

Оптимизација положаја резних елемената роторних багера помоћу мерења термалном камером

Предраг Радуловић



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Оптимизација положаја резних елемената роторних багера помоћу мерења термалном камером | Предраг Радуловић || 2024 ||

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0008923>

Универзитет у Београду
Рударско-геолошки факултет



МАСТЕР РАД

**ОПТИМИЗАЦИЈА ПОЛОЖАЈА РЕЗНИХ ЕЛЕМЕНАТА
РОТОРНИХ БАГЕРА ПОМОЋУ МЕРЕЊА
ТЕРМАЛНОМ КАМЕРОМ**

Кандидат:

Предраг Радуловић
P551/23

Ментор:

проф. др Предраг Јованчић

Београд, 2024.

Комисија:

1. проф. др Предраг Јованчић, ментор

Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

2. доц. др Стеван Ђенадић, члан комисије

Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

3. доц. др Филип Милетић, члан комисије

Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

Датум одбране: _____

Сажетак: Роторни точак као радни елемент роторног багера представља један од најбитнијих делова багера. У овом раду појединачно су представљени сви делови радног елемента роторног багера као и типови и материјали од којих су израђени. Приказани су утицаји геолошке грађе и разних отпора приликом копања на резне елементе. Веома битан део рада представља термографија као дијагностичка метода као и студија случаја која је изведена након извршених мерења чији у резултати приказани у раду. Крајњи исход рада представља предлог оптимизације положаја зуба добијен закључивањем из резултата мерења.

Кључне речи: зуб, ведрице, температура, изотерме, термограф

Садржај

1.Увод	1
2.Радни елемент роторног багера	2
2.1.Диспозиција елемената радног уређаја	4
2.1.1Тело роторног точка.....	4
2.1.2.Редуктор за погон радног точка.....	8
2.1.4.Сигурносна спојница	11
2.1.5.Ведрице.....	12
2.2.Резни елементи – типови, материјал, положај	14
2.2.1. Типови и положај	14
2.2.2.Материјал	17
3.Утицај резних елемената на технологију рада роторног багера.....	20
3.1.Геолошка грађа радне откопне средине роторног багера	21
3.2.Отпор на копање	25
4.Термографија – основни принципи примене дијагностичке методе .	34
4.1.Инструменти за мерење температуре.....	37
4.2.Инфрацрвена термовизија	39
5.Студија случаја – резни елементи роторних багера РБ Колубара	47
5.1. Загревање и хлађење зуба роторног багера	47
5.2. Термограми узведених мерења	49
6.Предлог мера за оптимизацију положаја резних елемената	54
7.Закључак.....	57
8.Литература	58

1. Увод

Роторни багер представља највећу самоходну откопну машину континуираног дејства у индустрији, која је намењена за откопавање јаловине и корисне супстанце на површинским коповима. На слици 1 дат је приказ роторног багера.



Slika 1 Роторни багер

Обртањем роторног точка у вертикалној равни и окретањем роторне стреле заједно са платформом у хоризонталној равни свака ведрица откопава из масива одрезак који је одређен обликом и геометријским параметрима.

Услед контакта резних елемената роторног точка са материјалом, долази до загревања и хабања истих. Оптимизација положаја резних елемената има велики утицај на рад багера, ефективност, смањење трошкова одржавања, смањење вибрација приликом рада као и многе друге сегменте.

Оптимизација положаја резних елемената и анализа параметара добијених мерењем на терену, о којима ће бити речи у овом раду, нуде боље схватање понашања материјала и радног елемента у радним условима, те омогућавају боље искоришћење истих.

2. Радни елемент роторног багера

Роторни точак представља најкарактеристичнији конструктивни део багера, по коме је и добио име. Кроз вишедеценијски развој роторних багера развијено је више типова роторних точкова уз стално даље усавршавање са циљем да се што боље одговори технолошким захтевима производње, уз смањење његове тежине, бољег и квалитетнијег одржавања као и уз повећање поузданости рада. Захтеви ка већим јединичним капацитетима условљавали су повећање димензија роторног точака. Пречник роторног точака се креће у дијапазону од 4.2 m па до 21.6 m, у зависности од величине багера и намене. На слици 2 дат је приказ роторног точака.



Slika 2 Роторни точак

Роторни точак се састоји из следећих основних елемената:

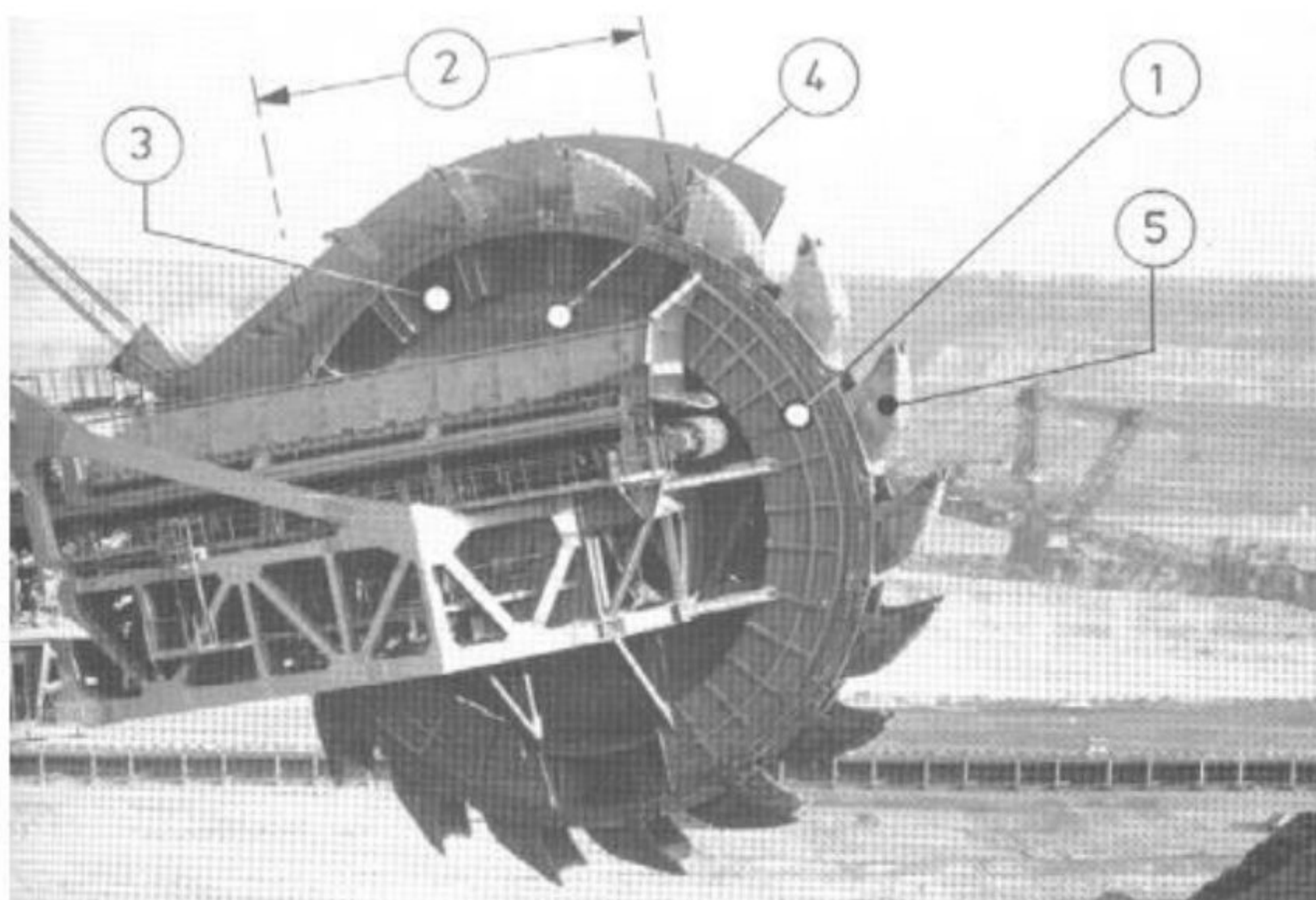
- ❖ носеће конструкције роторног точака,
- ❖ вратила са лежајевима,
- ❖ ведрца са резним елементима.

Под погонским механизмом роторног точка подразумевамо:

- ❖ редуктор роторног точка (један или два),
- ❖ спојнице,
- ❖ електромотор (један или више, чак до четири комада),
- ❖ зглобна вратила за везу мотора и редуктора (само код неких багера).

У концепцији конструкције роторног точка, почевши од првих хелијских и затим безхелијских (највише примењени), са њиховим предностима и недостацима, дошло је се и до полухелијских, што је свакако последица све разноврснијих услова рада багера. Повећањем висине прстенастог сектора и продужењем задњег дела ведрине у овај простор, добијена је комбинација хелијског и безхелијског роторног точка.

Највећи багер, номиналног капацитета 240.000 m^3 /дан чврсте масе, има точак полухелијског типа. Поред ових, може се рећи основних типова, постоје и роторни точкови са гравитационо-инерционим или само инерционим пражњењем. Треба још напоменути да код роторних багера који су предодређени само за дубински рад, на роторном точку су ведрине заокренуте за 180° , а смер обртања супротан у односу на багере за висински рад. На слици 3 приказан је роторни точак полухелијског типа.



Слика 3 Роторни точак полухелијског типа; 1 – прстен, 2 – истоварни сектор, 3 – полухелијски простор, 4 – склизница, 5 – ведрина.

2.1. Диспозиција елемената радног уређаја

2.1.1 Тело роторног точка

Задатак тела роторног точка је да обезбеди чврсту везу између вратила роторног точка и ведрица како би се све силе и моменти пренели између ова два елемента. Такође, функција тела роторног точка је да обезбеди, уз минимална просипања, одвођење материјала из ведрица преко клизних површина на пријемни транспортер. Тело роторног точка изводи се заваривањем од челичних лимова као једноставна носећа конструкција.

У току рада цела конструкција је оптерећена широким спектром динамичких оптерећења, а у извесним случајевима и оптерећењима хаваријске природе. Површине које су у процесу рада у контакту са откопаном материјалом заштићене су антихабајућим облогама, али се, међутим, не може у потпуности елиминисати хабање носеће конструкције, што има за последицу смањење њене укупне чврстоће. Утицај корозије је такође изразит на везама које су изведене заваривањем или завртњима, што наравно, повлачи за собом слабљење укупне чврстоће конструкције.

Дуго време израде роторног точка са великим степеном сложености, уз наведене неповољне услове рада, захтева усвајање високог степена сигурности конструкције тела роторног точка. Велики степен сигурности повлачи за собом повећање масе тела роторног точка. Овде треба напоменути да повећање масе роторног точка за једну тону захтева повећање масе целе конструкције багера уз корекцију противтега, за око четири до пет тона.

Носећа конструкција роторног точка се састоји од следећих радних елемената:

- ❖ тело роторног точка,
- ❖ прстенасти кутијасты носач спољни и прстенасти носач унутрашњи,
- ❖ попречни носачи
- ❖ ушице за фиксирање ведрице

Највише у употреби су следеће конструкционе форме за извођење тела роторног точка:

- ❖ тело роторног точка са двоструким зидовима,
- ❖ тело роторног точка са једним зидом и паоцима,
- ❖ тело роторног точка у облику зарубљене купе са једним зидом

<p>Тело точка са двоструким зидовима</p>	<p>Тело точка са једним зидом и паоцима</p>	<p>Тело точка у облику зарубљене купе са зидом</p>
<p>1. Унутрашњи носећи зид тела роторног точка 2. Спољни носећи зид тела роторног точка 3. Сегментни прстен, 4. Попречна греда, 5. Ведрица, 6. Осовина роторног точка, 7. Склизница и 8. Пријемна трака.</p>	<p>1. Унутрашњи носећи зид тела роторног точка, 2. Паок, 3. Сегментни прстен, 4. Попречна греда и 5. Ведрица.</p>	<p>1. Носећи зид у облику зарубљене купе; 2. Конструкција за повезивање са вратилом роторног точка; 3. Прстен на унутрашњој страни; 4. Прстен отпоран на увијање на спољашњој страни; 5. Попречни носачи; 6. Склизница; 7. Вратило роторног точка; 8. Ведрица</p>

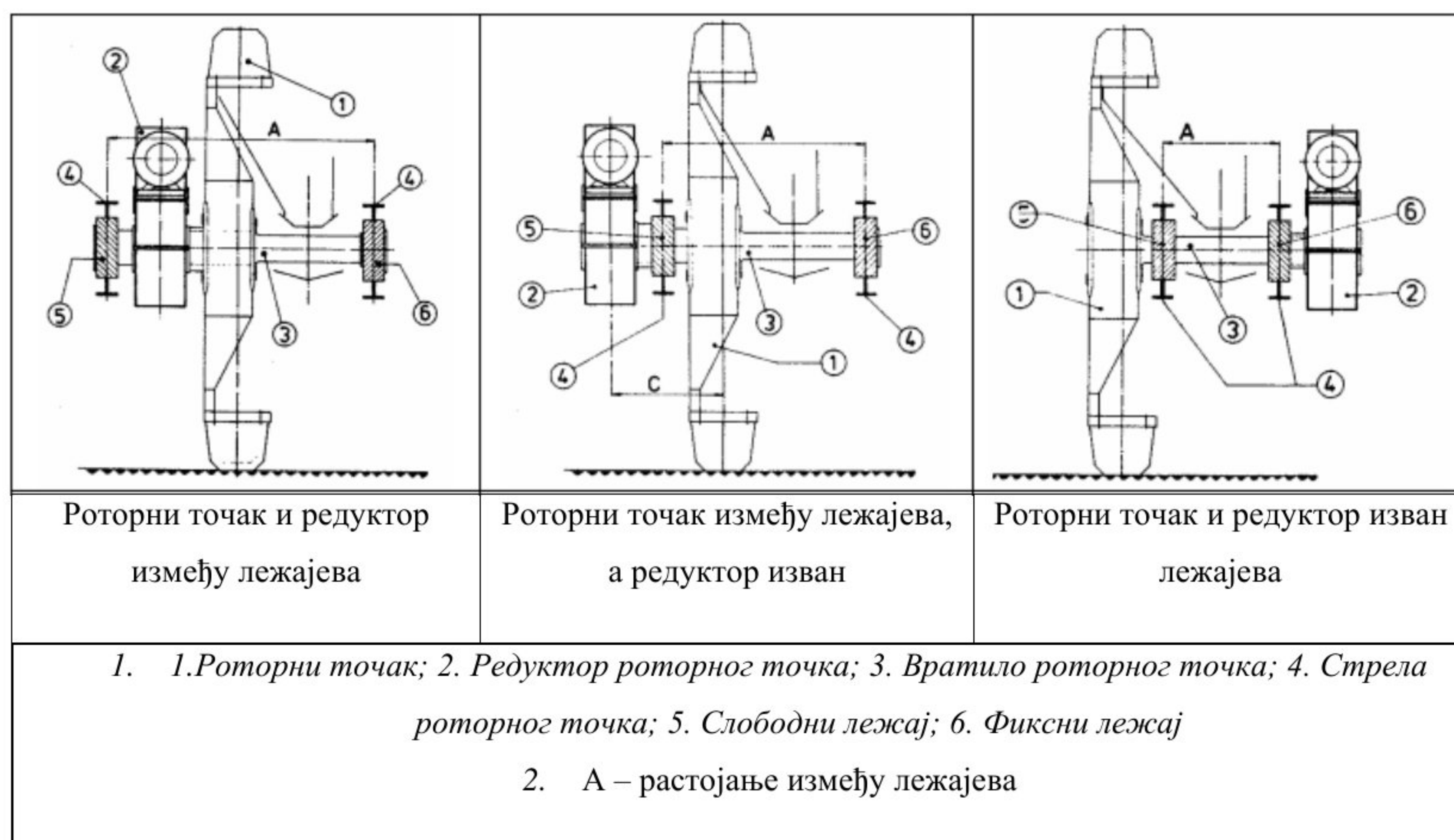
Slika 4 Конструкционе форме тела роторног точка

Код роторног точка са двоструким зидовима носећа конструкција се састоји од спољашњег зида у облику кружне плоче и унутрашњег зида у облику зарубљене купе. Повезивање унутрашњег и спољашњег зида се врши преградним лимовима. Добре стране оваквог извођења се састоје у високој крутости и чврстоћи носеће конструкције роторног точка и веома добром преносу сила од ведрица на вратило. Висока крутост конструкције тела роторног точка омогућава једноставно повезивање попречних носача и унутрашњег прстена у носећу структуру. Недостатак, који је уочен у експлоатацији роторних багера са оваквим роторним точком, је могућност појава нагомилавања материјала у коморе између носећих зидова. Количина нагомиланог материјала може бити знатна па тиме и угрозити стабилност горње градње багера. Овај недостатак налаже потребу честе контроле коморе кроз ревизионе отворе на спољашњем носећем зиду, који треба да омогуће улаз особља за чишћење.

Извођење тела роторног точка са једним зидом и паоцима се састоји од једног зида у облику зарубљене купе која се налази до пријемног транспортера, док се преостала носећа конструкција састоји од радијално распоређених носача у облику паока. Уградња попречних носача и унутрашњег прстена у носећу структуру роторног точка је релативно једноставна, а пренос сила са ведрица на вратило роторног точка је веома повољан. Наведена конструкција представља у ствари модификацију претходне варијанте са побољшањем да се нагомилани материјал унутар роторног точка може лако уочити и благовремено одстранити. Међутим, постојање многих отворених „депова” пружа могућност лаког нагомилавања материјала па се због тога роторни точак мора често чистити што, наравно, повлачи за собом честа заустављања багера.

Тело роторног точка у облику купе са једним зидом изграђено је од челичног лима у облику зарубљене купе конструкције која повезује вратило и наведену купу. Овај тип конструкције омогућава минимално нагомилавање материјала унутар роторног точка тако да и максимална запрљаност не утиче

на поремећај стабилности горње градње багера, а евентуално чишћење нагомиланог материјала не захтева дуже застоје и већи број људи. Крутост тела роторног точка се постиже преко кутијастог прстенастог носача на спољашњој страни који са облогом чини једну целину. Недостатак ове конструкције се огледа у сложеној расподели сила због различитих напрезања у току обртања роторног точка. Међутим, у новије време методом коначних елемената могуће је прецизно дефинисати распоред сила и напона у конструкцији овог типа роторног точка. Поменуте три конструкције роторних точка се по укупној маси мало разликују, па се са аспекта масе не може дати предност нити једној од поменутих извођења. Слика 5 приказује диспозицију органа р.т.



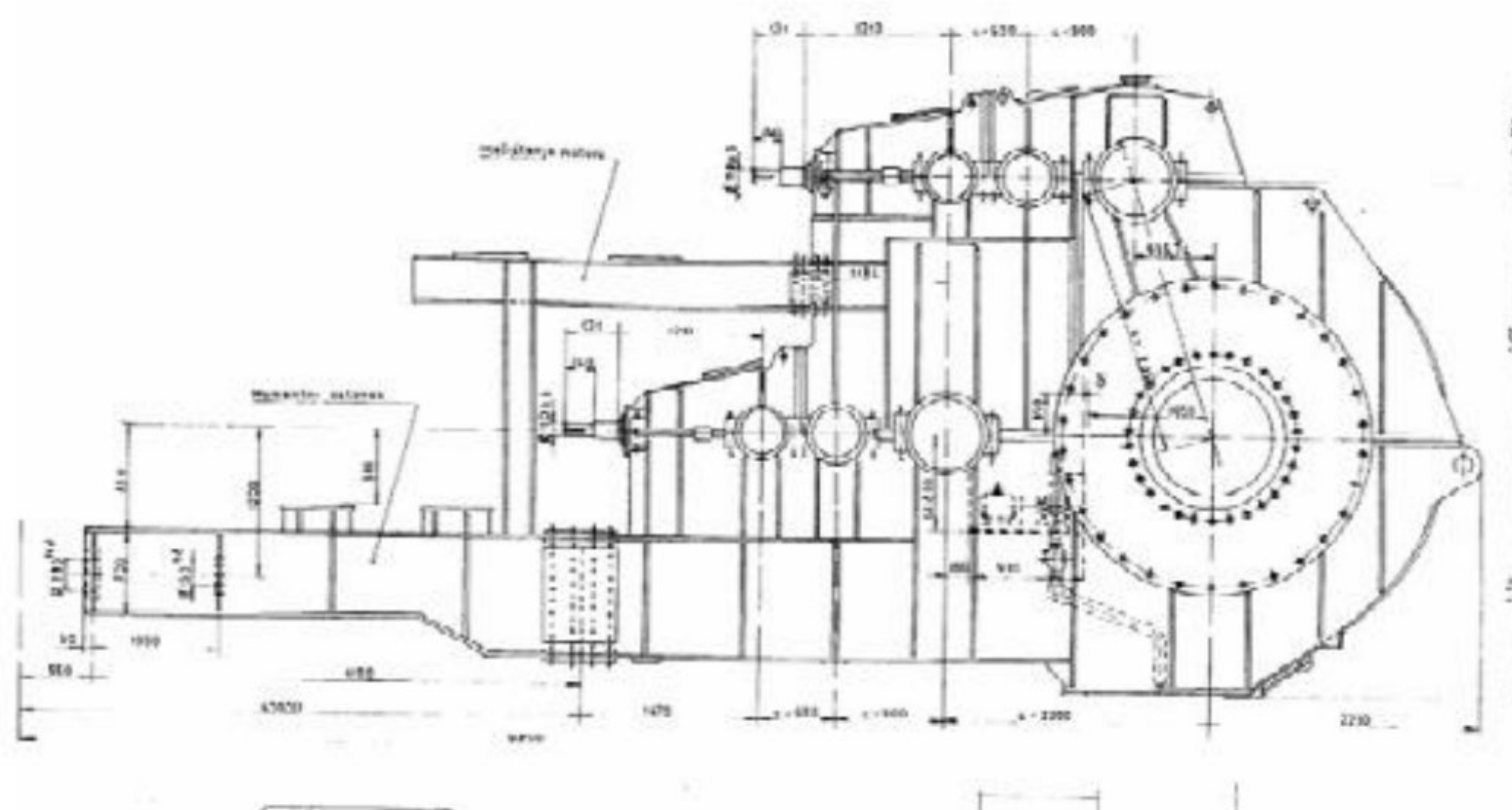
Слика 5 Диспозиције погонских агрегата и начина улежиштења роторног точка

Правилно подмазивање и заптивање директно утиче на употребни век лежајева роторног точка. Поред великих оптерећења, лежајеви су угрожени и сталним могућностима продора нечистоћа. Подмазивање се изводи тако, да израђена маст уједно одстрањује нечистоћу која би продрла у лежај па се због тога лежајеви подмазују обимније него за стандардне услове рада. Често се врши и подмазивање лежајева уљем, а маст се доводи у лабиринтске поклопце кућишта лежаја са задатком да спречи продоре нечистоћа.

2.1.2. Редуктор за погон радног точка

Редуктор роторног точка служи за пренос снаге од погонских мотора на вратило роторног точка при чему врши редукцију броја обртаја и повећава обртни момент. Код погона електромотором, број обртаја улазног вратила је по правилу од 1000 до 1500 min^{-1} , а број обртаја роторног точка од 6,0 до 7,0 min^{-1} . За овако велику редукцију броја обртаја потребни су редуктори са преносним односом $i=150\div 350$. Овакав преносни однос могуће је остварити вишестепеним редукторима. Редуктори за погон роторног точка су дуги низ година извођени у класичној концепцији односно као конусно-цилиндрични редуктори. Добре стране тих редуктора се огледају у једноставној и лако прегледној конструкцији, једноставном одржавању и ремонту.

Недостаци се састоје у великој маси и великим габаритима. Због далеко мање тежине и габарита, примена планетарних редуктора је све израженија. Мање димензије кућишта омогућавају повољније формирање бочне косине. Међутим, планетарни редуктори су компликованији за израду и врло осетљиви на нетачности у изради и монтажи. Због збијености унутрашње конструкције контрола је врло отежана, а чест је случај да лом једног елемента изазове хаварију већег дела погонских елемената редуктора. На слици 6 приказан је вишестепени редуктор.

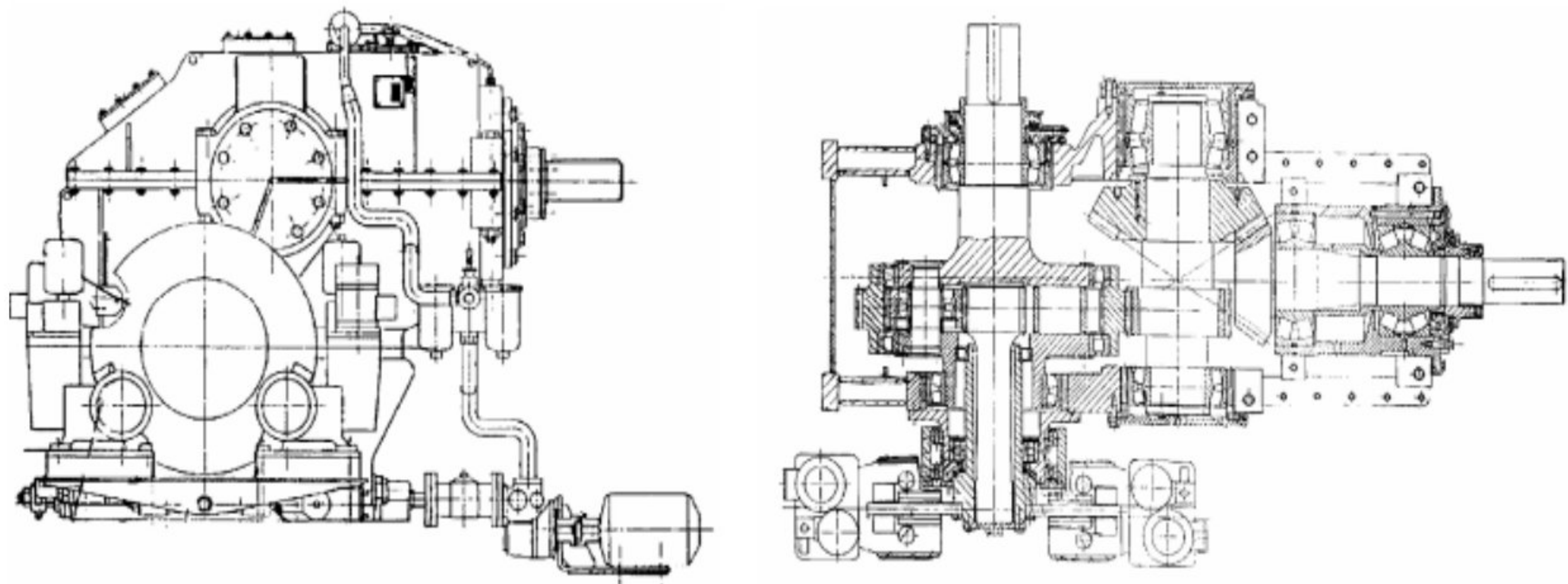


Слика 6 Вишестепени конусно-цилиндрични редуктор

Редуктори се ослањају, у основи, на три ослонаца: два представљају лежајеви излазног степена редуктора, а трећи се обично поставља у зони улазног вратила. Овај трећи ослонац мора бити тако изведен да се еластичне деформације вратила роторног точка пренесу на стрелу, а да се при том не појаве додатна оптерећења у ослонцима редуктора.

Погрешним ослањањем, односно погрешним конструисањем кућишта, може се изазвати оштећење зупчаника излазног степена редуктора. Код појединих конструкција постоје и такозване моментне полуге чији је задатак да се реактивни момент, који се јавља код копања, преко посебне полуге пренесе на стрелу. На тај начин кућиште се у великој мери растеређује, јер основно оптерећење се директно са излазног степена редуктора уводи у носећу конструкцију стреле, а кућиште је поред сопствене тежине оптерећено само мањим додатним силама.

Комбиновани редуктори, којима је последњи степен планетарног типа, а претходни у класичном извођењу, врло су поуздани, јер су преузели добре стране класичних и планетарних преносника уз смањење наведених негативних особина. На слици 7 приказани вертикална и хоризонтална пројекција комбинованог редуктора.



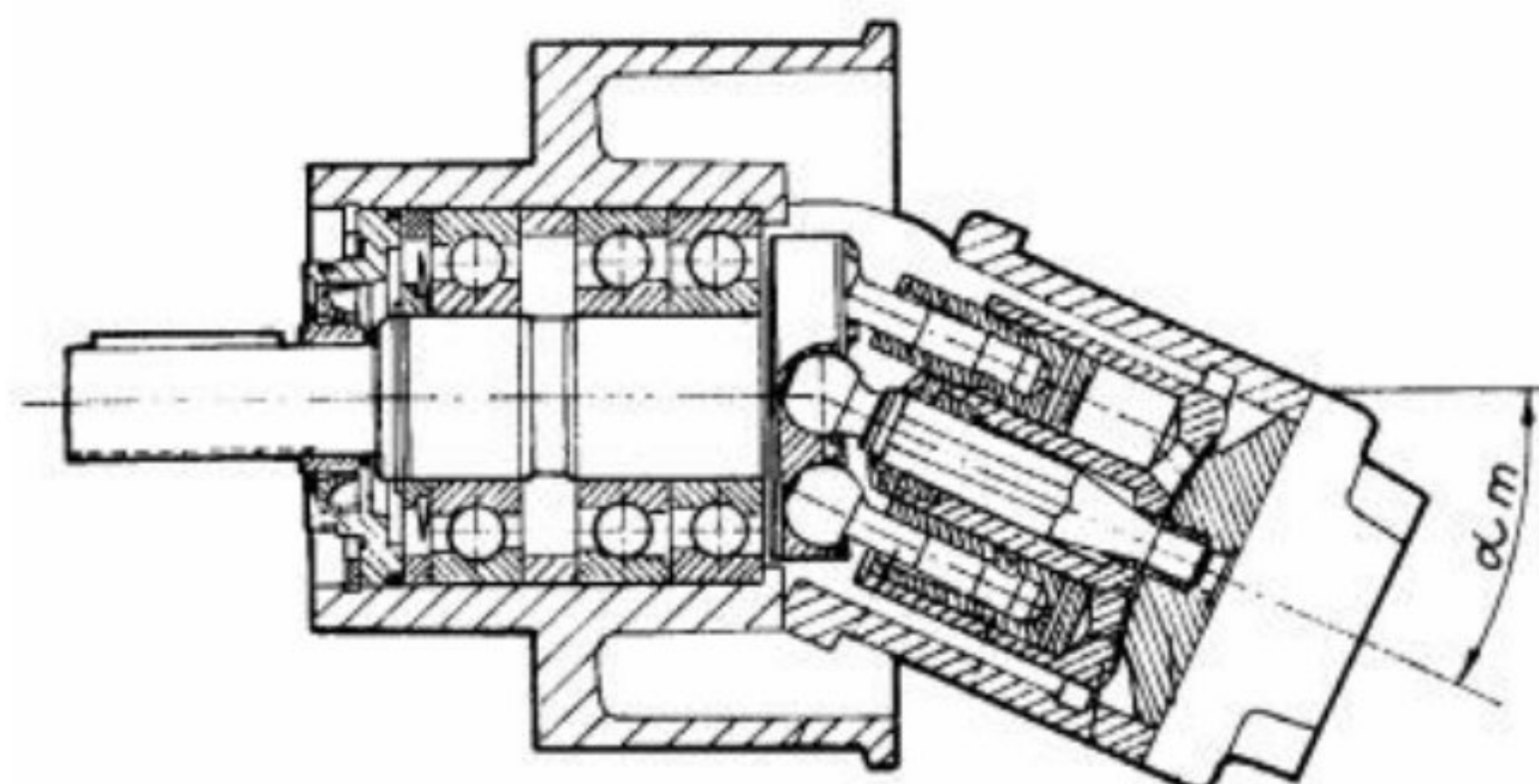
Slika 7 Комбиновани редуктор

2.1.3. Погонски мотори

У највећем броју изведених конструкција на роторним багерима за погон роторног точка, примењени су електромотори, а на једном мањем броју и то на багерима мањег капацитета (углавном код компактних багера) у примени су хидромотори. У табели 1 приказане су карактеристике елктро и хидромотора. На слици 8 приказана је конструкција хидримотора.

Табела 1 Караткеристикие погонских мотора са аспекта броја обртаја

Електромотори		Хидромотори	
Са константим бројем обртаја	Са променљивим бројем обртаја	Затворен систем	Отворен систем
Са степенастом регулацијом	Са континуалном регулацијом	Хидраулични систем са константним бројем обртаја	Хидраулични систем са променљивим бројем обртаја



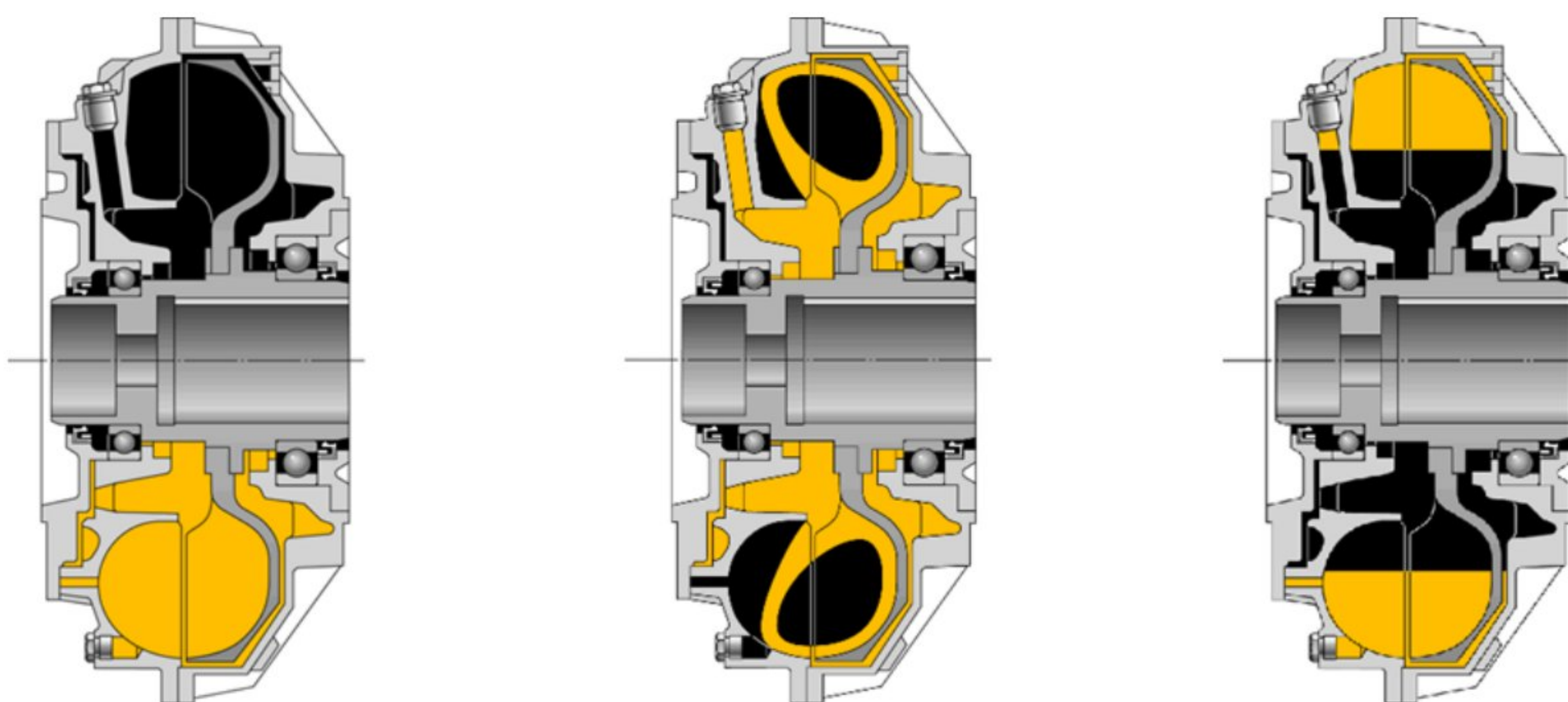
Слика 8 Хидромотор

Примењују се мотори наизменичне струје, а ретко мотори једносмерне струје. Стандардни напони на багерима су 380, 500 и 6000 V за напајање мотора роторног точка. Високо напонски мотори (6000 V) примењују се за веће моторе, због мањег оптерећења багерског трансформатора полазним струјама. Од мотора са константним бројем обртаја примењују се кратко спојени асинхрони мотори и то у већини случајева мотори са клизним прстеновима који омогућавају постепено залетање. Уградњом хидродинамичке спојнице постиже се сличан ефекат при залетању и код мотора без клизних прстенова.

2.1.4. Сигурносна спојница

Услед наиласка ведрице роторног точка на чврсту препреку, при процесу копања, исти се блокира, при чему се у систему преноса снаге јављају велике силе које су у стању да изазову лом појединих елемената. Појава великих сила је последица кинетичке енергије обртних маса електромотора, редуктора вратила роторног точка и роторног точка. Познато је да је кинетичка енергија обртних делова функција квадрата угаоне брзине, односно да брзо ротирајући делови имају при истим масама далеко већу кинетичку енергију од споро ротирајућих маса. Код изведених конструкција уочава се да ротору електромотора припада 65 до 80% кинетичке енергије обртања, односно уградњом сигурносне спојнице, између мотора и редуктора се у случају удара роторног точка о чврсту препреку, значајно умањују настале силе услед удара.

Најчешће се примењују следеће врсте сигурносних спојница: растављачи, моментне ваге, ламеласте фриксионе спојнице, хидродинамичке спојнице и магнетне спојнице. Спојнице се подешавају да при 60% преоптерећења реагују. Поред спојница, електромотори се штите од преоптерећења на уобичајене начине. На слици 9 приказан је принцип рада хидродинамичке спојнице.



Слика 9 VOITH хидродинамичка спојница тип-Т

2.1.5. Ведрице

У декласирану запремину ведрице убраја се запремина саме ведрице и део запремине прстенастог простора роторног точка. За одређивање теоретског капацитета полази се од претпоставки да се у процесу откопавања запремина прстенастог простора пуни са 50 % од запремине ведрице. На сликама 10 и 11 приказане су ведрице са ланчаницима са отвореним и затвореним дном.

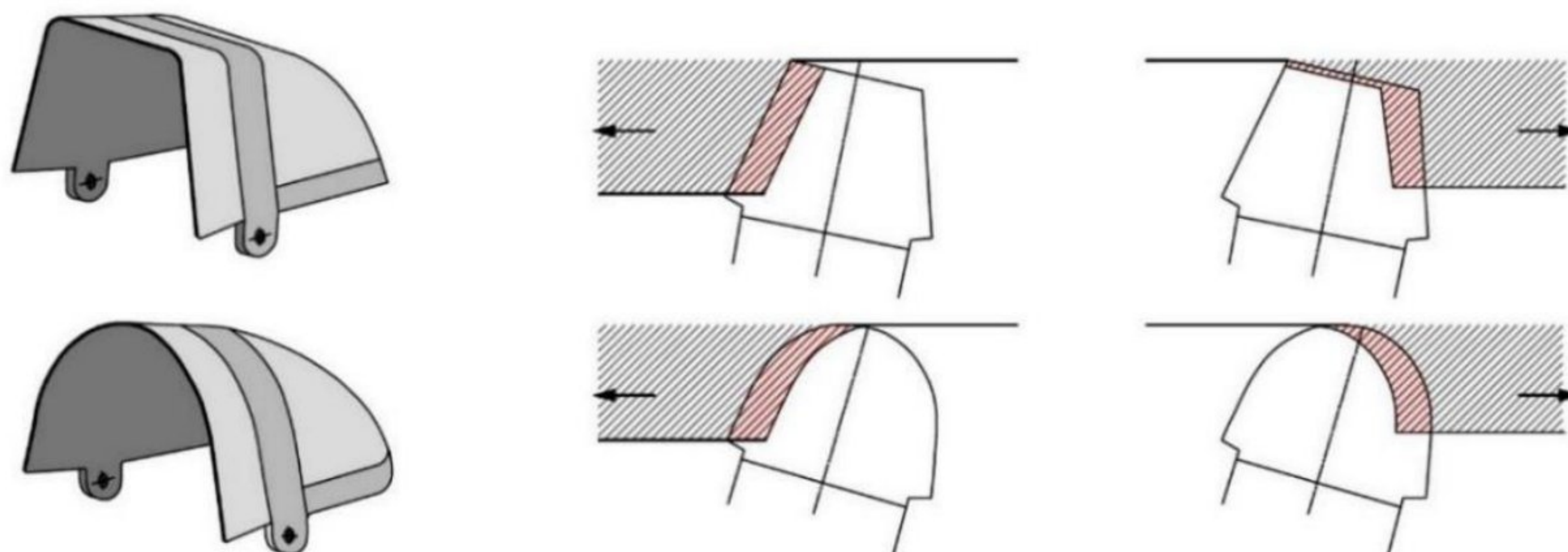


Slika 11 Отворено дно



Slika 10 Затворено дно

У односу на разну ивицу разликујемо: правоугаоне, трапезне и лучне. Најзаступљеније су лучне и трапезасте, док се правоугаоне ведрице ретко употребљавају. На слици 12 приказане су лучна и трапезаста ведрица.



Slika 12 Приказ трапезних и лучних ведрица и изглед одрезака

Лучне ведрине имају неповољан однос дужине резне ивице и површине одреска па је због тога потребна већа снага за откопавање у односу на трапезне ведрине - лучне ведрине захтевају 40% већу снагу од трапезних.

При откопавању тврдих материјала потребна сила резања мање зависи од облика резне ивице, а више од површине попречног пресека одреска, па у тим материјалима полукружне ведрине дају најповољније резултате. Лучне ведрине имају различите дужине ивица резања у зависности од смера кружног кретања. Како је та разлика знатна при откопавању тврђих материјала често се дешава да багер у зависности од смера кружног кретања има различита оптерећења и велике разлике у капацитету.

Као опште правило може се усвојити да за хомогене материјале, који се лако откопавају, предност треба дати трапезним ведринама, а код материјала са високим отпорима при откопавању предност је на страни полукружних ведрине. У тим тврдим материјалима лучне ведрине испољавају предности у односу на трапезне ведрине. Те предности се манифестују кроз равномерније резање материјала односно равномерније оптерећење роторног точка и кружног кретања као и повољнију комадност откопаног материјала.

Најчешћи недостаци ведрине у експлоатацији су следећи:

- ❖ појава напрстина у зони ушке;
- ❖ појава напрстина на телу ведрине;
- ❖ пуцање отвора за чауре на ушкама;
- ❖ интензивно хабање ланчасте завесе и пуцање ланаца;
- ❖ просипање откопаног материјала;
- ❖ лоше пражњење ведрине;
- ❖ хабање ножа ведрине услед неадекватног положаја и распореда „цепова“ за зубе

Све наведено узрокује непланиране застоје услед замена ведрине и пад коефицијента временског искоришћења багера.

Геометрија ведрнца са резним елементима треба да задовољи:

- ❖ да се процес резања и пуњења ведрнце материјалом остварује са што је могуће мањим утрошком енергије;
- ❖ да се елиминише или сведе на најмању могућу меру лепљење материјала на унутрашњим површинама ведрнце;
- ❖ да се обезбеди потпуно пражњење ведрнце у пределу истоварног сектора, да се у откопаном материјалу елиминише појава негабаритних комада;
- ❖ да се елиминише или сведе на минимум просипање материјала из ведрнца на етажни планум;
- ❖ да се неравномерност спољашњих оптерећења као резултат периодичног уласка и изласка резних елемената из масива откопног блока сведе у прихватљиве границе;

2.2. Резни елементи – типови, материјал, положај

2.2.1. Типови и положај

У зависности од материјала који се откопава, ведрнце се опремају следећим елементима за резање:

- ❖ ножевима,
- ❖ угаоним сечивима
- ❖ зубима

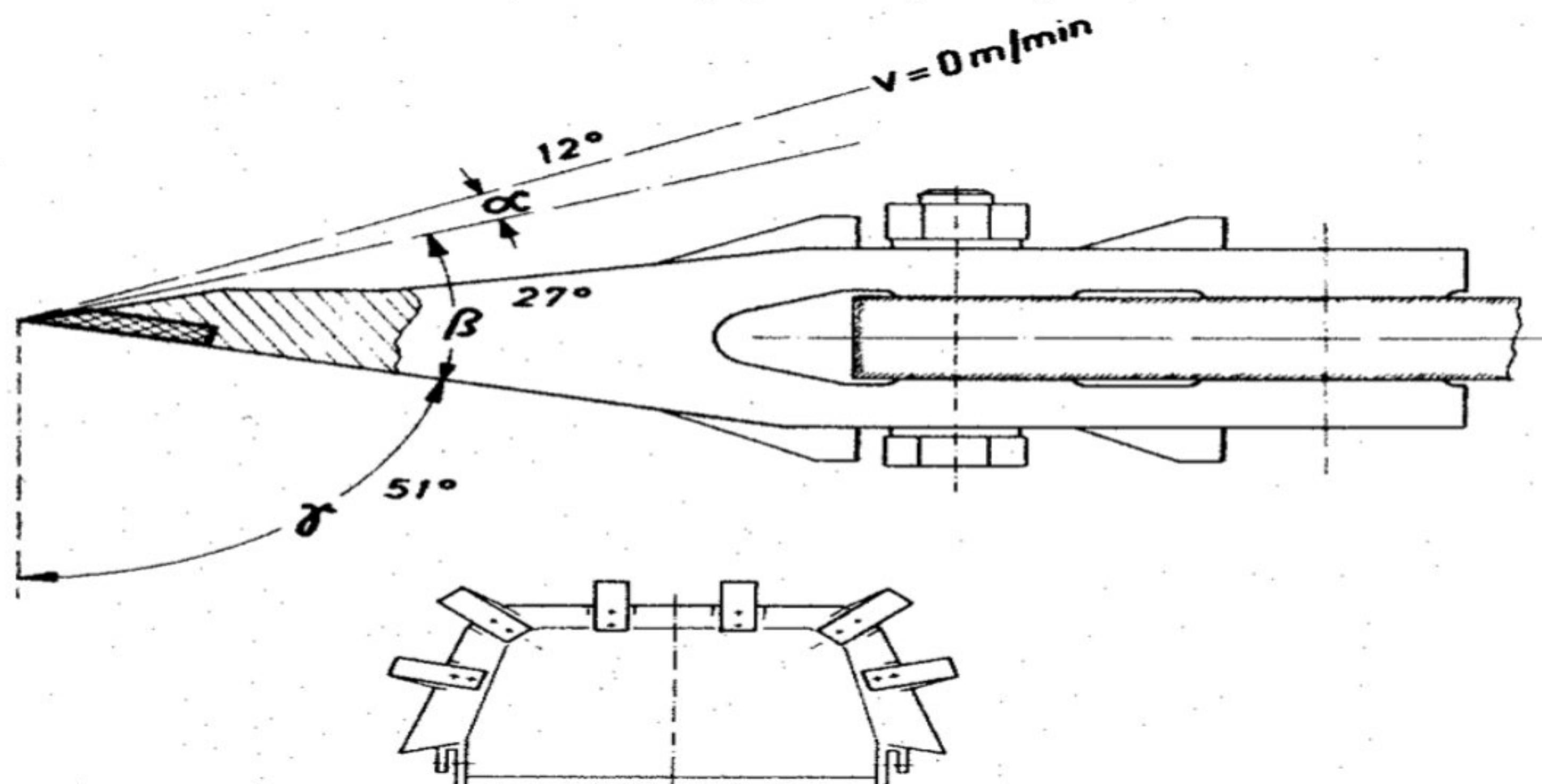
Под ножем се подразумева резна ивица ведрнце, при њему се ведрнце са ножем употребљавају за откопавање тла са веома малим отпором на копање. Ради заштите од хабања резне ивице се ојачавају наваривањем са тврдим електродама. Како су прелазне кривине ведрнца највише изложене хабању често се штите уградњом угаоних сечива која учествују у процесу откопавања, штитећи тиме преостали део резне ивице ведрнце. За чврсте материјале ведрнца се опрема појединачним зубима на најоптерећенијим местима.

Код правоугаоних ведрица на угловима, а код полукружних ведрица по целој резној ивици. Применом зуба расположива сила резања се концентрише на малу дужину резања и на тај начин се олакшава продирање ведрице у материјал.

Зуби морају да задовоље више захтева, од којих су најважнији:

- ❖ повољна геометрија са аспекта резања
- ❖ висока отпорност на хабање
- ❖ висока механичка чврстоћа
- ❖ лака заменљивост

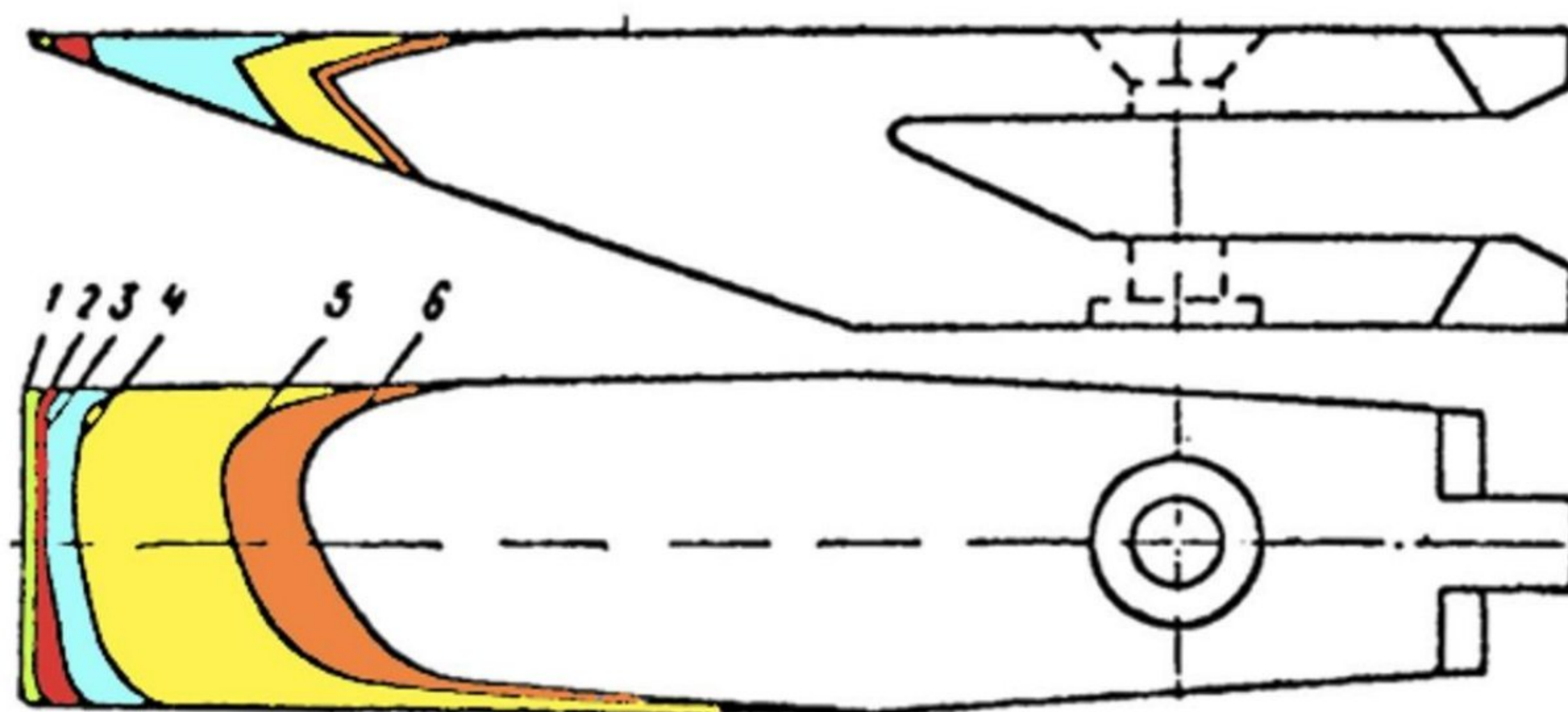
Геометријски параметри зуба су: дужина резне ивице, угао оштрице β , слободан угао α , угао резања $\alpha + \beta$ и предњи угао γ . Угао резања (копања) чини збир углова оштрице β и слободног угла α . Слободни угао се назива и леђни угао зуба. На слици 13 дати су геометријски параметри зуба.



Слика 13 Геометријски параметри зуба

Уобичајене вредности угла резања су од 28° до 33° , уз слободан угао од 5° до 12° (веће вредности се односе на тврђе материјале). Мањи углови резања и поред мањих отпора резања не примењују се због недовољне чврстоће зуба и његовог брзог хабања.

При откопавању, услед дејства абразије ножеви и зуби мењају свој облик и димензије. Из тих разлога мењају се услови рада при откопавању. Мерења извршена у Русији показала су да дозвољено хабање зуба у пракси може повећати отпор на копање за 60÷100%, а са своје стране пракса показује да се ведрица са оштрим резним делом пуни брже и лакше него са затупљеним не изазивајући преоптерећења виталних делова багера. На слици 14 приказано је хабање зуба на ведрици по нивоима где број 1 представља најмању, а број 6 највећу истрошеност зуба ведрице.



Slika 14 Фазе хабања зуба на ведрици роторног багера

При откопавању меких материјала истим ведрицама хабају се подједнако нож и зуби. За откопавање тврдих материјала неопходно је ведрицу опремити зубима који на себе преузимају копање материјала. Зуби морају да задовоље више захтева, од којих су најважнији:

- ❖ повољна геометрија са аспекта резања,
- ❖ висока отпорност на хабање,
- ❖ висока механичка чврстоћа,
- ❖ лака заменљивост.

2.2.2. Материјал

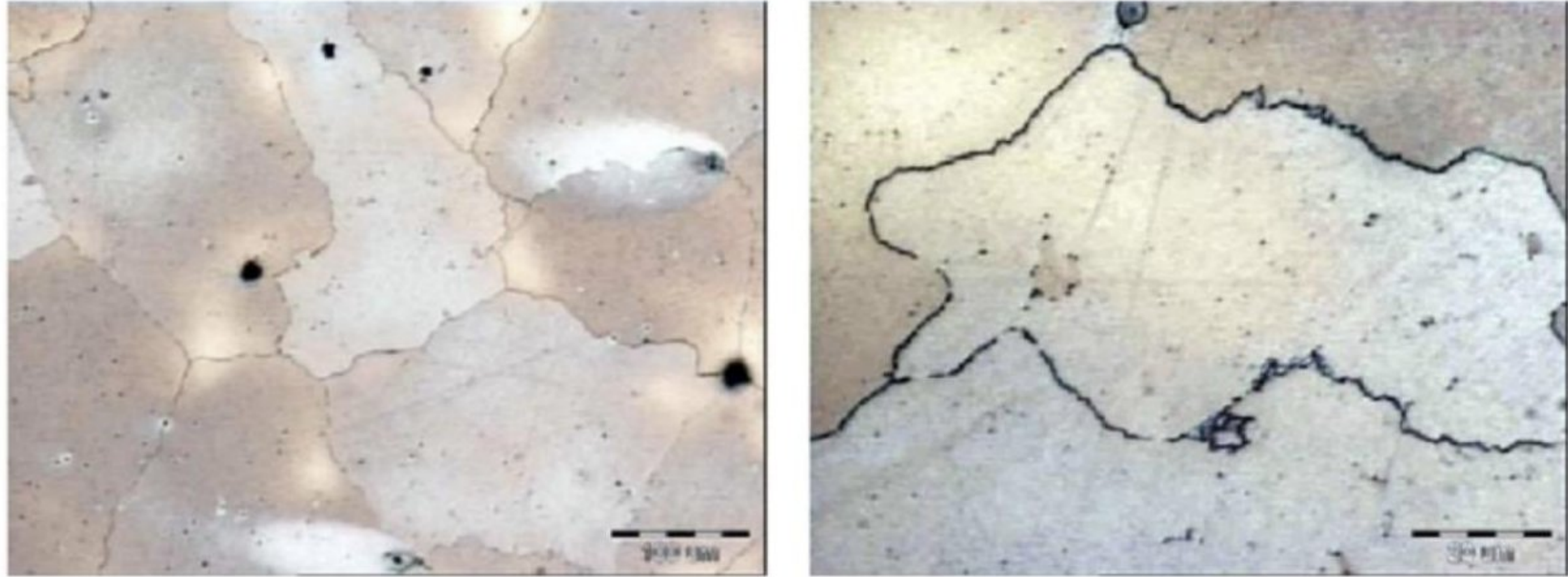
Избором материјала који су отпорни на хабање, радни век зуба се може знатно продужити (до неколико стотина сати). Резна ивица се може заштитити наваривањем тврдих материјала; уметањем плочице од тврдог метала. Откопани материјал знатно утиче на век трајања зуба те се морају извршити испитивања у експлоатацији за конкретан рудник. У току рада зуб је изложен великим силама које настају у процесу резања, па то захтева и велику механичку отпорност; тачније, тело зуба мора поседовати високу чврстоћу и жилавост. У случају погрешно изабраног материјала тело зуба се ломи или савија, а тиме се драстично нарушава процес резања.

Зуби роторних багера израђују се од следећих материјала:

- ❖ високолегирани мангански челици отпорни на хабање GX120Mn12 (Ѓ.3160)
- ❖ нисколегирани мангански челици отпорни на хабање 50Mn7 (Ѓ.3134)
- ❖ високолегирани хромни челици

Високолегирани мангански челици отпорни на хабање

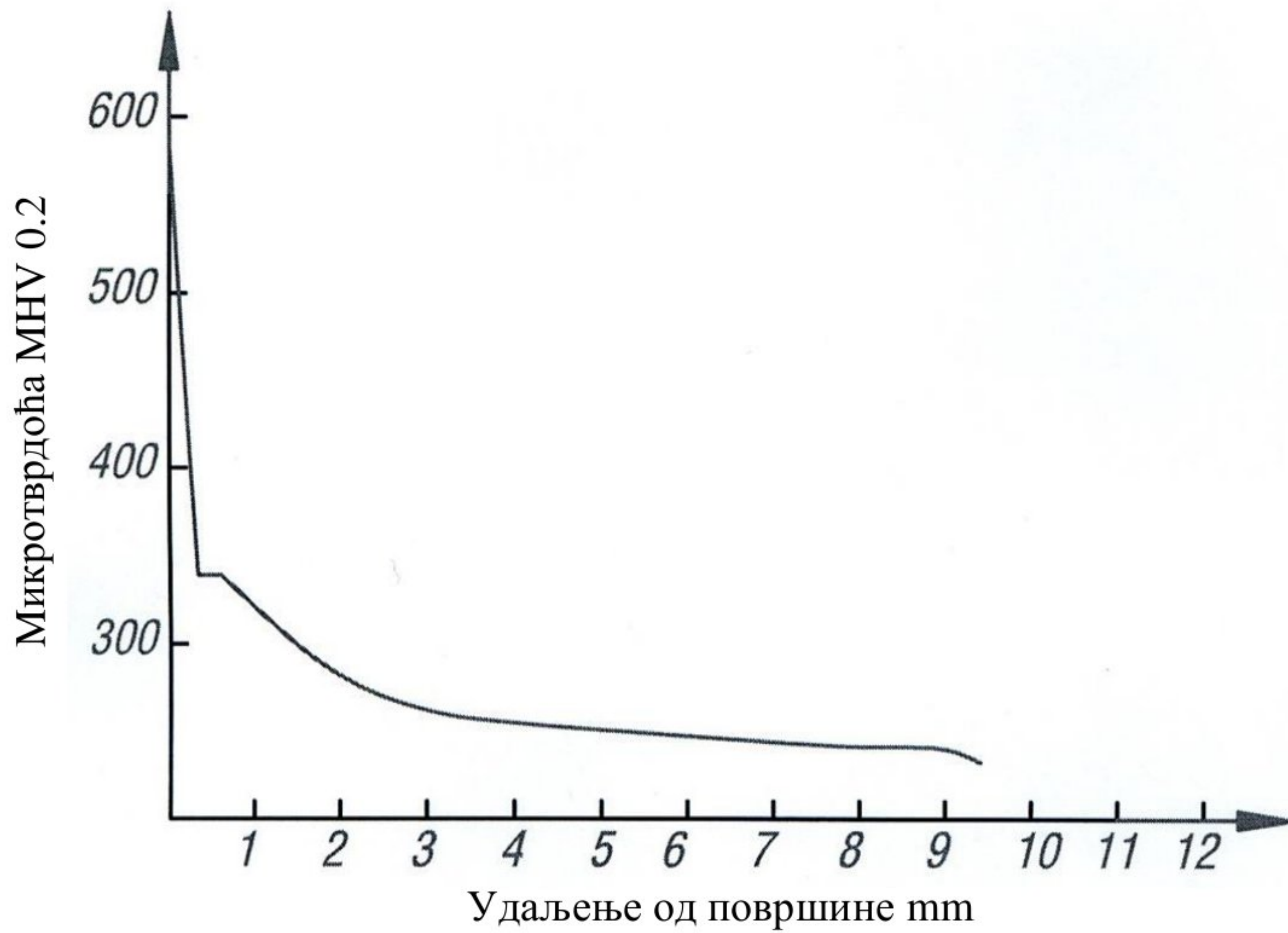
Зуби су изложени хабању у условима високих притисака и удара, па се за њихову израду користе високолегирани мангански челици аустенитне структуре, као што је GX120Mn12 (1,2% C; 12,5% Mn). Структура овог челика после ливења састоји се од аустенита и веће количине мешовитих карбида, распоређених по границама аустенитних зрна, што смањује чврстоћу и жилавост. Због веће количине карбида ливени делови се термички обрађују растворним жарењем на температури 1050÷1100°C са хлађењем у води, услед чега се разлаже карбид, а челик добија потпуну аустенитну структуру. Ова врста челика се веома тешко обрађује резањем. На слици 15 приказана је микроструктура челика GX120Mn12 увећана 150 и 750 пута. На слици 16 приказан је график расподеле тврдоће у површинском слоју челика.



а) Увећање 150 пута

б) Увећање 750 пута

Слика 15 Микроструктура челика GX120Mn12



Слика 16 Расподела тврдоће у површинском слоју

Нисколегирани мангански и други нисколегирани челици

Нисколегирани челици, као што је 50Mn7 (Џ.3132) (0,5% С 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. Код ових челика манган делом улази у чврсти раствор, а делом у карбид гвожђа. Ова група челика у каљеном и отпуштеном стању има, поред добре отпорности на хабање, и високу пластичност.

Високолегирани хромни челици

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 зуба роторних багера за копање јаловине, добри резултати се постижу применом челика са садржајем више од 1,65% С и више од 12% Cr, 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 Мо, W, V и др., што им повећава отпорност на хабање и способност резања.

3. Утицај резних елемената на технологију рада роторног багера

Технологија рада роторног багера је иста за све типове и величине багера, са незнатном изменом код роторних багера са телескопском стрелом роторног точка (са помаком). Утицај на саму технологију рада багера има, пре свега, висина откопавања, затим угао нагиба радне косине, ширина блока, дебљина реза и пречник роторног точка. Остали елементи, као брзина резања, број пражњења ведрица, брзина обртања стреле роторног точка и облик одреска, имају битан утицај на капацитет роторног багера, али не и на технологију рада.

При откопавању, роторни точак се окреће око своје осе, уз истовремено окретање роторне стреле око вертикалне осе багера. Овде се радни елемент, при пролазу кроз материјал, креће по резултанти ободне брзине при окретању роторног точка око своје осе и ободне брзине окретања роторне стреле око вертикалне осе багера. При овоме се из масива откопавају резови српастог облика, који у зависности од начина рада могу бити вертикални и хоризонтални. У раду се примењују само вертикални, само хоризонтални или комбиновано и једни и други.

Откопавање блока вертикалним резovima има низ одлучујућих предности у односу на рад са хоризонталним и комбинованим резovima (нпр. већа откопна висина, мањи динамички удари, лака примена програмираног рада, мања потрошња енергије услед копања и дизања материјала до висине пражњења – мањи пут, при чему планум остаје раван), па је потребно, тамо где је могуће, вршити откопавање вертикалним резovima.

3.1. Геолошка грађа радне откопне средине роторног багера

Основни утицајни фактор на отпор копању представљају физичко-механичке карактеристике материјала који се откопава.

Појава великих осцилација у капацитету роторног багера је последица утицаја бројних и разноврсних чинилаца као што су:

- ❖ физичко-механичка својства материјала који се откопава
- ❖ конструктивно-кинематски параметри багера
- ❖ степен усаглашености микро и макро параметара радног блока са конструкционо-кинематским параметрима багера
- ❖ организациони и климатски фактори

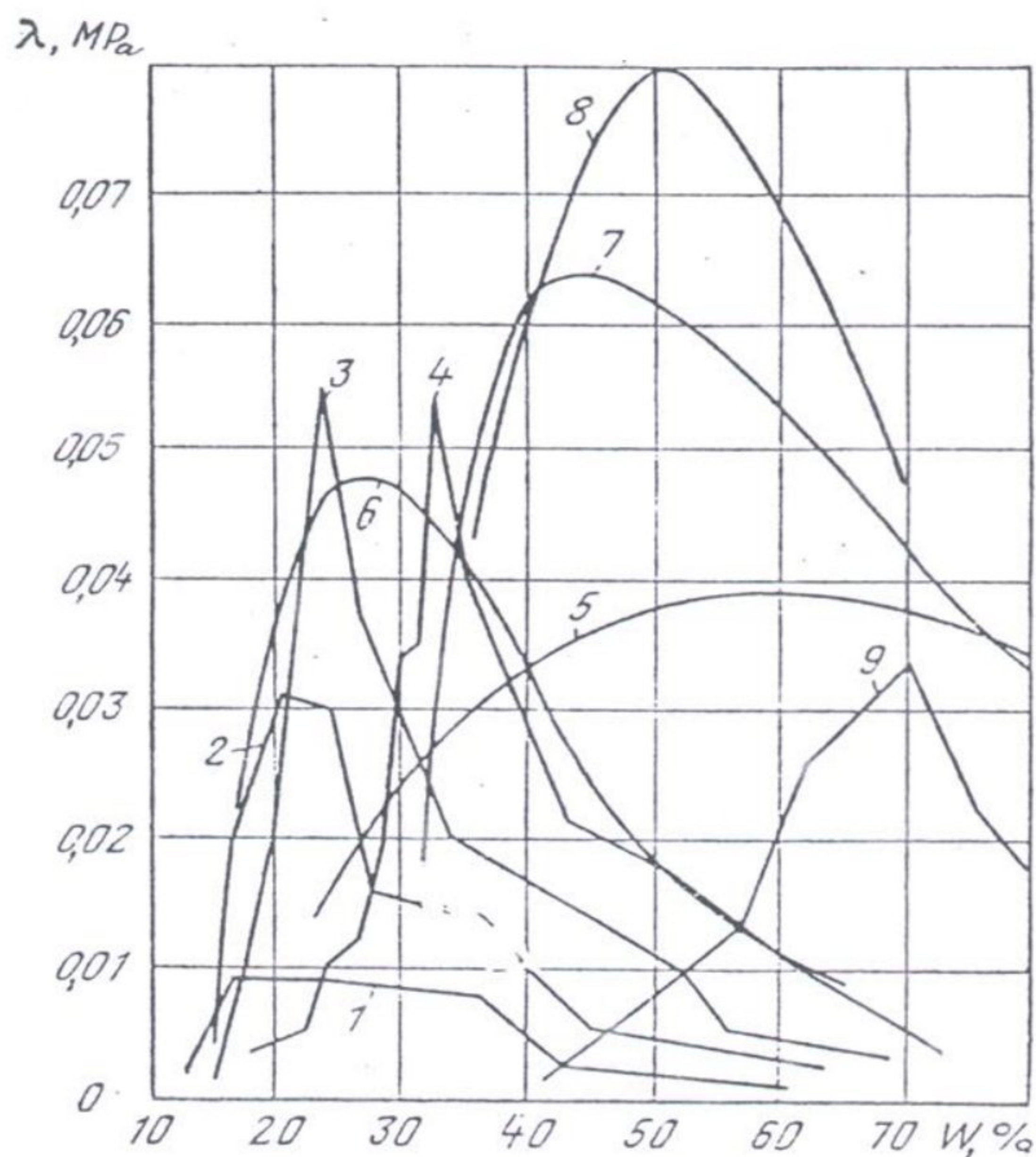
Приликом избора оптималне геометрије резних ивица, облика ведрица, броја и врсте зуба неопходно је детаљно познавање неких геотехничких елемената као што је лепљивост, дробљивост, абразивност, кохезија, угао унутрашњег трења и др.

Лепљивост

Појава интензивног лепљења код откопавања неких материјала може у великом степену смањити капацитетно и временско искоришћење багера. Са аспекта последица лепљивости материјала најосетљивија места на роторном багеру су ведрице. Лепљење материјала по унутрашњим зидовима ведрица може осетно смањити ефективност рада багера. Често се ведрице морају чистити у свакој смени, а пошто се то ради ручно, време чишћења најчешће износи 2 до 3 часа по смени. Да би се овај проблем превазишао ведрице се израђују са ланчастим мрежама и бочним странама што мање висине. Код примене дужих ланаца смањује се ефекат пражњења и повећава проценат просипања материјала. Истраживања показују да најпогоднију чврстоћу лепљења имају глине са влажношћу 25÷75% и она износи до 0,08 МПа.

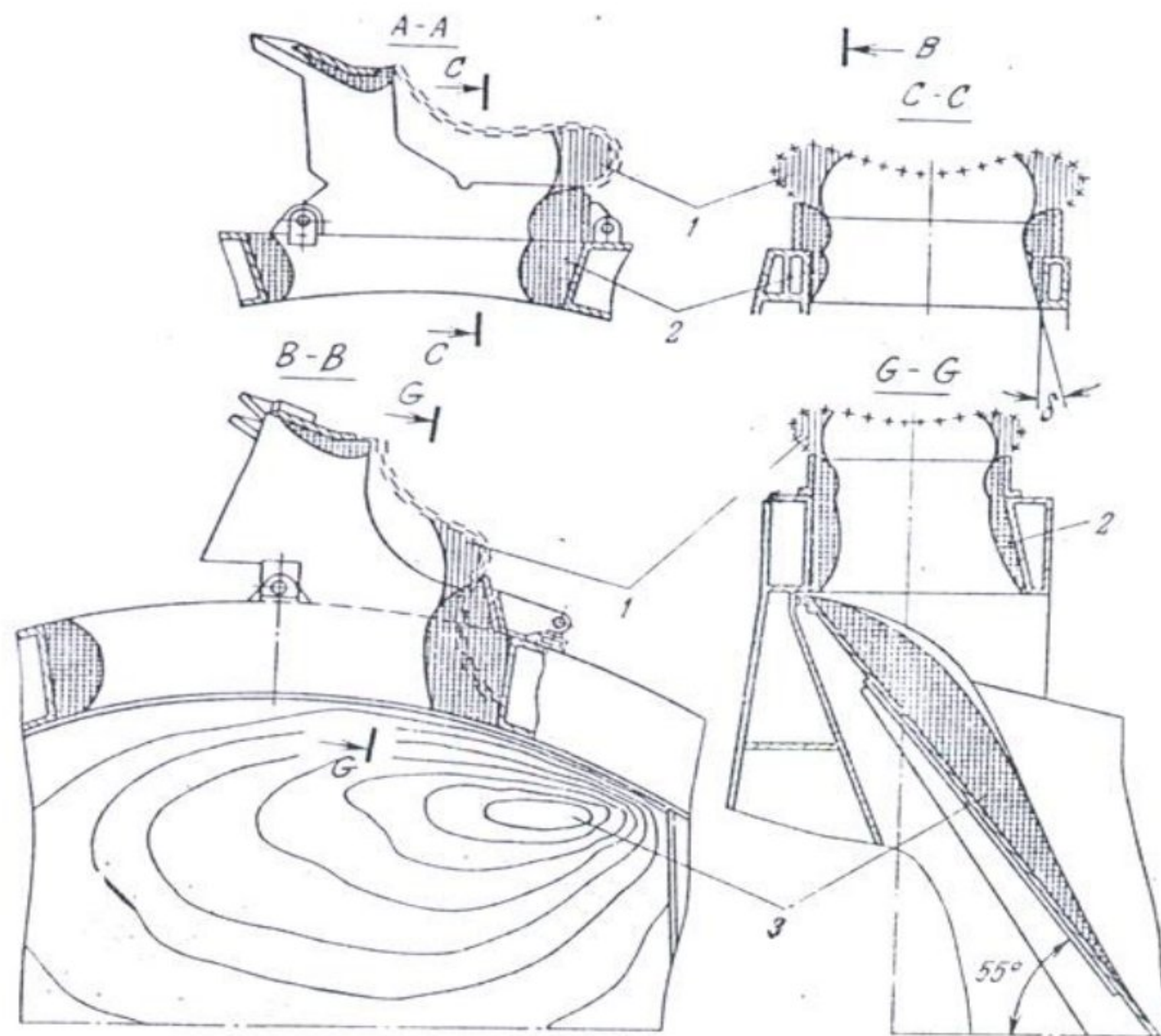
При конструктивном нагибу бочних зидова ведрице (10,12°) и мањих висина, површина налепљеног слоја одсликава унутрашњу површину оштрице,

а налепљени слој има мању дебљину. У задњем делу ведрице формира се најпостојанији слој лепљеног материјала знатне дебљине, који достиже после 4,5 сати рада, на пример на ведрицама багера *SchRs630*, у просеку 0,30, 0,35 m. При пребацавању прослојака, а при раду са затвореним ведрицама, запуњеност је износила и преко 70%. На сликама 17, 18 и 19 приказане су карактеристике лепљења материјала у зависности од различитих фактора.



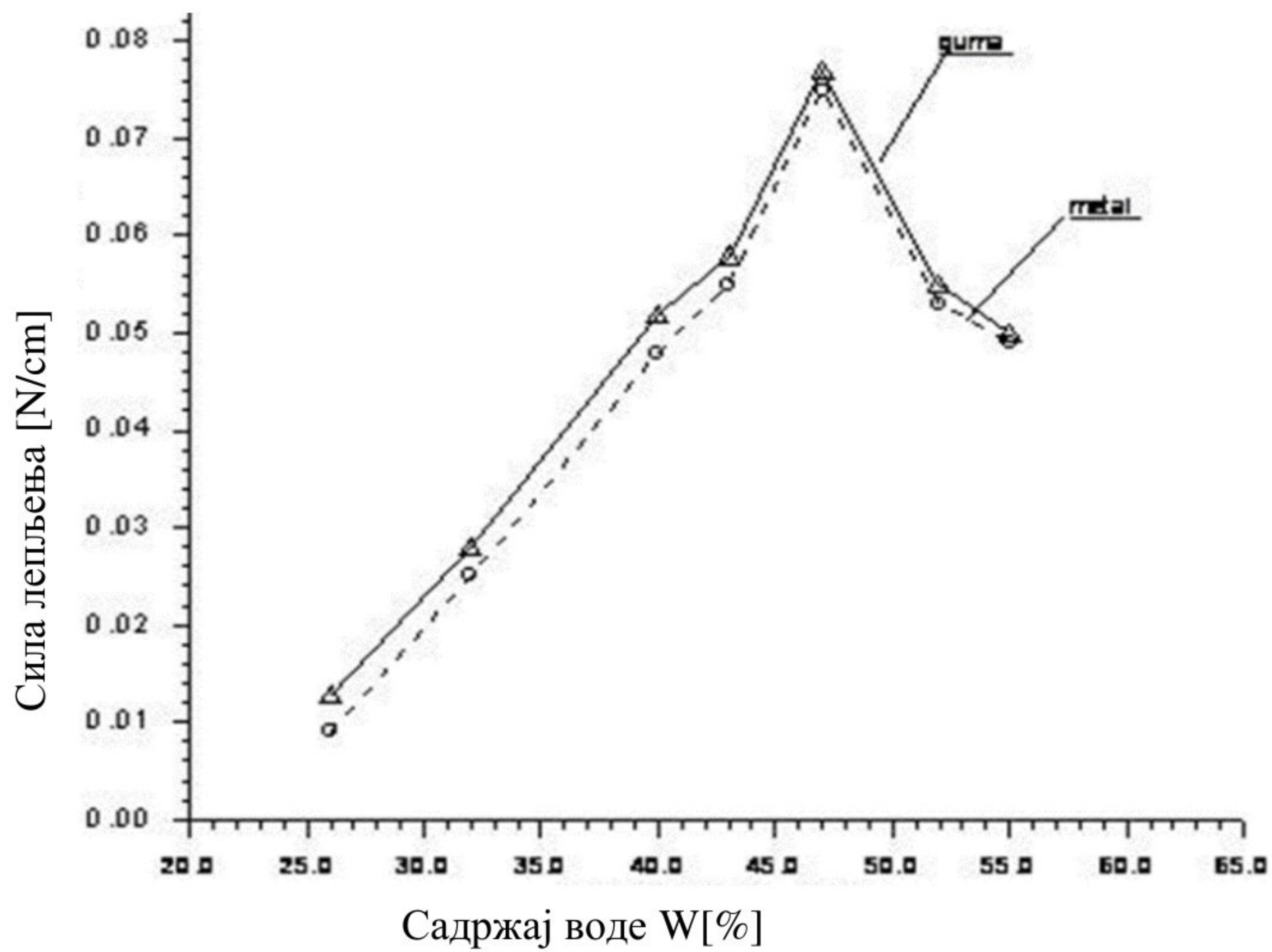
Слика 17 Зависност лепљења од влажности

(1, 2, 3 и 4 - сагласно садржају глиноватих материјала 10, 40, 60 и 100 %; 5 - жута глина, 6 - зелена глина, 7 - сиво-зелена глина, 8 - црносива глина, 9 - сива глина)



Слика 18 Налепљивање материјала на ведрицама роторних багера

(1 - лепљење на ланцима, 2 - лепљење у ведрицама, 3 - лепљење у пријемном бункеру)



Слика 19 Зависност силе лепљења од промене влажности испитиваног материјала на ПК РБ Колубара

Абразивност материјала који се откопава

Абразивност материјала има велики утицај на радни процес и капацитет роторног багера, јер изазива хабање резних елемената, ивица ведрица, итд. Пракса показује да се похабани резни елементи замењују када се потребна енергија за погон радног точка повећа за $1,3 \div 1,5$ пута у поређењу са оном када су зуби нови. У табелама 2 и 3 приказани су прегледи карактеристика појединих елемената.

Табела 2 Преглед просечних вредности физичко-механичких параметара појединих литолошких елемената

Врсте седимената, комплекс	Влажност, %	Запреминска тежина, kN/m^3	Угао унутрашњег трења, $\varphi(^{\circ})$	Кохезија, kN/m^2
Квартних глина	25,00	20,00	24°	30,00
Песковито алувијалних седимената	22,00	19,00	29°	10,00
Шљункова алувијалних загуљених	26,00	19,50	31°	6,00
Понтских глина	30,00	19,20	25°	25,00
Угља	48,00	11,50	38°	60,00
Угљевите глине	58,00	16,50	16°	25,00
Понтских подинских пескова	30,00	19,70	28°5'	10,00

Табела 3 Преглед физичко-механичких карактеристика повлатних и подинских седимената на ПК „Тамнава-Западно поље“

Литолошки чланови, комплекс	Влажност, %	Запреминска тежина, kN/m^3	Угао унутрашњег трења, $\varphi(^{\circ})$	Кохезија, kN/m^2
Квартних глина	25,00	19,90	25°	16,00
Алувијалних пескова	22,00	18,10	26°	1,00
Алувијалних шљункова	30,00	19,00	28°	0,00
Алувијалних шљункова и пескова	29,00	18,60	30°	2,00
Понтских глина	31,00	18,60	25°	20,00
Угља	-	11,50	39°	30,00
Понтских пескова	20,00	17,10	28°	4,00
Угљевита глина	58,00	16,40	16°	15,00

3.2. Отпор на копање

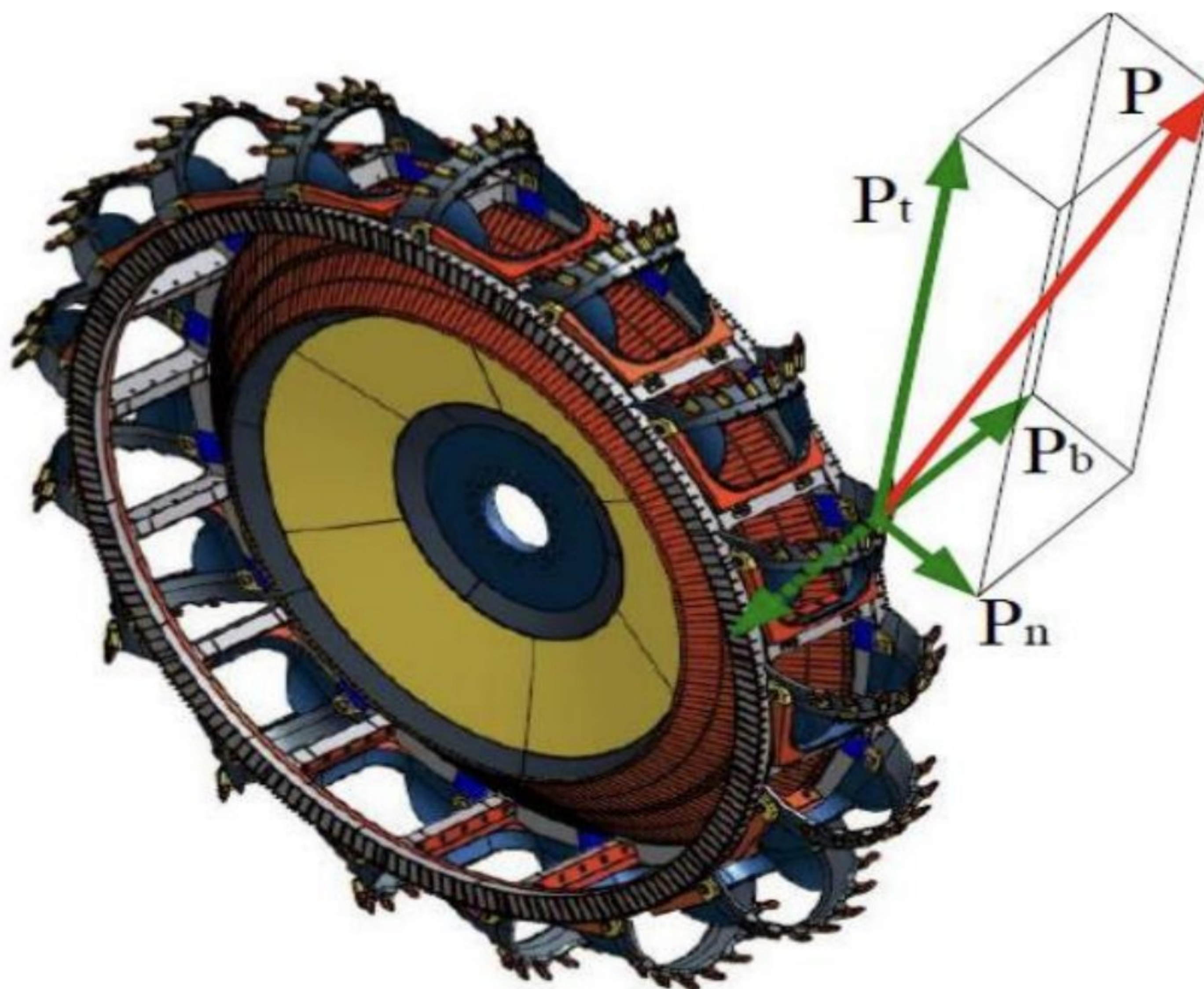
Роторни багери откопавају материјал ведрима које при копању исецају материјал из масива у облику одрезака. Код роторних багера поред резања масива врши се захватање и подизање материјала до висине пражњења у пределу истоварног сектора радног точка. Растресити материјал без кохезије не пружа битан отпор резним елементима за дробљење. Пластични материјал, који има малу кохезију, пружа мали отпор, а суви везани материјал са већом кохезијом при процесу дробљења ломи се у комаде и пружа већи отпор копања. Чврсте стене захтевају знатне силе копања.

Данас је код свих произвођача роторних багера опште прихваћен принцип да се, код димензионисања снаге погона РТ и кружног кретања горње градње, укупни отпор материјала на копање разлаже на три компоненте: тангентну P_t , бочну P_b , и нормалну P_n .

Тангентна компонента - P_t делује у равни РТ, има смер супротан његовом обртању и правац тангенте на трајекторију резања, а савлађује се снагом мотора за погон РТ.

Бочна компонента - P_b делује у равни кружног кретања РТ, има смер супротан окретању стреле РТ и правац тангенте на трајекторију окретања, а савлађује се снагом погона за кружно кретање горње градње багера.

Нормална компонента - P_n делује у равни РТ у оквиру лука копања, има правац нормале на трајекторију обртања РТ, а савлађује се снагом погона за транспорт багера (при раду багера са вертикалним резовима) или тежином стреле роторног точка (при раду багера са хонзонталним резовима). На слици 20 приказан је распоред дејства сила на кофици роторног точка.



Slika 20 Шема сила које делују на резну ивицу ведрнице

Тангентна компонента

Ободна сила на роторном точку савлађује следеће отпоре:

- ❖ P_{rez} - отпор на резање (одваљивање) материјала из масива
- ❖ P_{pod} - отпор на подизање материјала у ведрницама до висине пражњења
- ❖ P_{punj} - отпор на пуњење ведрница материјалом,
- ❖ P_{tr} - отпор трења између материјала у ведрници и кружне склизнице РТ
- ❖ P_{kin} - отпор на саопштавање кинетичке енергије материјалу у ведрници

Ободна сила на P_t се може дефинисати изразом:

$$P_t = P_{rez} + P_{pod} + P_{punj} + P_{tr} + P_{kin}$$

Вредности компонената P_{punj} , P_{tr} , и P_{kin} су мале у односу на P_{rez} и приближно износе:

$$P_{punj} + P_{tr} + P_{kin} = (0,02 \div 0,15) P_{rez}$$

Према томе израз за ободну силу можемо писати у облику:

$$P_t = P_k + P_{pod}$$

Где је P_k сила копања

Овакав начин одређивања ободне силе на роторном точку ($P_t = P_k + P_{pod}$) користе сви велики произвођачи роторних багера на свету као што су: Русија, Немачка, Чешка...

Сила копања се одређује по обрасцу:

$$P_{pod} = \frac{Q_t \gamma g h_d}{3600v}$$

Где је:

- ❖ Q_t – теоретски капацитет багера, m^3m/h
- ❖ γ – насипна маса материјала, t/m^3
- ❖ g – убрзање земљине теже, m/s^2
- ❖ v – ободна брзина роторног точка, m/s
- ❖ h_d – висина дизања материјала у ведрима до места пражњења, m

Бочна компонента

До данас код произвођача роторних багера није прихваћен јединствен став и разрађена јединствена метода за одређивање бочне компоненте отпора на копање, а зависно од произвођача роторних багера, бочна сила копања се одређује као део ободне силе - P , тангентне компоненте отпора на копање (силе копања) - P_k , или силе резања - P_{rez} .

Најновија истраживања у циљу потпунијег дефинисања бочне силе копања показују да карактер промене ове силе зависи од параметара багера, карактеристика материјала који се откопава, површине попречног пресека одреска и односа дебљине и ширине одреска.

Нормална компонента

До данас нема опште прихваћене методе која пружа могућност да се утврди карактер промене нормалне силе копања. Истраживања су показала да правац дејства и величина нормалне силе копања зависе од врсте материјала који се откопава, конструкције резних елемената и степена похабаности истих, начина откопавања блока, режима рада, а такође и од осцилација роторног точка. За величину нормалне компоненте отпора на копање могу се давати само оријентационе препоруке, и то искључиво у зависности од чврстоће материјала који се откопава:

- ❖ За I и II групу материјала $P_n = 0,4 P_k$
- ❖ За III групу материјала $P_n = (0,6 \div 0,7) P_k$
- ❖ За IV и V групу материјала $P_n = (0,8 \div 0,9) P_k$

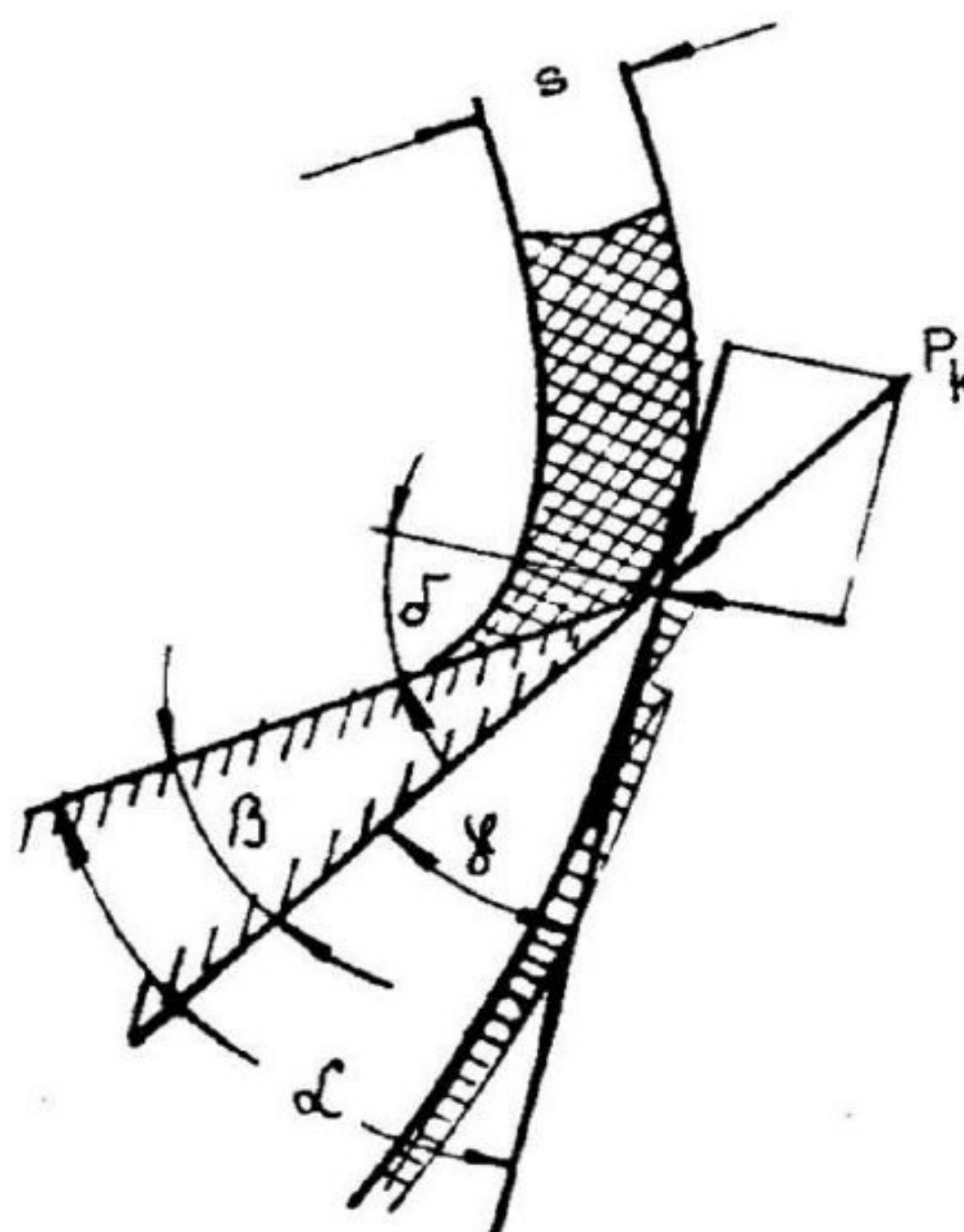
Утицај резних елемената на отпор копања

За чврсте материјале ведрџа се опрема појединачним зубима на најоптерећенијим местима. Применом зуба расположива сила резања се концентрише на малу дужину резања и на тај начин се олакшава продирање ведрџе у материјал. Ширина зуба бира се минималном и то из услова максималног напрезања по 1cm његовог сечива до 7 kN, што обично одговара растојању између зуба 1,2÷1,25 ширине зуба.

Значајни углови код зуба су:

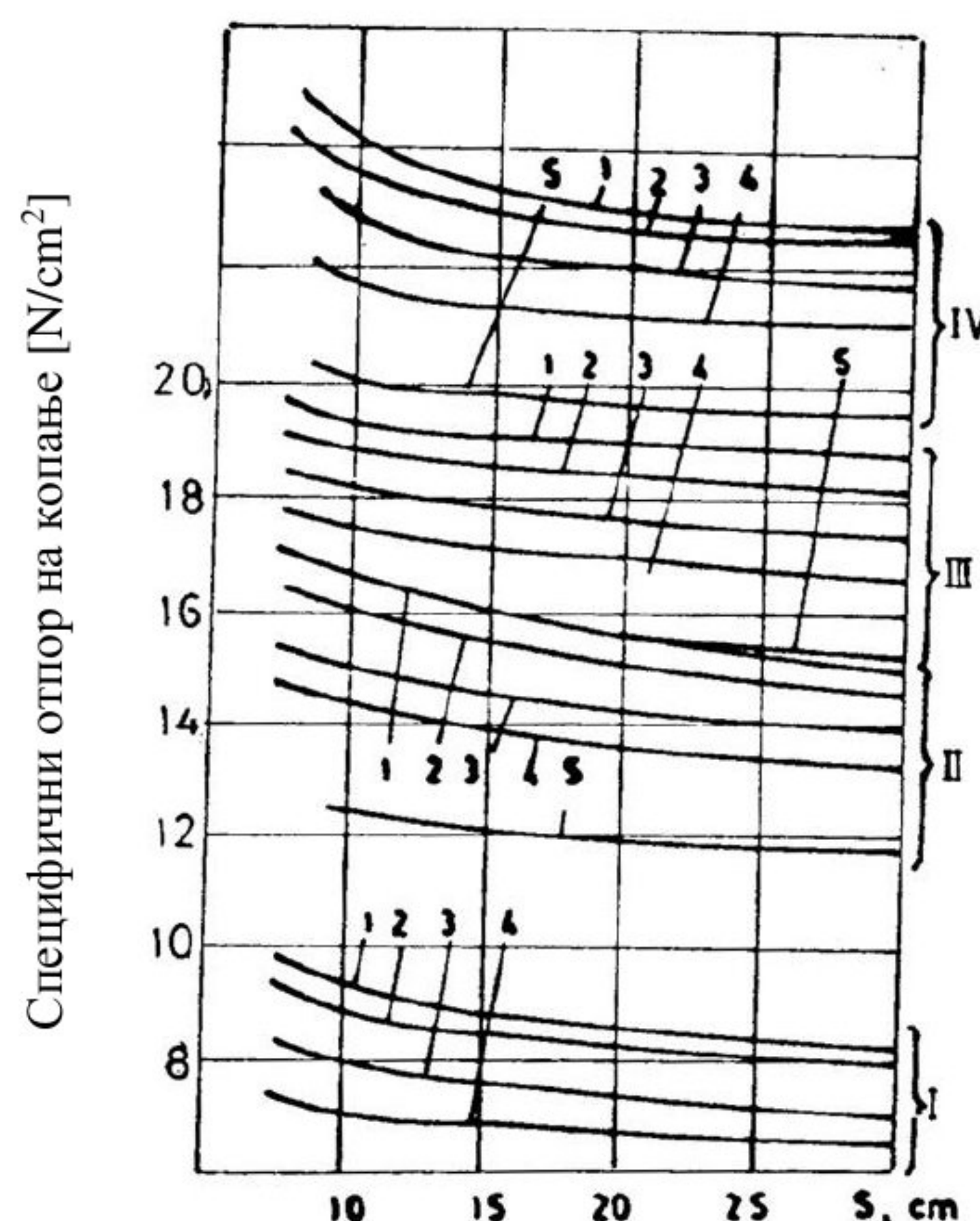
- ❖ угао резања $\alpha = \beta + \gamma$
- ❖ угао клина β
- ❖ задњи угао копања γ
- ❖ предњи угао δ (угао хабања)

Мерењем тангенцијалног отпора копања F_t , на оштром и похабаном зубу. Дијаграм хабања показује зависност отпора копања од угла хабања новог зуба и угла хабања похабаног зуба. Из дијаграма се види знатно повећање отпора копања F_t са повећањем угла хабања δ . Угао клина зуба треба да износи $20 \div 22^\circ$ за мекше стене и $20 \div 25^\circ$ за тврде. Слика 21 приказује тренутак одвајања материјала. Слика 22 приказује зависност отпора на копање од резне ивице.



Слика 21 Детаљ зуба у захвату са стенском масом у тренутку настанка пукотине и одвајања материјала

Повећањем дебљине резне ивице повећава се отпор на копање, чак и при оштрим резним ивицама и зубима, јер се повећава отпор од деформације одреска.



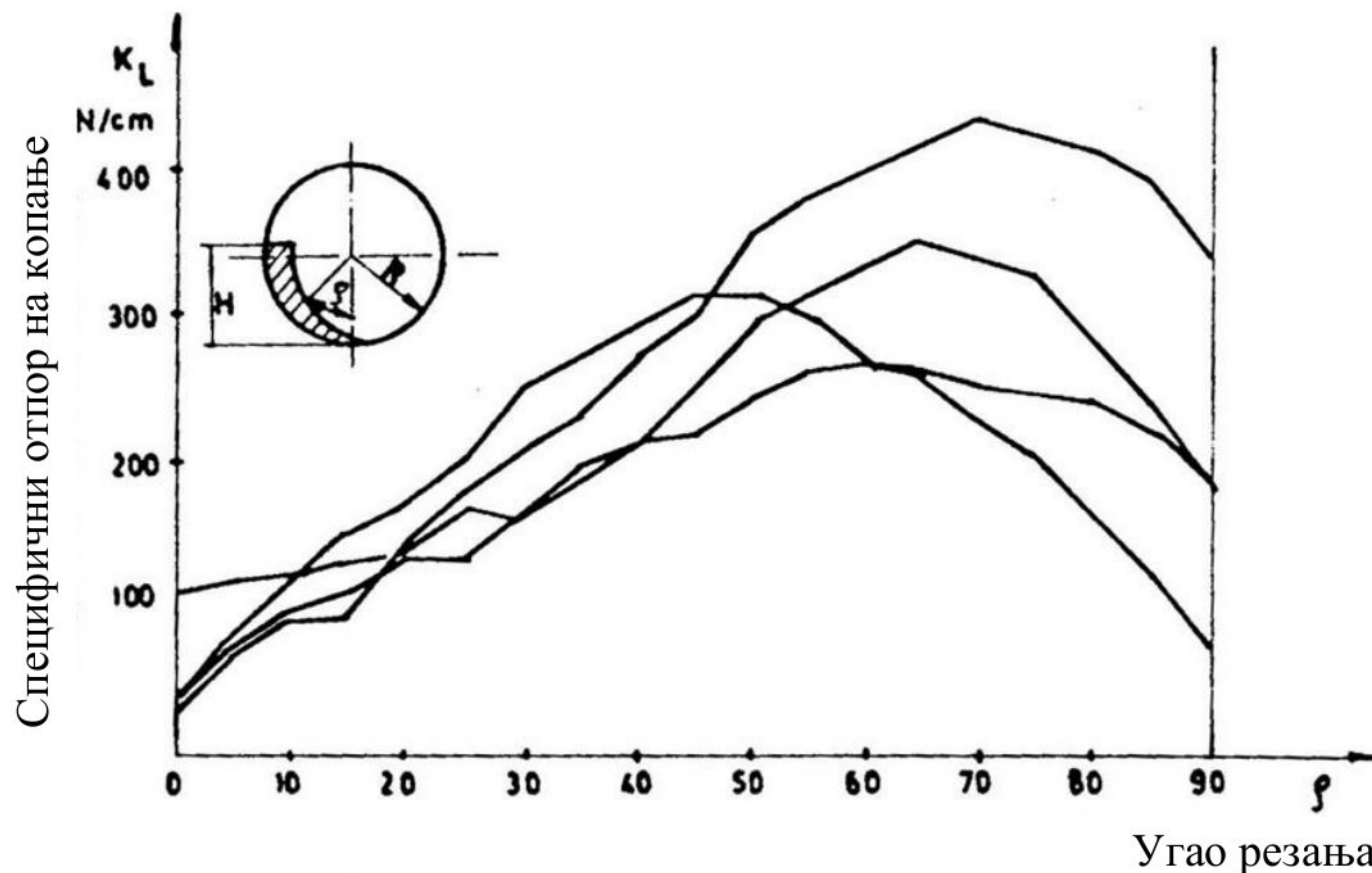
Слика 22 Зависност отпора на копање од дебљине резне ивице

(криве 1,2,3,4 и 5 се односе на дебљине резне ивице 55, 45, 30, 22 и 7,5 mm)

Утицај геометријских параметара одреска на отпор копања

Угао резања

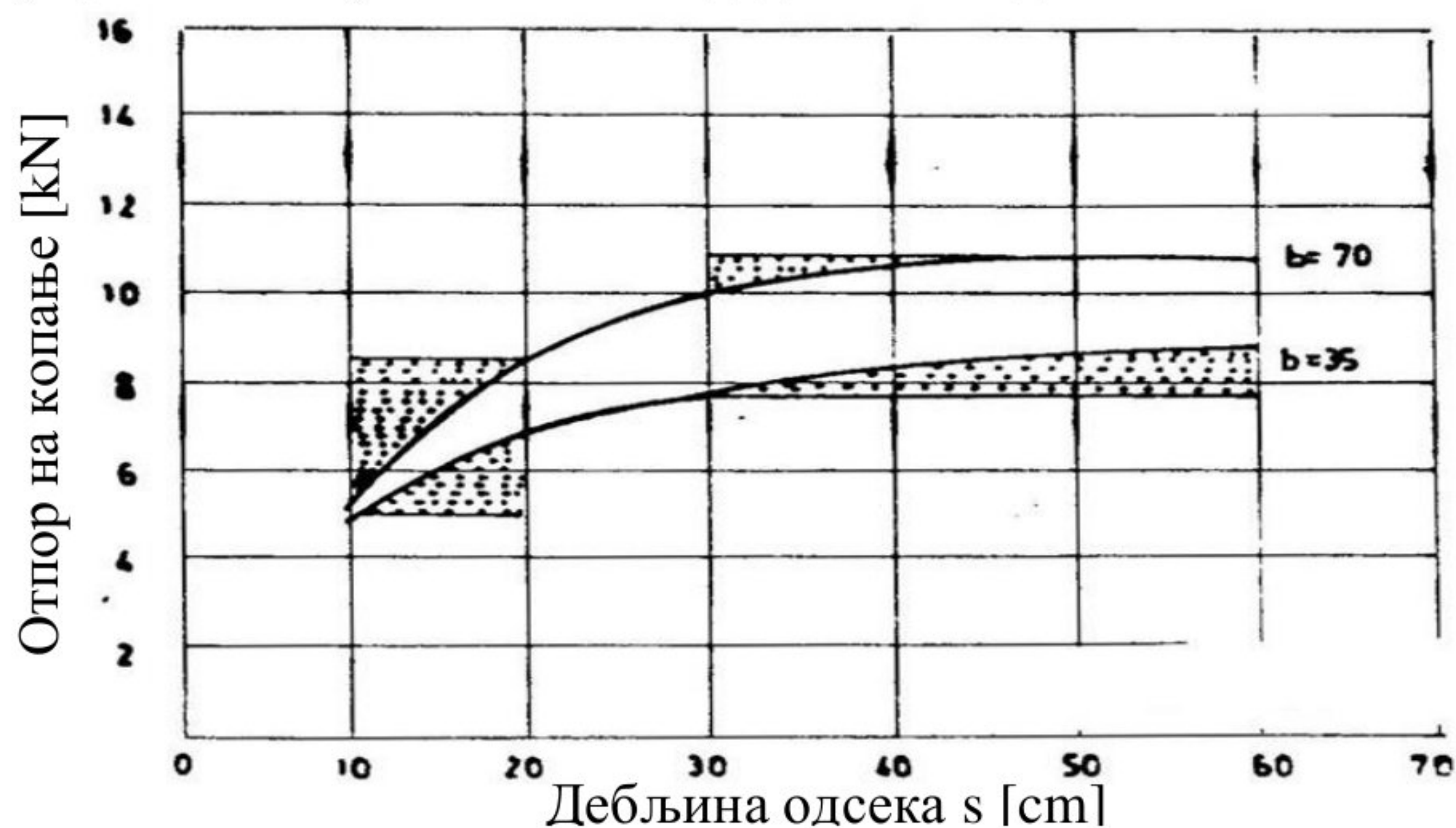
До одређене вредности угла резања ρ специфични отпор на копање расте, да би достигао максимум између 50° и 70° . Даљим порастом угла резања отпор на копање опада. Слика 23 приказује зависност отпора на к. од угла резања.



Слика 23 Зависност специфичног отпора на копање од угла резања

Ширина одреска

У подручју малих дебљина одреска, до око 30 см, ширина одреска има мали утицај на пораст отпора на копање. Код већих дебљина одреска утицај ширине одреска има велики утицај на отпор копању. Слика 24 приказује зависност укупног отпора на копање од дебљине одсека.



Слика 24 Зависност укупног отпора на копање од дебљине одсека

Начин копања (врста реза)

Откопавање роторним багерима може се вршити вертикалним или хоризонталним резовима. С обзиром да је принцип копања исти и отпор на копање би требало би да буде исти. Међутим, нешто већи отпор се ипак јавља код хоризонталних резова што се може објаснити чињеницом да је услед смањења дејства силе гравитације, отпор трења на пуњење ведрица материјалом већи.

Утицај вибрација и динамичких удара

Испитивања обављена на ПК "Belhatow" у Пољској на багеру SRS 2000 показали су да је при откопавању угља долазило до великих вибрација и да се при томе угао резања мењао од 30 до 60° и изазивало промену силе резања и до 60%.

Утицај геотехничких карактеристика материјала на отпор копњу

Чврстоћа на притисак

Чврстоћа на притисак је једна од најбитнијих физичко-механичких карактеристика материјала која утиче на отпор копању. Зависности отпора на копање од чврстоће на притисак први је поставио Протођаконов, према чијим испитивањима је извршена и класификација стена. Протођаконов је одредио коефицијент чврстоће (f_c) на бази једнооксијалне чврстоће на притисак (σ_p):

$$f_c = \frac{\sigma_p}{10}$$

Бројна вредност коефицијента чврстоће представља десети део једнооксијалне чврстоће на притисак изражене у МПа. У табели 4 налазе се различити састави тла и стена према специфичном отпору чврстоћи на притисак по Протођаконов-у.

Табела 4 Састав тла и стена према специфичном отпору копања и чврстоћи на притисак по Протођаконов-у

Материјал	Назив стене	Степен чврстоће стена	Коефицијент чврстоће f_{ξ} МПа	$K_L=f_{PR}$ x 1000 kN/m
X	муљевито тло, растресити песак који садржи воду, расуто тло	муљевите стене меко стење	0,3	do 300
IX	смеђи угаљ са земљом	муљевите стене меко стење	0,5	do 500
VIII	матично тло, тресет, иловача, песак	земљане стене	0,6	do 600
VIIa	песковита иловача, прашина (мека тла), лес	меке стене	0,8	do 800
VII	иловача чврста, меки камени угаљ, чврсти смеђи угаљ, иловачасто тло	меке стене	1	do 1000
VIa	шљунковито тло, разбијени шкриљац, отврдла иловача	доста меке стене	1,5	do 1500
VI	меки шкриљац, веома меки кречњак, креда, фини песак, антрацит, цемент, шљунак и песак	доста меке стене	2	do 2000
V	чврсти иловачасти шкриљац, песак без чврстине и кречњака	средње чврсте стене	4	-
IV	нормални пешчар, гвоздена руда	доста чврсте стене	6	-
III	гранит, стене	чврсте стене	10	-
II	кварц, порфир, гранит	врло чврсте стене	15	-
I	густи жилави кварц, базалит	врло чврсте стене	20	-

Кохезија и угао унутрашњег трења

Са повећањем дубине ПК повећава се и отпор на резање. Код дубоких површинских откопа кохезија расте и то од $C = 0,01$ МПа непосредно испод површине до $C = 0,085$ МПа на дубини од 140m, а сходно томе и отпори на резање.

Утврђено је да најмањи отпор на резање имају материјали са великим углом унутрашњег трења и без кохезије, а највећи материјали са највећом кохезијом и углом унутрашњег трења. У табели 5 приказано је повећање кохезије са повећањем дубине површинског копа.

Табела 5 Повећање кохезије са повећањем дубине копа

Дубина копа, m	Кохезија, C МПа	Специфични отпор на копање, K_L N/cm	
		Просечни	Максимални
0-10	0,005-0,01	230	300
10-20	0,007-0,035	270	670
20-30	0,012-0,05	340	890
30-40	0,016-0,055	400	950
40-50	0,020-0,075	450	1250
50-60	0,030-0,07	600	1150
60-70	0,033-0,065	640	1100
70-80	0,036-0,07	690	1150
80-140	0,045-0,085	840	1400

4. Термографија – основни принципи примене дијагностичке методе

При анализи стања једног техничког система, неопходно је сагледати све факторе који могу имати негативан утицај на тај систем, превасходно узроке настајања топлотне енергије. Извор топлотне енергије може бити само техничког система (нпр. услед трења), али узрок њеног настајања често је и природа технолошког процеса.

Праћењем термичког стања једног техничког система може се одредити интензитет размене топлоте између загрејаног и хладног тела, као и евентуално одступање од величина која су дефинисане (прописане) правилима и упутствима за руковање и одржавање. Одступање од нормалне вредности температуре за дати технички систем (њене висине и расподеле), указује доста прецизно на стање техничког система. Понашање стања техничког система по питању емитовања топлоте (електричне, механичке), може бити озбиљан показатељ (са великом поузданошћу предвиђања) при дијагностиковању проблема.

Праћењем температуре једног техничког система могуће је:

- ❖ проценити његово термичко стање;
- ❖ благовремено проналажење његових неисправних делова; – спречавање тежих отказа у техничком систему;
- ❖ добијање низа важних података за статистичку анализу, анализу квалитета, трајност система, периодичност активности одржавања једног техничког система.

Такође, у индустрији, најчешће је температура један од приметних параметара који први указује на стање оперативних процеса и опреме, јер је топлотна енергија нуспроизвод при раду електричних уређаја, механичких система, или хемијских процеса. Праћењем температуре, могућа је и:

- ❖ мануелна контрола температуре или њен надзор (тј. благовремено откривање њене промене услед неисправног рада дела система);
- ❖ откривање промена у провођењу топлоте кроз систем или ван система, изазваним неисправним радом система или стварањем наслага у спроводним деловима;

За праћење термичког стања могу се применити како контактне тако и безконтактне методе, као и индикаторске методе.

Контактна метода – У овом случају мерни елемент је у непосредном контакту са средином чија се температура мери. Овом методом се врши праћење термичког стања система на основу кога се доноси оцена о његовом термонапонском стању. Мерењем температуре, поред оцене стања процеса, може се индиректно сагледати температурно стање система. У контактним методама у својству мерних уређаја користе се: контактни термометри, термопарови, термисторски термометри, електрично-отпорни термометри и мерни елементи који раде на принципу термичке експанзије.

Безконтактна метода заснована је на принципу мерења електромагнетне енергије зрачења инфрацрвеним детекторима (ИЦ детекторима). Овом методом се омогућава брзо утврђивање радне способности односно термичког стања целог система при периодичним контролама. У бесконтактним методама у својству ИЦ мерних уређаја користе се: пирометри, оптички пирометри и термовизијске камере (нарочито погодне јер дају слику температурног поља система).

Индикаторска метода – заснована на осетљивости појединог материјала на промену, односно пораст температуре. Овом методом се може само приближно установити постигнута максимална температура неке површине. То су поједине индикаторске боје, креде, папир, и куглице.

При загревању, термичко стање једног техничког система манифестује се и као термичко напрезање (термичке деформације) услед чега могу бити смањене дилатације између појединих делова тог система. При промени режима рада, услед промене интензитета и правца топлотног флукса који са радног медијума прелази на чврсте делове система може доћи до знатних термичких напрезања а промене су интензивније у масивним деловима као што су ротори, кућишта, итд. Дозвољено термичко стање обезбеђује се праћењем стања критичних делова и постављањем сигурносних уређаја, а критеријуми који дефинишу дозвољено термичко стање су погонски прописи за руковање системом.

У једном систему извор топлотне енергије може бити последица неког процеса (сагоревања горива у котлу, пара у турбини итд.), или сам систем (нпр. трење у лежајевима итд.). Познавањем извора топлоте и праћењем термичког стања, може се проценити количина топлоте која ће бити ослобођена у појединим деловима, и на основу тога извести закључак о мањењу механичких карактеристика поједних делова система, оштећењу површина за размену топлоте, запрљању површина за размену топлоте, оштећењу изолационих материјала, оштећењу лежајева и улежиштења, оштећењу електричних компонената и инсталација итд.

За утврђивање термичког стања једног техничког система, потребно је познавати механичке карактеристике материјала од којих су израђени делова система, које се дефинишу на основу границе истезања материјала, чврстоћи материјала, и отпорности на замарање при малом броју циклуса. Праћење термичког стања може се организовати као континуално праћење или периодично праћење техничког стања.

4.1. Инструменти за мерење температуре

Избор инструмента одговарајућег мерног инструмента одређује се на основу мерног места мерења температуре.

Контактни сензори обезбеђују локалну индикацију (термометри), или контролишу одређену функцију температуре (термостат). Услов при мерењу је остваривање доброг термичког контакта утиснућем у површину или урањањем у флуид.

Термоиндикатори су засновани или на топљењу материјала или на промени боје на одређеним температурама. Могу бити реверзибилни и ирреверзибилни, односно они који могу да врате првобитну боју када температура постане нижа од оне на којој реагује термоиндикатор или они који трајно губе боју када се премаши температура реаговања.

Термометарски пиштољи представљају ручне преносиве инструменте, за мерење површинске температуре статичког предмета или предмета у покрету, без додира. Може се употребити за топлотно скенирање површине односно утврђивање грејних тачака. Погодни су у контроли отказа струјних проводника, за контролу високих пећи и котлова, као и температуре флуида у цевима, за контролу електричних инсталација, мотора, трансформатора, за одржавање температуре грејних елемената, за читавање температуре метала са ниском тачком топљења.



Slika 25 Термометарски пиштољ

Функционисање оптичких пирометара се заснива на чињеници да свако тело на температури изнад апсолутне нуле зрачи енергију сразмерну температури која се може избором одговарајућег детектора прецизно измерити. Принцип рада оптичког пирометра заснова се на томе да се тоplotно зрачење невидљиво за људско око (на температурама изнад 50 °C) претвара у видљиве фреквенце. Најпре се врши контролисано загревање влакна. Затим се на основу упоређивања боје влакна и загрејаног тела или гаса, на месту где се врши мерење температуре, утврђује подударност истих боја и читава температура на инструменту.



Slika 26 Оптички пирометар

Радијациони пирометари имају оптички систем који енергију зрачења усмеравају на сензор, а видљиво зрачење на окулар, како би се тачно локализовало место мерења температуре. У зависности од температуре, на сензору се појачава излазна величина и доводи на инструмент, који је калибрисан за директно читавање температуре. Опсези мерења су од око 50 до 4000 °C.



Slika 27 Радијациони пирометар

4.2. Инфрацрвена термовизија

Као безконтактна температурна мерна метода, инфрацрвена термовизија омогућује откривање разноликих потенцијалних грешака и то без потребе прекида процеса производње и трошкова који су повезани тим прекидом.

Сви материјали на температури изнад 0 степени Келвина (-273°C), емитују електромагнетну енергију у инфрацрвеној области спектра. Енергија коју емитује загрејани мерени објекат претвара се у електрични сигнал и приказује на монитору камере у виду термограма који може бити у боји или црно-бели. Свакој боји, односно нијанси сивог, одговара одређена температура. У основни принципа рада термовизијске камере су закони зрачења црног тела.

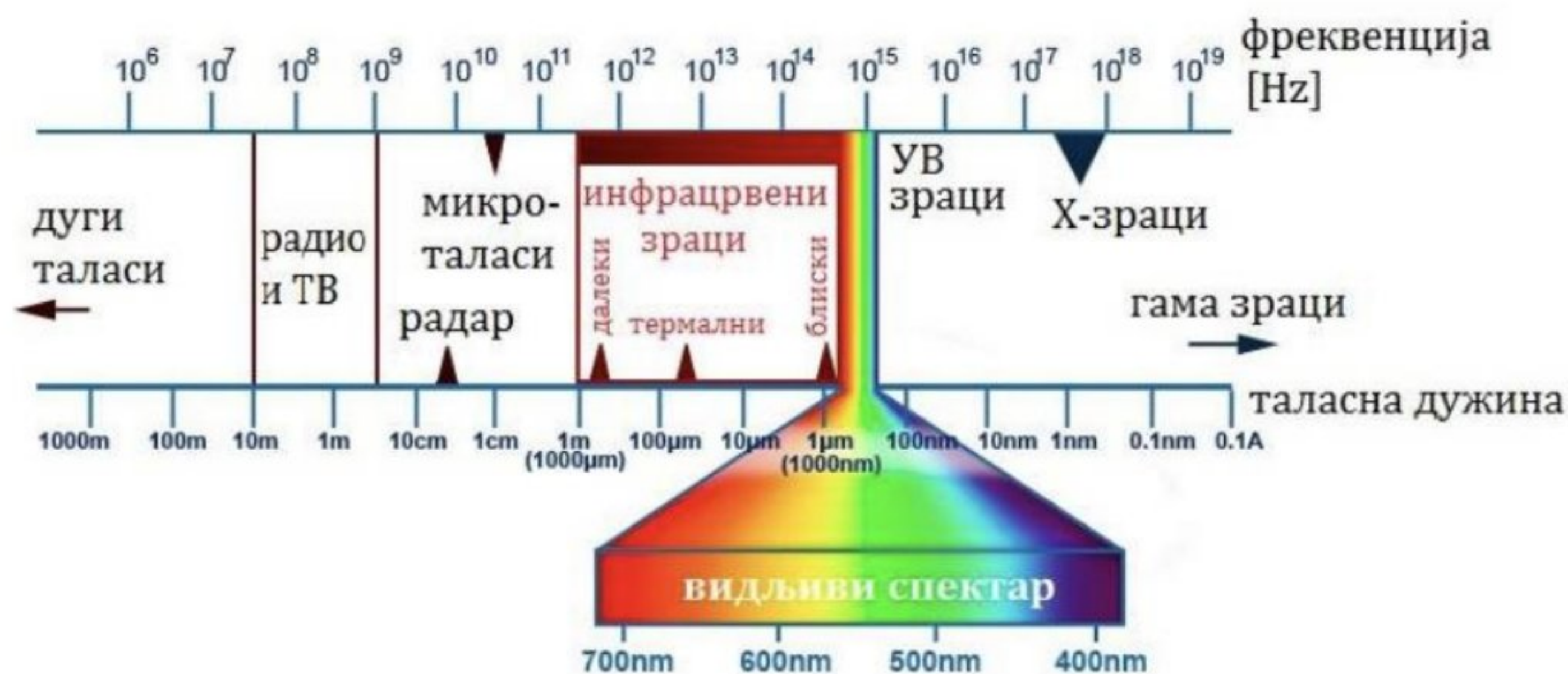


Slika 28 Термовизијска камера

Инфрацрвено (тоplotно) зрачење

Електромагнетски спектар подељен је на основу таласних дужина на неколико таласних подручја (спектралних опсега). Не постоји принципијална разлика између зрачења у различитим таласним подручјима, јер сви подлежу истим физичким законима. Дакле, једина разлика је у таласним дужинама (фреквенцијама). На слици 29 приказана је подела спектра ем. зрачења.

Видљива светлост (оптички спектар) представља само мали опсег електромагнетног спектра, док електромагнетно зрачење „невидљиво“ за људско око, покрива већину преосталог дела спектра. Термовизија (конверзија просторног ИЦ електромагнетног зрачења у ИЦ слику видљиву за људско око) првенствено је намењена за ноћна разматрања. ИЦ спектрални подручје дели се на краткоталасно и дуготаласно. У краткоталасном ИЦ спектралном подручју, доња граница је на око 500nm, тј. у подручју црвеног. У дуготаласном ИЦ спектрално подручје спаја се са микроталасним подручјем и обухвата и милиметарске таласе. Међутим, када су у питању ИЦ сензори (на основу подручју ИЦ спектра у којима су осетљиви), подела ИЦ по областима спектра је другачија. Инфрацрвено таласно подручје (невидљиво за голо људско око) је подељено на четири области: готово инфрацрвени опсег (0,75 до 3 микрометара); средњи инфрацрвени (3 до 6 микрометара); далеки инфрацрвени (6 до 15 микрометара); и крајњи инфрацрвени (15 до 1000 микрометара). Сви објекти чија је термодинамичка температура различита од апсолутне нуле (0 K), емитују енергију унутар управо наведених спектралних подручја.



Слика 29 Подела спектра електромагнетног зрачења по областима

Таласи свих таласних дужина (фреквенција) заједно чине електромагнетни спектар, простиру се брзином светлости $c \approx 300\,000\text{ km/s}$ и преносе електромагнетну енергију кроз простор. Разликују се међусобно само по таласној дужини (фреквенцији) што је у корелацији са количином енергије коју таласи преносе. Фотон је носилац електромагнетне интеракције. Енергија сваког појединачног фотона је сразмерна производу фреквенције и Планкове константе $E=hf$. Таласна дужина је једнака количнику брзине светлости и фреквенције ($\lambda=c/f$). Таласна дужина је растојање које талас пређе за време (период T) које је потребно електричном пољу да са максималне спадне на своју минималну вредност и врати се поново на максималну. На пример, таласна дужина гама зрака је приближно милион пута мање од таласне дужине видљиве светлости, па они преносе изузетно велику количину енергије. Радио таласи имају таласне дужине које су милијардама пута дуже него видљива светлост, па они преносе малу количину енергије. У табели 6 налазе се таласне дужине АЦТ.

Табела 6 Таласне дужине које одговарају зрачењу апсолутно црног тела (АЦТ) на појединим температурама

Спектрални опсег	Таласна дужина [cm]	Енергија [eV]	Термодинамичка температура АЦТ [K]
Радио таласи	> 10	< 10^{-5}	< 0.03
Микроталаси	10 - 0.01	10^{-5} - 0.01	0.03 – 30
Инфрацрвени	0.01 - 7×10^{-5}	0.01 – 2	30 – 4100
Видљиви	7×10^{-5} - 4×10^{-5}	2 – 3	4100 – 7300
Ултраљубичасти	4×10^{-5} - 10^{-7}	3 - 10^3	7300 - 3×10^6
Х-зраци	10^{-7} – 10^{-9}	10^3 - 10^5	3×10^6 - 3×10^8
Гама зраци	< 10^{-9}	> 10^5	> 3×10^8

Чест назив за ИЦ зрачење је и тоplotно зрачење јер већи део ИЦ спектра људско око не региструје али тоplotно зрачење осећа. У термовизији, када су термограми у нијансама сивог, најчешће се белом бојом показују топлији објекти, док се хладнији делови представљају црном. Ако су у питању термограми у боји, црвеном и жутом бојом се приказују елементи са повишеном температуром, а плаво – љубичастом нијансом хладнији елементи.

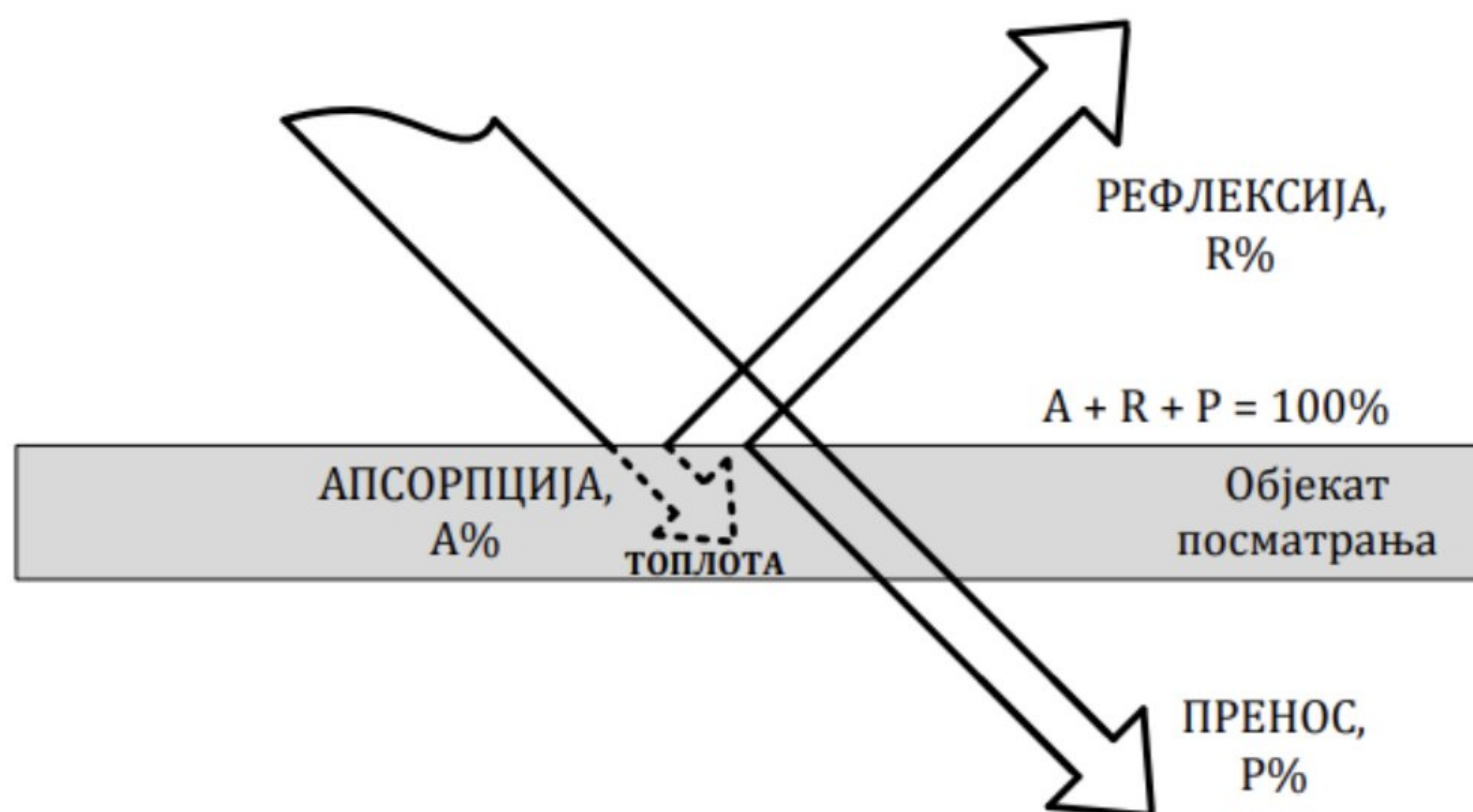
Са новим могућностима праћења, инфрацрвена термовизија је препозната као један од најважнијих, свестраних и ефикасних метода за

безконтактно мерење температуре површине загрејаних тела. Сви механички системи емитују топлотну енергију, која је предуслов за функционисање инфрацрвене термовизије. На основу температуре очитане са ИЦ слике (термограма) може се оценити тренутно оперативно стање тог система јер један од највећих проблема у механичким системима неадекватна, најчешће превисока температура за тај систем. Узрок претерано високих температура су најчешће трења и расхладни уређаји. Могу изазвати деградације система, материјалне губитак или блокаду рада система. Узроци превеликог трења су најчешће: хабање, несаосност, неподмазаност или претерано подмазивање, као и функционалне злоупотребе система.

Већина опреме је тако дизајнирана, а радни процеси подешени, тако да се количина топлоте која се емитује адекватна за нормални рад система. Термална идентификација рада система не значи да је лоциран проблем или узрок проблема. Наиме, оператер мора бити упознат са свим механичким компонентама система које се вреднују са аспекта емитовања топлоте. За један технички систем или његов део, постоји референтни термограм (такозвани термички „потпис”) који егзактно дефинише исправан рад. Одступање од нормалног стања (других термограма од референтног) може бити показатељ постојања аномалија у раду датог техничког система. Дакле, оператер најпре треба да сними, а касније да анализира снимљене термограме. Примена термовизије је корисна за лоцирање проблема (лоцирање дела простора или површине) на испитиваном узорку, али она не указује на узрок настанка прегревања. Жариште повећане температуре, која се јавило унутар система, не може се детектовати термовизијском камером. Термовизијска камера опажа емитовање топлоте само са површине тела (али оно што је важно, у том смислу и оне количине топлоте које је прошла кроз материјал кондукцијом или конвекцијом до површине). Друге дијагностичке методе као што су анализа вибрација, анализа уља, или ултразвук могу бити коришћене за утврђивање проблема (након лоцирања жаришта термографском методом).

Емисивност

Инфрацрвено зрачење је енергија која је последица кретањем атома и молекула на површини посматраног објекта чија је температура различита од апсолутне нуле. Емисивности је функција температуре материјала. Другим речима, виша температура, већи интензитет ИЦ енергије која се емитује. Поред емисије сопствене ИЦ енергије, материјал такође ИЦ енергију која на њега пада, делом апсорбује, делом рефлектује а у неким случајевима (ако је провидан - транспарентан) и пропушта. На слици 30 приказано је кретање ем. енергије.



Слика 30 Рефлексија, апсорпција и транспаренција електромагнетне енергије која пада на површину објекта

Ознаке А, R и P су коефицијенти који показују начин понашања (део) енергије након ударања у објекат. Ови коефицијенти су:

- ❖ А – коефицијент апсорпције
- ❖ R – коефицијент рефлексије
- ❖ P – коефицијент трансмисије

Њихов збир уствари представља укупну енергију која је пала на објекат посматрања, чија нормирана вредност износи 1 (или 100 %) по закону одржања енергије. Сваки од наведених коефицијената указује у којој мери материјал рефлектује, апсорбује, или ако је транспарентан – преноси енергију.

Практична мерења

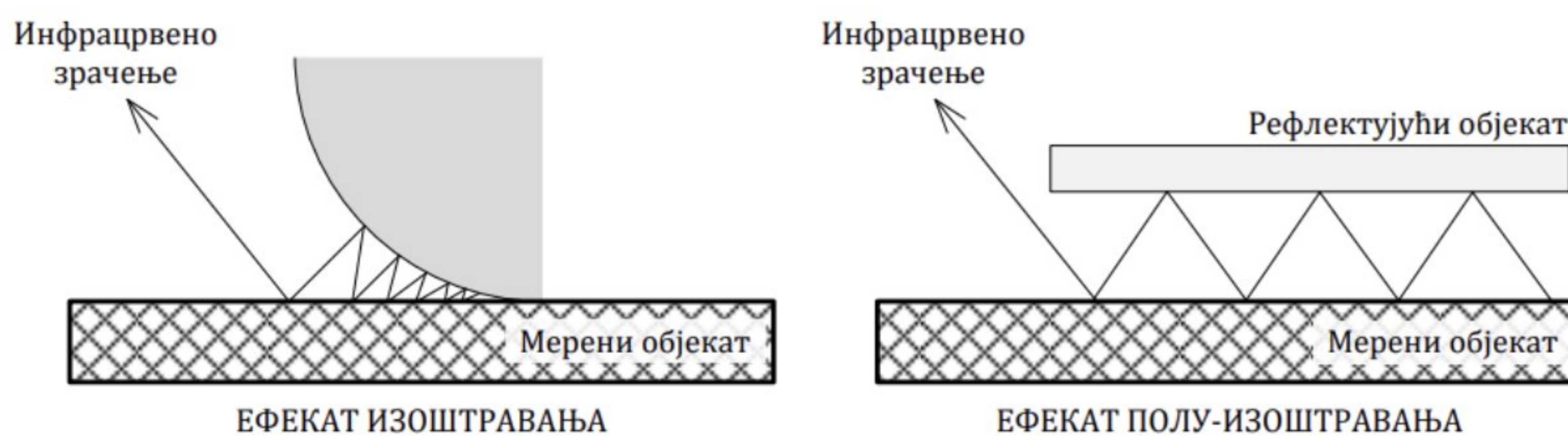
Ако се зна унапред степен емисивности објекта (тј. ако се он пре мерења процени термовизијском камером) може се одмах извршити мерење камером без корекције. Међутим, постоји велики број метода за исправљање емисивности у циљу што прецизнијег одређивања температуре. Те методе су:

- 1) Метод поређења или директно мерење емисивности која је приближна
 - ❖ стабилизovati температуру мереног објекта.
 - ❖ отворити веома мали отвор у објекту који термовизијска камера опажа тако да се задовоље услове апсолутног црног тела.
 - ❖ подесити дефинисану функцију емисивности термовизијске камере тако да температура црног дела и измерена површина буду исте. Добијена емисивност биће емисивност мерене површине.
 - ❖ након тога, када се мери исти тип објекта, нису потребна подешавања емисивности.

2) Метода директног мерења емисивности. Ако не може да се направи отвор као у поступку 1, онда се наноси црна боја велике емисивности и спроведу исте процедуре за одређивање емисивности. Пошто црна боја неће бити савршено црно тело, прво је потребно поставити емисивност црне боје, а затим спровести мерење температуре.

3) Индиректно мерење емисивности. Потребно је извршити мерење узорка који је сличан мереном објекту и довести га у стање да се загрева (коришћење неког грејача, на пример индукциони). Затим се мери објекат и узорак наизменично са термовизијском камером и када су идентичне измерене вредности, онда се мере температура узорка са контактним термометром. Подесити емисивност термовизијске камере на изазвану температуру узорка која одговара температури мереног објекта. Добијена емисивност испитиваног узорка је емисивност мереног објекта.

4) Мерење ефектом изоштравања. Овим поступком је мерење емисивности саме површине побољшано кроз употребу ефекта изоштравања или ефекта полу-изоштравања. При томе се мора водити рачуна о броју рефлексија и/или угла мерења. Мала промена у углу ће смањити квалитет емисивности. На слици 31 приказан је ефекат изоштравања.

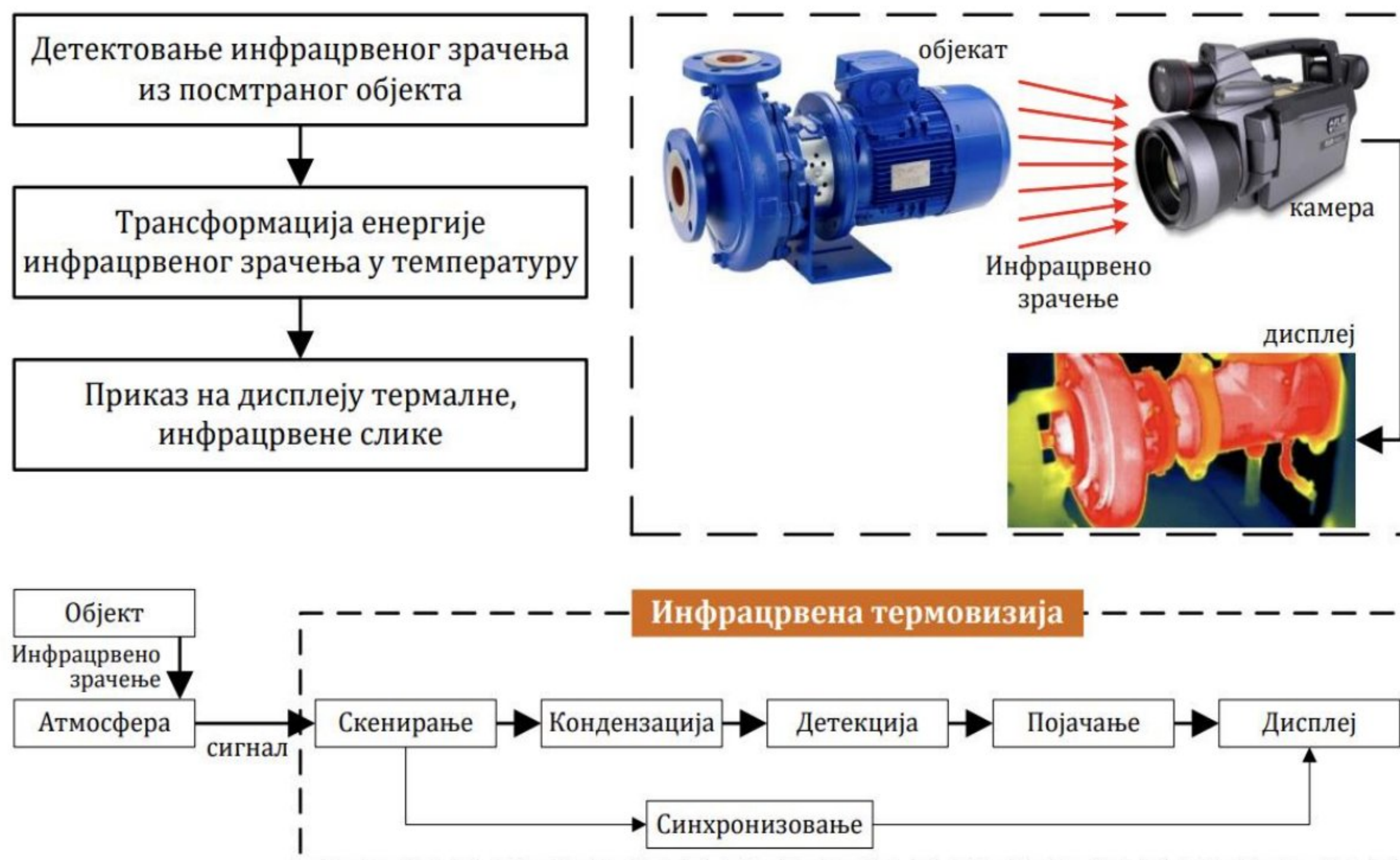


Слика 31 Принципијелни изглед ефекта изоштравања

Принцип рада термовизијске камере

Термовизијска (инфрацрвена, термална) камера је уређај који детектује топлотну енергију (електромагнетне таласе у ИЦ подручју), коју емитује загрејани објекат или тело и претвара је у електронски сигнал, чијом се обрадом формира термограм на монитору (ИЦ слика, термална слика, ИЦ фрејм). На основу њега, врши се читавање температуре објекта.

Камере су опремљене сложеном оптиком (системом сочива) чија је функција да усмере и фокусирају ИЦ зрачења ка низу ИЦ сензора. У зависности типа термовизијске камере, или болометар или огроман број сензора у низовима који чине матрицу, претварају ИЦ енергију зрачења у електричне сигнале, који затим дефинишу термограме. На слици 32 приказан је принцип рада термовизијске камере.



Slika 32 Принцип рада термовизијске камере

Примена термовизијске камере

Термовизија, чија је „првоначелна“ примена била безбедносна, тј. војна (лоцирање циљева - загрејаних објеката и живе силе ноћу или у отежаним условима видљивости) је данас изузетно широка (електрична инспекција зграда, постројења, објеката, рафинерија; инспекција губитака топлоте зграда, постројења, објеката, рафинерија; истраживање контаминације влаге у зградама; инспекција постојаности бетона; откривање цурења у зградама - кровови, постројењима, објекатима; инспекција генератора за производњу електричне енергије; детекција пропуштања паре и гасова у котловским постројењима електрана; електрична инспекција подстаница, трансформатора, кондензатора; дистрибуција електричне енергије у урбаном и руралном подручју; инспекције заштите животне околине, загађење вода, одлагање отпадних вода; мапирање пожара, инспекција пожарних путева; инспекција високонапонских антена; претраживање и спасавање; тајни ноћни надзори (безбедност), авиоиндустрија и авиосаобраћај, итд.

5. Студија случаја – резни елементи роторних багера РБ Колубара

5.1. Загревање и хлађење зуба роторног багера

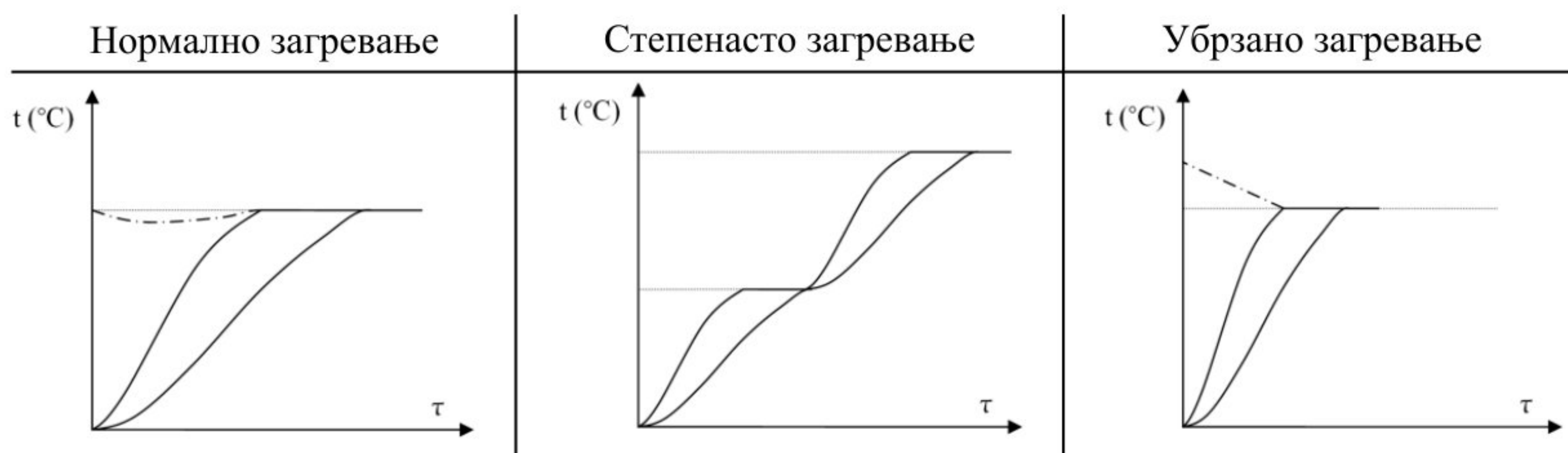
Изотерма је линија на дијаграму која представља тачке једнаке температуре. Изотерме се обично користе за илустрацију расподеле температуре у различитим сегментима материјала који се опажа, у одређено време. Оне помажу да се визуализује како температура варира.

У ширем контексту, изотерме се такође могу наћи у термодинамици, где представљају услове константне температуре у дијаграму притисак-запремина. У хемијском инжењерству, изотерме могу описати процесе адсорпције, показујући како количина адсорбоване супстанце варира са притиском на константној температури.

Кључне карактеристике изотерме укључују:

Облик: Облик изотерми може указивати на температурне градијенте, са блиско распоређеним линијама које указују на брзе промене температуре и широко размакнутим линијама које указују на уједначеније температуре.

У зависности од брзине загревања и способности материјала за провођење топлоте, температура на површини комада брже ће расти него у језгру. Ова температурна разлика доводи до неравномерног ширења површинског слоја и језгра комада услед чега настају унутрашњи напони који могу да деформишу зуб, а ако је њихова вредност већа од чврстоће материјала долази до пуцања зуба. Стога је потребно загревање вршити тако да се избегну велике температурне разлике. На слици 33 приказани су различити начини загревања.



Slika 33 Начини загревања

Нормално загревање – подразумева да се зуб загреје на жељену температуру, па се у тако загрејан хлади на температури сличној његовој. Овај поступак долази у обзир у случају ниских температура загревања, код материјала добре топлотне проводљивости.

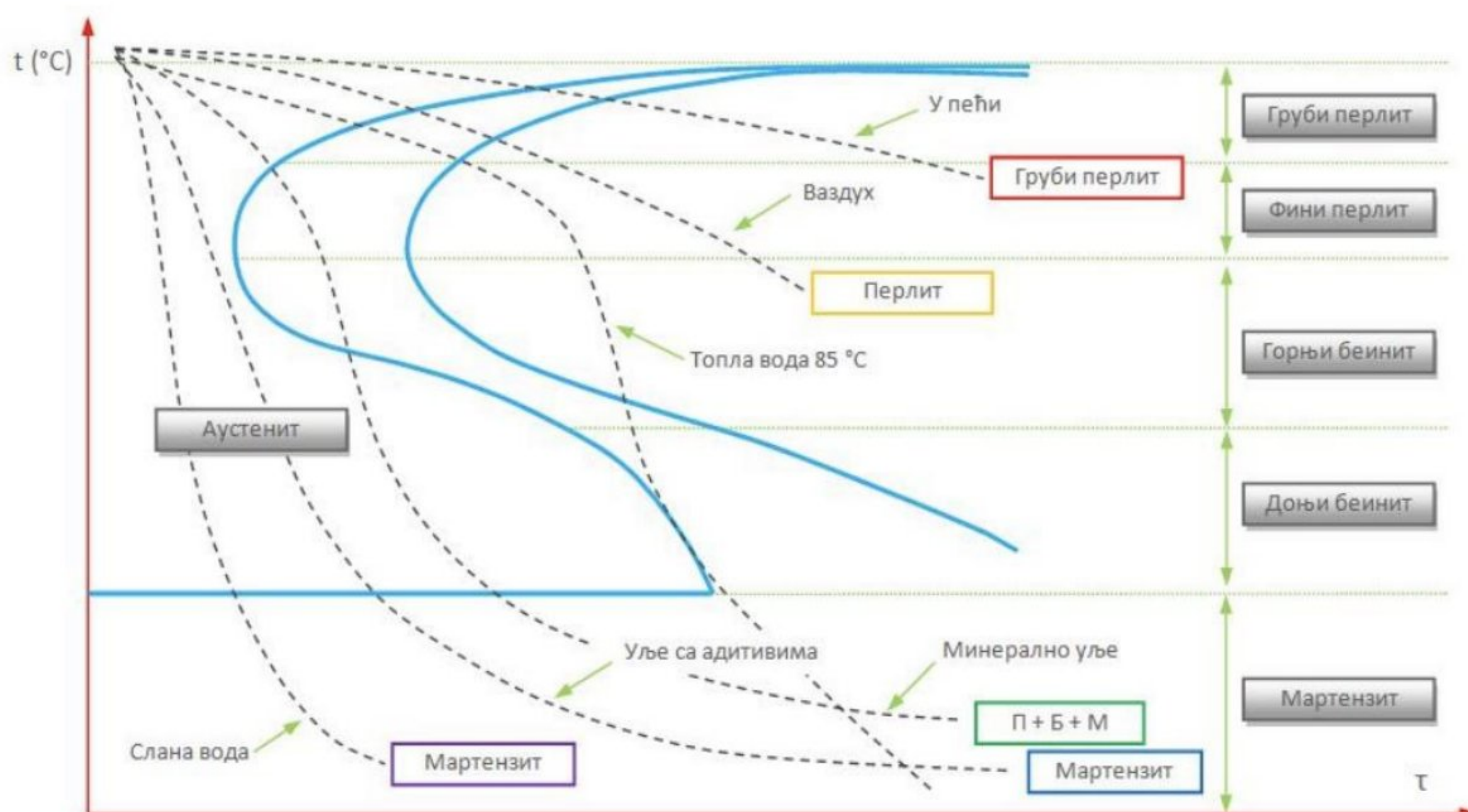
Степенасто загревање - Ако је радна температура висока, а топлотна проводљивост материјала мала и ако су комади постоји опасност да због великих температурних разлика настану велики унутрашњи напони. У том случају примењује се степенасто загревање, што је најчешћи случај у пракси.

Убрзано загревање – Нагло повећавање почетне температуре.

Као и загревање, хлађење је важна технолошка операција. Према брзини којом се оно врши разликују се:

- ❖ споро
- ❖ нормално
- ❖ брзо

Хлађење може да се одвија **континуално** од температуре зуба до температуре средства за хлађење или **изотермално** - подразумева брзо хлађење до одређене температуре, задржавање на тој температури и завршно хлађење до собне температуре. На слици 35 утицај начина хлађења на фазни састав угљеничног челика.



Slika 34 Утицај начина хлађења на фазни састав угљеничног челика

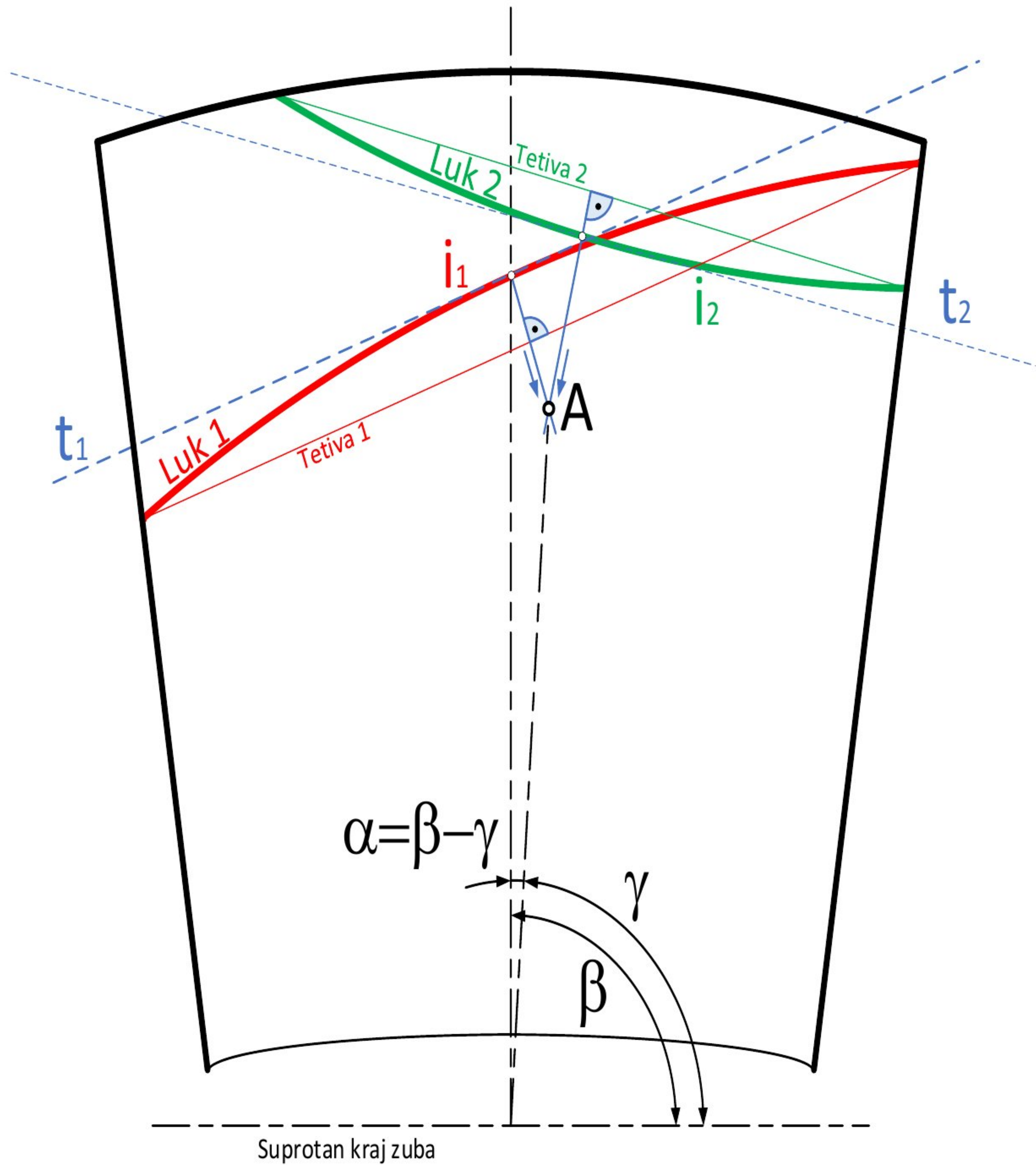
5.2. Термограми узведених мерења

Изотерма је линија на дијаграму која представља тачке једнаке температуре. Изотерме се обично користе за илустрацију расподеле.

Резни елементи на ведрицама роторног багера су у сталном контакту са масивом који се откопава. Њихова геометрија је тако конципирана да увек постоје мање или веће површине које се загревају приликом процеса резања. На оптималан утицај процеса рада имају геометријске величине као што су угао резања, угао клина, ширина зуба, леђна и чеона површина зуба, број зуба на ведрици али и позиција зуба на самој ведрици, односно положај цепа/ташне у коју улази зуб.

Оптимално постављен зуб на ведрици има утицај на квалитет процеса откопавања али и на потрошњу електричне енергије. При постављању зуба (цепова) користила се емпиријска метода „раширених прстију“, где су се зуби постављали на нож ведрице као када би прсте постављали преко исечене зарубљене купе.

Коришћењем феномена емисије топлоте, односно лоцирањем изотерми грејања (хлађења), може се одредити оптималан положај зуба на ведрици. На слици 35 дат је приказ одређивања потребног угла померања зуба на ведрици.



Slika 35 Начин одређивања потребног угла померања зуба на ведрици

Термална камера које се користила за мерење је FLIR i60. Њене основне карактеристике су дате у оквиру табеле 7.

Табела 7 Основне карактеристике термалне камере FLIR i60

- Слика високе резолуције: 32400 пиксела (180x180);
- Дигитална камера са видљивим светлом: 2,3 МР резолуција;
- Скалабилна слика у слици (термална преко дигиталне слике);
- Јарка LED светла (омогућава визуелизацију при слабом светлу);
- Широки температурни опсег: од -20 до $+350^{\circ}\text{C}$;
- Тачност: $\pm 2\%$ (поуздано мерење);
- Li-Ion пуњива батерија: траје преко 5 сати;
- Ласерски LocatIR™ показивач и ласерски маркер;
- Режим подручја приказује *min* и *max* температуру у оквиру области;
- Подешавање софтвера омогућава урачунавање губитка преноса кроз IR прозоре;
- Аутоматски маркер означава област која проналази најтоплију и најхладнију тачку;
- Бежична комуникација Bluetooth® предајник са METERLiNK™;
- Складишти преко 1000 радиометријских JPEG слика (меморија SD картице);
- Брзина кадрова: 9 Hz;
- Видно поље / минимална раздаљина фокуса $25^{\circ} \times 25^{\circ} / 3.9''$ (0.1m);
- Ручно фокусирање (минимална удаљеност фокуса 0,4m);
- Термичка осетљивост: $< 0.1^{\circ}\text{C}$ на 25°C ;
- Спектрални опсег од 7,5 до 13 μm ;
- Екран 3,5" LCD у боји.



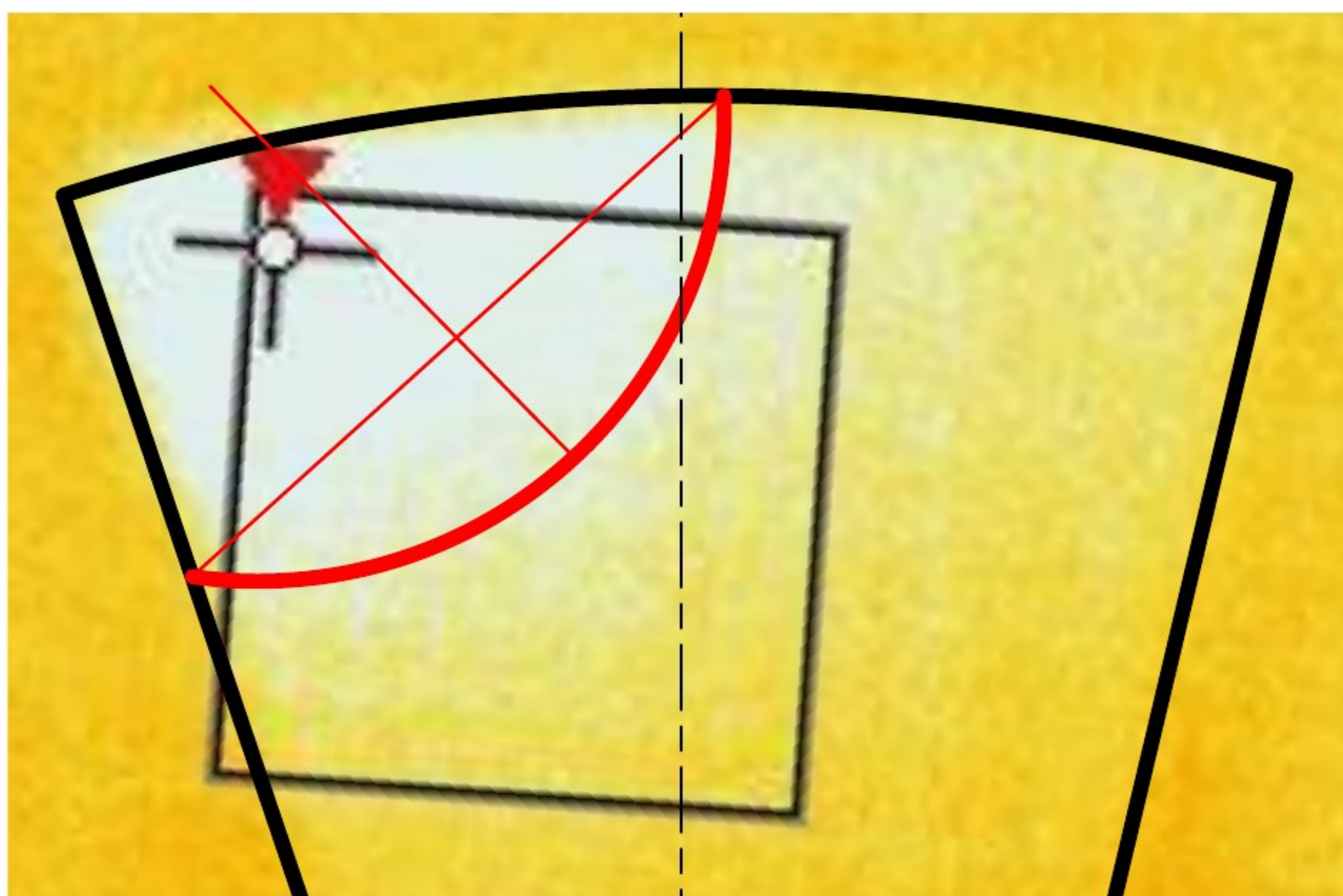
Основни циљ је да се установи локација изотерми при којима се зуб греје односно хлади при процесу резања, у зависности од механичких и термофизичких карактеристика резног елемента / зуба. Подршку дају добијени термограми преко инфрацрвеног програмског пакета QuickReport™ FLIR Reporter Ver. 8.5.

Дефинисање изотерми (као на слици 35) представља један дијагностички корак при оптималном одређивању позиције зуба на ведрици багера. На слици 36 дат је приказ термограма леђне површине зуба при процесу откопавања у десну страну. Амбијентална температура је износила 28°C , а коефицијент емисивности је подешен на камери за челични лив. На сваком термограму је приказана и максимална температура на зубу.



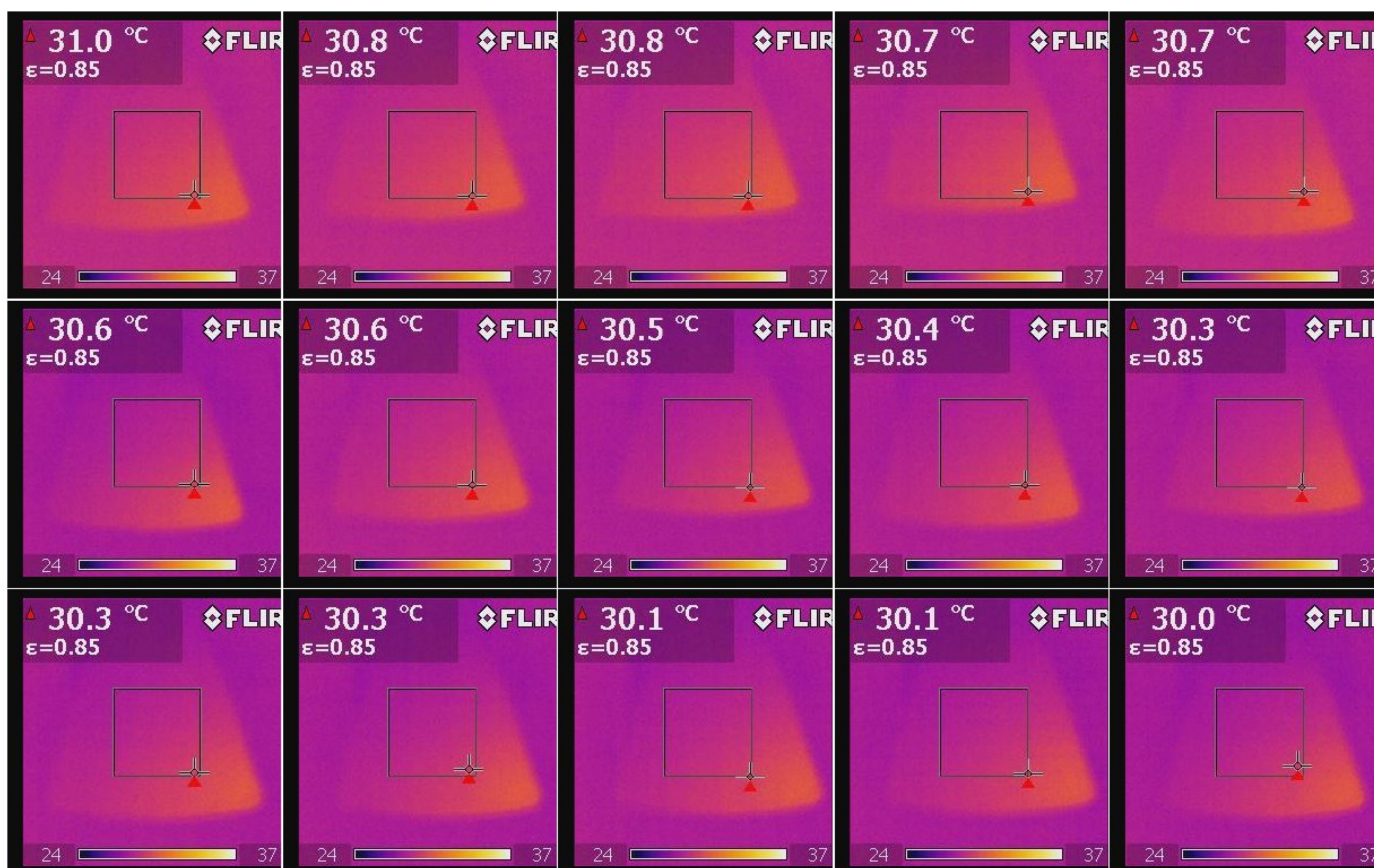
Slika 36 Добијени термограми емисије топлоте на зубу при копању у десну страну

На основу добијених термограма, издваја се термограм са најбољим контрастом и дефинише се изотерма (разлика у два боја; камера FLIR i60 поред својих карактеристика није довољно квалитетна за добијање јачег контраста; у овом раду се дефинише методологија за утврђивање оптималне позиције зуба на ведрици). На слици 37 је дата комбинација модела са слике 35 и термограма са слике 36. Дефинисана је изотерма.



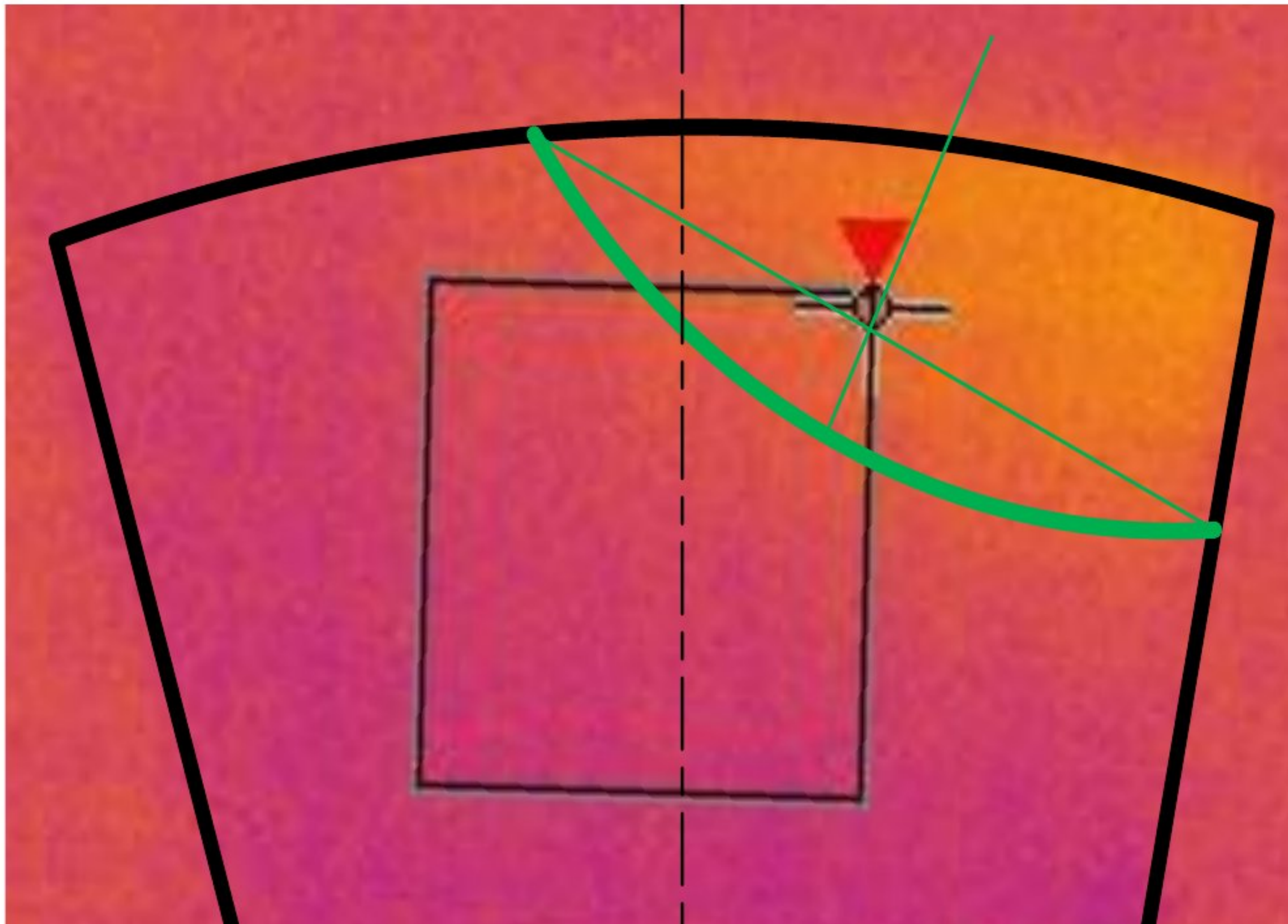
Slika 37 Дефинисање изотерме на термограму на зубу при копању у десну страну

На слици 38 дат је приказ термограма грудне површине зуба при процесу откопавања у леву страну. Амбијентална температура је изосила 28°C, а коефицијент емисивности је подешен на камери за челични лив. На сваком термограму је приказана и максимална температура на зубу.



Slika 38 Добијени термограми емисије топлоте на зубу при копању у леву страну

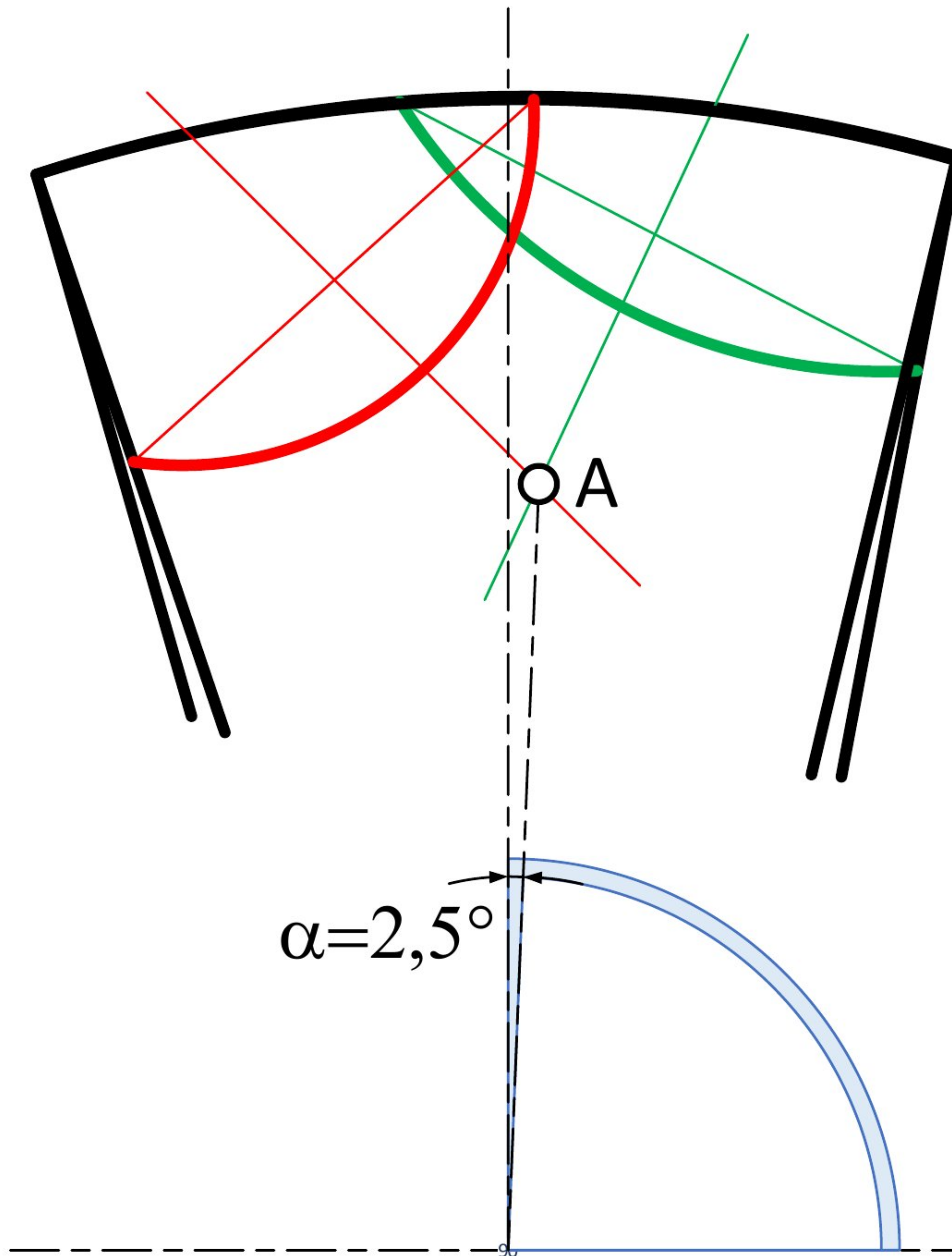
На основу добијених термограма, издваја се термограм са најбољим контрастом и дефинише се изотерма. На слици 40 је дата комбинација модела са слике 36 и термограма са слике 39. Дефинисана је изотерма.



Slika 39 Дефинисање изотерме на термограму на зубу при копању у леву страну

6.Предлог мера за оптимизацију положаја резних елемената

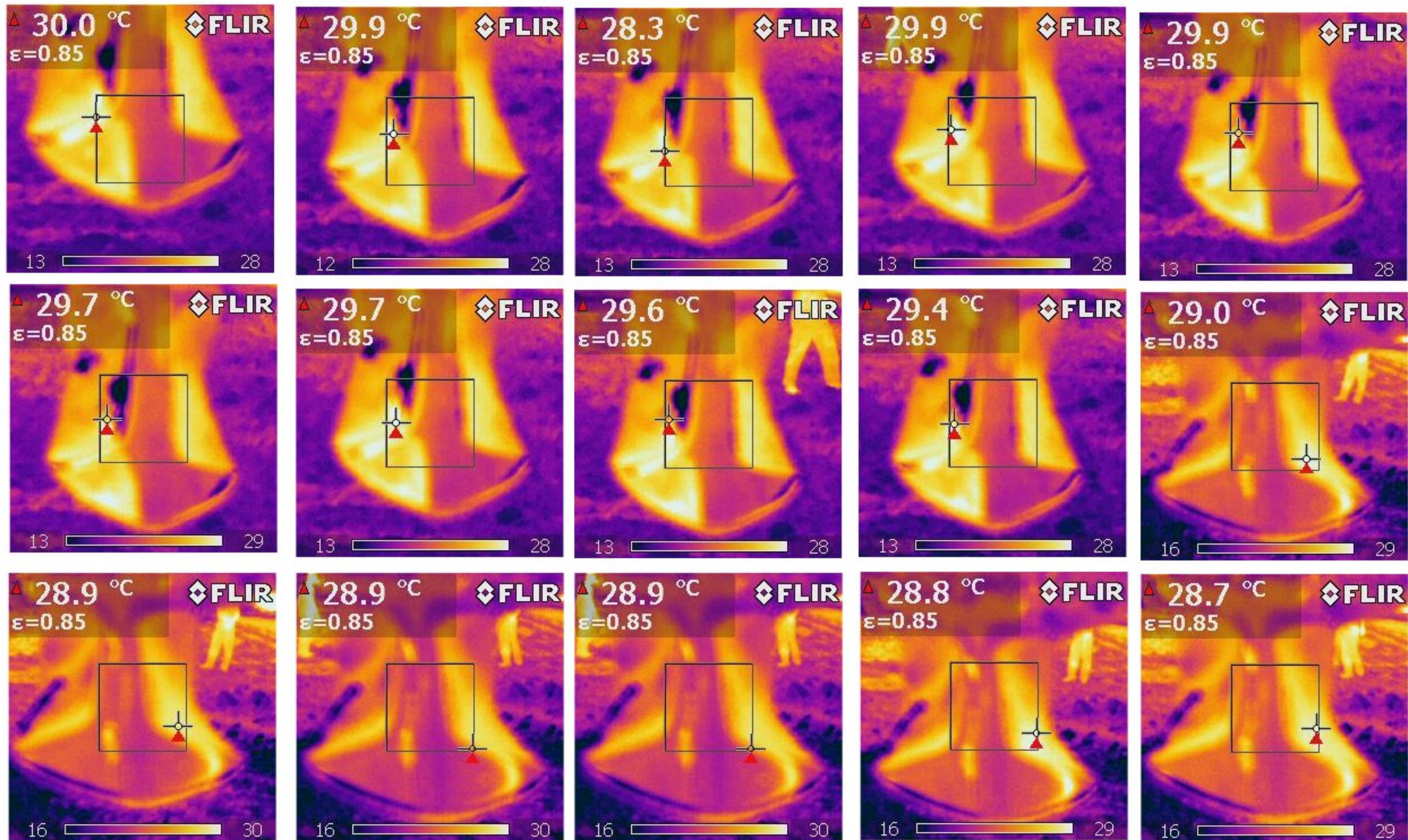
Преклапањем добијених изотерми са слика 37 и 39 добија се модел као са слике 35. За дати случај дефинисања изотерми, добијен је угао померања зуба по централној оси за око $2,5^\circ$. На слици 40 дат је модел дефинисања угла померања зуба на ведрици.



Slika 40 Дефинисање изотерме на термограму на зубу при копању у леву страну

Овакав приступ одређивања оптималне позиције зуба на ведрици се може спровести код свих зуба / резних елемената на ведрици без обзира на његову локацију на ведрици. Бенефити оваквог приступа су бољи процес резања материјала и пуњење ведрице материјалом и смањење потрошње електричне енергије.

На слици 41 дат је један негативан пример коришћења зуба на багеру SchRs900 на површинском копу "Поље Г" – РБ "Колубара". Са термограма се виде цепови акумулирања топлоте што утиче на слабији ископ материјала и повећану потрошњу електричне енергије.



Слика 41 Негативан пример коришћења зуба на багеру SchRs900

7. Закључак

Овај рад почевши од диспозиције елемената радног уређаја објашњава карактеристике свих појединачних делова роторног точка и улоге коју они врше.

На разумевање значајности самог рада велики утицај има схватање утицаја геолошке грађе и отпора на копање на зубе који се налазе на ведрицама, јер у зависности од њихове грађе и интензитета следује и ниво похабаности зуба а самим тим и степен његовог загревања и мање како енергетске тако и експлоатационе капацитивности.

Низ термограма јасно приказује кретање изотерме и самим тим хлађење резне површине зуба. Инфрацрвена термографија у овој студији случаја је показала да и при малим повећањима радне температуре од може дати јасне резултате уз помоћ којих се може одредити оптималан положај зуба у додиру са материјалом, што је у овом случају било његово померање у десно за $2,5^\circ$.

У овом раду је приказано како термографија заправо може имати веома велики утицај у многим, како рударској, тако и другим индустријама, тако да на разне начине може побољшати квалитет рада приликом експлоатације тако и самим тим ефикасност и одрживост одређених система над којим се врше испитивања.

8. Литература

Предраг Јованчић. *Техничка дијагностика*, Београд : Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, 2020.

Филип Милетић. *Утицај похабаности резних елемената роторног багера на ниво вибрација погона за копање*, Докторска дисертација, Београд: [Ф. Милетић], 2023.

Игњатовић Д., *Скрипта из предмета машине за површинску експлоатацију - II део*, Универзитет у Београду, Рударско – геолошки факултет, Универзитет у Београду, 2020.

Новаковић Д., *Оптимизација резних елемената роторног багера SchRs630*, Дипломски рад, Рударско-геолошки факултет у Београду, 2007.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ ЗАВРШНОГ РАДА

Име и презиме студента Предраг Радуловић

Број индекса Р551/23

Изјављујем

да је завршни рад под насловом

Оптимизација положаја резних елемената роторних багера помоћу мерења термалном
камером

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да завршни рад у целини ни у деловима није био предложен за стицање друге дипломе на студијским програмима Рударско-геолошког факултета или других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, 24.09.2024.

Потпис студента

ИЗЈАВА
О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ЗАВРШНОГ РАДА

Име (име родитеља) и презиме студента Предраг (Небојша) Радуловић

Број индекса P551/23

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада Оптимизација положаја резних елемената роторних багера помоћу мерења термалном камером

Ментор проф. др Предраг Јованчић

Изјављујем да је штампана верзија мог завршног рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради одлагања у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета.

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

Ови лични подаци могу се објавити у електронском каталогу и у публикацијама Рударско-геолошког факултета.

У Београду, 24.09.2024.

Потпис студента

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ ЗАВРШНОГ РАДА

Овлашћујем библиотеку Рударско-геолошког факултета да у Дигитални репозиторијум унесе мој завршни рад под насловом:

Оптимизација положаја резних елемената роторних багера помоћу мерења термалном камером

који је моје ауторско дело.

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

Мој завршни рад одложен у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета је (*заокружити једну од две опције*):

- I. редуковано доступан кроз наслов завршног рада и резиме рада са кључним речима;
- II. јавно доступан у отвореном приступу, тако да га могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се уз сагласност ментора одлучио/ла.
 1. Ауторство (CC BY)
 2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
 3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
 4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
 5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
 6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве.)

У Београду, 24.09.2024.

Потпис ментора

Потпис студента
