних резних зуба.

У оквиру ове докторске дисертације разматрана је проблематика увођења системског процеса конструисања, кроз концепт интегрисаног приступа, који је базиран на *CAD/CAE/CAM* интеграцији. Овакав приступ представља алтернативу постојећем стању процеса развоја резних елемената, која се на релативно једноставан начин може инкорпорирати и применити у производном процесу. Циљ примене интегрисаног приступа конструисања је у томе да пре саме израде резног елемента постоји јасна представа о томе како ће производ изгледати, како и на који начин ће усвојена технологија производње утицати на крајњи квалитет, како ће се понашати у радним условима и др. Такође, обезбеђује се предност која се огледа у смањењу трошкова, самим тим што се у већем делу анализе током конструисања користе *CAD/CAE/CAM* алати, чиме се значајно смањује време потребно за тестирања у лабораторији или експлоатационим условима. Са друге стране, смањује се време од тренутка постављања захтева за производом до његовог доласка

на тржиште, јер се смањује број развојних циклуса, аутоматским одбацивањем незадовољавајућих решења конструкције. Тежиште оваквог приступа се преноси на концептуално пројектовање и прелиминарно конструисање, чиме се утиче на касније смањење броја конструкционих измена и измена у производном процесу. Оваквим приступ се обезбеђују основни услови и реализује тежња ка уникатној производњи резних елемената, посебно прилагођених специфичним условима радне средине, багеру, ведрници, итд.

Процес конструисања резних елемената у општем случају у први план ставља познавање радног оптерећења, односно познавање правца, смера и интензитета спољашњих сила. У досадашњој пракси тежиште се стављало на грубу процену интензитета, док се правац и смер спољашњег оптерећења дефинисао са три међусобно управне компоненте силе у координатном систему, чији се координатни почетак дефинисао у односу на одређени део резног зуба, ведрнице или неког другог места на самом багеру. Међутим, у циљу генерисања бољих конструктивних решења, неопходно је јасно познавање свих фактора и њихових зависности, који имају утицаја на оптерећење. То значи да је потребно прецизније дефинисање спољашњег оптерећења, и то кроз функционалне зависности утицајних фактора, односно дефинисање спољашњег оптерећења у функцији од својстава стенског материјала који се ископава, положаја и оријентације зуба у захвату, технолошких параметара брзине, дубине резања и др. Основни проблем који се овде јавља је у томе што су процеси који се јављају током интеракције резног елемента и стенског материјала веома комплексни и не могу се описати једноставним изразима, а да се при том не направи груба апроксимација. То је због тога, што на оптерећење резних зуба највећи утицај има ископавани стенски материјал, који је у општем случају веома сложене грађе, при чему карактеристике материјала имају случајну расподелу. Код багера континуалног дејства, идентификована су три различита механизма која се јављају током процеса копања, а то су продирање, резање и захватање. Уопштено говорећи током захвата не јавља се само један механизам, већ коезистира више њих истовремено. Међутим, ако се процес ископавања раздвоји у серију појединачних секвенци, онда се процес посматра тако да се свака секвенца поклапа са одговарајућим механизмом. На тај начин, процес копања се раздваја на основне механизме, чиме се проблем значајно поједностављује. Овакав приступ је могуће применити за израчунавање оптерећења, обзиром да је резни зуб најоптерећенији у фазама продирања и резања. Осим тога, тренутак за који се везује анализа је онда када се разара стенски материјал највеће чврстоће, што заправо представља критичан тренутак за који резни зуб треба да се димензионише.

Опис интеракције, односно израчунавање оптерећење резног алата у облику клина, може се описати применом три приступа, односно применом аналитичког, емпиријског и нумеричког приступа. Емпиријски модел се креира помоћу великог броја изведених експеримента, углавном лабораторијских. Без обзира што се у току креирања оваквог модела испитује велики број узорака, његова примена је парцијална због ограничења која се јављају у опису широког опсега могућих варијација процеса интеракције. Са друге стране, аналитички модел може узети у обзир и ове варијације, али може описати само једноставне случајеве, као што је пример оштрице резног елемента бесконачне ширине, клинасти облик алатаи, итд. Такође у оквиру аналитичких модела дефинишу се полазне претпоставке, које на самом почетку анализе доводе до значајних разлика у односу на реалне услове интеракције. Нумерички модели омогућавају укључивање великог броја параметара којима се дефинише проблем интеракције, и уколико се обезбеди адекватан опис проблема, могу дати задовољавајуће резултате израчунавања оптерећења резног зуба. Такође, сваки нумерички модел се мора на неки начин верификовати, што представља значајно ограничење.

Сваки приступ има својих предности и недостатака, па за израчунавање спољашњег оптерећења треба симултано користити два или сва три приступа. На тај начин применом аналитичког приступа израчунава се номинална вредност спољашњег оптерећења. Тако добијена вредност се коригује допунским коефицијентима, који су добијени на основу лабораторијског или експлоатационог мерења, односно применом емпиријског приступа. Допунским коефицијентима се обухвата утицај хабања резног зуба, осцилације радног елемента багера, динамички ефекти разарања материјала и сви други ефекти које је практично немогуће обухватити аналитичким изразом. Развојем модела на бази примене нумеричке методе, који би у основи подразумевао примену хибридне *FEM/DEM* методе, омогућило би се поређење вредности оптерећења добијених применом аналитичког и емпиријског приступа. Такође, дефинисан и верификован модел, био би подлога за будуће решавања истих или сличних проблема израчунавања спољашњег оптерећења. Применом методе коначних елемената моделирао би се резни елемент, док би се стенски

материјал моделирао применом методе дискретних елемената са увођењем емпиријских израза, изведених из мерења реалних узорака стенског материјала.

Повећање сложености аналитичких израза који се могу искористити за израчунавање номиналног оптерећења резних зуба, не утичу на добијање тачнијих вредности. Са друге стране, за инжењерску примену у процесу конструисања резних зуба, адекватнија је примена једноставнијих модела. У раду је детаљно анализиран *Evans*-ов једноставан механички модел, који је изведен и прилагођен за примену код резних зуба багера континуалног дејства. Код стенских материјала као што су глина и лигнит, резна ивица ножа ведрице служи за резање у области пластичног разарања. Код тврдих стенских материјала, резни зуби на ведрицама служе како би се поспешиио процес продирања, односно како би се обезбедили довољни нормални и тангенцијални напони неопходни за иницијално разарање стенских материјала. Управо та чињеница оправдава примену *Evans*-овог модела у израчунавању номиналног оптерећења резних зуба. При конструисању, треба узети у обзир она оптерећења која би могла довести до неког од критичних стања резног зуба током процеса експлоатације. Та оптерећења су краткотрајна и углавном се генеришу током интеракције са стенским материјалима веће чврстоће, за чији је опис и дефинисање силе адекватна примена *Evans*-овог модела. Моделом се обухватају најважнији фактори, као што су геометрија резног зуба, притисна чврстоћа стенског материја, итд.

Интегрисани приступ конструисања резних елемената, који је разматран у овом раду, у први план ставља моделе и њихово међусобно повезивања. На тај начин се обезбеђују услови за симултани рад сва три битна чиниоца, односно „корисник-произвођач-развој“, повећавајући међусобну комуникацију, визуализацију и симулацију у свим фазама развоја резних елемената. У раду су дефинисана три рачунарска симулациона модела, на бази којих се решавају три различита проблема. То су одређивања носивости резних зуба, проблем испитивања прототипа и проблематика везана за дефинисање технологије ливења. Када се говори о анализи напонског стања, осим процене носивости, битно је анализирати понашање резних зуба у симулационим условима сличним експлоатационим. На тај начин се, осим стандардних услова рада, могу испитати и екстремни услови оптерећења, што свакако доприноси бољој оцени усвојеног решења резног елемента. То значи да је потребно моделирати спољашње оптерећење, и услове ограничења који се у таквим случајевима могу јавити. Када се говори о циљу овакве анализе у пракси увек треба размотрити неколико важних питања:

- a) Да ли је важније предвидети тачно решење проблема, или је довољно предвидети његове трендове?
- b) Који ће специфични подаци помоћи у доношењу потребне инжењерске одлуке и оцени конструкционог решења резног зуба?
- c) Када се анализа завршава, и како и на који начин се резултати анализе интерпретирају?
- d) Које апроксимације се могу искористити да би се решио дати проблем?
- e) Како се добијени резултати могу упоредити са подацима добијеним из експлоатације?

Примена модела и симулације у технологији ливења резних елемената, поред скраћења времена, освајања производа и смањења трошкова производње, омогућује и производњу квалитетнијих одливака у првом покушају. Обзиром на продуктивност, количину шкарта, утрошак енергије по килограму одливка, применом компјутерске симулације ливења битно се утиче на побољшање завршне конструкције резних елемената и повољан крајњи економски исход. Предложени концепт у производњи резних елемената темељи се на процесу предвиђања и елиминисања могућих грешака одливка.

Интегрисани приступ конструисања у функцији развоја резних зуба за багере континуалног дејства, који је разматран у оквиру овог рада, у односу на постојеће стање има значајне предности, а то су:

- Скраћење времена освајања нових решења резних зуба
- Минимизирање потребе за физичким тестирањем (израда прототипа) које је скупо и дуготрајно и проузрокује застоје у производњи
- Смањују се трошкови освајања производа
- Минимизирање ризика неуспеха усвојене концепције и крајње конструкције резног елемента
- Скраћење времена развоја и тестирања прототипа
- Смањење броја и боља организација понављајућих корака у конструисању и тестирању
- Повећање поузданости процеса конструисања



- Поновљивост тестирања сличних конструкција, као и могућност проширења за тестирање осталих компоненти багера
- Повећање продуктивности инжењера и технолога

Будући рад у оквиру проблематике конструисања резних елемената код багера континуалног дејства треба усмерити на решавање следећих проблема:

- a) Крајња реализација концепта модуларног конструисања ведрице и припадајућих резних елемената за различите багере континуалног дејства.
- b) Постављање и верификација аналитичких израза да израчунавање допунских коефицијената, потребних за аналитичко одређивање оптерећења.
- c) Развој, повезивање и верификација осталих модела потребних за пуну примену интегрисаног приступа процеса конструисања.
- d) Развој базе знања, којом би се обезбедило системско прикупљање, и анализа информација из целокупног животног циклуса резних елемената.
- e) Дефинисање нумеричког модела базираног на хибридном *FEM/DEM* методу за израчунавање спољашњег оптерећења, који би био верификован подацима добијеним из експлоатационог мерења оптерећења резних зуба.
- f) Изградња функционалног виртуелног прототипа и његова верификација, којим би се омогућило виртуелно тестирање резних зуба у симулираним експлоатационим условима
- g) Развој модела за оптимизацију резних зуба, према строго дефинисаним критеријумима као што су облик ведрице, расположива сила резања, карактеристике стенског материјал и др.



## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ивковић, С., Игњатовић, Д., Јованчић, П., Танасијевић, М., Пројектовање одржавања опреме површинских копова угља, Рударско-геолошки факултет, Београд, ИСБН 978-86-7352-184-8 2008.
- [2] Макар, М., Теорија багеровања роторним багерима, Рударски институт, Београд, 1990.
- [3] **Поповић, М.**, Истраживање и развој дводелне конструкције зуба код роторних багера, Магистарски рад, Технички факултет, Чачак, 2007.
- [4] Југовић, З., Конструкција резних елемената - зуба за роторне багере са аспекта трибологије, YUTRIB'89, Прва Југословенска конференција о трибологији, Крагујевац, 1989.
- [5] Југовић, З., Утицај абразивног хабања зуба роторног багера на његову поузданост, Друга Југословенска конференција о трибологији YUTRIB'91, Крагујевац, 1991.
- [6] **Поповић, М.**, Југовић, З., Славковић, Р., Интегрисани приступ конструисања хабајућих резних елемената код роторних багера, SERBIATRIB'07, стр.259-262, Крагујевац, 2007.
- [7] Стојановић, Д., Игњатовић, Д., Ивковић, С., Утицај хабања зуба на ефективност рада роторних багера, Рударско геолошки факултет, Београд, YUTRIB'95.
- [8] **Поповић, М.**, Југовић, З., Избор оптималног решења конструкције за израду прототипа дводелног зуба роторног багера, ICDQM-2007, стр.906-911, Београд, 2007.
- [9] Танасијевић, С., Триболошки исправно конструисање, Монографија, Машински факултет, Крагујевац, 2004.
- [10] Игњатовић, Д., Јаковљевић, М., Производња угља у Србији – примена и стање механизације, ВИИИ Међународни симпозијум, МАРЕН 2010, стр.23-33, Лазаревац, 2010.
- [11] Техничка документација ПК Колубара, 2011.
- [12] Техничка документација ПК Костолац, 2011.
- [13] Јовановић, М., Лазић, В., Мутавцић, М., Ратковић, Н., Адамовић, Д., Избор технологије репаратурног наваривања радних делова грађевинских машина изложених интензивном абразивном хабању, YUTRIB'05, 9-та Југословенска конференција о трибологији, Крагујевац, 2005.
- [14] Јовановић, М., Лазић, В., Мутавцић, М., Адамовић, Д., Избор оптималне технологије репаратурног наваривања зуба утоварне кашике, Часопис „Заваривање и заварене конструкције“, Бр. 1/2005, стр. 11-20, 2005
- [15] Југовић, З., Трибо-економски ефекти примене дводелне конструкције зуба на роторним багерина, Трећа Југословенска конференција о трибологији YUTRIB'93, Крагујевац, 1993.
- [16] Југовић, З., Трбојевић, М., Стоисављевић, Н., Стајчић, Ф., Утицај конструкције зуба за роторне багере на трошкове производње, Зборник радова Првог Југословенско-чехословачког симпозијума „Техника, технологија и управљање процесима у површинској експлоатацији угља“.
- [17] Југовић, З., Могућност уштеде потрошње електричне енергије код сложених техничких система у рударству, Зборник радова ЕПСТ'95, Нови Сад, 1995.
- [18] Милтеновић, В., Машински елементи, облици, прорачун, примена, Машински факултет, Ниш, 2009.
- [19] Огњановић, М., Конструисање машина, Машински факултет, Београд, 2003.
- [20] Коларевић, М., Брзи развој производа, Београд, Задужбина Андрејевић, 2004.
- [21] Милтеновић, В., Вереш, М., Банић, М., Concept of virtual product development, Proceedings The Sixth International Symposium KOD 2010, стр. 7-12, 29 и 30 Септембар, Палић, 2010.
- [22] Fox, D., New Technologies for Performing Realistic Simulations, HP Asian CAE Symposium, 2008.
- [23] Мандић, В., Виртуелни инжењеринг, Машински факултет, Крагујевац, 2007.
- [24] Деведић, Г., CAD/CAM технологије, Машински факултет, Крагујевац, 2009.

- [25] Мандић, В., *FE симулације процеса*, Виртуелна производња – изазов за будућност, Машински факултет, Крагујевац, 2007.
- [26] Славковић, Р., Милићевић, И., *Програмско управљање машинама*, ИСБН 978-86-7776-088-5, Технички факултет, Чачак, 2010.
- [27] Зеленовић, Д., и др. *Интегрални развој производа*, Факултет техничких наука, Нови Сад, 1997.
- [28] **Поповић, М.**, Југовић, З., Славковић, Р., Грујовић, Н., Милићевић, И., Борота, Ј., *Integrated approach of cutting teeth design for excavator of continual action*, VII International Conference NM2011, Serbia, pp.89-98, 2011.
- [29] Петровић, П., Данилов, И., Лукић, Н., *Нови приступи у пројектовању екстремно варијантних производа 37*. Јупитер конференција, Зборник радова, ИСБН 978-86-7083-724-9, Стр.3.26-3.35, Београд, 2011.
- [30] Славковић, Р., Милићевић, И., **Поповић, М.**, Радиша, Р., *Симулација процеса ливења као основа CAD/CAM пројектовања динамички оптерећених одливака у машиноградњи*, 37. Јупитер конференција, Зборник радова, ИСБН 978-86-7083-724-9, Стр.2.30-2.35, Београд, 2011.
- [31] Југовић З., и др., *Истраживање и развој нове генерације зуба за роторне багере и багере ведричаре*, Пројекат технолошког развоја бр.14038, Министарство за науку Републике Србије, 2008-2010.
- [32] Николић, В., *Машински елементи, теорија, прорачун, примери*, Машински факултет, Крагујевац, 2004.
- [33] Стефановић, М., *Производни системи-основи функционисања производних система и управљање развојем производа и технологија*, Машински факултет, Крагујевац, 2005.
- [34] Ерић, Д., Марковић, С., *Application some aspects concurent engineering in computer development products and manufacturing process*, International Conference RaDMI, Врњачка Бања, 2009.
- [35] Јовановић, В., Томовић, М., Филиповић, С., *Интернетом подржана сарадња у дистрибуираним производним системима*, Purdue University, SAD, 2007.
- [36] Марјановић, Н., *Методe конструисања*, Машински факултет, Крагујевац, 1999.
- [37] Gill, R., Vanden Berg, E., *Soil dynamics in tillage and traction*, Agricultural handbook, Washington D.C., US, No.316, 1968.
- [38] Osman, S., *The mechanics of soil cutting blades*, J. Agric. Engrg. Res., 9(4), pp.313-328, 1964.
- [39] McKeyes, E., *Soil cutting and tillage*, Elsevier, New York, US, 1985.
- [40] Јовановић, П., *Механички поступци разарања стена при извођењу рударских радова*, Рударско-геолошки факултет, Београд, 1980.
- [41] Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Zimmerman, R.W., *Fundamentals of rock mechanics-4<sup>th</sup> ed.*, Blackwell Publishing, ISBN 978-0-632-05759-7, 2007.
- [42] Hoek E., *Practical rock engineering*, EH Consulting Engineer Inc., Canada, 2006.
- [43] Стевић, М., *Механика тла и стијена*, Рударско-геолошки факултет, Тузла, 1991.
- [44] Максимовић, М., *Механика тла*, Грађевинска књига, 2005.
- [45] Fowkes, S., Frisque, E., Pariseau, G., *Penetration of selected/granular materials by wedge-shaped tools*, Report of Investigations 7739, Bureau of Mines, U.S.D.I., Washington, D.C., 1973.
- [46] Kok Sien Ti, Bujang B.K. Huat, Jamaloddin Noorzaeei, Moh'd Saleh Jaafar, Gue See Sew, *A review of basic soil constitutive models for geotechnical application*, University Putra, Journal EJGE, Vol.14, pp.2-18, Malaysi, 2009.
- [47] Sawicki, A., Świdzinski, W., *Elastic moduli of non-cohesive particulate materials*, Powder Technology, Elsevier, Switzerland, Vol. 96 (1), pp. 24–32, 1998
- [48] Kazimi, S.M.A., *Solid Mechanics*, Tata McGraw-Hill. ISBN 0074517155, 1982
- [49] Drucker, D. C., Prager, W., *Soil mechanics and plastic analysis for limit design*. Quarterly of Applied Mathematics, vol. 10, no. 2, pp. 157–165., 1952
- [50] Chu, E., *Generalization of Hill's 1979 anisotropic yield criteria*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 50, pp. 207-215., 1995

- [51] Tsai, S. W., Wu, E. M., A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*. vol. 5, pp. 58-80., 1971
- [52] Johnson, G. R. and Holmquist, T. J., An improved computational constitutive model for brittle materials, *High-Pressure Science and Technology*, American Institute of Physics, 1994.
- [53] Домбровский, Н.Г., Многоковшовый экскаватор–конструкции, теория и расчет, Издательство „Машиностроение“, Москва, 1972.
- [54] Pajer G., Pfeifer M., Kurth F., *Tagebaugroßgeräte und Universalbagger*, Veb Verlag Technik Berlin, Germany, 1985.
- [55] Terzaghi, K., *Теоријска механика тла*, Научна књига, Београд, 1972.
- [56] McKyes, E., *Agricultural Engineering soil mechanics*, Elsevier Science Publishers, New York, US, ISBN 0-444-88080-1, 1989.
- [57] Verruijt, A., *Soil mechanics*, Delft University of Technology, Holandija, 2006.
- [58] Sokolovski, V.V., *Statics of soil media*, Butterworth, London, England, 1956.
- [59] Поповић, М., Југовић, З., Славковић, Р., Теоријско разматрање интеракције резног зуба и стенског материјала, *Зборник радова осме интернационалне конференције механизације и аутоматизације у рударству, МАРЕН 2010*, стр.307-314, Лазаревац, 2010.
- [60] Swick, C., Perumpral, V., A model for predicting soil-tool interaction, *Journal of Terramechanics*, 25(1), pp.43-56, 1988.
- [61] Yao, Y., Zeng, C., Investigation of the relationship between soil-metal friction and sliding speed, *Journal of Terramechanics*, 27(4), pp.283-290, 1990
- [62] McCarthy, F., *Essential of soil mechanics and foundations - Basic geotechnics*, Fourth Edition, Regents/Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1993.
- [63] Yong, N., Warkentin, P., *Introduction to soil behavior*, McMillan, New York, US, 1966.
- [64] Gill, R., Vanden Berg, E., *Soil dynamics in tillage and traction*, *Agricultural handbook*, Washington D.C., US, No.316, 1968.
- [65] Zelenin, N., Balovnev, I., Kerov, P., *Machines for moving the earth*, Amerind Publishing, New Delhi, 1985.
- [66] Korzen, Z., Mathematical modeling of the cutting process of strongly heterogeneous bulk materials with curvilinear edge tools, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 7(1), pp.27-54, 1985
- [67] Makarov, V., Approximate calculation of the cutting forces in brittle materials, *Journal of Mining Science*, 5, pp.54-60, 1992.
- [68] Karmakar, S., Kushwaha Lal, R., Dynamic modeling of soil-tool interaction: An overview from a fluid flow perspective, *Journal of Terramechanics*, No.43, pp.411-425, 2006.
- [69] Gavrilov, D., *Discrete mechanics of granular matter*, PhThesis, University of Calgary, Canada, 1999.
- [70] Bernold, L.E., Motion and path control for robot excavation, *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE, Vol.6, pp.1-18, 1993.
- [71] Zelenin, A.I., *Fizičeskie osnovi teorii rezanja gruntov*, Izdatejstvo AN, SSSR, 1950.
- [72] Zelenin, A.I., *Osnovi razrušenija gruntov mehaničeskimi sposobami*, *Mašinostrenia*, Moskva, 1968.
- [73] Hemami, A., Goulet, S., Aubertin, M., On the resistance of particulate media to bucket loading, 6th symposium on Mining Automation, Canadian Institute of Mining, Canada, 1994.
- [74] Blouin, S., Hemami, A., Lipsett, M., Review of resistive force models for earthmoving processes, *Journal of aerospace engineering*, Vol.14, No3, 2001.
- [75] Reece, A.R., The fundamental equation of earthmoving mechanics, *Symposium of Earthmoving Machinery*, Institute of Mechanical Engineers, London, England, 1965.
- [76] Yong, N., Warkentin, P., *Introduction to soil behavior*, McMillan, New York, 1966.
- [77] Osman, S., The mechanics of soil cutting blades, *J. Agric. Engrg. Res.*, 9(4), pp.313-328, 1964.
- [78] McCarthy, F., *Essential of soil mechanics and foundations - Basic geotechnics*, Fourth Edition, Regents/Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1993.
- [79] Desir, F.L., A field evaluation of the wedge approach to the analysis of soil cutting by narrow blades, M.Sc. Thesis, McGill University, Montreal, Canada, 1981.

- [80] Yong, R.N., Chen, C.K., Analytical and experimental studies of soil cutting, A.S.A.E., Paper No. 70-676, St. Joseph, USA, 1970.
- [81] Harr, M.E., Foundations of theoretical soil mechanics, Mc-Graw Hill, New York, USA, 1966
- [82] Hettiaratchi, D.R.P., Reece, A.R., Symmetrical three-dimensional soil failure, Journal of Terramechanics, Vol.4, No.3, pp. 45-67., 1967
- [83] Hettiaratchi, D.R.P., Reece, A.R., The calculation of passive soil resistance, Geotechnique, Vol. 24, No. 3, pp. 289-310., 1974
- [84] Shmulevich, I., Asaf, Z., Rubinstein, D., Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method, Soil & Tillage Research 97, pp.37–50, 2007.
- [85] Payne, P.C.J, The relationship between the mechanical properties of soils and the performance of simple cultivation implements, Journal of Agricultural Engineering, Vol.1, No.1, pp. 23-50, 1956.
- [86] Godwin, R.J., An investigation into the mechanics of narrow tines in frictional soils, Ph.D. Thesis, University of Reading, U.K., 1974.
- [87] Godwin, R.J, Spoor, G., Soil failure with narrow tines, Journal of Agricultural Engineering, Vol. 22, pp.213-228, 1977.
- [88] Payne, P.C.J, Tanner, D.W., The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation instruments, Journal of Agricultural Engineering, Vol. 4, No.4, pp. 312-325, 1959.
- [89] McKyes, F., Ali, O.S., The cutting of soil by narrow blades, Journal of Terramechanics, Vol.14, No.2, 1977.
- [90] Grisso, R.D., Perumpral, J.V, Desai, C.S, A soil-tool interaction model for narrow tillage tools, ASAF Paper No. 80-1518, 1980.
- [91] Perumpral, J.V., Grisso, R.D, Desai, C.S., A soil-tool model based on limit equilibrium analysis, Transactions A.S.A.E., Vol.26, No.4, pp. 991-995, 1983.
- [92] Debeleac, C., Loading Processes Dynamics Modelling Taking into Account the Bucket-Soil Interaction, Analele universității, “Eftimie Murgu” Resita, Anul XIV, NR. 1, ISSN 1453 – 7394, pp.81-86, 2007.
- [93] Jing, L., J.A. Hudson, A.J., Numerical methods in rock mechanics, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, No.39, pp.409–427, 2002.
- [94] Cundall, P.A., Strack O.D.L., A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique 29, pp.47-65, 1979.
- [95] Yang S., Simulation of Rock Cutting by the Finite Element Method, Shanghai Branch of China Coal Research Ins., China, 2004.
- [96] [www.roscience.com](http://www.roscience.com)
- [97] The Stanford Rock Fracture Project, Stanford University, USA, 2002.
- [98] Cundall, P.A., A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems, Proc.Sympo. ISRM II, Nancy, pp.129-139, 1971.
- [99] Plesha, M. E., Aifantis, E.C., On the modelling of rocks with microstructures, The 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), June 20 - 23, 1983.
- [100] Walton, O.R., Particle dynamic modelling of geological materials, Univ. of Ca. Lawrence Livermore Lab. Rep. UCRL-52915, 1980.
- [101] Поповић, М., Југовић, З., Славковић, Р., Примена *DEM* нумеричке методе у анализи проблема оптерећења резних елемената код роторних багера, Часопис ИМК-14, Број 34, ИССН 0354-6829, 2010.
- [102] Rojek, J., Discrete element modelling of rock cutting, Computer methods in material science, Vol.7, No.2, 2007.
- [103] Cleary W.P., Large scale industrial DEM modelling, Journal Engineering Computations, ISSN 0264-4401, Vol. 21, No. 2/3/4, pp.169-204, Australia, 2004.
- [104] Labra, C., Rojek, J., Onate, E., Zarate, F., Advances in discrete element modelling of underground excavations, Acta Geotechnica, Vo.13., pp.317-322, 2008.
- [105] Söhne W., Einige Grundlagen für eine landtechnische Bodenmechanik, Grundlagen der Landtechnik, Germany, 1956.

- [106] Ветров Ю.А., Исследования резания грунтов, Издательство „Машиностроение“, Москва, 1971.
- [107] Домбровский Н.Г., Экскаваторы, общие вопросы теории, проектирования, исследования и применения, Издательство „Машиностроение“, Москва, 1969.
- [108] Raaz V., Assessment of the Digging Force and Optimum Selection of the Mechanical and Operational Parameters of Bucket Wheel Excavators for Mining of Overburden, Coal and Partings, KRUPP Fördertechnik, Germany, 2005.
- [109] Raaz V., Optimization of digging tools for bucket wheel excavators, VIII Међународни симпозијум, МАРЕН 2010, стр.288-295, Лазаревац, 2010.
- [110] Leymann H., Optimization of digging tools for bucket wheel excavators, Excellence in Technology - ThyssenKrupp Fördertechnik, 2010.
- [111] Merchant M. E., Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip, Journal of Applied Physics, Vol.16,1945.
- [112] Nishimatsu Y. The mechanics of rock cutting, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 9, pp.261–270., 1972.
- [113] Evans I.A, Pomeroy C. D., The strength, fracture and workability of coal, Pergamon Press, Oxford, 1966.
- [114] Roxborough F.F., King, P., Pedroncelli, E.J. Tests on the cutting performance of a continuous miner, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 9–25., 1981.
- [115] Roxborouh F.F., Pedroncelli, E.J. Practical evaluation of some coalcutting theories using a continuous miner. The Mining Engineer, pp.145–155. 1982.
- [116] Evans I. A, theory of the cutting force for point attack picks, Int. J. of Min. and Geol. Eng., Vol. 2, 1984.
- [117] Goktan R.M., A suggested improvement on Evans' cutting theory conical bits, Proc. of the 4 th Int. Symp. On Mine Mechanization Automation, Brisbane, Queensland, Australia, Vol.1, 1997.
- [118] Vlasblom W.J., Cutting of rock, Delft University of Technology, Netherlands, 2007.
- [119] **Поповић, М.**, Југовић, З., Славковић, Р., Утицај вертикалних осцилација катарке роторног багера на оптерећење резних зубаца, Часопис “Трактори и погонске машине”, Вол.14. бр.4., стр.64-69, ИССН 0354-9496, 2009.
- [120] Xue, J., Xia, Y., Ji, Z., Zhou, X., Soft rock cutting mechanics model of TBM cutter and experimental research, ICIRA, LNAI 5928, pp.383-391, 2009.
- [121] Wocka, N., Wocka, C., Effect on the cutting force of bucket wheel excavators in difficult unconsolidated rock, Braunkohle 41, Heft 8, 1989.
- [122] Бошњак, С., Зрнић, Н., Огуаманам, Д., On the dynamic modelling of bucket wheel excavators, FME Transactions 34, Машински факултет, Београд, 2006.
- [123] Adachi, J.I., Frictional contact in rock cutting with blunt tools, Master degree thesis, University of Minnesota, 1996.
- [124] Јосифовић, Д., Испитивање машинских конструкција, Машински факултет, Крагујевац, 2000
- [125] Радиша, Р., Марковић, С., Приставец, Ј., Квргић, В., Манасијевић, С., Употреба САЕ технике за технологију виртуелног дизајна одливака-уштеда у ливницама Србије, Часопис Ливарство, Вол.47, Но.1, ИССН 0456-2933, стр.12-24, 2008.
- [126] Југовић З., и др., Реконструкција зуба за роторни багер SchRS 1600, Елаборат, Технички факултет Чачак, 2011.
- [127] [www.magma-soft.de](http://www.magma-soft.de)
- [128] **Поповић, М.**, Југовић, З., Славковић, Р., The concept of Functional Virtual Prototype in the design of excavator cutting teeth, Tribology in Industry, Vol 3-4, 2009.
- [129] Огњановић, М., Примена 3Д технологија у пројектовању, развоју и едукацији, Конференција „Forum of New Technologies“, Машински факултет, Београд, 2009.
- [130] Simpson, T.W., Siddique, Z., Jiao, J., Product Platform and Product Family Design – Methods and Applications, Springer, Res.Eng. Design, No.13, USA, 2006



- [131] Suzić, N., Lazarević, M., Sremčev, N., Design for product variety, The Sixth International Symposium about forming and design in mechanical engineering KOD 2010, ISBN 978-86-7892-278-7, pp.219-222, Palić, 2010.
- [132] Bierwith, S., R., Excavation bucket, USA Patent documentation, Patent No.5680717, 1997
- [133] Herve, Y., Desgreys, P., Functional virtual prototyping design flow and VHDL-AMS, Forum on specification & Design Languages (FDL'06), Darmstadt (Germany), September 19-22, pp. 69-76, 2006
- [134] Legendre, A., Herve, Y., Functional Virtual Prototyping Applied to Medical Devices Development, Systems VIP, Strasbourg, 2008.
- [135] ETS-SLABY, Bagger-Simulator 2008 Software, Astragon software GMBH, [www.ets-slabby.de](http://www.ets-slabby.de), 2008.
- [136] Ryan, R., Digital testing in the context of digital engineering - Functional Virtual Prototyping, Mechanical Dynamics, Inc., Michigan, USA, 1999.
- [137] Fox, D., New Technologies for Performing Realistic Simulations, HP Asian CAE Symposium, 2008.
- [138] Чикара, Д., Ракин, М., Бајић, Н., Чикара, Д., Нови трендови у развоју материјала за зубе рото-багера, Часопис „Енергетске технологије“, бр.3, 2006.
- [139] Fernández E.J., Vijande R., Tucho R., Rodriguez J., Martin A., Materials selection to excavator teeth in mining industry, Journal Wear, No.250, pp.11–18, 2011.
- [140] Поповић, М., Калајдић, М., Могућности оптимизације конструкција методом коначних елемената, VIII Међународна конференција флексибилне технологије, Зборник радова стр. 45-46., Нови Сад, 2003.
- [141] Радиша, Р., Манасијевић, С., Марковић, С., Оптимизација технологија ливења метала применом софтверских алата, Часопис Ливарство, ИССН 0456-2933, Вол.48, Но.3, Београд, стр.30-36., 2009.
- [142] Гулишија, З., Виртуелна производња одливака применом CAE техника, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, 2007.
- [143] [www.livenje.ftn.uns.ac.rs](http://www.livenje.ftn.uns.ac.rs)
- [144] Славковић, Р., Радиша, Р., Милићевић, И., **Поповић, М.**, Симулација процеса ливења као помоћ CAD/CAE/CAM пројектовању резних елемената багера континуалног дејства, 35. Јупитер конференција, Београд, 2009.
- [145] Марковић, С., Матијашевић, С., Јосиповић, Ж., Оцокољић, С., Збирка решених задатака из ливарства, Технолошко-металуршки факултет, Београд, 1994.
- [146] Анишин, З., Производне технологије II – технологија ливења, Виша техничка школа, Суботица, 2003.
- [147] Славковић, Р., Југовић, З., Милићевић, И., **Поповић, М.**, Дучић, Н., Недељковић, Б., Simulation methodology as the basis of CAD/CAM/CAE design of dynamically loaded castings in machine building, Metalurgia International, Vol. XVII, No.4, pp.19-26, 2012.
- [148] Raja, V., Fernandes, K., Reverse Engineering – An Industrial Perspective, Springer-Verlag, London, 2008.
- [149] Pahole, I., Ficko, M., Balič, J., Šenveter, J., Evaluation and exploitation of a tool shape acquired by the 3d scanning process, the Sixth International Symposium about forming and design in mechanical engineering KOD 2010, ISBN 978-86-7892-278-7, pp.129-132, Palić, 2010.
- [150] Трајановић, М., Грујовић, Н., Миловановић, Ј., Миливојевић, В., Рачунарски подржане брзе производне технологије, Монографија, Машински факултет, крагујевац, 2008.
- [151] Славковић Р., и др., Развој нове конструкције кашике багера континуалног дејства у циљу интегрисања модуларних резних елемената, Пројекат технолошког развоја бр.35037, Министарство за науку и технолошки развој, Република Србија, 2011-2014.
- [152] Park, B., Development of a Virtual Reality Excavator Simulator: a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Virginia Polytechnic Institute, USA, 2002.
- [153] Kramadibrata, S., The influence of rock mass and intact rock properties on the design of surface mines with particular reference to the excavatability of rock, Doctorate, School of Civil Engineering, Curtin University of Technology

- [154] Shmulevich, I. , Asaf, Z., Rubinstein, D., Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method, *Soil & Tillage Research* 97, pp.37–50, 2007.
- [155] Prajapati, K., V., Modeling of Rock Failure Under PDC Cutter Based on Lab Experiments, Texas Tech University, 2011.
- [156] Hoek E., *Practical rock engineering*, EH Consulting Engineer Inc., Canada, 2006.
- [157] Munjiza A., *Discrete element methods-theory and application*, University of London, ISBN 978-0-9551179-8-5, Velika Britanija, 2010.
- [158] **Поповић, М.**, Југовић, З., Славковић, Р., Драгићевић, С., Милићевић, И., Analysis of the excavator’s cutting teeth load capacity by applying functional virtual prototypes, *Metalurgia International*, Vol. XVII, No.3, pp.58-63, 2012.
- [159] Popko, E., Luyer, M., E., *Asset Management to support Product Lifecycle Management (PLM)*, IBM Business Partner, USA, 2009.



# ПРИЛОГ

## ПРИЛОГ 1. АНАЛИЗА ПОХАБАНОСТИ МОДУЛАРНОГ РЕЗНОГ ЗУБА

Након монтаже „нулте“ серије модуларних резних зуба, на багер ведричар *ERS1000/20* и експлоатационог рада у времену од 280÷320 радних часова, извршена је анализа њихове похабаности (слика П1.1). Циљ анализе је оцена испуњености услова адекватног избора материјала резних зуба, избора облика и димензија и њихове адекватне монтаже на ведрницу багера.



а)



б)



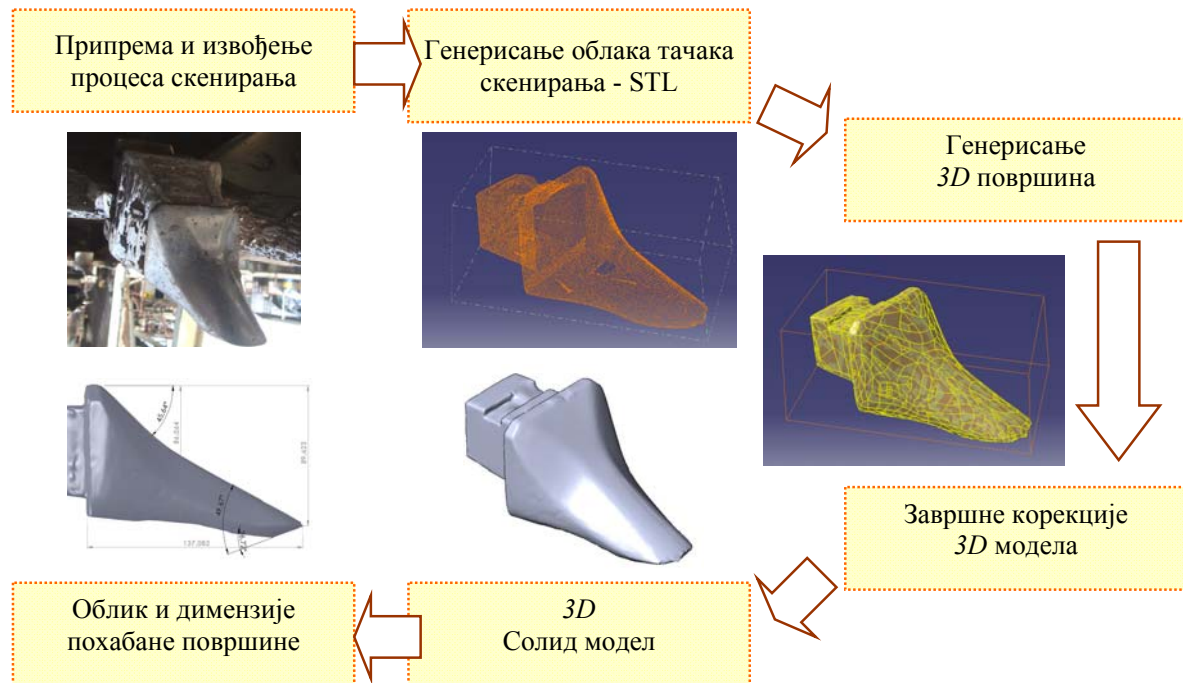
ц)

Слика П1.1 а) Облик и величина хабања постојећих једноделних резних зуба, Пример хабања резног дела „нулте“ серије модуларних резних зуба; б) леђна површина, ц) Хабање бочне стране

Анализа похабаности је реализована применом концепта реверзног инжењеринга, који представља део методолошког приступа интегрисаног развоја резних зуба. Реверзни инжењеринг обједињује процесе којима се од физичког модела, помоћу неке врсте 3D дигиталзера, прикупљају 3D подаци о геометрији објекта. На слици П1.2. приказана је методологија која је коришћена за добијање слике хабања резног дела зуба, а у табели П1.1. техничке карактеристике примењеног ласерског скенера.

Посматрајући проблематику конструисања резних зуба код багера континуалног дејства, реверзни инжењеринг би требало поставити у центар овог процеса. Важност примене реверзног инжењеринга лежи у решавању следећих проблема:

1. Добијање 3D солид модела хабања резних елемената
2. Добијање 3D солид модела хабања склопа ведрнице и резних елемената
3. Контрола исправности облика и димензија током израде резних зуба, и након монтаже на ведрницу багера
4. Контрола исправности облика и димензија алата за ливење резних зуба [149]



Слика П1.2 Методологија добијања слике хабања применом реверзног инжењеринга [28]

Табела П1.1 Техничке карактеристике 3D ласерског скенера LPX-250

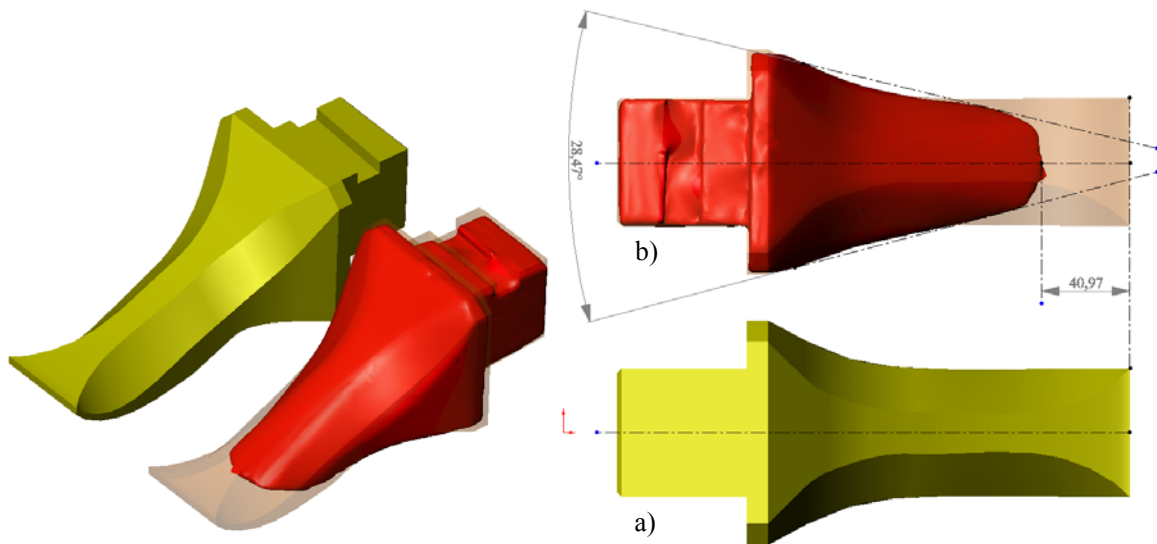
Величина радног стола (пречник)		254.0 mm
Максимални радни простор (пречник x висина)		254.0 x 406.4 mm
Резолуција	Угаона	0.2°
	Дужинска	0.2 mm
Ласер	Таласна дужина	600±700 nm
	Снага	< 0.39W
	Фреквенција пулса	2857 Hz
Сензор		Безконтактни ласерски сензор
Брзина скенирања	Брзина обртања радног стола	15 o/min
	Брзина обртања главе ласера	15 o/min
	Посмак главе ласера	50 mm
Метод прослеђивања података		Асинхрони Двострука трансмисија података
Брзина пребацивања података		9600/115200 bps
Формати 3D модела		STL, VRML, IGES

Посматрајући процес хабања резних зуба код багера континуалног дејства у временском домену, могу се уочити промена облика зуба и интензитет трошења материјала. Максимално трошење зуба које се допушта, представља тренутак када резни зуб престаје исправно да врши своју основну функцију. Ово је условљено губитком резних способности и прекомерним одступањем од његових номиналних димензија. У овом тренутку је неопходно извршити замену похабаног зуба.

Примена интегрисаног приступа конструисања захтева повратну информацију о понашању резних зуба у експлоатационим условима и систематизацију тако добијених података, како би се накнадно могли применити у процесу поновног конструисања. У табели П1.2. приказани су проблеми који су разматрани у оквиру реализоване анализе хабања резног зуба.

Табела П1.2 Анализа хабања „нулте“ серије модуларних резних зуба у експлоатационим условима:

АНАЛИЗИРАН ПРОБЛЕМ	ЗАКЉУЧАК
Да ли је материјал за израду резног зуба исправно усвојен?	(ДА) Унапређење усмерити у правцу додавања специфичних легирајућих елемената, са тежиштема на економској исплативости.
Да ли је усвојена адекватна термичка обрада?	(ДА) Унапређење усмерити у правцу оптимизације технолошког поступка термичке обраде.
Да ли су облик и димензије хабања адекватни са аспекта самооштрење?	(ДА) Резултат приказан на слици П1.3. указује да се током хабања резни део зуба самооштри. Сличан поступак треба применити и на бочне резне зубе, који су делимично у захвату.
Да ли су облик и геометрија резног зуба исправно подешени за дате услове рада?	(ДЕЛИМИЧНО) Применом различитих модуларних врхова, прилагођених одговарајућој позицији на ведрице, овај проблем се може превазићи.
Да ли је положај и оријентација резног зуба на ведрици исправно дефинисана?	(У НАЈВЕЋОЈ МЕРИ) → Извршена је корекција угаоног положаја резног зуба у односу на правац кретања ланца са ведрицама. → Зуби су монтирани да буду паралелни са овим правцем ( $0^\circ$ ), уместо постојања досадашњег угла од $6^\circ$ . → Будућа разматрања оптимизације процеса резања свакако треба да иду у смеру дубље анализе овог проблема.
Да ли је усвојен оптимални број резних зуба на ведрици?	(-) → Анализирано је хабање само чеоних, најоптерећенији резних зуба на ведрици, тако да овај проблема није разматран. → Будућа разматрања оптимизације процеса резања свакако треба да иду у смеру дубље анализе овог проблема.



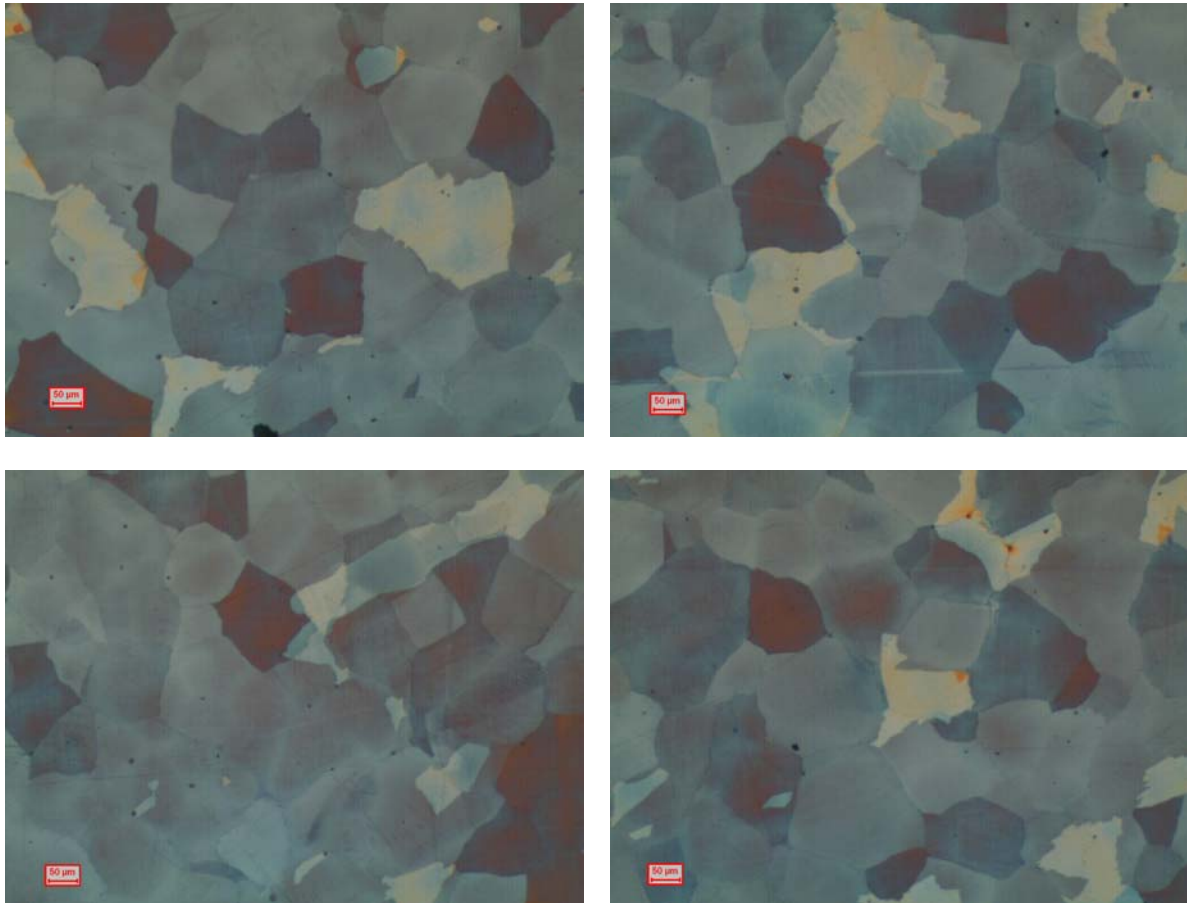
Слика П1.3 Пример анализе облика и геометрије хабања резног дела зуба. а) Модел непохабаног дела, б) 3D модел похабаног резног дела зуба



## ПРИЛОГ 2. АНАЛИЗА МИКРОСТРУКТУРЕ РЕЗНОГ ДЕЛА ЗУБА

Након реализације термичке обраде код „нулте“ серије модуларних резних зуба, извршена је анализа микроструктуре одливка резног дела. Циљ анализе је оцена испуњености услова које треба да задовољи материјал након технологије израде и примењене термичке обраде.

Анализа микроструктуре попречног пресека резног дела зуба након термичке обраде гашења одливака са температуре  $1080^{\circ}\text{C}$  у струји воде на тврдоћу  $200\text{HV}$  извршена је помоћу светлосног микроскопа REICHERT-JANG са LEICA колор видео камером, који је повезан са LEICA Q500MC рачунаром за процесирање слике. Добијени изглед микроструктуре приказан је на слици П2.1.

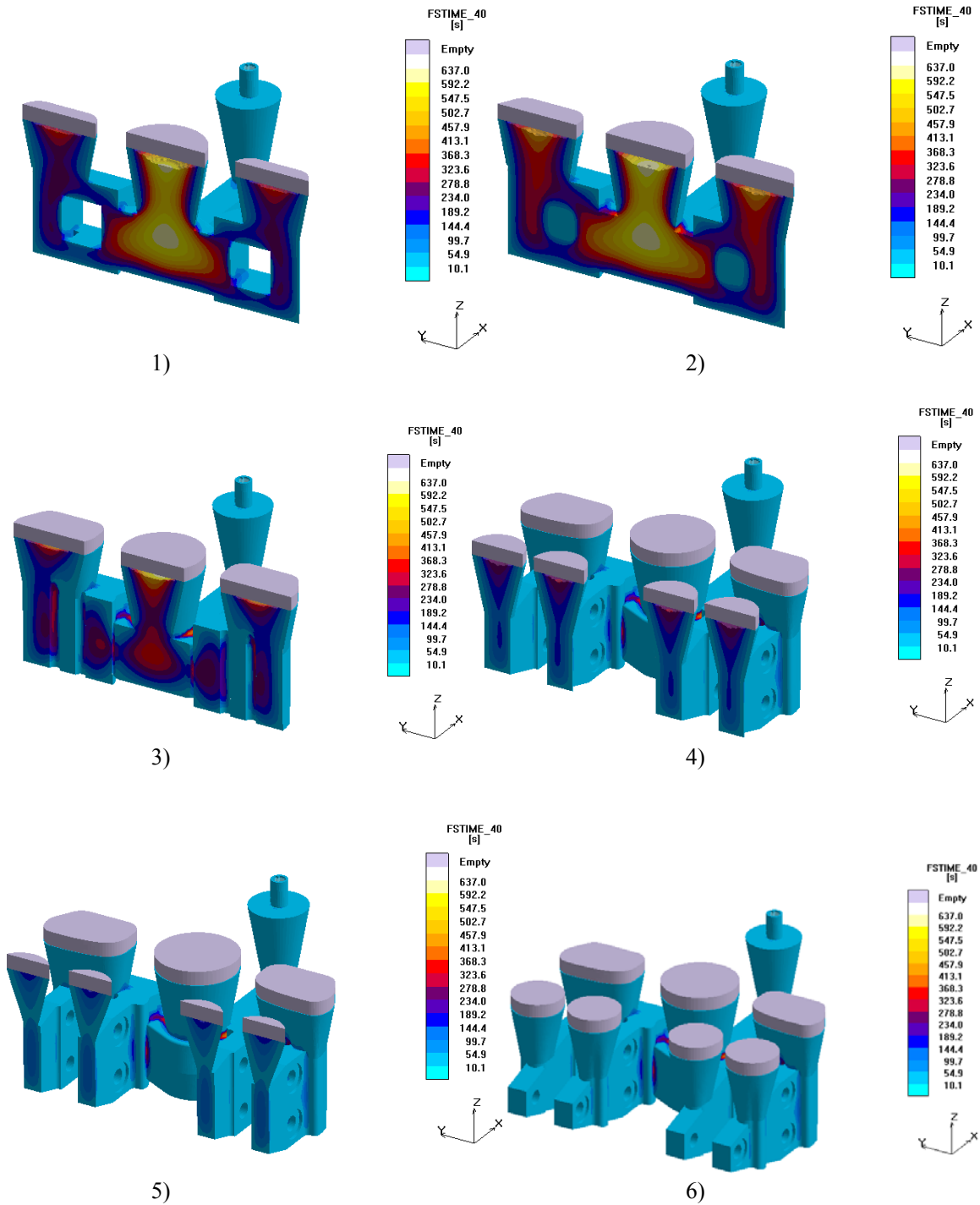


*Слика П2.1 Изглед микроструктуре резног дела зуба након термичке обраде*

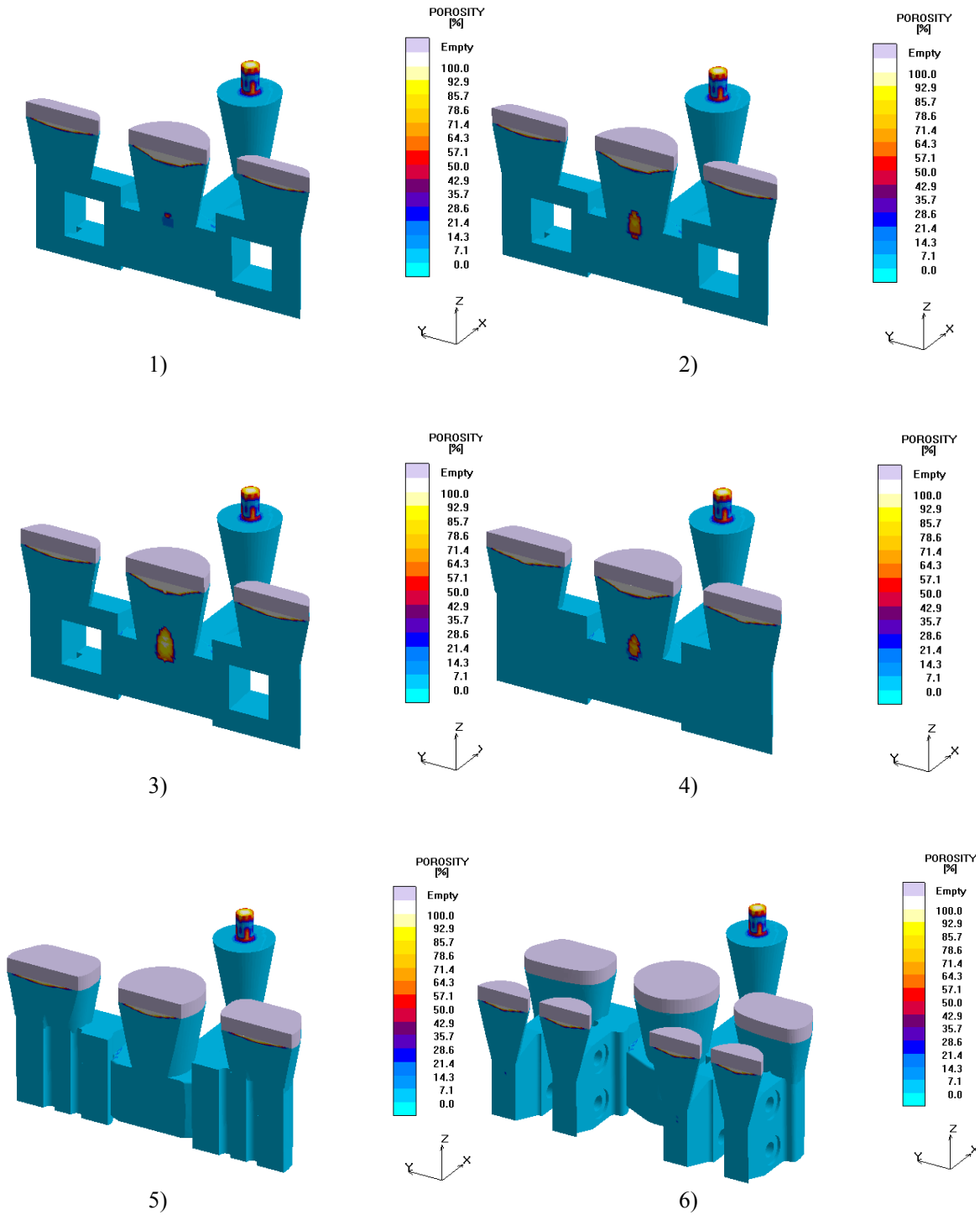
Са слика се види да је постигнута аустенитна структура очекивана за челик X120Mn12. У процесу експлоатације под дејством спољашњег оптерећења, ова структура се трансформише у мартензитну структуру која резном делу обезбеђује потребну тврдоћу и отпорност на хабање.



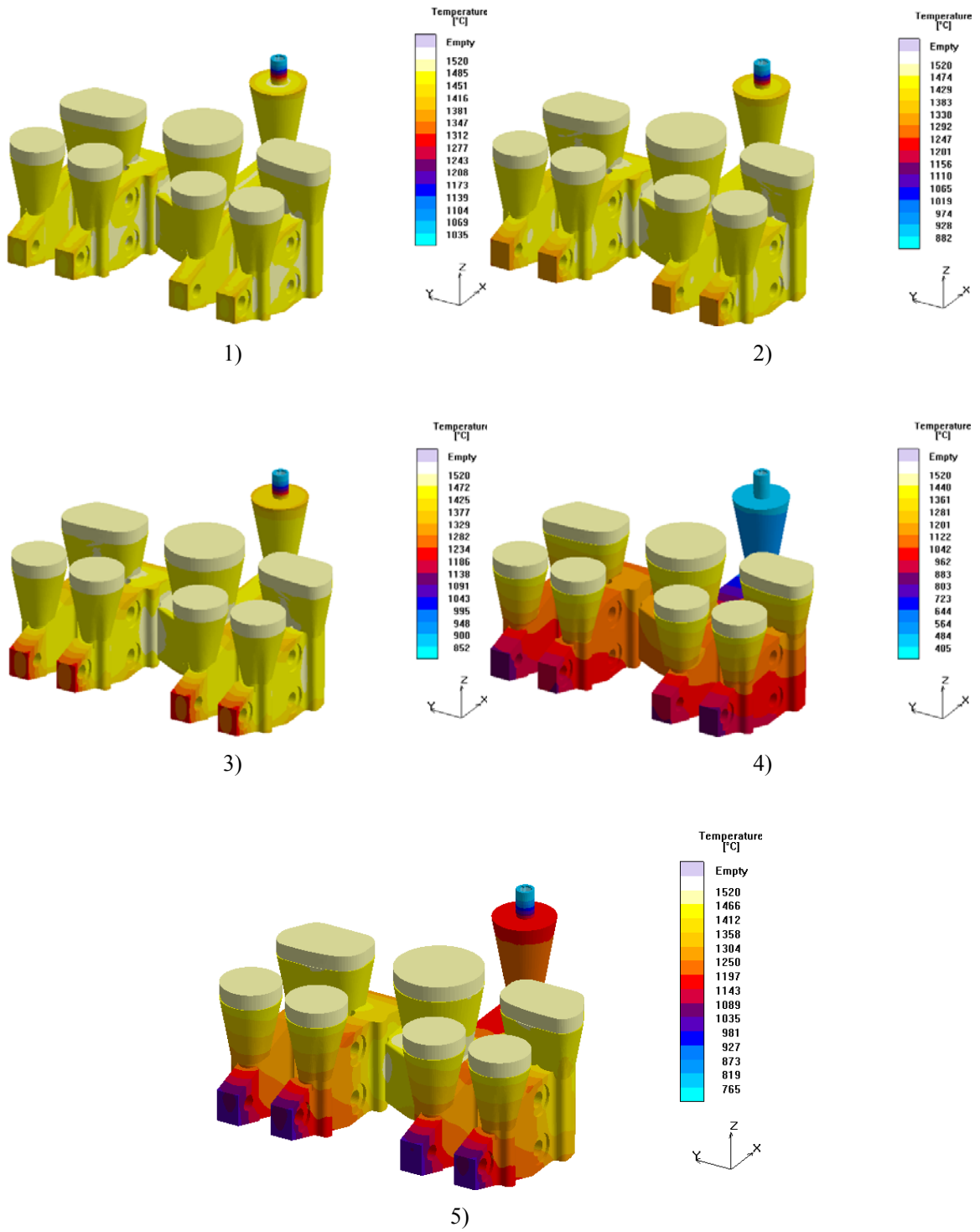
**ПРИЛОГ 3.1 АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ЗА УСВОЈЕНО РЕШЕЊЕ  
ОДЛИВКА НОСАЧА РЕЗНОГ ЗУБА И ПОДЕШЕНЕ ПАРАМЕТРЕ ЗА  
ЊЕГОВО ЛИВЕЊЕ**



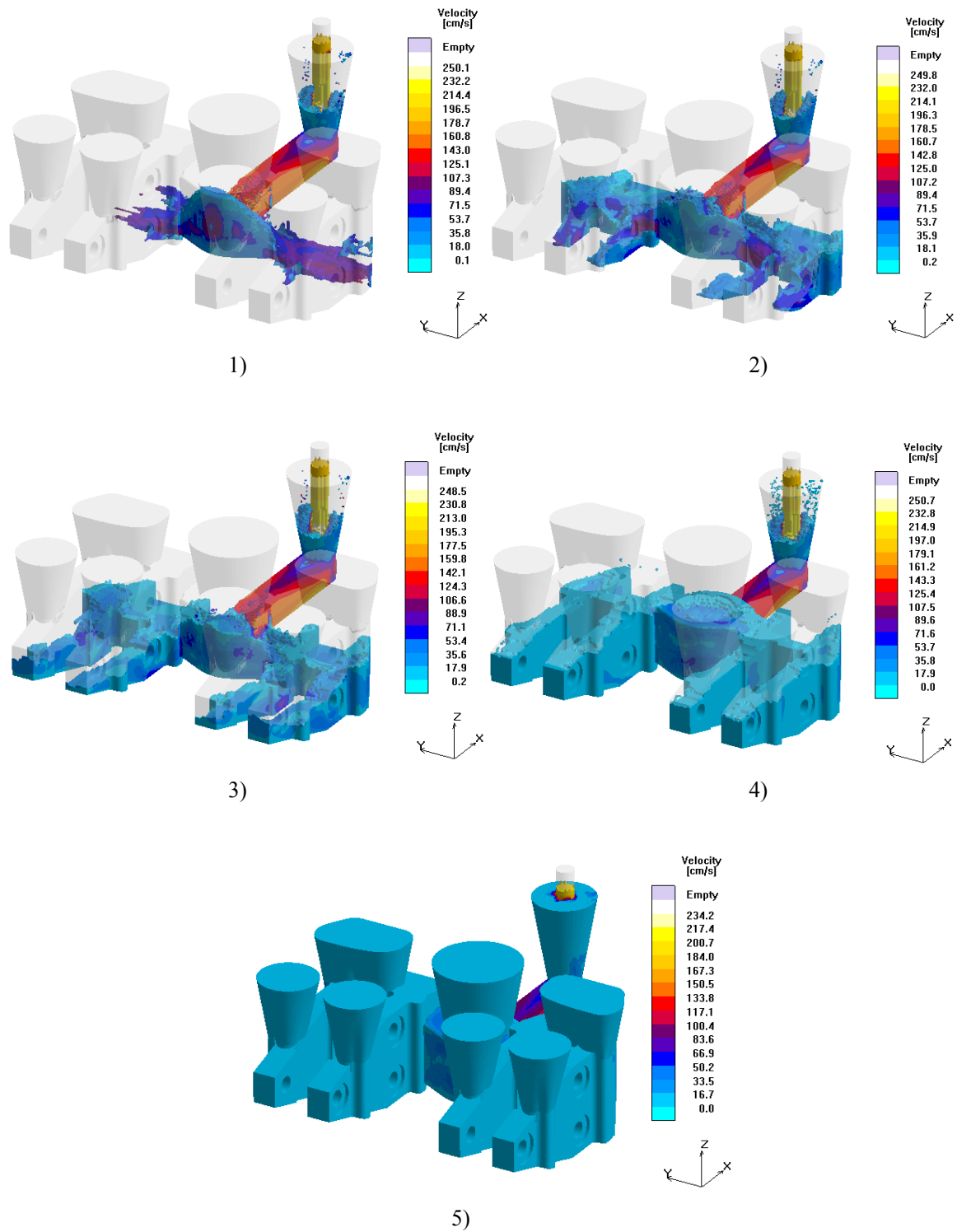
Слика ПЗ.1 Могућност макроскопског храђења одливка



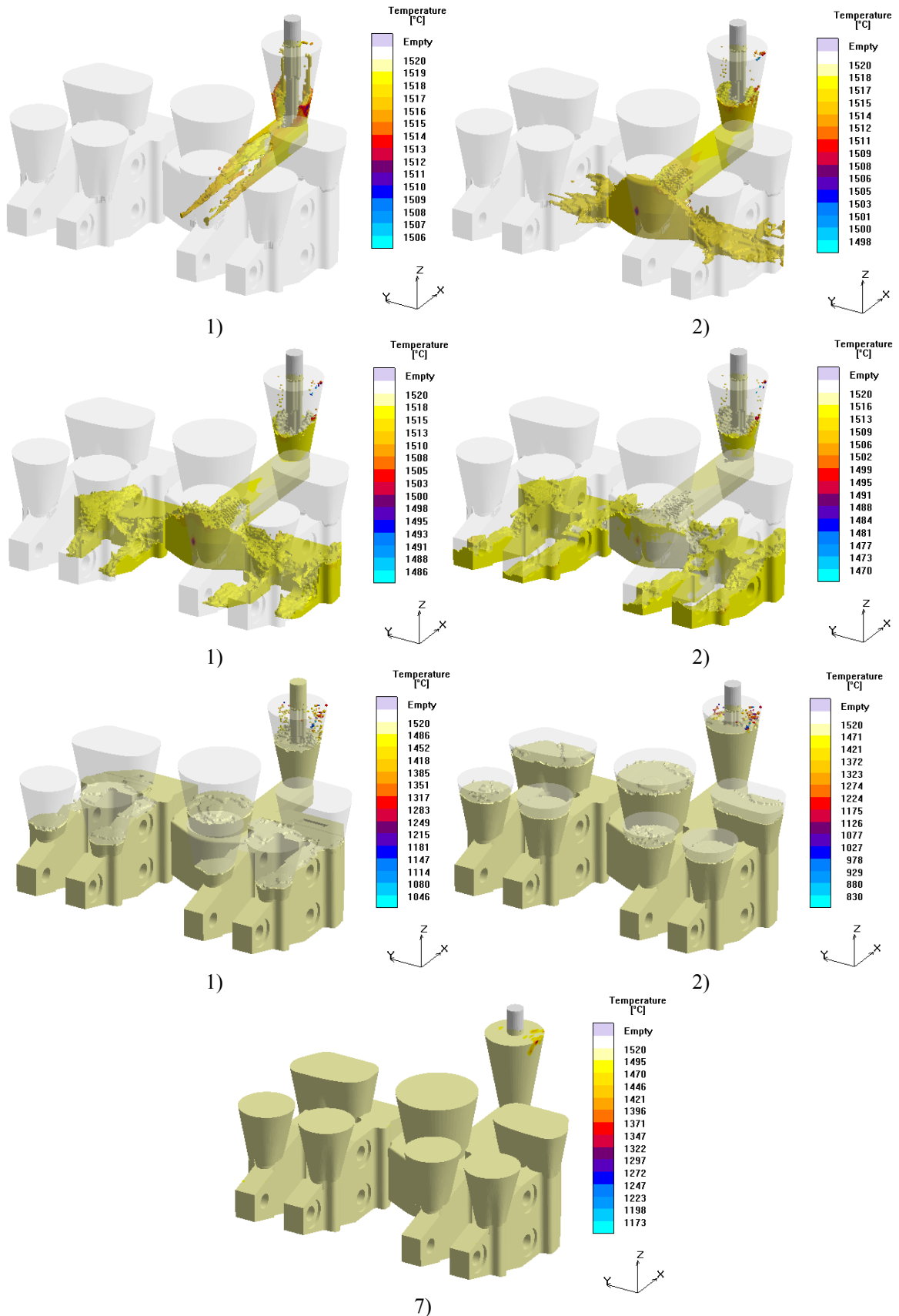
Слика П3.2 Анализа порозности у различитим попречним пресецима одливка



Слика ПЗ.3 Температурно поље солидификације



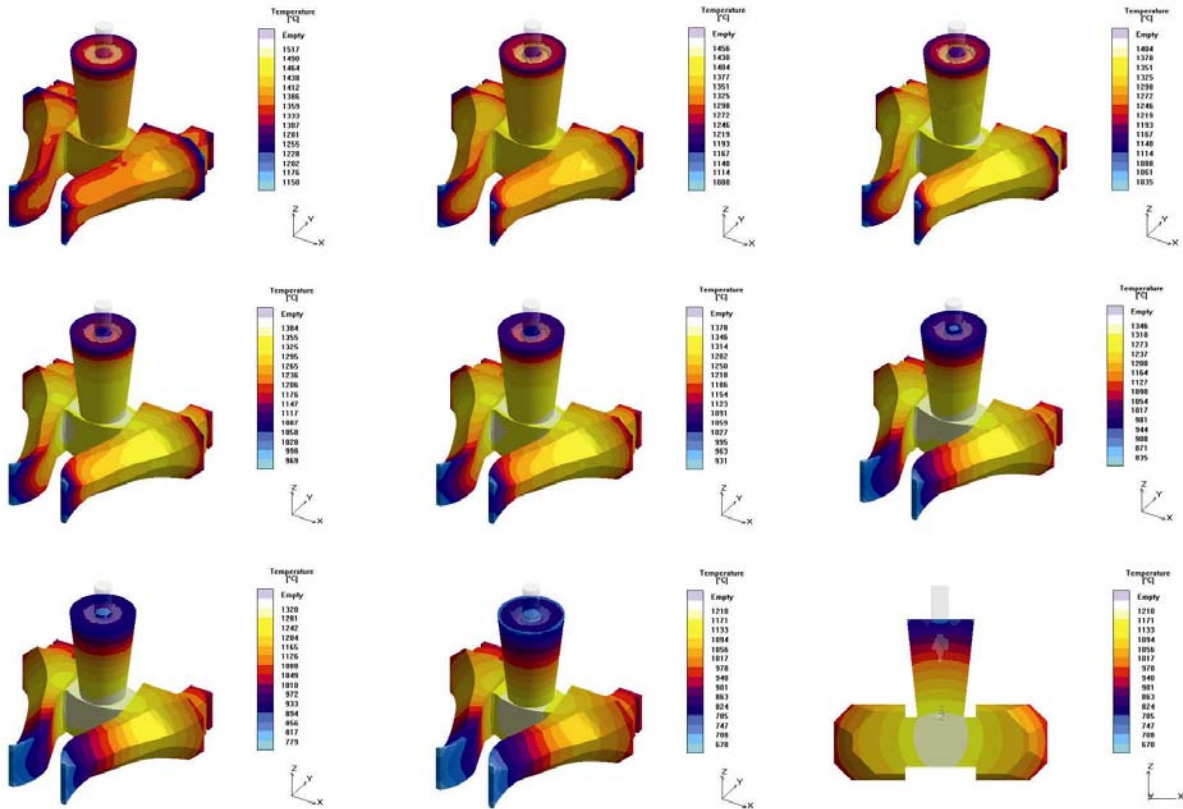
Слика ПЗ.4 Брзина пуњења за различите тренутке попуњености калуна



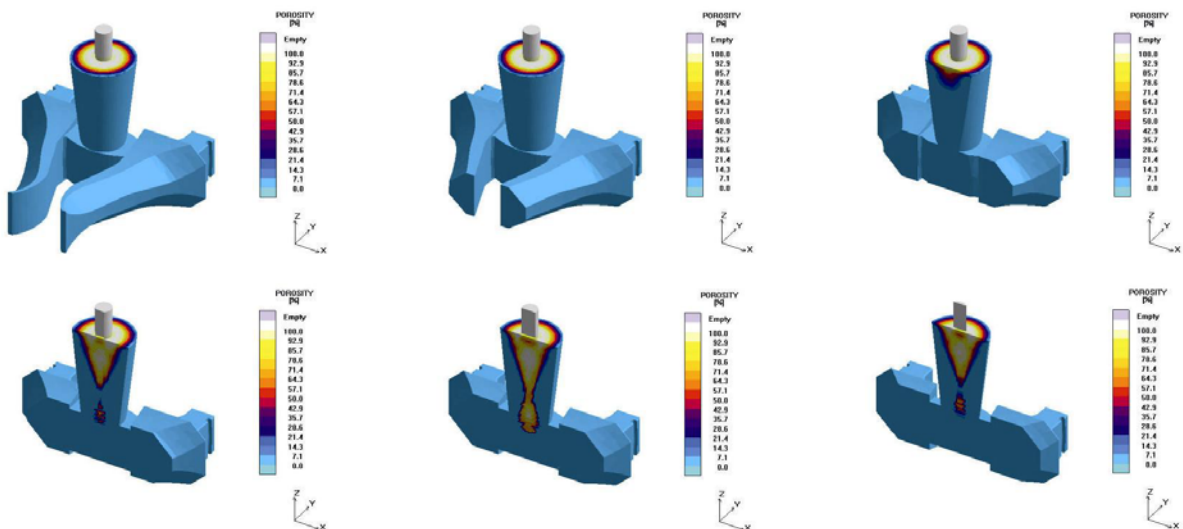
Слика ПЗ.5 Симулација процеса ливења са температурним пољем пуњења калуца



### ПРИЛОГ 3.2 АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРНОГ ПОЉА И ПОРОЗНОСТИ УСВОЈЕНОГ ОДЛИВКА РЕЗНОГ ДЕЛА



Слика ПЗ.6 Температурно поље солидификације



Слика ПЗ.6 Анализа порозности у различитим попречним пресецима одливка

**ПРИЛОГ 4. ИСПИТИВАЊЕ ЕНЕРГИЈЕ УДАРА МАТАЕРИЈАЛА РЕЗНОГ  
ДЕЛА ЗУБА**

	<p align="center"><b>ВОЈНОТЕХНИЧКИ ИНСТИТУТ</b> БЕОГРАД-Ратка Ресановића 1, тел. (011) 2508-308, факс 011- 2508- 474 <b>Одељење за металне материјале</b> тел. (011) 2051-245</p>	
<p align="center"><b>ИЗВЕШТАЈ О ИСПИТИВАЊУ      Бр. 27/11</b></p>		
<p>Наручилац: Универзитет у Крагујевцу – ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ - Чачак <b>Захтев наручиоца:</b> 1372 од 05.07.2011. године; инт. бр. 08/2137-1 од 05.07.2011. године</p>		
<p><b>Узорак:</b> Челичне епрувете за испитивање енергије удара <b>Произвођач:</b> /</p>		
<p><b>Датум пријема узорка:</b> јул 2011.</p>		
<p><b>Узорковање извршио:</b> Поручилац</p>		
<p><b>Обим испитивања и методе испитивања:</b> Енергија ударана собној и сниженој температури</p>		

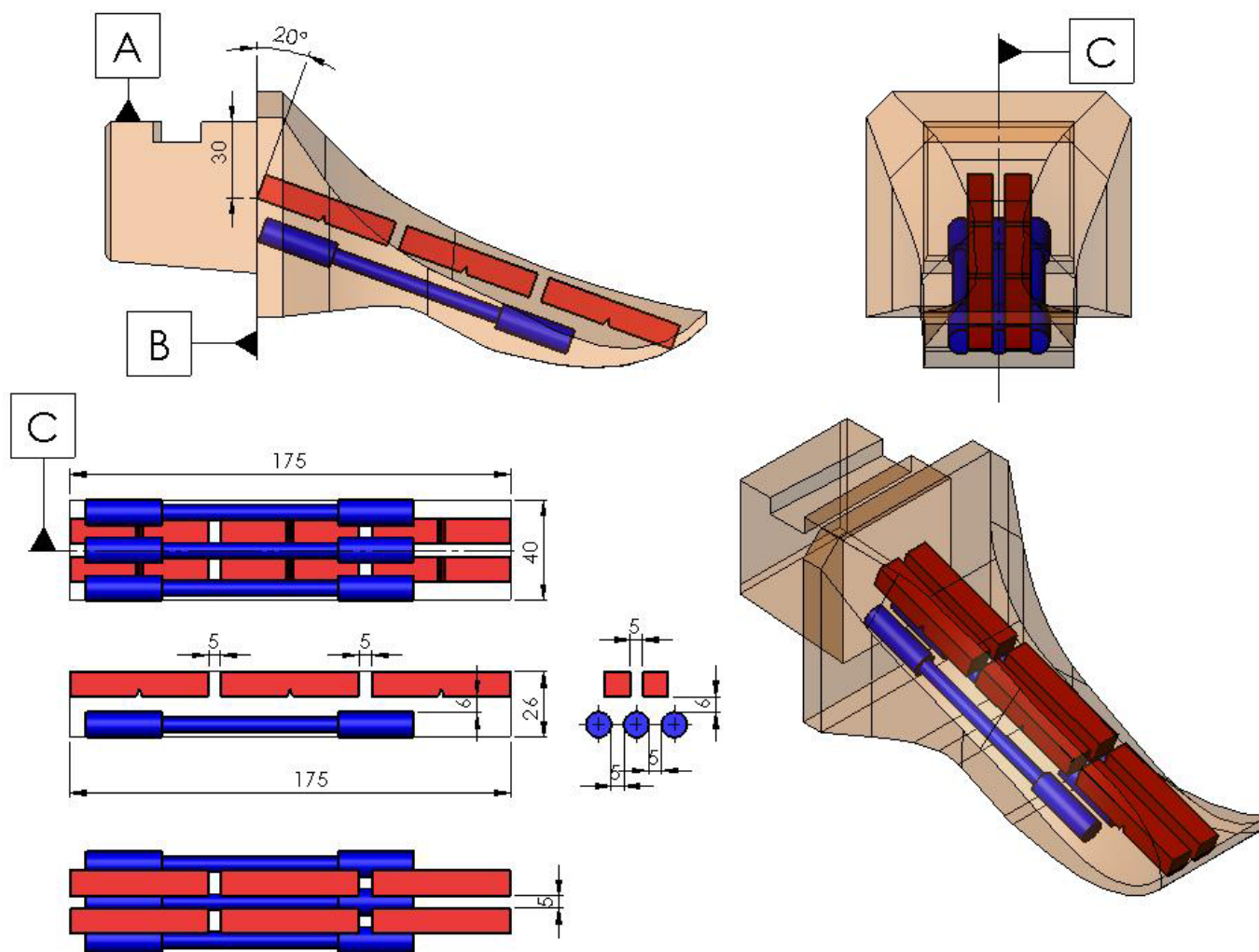
**ИСПИТИВАЊЕ ЕНЕРГИЈЕ УДАРА**

За испитивање су достављене 4 групе машински обрађених епрувета. Групе узорака су обележене према режимима термичке обраде на следећи начин:

- група I – каљено и отпуштено на 320°C/180 минута,
- група II – каљено и отпуштено на 380°C/180 минута,
- група III – каљено и отпуштено на 440°C/180 минута,
- група IV – каљено и отпуштено на 380°C+420°C+460°C+500°C.

Енергија удара одређена је на стандардним Шарпи епруветама **10x10x55** мм са ISO-V зарезом. Испитивање је извршено на инструментираним Шарпи клатну на собној и температури од - 20°C према стандару **SRPS EN 10045-1**. Називна енергија удара клатна је **300J**, а брзина **5,11m/s**.

Добијене вредности дате су у табели П4.1, а типични дијаграми зависности сила-време и енергија-време за по једну епрувету из сваке групе узорака, на температурама испитивања дати су на сликама П4.2÷П4.9. На слици П4.1 дат је принцип узорковања епрувети за испитивање.



Слика П4.1 Принцип узорковања епрувети са предходно припремљеног и термичко обрађеног резног дела зуба

Табела П4.1 Вредност енергије удара

Ознака узорка	Ознака епрувете	Температура испитивања [°C]	Енергија стварања прслине $E_s$ [J]	Енергија ширења прслине $E_{\text{ш}}$ [J]	Укупна енергија удара $E_u$ [J]	Средња вредност укупн. Енерг. $E_{u_{\text{sr}}}$ [J]
И	1	20	13,05	2,84	15,89	18,18
	2		13,46	5,45	18,91	
	3		16,68	3,07	19,75	
И	1	- 20	11,91	1,48	13,39	13,22
	2		11,59	1,47	13,06	
	3		12,19	1,03	13,22	
В	1	20	4,78	1,20	5,98	6,47
	2		6,13	0,66	6,79	
	3		4,88	1,75	6,63	
В	1	- 20	3,53	0,98	4,51	5,0
	2		4,26	1,23	5,49	
	3		4,40	0,6	5,0	
Т	1	20	4,90	0,75	5,65	5,87
	2		5,08	1,55	6,63	
	3		3,84	1,48	5,32	
Т	1	- 20	2,20	1,33	3,53	3,96
	2		3,32	0,86	4,18	
	3		3,33	0,85	4,18	
М	1	20	2,14	0,42	2,56	2,88
	2		2,08	0,48	2,56	
	3		2,49	1,04	3,53	
М	1	- 20	1,53	0,87	2,40	2,4
	2		1,73	0,51	2,24	
	3		2,02	0,54	2,56	

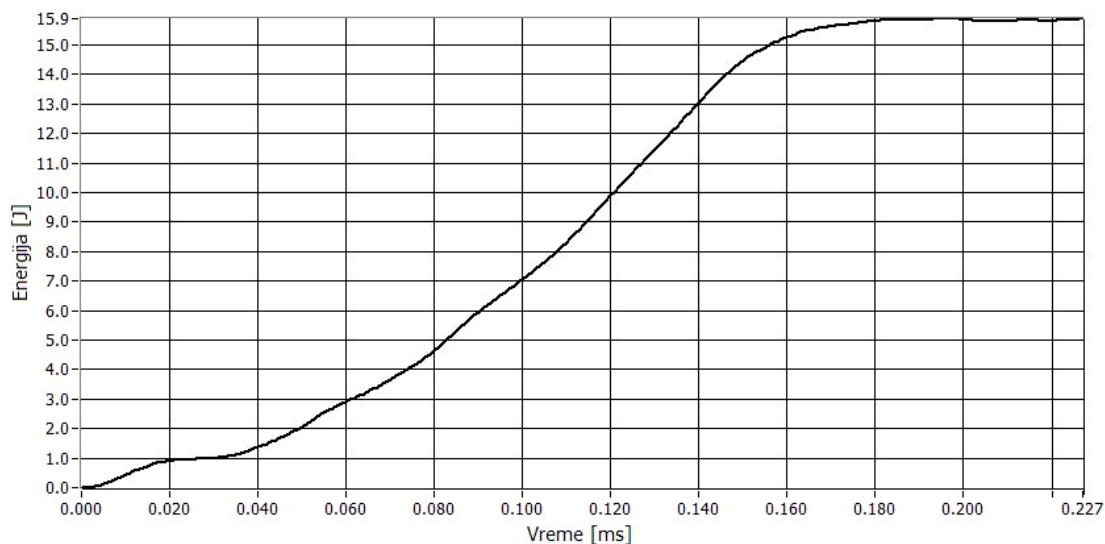
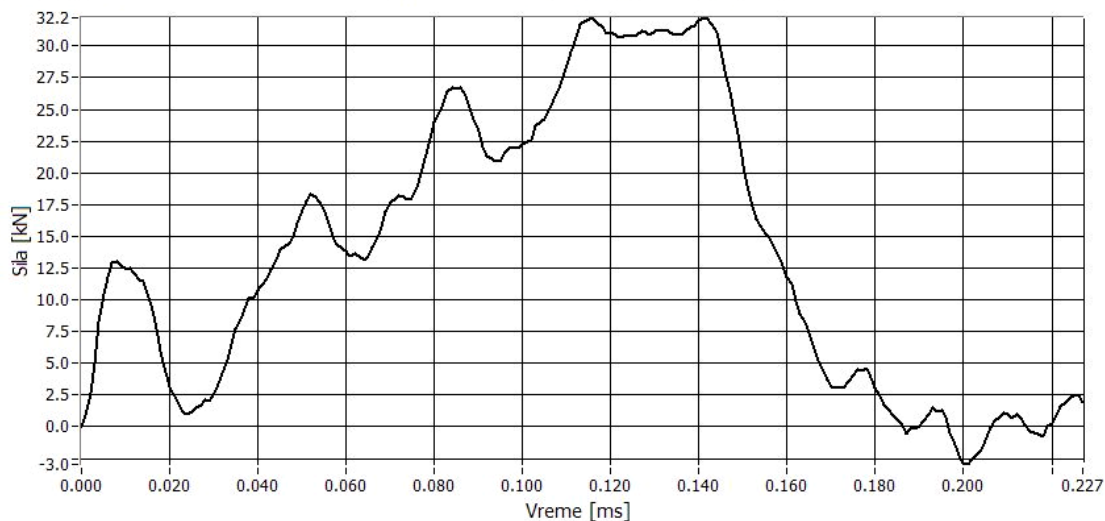
## VOJNOTEHNIČKI INSTITUT

Odeljenje za metalne materijale  
Ratka Resanovića 1, 11000 Beograd, SRBIJA  
tel. +381 11 2051 709, fax. +381 11 2508 474



PODACI O ISPITIVANJU		PODACI O EPRUVETI	
Oznaka epruvete:	I-1	Dužina epruvete [mm]	55.00
Temperatura ispitivanja:	20	Širina epruvete [mm]	10.00
Tip epruvete:	ISO-V (55x10x10 (8))	Visina epruvete [mm]	10.00
Senzor:	ISO	Visina nosećeg preseka [mm]	8.00
Datum ispitivanja:	21.7.2011	Površina nosećeg preseka [mm <sup>2</sup> ]	80.00
Vreme ispitivanja:	14:03:28	R-zarez [mm]	0.25
		Ugao [°]	45.00
		Raspon između oslonaca [mm]	40.00

PODACI O MATERIJALU	PODACI O MESTU	PODACI O
Materijal:	Ispitivač:	Naručilac:
Stanje materijala:	Mesto ispitivanja:	Preduzeće:
Pravac valjanja:	Adresa:	Adresa:
Položaj zarez:	Pošta:	Pošta:



REZULTATI					VIZUELNA OCENA		
Energija udara:	15.89	J	Sigma e:	-	MPa	Tamna površina:	%
Udarne žilavost:	19.86	J/cm <sup>2</sup>	Sigma m:	-	MPa	Duktilni lom:	%
Ei:	13.05	J	Rm:	314.35	MPa	Interkristalni lom:	%
Ep:	2.84	J	Re:	400.46	MPa	Transkristalni lom:	%
Koeficient f:	-310068.72	N/V	Procenat žilavoq loma:	21.67	%		

Слика П4.2 Дијаграм сила-време и енергија-време за епрувету из групе I, температура испитивања енергије удара (20 °C)

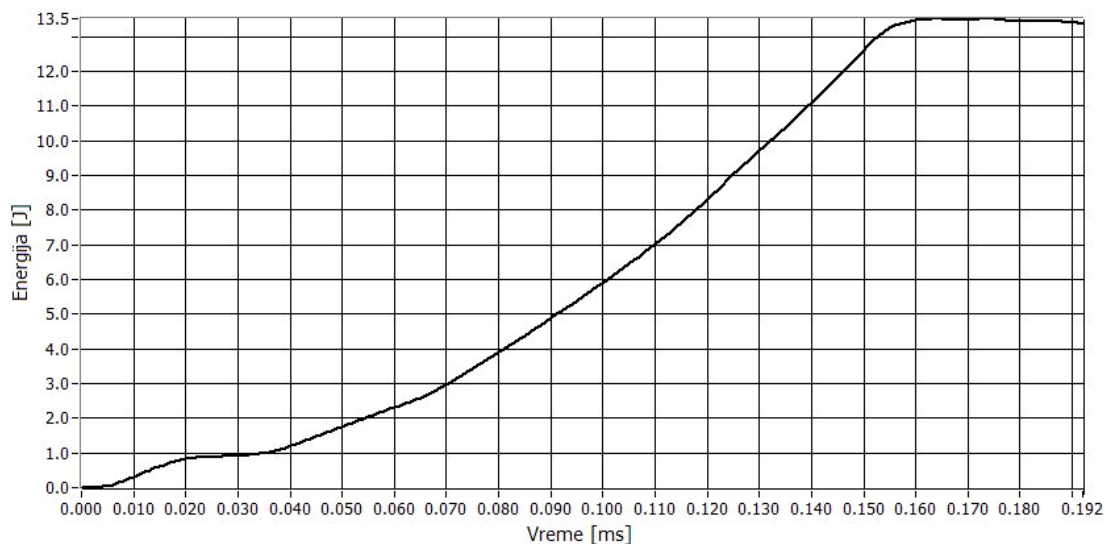
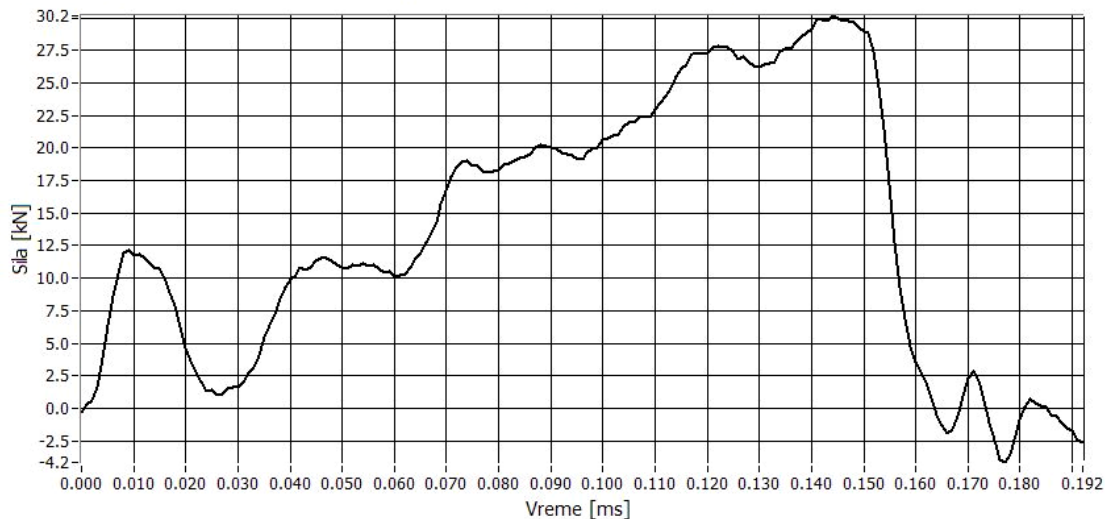
## VOJNOTEHNIČKI INSTITUT

Odeljenje za metalne materijale  
Ratka Resanovića 1, 11000 Beograd, SRBIJA  
tel. +381 11 2051 709, fax. +381 11 2508 474



PODACI O ISPITIVANJU		PODACI O EPRUVETI	
Oznaka epruvete:	I - 1	Dužina epruvete [mm]	55.00
Temperatura ispitivanja:	- 20	Širina epruvete [mm]	10.00
Tip epruvete:	ISO-V (55x10x10 (8))	Visina epruvete [mm]	10.00
Senzor:	ISO	Visina nosećeg preseka [mm]	8.00
Datum ispitivanja:	22.7.2011	Površina nosećeg preseka [mm <sup>2</sup> ]	80.00
Vreme ispitivanja:	10:15:36	R-zarez [mm]	0.25
		Ugao [°]	45.00
		Raspon između oslonaca [mm]	40.00

PODACI O MATERIJALU	PODACI O MESTU	PODACI O
Materijal:	Ispitivač:	Naručilac:
Stanje materijala:	Mesto ispitivanja:	Preduzeće:
Pravac valjanja:	Adresa:	Adresa:
Položaj zarez:	Pošta:	Pošta:



REZULTATI					VIZUELNA OCENA		
Energija udara:	13.39	J	Sigma e:	-	MPa	Tamna površina:	%
Udarne žilavost:	16.74	J/cm <sup>2</sup>	Sigma m:	-	MPa	Duktilni lom:	%
Ei:	11.91	J	Rm:	253.66	MPa	Interkristalni lom:	%
Ep:	1.48	J	Re:	376.67	MPa	Transkristalni lom:	%
Koeficient f:	-289578.91	N/V	Procenat žilavoq loma:	18.11	%		

Слика П4.3 Дијаграм сила-време и енергија-време за епрувету из групе I, температура испитивања енергије удара (-20 °C)



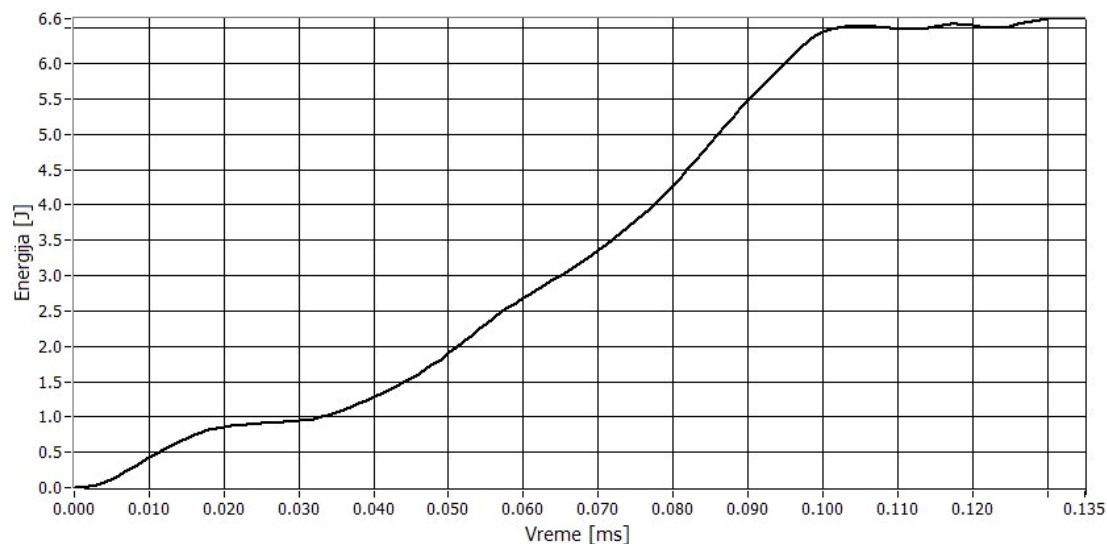
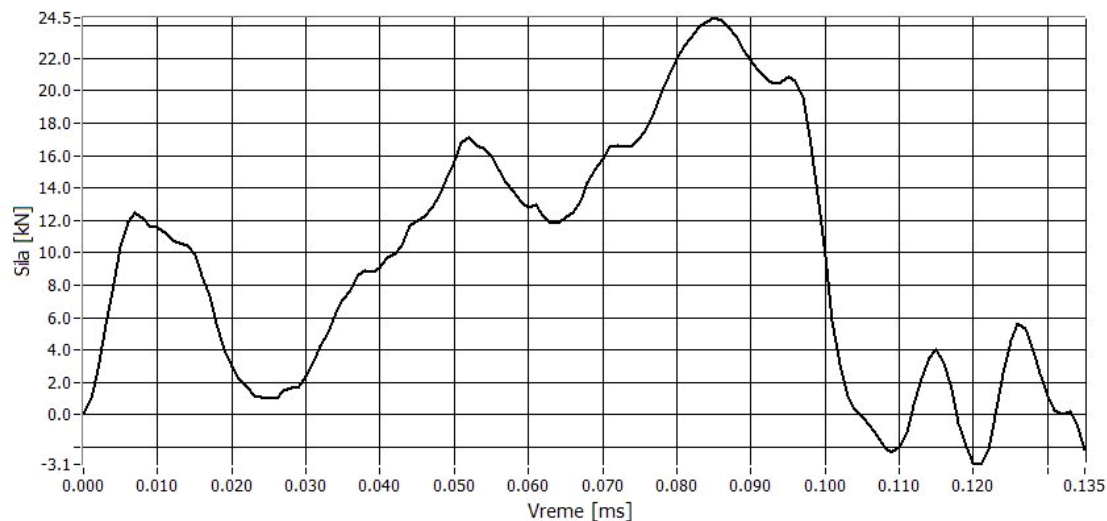
## VOJNOTEHNIČKI INSTITUT

Odeljenje za metalne materijale  
Ratka Resanovića 1, 11000 Beograd, SRBIJA  
tel. +381 11 2051 709, fax. +381 11 2508 474



PODACI O ISPITIVANJU		PODACI O EPRUVETI	
Oznaka epruvete:	V - 3	Dužina epruvete [mm]	55.00
Temperatura ispitivanja:	20	Širina epruvete [mm]	10.00
Tip epruvete:	ISO-V (55x10x10 (8))	Visina epruvete [mm]	10.00
Senzor:	ISO	Visina nosećeg preseka [mm]	8.00
Datum ispitivanja:	21.7.2011	Površina nosećeg preseka [mm <sup>2</sup> ]	80.00
Vreme ispitivanja:	14:15:13	R-zarez [mm]	0.25
		Ugao [°]	45.00
		Raspon između oslonaca [mm]	40.00

PODACI O MATERIJALU	PODACI O MESTU	PODACI O
Materijal:	Ispitivač:	Naručilac:
Stanje materijala:	Mesto ispitivanja:	Preduzeće:
Pravac valjanja:	Adresa:	Adresa:
Položaj zarez:	Pošta:	Pošta:



REZULTATI					VIZUELNA OCENA		
Energija udara:	6.63	J	Sigma e:	-	MPa	Tamna površina:	%
Udarne žilavost:	8.29	J/cm <sup>2</sup>	Sigma m:	-	MPa	Duktilni lom:	%
Ei:	4.88	J	Rm:	205.42	MPa	Interkristalni lom:	%
Ep:	1.75	J	Re:	306.29	MPa	Transkristalni lom:	%
Koeficient f:	-281293.26	N/V	Procenat žilavoq loma:	16.56	%		

Слика П4.4 Дијаграм сила-време и енергија-време за епрувету из групе II, температура испитивања енергије удара (20 °C)

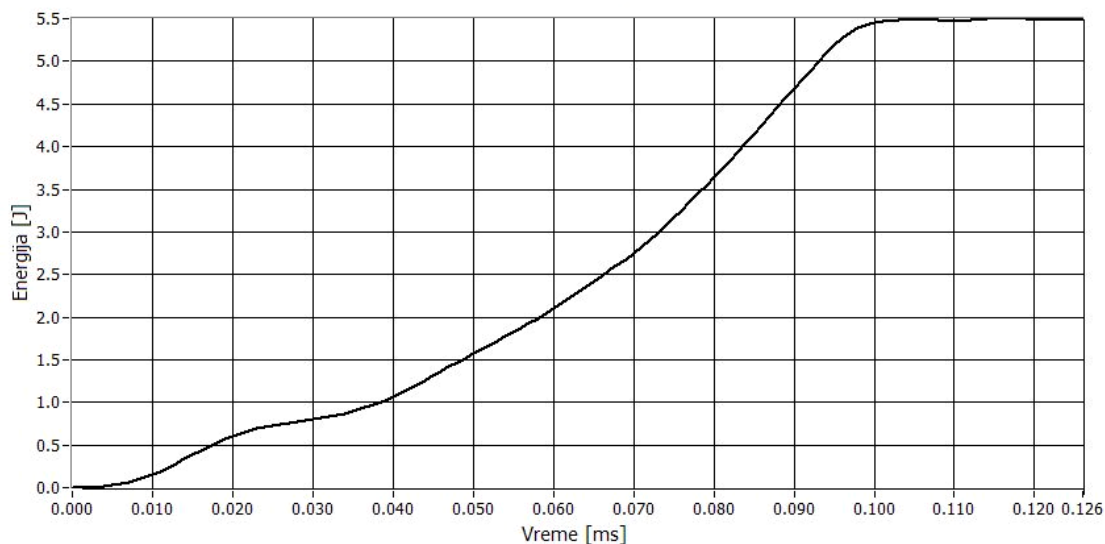
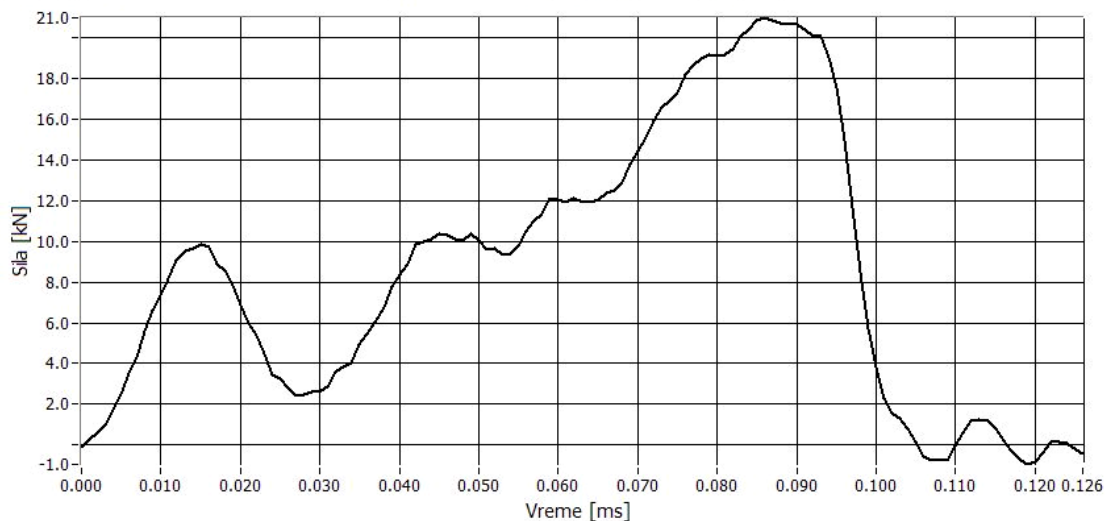
## VOJNOTEHNIČKI INSTITUT

Odeljenje za metalne materijale  
Ratka Resanovića 1, 11000 Beograd, SRBIJA  
tel. +381 11 2051 709, fax. +381 11 2508 474



PODACI O ISPITIVANJU		PODACI O EPRUVETI	
Oznaka epruvete:	V - 2	Dužina epruvete [mm]	55.00
Temperatura ispitivanja:	- 20	Širina epruvete [mm]	10.00
Tip epruvete:	ISO-V (55x10x10 (8))	Visina epruvete [mm]	10.00
Senzor:	ISO	Visina nosećeg preseka [mm]	8.00
Datum ispitivanja:	22.7.2011	Površina nosećeg preseka [mm <sup>2</sup> ]	80.00
Vreme ispitivanja:	10:29:05	R-zarez [mm]	0.25
		Ugao [°]	45.00
		Raspon između oslonaca [mm]	40.00

PODACI O MATERIJALU	PODACI O MESTU	PODACI O
Materijal:	Ispitivač:	Naručilac:
Stanje materijala:	Mesto ispitivanja:	Preduzeće:
Pravac valjanja:	Adresa:	Adresa:
Položaj zarez:	Pošta:	Pošta:



REZULTATI					VIZUELNA OCENA		
Energija udara:	5.49	J	Sigma e:	-	MPa	Tamna površina:	%
Udarne žilavost:	6.86	J/cm <sup>2</sup>	Sigma m:	-	MPa	Duktilni lom:	%
Ei:	4.26	J	Rm:	149.08	MPa	Interkristalni lom:	%
Ep:	1.23	J	Re:	262.43	MPa	Transkristalni lom:	%
Koeficijent f:	-280525.71	N/V	Procenat žilavoq loma:	15.12	%		

Слика П4.5 Дијаграм сила-време и енергија-време за епрувету из групе II, температура испитивања енергије удара (-20 °C)

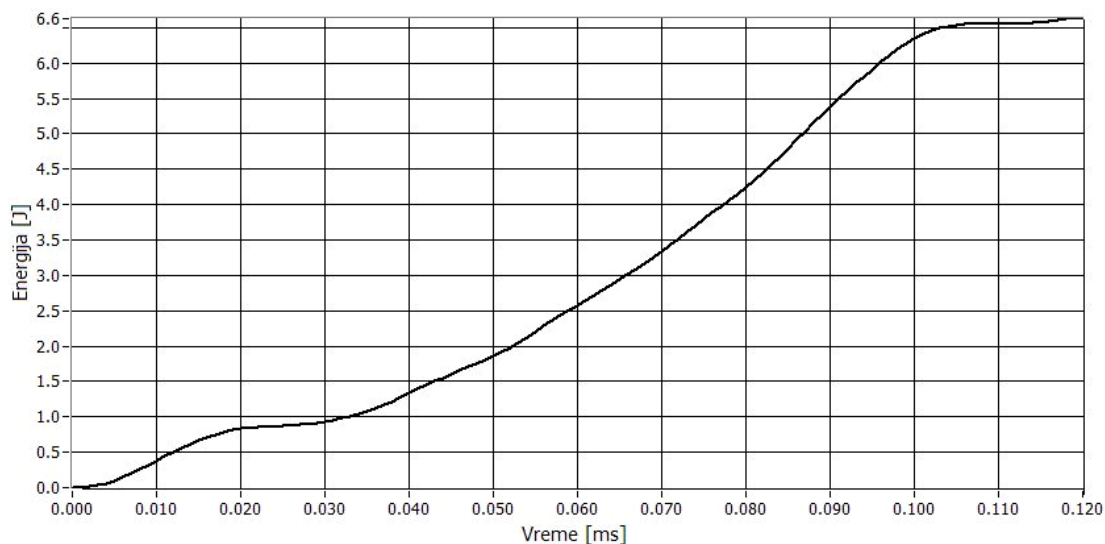
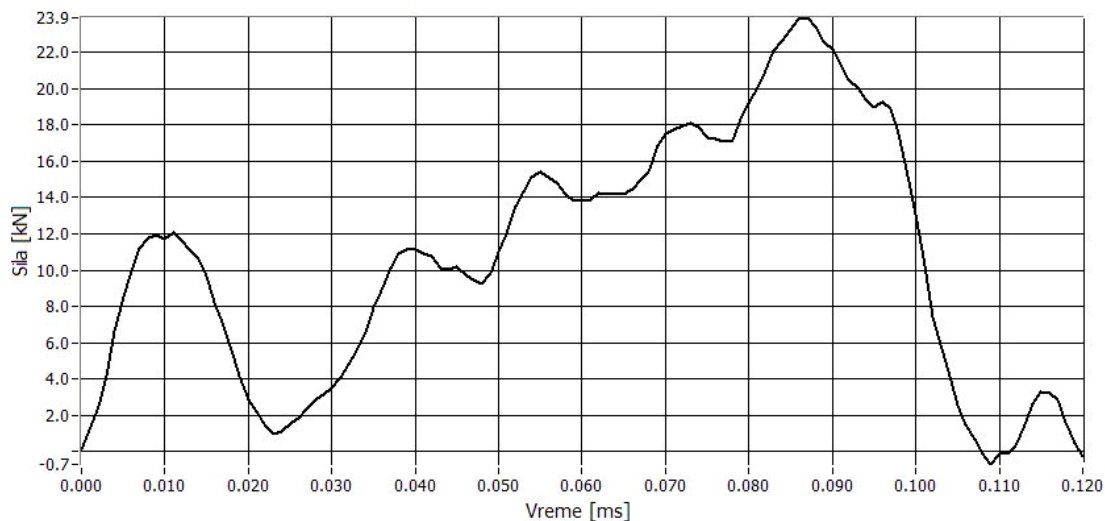
**VOJNOTEHNIČKI INSTITUT**

Odeljenje za metalne materijale  
Ratka Resanovića 1, 11000 Beograd, SRBIJA  
tel. +381 11 2051 709, fax. +381 11 2508 474



PODACI O ISPITIVANJU		PODACI O EPRUVETI	
Oznaka epruvete:	T - 2	Dužina epruvete [mm]	55.00
Temperatura ispitivanja:	20	Širina epruvete [mm]	10.00
Tip epruvete:	ISO-V (55x10x10 (8))	Visina epruvete [mm]	10.00
Senzor:	ISO	Visina nosećeg preseka [mm]	8.00
Datum ispitivanja:	22.7.2011	Površina nosećeg preseka [mm <sup>2</sup> ]	80.00
Vreme ispitivanja:	9:22:54	R-zarez [mm]	0.25
		Ugao [°]	45.00
		Raspon između oslonaca [mm]	40.00

PODACI O MATERIJALU	PODACI O MESTU	PODACI O
Materijal:	Ispitivač:	Naručilac:
Stanje materijala:	Mesto ispitivanja:	Preduzeće:
Pravac valjanja:	Adresa:	Adresa:
Položaj zarez:	Pošta:	Pošta:



REZULTATI					VIZUELNA OCENA		
Energija udara:	6.63	J	Sigma e:	-	MPa	Tamna površina:	%
Udarne žilavost:	8.29	J/cm <sup>2</sup>	Sigma m:	-	MPa	Duktilni lom:	%
Ei:	5.08	J	Rm:	190.96	MPa	Interkristalni lom:	%
Ep:	1.55	J	Re:	301.27	MPa	Transkristalni lom:	%
Koeficijent f:	-301210.35	N/V	Procenat žilavoq loma:	9.88	%		

Слика П4.6 Дијаграм сила-време и енергија-време за епрувету из групе III, температура испитивања енергије удара (20 °C)

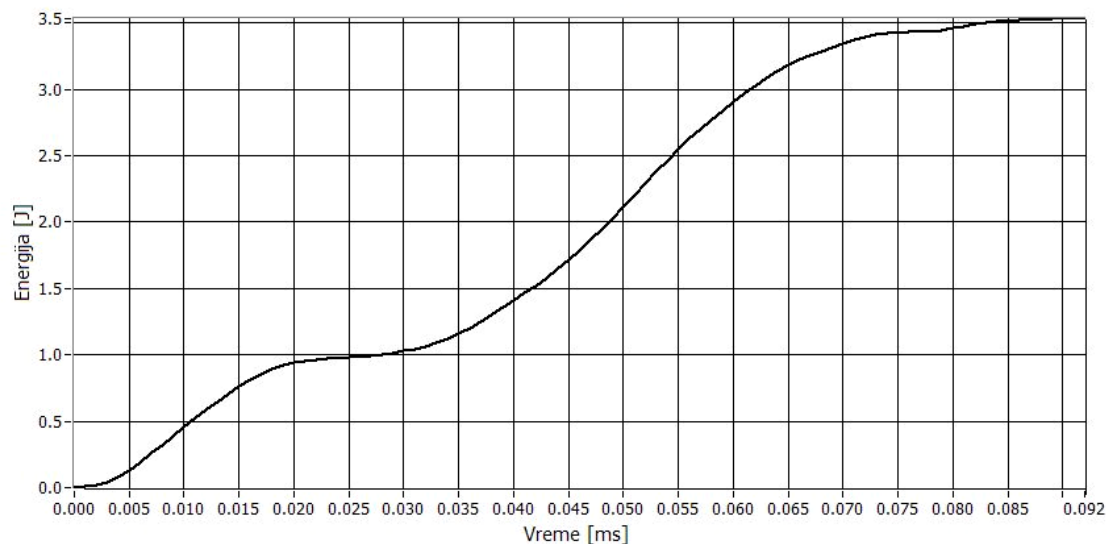
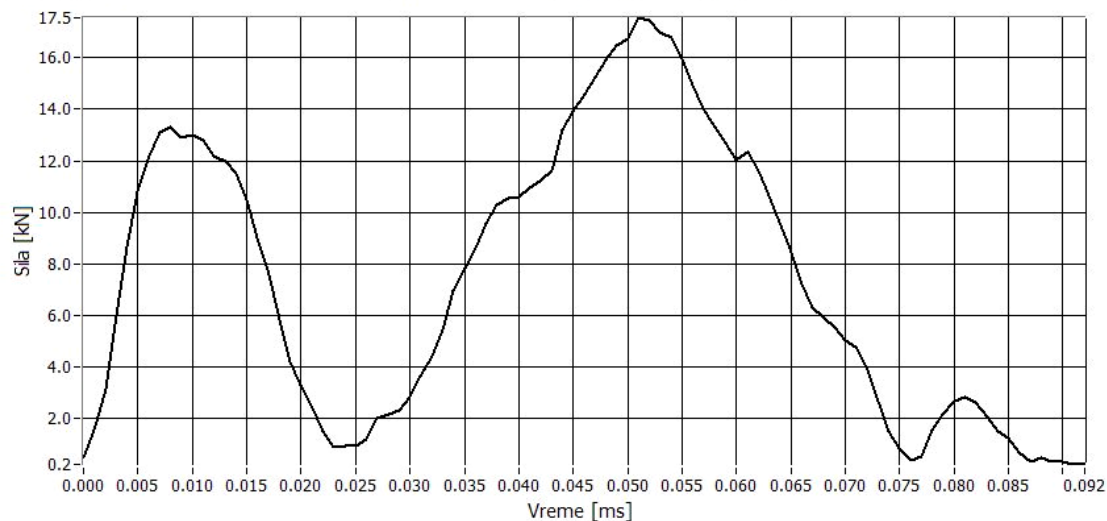
## VOJNOTEHNIČKI INSTITUT

Odeljenje za metalne materijale  
Ratka Resanovića 1, 11000 Beograd, SRBIA  
tel. +381 11 2051 709, fax. +381 11 2508 474



PODACI O ISPITIVANJU		PODACI O EPRUVETI	
Oznaka epruvete:	T - 1	Dužina epruvete [mm]	55.00
Temperatura ispitivanja:	- 20	Širina epruvete [mm]	10.00
Tip epruvete:	ISO-V (55x10x10 (8))	Visina epruvete [mm]	10.00
Senzor:	ISO	Visina nosećeg preseka [mm]	8.00
Datum ispitivanja:	22.7.2011	Površina nosećeg preseka [mm <sup>2</sup> ]	80.00
Vreme ispitivanja:	10:22:40	R-zarez [mm]	0.25
		Ugao [°]	45.00
		Raspon između oslonaca [mm]	40.00

PODACI O MATERIJALU	PODACI O MESTU	PODACI O
Materijal:	Ispitivač:	Naručilac:
Stanje materijala:	Mesto ispitivanja:	Preduzeće:
Pravac valjanja:	Adresa:	Adresa:
Položaj zarez:	Pošta:	Pošta:



REZULTATI					VIZUELNA OCENA		
Energija udara:	3.53	J	Sigma e:	-	MPa	Tamna površina:	%
Udarne žilavost:	4.42	J/cm <sup>2</sup>	Sigma m:	-	MPa	Duktilni lom:	%
Ei:	2.20	J	Rm:	145.38	MPa	Interkristalni lom:	%
Ep:	1.33	J	Re:	219.31	MPa	Transkristalni lom:	%
Koeficijent f:	-323036.40	N/V	Procenat žilavoq loma:	6.59	%		

Слика П4.7 Дијаграм сила-време и енергија-време за епрувету из групе III, температура испитивања енергије удара (-20 °C)



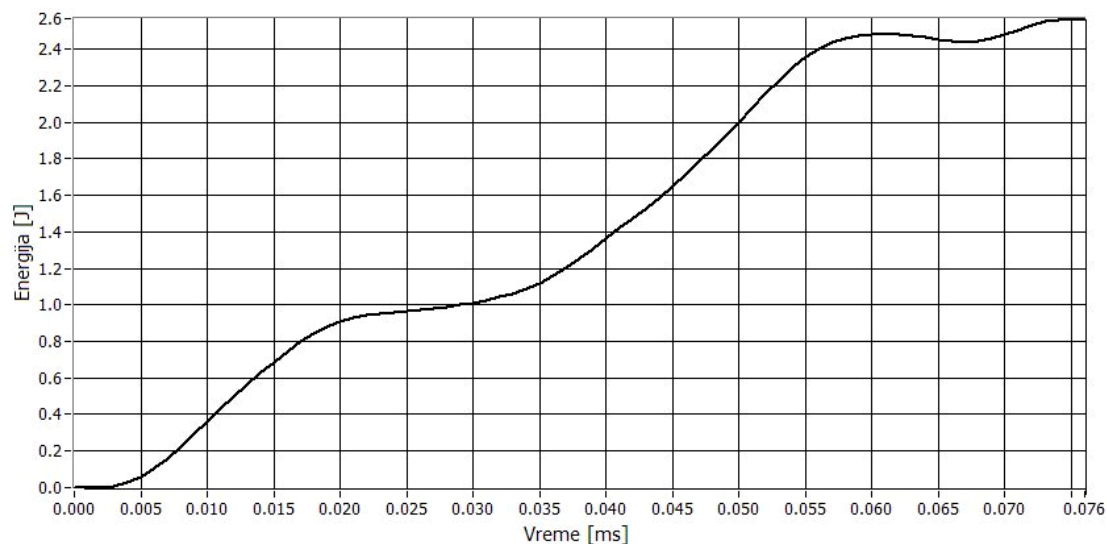
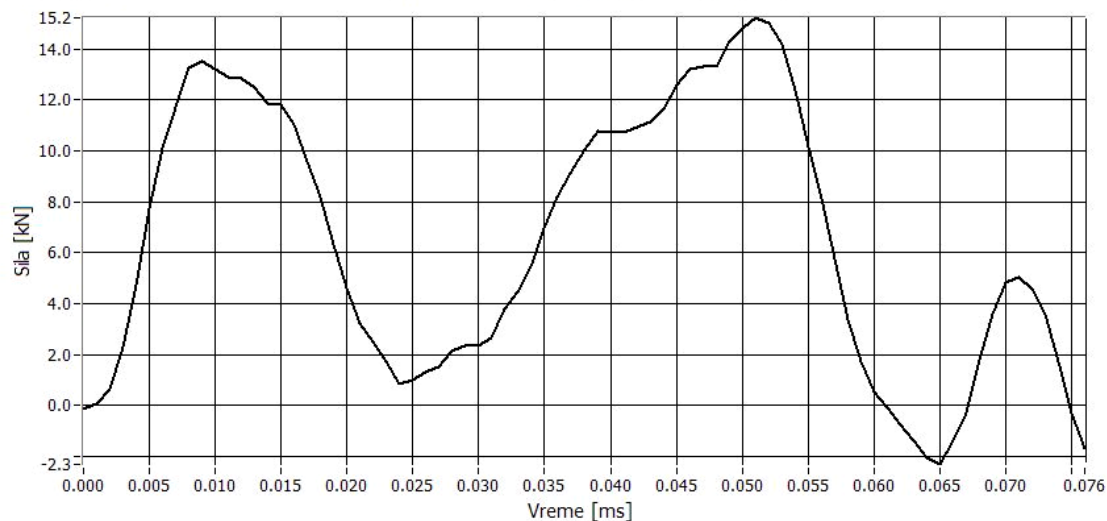
## VOJNOTEHNIČKI INSTITUT

Odeljenje za metalne materijale  
Ratka Resanovića 1, 11000 Beograd, SRBIJA  
tel. +381 11 2051 709, fax. +381 11 2508 474



PODACI O ISPITIVANJU		PODACI O EPRUVETI	
Oznaka epruvete:	M - 2	Dužina epruvete [mm]	55.00
Temperatura ispitivanja:	20	Širina epruvete [mm]	10.00
Tip epruvete:	ISO-V (55x10x10 (8))	Visina epruvete [mm]	10.00
Senzor:	ISO	Visina nosećeg preseka [mm]	8.00
Datum ispitivanja:	22.7.2011	Površina nosećeg preseka [mm <sup>2</sup> ]	80.00
Vreme ispitivanja:	9:30:52	R-zarez [mm]	0.25
		Ugao [°]	45.00
		Raspon između oslonaca [mm]	40.00

PODACI O MATERIJALU	PODACI O MESTU	PODACI O
Materijal:	Ispitivač:	Naručilac:
Stanje materijala:	Mesto ispitivanja:	Preduzeće:
Pravac valjanja:	Adresa:	Adresa:
Položaj zarez:	Pošta:	Pošta:



REZULTATI					VIZUELNA OCENA		
Energija udara:	2.56	J	Sigma e:	-	MPa	Tamna površina:	%
Udarne žilavost:	3.20	J/cm <sup>2</sup>	Sigma m:	-	MPa	Duktilni lom:	%
Ei:	2.08	J	Rm:	133.76	MPa	Interkristalni lom:	%
Ep:	0.49	J	Re:	190.31	MPa	Transkristalni lom:	%
Koeficijent f:	-320556.04	N/V	Procenat žilavoq loma:	6.34	%		

Слика П4.8 Дијаграм сила-време и енергија-време за епрувету из групе IV, температура испитивања енергије удара (20 °C)

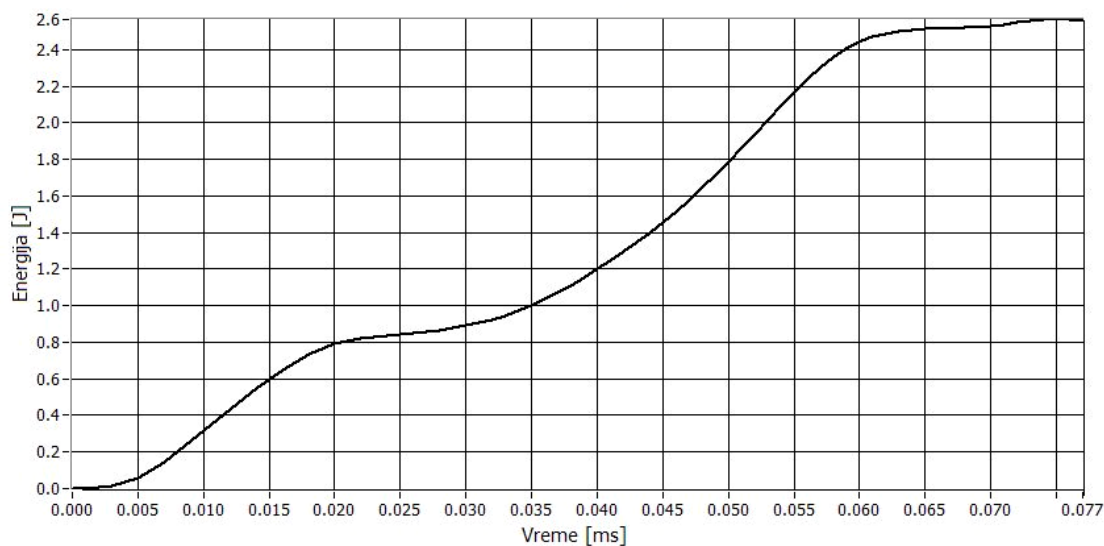
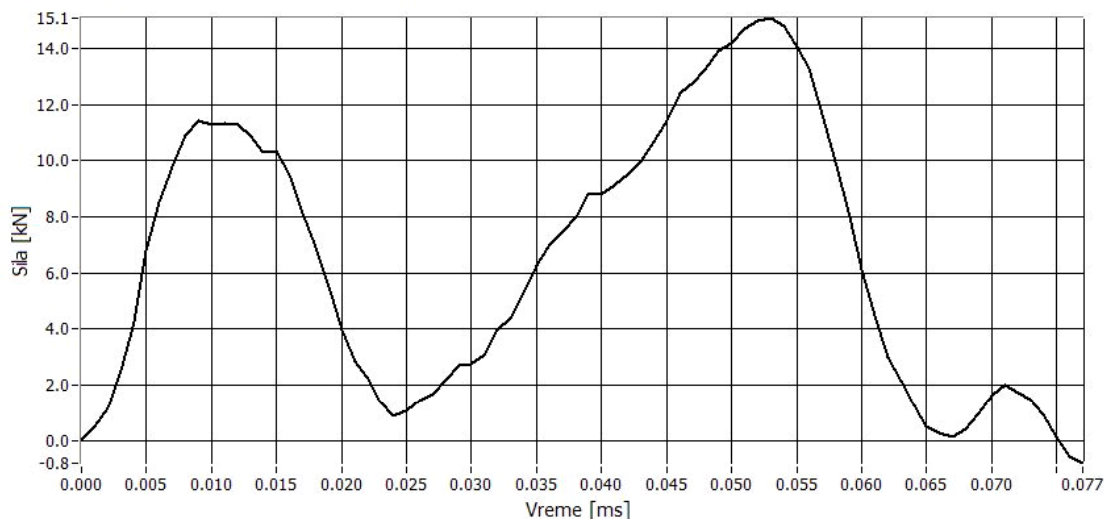
## VOJNOTEHNIČKI INSTITUT

Odeljenje za metalne materijale  
Ratka Resanovića 1, 11000 Beograd, SRBIA  
tel. +381 11 2051 709, fax. +381 11 2508 474



PODACI O ISPITIVANJU		PODACI O EPRUVETI	
Oznaka epruvete:	M - 3	Dužina epruvete [mm]	55.00
Temperatura ispitivanja:	- 20	Širina epruvete [mm]	10.00
Tip epruvete:	ISO-V (55x10x10 (8))	Visina epruvete [mm]	10.00
Senzor:	ISO	Visina nosećeg preseka [mm]	8.00
Datum ispitivanja:	22.7.2011	Površina nosećeg preseka [mm <sup>2</sup> ]	80.00
Vreme ispitivanja:	10:13:54	R-zarez [mm]	0.25
		Ugao [°]	45.00
		Raspon između oslonaca [mm]	40.00

PODACI O MATERIJALU	PODACI O MESTU	PODACI O
Materijal:	Ispitivač:	Naručilac:
Stanje materijala:	Mesto ispitivanja: Vojnotehnički institut	Preduzeće:
Pravac valjanja:	Adresa: Ratka Resanovića 1	Adresa:
Položaj zarez:	Pošta: 11000 Beograd	Pošta:



REZULTATI					VIZUELNA OCENA		
Energija udara:	2.56	J	Sigma e:	-	MPa	Tamna površina:	%
Udarna žilavost:	3.20	J/cm <sup>2</sup>	Sigma m:	-	MPa	Duktilni lom:	%
Ei:	2.02	J	Rm:	155.24	MPa	Interkristalni lom:	%
Ep:	0.54	J	Re:	188.36	MPa	Transkristalni lom:	%
Koeficijent f:	-281898.83	N/V	Procenat žilavoq loma:	10.21	%		

Слика П4.9 Дијаграм сила-време и енергија-време за епрувету из групе IV, температура испитивања енергије удара (-20 °C)