



**УНИВЕРЗИТЕТ „ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ“ - ШТИП
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ**

м-р Наим Остерглава дип. маш. инж.

**МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ НА СРЕДНА
ТЕМПЕРАТУРА ПРИ ОБРАБОТКА СО СТРУЖЕЊЕ НА
МЕТАЛИ СО ЗГОЛЕМЕНА ТВРДИНА**

- Докторска дисертација -

ШТИП, 2021 г.

Интерен ментор: **д-р Симеон Симеонов,**
редовен професор на Машинскиот факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип;

Екстерен ментор: **д-р Мите Томов,**
вонреден професор на Машинскиот факултет,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје;

ЧЛЕНОВИ НА КОМИСИЈАТА ЗА ОЦЕНА И ОДБРАНА

Претседател: **д-р Елениор Николов,**
редовен професор на Воената академија
„Генерал Михаило Апостолски“ – Скопје,
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип;

Член: **д-р Симеон Симеонов,**
редовен професор на Машинскиот факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип;

Член: **д-р Мите Томов,**
вонреден професор на Машинскиот факултет,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје;

Член: **д-р Невен Трајчевски,**
вонреден професор на Воената академија
„Генерал Михаило Апостолски“ – Скопје,
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип;

Член **проф. д-р Винета Сребренкоска,**
редовен професор на Технолошко-технички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип

Научно поле: 214 Машинство

Научна област: 21403 Производно машинство, технологии и системи
21404 Технологија на обработка на метали и алатни
машини

Датум на одбрана:
Датум на промоција:

БЛАГОДАРНОСТ

Би сакал да изразам благодарност кон менторот проф. Симеон Симеонов кој со корисни совети и сугестии во текот на работата на докторската дисертација придонесе да биде успешно завршен овој докторски труд.

Исто така сакам да упатам благодарност до проф. Миколај Кузиновски (in memoriam) за овозможените услови за реализација на експерименталните истражувања со користење на специјализирана опрема која што се наоѓа на Машинскиот факултет во Скопје.

Благодарност до останатите членови на комисијата: проф. Елениор Николов, проф. Мите Томов, проф. Невен Трајчевски и проф. Винета Сребренкоска за укажаните корисни совети при изработката и пишувањето на докторската дисертација.

Искрена благодарност на мојата фамилија.

Авторот

МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ НА СРЕДНА ТЕМПЕРАТУРА ПРИ ОБРАБОТКА СО СТРУЖЕЊЕ НА МЕТАЛИ СО ЗГОЛЕМЕНА ТВРДИНА

Краток извадок:

Стружењето на челици со зголемена тврдина е во почетна фаза на примена во многу случаи во производството. Во моментот, најважниот проблем се однесува на квалитетот на обработената површина. Еден од клучните фактори за квалитетот е температурата на контактната површина помеѓу обработуваното парче и алатката. Оваа докторска дисертација го истражува влијанието на параметрите на стружење (брзина на режење, помест, длабочина на режење, радиус на врвот на алатот), од материјал челик за подобрување С 55 (DIN) врз температурата на контактот помеѓу работното парче и алатот. Прстените се термички обработени на бараната тврдост 52 ± 2 HRC. Димензиите на прстените се $\Phi 102 \times \Phi 82 \times 20$ mm. Материјалот на резните плочки е од мешана керамика MC 2 ($Al_2O_3 + TiC$).

Клучни зборови: параметри на стружење, температура, челик со зголемена тврдина.

MATHEMATICAL MODELING OF THE AVERAGE TEMPERATURES DURING HARD TURNING

Abstract:

Turning of steels with increased hardness is in the initial stage of application in many cases in production. At the moment, the most important problem is the quality of the treated area. One of the key factors for quality is the temperature of the contact surface between the workpiece and the tool. This doctoral dissertation investigates the influence of turning parameters (cutting speed, displacement, cutting depth, tool neck radius). made of material improving steel C 55 (DIN), due to the contact temperature between the work piece and the tool. The rings are heat-treated to a hardness of 52 ± 2 HRC. The dimensions of the rings are $\Phi 102 \times \Phi 82 \times 20$ mm. The material of the cut tiles is made of mixed ceramics MC 2 ($Al_2O_3 + TiC$).

Key words: surface roughness, hard turning, cutting parameter.

М-р Наим Остерглава

**МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА РАПАВОСТ ПРИ
ОБРАБОТКА СО СТРУЖЕЊЕ НА МЕТАЛИ СО ЗГОЛЕМЕНА ТВРДИНА**

Универзитет „Гоце Делчев“ - Штип

СОДРЖИНА

| | |
|---|-----------|
| 1. ВОВЕД..... | 5 |
| 2. ПРЕГЛЕД НА ЛИТЕРАТУРАТА И ДОСТИГНУВАЊАТА ВО ОБЛАСТА НА ИСТРАЖУВАЊЕТО..... | 15 |
| 3. МЕТОДИ ЗА МЕРЕЊЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА ПРИ ОБРАБОТКА СО СТРУЖЕЊЕ..... | 28 |
| 4. НАУЧНОИСТРАЖУВАЧКИ ТЕЗИ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО..... | 44 |
| 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИСТРАЖУВАЊА (УСЛОВИ И РЕЗУЛТАТИ)..... | 47 |
| 5.1. ОБРАБОТУВАН МАТЕРИЈАЛ..... | 47 |
| 5.2. РЕЗАЧКИ АЛАТ (ДРЖАЧ И ПЛОЧКИ)..... | 50 |
| 5.3. МЕТАЛОРЕЗАЧКА МАШИНА..... | 51 |
| 5.4. УСЛОВИ НА ОБРАБОТКА СО СТРУЖЕЊЕ..... | 52 |
| 5.5. КОМПЈУТЕРИЗИРАНИ МЕРНИ СИСТЕМИ ЗА МЕРЕЊЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА..... | 53 |
| 5.6. РЕЗУЛТАТИ..... | 56 |
| 6. МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ НА СРЕДНАТА ТЕМПЕРАТУРА ВО ПРОЦЕСОТ НА РЕЖЕЊЕ ПРИ ОБРАБОТКА СО СТРУЖЕЊЕ..... | 60 |
| 6.1 ОБРАБОТКА НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОД ИЗВЕДЕНИТЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ МЕРЕЊА..... | 60 |
| 6.2 МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛИ..... | 73 |
| 6.3 ГРАФИЧКА ИНТЕРПРЕТАЦИЈА НА МАТЕМАТИЧКИТЕ МОДЕЛИ...74 | |
| 7. АНАЛИЗА НА РЕЗУЛТАТИТЕ..... | 76 |
| ЗАКЛУЧОК..... | 81 |
| ЛИТЕРАТУРА..... | 84 |
| ПРИЛОГ..... | 89 |

1. ВОВЕД

Дефинирање на основните поими при истражувањето

За да се реализира одреден вид на производството, производителите се соочени со многу предизвици, како квалитет и цена на производот, а ова е најголемиот предизвик за производителите. За да се биде конкурентен на пазарот, треба реална анализа на сите делови на производствената организација, како и пазарот, дали е можно планираното производство да се реализира. Потребно е да се направи производство кое ќе биде квалитетно и пазарот да го прими - економски конкурентно. Од горе кажаното, произлегуваат два правци што го одредуваат опстанувањето на производите на пазарот: стратегија на цени и стратегија на квалитет.

За реализацијата на добивање машински производи, еден од условите е технолошкиот процес на обработка (со режење или пластични деформации). Од процесите со режење е стружењето на полуфабрикатот за добивање парчиња од полупроизводи. Со стружење се симнува одреден материјал од почетното парче, симнувањето на материјал зависи и од тврдината на материјалот. Обработка на материјали со зголемена тврдина (тврдина поголема од 45 HRc), како што е челик, оваа обработка може да понуди предности во смисла: поголема стапка на симнување на материјал, пократко време на изработка и намалена цена на производство, во однос на брусењето. За ова треба да се најдат соодветни (оптимални) технолошки параметри, и сл.

Производството треба да исполни многу фактори, како и економскиот. Важни фактори при режење се: *влезни параметри* (обработуван материјал и неговите карактеристики), параметрите на стружење (брзина, помест и длабочина), параметрите од геометријата на алатката за стружење, односот алатка/машина, стегнување, работни парчиња, алати); *процес на истражување* (физичко-хемиски механизам за создавање и отстранување на струшка и физички ефекти) и *испитувани излезни големини* (технолошки ефекти - точност, квалитет на површината, издржливост на алатката за режење), итн.

Всушност, за време на моето истражување сретнав многу дела, кои од различни агли ги анализираат материјалите за режење и факторите кои го карактеризираат процесот. Заедничко на овие обврски е перфектност и интензивирање на постапката на обработка со режење.

Технологи

Технологијата е наука која ги проучува процесите и постапките за преработка на сировини во полупроизводи и готови делови. Таа може да се дефинира како научна, применета, техничка дисциплина, која ги проучува односот на средствата и методот на производство, согласно законите и економската оправданост.

Технологии кои се применуваат се:

- Технологии за добивање на материјали;
- Технологии за обработка;
- Технологии за термичка обработка;
- Технологии за површинска заштита;
- Монтажни технологии; и
- Технологии за модифицирање на површинскиот слој (цементација, нитрирање, превлаки, и сл.).

Технологијата за обработка се дели на:

- Отстранување на вишок на материјал со струшка (обработка со режење на материјалот - стругање, глодање, дупчење, брусене, и сл.);
- Без отстранување на вишок на материјал (без симнување на струшка, обработка со пластични деформации, обработка со спојување, закивање, заварување, и сл.);

Основните технолошки процеси за обработката со симнување на струшка се делат на две групи:

- Претходна груба обработка (обработка со режење на материјалот - стругање, глодање, дупчење, и сл.) и
- Завршна фина обработка (брусење, развртување, хоновање, полирање, провлекување, и сл.).

Процесот на режење

Овој процес настанува со продирање на режечкиот клин од алатот со одредена брзина во обработуваното парче. Со продирање на алатот во обработуваното парче со одредена сила настанува одвојување на дел од материјалот (струшка).

Основните параметри на процесот со режење можат да се поделат на две групи: геометриски (геометрија на ножот) и технолошки. Технолошки параметри се:

- V (m/min; 1/min) - брзина на режење;
- s (mm/min; mm/vrt) - помест (брзина на помошните движења); и
- δ (mm) дебелина на режење.

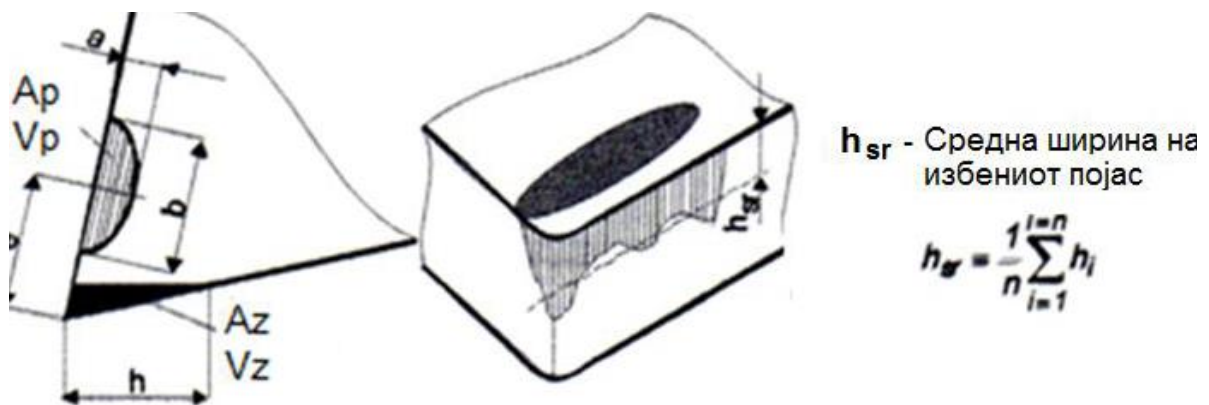
Со обработката на режење се обработуваат следните материјали: челици, сив лив, темперлив, пластика, и сл., со најразлични тврдини. Во голем број на истражувања во литературата, научни трудови, при обработката на челици со висока трврдина ($>45\text{HRc}$) се одвиваат во следните правци: примена на нови видови алатки за режење и нивна постојаност, анализа на резниот алат (геометрија, истрошување, негово влијание на процесот на режење).

Алати

Алатот треба да обезбеди тврдина и жилавост, односно отпорност на абеење (истрошување), ударно оптоварување и вибрации, во услови на висока температура. Температурата ја намалува цврстината на алатните материјали, отпорноста на абеење, и постојаноста на алатот. Температурата зависи од

отпорите на режење, односно од режимот на режење (брзина, помест, дабочина на режење).

Абењето на режечкиот алат доведува до губење на неговите режечки способности и влијае негативно на трајноста на алатот, квалитетот на обработената површина и нејзината димензионална точност, а со тоа и врз економичноста на процесот на режење. На Слика 1.1 е дадено каде се појавува истрошувањето на алатот.



Слика 1.1: Линиски, површински и волуменски параметри на затапување на режечкиот клин: a - длабочина, b - ширина, e - положба на кратерот, h - ширина на избениот појас [1]

Figure 1.1: Linear, surface and volume parameters of cutting the wedge: a - depth, b - width, e - position of the crater, h - width of the worn belt-zone [1], [2]

Тврдите метали претставуваат физичко-металургиска смеса со основа од тврди материјали од типот на карбидите: WC, TiC, TaC, NbC, и др. и жилави компоненти Co, Ni, Mo, Fe, Cu, и др., како сврзувачки материјал. Тие можат да бидат лемени или изменливи.

Резните плочки според бројот на рабови за сечење, се со една и повеќе рабови за режење.

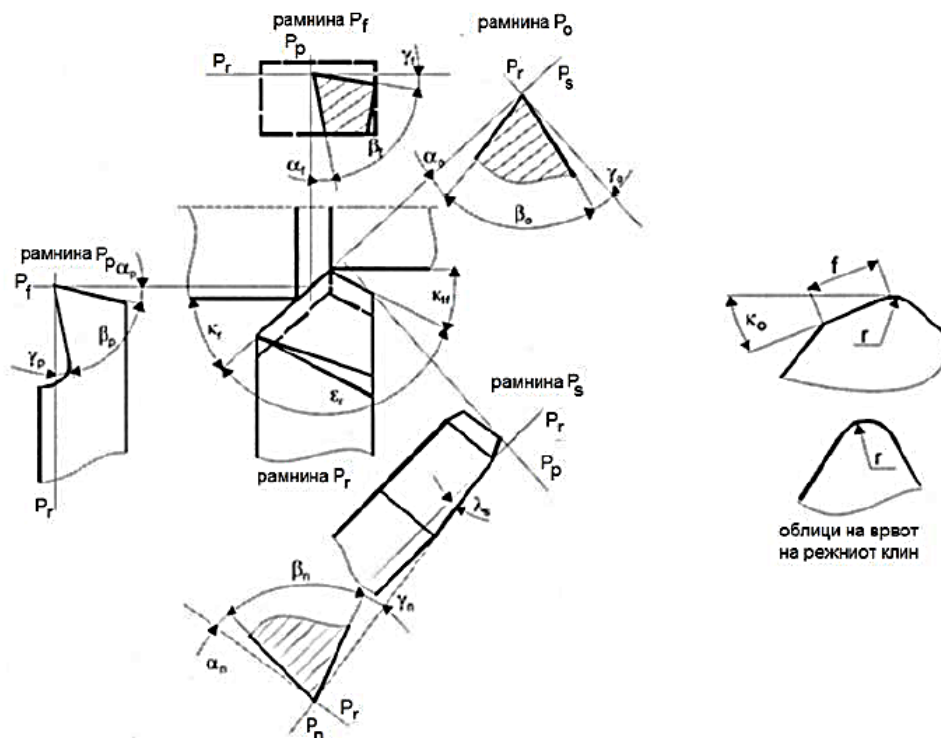
При обработката на тврди метали се користат изменливи плочки со материјал на база на керамика, но водејќи сметка и за нивната стабилност спрема јагленородот од челикот.

Како материјал се користат супер тврди материјали: кубик бор нитрит (CBN) и обложени карбиди, керамика, мешавина $Al_2O_3 + TiC$, и сл., како превлаки се користат на база на AlCrSiN, AlTiN и TiAlCrN.

На Слика 1.2 и Слика 1.3 се дадени основните елементи на алат за стругање и неговата геометрија [1], [2].



Слика 1.2: Основни елементи на стругарски нож [1], [2].
Figure 1.2: Basic elements of a cutting tool [1], [2].



Слика 1.3: Режечка геометрија на стругарска алатка [1]
Figure 1.3: Cutting geometry of a cutting tool [1]

Стружење на челик со зголемена тврдина

Стружење на челик со зголемена тврдина лесно се применува во различни индустрии, бидејќи материјалот е тврд, силата на режење, температурата и заостанатите напони, трошењето на алатот, квалитетот на површината, и сл., зависат и од режимот на стружење, материјалот на алатот, материјалот на обработуваното парче, и сл.

Направени се многу истражувања на конвенционални машини, при математичкото моделирање, но во литературата има малку информации. Тие се фокусирани на експериментални истражувања.

Производителите на машински компоненти и произведената стока се соочуваат со постојан предизвик да ги намалат трошоците, да го подобрат квалитетот и да го минимизираат времето на поставување со цел да останат конкурентни. Честопати, одговорот се наоѓа со нови технолошки решенија. Во последниве години, постои зголемен интерес за заменување на брусењето за обработка на тврди челици во автомобилската индустрија со тврдо стружење. На стружење на челик со зголемена тврдина влијаат многу фактори како: машинска алатка, геометрија и материјали на алатки за режење, параметри за режење и методи за ладење. Постојат некои проблеми во процесот, кои треба да се разберат и да се решат, како што се триење и производство на топлина во областа на режење, што може да влијае на траењето на алатот и на површината, за разлика од другите резултати за да се постигнат успешни перформанси. Истражувачите работат на неколку аспекти поврзани со тврдото стружење и дојдоа до свои препораки за надминување на овие проблеми. Техниките на стружење на челик со зголемена тврдина е во почеток на примена во индустријата и понатаму се дискутира за споредба на стружење на челик со зголемена тврдина и брусење во врска со одредени критериуми за проценка засновани врз економски процесни процеси.

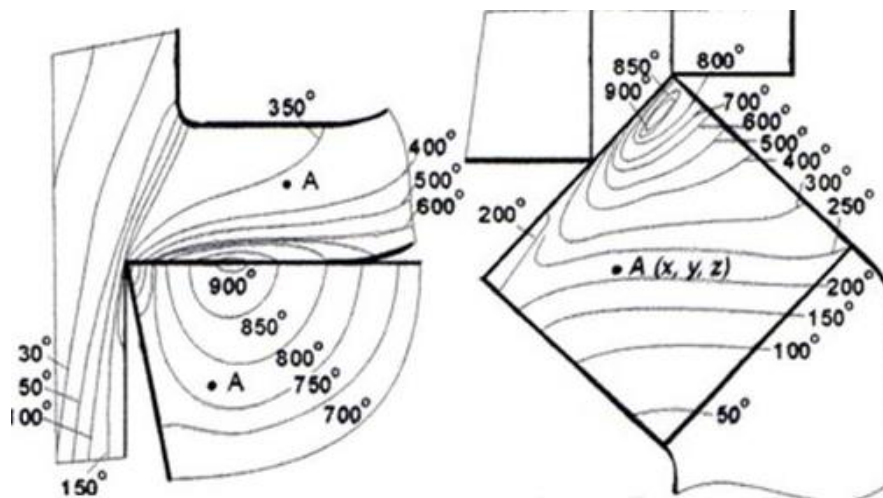
Процесот на обработка на стружење на челик со зголемена тврдина со современи алатни материјали е застапен во многу индустриски гранки (во нивните погони) во автомобилската, воената, авиоиндустријата, и сл.

Температура/топлина во процесот на режење

Во зоната на режење се појавува топлина, како последица од претворањето на механичката енергија во топлотна. Висината на температурата влијае на: процесот на деформација на металот (челикот), процесот на формирање на струшка, пластична деформација на струшката, појава на налеп, отпор на режење, истрошување (абење), јакост, крутост и трајност на режечкиот алат; квалитет, толеранции на обработуваното парче (Сл. 1.4).

Повеќе од 95 % од енергијата (механичката работа) се троши на деформирање на материјалот од обработуваното парче и совладување на силата на триење на допирната површина на резниот алат.

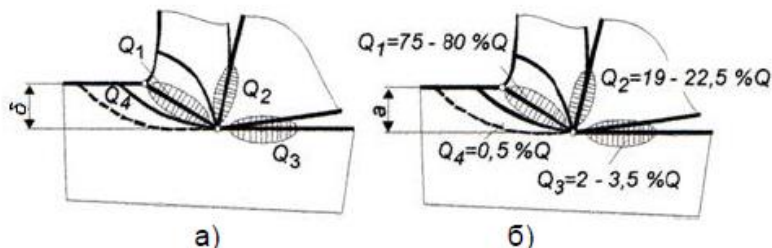
Создадената топлина во зоната на режење доведува до загревање на струшката, обработуваното парче и алатот. Температурата во различни точки се различни. На Слика 1.4 се прикажани експериментално одредени температурни полиња за задната и предната површина од режечкиот клин од алатот.



Слика 1.4: Температурни полиња на режечкиот клин при обработка на челик:
а) - задна површина, б) - предна површина [1], [2]

Figure 1.4: Temperature fields of the cutting wedge in steel processing:
а) - back surface, б) - front surface [1], [2]

Создадената топлина во процесот на режење Q е резултат на појавата на четири топлотни извори (Сл. 1.5).



Слика 1.5: Топлотни извори во процесите на режење: а) - извори и нивна локација,
б) - процентуални износи на изворите [1], [2]

Figure 1.5: Heat sources in the cutting processes: а) - sources and their location,
б) - percentage amounts of the sources [1], [2]

$Q_1 = (75\div 80) \% Q$ - топлина создадена од смолкнување во зоната во која се врши пластична деформација на материјалот од обработуваното парче и негова трансформација во струшка;

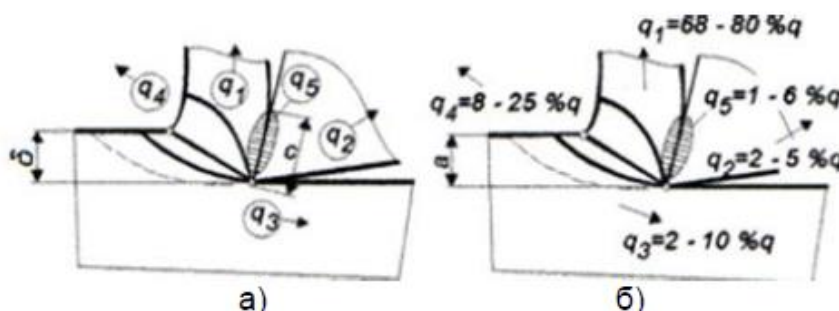
$Q_2 = (19\div 22,5) \% Q$ - топлина која се создава во зоната на контакт помеѓу струшката и режечкиот клин како резултат на триењето помеѓу предната површина на режечкиот клин од алатот и струшката, како и нејзината секундарна деформација;

$Q_3 = (2\div 3,5) \% Q$ - топлина која се создава поради триење на задната површина на режечкиот клин од алатот и обработената површина;

$Q_4 \approx 0,5 \% Q$ - топлина создадена во зоната на еластична деформација пред зоната на смолкнување [1].

Одводот на топлина преку топлотните одводи q е прикажан на (Сл.1.6).

Одведување на топлината во процесите на режење: а) - понори и нивна локација, б) - процентуални износи на понорите.



Сл. 1.6: Одведување на топлината во процесот на режење: а) понори и нивни локации, б) процентуален износ на понорите [1], [2]

Fig. 1.6: Heat conduction in the slicing process: a) sinkholes and their locations, б) percentage of sinkholes [1], [2]

$q_1 = (68\div 80) \% q$ - топлина која се одведува со струшката, и тоа поголем дел од топлината Q_1 и дел од топлината Q_2 ;

$q_2 = (2\div 5) \% q$ - топлина која се одведува преку режечкиот алат, и тоа дел од топлината Q_2 и дел од топлината Q_3 ;

$q_3 = (2\div 10) \% q$ - топлина која се одведува преку обработуваното парче, и тоа топлината Q_4 и делот од топлината Q_2 и Q_3 ;

$q_4 = (8\div 25) \% q$ - топлина која се одведува во околината преку средството за

ладење и подмачкување;

$q_5 = (1 \div 6) \%$ - топлина која се акумулира во режечкиот алат и предизвикува загревање на режечкиот алат.

Најголемиот дел од топлината се одведува со струшката. Кај мали режечки брзини количината на топлината која се одведува со струшката и обработуваното парче е приближно иста. Со зголемување на режечката брзина се намалува количината на топлина што се одведува со обработуваното парче и режечкиот алат. Кај современите постапки на обработка со високи режечки брзини струшката одведува и до 95 % од создадената топлина, така што режечките алати практично се ладни.

Познавањето на изворите на топлина и нејзиното одведување, води кон формирање на равенката на топлотниот биланс во процесот на режење:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 \dots \dots \dots (3.12)$$

Создадената топлина во зоната на режење може да предизвика структурни трансформации во површинскиот слој на режечкиот алат и обработената површина [1].

Од големината на температурата зависат механизмите на абење на режечките алати, механиката на одвојување на материјалот од обработуваното парче и формирањето на површинскиот слој на обработената површина. Како резултат на порастот на температурата, јакосните особини на режечкиот материјал се смалуваат, што води кон пластични деформации на режечкиот клин. Од резниот алат се бара повисока тврдина, жилавост, отпорност: на абење, ударни оптоварувања и вибрации.

За развојот на технологијата на обработката на метали со зголемена тврдина, треба да се анализира разликата на енергетскиот биланс во конвенционалниот и процесот на режење на метали со зголемена тврдина.

Методите за мерење на температурите при режење и можноста за нејзина технолошка и сензорна примена при дефинирање на механичките и термичките карактеристики на материјалите на алатот и работното парче: една од методите е развиената полуемпириска метода за предвидување на

издржливост, должина на контакт со струшките и температура. Овие параметри и емпириските односи се користат за пресметување на температурата на режење и животниот век на алатот.

Конечно, експерименталните резултати се споредуваат со резултатите добиени аналитички. Врз основа на калориметриските мерења, утврдено е дека убедливо најголемиот дел од развиената топлинска енергија се расфрла низ струшка, многу помал дел го презема работното парче, додека најмалку топлинската енергија генерирана при режењето се одведува преку алатот.

Истражувањата за промена на температурата на режење во зависност од тврдоста на работното парче и од материјалот на резната плочка (пример за два вида материјал на алатот, тврд метал P 10 и CBN, работно парче со тврдина од 50 HRC. Постојано зголемување на температурата на режење е добиено при обработка со алат TM P10 со зголемена тврдина на материјалот, додека при обработка со алатка CBN се добива максимална температура околу 600°C (таа е помала од температурата добиена со резен алат од тврд метал).

2. ПРЕГЛЕД НА ЛИТЕРАТУРАТА И ДОСТИГНУВАЊАТА ВО ОБЛАСТА НА ИСТРАЖУВАЊЕТО

За да се добијат повеќе информации од областа на обработка на материјали, зголемената тврдина и начинот на обработка, треба да се разгледаат сознанијата во литературата и објавените трудови во научни списанија.

Во својата широка дефиниција, обработката на челик со зголемена тврдина на материјали со зголемена тврдина е обработка на делови со цврстина над 45 HRC, иако најчесто процесот се однесува на тврдини од 58 до 68 HRC. Вклучените материјали за работното парче вклучуваат различни (материјали со зголемена тврдина) легирани челици, челици за алати, површински калени челици, суперлегури, нитрирани железа, хромирани челици и термички обработени металуршки делови во прав. Тоа главно е процес на завршна обработка или полузавршна обработка каде што треба да се постигне висока димензионална точност, точност на обликот.

Оваа обработка е воведена во средината на 80-тите години на минатиот век во форма на тврдо стружење, тврдото обработување значително се разви во различни машински операции. Со развој на соодветни крути машински алати, супер тврди материјали за алатката за режење и дизајни на специјални алатки на телото на резниот алат и комплетните подесувања, го направија металното режење на тврди делови лесно достапно за секоја фабрика за изработка на машински делови.

Следниве придобивки од тврдата обработка (добро опишани во многу извори на литература и материјали за промоција на компаниите) ги иницираа корисниците на процесот:

- лесен за прилагодување на контурите на сложените делови;
- брзи промени во видовите компоненти;
- неколку операции извршени во една поставеност;
- висока стапка на отстранување метал;
- можно е компјутерско нумеричко управување (CNC), како што се користи за меко стругање;
- мала инвестиција во машински алати;

- еколошки чисти метални струготини;
- елиминација на течноста за ладење во повеќето случаи, и
- мал инвентар на алати.

Ограничувањето и недостатоците на обработка на челици со зголемена тврдина вообичаено не се наведени во промотивните материјали и во истражувачките трудови, иако треба да бидат јасно разбрани од крајните корисници:

- Трошоците за обработка по единица се значително поголеми при обработка на челици со зголемена тврдина во споредба со брусењето;
- Во некои случаи, големината или геометријата на парчето едноставно не се препорачуваат на обработка на челици со зголемена тврдина. Делови што се најсоодветни за обработка на челици со зголемена тврдина имаат мал однос должина-дијаметар (L/D). Општо, односот L/D за неподдржани работни парчиња не треба да биде поголем од 4:1. И покрај поддршката од линета, коњче дел (од стругот) за долги, тенки делови, големите притисоци на режење веројатно ќе предизвикаат вибрации;
- Површинската обработка на обработените делови се влошува со истрошување на алатот, дури и во границите на дозволеният век на алатот;
- Таканаречената формација „бел слој“ при тврда обработка е невидлива со голо око, таа е многу тенка обвивка од материјал што е потврда од основниот материјал. Дебелината на белиот слој формиран при обработка на челици со зголемена тврдина се зголемува со абењето на алатот. Најчесто се формира на челици за лежишта, и е најпроблематичен за делови како траки - ленти за лежишта од кои се добиваат прстени за лежишта, кои примаат високи контактни напони;
- Во многу случаи, потребни се специјални крути машини за успешна обработка;

• Примената на разладно средство при стругање на челици со зголемена тврдина е дилема, дали да има или да нема разладување. При неконтинуирана обработка (запчаници, се јавуваат резови) да се применува без ладење, се појавуваат топлотни удари, бидејќи топлотниот удар се пренесува на алатот, веројатно ќе предизвика кршење. При континуирана обработка, високата температура што се јавува при сува обработка на алатот, ќе врши омекнување на делот кој се обработува, затоа е пожелно да има ладење [3].

При вршење на истражувањата на тврдото стружење се применуваат модели. Нивна задача е да се одреди квалитетот на обработката и економичноста. Се користат повеќе модели:

- Аналитички: овие се математички и се базирани на законите и принципите на математиката и физиката, со кои се опишува одреден процес;
- Емпириски: се користат за моделирање на сложени процеси и системи, користат податоци од експериментите;
- Механички: овие го олеснуваат правилниот избор на режим на обработка, параметрите на патеката на алатот, контролата и компензацијата на отклонување на алатката, поврзување на силите со силата, како и контролата на вибрациите. Механичките модели се обидуваат да ги поврзат силите на режење со геометријата на струшка со помош на константи добиени експериментално и тие најмногу се користат во пракса;
- Нумерички: овие се засновани на различни техники на моделирање како Конечни елементи (FEM), Метод на конечни разлики (FDM) и Метод на гранични елементи (BEM);
- Хибридни: овие модели се комбинација од аналитички, емпириски и метод на вештачка интелигенција;
- Вештачка интелигенција (неуронска мрежа, делови од неуронска мрежа, и сл.), и
- Користење на Факторскиот план на експериментот (моделирање со планови од повеќе фактори од втор ред) [22].

Истражувањато во овој труд е насочено кон мерење на просечната температура на алатката за режење. Процесот се изведува на машина за стружење конвенционална, материјалот е шипка со кружен пресек од челик EN 36. Мерењето се извршува со повеќе методи, една од нив која се користи за ова испитување за мерење на температурата е фокусирана на сензор за термопар на алатката за режење од типот **k**. Алатката за режење е обложена со карбид, Се мери температурата на режење врз различни параметри, како резачка брзина, помест и длабочина на режење. Дадени се резултатите од мерењето на температурата за брзина 450, 710, 1120 (vrt/min), длабочина на режење 0,4, 0,8, 1,2 (mm), помест 0,180, 0,255, 0,560 (mm/vrt). Измерената температура е 95-150 (°C) [4].

Истражувањето е насочено кон мерење на температурата, со нумерички, аналитички и експериментални техники. Извршени се неколку експериментални истражувања за да се предвидат и измерат температурите вклучени во текот на овој процес со употреба на нумерички, аналитички и експериментални техники. Предвидување и мерење на силите за обработка, абењето, температурата на алатот, преостанатите напони и многу други карактеристики беа извршени со значително внимание и беа пронајдени многу добри одговори помеѓу нумерички и аналитички решенија и експериментални податоци [5].

Температурата на режење е клучен фактор кој директно влијае на алатот за режење и абењето, површината на работните парчиња и прецизноста на обработката според релативното движење помеѓу алатот за режење и работните парчиња. Количината на генерирана топлина варира во зависност од видот на обработуваниот материјал и факторите на режење, особено брзината на режење [6].

Во овој трудот се користи 3-Д моделирање со конечни елементи. Факторите на режење, како што се брзината, длабочината на режење и

поместот, беа изучувани со користење на 3-Д температурно поле на алатот за време на машинската обработка и во споредба со експерименталната работа на работното парче од материјал С 45 со употреба на резна плочка (карбид) на алат за режење. Се посветува значително внимание за да се утврдат температурите на алатот. Експериментите беа спроведени за состојба на сува и ортогонална обработка. Тоа покажа дека зголемувањето на температурата на алатот зависи од длабочината на режење и особено од брзината на режење во висок опсег на услови на режење [7].

Некои истражувачи се концентрирале на оптимизирање на параметрите за режење користејќи два начина за изведба: температура на површината на работното парче и рапавост на површината. Добиени се оптимални параметри за режење за секој начин на изведба со употреба на техники Тагучи. Ортогоналната низа, односот сигнал на бучава и (ANOVA) се користени за проучување на карактеристиките на изведбата во процесот на стружење. Експерименталните резултати покажаа дека температурата на површината на работното парче може да се почувствува и ефикасно да се користи како индикатор за контрола на перформансите на режењето и го подобрува процесот на оптимизација за да се зголеми користењето на машината и да се намалат трошоците за производство во автоматизирана средина за производство [8].

Во овој труд се проучува ефектот на високата температура врз перформансите на режење, а исто така е испитан и квалитетот на крајниот производ. Експерименталната работа е направена со помош на термопар за мерење на температурата, а парчето е од мек челик, се испитува на конвенционална машина за стружење. Се користи плочка за режење со превлака (облога) за да се проучи влијанието на облогата врз перформансите на алатката за режење и се споредува со плочка без превлака. Откриено е дека превлаката на алатот го зголемува животниот век на алатот во споредба со плочката без превлаката за иста брзина на режење или за ист век на траење на алатот [9].

Ова истражување е насочено кон описот на термодинамичките процедури и Методот на калибрација за одредување на температурните вредности на точката на режење. Во експерименталната работа, термопарот е искористен за мерење на температурата, затоа што е лесен за инсталирање, употреба, евтин и се користи резен алат од карбид обложен со волфрам. Резултатите покажаа сеопфатен опис на развојот на температурата во пресечната точка и методот на калибрација.

Презентиран и оптимизиран е развој на нови модели за математичка обработка на параметри за да се минимизира температурата на алатката за режење на крајот од процесот на брусење со интегрирање на генетскиот алгоритам (GA) со статистички пристап. Развиени се математичките модели за параметрите на температурата на алатот и параметрите на рапавоста на површината, во смисла на брзина на режење, поместот и аксијалната длабочина на режење со употреба на Методот на методологија на одговор (одзив) (RSM). Разгледани се две цели: минимална температура на режење и минимална аритметичка просечна рапавост (R_a). Поради комплексноста на овој проблем за оптимизација на машинска обработка, применет е повеќе објективен генетски алгоритам (MOGA) за решавање на проблемот и резултатите се анализирани. Овде фокусирањето е извршено на споредување на стружењето со ладење и без ладење. При ладењето има намалување на температурата на режење, како и влијанието на рапавоста за челик C 45 [11].

Истражувањата во овој труд се во правец на мерењето на температурата при стружење на челик со зголемена тврдина на ефектите на параметрите за режење врз рапавоста на површината (R_a , μm), температурата на режење (T , $^{\circ}\text{C}$) на интерфејсот на струшката-алатката и стапката на отстранување на материјалот при обработка на челик AISI 1015 (43 ± 1 HRC) со употреба на резна плочка од карбид под суво и ладење со спреј. Користена е комбинирана техника со употреба на ортогонална низа и анализа на промената

(остапување) за да се испита придонесот на брзината на вретеното, поместот, длабочината на режењето и притисокот на воздухот врз бараните одговори. Забележано е дека со ладењето со спрејот, перформансите на режењето се подобруваат во споредба со сувото режење. Предвидената поставка за оптимизација со повеќе одговори, обезбедува минимизирање на рапавоста на површината, температурата на режење и максимизирање на стапката на отстранување на материјалот [12].

Се прават обиди да се испита ефектот на параметрите на режење (брзина на режење, поместот и длабочината на режење) на температурата на режење при стружење на легиран челик AISI 52100 со употреба на повеќеслоен обложен карбид (TiN/TiCN/Al₂O₃/TiN) за резната плочка. Централен композитен дизајн (CCD) беше искористен за извршување на експерименти со машинска обработка за собирање податоци.

Извршени се неколку дијагностички тестови за да се провери валидноста на претпоставките. Значењето на параметрите за режење беше утврдено со употреба на статистичка анализа на промената (ANOVA). Предложена е равенката на моделот за предвидување на температурата на режење. Применета е Методологија на површинска реакција (PCM) за да се утврдат оптималните вредности на параметрите за режење. АНОВА резултатите покажаа дека сите три параметри на режењето имаат значително влијание врз температурата на режењето. Резултатите, исто така, го открија тоа во рамките на истражениот опсег, температурата на режење е многу чувствителна на брзината на режење и поместот. Оптимизиран модел покажува 100 % ниво на пожелноста за економијата во конвенционалниот процес на стружење. Понатаму, од предвидените вредности на режењето се покажа дека температурата добиена од регресивната равенка е во тесна согласност со оние со експериментални вредности [13].

Во процесот на стружење на челик со зголемена тврдина се применува модел за механика и термичка анализа. Предвидените сили за режење се споредуваат со експерименталните мерења за целите на валидацијата на

моделот. Во споредба со експерименталните мерења, се забележува дека моделот предвидува дека компонентите на тангенцијалната и радијалната сила се помалку од 12 % грешка. Компонентата за поместот - аксијална сила е околу 11 % од добиената сила, се бараат дополнителни подобрувања. Температурните полиња на струшката и алатката се предвидуваат врз основа на моделот на температура со конечна разлика. Симулираните просечни вредности на температурата со експерименталните мерења со пирометар (кварц со оптички влакна). Во термичките тестови се гледа дека просечната температура на наклонот на предната страна резниот алат се предвидува во рамките на околу 10 % грешка [14].

При обработката на вискохромиран материјал со зголемена тврдина со нова примена во полето на PCBN алатите. Во истражување на температурата на режење од суштинско значење за обработка на материјалите, со што се подобруваат ефикасноста на процесите. Температурата на режење од две типични обработки: еден мешан експеримент и нумерички пристап - беа изучувани, техниката на далечински тремопар и симулацијата на конечни елемент. Ефектите од микроструктурата и машинските параметри на температурата на режење се компаративно истражени користејќи титаниумови легури, како референтен материјал. Просечната температура на режење на материјал со зголемена тврдина се најдени во опсег 600-700°C и зголемени со повисока резна брзина и помест. Обработката со поголеми карбидни зрна покажува помала температура на режење (околу 600°C) и помала стапка на зголемување на брзината на режење и поместот [15].

Обработка и подобрување на обработливоста на челици со зголемена тврдина, што се користи успешно во автомобилската индустрија и индустријата за калапи е колективно дело. Внимателно е испитана поврзаноста со стружење на материјали со зголемена тврдина во споредба со брусење врз основа на различни алатни машини, геометрија и материјал на алатот, параметри на режење и методи на ладење. Во споредба со брусењето, стружењето е поекономично [16].

Во овој труд се истражува стружење на материјали со зголемена тврдина во автомобилската индустрија, обично има голем број потенцијални придобивки во однос на брусењето како традиционална форма на обработка, вклучително и пониски трошоци за опрема, пократко време на поставување и помалку чекори на процесот, што пак, обезбедува висока флексибилност и способност. Поради многу висока температура поради прекумерно генерирање на топлина, алатите за режење се изработени од супер тврди материјали, како што се обложен цементиран карбид, керамика, PCD, CBN, итн. Тие мора да се користат бидејќи работат добро во тешки услови на обработка.

Геометријата на алатот за режење, тврдоста на работното парче и параметрите за режење значително влијаат на силите на режење, остатокот на површинскиот напон, рапавоста на површината, интегритетот на површината, абењето на алатот и животниот век на алатот.

Сложените феномени вклучени во тврдото стружење може да се изучуваат преку симулација и моделирање користејќи техники како што се FEM, ANN, итн. и резултатите од моделите може да се потврдат со експериментални резултати.

Обработката на стружење се користи во индустријата за топчести лежишта, автомобилската индустрија, опрема и индустрии за изработка на алати за калапи.

Информациите добиени преку проучување и предвидување на абењето на алатот за време на обработката може да се користат како основа за ефективен дизајн на алатките за режење и утврдување на условите за режење, што ќе доведат до формулирање на стратегиите за промена на алатката [17].

Важноста на температурата достигната помеѓу алатот и материјалот за работното парче за време на обработката, и во континуирани и во прекинати процеси, е широко признаена од истражувачите за нивните карактеристики.

Влијанието на температурата на абењето на алатот е дадено со равенка. Во дисконтинуирано режење, температурата циклично се зголемува за време на работните операции и се намалува за времето на периоди што не се реже. Разликите на температурите се идентификуваат со континуирано

режење и температурата на режење измерена за дисконтинуирано режење. Постојаното тропање помеѓу алатката и работното парче и термичките циклуси се карактеристики на дисконтинуирани процеси на режење. Овие карактеристики треба да се анализираат конкретно во овие процеси на обработка:

- Механизмите за откажување на алатката се едни од главните точки изучувани во литературата. На овој начин, се истакнуваат следните неуспешни механизми: термички пукнатини, механички влијанија, атхезија механизми, негативен агол на смолкнување, почетен струшка на деформација или комбинација на различни механизми;
- Поради тешките услови на дисконтинуирано режење, изборот на материјалот е клучно прашање со кое треба да се справи. Во сегашното истражување разгледани се неколку дела со анализа на употреба на различни видови алатки. Особено се прегледани карбиди, CBN, керамика и PCD алатки; и
- Термичките ефекти се исто така една од точките што привлекуваат интерес на истражувачите. На овој начин се истакнуваат различни стратегии за проучување на температурата. На пример, директно мерење на температурата и аналитички и нумерички методи за предвидување на температурата. Друга стратегија за намалување на ефектите на температурата е употреба на различни системи за ладење подмачкување [19].

Во овој труд се истражува експерименталната обработка на материјалот Ti6Al4V при обработка на стружење на челици со зголемена тврдина конвенционално со резни плочки од поликристален дијамант (PCD).

Дизајнот за експерименталната постапка е да се испита ефектот на параметрите на променливиот процес (брзина на режење, помест, длабочина на режење и нивното влијание на рапавоста и температурата на режење). Резултатите откриваат дека температурата на режење се зголемува со зголемување на брзината на режење и намалување на поместот во конвенционалната и брза обработка. Откриено е дека брзата обработка покажа просечно зголемување на температурата на режење од 65 % во споредба со конвенционална обработка. Брзата обработка покажа подобри

перформанси во смисла со помала рапавост на површината, и покрај тоа што се користат повисоки помести во споредба со конвенционалната обработка. Брзата обработка на Ti6Al4V покажа подобрување на рапавоста на површината од 11 % во споредба со конвенционална обработка, со 207 % зголемување на стапката на отстранување метал (MRR), со што се појави можност за зголемување на продуктивноста. Конечно, беше потврдена инверзна врска помеѓу генерираната температура на режење и рапавоста на површината. Ова се припишуваше главно на високото режење кое создава температура, која го омекнува и ја намалува јачината на материјалот во близина на зоната на режењето, што пак овозможи полесна обработка и намалена рапавост на површината [20].

Во оваа студија истражувањето е во правец на одредување на термичко оштетување, кое е ограничување на процесот при завршно стружење на челици со зголемена тврдина и разбирање на ефектите на параметрите на процесот, особено: абеењето на алатот, намалување на температурите, што е основно за моделирање и оптимизација на процесите. Оваа студија развива аналитички модел за предвидувања на температурата за режење, особено на машински изработените површини, при завршно стружење на метали со зголемена тврдина, или со нова или со истрошена алатка.

Се користи механистички модел за проценка на силите на формирање струшки. Силите на абеење на контактната површина, се моделираат со користење на пристап што претпоставува линеарен раст на пластичната зона на абеење и квадратно распаѓање на напрегањата при еластичен контакт. Обработувачките сили и геометриските карактеристики, т.е. рамнина на смолкнување, контакт со струшка - алат и контактната површина на абеење, приближна на интензитетот на топлината и димензиите на рамнината на смолкнување, наклон на предната страна на алатот, како и извори на топлина на абеење.

Особено, температурата на обработената површина е адресирана за проценка на дел од термичката штета. Методологијата потекнува од механистичко режење моделирање на сила, линеарен раст на пластична зона

на абење, тридимензионална геометрија на режење и модифицирани подвижни и стационарни пристапи на изворот на топлина.

Моделот е применет за да се проучи параметарот на процесот, ефектите врз температурите на обработка. Резултатите покажуваат дека, во режење на нова алатка, максималните температури на обработената површина се зголемуваат со брзината на режење и поместот, но се намалуваат со длабочината на режење. Исто така, се покажа дека абењето на наклонот на предната страна на алатот има одлучувачки ефекти врз температурите на обработената површина, максимум зголемување на температурата 2-3 пати од 0 до 0,2 mm ширина на абење [21].

Од информациите добиени од литературата и истражувањата презентирани во научни и стручни трудови, се добиваат одредени сознанија за обработката на челици со зголемена тврдина. Но во оваа област сè уште се истражува и ќе се истражува, бидејќи има многу фактори кои влијаат на обработката со стружење:

- Материјалот кој се обработува, неговиот хемиски состав, тврдина;
- Резниот алат, неговиот хемиски состав, тврдина, термичката обработка, слоеви на превлаки. Геометријата на резниот алат - изменливи плочки за режење;
- Режимот на обработка, брзина на стружење, помест, длабочина на стружење, радиус на на врвот на резната плочка;
- Сретства за ладење и подмачкување, нивното влијание на процесот на стружење;
- Сили на отпорот при стружење, кои влијаат на одредување на параметрите на режење;
- Оптимирање на процесот, од аспект на квалитетна обработка или оптимирање од економска оправданост;
- Машината за обработка, нејзината моќност и крутост;
- Начин на мерење, модели на истражување (математички, експериментални), и сл.

Набројаните фактори при стружење влијаат на: температурата создадена во процесот на режење. Таа е висока и влијае на обработената површина; резниот алат, неговата издржливост и истрошеност.

Од сознанијата на истражувањата кои се направени во однос на температурата, вршени се испитувања на температурата како функци од режимот на обработка (една или две променливи најчесто, поретко со три променливи, уште поретко со четири променливи).

Во овој труд вниманието е посветено на температурата, која се јавува во процесот на стружење во зависност од параметрите на технолошкиот процес, односно од режимот на обработка на челик со зголемена тврдина (С 55). Висината на температурата се истражува во зависност од 4 параметри заедо. Целта е да се види како овие променливи (брзина, помест, длабочина на режење и радиус на врвот од алатот) дејствуваат на температурата при обработка.

3. МЕТОДИ ЗА МЕРЕЊЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА ПРИ ОБРАБОТКА СО СТРУЖЕЊЕ

При режење на метали, во самиот процес се создава топлина (од смолкнување на материјалот, контакт помеѓу струшката и режечкиот клин, триење помеѓу предната површина на алатот и струшката), која влијае на алатот и на готовиот дел. Тоа се случува кога температурта е висока. Затоа е потребно точно одредување на температурата во зоната на режење. Одредување на температурата: се одредува со експеримент, а таа зависи од материјалот на обработка и на резниот алат, геометријата на алатот, разладно средство, и сл.

Се разликуваат два начини на мерење на температурата: контактно и бесконтактно. Контактното мерење на температурата е мерење на температурата на ограничено подрачје од мерниот објект. Бесконтактно мерење на температурата, без физички контакт (само објектот да е видлив за мерниот уред), тој ја мери температурата на површината.

Мерењето на температурата се врши со:

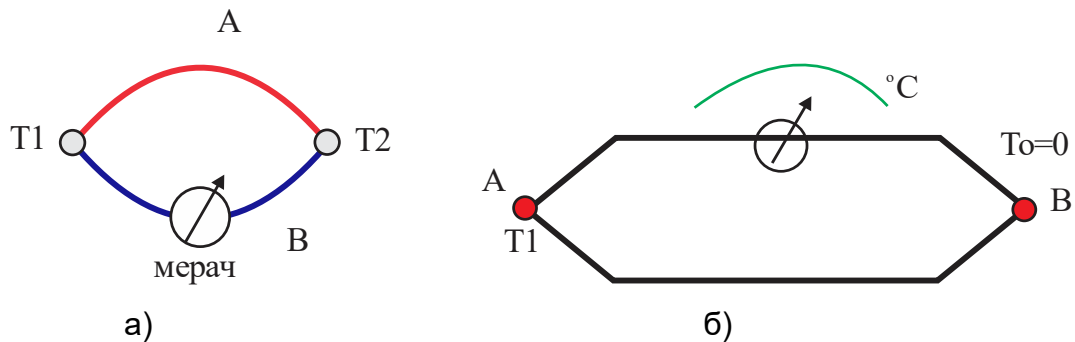
- термопарови,
- термовизиска камера,
- пирометари, и сл.

Секоја техника има свои предности и ограничувања, во зависност од физичкото мерење.

3.1 ТЕРМОПАР

Мерењето на температурата со термопар (термоелектрични сензори - термопар) е контактно мерење. Принципот на работа е заснован на појава на термоелектрични ефекти, кој се јавува кога два проводника - жици кои се изработени од различни материјали се поврзуваат на слободните краеве и се изложуваат на различни температури (Сл. 3.1 а). При ова се јавува потенцијална разлика во точките на поврзување, а како резултат на тоа е течење на термоелектромоторна струја. Се применуваат за мерење на

температури до ($\sim 1600-2500$) $^{\circ}\text{C}$ во зависност од материјалот на термопарот. На Слика 3.2 б е прикажана термопар точката А која е работна точка (мерена температурата), точката В е референтна температура и мерен инструмент (обично милivolтметар, милиамперметар) кој е избјадарен во мерната единица на температурата, мерењето е едноставно.



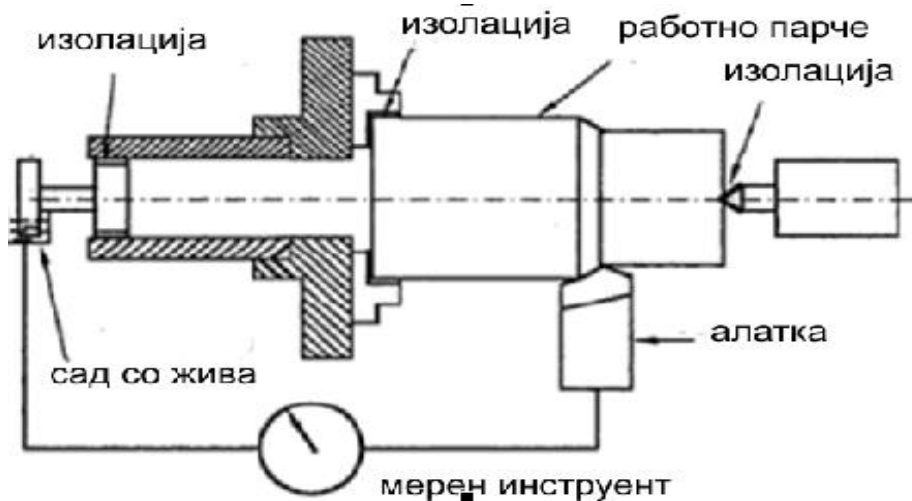
Слика 3.1: Термопар
Figure 3.1: Thermocouple

Термопарот стана популарна алатка што се користи при мерења на температурата при режење метал. Овој метод е многу корисен за да се најде зависноста на брзината на режење, поместот, длабочината на режење и параметрите на алатот врз температурата.

Термопаровите се еден од најчесто користените експериментални методи за мерење на температурата при обработката. Тие се проводници, евтини, можат да се ракуваат во широко температурно подрачје и лесно може да се применат. Сепак, тие ја мерат само средната температура во целата област на контакт на алатот и работното парче.

3.1.1. Техника на работа на термопар

Техниката на работа со термопар е многу едноставна, поставувањето е прикажано на Слика 3.2. Авторот Шо предвидува дека методот е лесен за одредување на температурните промени помеѓу работното парче и алатот за време на режењето на материјалот. Термопарот алат - материја има еден проблем, тоа е тешкото одредување на точноста на калибрација.



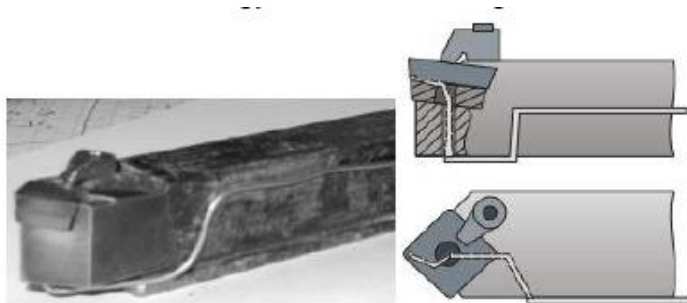
Слика 3.2: Шематско експериментално поставување за мерење на просечната температура на контактот струшка - алатка со употреба термопар [26]

Figure 3.2: Schematic experimental setup for measuring average chip-tool interface temperature using thermo - couple technique [26]

Со оваа техника може да се забележи покачување на температурата на една точка од алатката. Понатаму, техниката е широко користена во случај на вметнување резни плочки. Со цел да се најде дистрибуцијата на покачување на температурата во различни точки на алатката, оваа техника не може да се користи при единечно поставување [25].

Авторот на ова истражување работеше на мерење на температурата на режење и обработливост на материјалот. Во ова истражување се мери температурата на режење со вештачки термопарови и се анализира завршната обработка од аспект на температурата на режење. За испитување на обработливоста на материјалот при стружење, вештачки термопар беше поставен веднаш под горниот дел на режечката плочка. На овој начин се добива едноставен, сигурен, економски и точен метод за испитување на обработливоста при режење. Топлотните феномени што се случуваат и во тесна и во широка област на зоната на режење, се директно поврзани со сите карактеристики на процесот на обработка [24].

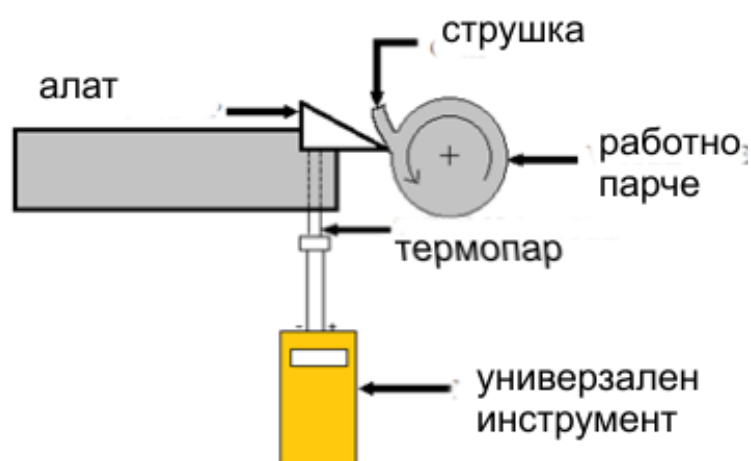
На Слика 3.3 е прикажан стругарски нож на кој е поставен вештачки термопар.



Слика 3.3: Мерно место за вештачки термопар за алат за стружење [24]

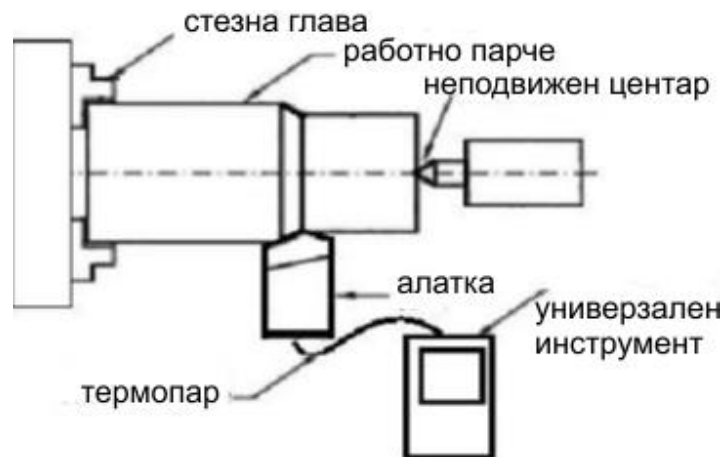
Figure 3.3: Measuring spot for artificial thermocouple for turning tool [24]

На Слика 3.4 е прикажан уредот за мерење на температурата, се состои од термопар и мултиметар тип **К**. Алатката има врв од јаглороден челик, а држачот е од леано железо. Отвор со дијаметар 4 mm е во држачот на алатот и сондата на термопар е вметната во отворот, така што ќе го допре врвот на алатот. Негативниот и позитивниот крај на термопарот е поврзан со мултиметарот. Во ова уредувње, температурата на врвот на алатот ќе развие термоелектромоторна сила (EMF) во термопар кој ќе се прикаже во мултиметарот. Алатката е фиксирана на носачот на алатот, а работното парче е фиксирано во стезната глава на стругот. Читањето на мултиметарот се зема за различни услови на обработка со менување на параметрите за режење, помест, длабочина на режење, брзина на режење, итн. [23].



Сл. 3.4: Уредување на термопар [23]

Fig. 3.4: Arrangement of thermocouple [23]



Слика 3.5: Шематски дијаграм од експериментално поставување [23]

Figure 3.5: Schematic diagram of experimental setup [23]

Постапката е:

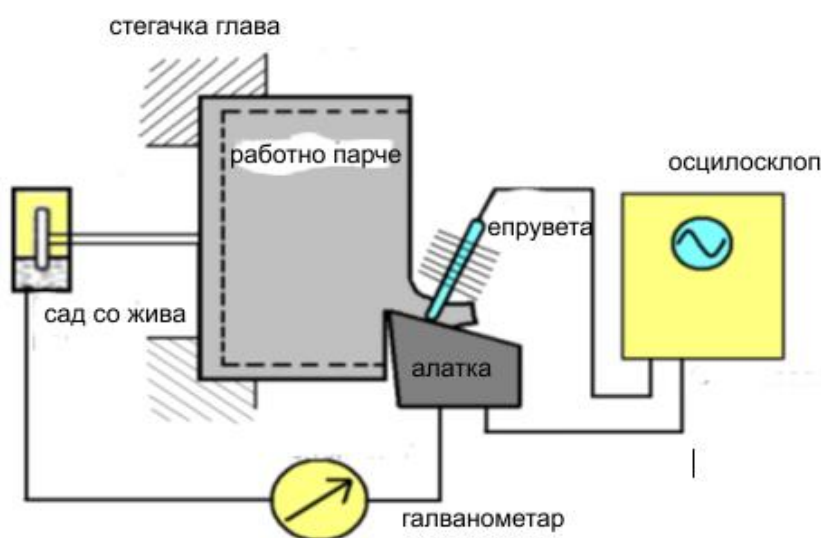
- Се мери дијаметарот на сондата за термопар, се прави отвор во одредена точка на врвот на алатката и се вметнува сондата за термопарот, потоа се фиксира алатката на носачот на алат;
- Едниот крај на термопарот е фиксиран во дупката во алатот, а другиот крај е поврзан со мултиметарот;
- Се врши промена на параметрите на режење;
- Се земаат вредности од мултиметар за различни вредности на длабочина на режење при постојани вртежи во минута и поместот;
- Истата постапка се повторува со различни вредности на брзината на напојување и вртежи во минута;
- Дозволено е петминутно време да ја доведе алатката да се излади во почетната состојба на атмосферската температура по секоја работа на вртење;
- Вредностите на температурата се читаат на мултиметарот со употреба на референтна табела; и
- Нацртани се графикони за да се добие врската помеѓу температурата и различните параметри.

3.1.2. Техника на попречен термопар

Техника со термопар се користи за мерење на просечната температура на интерфејсот за работа на алатот, но промените на температурата во различни точки и предната страна на алатката е тешко да се анализира со овој метод. За да се надмине овој проблем, техниката на попречен термопар беше развиена од Арндт и Браун. Техниката со попречен термопар е способна да ја одредува температурата на различни точки на алатот со помош на подвижна сонда, Слика 3.6. Попречните термопарови имаа за цел да ги истражат дистрибуциите на температурата на алатот во областа на интерфејсот за струшка - алатка во три димензии [9]. Методот е поврзан со термопар на алатот/работното парче, со таа разлика што контактната точка помеѓу струшката и алатот се менува постојано како што напредува режењето [36], [32].

Во оваа техника се користат алат од високобрзински челик и цементирана карбидна сонда, или обратно.

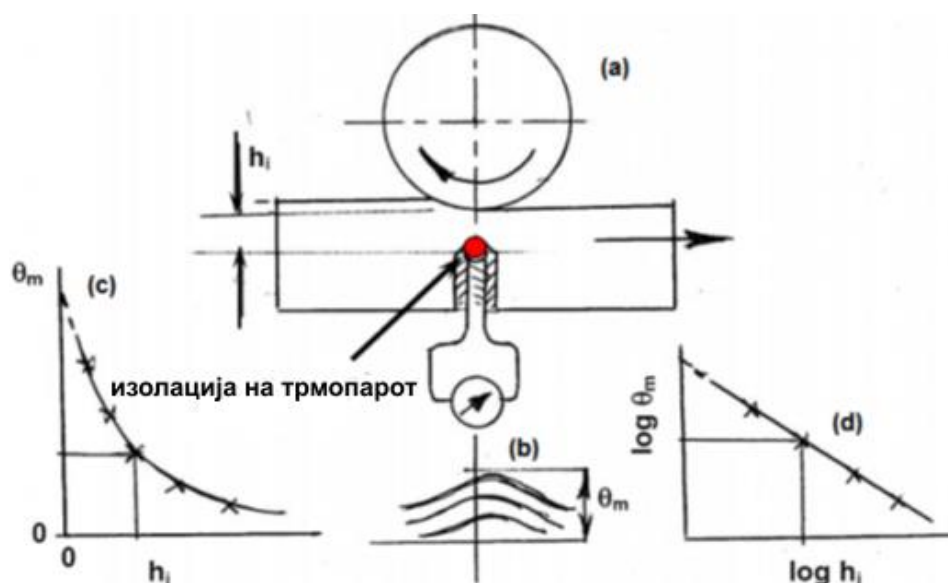
Дијаграмска презентација на попречно поставување на термопар е прикажана на Слика 3.6.



Слика 3.6: Поставување попречен термопар [32]
Figure 3.6: Transverse thermocouple setup [32]

3.1.3 Техника со вградување на термопар

Во операции како глодање, брусење, итн., каде што други две техники на термопар не работат, вградениот термопар може да служи за да се оствари целта. Експерименталното поставување е илустрирано на Слика 3.7 [28].



Слика 3.7: Експериментално поставување на техника на термопар
Figure 3.7: Experimental installation of a thermocouple technique

- (а) Експериментално поставување на вградената техника на термопар;
- (б) Варијација на температурата во однос на растојанието при машинска обработка;
- (ц) Варијација на температурата во однос на висината h_i , на едноставен графикон; и
- (д) Варијација на температурата во однос на височината на h_i на логаритамски графикон [28].

3.1.4 Термопарови

Кога има градиент на температура по должината на електричниот спроводник, се јавува феномен познат како Ефект на Зибек [29]. Струјата е индуцирана термички, предизвикувајќи пад на напон.

Table 3.1: Standard thermocouple types [32]

| Type (SLD) | Popular Name | Materials (colour code) (positive material appears first) | Typical Temperature Range | Seebeck Coefficient at 100°C $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
|------------|------------------|--|---------------------------|---|
| S | - | Platinum-10% rhodium vs. platinum | -50 to 1767°C | 7.3 |
| R | - | Platinum-13% rhodium vs. platinum | -50 to 1767°C | 7.5 |
| B | - | Platinum-30% rhodium vs. platinum-6% rhodium | 0 to 1820°C | 0.9 |
| T | Copper-constant | Copper (blue) vs. a copper-nickel alloy (red) | -270 to 400°C | 46.8 |
| J | Iron-constant | Iron (white) vs. a different copper-nickel alloy (red) | -210 to 760°C | 54.4 |
| E | Chromel-constant | Nickel-chromium alloy (purple) vs. a copper-nickel alloy (red) | -270 to 1000°C | 67.5 |
| K | Chromel-Alumel | Nickel-chromium alloy (yellow) vs. a copper-nickel alloy (red) | -270 to 1372°C | 41.4 |
| N | Nicrosil-Nisil | Nickel-chromium-silicon alloy (orange) vs. Nickel-chromium-magnesium alloy (red) | -270 to 1300°C | 29.6 |

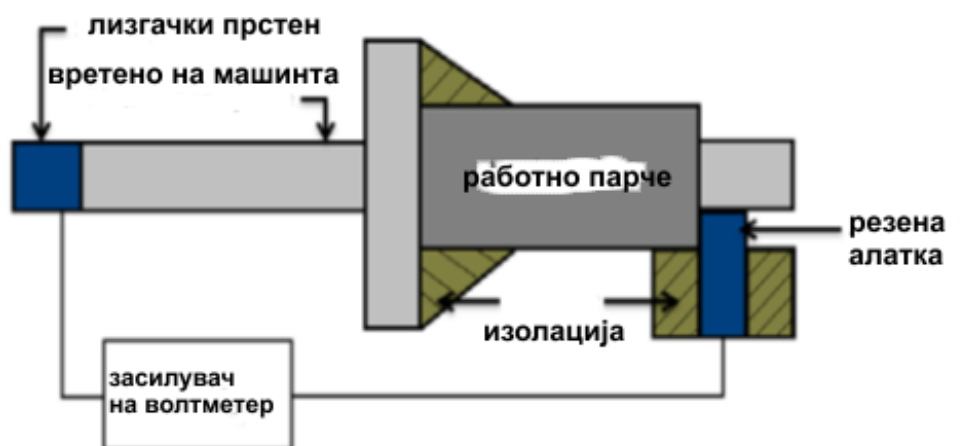
Табела 3.1: Типови на стандардни термопарови [32]

| Тип (SLD) | Популарно име | Материјали (шифра во боја) (позитивниот материјал се појавува прво) | Типичен опсег на температура | Коефициент на Зибек на 100°C $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
|-----------|-------------------|--|------------------------------|---|
| S | - | Платина -10 % родиум наспроти платина | -50 до 1767°C | 7.3 |
| R | - | Платина -13 % родиум наспроти платина | -50 до 1767°C | 7.5 |
| B | - | Платина - 30 % родиум наспроти платина - 6 % родиум | 0 до 1820°C | 0.9 |
| T | Бакарна константа | Бакар (сина) наспроти легура на бакар-никел (црвена) | -270 до 400°C | 46.8 |
| J | Железна константа | Железо (бело) наспроти друга легура на бакар - никел (црвена) | -210 до 760°C | 54.4 |
| E | Хромл-constant | Никел-хром легура (виолетова) наспроти легура на бакар-никел (црвена) | -270 до 1000°C | 67.5 |
| K | Хромел-алумел | Никел-хром-силициумска легура (портокалова) наспроти легура на никел-хром-магнезиум (црвена) | -270 до 1372°C | 41.4 |
| N | Никросил-нисил | Легура никел-хром-силициум (портокалова) наспроти легура никел-хром-магнезиум (црвена) | -270 до 1300°C | 29.6 |

Ова е случај за секој проводен материјал што доживува термички градиент [30]. Овој градиент може да постои преку две (топли и ладни) споеви, што резултира во електромоторна сила (ЕМФ). ЕМФ е карактеристичен за употребуваните проводнички материјали, и исто така зависи од температурите на споевите [31]. На овој начин се конструира многу повторлив уред за мерење на температурата, попознат како термопар. Во Табела 3.1 се дадени стандардни типови на термопарови.

3.1.5 Термопар за алат/работно парче

При машинска обработка, две тела вклучени во релативно движење - алатката за режење и работното парче - можат да бидат како даден облик на два елемента на термопар со цел да се измери температурата. Ова е познато како техника Шор-Готвајн-Херберт [32]. Значајно за оваа техника е да се испитаат температурните ефекти на различните параметри на режење (поместот, брзината на режење). На Слика 3.8 е прикажана шемата на алат - работно парче [30].



Слика 3.8: Експериментално поставување на алатот/работното парче како термопар [33]

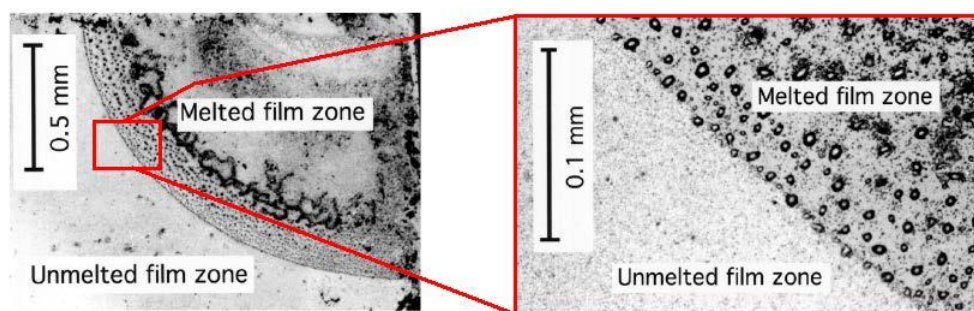
Figure 3.8: The tool/work piece thermocouple experimental setup [33]

3.2 ДРУГИ МЕТОДИ ЗА МЕРЕЊЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА ПРИ ОБРАБОТКА

3.2.1 PVD облоги

Со овој метод, мерењето се врши со премаз на физичко таложење со параа (PVD) што се таложи на поделен - алат во воден раствор. Кога ќе се надминат одредени (прагови) на температурата, тие се снимаат со видливо стопени облоги - слоеви. На овој начин може да се одреди внатрешната температура на цврстото тело за време на стружење. Облогата за откривање на температура се состои од неколку материјали со различни точки на топење кои се депонираат со физичко таложење на параа на расцепната површина на алатот за режење [34].

На Слика 3.9 се прикажани гранични слики на експерименти со обработка со телуриум со PVD материјал [32].



Слика 3.9: Фотомикрограф на површински чувствителен на PVD (телуриум) површина [32]

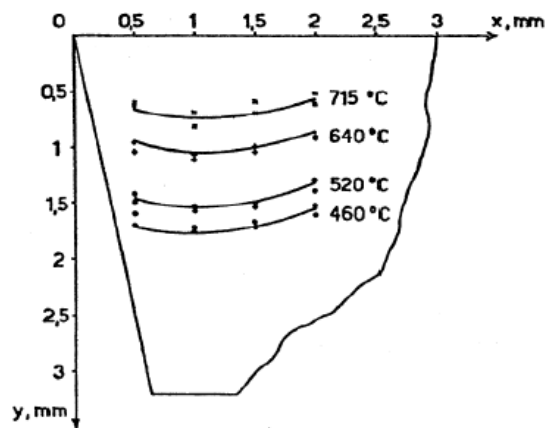
Figure 3.9: Photomicrograph of temperature-sensing PVD coated (tellurium) surface [32]

3.2.2 Техника на термичка боја

Оваа метода го користи принципот на хемиска реакција што се одвива на одредена температура за промена на бојата. Наведени се приближни вредности на врвните температури на кои биле изложени алатките за режење и/или работните парчиња. Бојата се наноси пред експериментот во областите од интерес. Важен фактор за техниката е што е некомплицирани и

евтина за да се постигне соодветен преглед. Таа е погодна за суви услови каде што се контролира влезот на топлина [32], [45].

Оваа техника е најекономична техника што се користи за мерење на температурата во различни точки. На Слика 3.10 се прикажани резултатите добиени со оваа техника, тие се сметаат за приближни и се препорачува потврда на резултатите од некоја друга техника [35].

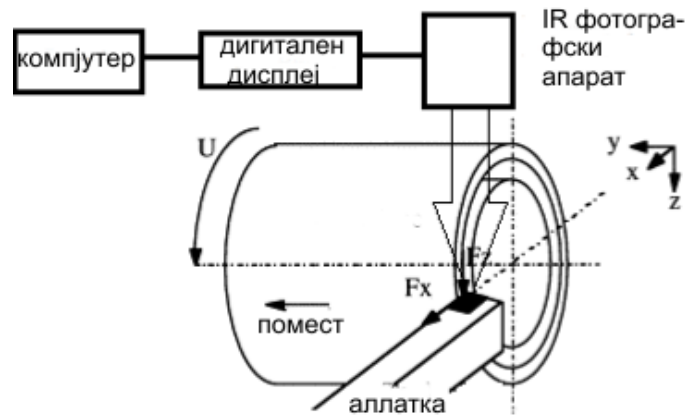


Слика 3.10: Експериментални податоци и соодветни изотерми, работен материјал: челик AISI 1040; алатка: цементиран карбид (P20); длабочина на сечење: 2 мм; храна: 0,428 mm/rev; брзина на сечење: 3,33 m/s [35]

Figure 3.10: Experimental data and corresponding isotherms, work material: AISI 1040 steel; tool: cemented carbide (P20); depth of cut: 2 mm; feed: 0.428 mm/rev; cutting speed: 3.33 m/s [35]

3.2.3. Инфрацрвена фотографска техника

Оваа техника за мерење на дистрибуцијата на температурата во зоната на смолкнување и на интерфејсот струшка - алатка за време на обработката. На Слика 3.11 е прикажано експерименталното поставување. Оваа техника е широко користена во случај на употреба резни плочки [36], [37].

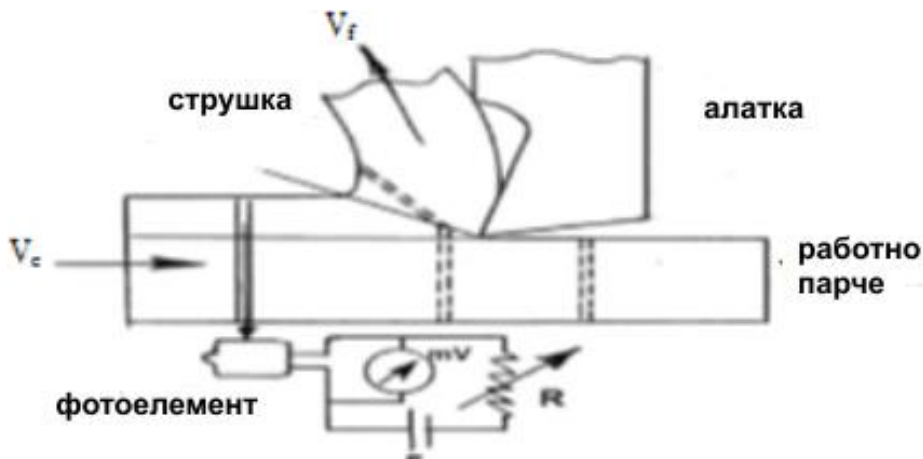


Слика 3.11: Експериментално поставување за инфрацрвена фотографска техника [36], [37]

Figure 3.11: Experimental setup for infrared photographic technique [36], [37]

3.2.4. Техника на пирометар на инфрацрвено зрачење (IR)

Тоа е техника базирана на електричен ефект. Со оваа метода може точно да се измери температурата долж зоната на смолкнување и бокот (страната) на алатот, како што е прикажано на Слика 3.12.



Слика 3.12: Експериментално поставување на IR пирометри [38]

Figure 3.12: Experimental setup for IR pyrometers [38]

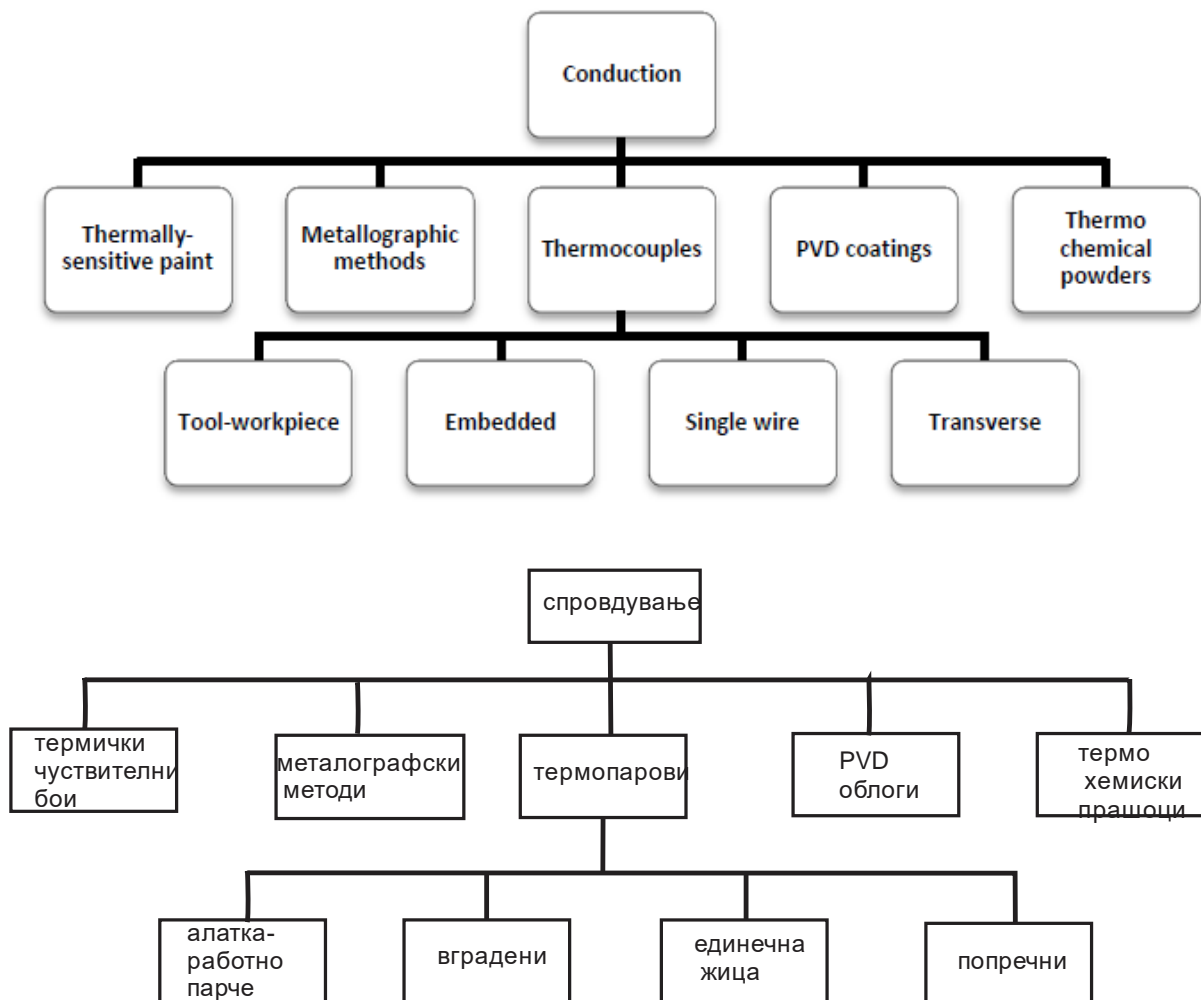
3.2.5. Техника на оптичко инфрацрвено зрачење со пирометар

Овој метод е сличен на техниката IR пирометар, со разлика на оптичкиот механизам. Оптичкиот механизам собира зрачење наместо да насочува радиоактивно зрачење до PbS клетката, со што се создаваат подобри

резултати и се намалува времето на изложеност. Оваа техника се спроведува и со употреба на изменливи резни плочки.

3.2.6 Спроводливост

Преносот на енергијата од поенергичните честички кон помалку енергетски честички од телото се одвива со помош на интеракциите помеѓу честичките. Овој механизам за пренос на енергија се нарекува спроводливост [39]. Слика 3.13 ги покажува методите за мерење кои се потпираат на спроводливоста на топлината од измереното тело до единицата за сензори.



Слика 3.13: Методи за мерење на температурата заснована на спроводливост [40], [41], [42]

Figure 3.13: The conduction-based temperature measurement methods [40], [41], [42]

3.2.7 Металографски методи

Микроструктурата на метална легура е типично карактеристична за нејзината термичка историја. Металографските методи го користат овој принцип: микроструктурата може да биде во врска со температурата на која е изложен материјалот. Микроструктурата на експерименталното парче се споредува со референтните микроструктури и се одредува температурата. На сличен начин, тврдоста - користејќи тест за микротврдост - се споредува со референтните информации [32].

Овој метод е прилично практичен за обработка на работата што се истражува, бидејќи таа може да се користи со ладење, што стана суштински дел од современата машинска пракса. За да се добие добра дискриминација со оваа техника, потребно е да се работи на високи температури, алатот се троши многу, а ова не е репрезентативно за условите за производство. Ова ја намалува корисноста и привлечноста на оваа техника [32].

3.2.8 Термичко зрачење

Термичко зрачење е енергијата што електромагнетно ја емитира материјата над апсолутната нулта температура [39].

Во оваа група припаѓаат: оптички термопар, пирометар на оптички влакна, инфрацрвена камера.

Оптички термопар

Под работното парче е поставено оптичко влакно, така што може да се открие промена во емитираната бранова должина. Бреговите решетки се направени со осветлување на јадрото на соодветно оптичко влакно со просторно различна шема на интензивна ултравиолетова светлина. УВ фотоните со кратка бранова должина имаат доволно енергија да ги раскинат екстремно стабилните силиконско-кислородни врски, така што структурата на оптичкото влакно е оштетена, што доведува до малку зголемен индекс на

рефракција. Ова прилагодено влакно потоа може да работи како селективно огледало на бранова должина. На оваа рефлектирачка бранова должина влијае секоја промена во механичките или физичките својства во подрачјето на решетката. Промената на температурата ќе доведе до промена на ефективниот индекс на рефракција - ломот како резултат на термооптичкиот ефект. За да се спроведе оваа техника на работно парче, таа мора да се стави на оптичката цевка или оптичката цевка да се стави во сендвич помеѓу парчето што ќе се реже и апаратот за поддршка [29].

Пирометри на оптички влакна

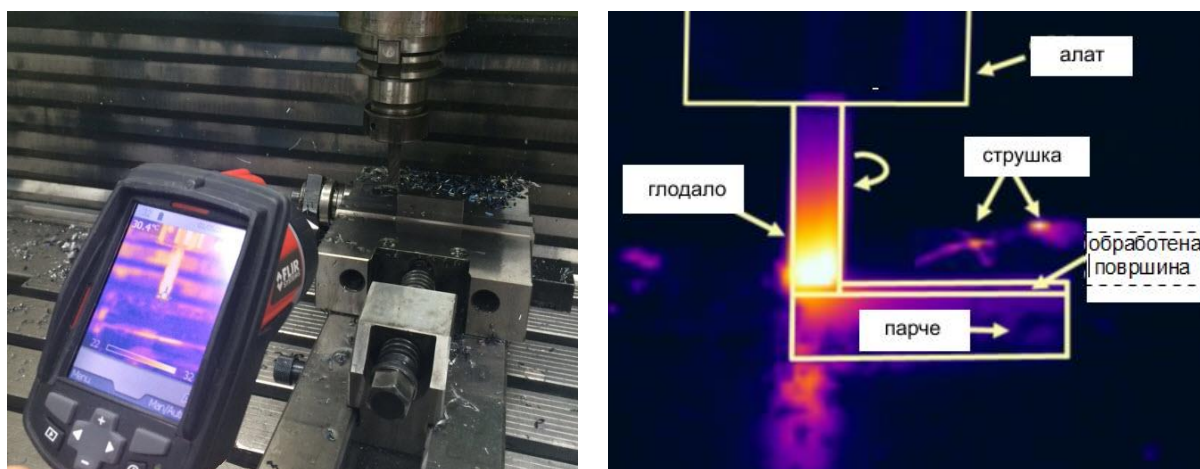
Користејќи типично оптичко влакно од 0,65 mm, температурата може да се мери на инаку достапни локации. Оптичкото влакно го олеснува далечинското набљудување, овозможувајќи им на сензорите да бидат физички поголеми. Може да се користат ладени детектори, што ја подобрува чувствителноста и на крајот реагираат на временски домен. Двобојните пирометри користат детектори со бранови должини близу еден до друг. При пресметување на температурата се користи односот помеѓу емисиите, елиминирајќи ја емисивноста како зависен параметар [44].

Инфрацрвени камери

Инфрацрвената (IR) светлина е фокусирана со специјална леќа и се скенира со фазна низа елементи на IR детектор, создавајќи термограм. Ова е преведено во електрични импулси кои се испраќаат до единицата за обработка на сигнал, каде што информациите се претвораат во податоци за приказот. Може да се стекнат температури на самото место со избирање позиција и добивање вредност за таа точка [33].

3.2.9 Мерење на температурата со термовизиска камера

Ова мерење е во зоната на режење и е бесконтактна метода. Мерењето се врши со зрачење на топлината од местото на режење. Резултатите со ова мерење се многу точни (тоа не зависи од материјалот за обработка, материјалот на алатот, параметрите на режење), мерењето е едноставно, вредностите се очитуваат од спектарот на бои во одреден температурен интервал. На Слика 3.14 е прикажана термовизиска камера (Flire - еден од моделите), се одликуваат со висока резолуција на сликата (480-640 пиксели), термална осетливост $< 0,03^{\circ}\text{C}$ [46].



Слика 3.14: Поставување на термовизиска камера и термограф при дупчење [46]
Figure 3.14: Installation of a thermal imaging camera and thermograph during drilling [46]

4. НАУЧНОИСТРАЖУВАЧКА ХИПОТЕЗА (ТЕЗА), ЦЕЛИ И МЕТОДИ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО

Главната цел на истражувањето на обработка со стружење е развој на математички модели со кои се предвидува средната темепратура, со ова се овозможува опишување на температура (поточно), која се создава на врвот на резачкиот клин, при обработка на материјали со зголемена тврдина.

Со ова истражување, добиените резултати имаат своја практична примена. Нивната примена е во металопреработувачката индустрија. Со примена во металопреработувачката индустрија можат да се овозможат можности за оптимизација на процесите и добивање на економски ефекти.

Целите и задачите на истражувањето се директно поврзани со научните тези:

- Степенестиот облик на функција од прв ред добиен со примена на методологијата на *Design of experiments* (DOE), со користење четирифакторен план на експерименти со повторување во средната точка од истражуваниот хиперпростор, со проверка на адекватноста на добиените модели, со успех може се користи за математичко моделирање на средната температура која се појавува во зоната на режење при обработка со стружење на челици со зголемена тврдина;
- Резултатите од мерењето на средната температура како физичка појава во процесот на стружење со помош на Методот на природен термопар се со задоволителна точност и повторливост и со успех можат да се користат за:
 - Успешно математичко моделирање на средната температура преку степенестиот облик на функција од прв ред, и
 - Донесување правилна одлука за стабилноста на процесот на стружење при обработка на материјали со зголемена тврдина што

е во директна зависност од вредностите на параметрите на режење.

Експерименталното добивање на математичкиот модел за средната температура во степенест облик на функција од прв ред е главната цел која треба да се постигне во рамките на докторската дисертација. За таа цел, се реализираат следниве активности (задачи):

Преглед на литературата и достигнувањата во областа на истражувањето: Истражување на тема и за дефинирање на тезите, анализирани се поголем број литературни извори, овој процес продолжи и во текот реализација на докторскиот труд;

- *Планирање на експерименталниот дел:* Оваа активност вклучува најпрвин избор на материјал кој се користи при обработката со стружење. Материјалот е челик со ознака С 55 (DIN) кој термички е подобрен со цел да се постигне тврдина од 52 ± 2 HRC. За обработка на назначениот материјал се користи алат - керамички резачки плочки од мешана керамика MC 2 ($Al_2O_3 + TiC$). Обработката со стружење се изведе со промена на четири независно променливи големини и тоа: v - брзина на режење, f - резачки помест, a - длабочина на режење и r_ϵ - радиус на врвот на резачката плочка, со примена на четирифакторен потполн план на експерименти од прв ред ($2^4 + 4$). Обработката со стружење се спроведе на конвенционален струг, додека за мерење на средната температура се користи Методот на природен термопар;

- *Реализација на обработката (експериментите) согласно планираното:* Овој дел вклучува редоследна обработка на работните парчиња согласно четирифакторниот план на експерименти, како и мерење на средната температура;

- *Математичко моделирање:* За добивање на степенестиот облик на функција од прв ред за средната температура, го користам софтверот CADEX (Computer Aided Design and analysis of Experiments), специјализиран за таа намена. Затоа се определува корелација на влезно-излезните информации (фактори) за:

- Математички модел од прв ред без меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите;
- Математички модел од прв ред без меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите;
- Математички модел од прв ред со меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите; и
- Математички модел од прв ред со меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите.

Разликата помеѓу измерената вредност и пресметковната вредност на истражуваната појава се прикажува преку грешката во (%). Точноста пак на математичките модели се дефинирана со 95 % - интервали на доверба. Во рамките на математичкото моделирање е дадена и оцена на значајноста на влезните фактори (параметри) како и дисперзиона анализа за сите погоре споменати модели.

- Табеларно и графичко прикажување на резултатите, нивна анализа; Во овој дел се прикажани сите добиени резултати од експерименталниот дел во облик на табели и дијаграми (3-Д површини). Спроведена е детална анализа на истите.

Горенаведените цели и задачи што се реализирани, како и тези, се соодветни на насловот на докторската дисертација.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИСТРАЖУВАЊА (УСЛОВИ И РЕЗУЛТАТИ)

5.1. ОБРАБОТУВАН МАТЕРИЈАЛ

Обработката со стружење се изведува на прстени, специјално изработени за оваа намена, димензиите на прстените се $\Phi 102 \times \Phi 82 \times 20$ mm, Слика 5.1.1 од материјал челик за подобрување С 55 (DIN). Прстените се термички обработени на тврдост 52 ± 2 HRC.

При обработката со стружење, прстените се поставуваат на специјално помагало, кое е изработено за оваа намена, за истражување на температурата на контактното подрачје на алатот/парчето што се обработува, со ова се зголемува крутоста на прстените, Слика 5.2.2.

Во продолжение е даден атестот за обработуваниот материјал С 55 (DIN), Слика 5.1.3.



Слика 5.1.1: Прстени од материјал С 55 (DIN), со тврдост 52 ± 2 HRC
Figure 4.1.1: Rings of material C 55 (DIN), hardness 52 ± 2 HRC



Слика 5.1.2: Специјално помагало за истражување на температурата во процесот на режење при обработка со стружење (во сопственост на Машински факултет во Скопје)

Figure 5.1.2: Special tool for research of the average temperature in the process of cutting during turning (owned by the Faculty of Mechanical Engineering in Skopje)

| | | Chemical composition % | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| № | Heat /cast No | Deoxidation | C | Mn | Si | P | S | Cr | Ni | Cu | Mo | As | Al | V | Ti | Nb | Bi | N | Ceq |
| | | | 1 | 73485 | | 0.450 | 0.610 | 0.230 | 0.008 | 0.007 | 0.080 | 0.080 | 0.210 | 0.011 | 0.018 | 0.034 | 0.003 | 0.040 | 0.000 |
| 2 | 73514 | | 0.450 | 0.610 | 0.210 | 0.013 | 0.021 | 0.090 | 0.080 | 0.240 | 0.011 | 0.014 | 0.030 | 0.003 | 0.026 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.594 |
| 3 | 71310 | | 0.170 | 1.310 | 0.240 | 0.014 | 0.014 | 0.090 | 0.100 | 0.220 | 0.018 | 0.021 | 0.047 | 0.086 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.449 |

| | | Mechanical properties | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------|-----------------------|-----------|---------------|----------|-----------------------|--------------------|--------------------|----------|-------------|----------|------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|----------|-----------|-------------------|-----------|--|--------------------|---------------------|---------|--|--|--|--|--|--|
| № | diam. mm | grade | Length mm | Heat /cast No | Batch No | Number of bars & Mass | Tens. strength MPa | Yield strength MPa | Relative | | | | Impact strength | | | | | | Samples condition | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | Elong. % | Shrink. Z % | Temp. °C | KV or KJcu | K ₁ | K ₂ | K ₃ | Condi. 2,3,4,5,6 | Diam. mm | Quenching | | Tempering | | Decar. burn. Depht | Circogr. test Class | US test | | | | | | |
| 1 | 32 | C45E | 6.000.00 | 73485 | A | 5 | 11.334 | 620 | 442 | 24.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 32 | C45E | 6.000.00 | 73514 | A | 3 | 7.373 | 650 | 446 | 26.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 105 | C55 | 6.300.00 | 71310 | B | 9/5 | 19.570 | 564 | 428 | 28.0 | -20 | KV | 113.7 | 117 | 119 | 105 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 17 | 38.277 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | Hardenability | | | | | | | | | | | | | | Incl. Meth. | Grain size | Hardness | | | Band in cold | Reduct. Ratio | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------|---------------|----|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----|-------|----------|
| № | diam. mm | H1 | | J _{1A} | J ₂ | J ₃ | J ₄ | J ₅ | J ₆ | J ₇ | J ₈ | J ₉ | J ₁₀ | J ₁₁ | J ₁₂ | | | J ₁₃ | J ₁₄ | J ₁₅ | | | J ₁₆ | J ₁₇ | J ₁₈ | J ₁₉ | J ₂₀ | J ₂₁ | J ₂₂ | J ₂₃ | J ₂₄ | J ₂₅ | HB | Cond. | Temp. °C |
| | | 1 | 32 | 73485 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 32 | 73514 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 105 | 71310 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

1. Manufacturing Method Steel EAF-LF-CC with EMS and Air Mist
2. Q - quenching /hardening/ 4. QT - quenching and tempering 6 HR - hot rolling
3. N - normalizing 5. SA - soft annealing /tempering

We hereby certify that the above mentioned steel (heat number) has been tested and proved to be free of radioactivity

We hereby certify that the above mentioned steel has been delivered to you in compliance with your purchase order

Technical control
Rolled shop

BACHVAROVA CE-mark concerns only EN 10025/2004 - Certificate No0035 CPR A191



Chief department TECHNICAL CONTROL
STOMANA INDUSTRY SA



Слика 1.5.3: Потврда на материјалот

Figure 1.5.3: Attest of the material

Условите за термичка обработка на доставените прстени од материјал C55 (DIN) или Č1630 се избрани со цел прстените да бидат на што е можно поголема тврдина во интервалот 50-60 HRc.

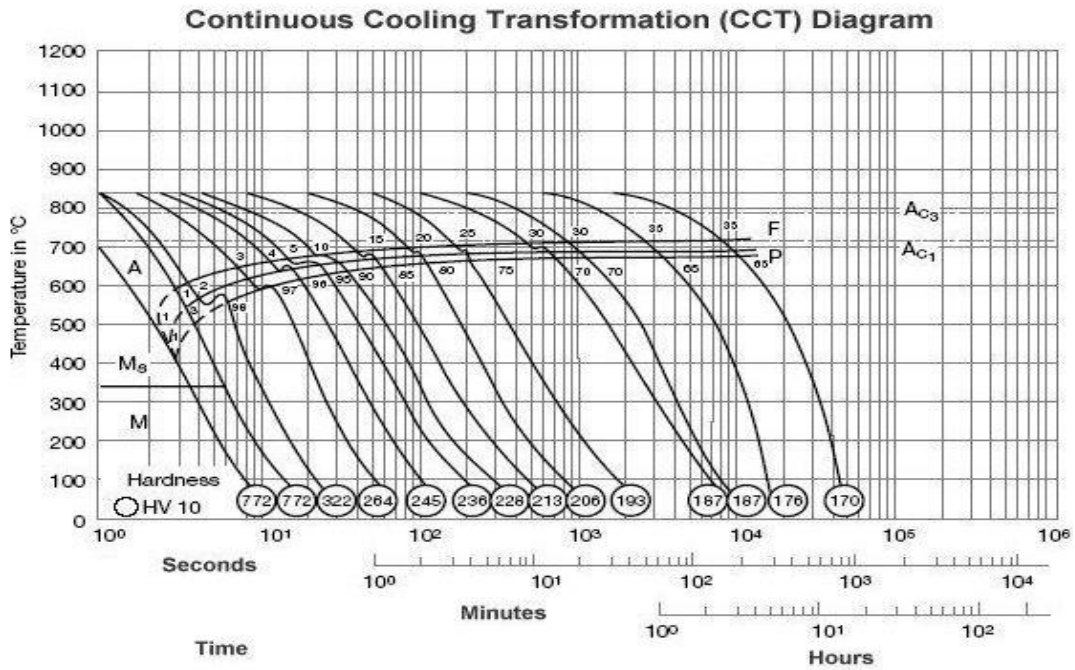
Затоа, термичката обработка на прстените е реализитрана согласно следниве чекори:

- Предгревање на температура 400°C во траење од 60 мин.;
- Загревање до температура на аустенизација 840°C и времетраење од 50 минути.

Загревањето и аустенизацијата е во атмосфера која е ендотермна и со пресметан јаглороден потенцијал, согласно хемискиот состав на материјалот.

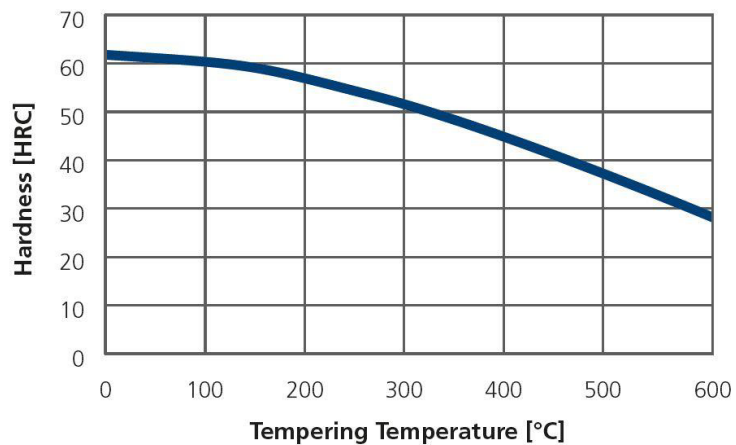
- Калењето се изведува во средство за ладење (Вода + Додатоци за зголемување на брзина на ладење), со цел да се постигне поголема тврдина кај деловите, согласно дијаграмот на Слика 5.1.4.

Температурата за опуштање е избрана, согласно дијаграмот на Слика 5.1.5, со цел да се постигне бараната тврдина.



Слика 5.1.4: Дијаграм за трансформација на континуирано ладење
Figure 5.1.4: Diagram for transformation to continuous cooling

Tempering response

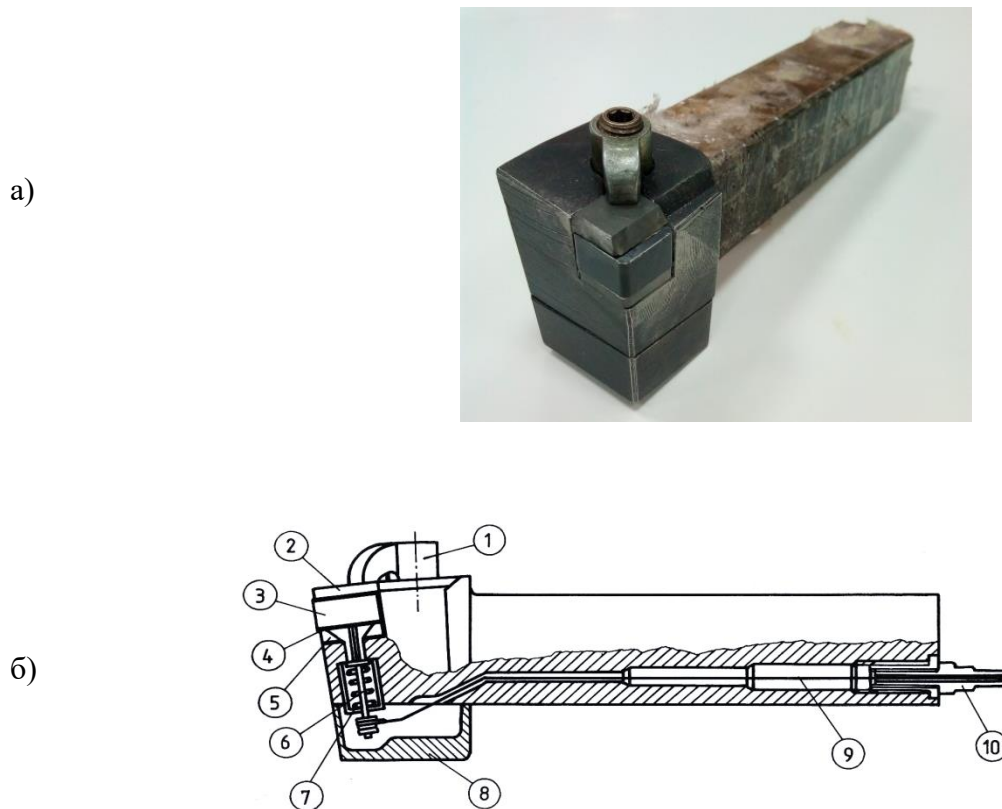


Слика 5.1.5: Дијаграм на опуштање на материјалот
Figure 5.1.5: Release diagram on the material

5.2. РЕЗАЧКИ АЛАТ (ДРЖАЧ И ПЛОЧКИ)

5.2.1. Држач за резачки плочки

При обработката со стружење се користат држачи за резачки плочки IK.KSZNR-064 25x25 од фирмата KENNAMETAL, Слика 5.2.1 а, специјално прилагоден за мерење на средната температура во процесот на режење, Слика 5.2.1 б.



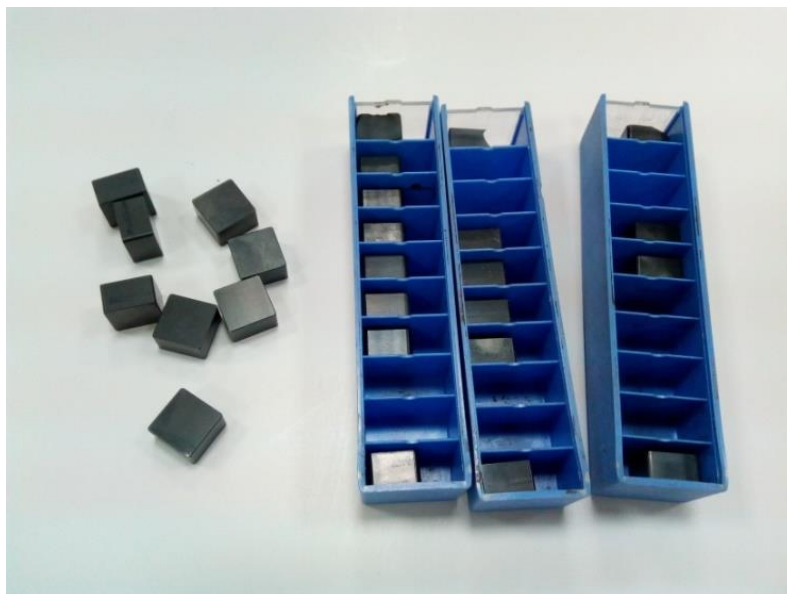
Слика 5.2.1: Изглед (а) и Пресек (б) на држач за резачки плочки IK.KSZNR-064 25x25 од фирмата KENNAMETAL. 1 - палец, 2 - кршач на струшка, 3 - кермачка резачка плочка MS 2, 4 - лискун, 5 - подлошка, 6 - механизам, 7 - изолациона гилза, 8 - заштитна капа, 9 - спроводник на сигнал, 10 - приклучок (во сопственост на Машински факултет Скопје)

Figure 5.2.1: Appearance (a) and Section (b) of the holder for cutting inserts IK.KSZNR-064 25x25 from the company KENNAMETAL. 1 - thumb, 2 - chipper, 3 - kerma cutting board MS 2, 4 - mica, 5 washers, 6 - mechanism, 7 - insulating sleeve, 8 - protective cap, 9 - signal conductor, 10 - connection.(owned by the Faculty of Mechanical Engineering in Skopje)

5.2.2. Резачки плочки

При Обработката со стружење се користат резачки плочки SNGN 120708-120712-120716 од мешана керамика MC 2 ($Al_2O_3 + TiC$) од фирмата HERTEL, Слика 5.2.2.

Геометријата на плочките е: $\kappa=75^0$; $\kappa_1=15^0$; $\gamma = -6^0$; $\alpha = 6^0$; $\lambda = - 6^0$; $r_\epsilon = 0.8-1.2-1.6 \text{ mm}$; $\gamma_f = -20^0$; $b_f = 0.2 \text{ mm}$.



Слика 52.2: Изглед на резачки плочки SNGN 120708-120712-120716 од мешана керамика MC 2 ($Al_2O_3 + TiC$) од фирмата HERTEL

Figure 5.2.2: Appearance of cutting plates SNGN 120708-120712-120716 from mixed ceramics MC 2 ($Al_2O_3 + TiC$) from the company HERTEL

5.3. МЕТАЛОРЕЗАЧКА МАШИНА

Обработката со стружење се изведува на конвенционален струг модел TVP 250 од фирмата Првوماјска, Слика 5.3.1, со силина $P= 11.2$ (Кв), со следните броеви на вртежите 16; 22,4; 31,5; 45; 63; 90; 100; 140; 200; 280; 400; 560; 800; 1120; 1600 и 2240 (врт./мин.), и со помести на режење 0,025; 0,028; 0,032; 0,036; 0,04; 0,045; 0,05; 0,063; 0,071; 0,08; 0,09; 0,1; 0,112; 0,125; 0,14; 0,16; 0,18; 0,2; 0,224; 0,25; 0,28; 0,315; 0,355; 0,4; 0,45; 0,5; 0,56; 0,63; 0,71; 0,8; 0,9; 1; 1,12 (mm/vrt).



Слика 5.3.1: Изглед на конвенционален струг модел TVP 250 од фирмата Првوماјска (во сопственост на Машински факултет во Скопје)

Figure 5.3.1: Appearance of a conventional lathe model TVP 250 from the company Prvomajska (owned by the Faculty of Mechanical Engineering in Skopje)

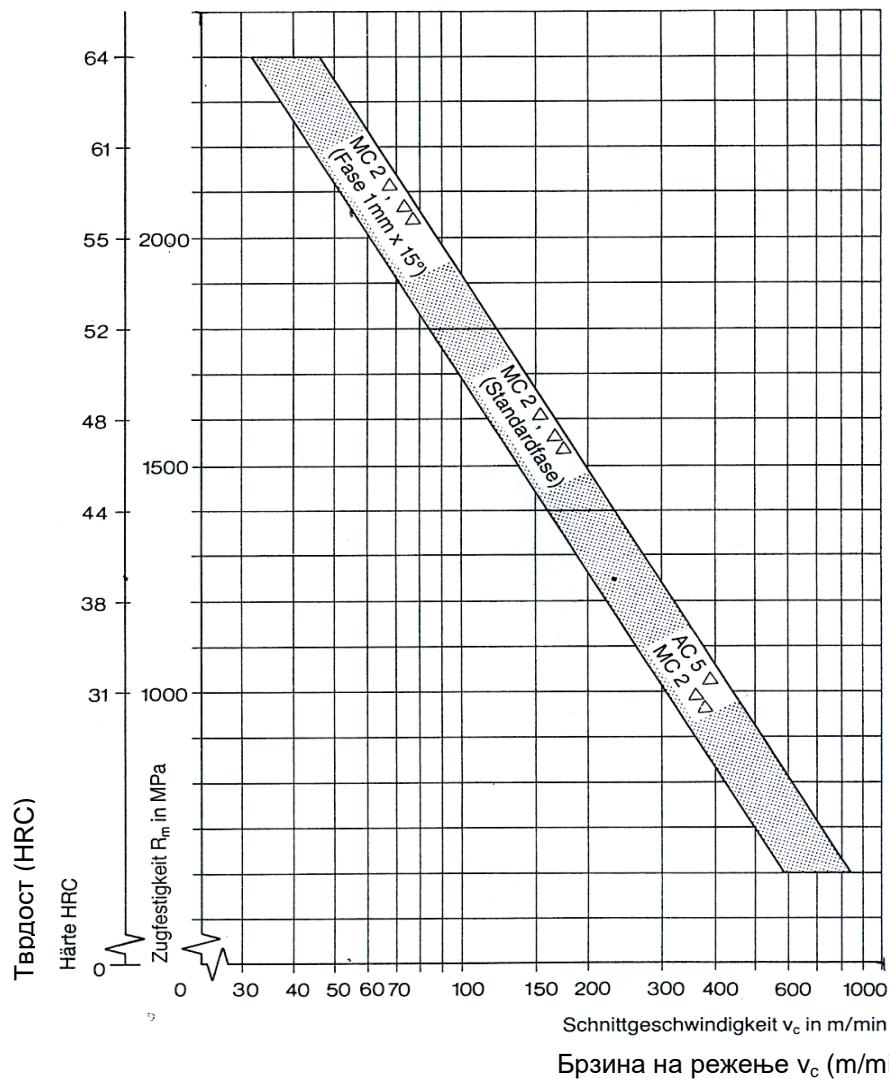
5.4. УСЛОВИ (ПАРАМЕТРИ) НА ОБРАБОТКА СО СТРУЖЕЊЕ

Обработката со стружење се изведува со промена на четири независно променливи големини и тоа: v - брзина на режење, f - резачки помест, a - длабочина на режење и r_ϵ - радиус на врвот на резачката плочка, со примена на четирифакторен потполн план на експерименти од прв ред ($2^4 + 4$).

Промената на независно променливите големини е претставена во Табела 5.4.1.

Табела 5.4.1: Карактеристики на независно променливите големини
Table 5.4.1: Characteristics of independent variable sizes

| КАРАКТЕРИСТИКИ НА НЕЗАВИСНО ПРОМЕНЛИВИТЕ ГОЛЕМИНИ | | | | | |
|---|-------------------|------|------------|--------|-----------|
| Број | Означување | Ниво | Максимално | Средно | Минимално |
| | | Код | 1 | 0 | -1 |
| 1. | v (mm/min) | X 1 | 133.00 | 94.398 | 67.00 |
| 2. | f (mm/vrt) | X 2 | 0.315 | 0.177 | 0.1 |
| 3. | a (mm) | X 3 | 0.8 | 0.566 | 0.4 |
| 4. | r_ϵ (mm) | X 4 | 1.6 | 1.131 | 0.8 |



Слика 5.4.1: Избор на брзината на режење за обработуван материјал C 55 (DIN) со тврдост 52 ± 2 HRC и резачки плочки од мешана керамика MC 2 ($Al_2O_3 + TiC$) согласно препораките од фирмата HERTEL

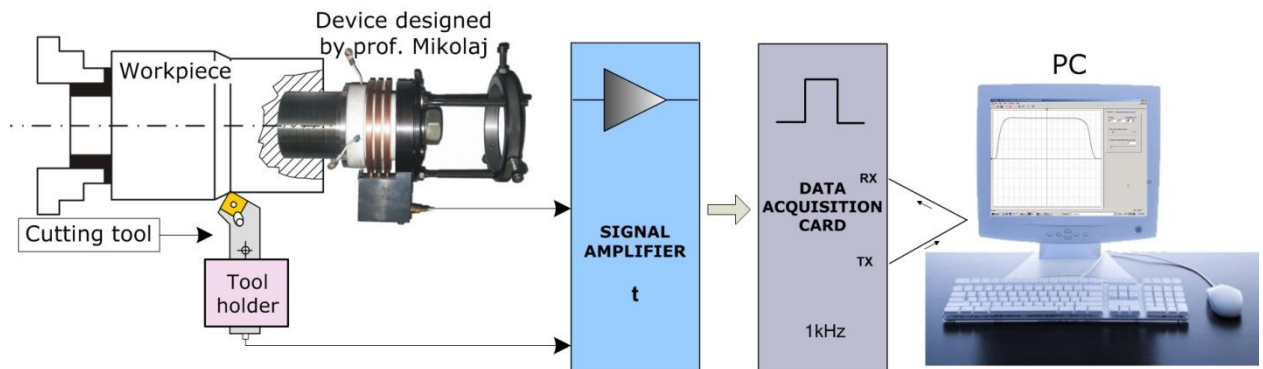
Figure 5.4.1: Selection of cutting speeds for machined material C 55 (DIN) with hardness 52 ± 2 HRC and cutting plates made of mixed ceramics MC 2 ($Al_2O_3 + TiC$) according to the recommendations of the company HERTEL

5.5 КОМПЈУТЕРИЗИРАН МЕРЕН СИСТЕМ ЗА МЕРЕЊЕ НА СРЕДНАТА ТЕМПЕРАТУРА ВО ПРОЦЕСОТ НА РЕЖЕЊЕ ПРИ ОБРАБОТКА СО СТРУЖЕЊЕ

Мерењето на средната температура во процесот на режење при обработка со стружење се изведува со примена на компјутеризиран мерен систем, прикажан на Слика 5.5.1.

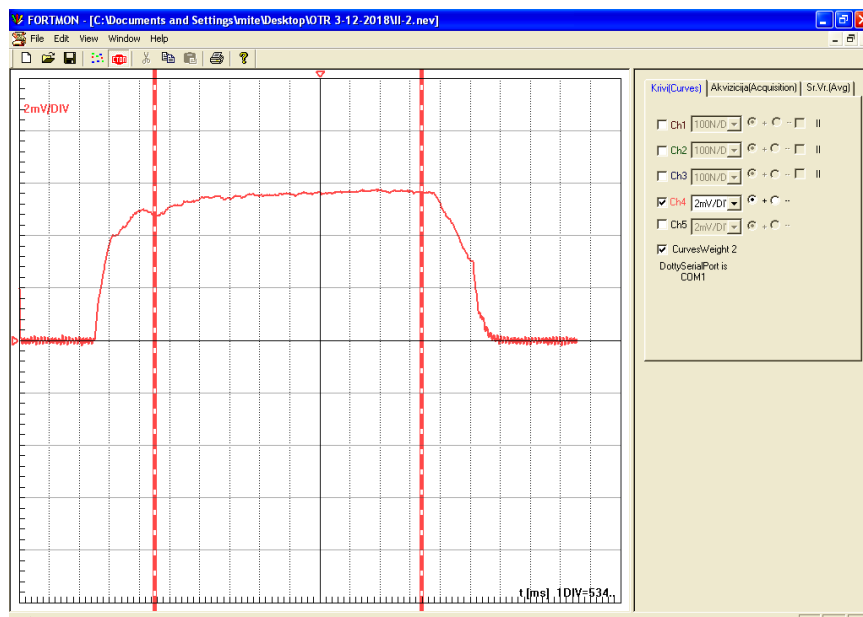
Овој мерен систем овозможува добивање на сигналите за средната температура во процесот на режење при обработка со стружење (Слика 5.5.1),

врз база на применет природен термопар, и пресметка на средната вредност на снимениот сигнал за термонапонот, во избраниот интервал (Слика 5.5.2).



Слика 5.5.1: Работно место за истражување на средната температура во процесот на режење при обработка со стружење, со користење на компјутеризиран мерен систем (во сопственост на Машински факултет во Скопје)

Figure 5.5.1: Workplace for research of the average temperature in the process of cutting during turning, using a computerized measuring system (owned by the Faculty of Mechanical Engineering in Skopje)



Слика 5.5.2: Измерен сигнал за средната температура во процесот на режење при обработка со стружење

Figure 5.5.2: Measured signal for the average temperature in the cutting process during turning processing

5.5.1.1 Редослед на изведување на експериментите (експериментална матрица)

Експериментите се изведени согласно четирифакторен план (декодиран) на експерименти од прв ред кој што е прикажан во Табелата 5.5.1.1, односно четирифакторен план (кодирани) на експерименти од прв ред кој што е прикажан во Табелата 5.5.1.2.

Табела 5.5.1.1: Четирифакторен план (декодиран) на експерименти од прв ред
Table 5.5.1.1: Four factor plan (decodet) of first order experiments

| ЧЕТИРИФАКТОРЕН ПЛАН НА ЕКСПЕРИМЕНТИ ОД ПРВ РЕД | | | | | |
|--|---|----------------|-------------|---------------------------|-----------------------------|
| Ред. број | Реална план матрица – независно променливи големини | | | | Параметар на температурат а |
| | v (m/min) | f (mm/vr) | a (mm) | r_{ε} (mm) | T (%) |
| 1. | 67,00 | 0,1 | 0,4 | 0,8 | |
| 2. | 133,00 | 0,1 | 0,4 | 0,8 | |
| 3. | 67,00 | 0,315 | 0,4 | 0,8 | |
| 4. | 133,00 | 0,315 | 0,4 | 0,8 | |
| 5. | 67,00 | 0,1 | 0,8 | 0,8 | |
| 6. | 133,00 | 0,1 | 0,8 | 0,8 | |
| 7. | 67,00 | 0,315 | 0,8 | 0,8 | |
| 8. | 133,00 | 0,15 | 0,8 | 0,8 | |
| 9. | 67,00 | 0,1 | 0,4 | 1,6 | |
| 10. | 133,00 | 0,1 | 0,4 | 1,6 | |
| 11. | 67,00 | 0,315 | 0,4 | 1,6 | |
| 12. | 133,00 | 0,315 | 0,4 | 1,6 | |
| 13. | 67,00 | 0,1 | 0,8 | 1,6 | |
| 14. | 133,00 | 0,1 | 0,8 | 1,6 | |
| 15. | 67,00 | 0,315 | 0,8 | 1,6 | |
| 16. | 133,00 | 0,315 | 0,8 | 1,6 | |
| 17. | 94,00 | 0,77 (0,18) | 0,566 | 1,13 (1,2) | |
| 18. | 94,00 | 0,177 (0,18) | 0,566 | 1,13 (1,2) | |
| 19. | 94,00 | 0,177 (0,18) | 0,566 | 1,13 (1,2) | |
| 20. | 94,00 | 0,177 (0,18) | 0,566 | 1,13 (1,2) | |

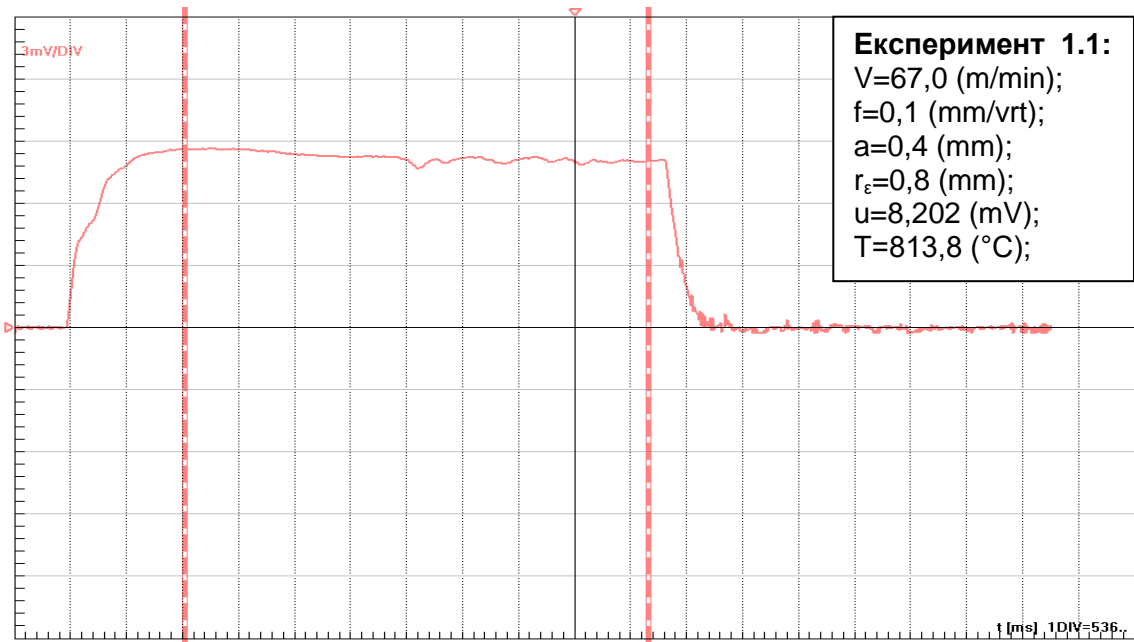
Табела 5.5.1.2: Четирифакторен план (кодирен) на експерименти од прв ред
 Table 5.5.1.2: Four factor plan (codet) of first order experiments

| ЧЕТИРИФАКТОРЕН ПЛАН НА ЕКСПЕРИМЕНТИ ОД ПРВ РЕД | | | | | | |
|--|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-------|
| Ред. број | Кодирана план матрица | | | | | T (%) |
| | X 0 | X 1 | X 2 | X 3 | X 4 | |
| 1. | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | |
| 2. | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | |
| 3. | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | |
| 4. | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | |
| 5. | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | |
| 6. | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | |
| 7. | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | |
| 8. | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | |
| 9. | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | |
| 10. | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | |
| 11. | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | |
| 12. | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | |
| 13. | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | |
| 14. | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | |
| 15. | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | |
| 16. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 17. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 18. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 19. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 20. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

5.6 РЕЗУЛТАТИ

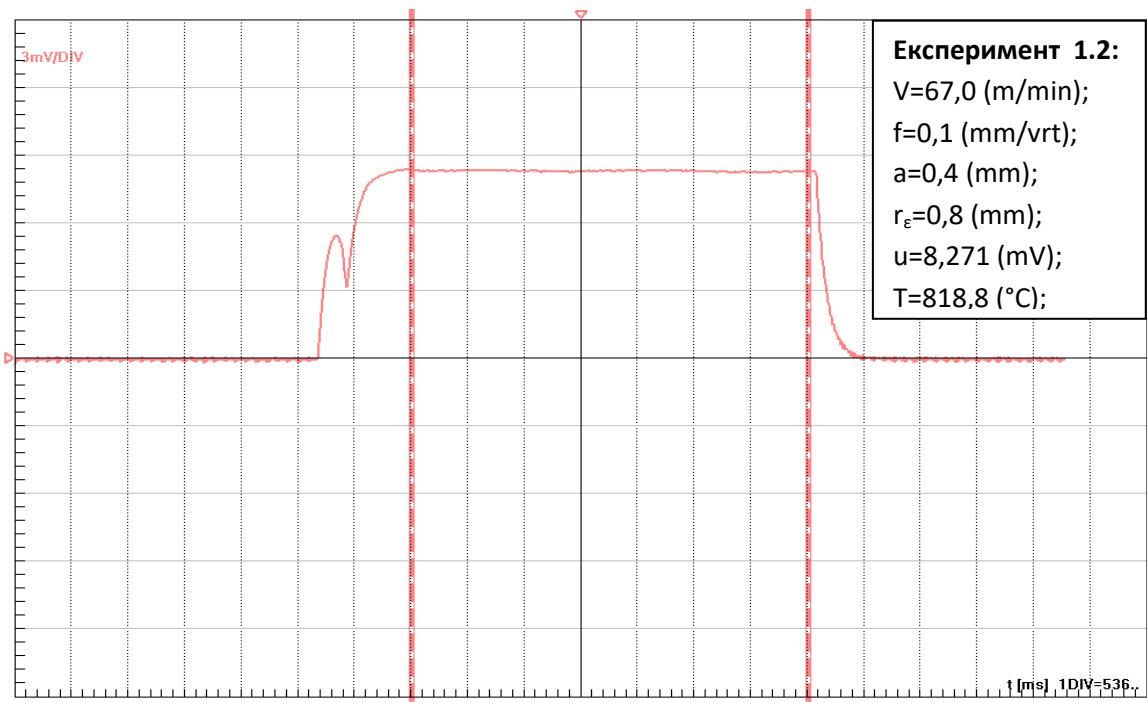
5.6.1 Резултати од мерење на средната температура во процесот на режење при обработка со стружење – графичка интерпретација на измерениот термонапон

Резултатите се прикажани на Слики 5.6.1.1, 5.6.1.2



Слика 5.6.1.1: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 1.1

Figure 5.5.1.1: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 1.1



Слика 5.6.1.2: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 1.2

Figure 5.6.1.2: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 1.2

Графичката интерполација за останатите експерименти се прикажани во Прилог на дисертацијата.

5.6.2. Определување на средната температура во процесот на режење при обработка со стружење врз основа на измерениот термонапон

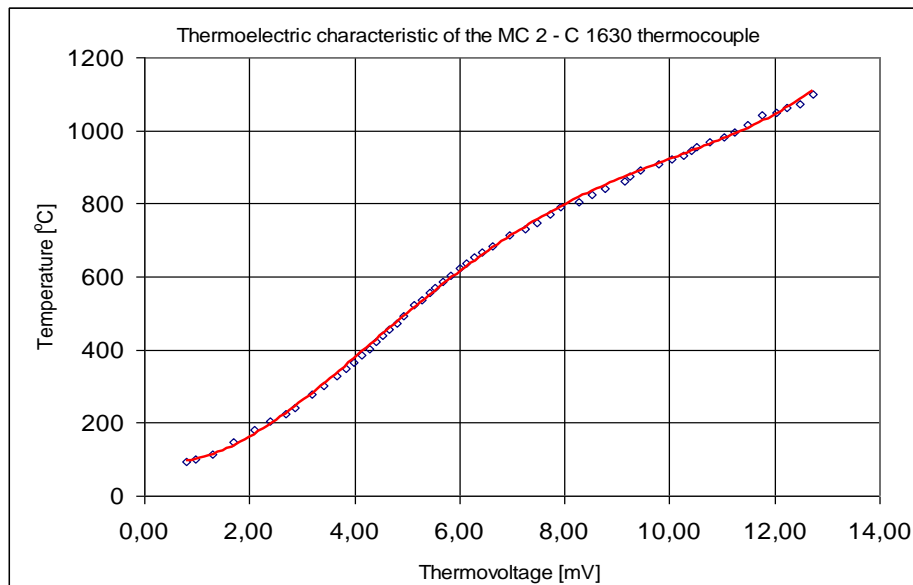
Измерената вредност на средната температура од три експерименти дадена е во Табела 5.6.2.1.

Табела 5.6.2.1: Измерена вредност на температурата

Table 5.6.2.1: Measured temperature value

| Ред. број на експеримент од план матрица (Табела 4.5.1.1 Табела 4.5.1.2) | Број на мерење | | | Средна вредност на температурата (°C) |
|--|----------------|-------|-------|---------------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 813,8 | 818,8 | 808,9 | 813,81 |
| 2 | 878,7 | 884,7 | 878,7 | 880,69 |
| 3 | 868,3 | 874,5 | 876,6 | 873,15 |
| 4 | 953,4 | 982,9 | 968,9 | 968,40 |
| 5 | 835,3 | 844,0 | 833,0 | 837,44 |
| 6 | 910,0 | 916,0 | 908,1 | 911,36 |
| 7 | 904,3 | 890,7 | 896,5 | 897,17 |
| 8 | 981,0 | 989,2 | 993,4 | 987,89 |
| 9 | 801,3 | 780,3 | 785,5 | 789,04 |
| 10 | 864,1 | 837,6 | 862,0 | 854,56 |
| 11 | 866,3 | 862,0 | 874,5 | 867,58 |
| 12 | 955,3 | 959,1 | 951,4 | 955,28 |
| 13 | 808,9 | 811,4 | 806,4 | 808,86 |
| 14 | 870,2 | 880,7 | 868,3 | 873,06 |
| 15 | 882,7 | 890,7 | 880,7 | 884,68 |
| 16 | 970,8 | 976,9 | 972,8 | 973,52 |
| 17 | 888,7 | 890,7 | 886,7 | 888,69 |
| 18 | 874,5 | 878,7 | 876,6 | 876,59 |
| 19 | 892,6 | 880,7 | 882,7 | 885,34 |
| 20 | 878,7 | 882,7 | 902,4 | 887,91 |

Зависноста на температурата од температурниот напон е прикажан на Слика 5.6.2.1, даден е и изразот за пресметка на температурата во зависност од температурниот напон.



Слика 5.6.2.1: Зависност на температурата од температурниот напон

Figure 5.6.2.1: Dependence of temperature on temperature voltage

$$T = 104,426 - 42,646 + 44,734u^2 - 4,937u^3 + 0,17u^4$$

6. МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ НА СРЕДНАТА ТЕМПЕРАТУРА ВО ПРОЦЕСОТ НА РЕЖЕЊЕ ПРИ ОБРАБОТКА СО СТРУЖЕЊЕ

6.1. ОБРАБОТКА НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОД ИЗВЕДЕНИТЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ МЕРЕЊА

Математичкото моделирање на средната температура во процесот на режење при обработка со стружење се реализира со примена на степенест облик на функцијата и четирифакторен потполн план на експерименти од прв ред ($2^4 + 4$).

Обработката на резултатите од изведените експериментални истражувања се реализира со примена на компјутерскиот софтвер CADEX (Computer Aided Design and analysis of Experiments). Параметрите на обработка со стружење дадени се во Табела 6.1.1.1.

Во процесот на математичкото моделирање опфатени се следните етапи:

1. Избор на план матрица за реализација на експериментите. Во овој случај, согласно усвоениот степенест облик на функцијата со која се опишува истражуваната појава, средната температура во процесот на режење, се избира четирифакторен план на експерименти од прв ред, со повторување во средната точка од истражуваниот хиперпростор.

Реалната план матрица е претставена во Табела 6.1.1.2, а кодираната план матрица во Табела 6.1.1.3;

2. Определување на корелацијата помеѓу влезните и излезните информации за:

- Математичкиот модел од прв ред без меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите $b(i)$, Табела 6.1.1.4;
- Математичкиот модел од прв ред без меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите $b(i)$, Табела 6.1.1.5;
- Математичкиот модел од прв ред со меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите $b(i)$, Табела 6.1.1.6 и
- Математичкиот модел од прв ред со меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите $b(i)$, Табела 6.1.1.7.

Разликата помеѓу измерената вредност на средната температура во процесот на режење при обработка со стружење и пресметковната вредност на истражуваната појава се прикажува преку грешката во (%).

Точноста пак на математичките модели е дефинирана со 95 % - интервали на доверба;

3. Оцена на значајноста на факторите $b(i)$ во:

- Математичкиот модел од прв ред без меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите $b(i)$, Табела 6.1.1.8;
- Математичкиот модел од прв ред без меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите $b(i)$, Табела 6.1.1.9;
- Математичкиот модел од прв ред со меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите $b(i)$, Табела 6.1.1.10 и
- Математичкиот модел од прв ред со меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите $b(i)$, Табела 6.1.1.11;

4. Дисперзиона анализа на:

- Математичкиот модел од прв ред без меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите $b(i)$, Табела 6.1.1.1;
- Математичкиот модел од прв ред без меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите $b(i)$, Табела 6.1.1.13;
- Математичкиот модел од прв ред со меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите $b(i)$, Табела 6.1.1.14; и
- Математичкиот модел од прв ред со меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите $b(i)$, Табела 6.1.15;

5. Изборот на математичкиот модел се определува врз основа на анализа на карактеристиките на моделот дадени во Табела 6.1.1.16, како:

- Бројот на членови во полиномот;
- Пресметковниот и табличниот коефициент на адекватност на моделот;

- Оцената на адекватноста на моделот, резидуалната сума, грешката од експериментот; и
- Коефициентот на повеќекратна регресија.

Табела 6.1.1.1: Карактеристики на независно променливите големини
Table 6.1.1.1: Characteristics of independent variable sizes

| КАРАКТЕРИСТИКИ НА НЕЗАВИСНО ПРОМЕНЛИВИТЕ ГОЛЕМИНИ | | | | | |
|---|---------------------|------|------------|--------|-----------|
| Број | Означување | Ниво | Максимално | Средно | Минимално |
| | | Код | 1 | 0 | -1 |
| 1. | v (mm/min) | X 1 | 133,00 | 94,398 | 67,00 |
| 2. | f (mm/vrt) | X 2 | 0,315 | 0,177 | 0,1 |
| 3. | a (mm) | X 3 | 0,8 | 0,566 | 0,4 |
| 4. | r _ε (mm) | X 4 | 1,6 | 1,131 | 0,8 |

Табела 6.1.1.2: Четирифакторен план на експерименти од прв ред
Table 6.1.1.2: Four factor plan of first order experiments

| ЧЕТИРИФАКТОРЕН ПЛАН НА ЕКСПЕРИМЕНТИ ОД ПРВ РЕД | | | | | |
|--|---|--------------|--------|---------------------|----------------------|
| Ред. број | Реална план матрица – независно променливи големини | | | | Измерена вредност |
| | v (m/min.) | f (mm/vr.) | a (mm) | r _ε (mm) | T _{сп} (°C) |
| 1. | 67,00 | 0,1 | 0,4 | 0,8 | 813,810 |
| 2. | 133,00 | 0,1 | 0,4 | 0,8 | 880,690 |
| 3. | 67,00 | 0,315 | 0,4 | 0,8 | 873,150 |
| 4. | 133,00 | 0,315 | 0,4 | 0,8 | 968,400 |
| 5. | 67,00 | 0,1 | 0,8 | 0,8 | 837,440 |
| 6. | 133,00 | 0,1 | 0,8 | 0,8 | 911,360 |
| 7. | 67,00 | 0,315 | 0,8 | 0,8 | 897,170 |
| 8. | 133,00 | 0,315 | 0,8 | 0,8 | 987,890 |
| 9. | 67,00 | 0,1 | 0,4 | 1,6 | 789,040 |
| 10. | 133,00 | 0,1 | 0,4 | 1,6 | 854,560 |
| 11. | 67,00 | 0,315 | 0,4 | 1,6 | 867,580 |
| 12. | 133,00 | 0,315 | 0,4 | 1,6 | 955,280 |
| 13. | 67,00 | 0,1 | 0,8 | 1,6 | 808,860 |
| 14. | 133,00 | 0,1 | 0,8 | 1,6 | 873,060 |
| 15. | 67,00 | 0,315 | 0,8 | 1,6 | 884,680 |
| 16. | 133,00 | 0,315 | 0,8 | 1,6 | 973,520 |
| 17. | 94,00 | 0,177 (0,18) | 0,566 | 1,13 (1,2) | 888,690 |
| 18. | 94,00 | 0,177 (0,18) | 0,566 | 1,13 (1,2) | 876,590 |
| 19. | 94,00 | 0,177 (0,18) | 0,566 | 1,13 (1,2) | 885,340 |
| 20. | 94,00 | 0,177 (0,18) | 0,566 | 1,13 (1,2) | 887,910 |

Табела 6.1.1.3: Четирифакторен план на експерименти од прв ред
 Table 6.1.1.3: Four factor plan of first order experiments

| ЧЕТИРИФАКТОРЕН ПЛАН НА ЕКСПЕРИМЕНТИ ОД ПРВ РЕД | | | | | | |
|--|-----------------------|-----|-----|-----|-----|----------------------|
| Ред. број | Кодирана план матрица | | | | | Измерена вредност |
| | X 0 | X 1 | X 2 | X 3 | X 4 | T _{сп} (°C) |
| 1. | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 813,810 |
| 2. | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 880,690 |
| 3. | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 873,150 |
| 4. | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 968,400 |
| 5. | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 837,440 |
| 6. | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 911,360 |
| 7. | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 897,170 |
| 8. | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 987,890 |
| 9. | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 789,040 |
| 10. | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 854,560 |
| 11. | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 867,580 |
| 12. | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 955,280 |
| 13. | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 808,860 |
| 14. | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 873,060 |
| 15. | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 884,680 |
| 16. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 973,520 |
| 17. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 888,690 |
| 18. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 876,590 |
| 19. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 885,340 |
| 20. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 887,910 |

Табела 6.1.1.4: Корелација на влезно-излезните информации за математички модел
 Table 6.1.1.4: Correlation of the input-output information about the mathematical model

| КОРЕЛАЦИЈА НА ВЛЕЗНО-ИЗЛЕЗНИТЕ ИНФОРМАЦИИ ЗА МАТЕМАТИЧКИОТ МОДЕЛ ОД ПРВ РЕД БЕЗ МЕЃУСЕБНО ДЕЈСТВО И БЕЗ ОЦЕНА НА ЗНАЧАЈНОСТА НА ФАКТОРИТЕ b (i) | | | | |
|---|---|---|---------------|----------------------------|
| Ред. број | Измерена вредност T _{ср} (°C) | Пресметковна вредност T _{ср} (°C) | Грешка во (%) | 95 % - Интервал на доверба |
| 1. | 813,810 | 808,183 | 0,691 | 800,262 - 816,182 |
| 2. | 880,690 | 883,362 | -0,303 | 874,704 - 892,105 |
| 3. | 873,150 | 884,257 | -1,272 | 875,591 - 893,009 |
| 4. | 968,400 | 966,512 | 0,195 | 957,039 - 976,078 |
| 5. | 837,440 | 828,081 | 1,118 | 819,965 - 836,277 |
| 6. | 911,360 | 905,110 | 0,686 | 896,239 - 914,069 |
| 7. | 897,170 | 906,028 | -0,987 | 897,147 - 914,995 |
| 8. | 987,890 | 990,308 | -0,245 | 980,602 - 1000,110 |
| 9. | 789,040 | 789,472 | -0,055 | 781,734 - 797,286 |
| 10. | 854,560 | 862,910 | -0,977 | 854,454 - 871,452 |
| 11. | 867,580 | 863,785 | 0,437 | 855,319 - 872,334 |
| 12. | 955,280 | 944,136 | 1,167 | 934,883 - 953,481 |
| 13. | 808,860 | 808,909 | -0,006 | 800,982 - 816,916 |
| 14. | 873,060 | 884,156 | -1,271 | 875,490 - 892,907 |
| 15. | 884,680 | 885,052 | -0,042 | 876,378 - 893,812 |
| 16. | 973,520 | 967,381 | 0,631 | 957,899 - 976,955 |
| 17. | 888,690 | 884,206 | 0,505 | 880,658 - 887,768 |
| 18. | 876,590 | 884,206 | -0,869 | 880,658 - 887,768 |
| 19. | 885,340 | 884,206 | 0,128 | 880,658 - 887,768 |
| 20. | 887,910 | 884,206 | 0,417 | 880,658 - 887,768 |

Табела 6.1.1.5: Корелација на влезно-излезните информации за математички модел

Table 6.1.1.5: Correlation of the input-output information about the mathematical model

| КОРЕЛАЦИЈА НА ВЛЕЗНО-ИЗЛЕЗНИТЕ ИНФОРМАЦИИ ЗА МАТЕМАТИЧКИОТ МОДЕЛ ОД ПРВ РЕД БЕЗ МЕЃУСЕБНО ДЕЈСТВО И СО ОЦЕНА НА ЗНАЧАЈНОСТА НА ФАКТОРИТЕ b_i | | | | |
|--|------------------------------------|--|---------------|----------------------------|
| Ред. број | Измерена вредност T_{cp} (°C) | Пресметковна вредност T_{cp} (°C) | Грешка во (%) | 95 % - Интервал на доверба |
| 1. | 813,810 | 808,183 | 0,691 | 800,262 - 816.182 |
| 2. | 880,690 | 883,362 | -0,303 | 874,704 - 892.105 |
| 3. | 873,150 | 884,257 | -1,272 | 875,591 - 893.009 |
| 4. | 968,400 | 966,512 | 0,195 | 957,039 - 976.078 |
| 5. | 837,440 | 828,081 | 1,118 | 819,965 - 836.277 |
| 6. | 911,360 | 905,110 | 0,686 | 896,239 - 914.069 |
| 7. | 897,170 | 906,028 | -0,987 | 897,147 - 914.995 |
| 8. | 987,890 | 990,308 | -0,245 | 980,602 - 1000.110 |
| 9. | 789,040 | 789,472 | -0,055 | 781,734 - 797.286 |
| 10. | 854,560 | 862,910 | -0,977 | 854,454 - 871.452 |
| 11. | 867,580 | 863,785 | 0,437 | 855,319 - 872.334 |
| 12. | 955,280 | 944,136 | 1,167 | 934,883 - 953.481 |
| 13. | 808,860 | 808,909 | -0,006 | 800,982 - 816.916 |
| 14. | 873,060 | 884,156 | -1,271 | 875,490 - 892.907 |
| 15. | 884,680 | 885,052 | -0,042 | 876,378 - 893.812 |
| 16. | 973,520 | 967,381 | 0,631 | 957.899 - 976.955 |
| 17. | 888,690 | 884,206 | 0,505 | 880.658 - 887.768 |
| 18. | 876,590 | 884,206 | -0,869 | 880.658 - 887.768 |
| 19. | 885,340 | 884,206 | 0,128 | 880.658 - 887.768 |
| 20. | 887,910 | 884,206 | 0,417 | 880.658 - 887.768 |

Табела 6.1.1.6: Корелација на влезно-излезните информации за математички модел

Table 6.1.1.6: Correlation of the input-output information about the mathematical model

| КОРЕЛАЦИЈА НА ВЛЕЗНО-ИЗЛЕЗНИТЕ ИНФОРМАЦИИ ЗА МАТЕМАТИЧКИОТ МОДЕЛ ОД ПРВ РЕД СО МЕЃУСЕБНО ДЕЈСТВО И БЕЗ ОЦЕНА НА ЗНАЧАЈНОСТА НА ФАКТОРИТЕ b (i) | | | | |
|--|--|--|------------------|----------------------------|
| Ред. број | Измерена вредност T _{ср} (°C) | Пресметковна вредност T _{ср} (°C) | Грешка во (%) | 95 % - Интервал на доверба |
| 1. | 813,810 | 813,904 | -0,012 | 809,049 - 818,789 |
| 2. | 880,690 | 880,792 | -0,012 | 875,538 - 886,078 |
| 3. | 873,150 | 873,251 | -0,012 | 868,041 - 878,491 |
| 4. | 968,400 | 968,512 | -0,012 | 962,734 - 974,324 |
| 5. | 837,440 | 837,538 | -0,012 | 832,541 - 842,563 |
| 6. | 911,360 | 911,466 | -0,012 | 906,028 - 916,935 |
| 7. | 897,170 | 897,275 | -0,012 | 891,921 - 902,659 |
| 8. | 987,890 | 988,005 | -0,012 | 982,110 - 993,934 |
| 9. | 789,040 | 789,132 | -0,012 | 784,425 - 793,868 |
| 10. | 854,560 | 854,660 | -0,012 | 849,561 - 859,789 |
| 11. | 867,580 | 867,681 | -0,012 | 862,506 - 872,888 |
| 12. | 955,280 | 955,392 | -0,012 | 949,692 - 961,125 |
| 13. | 808,860 | 808,955 | -0,012 | 804,129 - 813,809 |
| 14. | 873,060 | 873,162 | -0,012 | 867,953 - 878,402 |
| 15. | 884,680 | 884,783 | -0,012 | 879,505 - 890,094 |
| 16. | 973,520 | 973,634 | -0,012 | 967,825 - 979,477 |
| 17. | 888,690 | 884,206 | 0,505 | 883,016 - 885,397 |
| 18. | 876,590 | 884,206 | -0,869 | 883,016 - 885,397 |
| 19. | 885,340 | 884,206 | 0,128 | 883,016 - 885,397 |
| 20. | 887,910 | 884,206 | 0,417 | 883,016 - 885,397 |

Табела 6.1.1.7: Корелација на влезно-излезните информации за математички модел
 Table 6.1.1.7: Correlation of the input-output information about the mathematical model

| КОРЕЛАЦИЈА НА ВЛЕЗНО-ИЗЛЕЗНИТЕ ИНФОРМАЦИИ ЗА МАТЕМАТИЧКИОТ МОДЕЛ ОД ПРВ РЕД СО МЕЃУСЕБНО ДЕЈСТВО И СО ОЦЕНА НА ЗНАЧАЈНОСТА НА ФАКТОРИТЕ b (i) | | | | |
|---|--|--|------------------|----------------------------|
| Ред. број | Измерена вредност T _{ср} (°C) | Пресметковна вредност T _{ср} (°C) | Грешка во (%) | 95 % - Интервал на доверба |
| 1. | 813,810 | 812,741 | 0,131 | 806,382 - 819,149 |
| 2. | 880,690 | 888,343 | -0,869 | 881,393 - 895,348 |
| 3. | 873,150 | 879,298 | -0,704 | 872,419 - 886,232 |
| 4. | 968,400 | 961,092 | 0,755 | 953,573 - 968,670 |
| 5. | 837,440 | 832,751 | 0,560 | 826,235 - 839,317 |
| 6. | 911,360 | 910,215 | 0,126 | 903,093 - 917,391 |
| 7. | 897,170 | 900,947 | -0,421 | 893,899 - 908,051 |
| 8. | 987,890 | 984,755 | 0,317 | 977,050 - 992,519 |
| 9. | 789,040 | 785,045 | 0,506 | 778,904 - 791,236 |
| 10. | 854,560 | 858,072 | -0,411 | 851,358 - 864,837 |
| 11. | 867,580 | 868,656 | -0,124 | 861,859 - 875,505 |
| 12. | 955,280 | 949,460 | 0,609 | 942,031 - 956,946 |
| 13. | 808,860 | 804,373 | 0,555 | 798,081 - 810,716 |
| 14. | 873,060 | 879,198 | -0,703 | 872,319 - 886,30 |
| 15. | 884,680 | 890,043 | -0,606 | 883,079 - 897,060 |
| 16. | 973,520 | 972,836 | 0,070 | 965,225 - 980,506 |
| 17. | 888,690 | 884,206 | 0,505 | 881,630 - 886,788 |
| 18. | 876,590 | 884,206 | -0,869 | 881,630 - 886,788 |
| 19. | 885,340 | 884,206 | 0,128 | 881,630 - 886,788 |
| 20. | 887,910 | 884,206 | 0,417 | 881,630 - 886,788 |

Табела 6.1.8: Со оцена на значајноста на на факторите b (i)
 Table 6.1.8: With assessment of the significance of the factors b (i)

| СО ОЦЕНА НА ЗНАЧАЈНОСТА НА ФАКТОРИТЕ b (i) | | | | | | | |
|--|----------------|------------------|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------|---|
| Математички модел од прв ред без меѓусебно дејство | | | | | | | |
| Коефициенти од математичкиот модел | | | Степен на слобода F (i) | Сума на квадрати S (i) | Дисперзија S (i) / F (i) | Дисперзиони односи FR (i) | Оцена на значајноста на факторите b (i) |
| Индекс i | Кодирани b (i) | Декодирани p (i) | | | | | |
| 0 | 6,785 | 575,063 | 1 | 920,641 | 920,641 | >99999 | Значаен |
| 1 | 0,04447 | 0,1297238 | 1 | 0,031646 | 0,031646 | 800,1 | Значаен |
| 2 | 0,04498 | 0,0784023 | 1 | 0,032371 | 0,032371 | 818,4 | Значаен |
| 3 | 0,01216 | 0,0350896 | 1 | 0,002366 | 0,002366 | 59,8 | Значаен |
| 4 | -0,01171 | -0,0337936 | 1 | 0,002195 | 0,002195 | 55,5 | Значаен |
| Ако е $FR(i) < 10,130 = >$ незначаен | | | | Ако е $FR(i) \geq 10,130 = >$ значаен | | | |

Табела 6.1.9: Со оцена на значајноста на на факторите b (i)
 Table 6.1.9: With assessment of the significance of the factors b (i)

| ОЦЕНА НА ЗНАЧАЈНОСТА НА ФАКТОРИТЕ b (i) | | | | | | | |
|---|----------------|------------------|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------|---|
| Математички модел од прв ред со меѓусебно дејство | | | | | | | |
| Коефициенти од математичкиот модел | | | Степен на слобода F (i) | Сума на квадрати S (i) | Дисперзија S (i) / F (i) | Дисперзиони односи FR (i) | Оцена на значајноста на факторите b (i) |
| Индекс i | Кодирани b (i) | Декодирани p (i) | | | | | |
| 0 | 6,785 | 571,603 | 1 | 920,641 | 920,641 | >999999 | Значаен |
| 1 | 0,04447 | 0,1297238 | 1 | 0,031646 | 0,031646 | 800,1 | Значаен |
| 2 | 0,04498 | 0,0749114 | 1 | 0,032371 | 0,032371 | 818,4 | Значаен |
| 3 | 0,01216 | 0,0350896 | 1 | 0,002366 | 0,002366 | 59,8 | Значаен |
| 4 | -0,01171 | -0,0151036 | 1 | 0,002195 | 0,002195 | 55,5 | Значаен |
| 12 | 0,00451 | 0,0000000 | 1 | 0,000325 | 0,000325 | 8,2 | Незначаен |
| 13 | -0,00035 | 0,0000000 | 1 | 0,000002 | 0,000002 | 0,04954 | Незначаен |
| 14 | -0,00096 | 0,0000000 | 1 | 0,000015 | 0,000015 | 0,36952 | Незначаен |
| 23 | -0,00147 | 0,0000000 | 1 | 0,000035 | 0,000035 | 0,87899 | Незначаен |
| 24 | 0,00562 | 0,0282825 | 1 | 0,000506 | 0,000506 | 12,8 | Значаен |
| 34 | -0,00158 | 0,0000000 | 1 | 0,000040 | 0,000040 | 1,0 | Незначаен |
| 123 | -0,00063 | 0,0000000 | 1 | 0,000006 | 0,000006 | 0,15914 | Незначаен |
| 124 | -0,00003 | 0,0000000 | 1 | 0,000000 | 0,000000 | 0,00033 | Незначаен |
| 134 | -0,00015 | 0,0000000 | 1 | 0,000000 | 0,000000 | 0,00905 | Незначаен |
| 234 | 0,00050 | 0,0000000 | 1 | 0,000004 | 0,000004 | 0,10104 | Незначаен |
| 1234 | 0,00098 | 0,0000000 | 1 | 0,000015 | 0,000015 | 0,38498 | Незначаен |
| Ако е $FR(i) < 10,130 = >$ незначаен | | | | Ако е $FR(i) \geq 10,130 = >$ значаен | | | |

Табела 6.1.10: Без оцена на значајноста на на факторите b (i)
Table 6.1.10: Without assessment of the significance of the factors b (i)

| БЕЗ ОЦЕНА НА ЗНАЧАЈНОСТА НА ФАКТОРИТЕ b (i) | | | | | | | |
|--|----------------|------------------|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------|---|
| Математички модел од прв ред без меѓусебно дејство | | | | | | | |
| Коефициенти од математичкиот модел | | | Степен на слобода F (i) | Сума на квадрати S (i) | Дисперзија S (i) / F (i) | Дисперзиони односи FR (i) | Оцена на значајноста на факторите b (i) |
| Индекс i | Кодирани b (i) | Декодирани p (i) | | | | | |
| 0 | 6,785 | 575,063 | 1 | 920,641 | 920,641 | >999999 | Значаен |
| 1 | 0,04447 | 0,1297238 | 1 | 0,031646 | 0,031646 | 800,1 | Значаен |
| 2 | 0,04498 | 0,0784023 | 1 | 0,032371 | 0,032371 | 818,4 | Значаен |
| 3 | 0,01216 | 0,0350896 | 1 | 0,002366 | 0,002366 | 59,8 | Значаен |
| 4 | -0,01171 | -0,0337936 | 1 | 0,002195 | 0,002195 | 55,5 | Значаен |
| Ако е $FR(i) < 10,130 = >$ незначаен | | | | Ако е $FR(i) \geq 10,130 = >$ значаен | | | |

Табела 6.1.11: Без оцена на значајноста на на факторите b (i)
Table 6.1.11: Without assessment of the significance of the factors b (i)

| БЕЗ ОЦЕНА НА ЗНАЧАЈНОСТА НА ФАКТОРИТЕ b (i) | | | | | | | |
|---|----------------|------------------|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------|---|
| Математички модел од прв ред со меѓусебно дејство | | | | | | | |
| Коефициенти од математичкиот модел | | | Степен на слобода F (i) | Сума на квадрати S (i) | Дисперзија S (i) / F (i) | Дисперзиони односи FR (i) | Оцена на значајноста на факторите b (i) |
| Индекс i | Кодирани b (i) | Декодирани p (i) | | | | | |
| 0 | 6,785 | 506,007 | 1 | 920,641 | 920,641 | >999999 | Значаен |
| 1 | 0,04447 | 0,1549320 | 1 | 0,031646 | 0,031646 | 800,1 | Значаен |
| 2 | 0,04498 | 0,0027419 | 1 | 0,032371 | 0,032371 | 818,4 | Значаен |
| 3 | 0,01216 | 0,1461194 | 1 | 0,002366 | 0,002366 | 59,8 | Значаен |
| 4 | -0,01171 | -0,1209403 | 1 | 0,002195 | 0,002195 | 55,5 | Значаен |
| 12 | 0,00451 | 0,0148291 | 1 | 0,000325 | 0,000325 | 8,2 | Незначаен |
| 13 | -0,00035 | -0,0272176 | 1 | 0,000002 | 0,000002 | 0,04954 | Незначаен |
| 14 | -0,00096 | 0,0298401 | 1 | 0,000015 | 0,000015 | 0,36952 | Незначаен |
| 23 | -0,00147 | 0,0567142 | 1 | 0,000035 | 0,000035 | 0,87899 | Незначаен |
| 24 | 0,00562 | -0,0726754 | 1 | 0,000506 | 0,000506 | 12,8 | Значаен |
| 34 | -0,00158 | -0,3087565 | 1 | 0,000040 | 0,000040 | 1,0 | Незначаен |
| 123 | -0,00063 | -0,0142986 | 1 | 0,000006 | 0,000006 | 0,15914 | Незначаен |
| 124 | -0,00003 | 0,0231093 | 1 | 0,000000 | 0,000000 | 0,00033 | Незначаен |
| 134 | -0,00015 | 0,0677623 | 1 | 0,000000 | 0,000000 | 0,00905 | Незначаен |
| 234 | 0,00050 | -0,1805365 | 1 | 0,000004 | 0,000004 | 0,10104 | Незначаен |
| 1234 | 0,00098 | 0,0412949 | 1 | 0,000015 | 0,000015 | 0,38498 | Незначаен |
| Ако е $FR(i) < 10,130 = >$ незначаен | | | | Ако е $FR(i) \geq 10,130 = >$ значаен | | | |

Табела 6.1.12: Дисперзиона анализа
Table 6.1.12: Dispersion analysis

| ДИСПЕРЗИОНА АНАЛИЗА | | | | | | |
|--|---------------------|--------------------|--|------------------------|----------------------|----------------------------------|
| Математички модел од прв ред без меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите b (i) | | | | | | |
| | Степен на слобода F | Сума на квадрати S | Дисперзија S/F | Дисперзион и односи FR | Таблична вредност FT | Оцена на адекватноста на моделот |
| Резидуална сума | 15 | 0,001068 | 0,000071 | | | |
| Грешка од експериментот | 3 | 0,000119 | 0,000040 | | | |
| Адекватност на моделот | 12 | 0,000949 | 0,000079 | 2,000 | 8,740 | Адекватен |
| Коефициент на повеќекратна регресија | | | | | 0,9923 | |
| Ако е $FR < FT \Rightarrow$ адекватен | | | Ако е $FR \geq FT \Rightarrow$ неадекватен | | | |

Табела 6.1.13: Дисперзиона анализа
Table 6.1.13: Dispersion analysis

| ДИСПЕРЗИОНА АНАЛИЗА | | | | | | |
|---|---------------------|--------------------|--|----------------------|----------------------|----------------------------------|
| Математички модел од прв ред без меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите b (i) | | | | | | |
| | Степен на слобода F | Сума на квадрати S | Дисперзија S/F | Дисперзион односи FR | Таблична вредност FT | Оцена на адекватноста на моделот |
| Резидуална сума | 15 | 0,001068 | 0,000071 | | | |
| Грешка од експериментот | 3 | 0,000119 | 0,000040 | | | |
| Адекватност на моделот | 12 | 0,000949 | 0,000079 | 2,000 | 8,740 | Адекватен |
| Коефициент на повеќекратна регресија | | | | | 0,9923 | |
| Ако е $FR < FT \Rightarrow$ адекватен | | | Ако е $FR \geq FT \Rightarrow$ неадекватен | | | |

Табела 6.1.1.4: Дисперзиона анализа
Table 6.1.14: Dispersion analysis

| ДИСПЕРЗИОНА АНАЛИЗА | | | | | | |
|---|------------------------|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Математички модел од прв ред со меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите b (i) | | | | | | |
| | Степен на слобода F | Сума на квадрат и S | Дисперзија S/F | Дисперзиони односи FR | Таблична вредност FT | Оцена на адекватноста на моделот |
| Резидуална сума | 15 | 0,000120 | 0,000008 | | | |
| Грешка од експериментот | 3 | 0,000119 | 0,000040 | | | |
| Адекватност на моделот | 12 | 0,000001 | 0,000000083 | 0,002300 | 8,740 | Адекватен |
| Коефициент на повеќекратна регресија | | | | | 0,9991 | |
| Ако е $FR < FT = >$ адекватен | | | Ако е $FR \geq FT = >$ неадекватен | | | |

Табела 6.1.1.5: Дисперзиона анализа
Table 6.1.15: Dispersion analysis

| ДИСПЕРЗИОНА АНАЛИЗА | | | | | | |
|--|------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Математички модел од прв ред со меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите b (i) | | | | | | |
| | Степен на слобода F | Сума на квадрат и S | Дисперзија S/F | Дисперзиони и односи FR | Таблична вредност FT | Оцена на адекватноста на моделот |
| Резидуална сума | 15 | 0,000562 | 0,000037 | | | |
| Грешка од експериментот | 3 | 0,000119 | 0,000040 | | | |
| Адекватност на моделот | 12 | 0,000443 | 0,000037 | 0,934287 | 8,740 | Адекватен |
| Коефициент на повеќекратна регресија | | | | | 0.9960 | |
| Ако е $FR < FT = >$ адекватен | | | Ако е $FR \geq FT = >$ неадекватен | | | |

Табела 6.1.16: Преглед на карактеристики за избор на варијанта на математички модел

Table 6.1.16: An overview of the choice characteristics for a mathematical model variant

| ПРЕГЛЕД НА КАРАКТЕРИСТИКИ ЗА ИЗБОР НА ВАРИЈАНТА НА МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ | | | | |
|--|--|---|---|--|
| Карактеристики на математичкиот модел | Без меѓусебно дејство и без оцена на значајноста | Без меѓусебно дејство и со оцена на значајноста | Со меѓусебно дејство и без оцена на значајноста | Со меѓусебно дејство и со оцена на значајноста |
| Број на членови во полиномот | 5 | 5 | 16 | 6 |
| Пресметковен коефициент на адекватност на моделот | 2,000 | 2,000 | 0,0023002 | 0,9342866 |
| Табличен коефициент на адекватност на моделот | 8,740 | 8,740 | 8,740 | 8,740 |
| Оцена на адекватноста на моделот (адекватен/неадекватен) | Адекватен | Адекватен | Адекватен | Адекватен |
| Резудуална сума | 0,0010681 | 0,0010681 | 0,0001198 | 0,0005621 |
| Грешка од експериментот | 0,0001187 | 0,0001187 | 0,0001187 | 0,0001187 |
| Коефициент на повеќекратна регресија | 0,99230 | 0,99230 | 0,99914 | 0,99596 |

6.2. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛИ

Врз основа на средните вредности на измерените параметри и нивната математичка обработка, добиен е следниов математички модел за параметрите на средната температура:

- Математичкиот модел од прв ред без меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите:

$$T = 575,063 \cdot v^{0.1297238} \cdot f^{0.0784023} \cdot a^{0.0350896} \cdot r_{\varepsilon}^{-0.0337936}$$

- Математичкиот модел од прв ред без меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите:

$$T = 575,063 \cdot v^{0.1297238} \cdot f^{0.0784023} \cdot a^{0.0350896} \cdot r_{\varepsilon}^{-0.0337936}$$

- Математичкиот модел од прв ред со меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите:

$$T = 506,007 \cdot v^{0.1549320} \cdot f^{0.0027419} \cdot a^{0.1461194} \cdot r_{\varepsilon}^{-0.1209403} \cdot \exp(x)$$

каде:

$$\begin{aligned} x = & 0.0148291 \cdot \ln v \cdot \ln f - 0.0272176 \cdot \ln v \cdot \ln a + 0.0298401 \cdot \ln v \cdot \ln r_{\varepsilon} \\ & + 0.567142 \cdot \ln f \cdot \ln a - 0.0726754 \cdot \ln f \cdot \ln r_{\varepsilon} - 0.3087565 \cdot \ln a \cdot \ln r_{\varepsilon} - 0.0142986 \\ & \cdot \ln v \cdot \ln f \cdot \ln a + 0.0231093 \cdot \ln v \cdot \ln f \cdot \ln r_{\varepsilon} + 0.0677623 \cdot \ln v \cdot \ln a \cdot \ln r_{\varepsilon} - \\ & 0.1805365 \cdot \ln f \cdot \ln a \cdot \ln r_{\varepsilon} + 0.0412949 \cdot \ln v \cdot \ln f \cdot \ln a \cdot \ln r_{\varepsilon} \end{aligned}$$

- Математичкиот модел од прв ред со меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите:

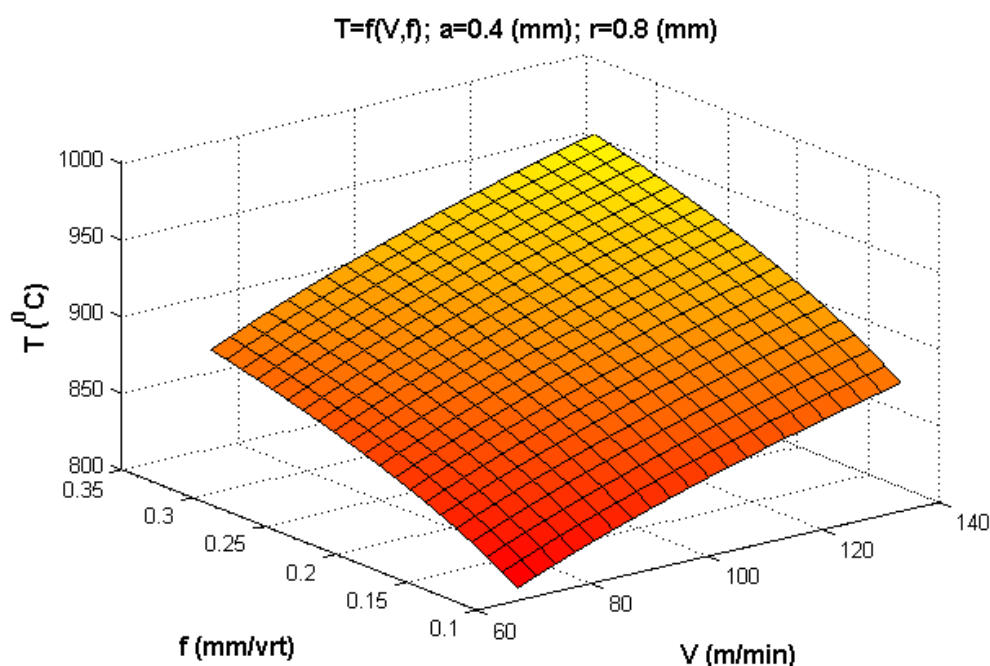
$$T = 571,603 \cdot v^{0.1297238} \cdot f^{0.0749114} \cdot a^{0.0350896} \cdot r_{\varepsilon}^{-0.0151036} \cdot \exp(x)$$

каде:

$$x = 0.0282825 \cdot \ln f \cdot \ln r_{\varepsilon}$$

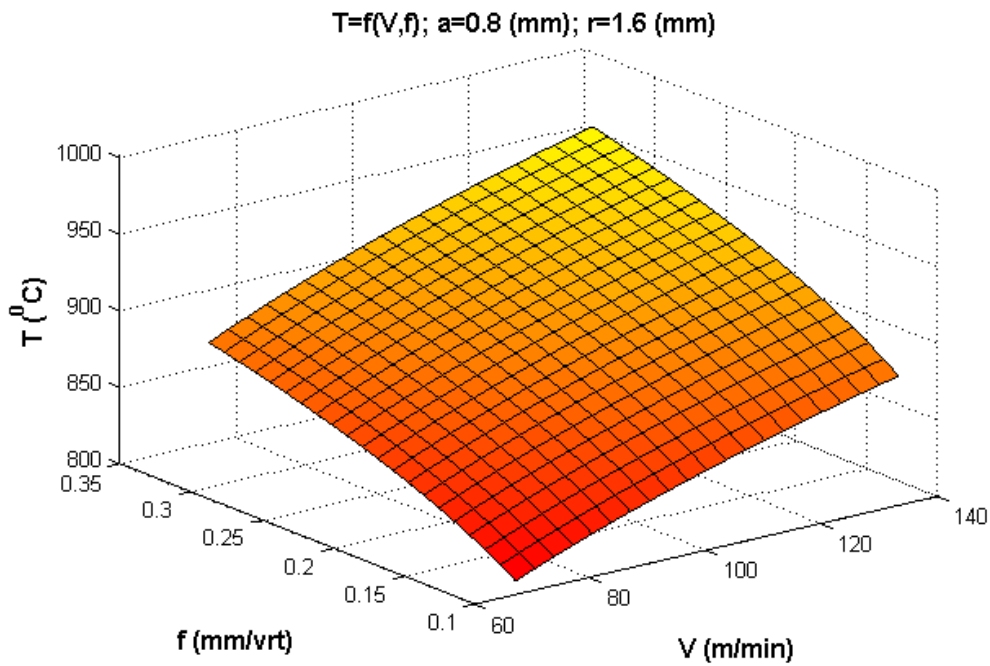
6.3. ГРАФИЧКА ИНТЕРПРЕТАЦИЈА НА МАТЕМАТИЧКИТЕ МОДЕЛИ

Со цел да се даде графички приказ на зависностите помеѓу истражуваните големини, во продолжение се дадени интерпретации за математичкиот модел за параметарот T во зависност од режимот на режење (v , s , a , r_z), изработени во Matlab. На дијаграмите се прикажани T во функција од два непроменливи и два променливи влезни параметри. Во продолжение се дадени дијаграмите само за два примери, а за останатите, дијаграмите се прикажани во Прилогот на дисертацијата.



Слика 6.3.1: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од брзината на режење V (m/min) и поместот f (mm/vrt), при длабочина на режење $a=0,4$ (mm) и радиус на врвот на резачката плочка $r=0,8$ (mm)

Figure 6.3.1: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of the cutting speed V (m/min) and the feed rate f (mm/rev), at a cutting depth $a = 0,4$ (mm) and the tool nose radius $r = 0,8$ (mm)



Слика 6.3.2: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од брзината на режење $V \text{ (m/min)}$ и поместот $f \text{ (mm/vrt)}$, при длабочина на режење $a=0,8 \text{ (mm)}$ и радиус на врвот на резачката плочка $r=1,6 \text{ (mm)}$

Figure 6.3.2: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of the cutting speed $V \text{ (m/min)}$ and the feed rate $f \text{ (mm/rev)}$, at a cutting depth $a = 0,4 \text{ (mm)}$ and the tool nose radius $r = 1,6 \text{ (mm)}$

Останатите графички прикази се прикажани во Прилог на дисертацијата.

7. АНАЛИЗА НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Од извршените мерења на температурата, во зависност од брзината (m/min), поместот (mm/vrt), длабочина на режење (0.4 и 0,8 mm), радиус на врвот на плочката (0,8 и 1,6 mm), може да се даде следната анализа (Математичкиот модел од прв ред без меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите).

Брзината, со зголемување на брзината, а при тоа параметрите помест, длабочина на режење и радиусот на врвот од плочката се непроменети - константни. Овде има повеќе варијанти, трите параметри (помест, длабочина на режење и радиус на врвот на алатот) се земаат за секоја пресметка со нивната вредност.

Зголемување/намалување на температурата во зависност од брзината од (67 и 133) m/min:

- При: $f=0,1$, $a=0,4$ $r=0,8$, $T_{,133/67} = 1,082$
- При: $f=0,315$, $a=0,4$ $r=0,8$, $T_{133/67} = 1,11\%$
- При: $f=0,1$, $a=0,8$ $r=0,8$, $T_{,133/67} = 1,088$
- При: $f=0,315$, $a=0,8$ $r=0,8$, $T_{,133/67} = 1,10$
- При: $f=0,1$, $a=0,4$ $r=1,6$, $T_{,133/67} = 1,083$
- При: $f=0,315$, $a=0,4$ $r=1,6$, $T_{,133/67} = 1,097$
- При: $f=0,1$, $a=0,8$ $r=1,6$, $T_{,133/67} = 1,079$
- При: $f=0,315$, $a=0,8$ $r=1,6$, $T_{,133/67} = 1,10$

Брзината влијае помалку на температурата околу 10 %, со зголемување на брзината се зголемува температурата.

Влијание на поместот, зголемување/намалување на температурата во зависност од поместот:

од (0,1 и 0,315) μm :

- При: $v=67$ $a=0,4$ $r=0,8$ $T_{0,315/0,1} = 1,073$
- При: $v=133$ $a=0,4$ $r=0,8$ $T_{,0,315/0,1} = 1,099$
- При: $v=67$ $a=0,8$ $r=0,8$ $T_{0,315/0,1} = 1,071$

- При: $v=133$ $a=0,8$ $r=0,8$ $T_{0,315/0,1} = 1,084$
- При: $v=67$ $a=0,4$ $r=1,6$ $T_{0,315/0,1} = 1,10$
- При: $v=133$ $a=0,4$ $r=1,6$, $T_{0,315/0,1} = 1,117$
- При: $v=67$ $a=0,8$ $r=1,6$, $T_{0,315/0,1} = 1,093$
- При: $v=133$, $a=0,8$ $r=1,6$, $T_{0,315/0,1} = 1,115$

Поместот има мало влијание на зголемување на температурата околу 11 %.

Зголемување/намалување на температурата во зависност од длабочината на режење од (0,4 и 0,8) mm:

- При: $v=67$, $f=0,1$ $r=0,8$ $T_{0,8/0,4} = 1,029$
- При: $v=133$ $f=0,1$ $r=0,8$ $T_{0,8/0,4} = 1,0348$
- При: $v=67$ $f=0,315$ $r=0,8$ $T_{0,8/0,4} = 1,027$
- При: $v=133$ $f=0,315$ $r=0,8$ $T_{0,8/0,4} = 1,02$
- При: $v=67$ $f=0,1$ $r=1,6$ $T_{0,8/0,4} = 1,024$
- При: $v=133$ $f=0,1$ $r=1,6$ $T_{0,8/0,4} = 1,02$
- При: $v=67$ $f=0,315$ $r=1,6$ $T_{0,8/0,4} = 1,019$
- При: $v=133$ $f=0,315$ $r=1,6$ $T_{0,8/0,4} = 1,019$

Длабочината на режење има многу помало влијание на температурата од поместот, односно со зголемување на длабочината на режење, се зголемува температурата околу за 3 %.

Зголемување/намалување на температурата во зависност од радиус на врвот на алатот од (0,8 и 1,6) mm:

- При: $v=67$ $f=0,1$ $a=0,8$ $Ra_{1,6/0,8} = 0,965$
- При: $v=133$ $f=0,1$ $a=0,8$ $Ra_{1,6/0,8} = 0,958$
- При: $v=67$ $f=0,315$ $a=0,8$ $Ra_{1,6/0,8} = 0,986$
- При: $v=133$ $f=0,315$ $a=0,8$, $Ra_{1,6/0,8} = 0,985$
- При: $v=67$ $f=0,1$ $a=0,4$ $Ra_{1,6/0,8} = 0,969$
- При: $v=133$ $f=0,1$ $a=0,4$ $Ra_{1,6/0,8} = 0,99$
- При: $v=67$ $f=0,315$ $a=0,4$ $Ra_{1,6/0,8} = 0,993$
- При: $v=133$ $f=0,315$ $a=0,4$ $Ra_{1,6/0,8} = 0,986$

Со зголемување на радиусот на алатот се намалува температурата околу 4 %

Вредностите на променливите со нивниот експонент се:

$$V^{0,1297238}, \quad 67^{0,1297238}=1,725 ; \quad 133^{0,1297238}=1,855 \quad (V_{133/67}=1,072)$$

$$f^{0,0784023}, \quad 0,1^{0,0784023}=0,83 ; \quad 0,315^{0,0784023}=0,913 \quad (f_{0,315/0,1}=1,1)$$

$$a^{0,0350896}, \quad 0,4^{0,0350896}=0,930 ; \quad 0,8^{0,0350896}=0,992 \quad (a_{0,8/0,4}=1,067)$$

$$r_{\varepsilon}^{0,0337936}, \quad 0,8^{0,0350896}=1,0075 ; \quad 1,6^{0,0350896}=0,984 \quad (r_{\varepsilon 16/0,8}=0,977)$$

Влијание на технолошките параметри (брзина, помест, длабочина и радиус на врвот на алатот) кога сите параметри се променливи.

Брзина: Со зголемување на брзината (останатите параметри се константни), параметарот на температурата се зголемува во процент околу ~10 %.

Кога се посматра влијанието на брзината во математичкиот израз (сите технолошки параметри се променливи), коефициентот на степенот на брзината е позитивен ($v^{0,1297238}$), ова значи се добива поголема вредност колку е брзината поголема, односно се зголемува T помалку во однос на поединечното влијание.

Помест: При поединечно влијание, со зголемување на поместот температурта се зголемува малку. Кога се посматра влијанието на поместот во математичкиот израз температурата ($f^{0,0784023}$), ова значи со зголемување на поместот и влијанието на температурата се зголемува приближно како и при поединечно влијание.

Длабочина на режење: При поединечно влијание има помало влијание на температурата. Кога се посматра влијанието на длабочината на режење во математичкиот израз ($a^{0,0350896}$) со зголемување на длабочината на режење, се зголемува T повеќе отколку при поединечно влијание.

Радиус на врвот на алатот: При поединечно влијание, со зголемување на радиусот на алатот има намалување. Кога се посматра влијанието на радиусот во математичкиот израз ($r_{\varepsilon}^{-0.0337936}$), има намалување на T со зголемување на радиусот приближно при поединечно влијание.

Треба да се нагласи, коефициентот-експонент кој е негативен на параметрите на режење ја намалува вредноста на T , колку параметрите се поголеми.

Колкави се отстапувањата при мерење и пресметка на параметарот на температурата T .

Споредба на измерените вредности од експериментот и пресметаните вредности за T , корелација на влезно-излезните информации за математичкиот модел од прв ред без меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите b (i). Од резултатите прикажани во Табела 6.1.1.4 за T може да се види дека има минимални отстапувања ($-1,271 \div 1,11$) %.

Споредба на измерените вредности од експериментот и пресметаните вредности за T , корелација на влезно-излезните информации за математичкиот модел од прв ред без меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите b (i). Од резултатите прикажани во Табела 6.1.1.5 за T може да се види дека има отстапувања ($-1,271 \div 1,11$) %.

Споредба на измерените вредности од експериментот и пресметаните вредности за T , корелација на влезно-излезните информации за математичкиот модел од прв ред со меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите b (i). Од резултатите прикажани во Табела 6.1.1.6 за T може да се види дека има отстапувања (до $-0,012$) %, а кај четири има $(0,502)$ %. Експеримент 17; $-0,869$ % експеримент 18; $0,128$ % експеримент 19; $0,417$ % експеримент 20.

Споредба на измерените вредности од експериментот и пресметаните вредности за R_a , корелација на влезно-излезните информации за математичкиот модел од прв ред со меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторот b (i). Од резултатите прикажани на Табела 6.1.1.7 за T може да се види дека има отстапување ($-0,869 \div 0,755$) %.

Оцена на значајниот фактор $b(i)$, математички модел од прв ред без меѓусебно дејство, значаен е за математичкиот коефициент со индекс 0, за 1, 2, 3, 4 индекси не е значаен. (Ако е $FR(i) \geq 10.130 = >$ значаен, $FR(i)$ - Дисперзиони односи) (Таб. 6.1.1.8).

Оцена на значајниот фактор $b(i)$, математички модел од прв ред со меѓусебно дејство, значаен е за математичкиот коефициент со индекс 0, 1, 2, 3, 4, а за 12, 13, 14, 23, 24, 123, 124, 134, 234, 1234 не е значаен (Таб. 6.1.1.9).

Без оцена на значајниот фактор $b(i)$, математички модел од прв ред без оцена на значајноста на факторите $b(i)$, без меѓусебно дејство, значаен е за математичкиот коефициент со индекс 0, 1, 2, 3, 4, за останатите 4 индекси не е значаен. (Ако е $FR(i) \geq 10.130 = >$ значаен, Ако е $FR(i) \geq 10.130 = >$ значаен; $FR(i)$ - Дисперзиони односи) (Таб. 6.1.1.10).

Без оцена на значајноста на факторите $b(i)$, математички модел од прв ред со меѓусебно дејство, значаен е за математичкиот коефициент со индекс 0, 1, 2, 3, 4, а за останатите 12, 13, 14, 23, 24, 123, 124, 134, 234, 1234 не е значаен (Таб. 5.1.1.11).

Дисперзиона анализа, математички модел од прв ред без меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите $b(i)$. Оцена на адекватноста на моделот: *адекватен* (Таб. 6.1.1.12).

Дисперзиона анализа, математички модел од прв ред без меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите $b(i)$. Оцена на адекватноста на моделот: *адекватен* (Таб. 6.1.1.13).

Дисперзиона анализа, математички модел од прв ред со меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите $b(i)$. Оцена на адекватноста на моделот: *адекватен* (Таб. 5.1.1.14).

Дисперзиона анализа, математички модел од прв ред со меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите $b(i)$. Оцена на адекватноста на моделот: *адекватен* (Таб. 6.1.1.15).

ЗАКЛУЧОК

По извршените експериментални испитувања, како и изработка на математички модели, може да се дадат следните заклучоци:

- Услови на испитување:
 - Избор на алатна машина: Обработка со стружење се изведува на конвенционален струг модел TVP 250 од фирмата Првомајска, со сила $P = 11.2$ (Kw);
 - Избор на држач за плочка и плочка: При обработката со стружење се применуваат држачи за резачки плочки CSRNR 25x25 M12H3 од фирмата HERTEL. При обработката со стружење се применува следната статичка геометрија: $\kappa = 75^0$; $\kappa_1 = 15^0$; $\gamma = -6^0$; $\alpha = 6^0$; $\lambda = -6^0$; $r_\epsilon = 0.8-1.2-1.6$ mm; $\gamma_f = -20^0$; $b_f = 0.2$ mm;
 - Избор на обработуван материјал: Обработката со стружење се изведе на прстени, специјално изработени за оваа намена, од материјал челик за подобрување C 55 (DIN). Прстените се термички обработени на бараната тврдост 52 ± 2 HRC. Димензиите на прстените се $\Phi 102 \times \Phi 82 \times 20$ mm;
 - Експеримент: Извршено е мерење на температурата (T) со различни режими на работа ($v=67, 94$ и 133 m/min; $s=0,1, 0,18$ и $0,315$ mm/vrt, $t=0,4, 0,566$ и $0,8$ mm; $R_\epsilon=0, 0,8, 1,2$ и $1,6$ mm). Од три мерења се зема средната вредност за одеден режим на работа.
- Избрани се математички модели, корелација на влезно-излезните информации за математичкиот модел од прв ред со (без) меѓусебно дејство и со (без) оцена на значајноста на факторите $b(i)$;
- Се користи дисперзиона анализа, која е адекватна за сите параметри на температурата (T);
- Параметрите од режењето го имаат следното влијание на температурата:
 - Брзина: Со зголемување на брзината (останатите параметри се константни), параметарот на температурата се зголемува во процент околу ~ 10 %. Кога се посматра влијанието на брзината во математичкиот израз (сите технолошки параметри се

променливи), коефициентот на степенот на брзината е позитивен ($v^{0.1297238}$), ова значи се добива поголема вредност колку е брзината поголема, односно се зголемува T помалку во однос на поединечното влијание;

- Помест: При поединечно влијание, со зголемување на поместот температурта се зголемува малку. Кога се посматра влијанието на поместот во математичкиот израз температурата ($f^{0.0784023}$), ова значи со зголемување на поместот и влијанието на температурата се зголемува приближно како и при поединечно влијание;
- Длабочина на режење: При поединечно влијание има помало влијание на температурата. Кога се посматра влијанието на длабочината на режење во математичкиот израз ($a^{0.0350896}$), со зголемување на длабочината на режење се зголемува T повеќе отколку при поединечно влијание; и
- Радиус на врвот на алатот: При поединечно влијание, со зголемување на радиусот на алатот има намалување. Кога се посматра влијанието на радиусот во математичкиот израз ($r_\epsilon^{-0.0337936}$), има намалување на T со зголемување на радиусот приближно при поединечно влијание.

- Се одредуваат математичките модели:

- Математичкиот модел од прв ред без меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите:

$$T = 575,063 v^{0.1297238} \cdot f^{0.0784023} \cdot a^{0.0350896} \cdot r_\epsilon^{-0.0337936}$$

- Математичкиот модел од прв ред без меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите:

$$T = 575,063 v^{0.1297238} \cdot f^{0.0784023} \cdot a^{0.0350896} \cdot r_\epsilon^{-0.0337936}$$

- Математичкиот модел од прв ред со меѓусебно дејство и со оцена на значајноста на факторите

$$T = 571,603 v^{0.1297238} \cdot f^{0.0749114} \cdot a^{0.0350896} \cdot r_\epsilon^{-0.0151036} \cdot \exp(x)$$

$$x = 0.0282825 \cdot \ln f \cdot \ln r_\epsilon$$

- Математичкиот модел од прв ред со меѓусебно дејство и без оцена на значајноста на факторите:

$$T = 506,007 \cdot v^{0.1549320} \cdot f^{0.0027419} \cdot a^{0.1461194} \cdot r_{\epsilon}^{-0.1209403} \cdot \exp(x)$$

$$x = 0.0148291 \cdot \ln v \cdot \ln f - 0.0272176 \cdot \ln v \cdot \ln a + 0.0298401 \cdot \ln v \cdot \ln r_{\epsilon} + 0.567142 \cdot \ln f \cdot \ln a - 0.0726754 \cdot \ln f \cdot \ln r_{\epsilon} - 0.3087565 \ln a \cdot \ln r_{\epsilon} - 0.0142986 \cdot \ln v \cdot \ln f \cdot \ln a + 0.0231093 \cdot \ln v \cdot \ln f \cdot \ln r_{\epsilon} + 0.0677623 \cdot \ln v \cdot \ln a \cdot \ln r_{\epsilon} - 0.1805365 \cdot \ln f \cdot \ln a \cdot \ln r_{\epsilon} + 0.0412949 \cdot \ln v \cdot \ln f \cdot \ln a \cdot \ln r_{\epsilon}$$

Треба да се нагласи, коефициентот - експонентот кој е негативен на параметрите на режење ја намалуваат вредноста на T , колку параметрите се поголеми.

- Со реализираните експериментални истражувања и добиените математички модели се потврдија тезите во докторската дисертација:

- Методот Design of experiments (DOE), особено степенестиот облик на функција од прв ред, преку примена на четирифакторен план на експерименти со повторување во средната точка од истражуваниот хиперпростор, со успех може да се користи за математичко моделирање на повеќе параметри на температурата;
- Истовременото математичко моделирање на повеќе параметри на температурата овозможува еднозначно опишување на температурата, додека пак вредноста на експонентите во математичките модели надолнето со проверката на адекватноста на експериментално добиените математички модели, овозможува да се констатира степенот на стабилност на процесот на обработка со стружење на материјали со зголемена тврдина.

Со овие изрази може да се одреди рапавоста според барањата на производителот, со менување на режимите на обработка.

- Насоки за понатамошни истражувања:
 - Материјал на алатки за режење на челици со зголемена тврдина да се користат резни плочки од CBN со и без превлака;
 - Резната алатка со избор на геометриските карактеристики;
 - Истражување на затупување на резниот алат врз квалитетот на обработената површина;
 - Избор на различни материјали за обработка, и сл.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Цветков, „Произвидни технологии“, УГД - Штип, 2018;
2. Б. Недиќ, М. Лазиќ, „Обрада метала резањем“, Машински факултет - Крагуевац, 2007 г.;
3. J. Paulo Davim, „*Machining of Hard Materials*“, Department of Mechanical engineering, University of Aveiro, Portugal;
4. Mehul Gosaia, Sanket N. Bhavsarb, „*Experimental Study on Temperature Measurement in Turning Operation of Hardened Steel (EN36)*“, 3rd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering, ICIAME 2016;
5. N. B. Balki, B. D. Nelge and Dr. V. M. Kale, "*Investigation of Temperature and Heat Transfer during Machining: Review*", International Journal for Scientific Research & Development, Volume: 3, Issue: 02, pp. 2283-2286, (2015);
6. N. A. Abukhshim, P.T. Mativenga and M.A. Sheikh, "*Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining*", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume: 46, Issue: 02, pp. 782-800, (2006);
7. Mottaghizadeh, M. Bagheri, "*3D Modeling of Temperature by Finite Element in Machining with Experimental Authorization*", International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, volume: 6, Issue:8, pp. 1646-1652, (2012);
8. Adeel H. Suhail, N. Ismail, S.V. Wong and N.A. Abdul Jalil, "*Optimization of Cutting Parameters Based on Surface Roughness and Assistance of Work piece Surface Temperature in Turning Process*", American J. of Engineering and Applied Sciences, Volume: 3, Issue:1, pp. 102-108, (2010);
9. Sushil D. Ghodam, "*Temperature measurement of a cutting tool in turning process by using tool work thermocouple*", International Journal of Research in Engineering and Technology, Volume: 03, Issue: 04, pp. 831-835, (Apr-2014);
10. Ajay Goyal, Suresh Dhiman, Shailendra Kumar and Rajesh Sharma, "*A Study of Experimental Temperature Measuring Techniques used in Metal Cutting*", Jordan

- Journal of Mechanical and Industrial Engineering, volume:8, Issue 2, pp. 82-93, (Apr-2014);
11. Muataz Hazza. F. Al Hazza, Erry Y.T. Adesta, Superianto, M.Y. and Muhammad Riza, "*Cutting Temperature and Surface Roughness Optimization in CNC End Milling Using Multi Objective Genetic Algorithm*", International Conference on Advanced Computer Science Applications and Technologies, volume:3, Issue 4, pp. 275-278, (2012);
 12. Susant K Sahu, Purna C Mishra, Kashfull Orra and Ashok K Sahoo „*Performance assessment in hard turning of AISI 1015 steel under spray impingement cooling and dry environment*“, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture 229(2):251-265, February 2014;
 13. K. Shihab*, Zahid A. Khan, Aas Mohammad, Arshad Noor Siddiqueed „*RSM Based Study of Cutting Temperature during Hard Turning with Multilayer Coated Carbide Insert* Suha Department of Mechanical Engineering, JamiaMillialIslamia (A Central University), New Delhi, India;
 14. *Forces and temperatures in hard turning* Article in Machining Science and Technology • July 2006, : <https://www.researchgate.net/publication/245332881>;
 15. H. Y. Ren, Q.X. Yang, R. D. James, L. Wang, „*Cutting temperatures in hard turning chromium hardfacing with PCBN tooling*“, Journal of materials Technology 147 (2004) 38-44 March 2004;
 16. Abhishek Anand¹, Ajay Kumar Behera^{1,*}, and Sudhansu Ranjan Das „*An overview on economic machining of hardened steels by hard turning and its process variables*“ Rev. 6, 4 (2019) © A. Anand et al., Published by EDP Sciences 2019, <https://doi.org/10.1051/mfreview/2019002>;
 17. Suha Karim Shihab, Zahid A. Khan, Aas Mohammad, & Arshad Noor Siddiquee „*A Review of turning of hard steels used in bearing and automotive applications*“ Pages 24-49 | Received 20 Nov 2013, Accepted 07 Jan 2014, Published online: 17 Mar 2014;
 18. Yong Huang & Y. Kevin Chou & Steven Y. Liang, „*CBN tool wear in hard turning: a survey on research progresses*“ Received: 26 January 2006 / Accepted: 28 July 2006 / Published online: 8 November 2006 # Springer-Verlag London Limited 2006;
 19. D. Carou¹, E.M. Rubio² and J.P. Davim¹ „*Discontinuous cutting: failure mechanisms, tool materials and temperature study*“, ¹ Department of Mechanical

Engineering, University of Aveiro, Campus Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal,
2 Department of manufacturing Engineering, National University of Distance
Education (UNED), C/ Juan delRosál, 12, E28040-Madrid, Spain Received:
December 01, 2013;

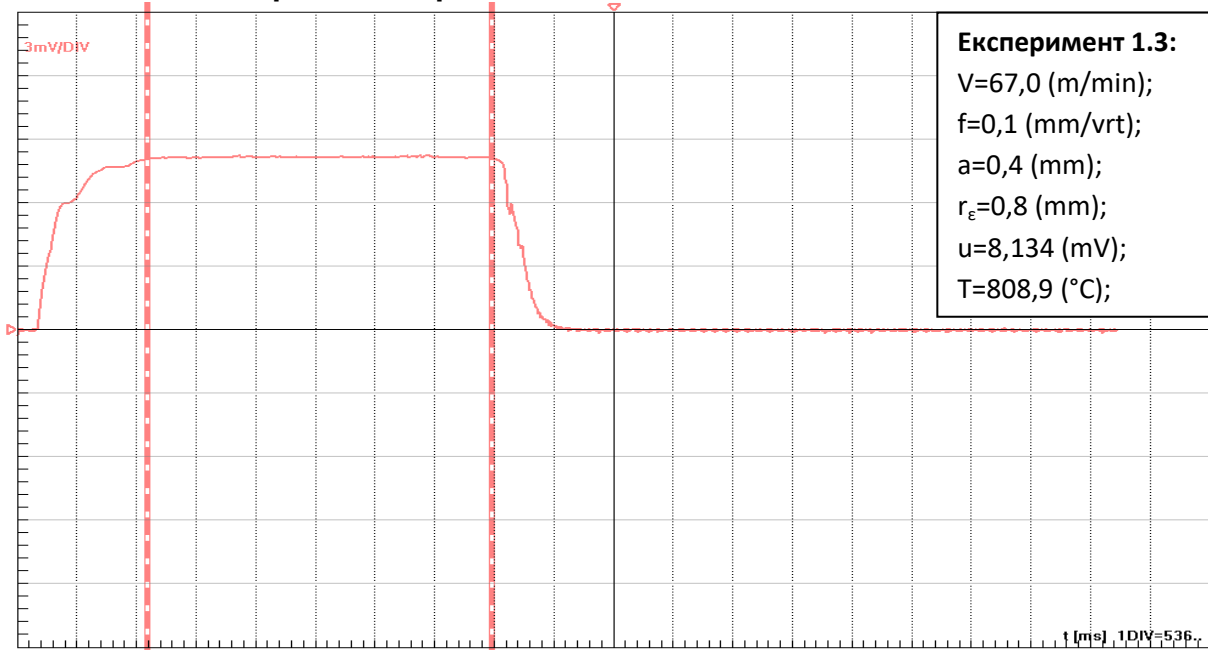
20. Elshaimaa Abdelnasser 1, Azza Barakat 2, Samar Elsanabary 1, Ahmed Nassef
1 and Ahmed Elkaseer 1, 3, „*Precision Hard Turning of Ti6Al4V Using
Polycrystalline Diamond Inserts: Surface Quality, Cutting Temperature and
Productivity in Conventional and High-Speed Machining Materials (Basel)*, 2020
Dec 12;13(24):5677., doi: 10.3390/ma13245677;
21. Y. Kevin Chou*, Hui Song, „*Thermal modeling for white layer predictions in
finish hard turning*“ Mechanical Engineering Department, The University of
Alabama, Tuscaloosa, AL 35487, USA Received 7 October 2003; accepted 1
September 2004 Available online 2 November 2004;
22. M. Tarić, „*Modelovanje procesa obrade struganjem termički obrađenog čelika*“,
Univerzitet, Tehnički fakultet, Departmen za proizvodno mašintvo, u Novi Sad, 2018
23. Akhil C S1, Ananthavishnu M H2, Akhil C K3, Afeez P M4, Akhilesh R5, Rahul
Rajan6 Measurement of Cutting Temperature during Machining;
24. Bogdan P. Nedic, Milan D. Eric 'Cutting Temperature Measurement and Material
Machinability, Thermal Science, 18 (1), 2014, S259-S268;
25. M. C. Shaw, *Metal cutting principles*, Oxford University press, London, 1984;
26. L. B. Abhang and M. Hameedullah, „*Chip-tool interface temperature prediction
model for turning process*“, International Journal of Engineering Science and
Technology Vol. 2(4), 2010, 382-393;
27. G. Arndt, R. H. Brown, „*On the temperature distribution in orthogonal
machining*“, Int J Mach Tool Des Res, 7, 1967, 39–53;
28. A. B. Chattopadhyay, „*Cutting temperature causes, effects, assessment and
control*“ MHRD NEPTEL Manufacturing Science II, Lecture 11, IIT Kharagpur
India Version 2, Page 9;
29. Longbottom, J. M. & Lanham, J. D. 2005. *Cutting temperature measurement
while machining - A review*, Aircraft Engineering and Aerospace Technology,
pp.122-130;

30. Davies, M. A., Ueda, T., M'Saoubi, R. Mullany, B. & Cooke, A. L. 2007. *On the measurement of temperature in material removal processes*, *Annals of the CIRP*, Vol.56, No.2, 581-604;
31. Sutter, G., Faure, L., Molinari, A., Ranc, N. & Pina, V. 2003. *An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining*, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 671-678;
32. Komanduri, K. & Hou, Z. B. 2001. *A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology*, *Tribology International*, pp. 653-682;
33. Longbottom, J.M. & Lanham, J.D. 2005. *Cutting temperature measurement while machining - A review*, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, pp. 122-130;
34. Yang, J., Sun, S., Brandt, M. & Yan, W. 2010. *Experimental investigation and 3D finite element prediction of the heat affected zone during laser assisted machining of Ti6Al4V alloy*, *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (1), 2215–2222;
35. S. Rossetto, U. Koch, "An investigation of temperature distribution on tool flank surface". *Annals of CIRP* 1971;19:551–7;
36. Boothroyd, "Photographic techniques for the determination of metal cutting temperatures", *Brit J of Appl Physics*, 12, 1961,238–242;
37. Boothroyd, "Temperatures in orthogonal metal cutting". *Proc I Mech E (Lon)*, 177, 1963, 789–810;
38. A. B. Chattopadhyay, "Cutting temperature causes, effects, assessment and control", MHRD NEPTel Manufacturing Science II, Lecture 11, IIT Kharagpur India, Version 2, Page 11 accessed on 15 Dec 2012;
39. Cengel, Y. A., 2006. *Heat and mass transfer*. New York: McGraw-Hill;
40. Sales, W. F., Guimaraes, G., Machado, A.R. & Ezugwu, E. O. 2002. *Cooling ability of cutting fluids and measurement of the chip-tool interface temperatures*, *Industrial Lubrication and Tribology*, pp. 57-68;
41. Potdar, Y. K. & Zehnder, A.T. 2004. *Temperature and deformation measurements in transient metal cutting*, *Society for Experimental Mechanics*, pp. 1-9;

42. Vorster, J. V. Z. 2010. *Temperature measurement of titanium during milling*, Stellenbosch;
43. A. Goyal, S. Dhiman, S. Kumar, R. Sharma, *A Study of Experimental Temperature Measuring Techniques used in Metal Cutting*, Volume 8 Number 2, April. 2014 ISSN 1995-6665 Pages 82 – 93;
44. P. J. T. Conradie 1*, G.A. Oosthuizen 2, N.F. Treurnicht 3 & A. Al Shaalane 4, *Overview of work piece temperature measurement techniques for machining of Ti6Al4V*, Department of Industrial Engineering Stellenbosch University, South Africa;
45. Arndt, G. & Brown, R. H. 1966. „On the temperature distribution in orthogonal machining, *International Journal of Machine Tool Design & Research*“, pp. 39-53;
46. mr Anđelija Mitrović, *„Modeliranje procesa obrade rezanjem”*, doktorska disertacija, Novi Sad, 2016;

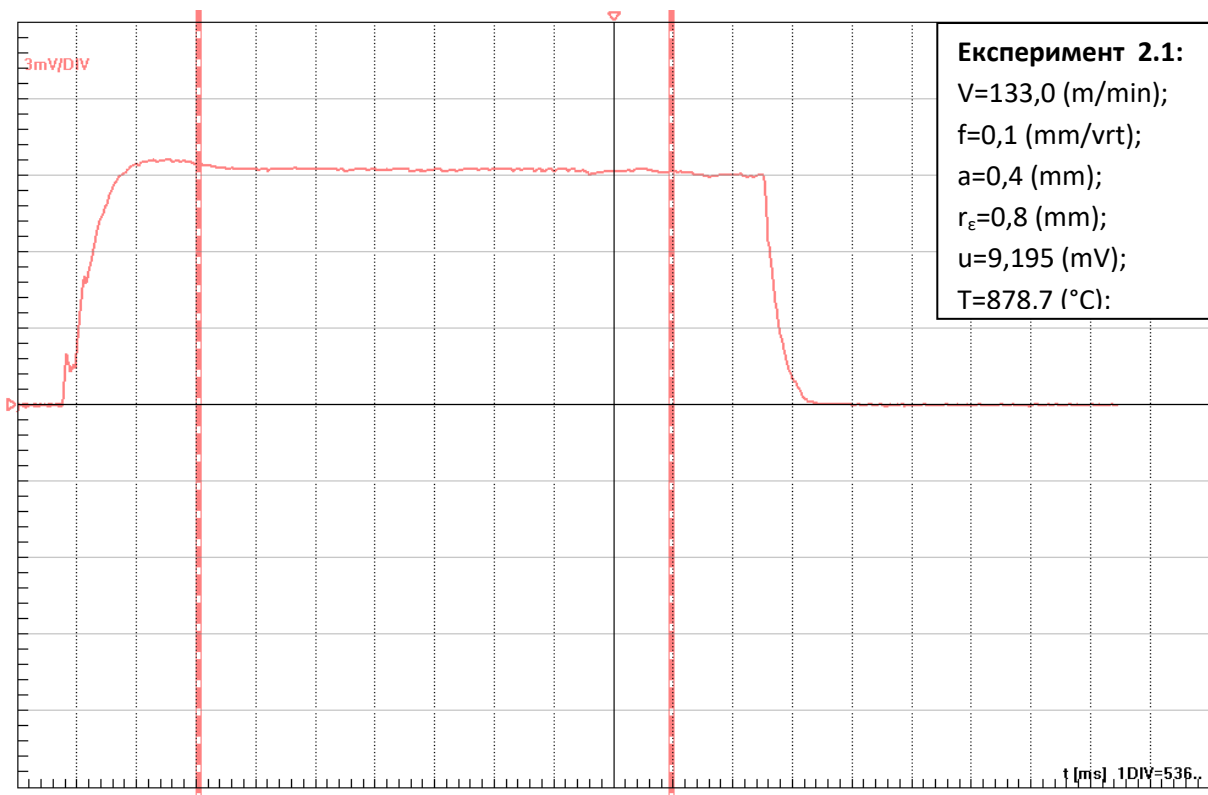
ПРИЛОГ

6.6.1 Резултати од мерење на средната температура во процесот на режење при обработка со стружење – графичка интерпретација на измерениот термонапон



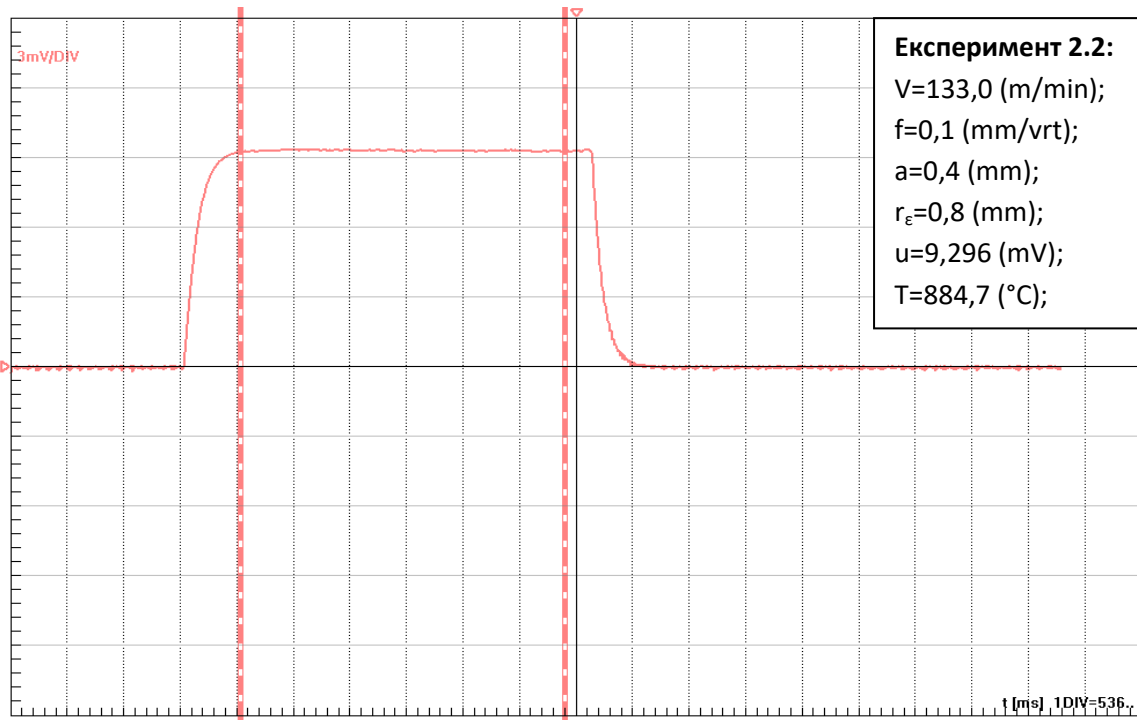
Слика 5.6.1.3: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 1.3

Figure 5.6.1.3: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 1.3



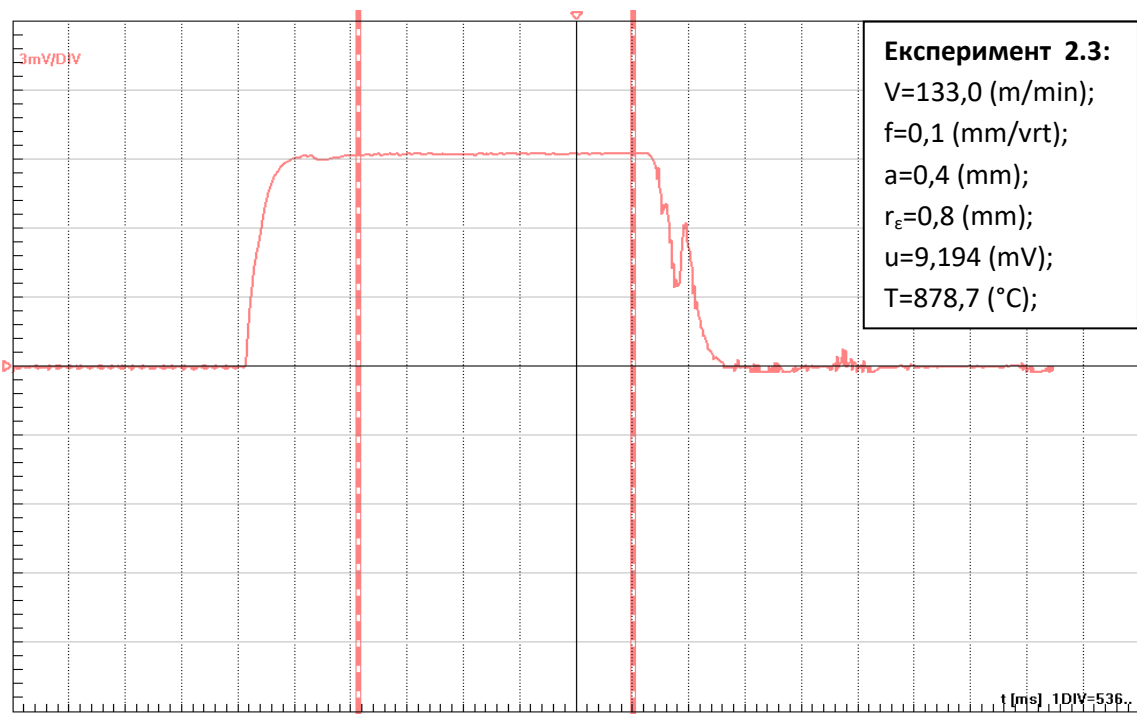
Слика 5.6.1.4: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 2.1

Figure 5.6.1.4: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 2.1



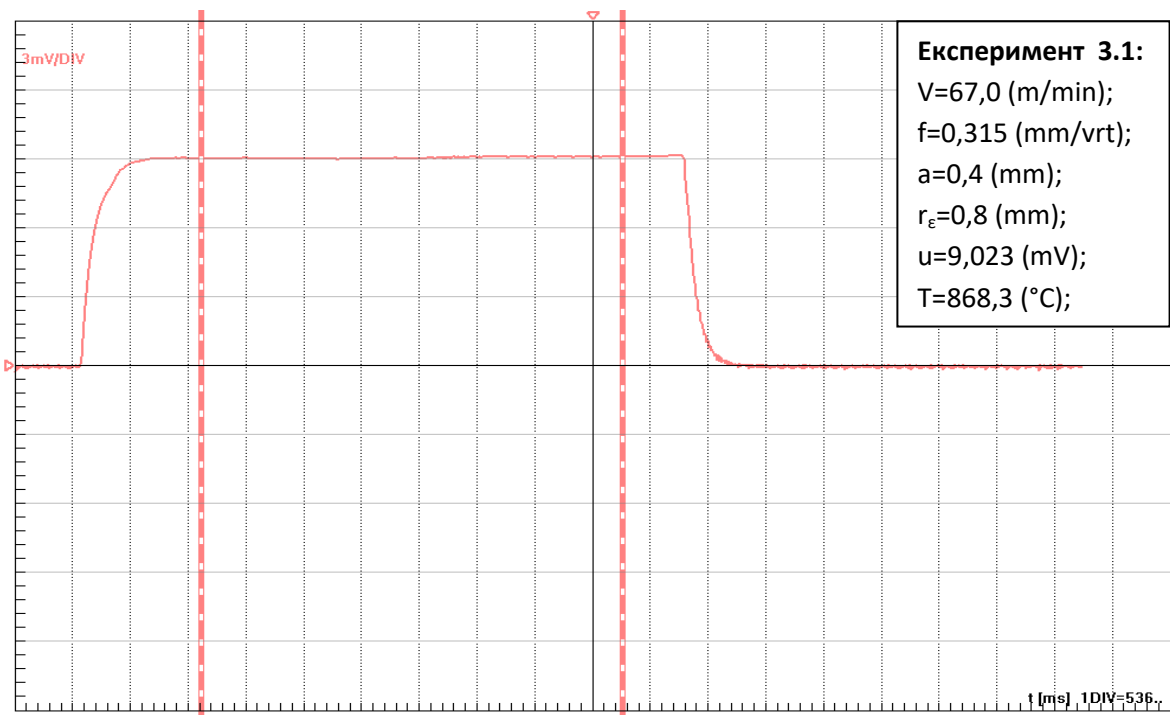
Слика 5.6.1.5: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 2.2

Figure 5.6.15: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 2.2



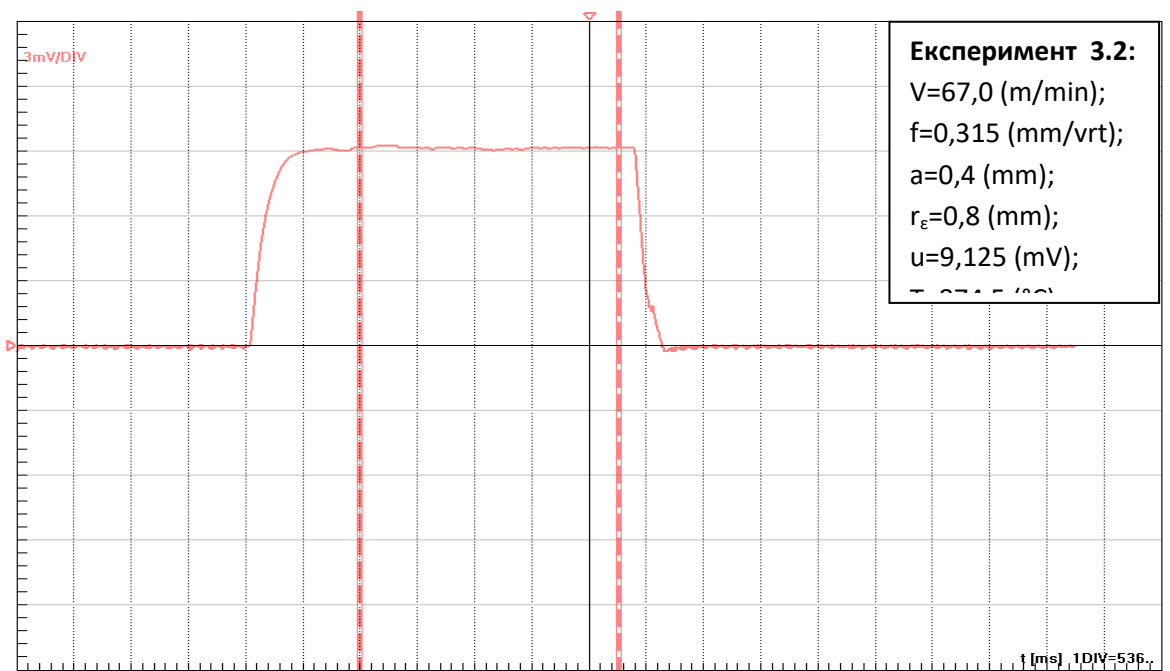
Слика 5.6.1.6: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 2.3

Figure 5.6.1.6: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 2.3



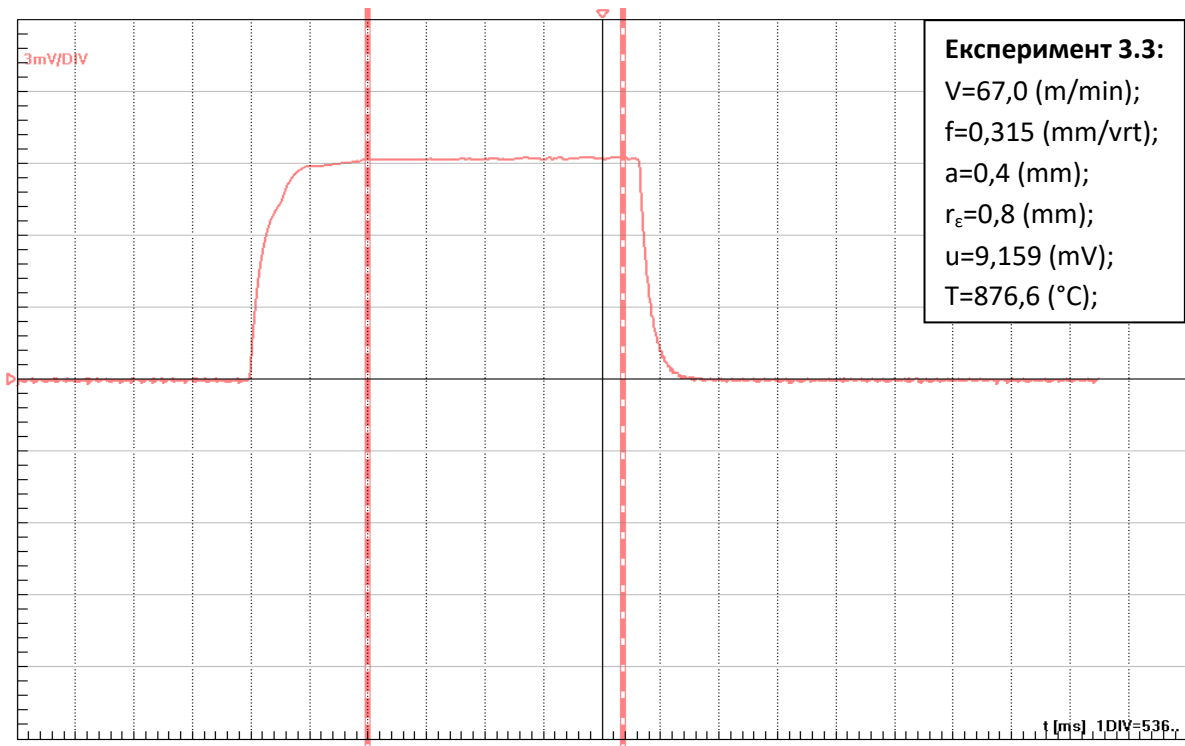
Слика 5.6.1.7: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 3.1

Figure 5.6.1.7: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 3.1



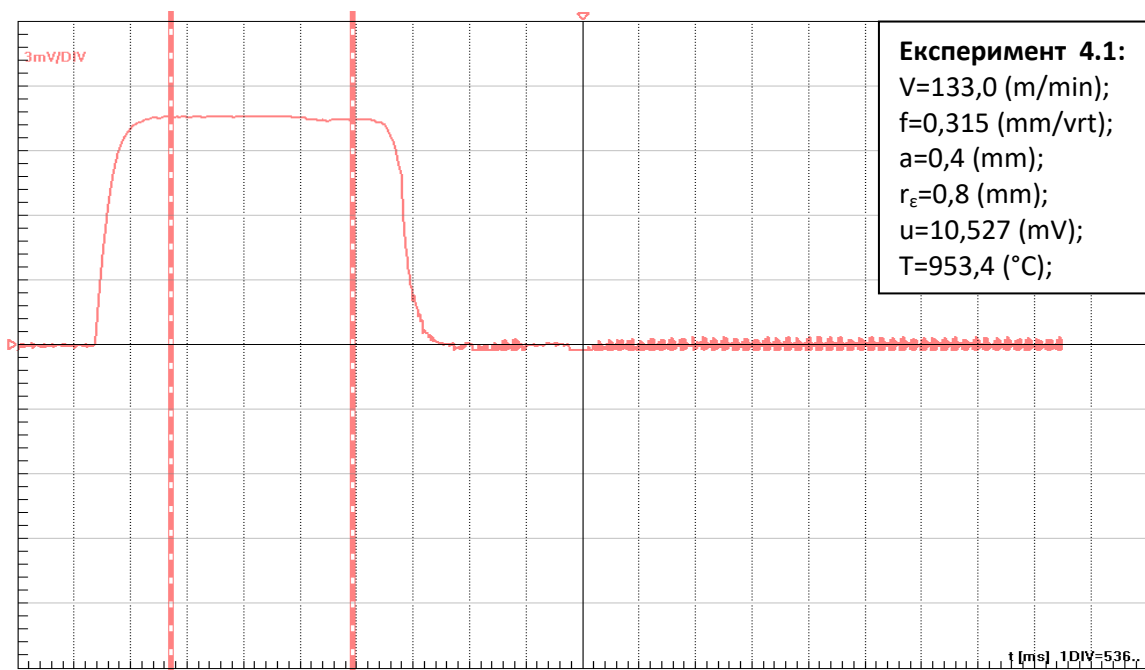
Слика 5.6.1.8: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 3.2

Figure 5.6.1.8: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 3.2



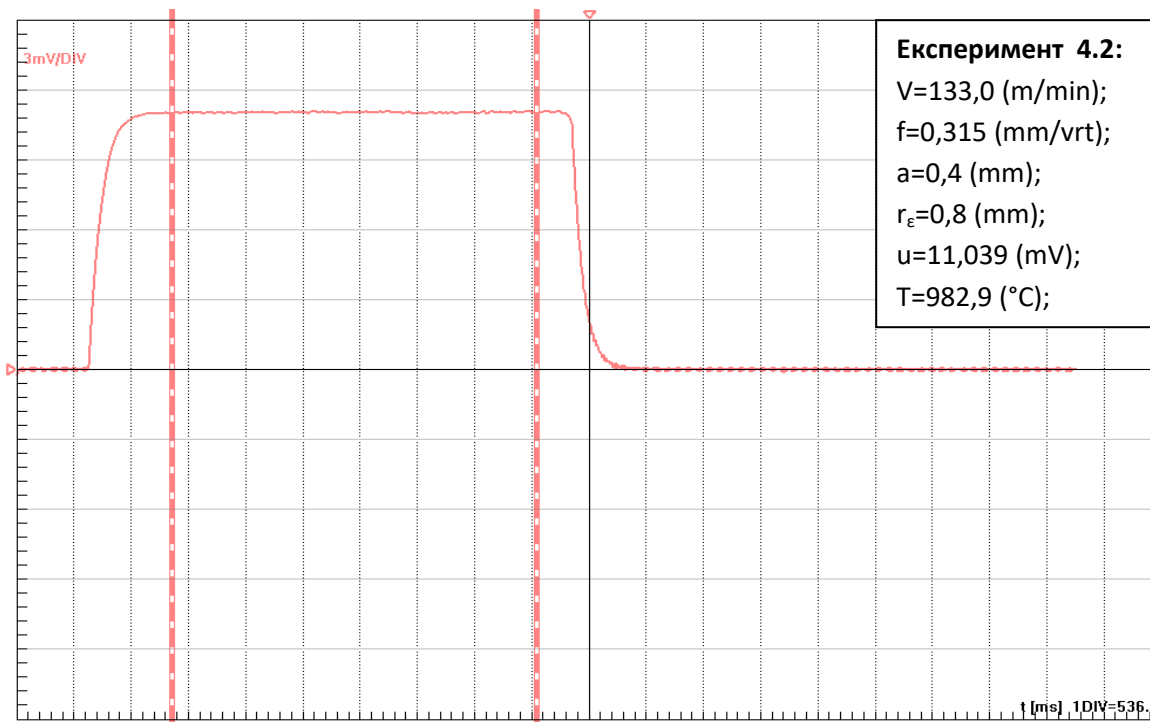
Слика 5.6.1.9: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 3.3

Figure 5.6.1.9: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 3.3



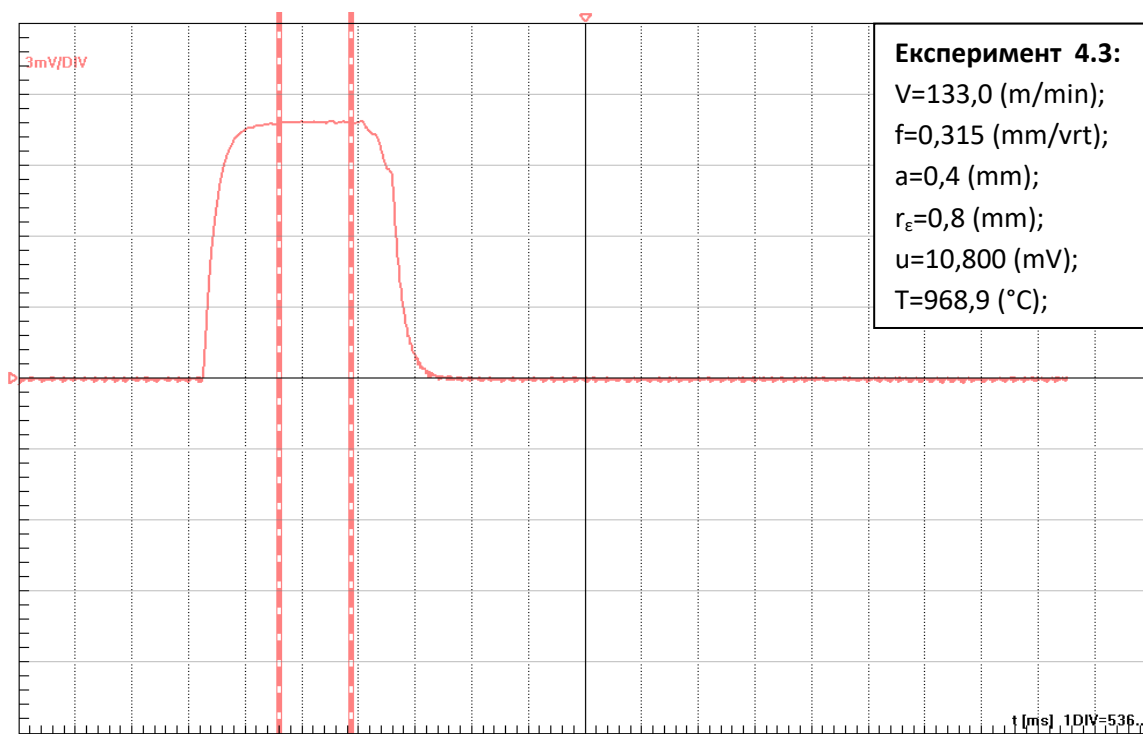
Слика 5.6.1.10: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 4.1

Figure 5.6.1.10: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 4.1



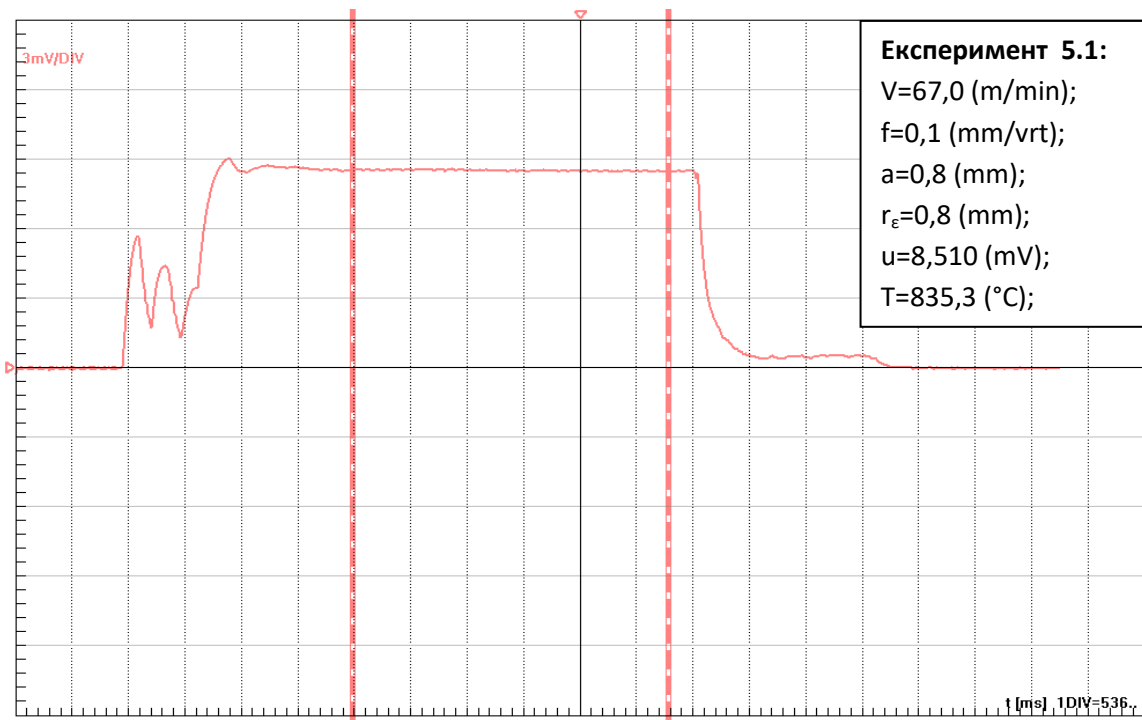
Слика 5.6.1.11: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 4.2

Figure 5.6.1.11: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 4.2



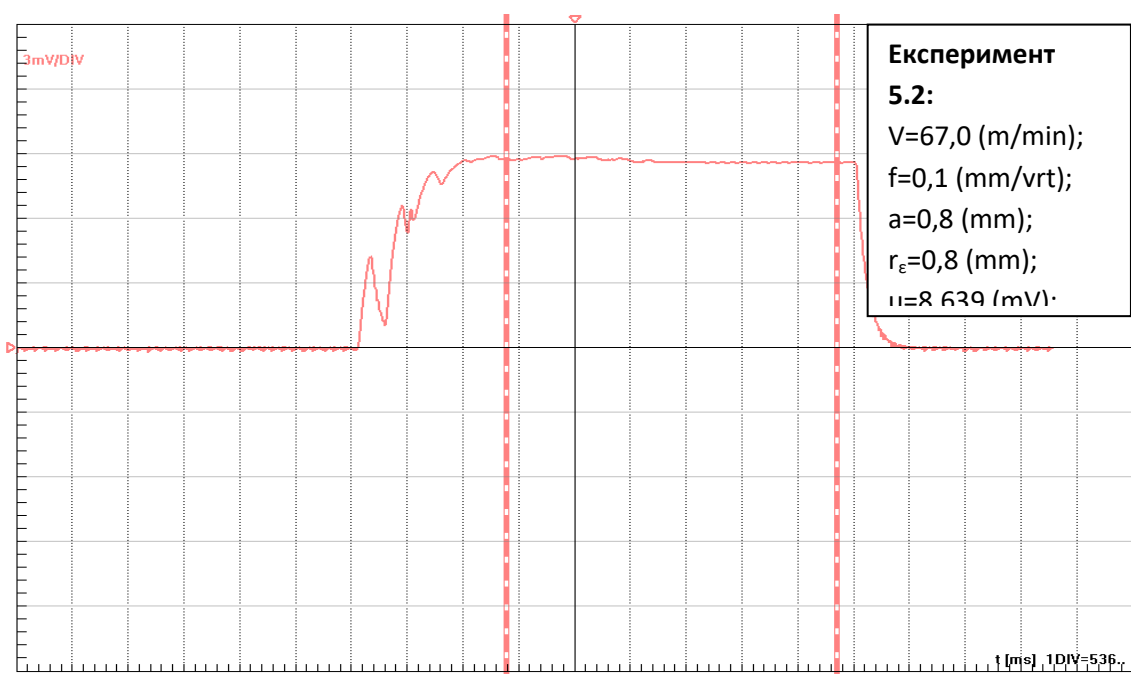
Слика 5.6.1.12: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 4.3

Figure 5.6.1.12: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 4.3



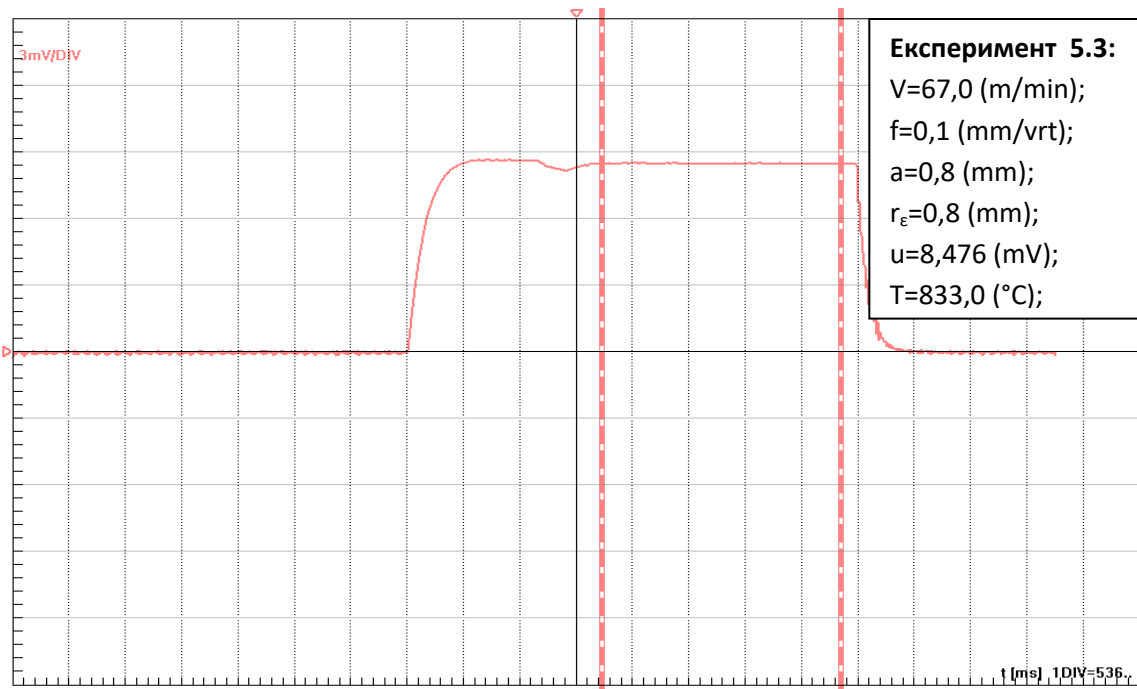
Слика 5.6.1.13: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 5.1

Figure 5.6.1.13: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 5.1



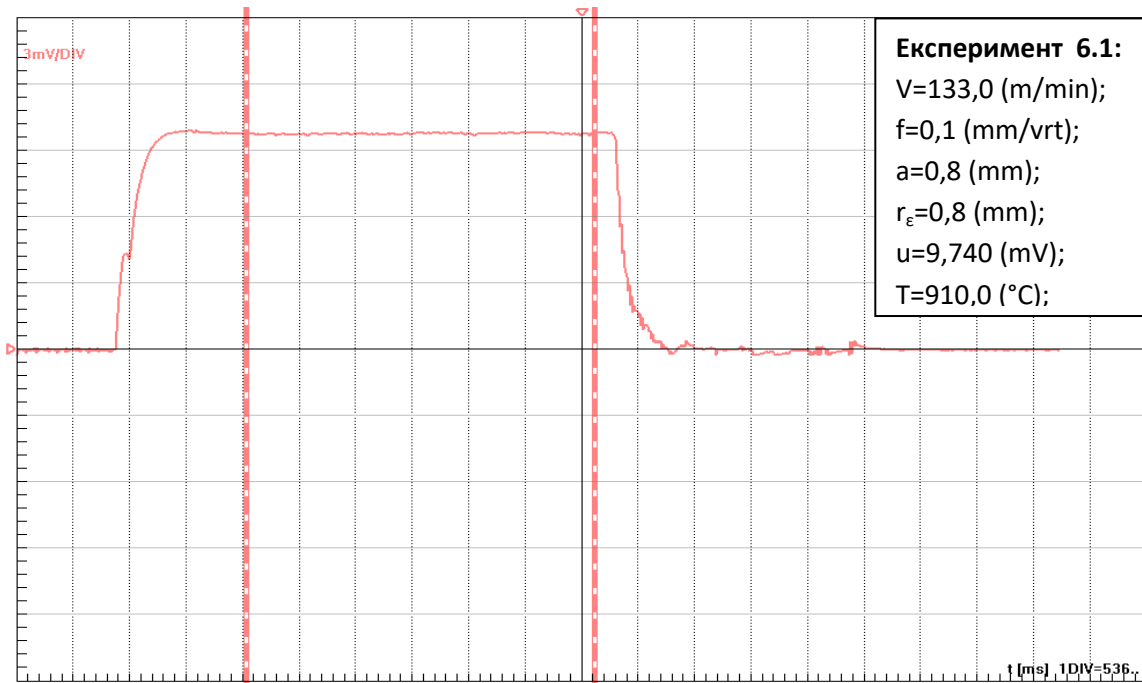
Слика 5.6.1.14: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 5.2

Figure 5.6.1.14: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 5.2



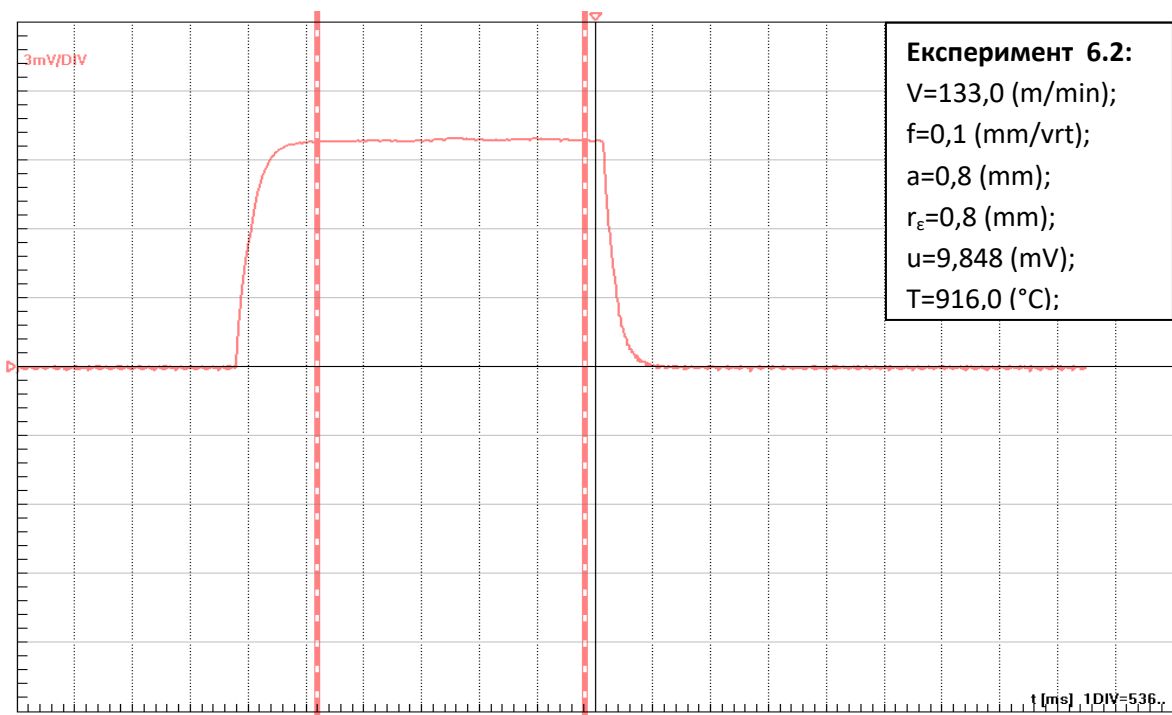
Слика 5.6.1.15: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 5.3

Figure 5.6.1.15: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 5.3



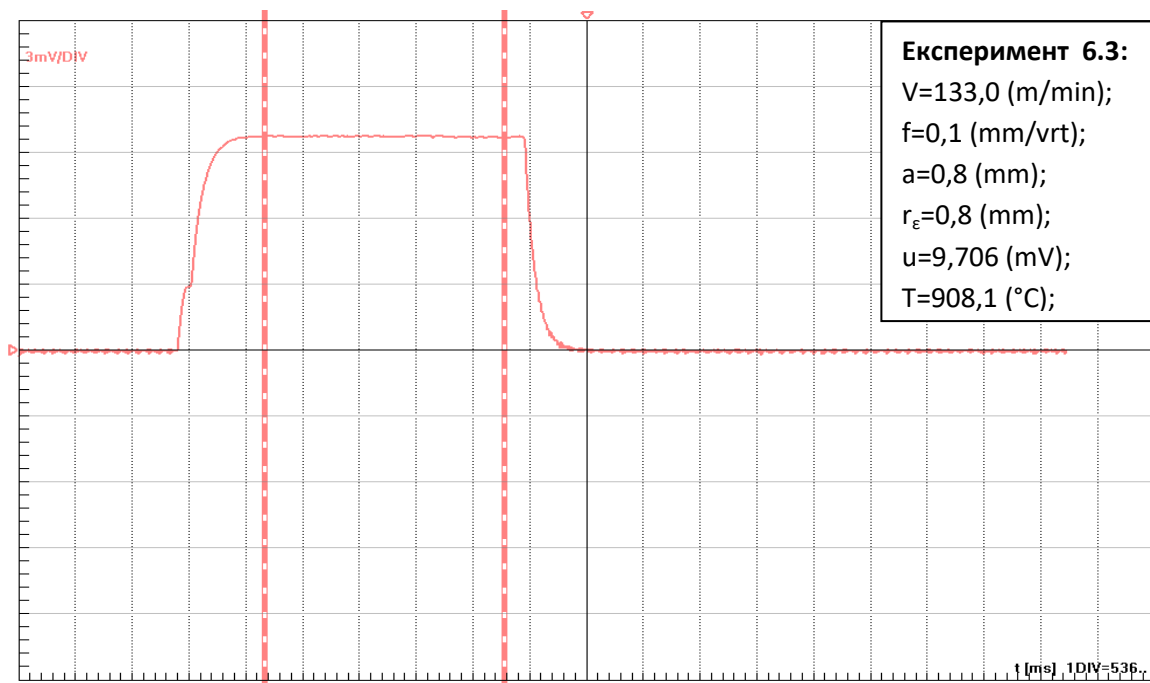
Слика 5.6.1.16: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 6.1

Figure 5.6.1.16: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 6.1



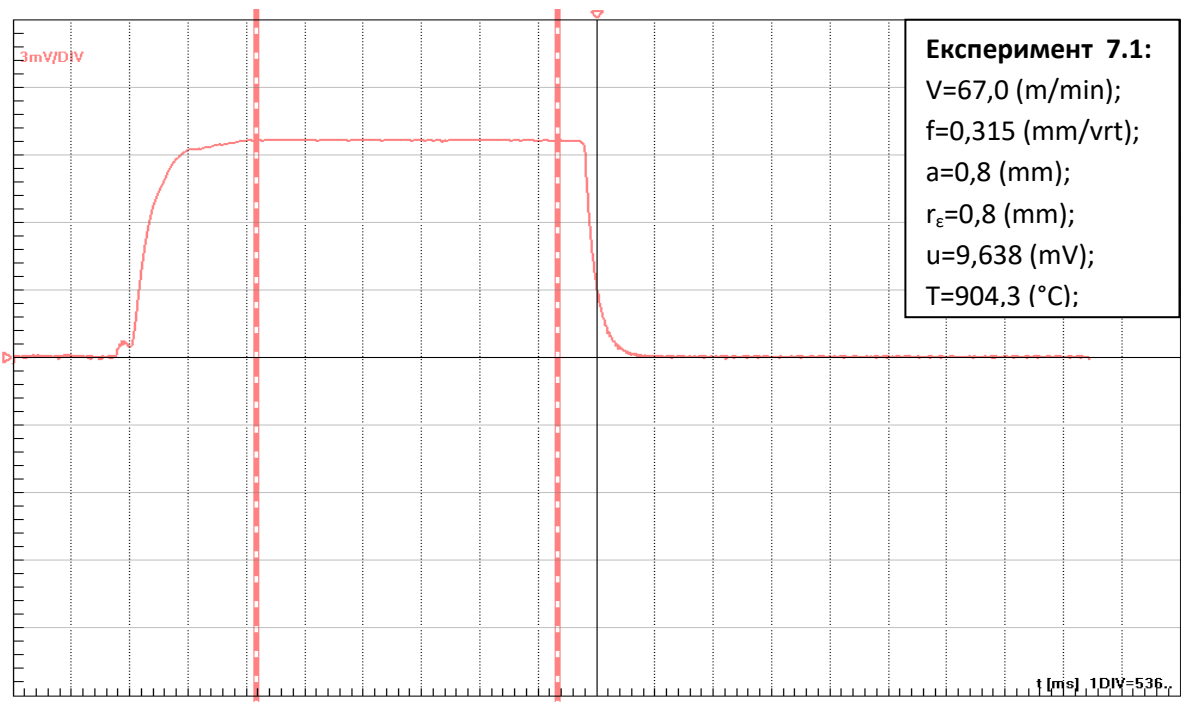
Слика 5.6.1.17: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 6.2

Figure 5.6.1.17: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 6.2



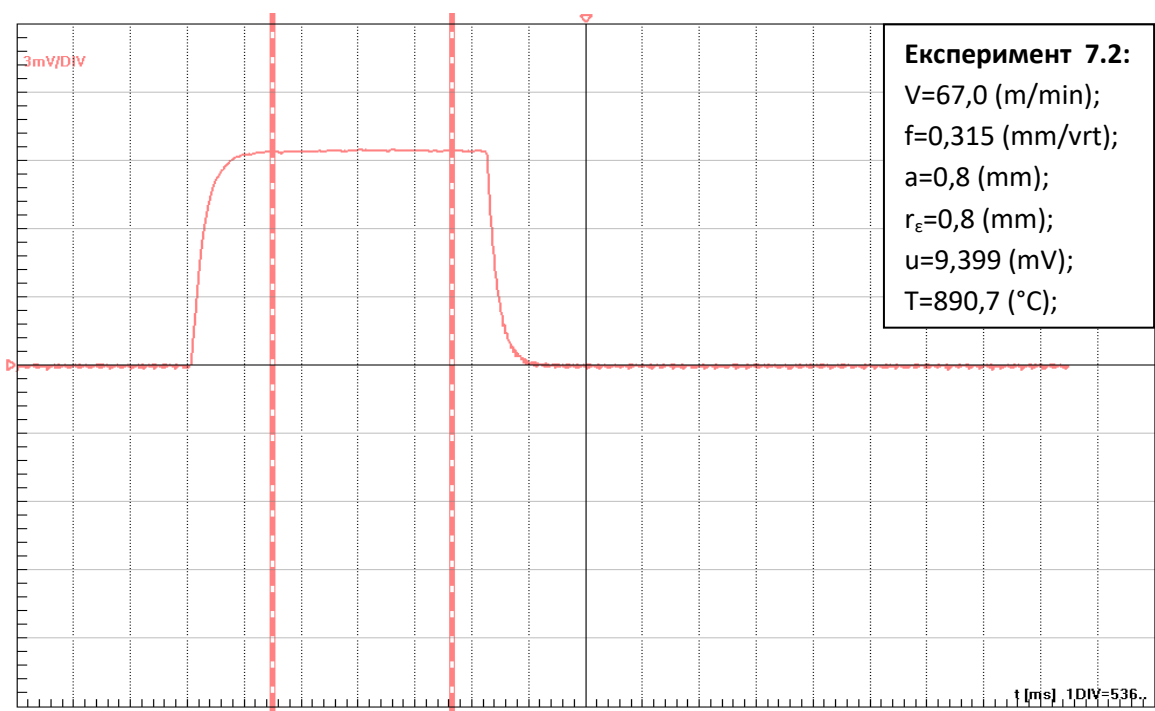
Слика 5.6.1.18: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 6.3

Figure 5.6.1.18: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 6.3



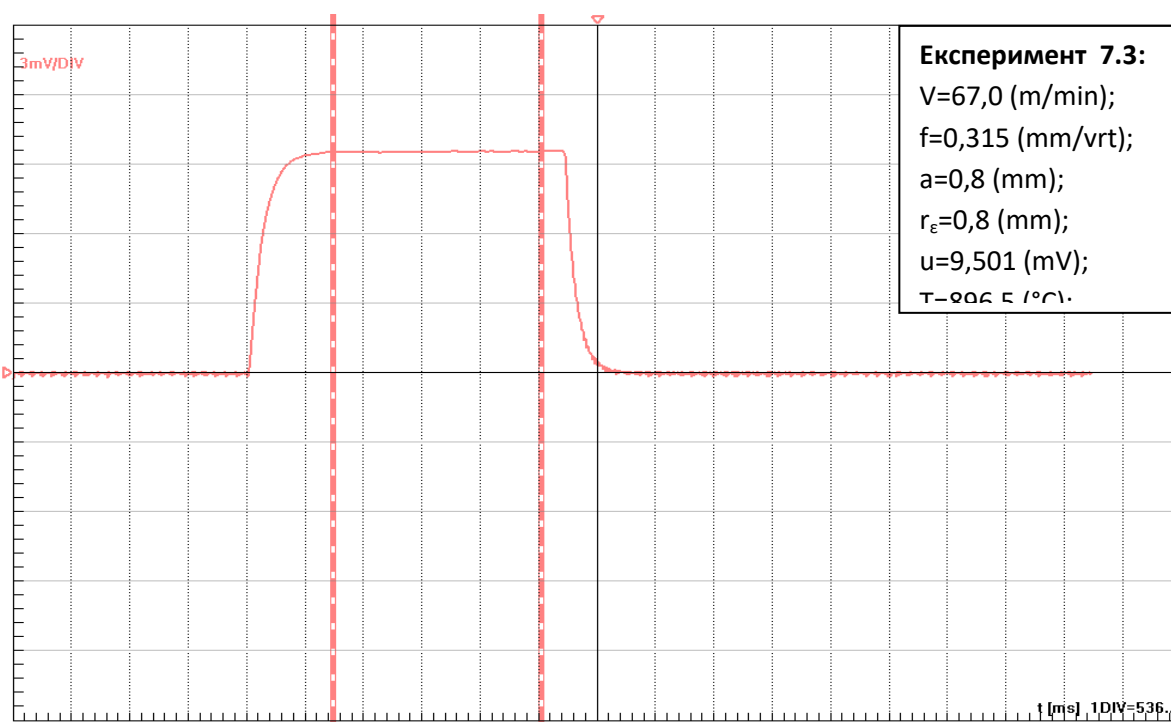
Слика 5.6.1.19: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 7.1

Figure 5.6.1.19: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 7.1



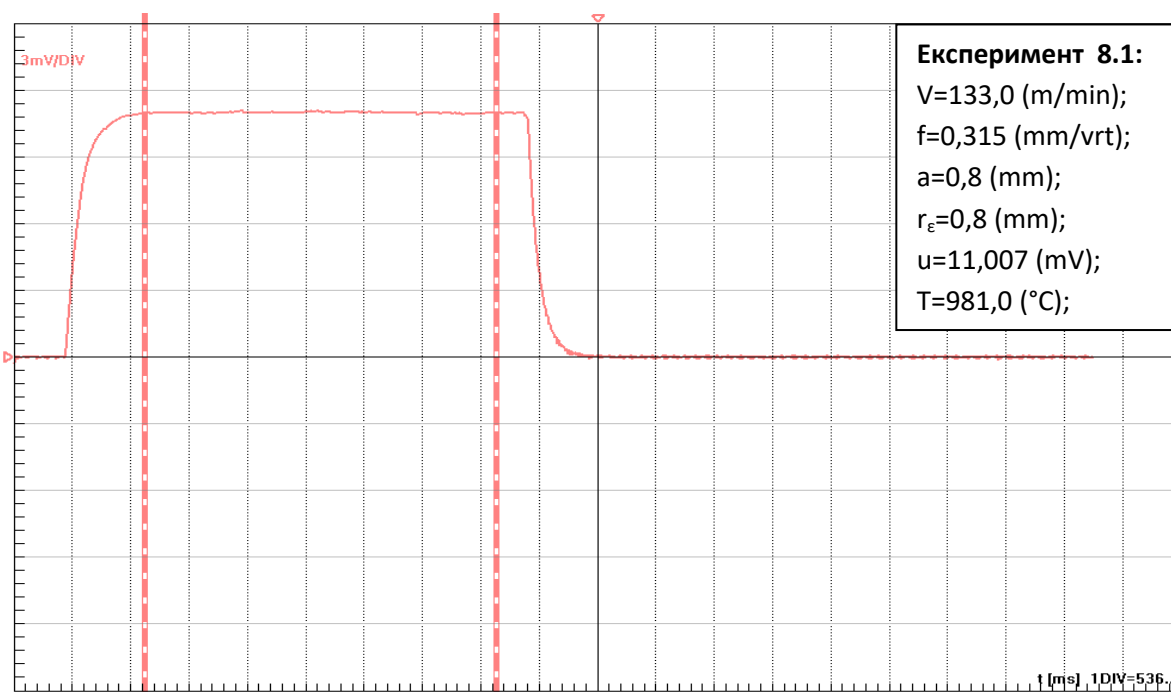
Слика 5.6.1.20: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 7.2

Figure 5.6.1.20: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 7.2



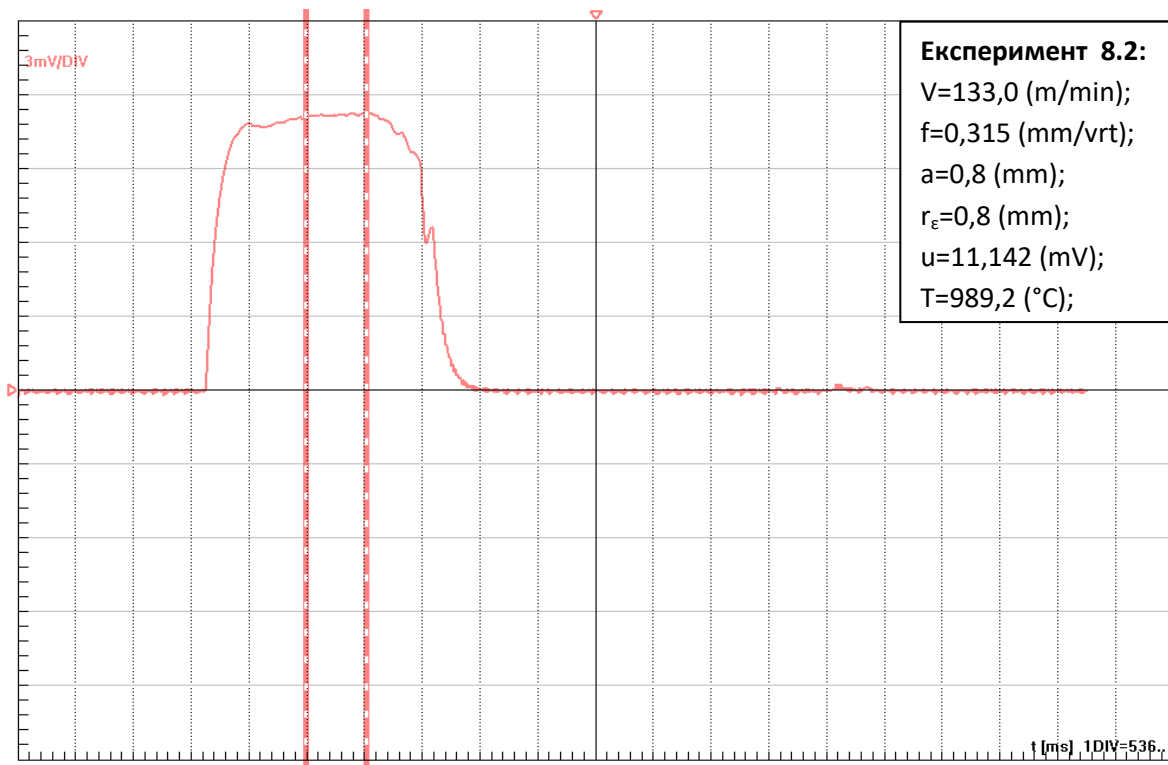
Слика 5.6.1.21: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 7.3

Figure 5.6.1.21: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 7.3



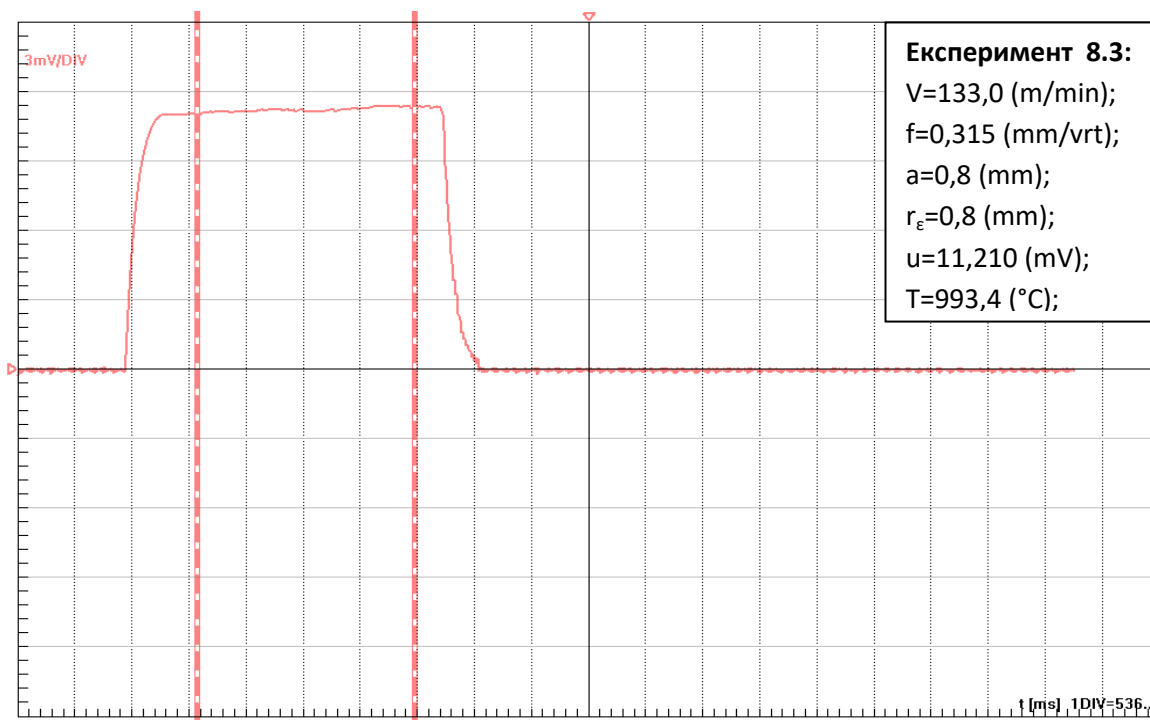
Слика 5.6.1.22: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 8.1

Figure 5.6.1.22: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 8.1



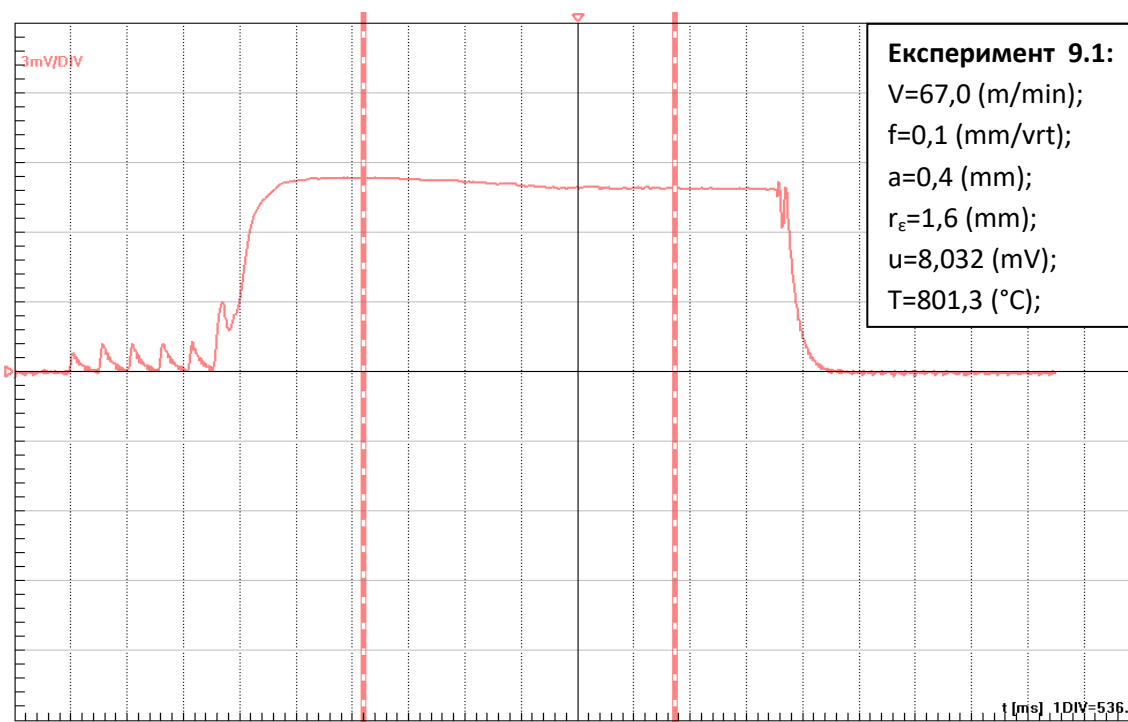
Слика 5.6.1.23: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 8.2

Figure 5.6.1.23: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 8.2



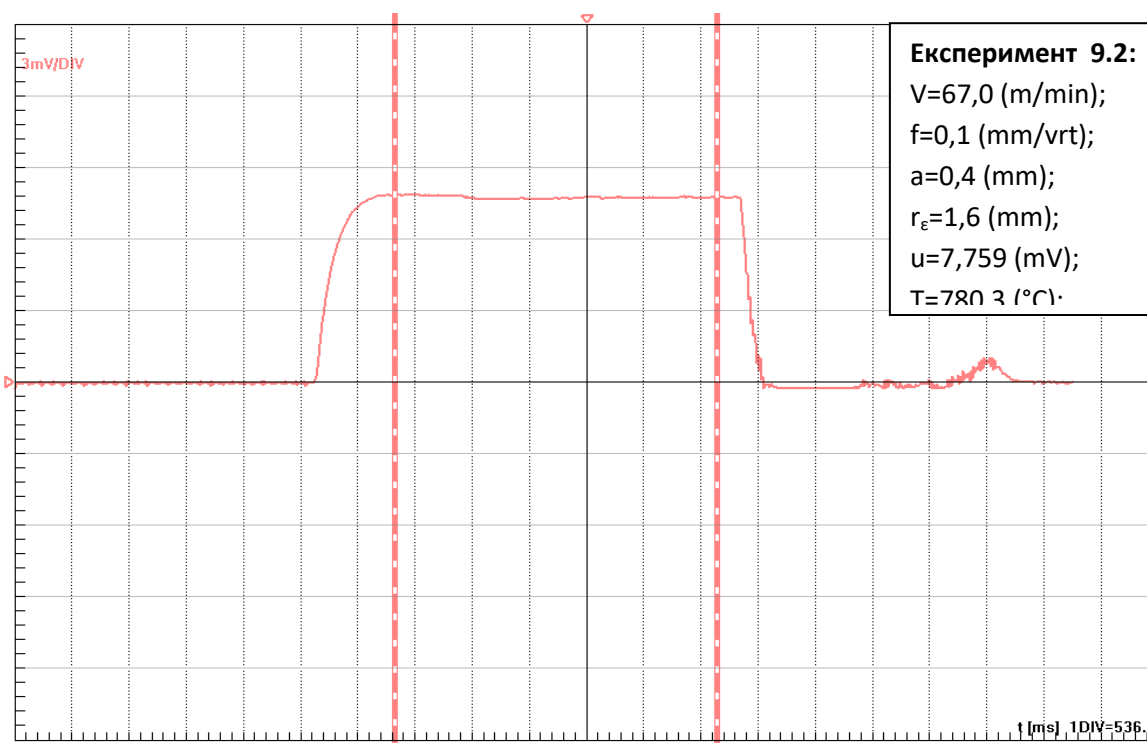
Слика 5.6.1.24: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 8.3

Figure 5.6.1.24: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 8.3



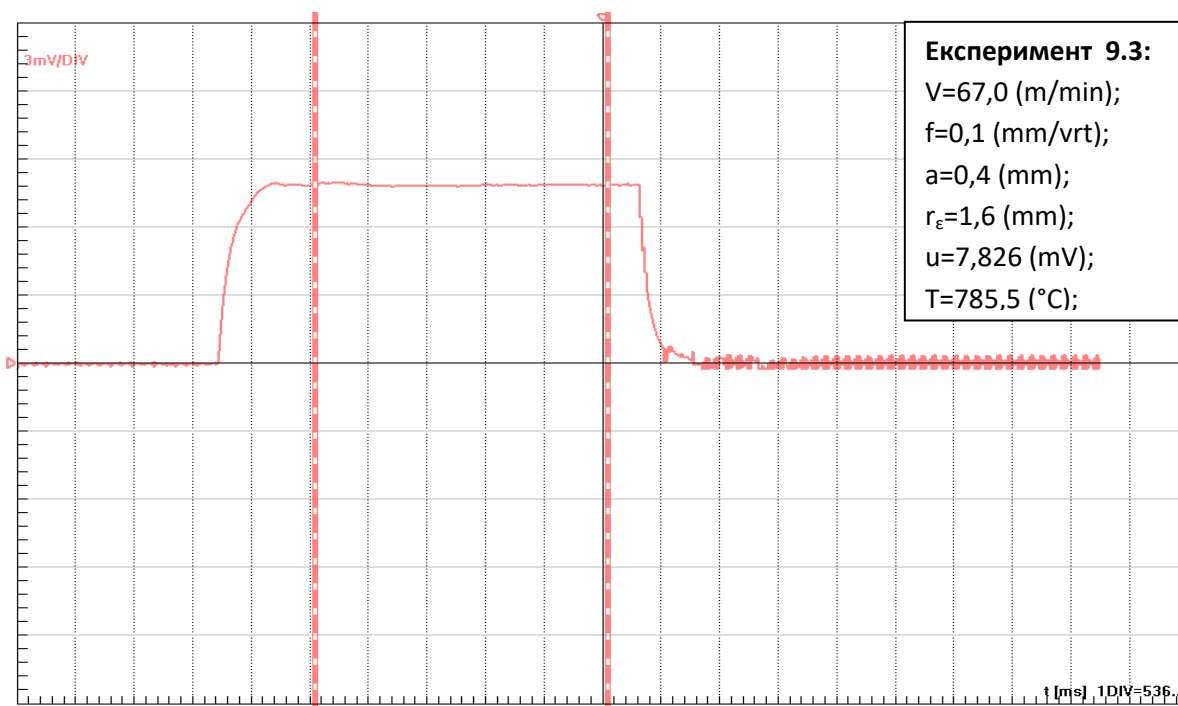
Слика 5.6.1.25: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 9.1

Figure 5.6.1.25: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 9.1



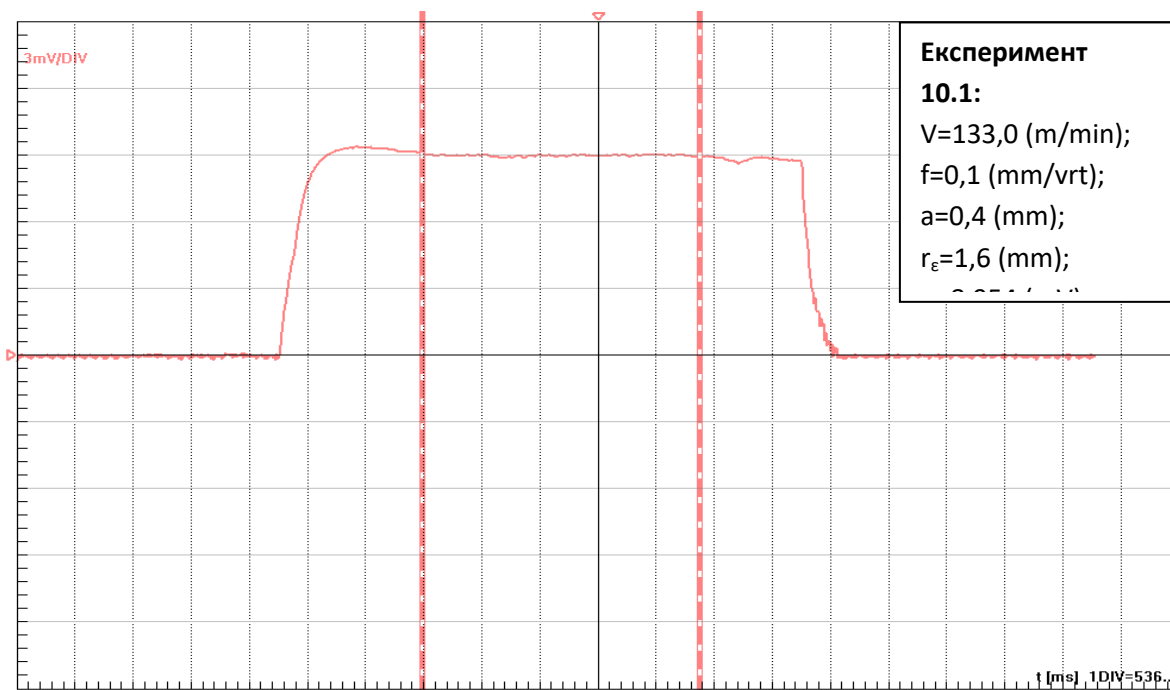
Слика 5.6.1.26: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 9.2

Figure 5.6.1.26: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 9.2



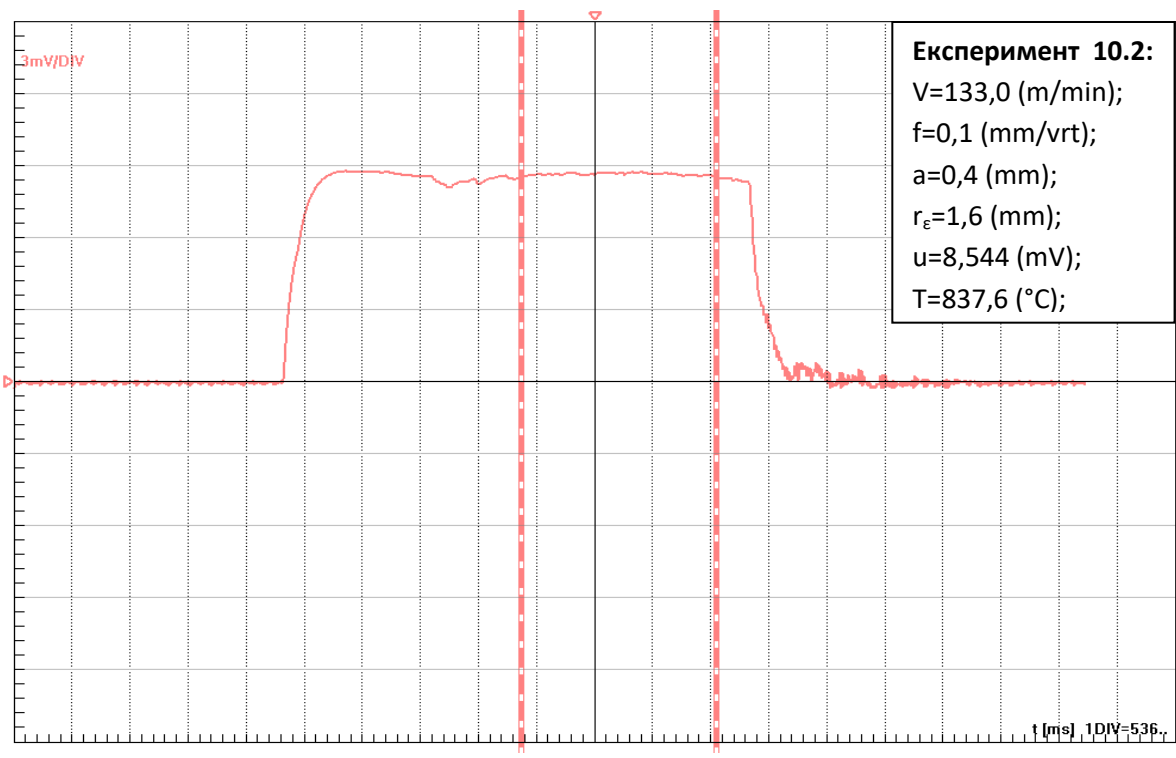
Слика 5.6.1.27: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 9.3

Figure 5.6.1. 27: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 9.3



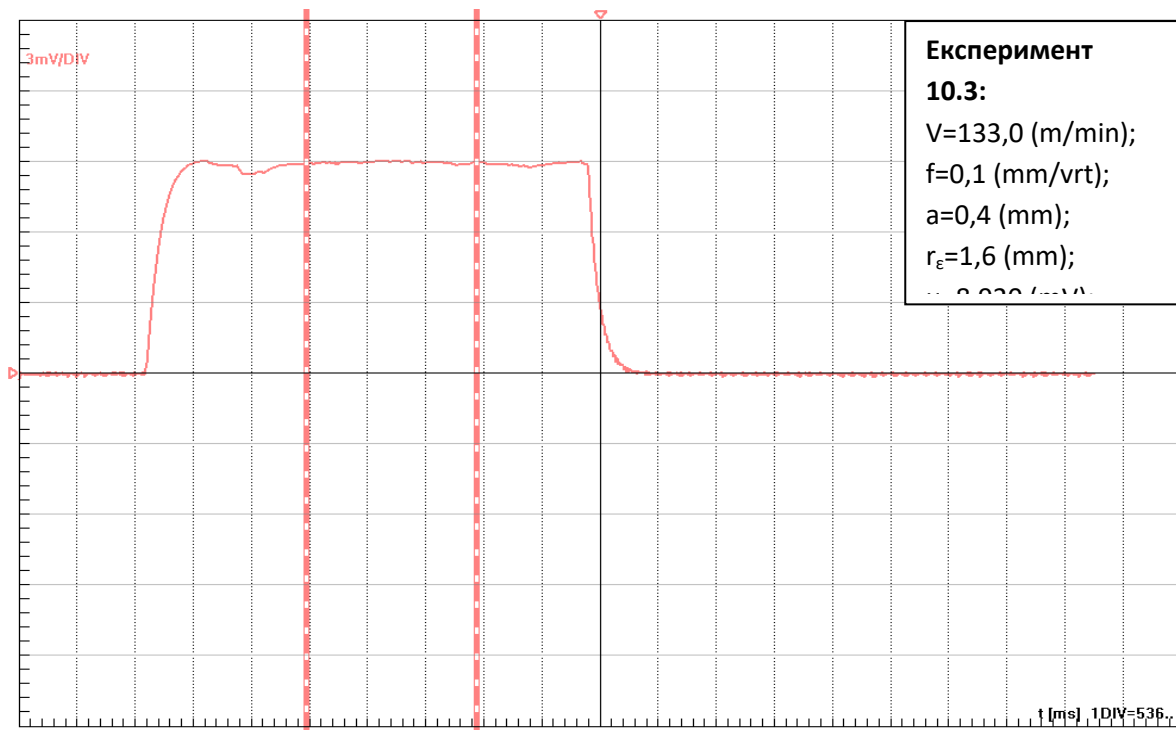
Слика 5.6.1.28: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 10.1

Figure 5.6.1.28: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 10.1



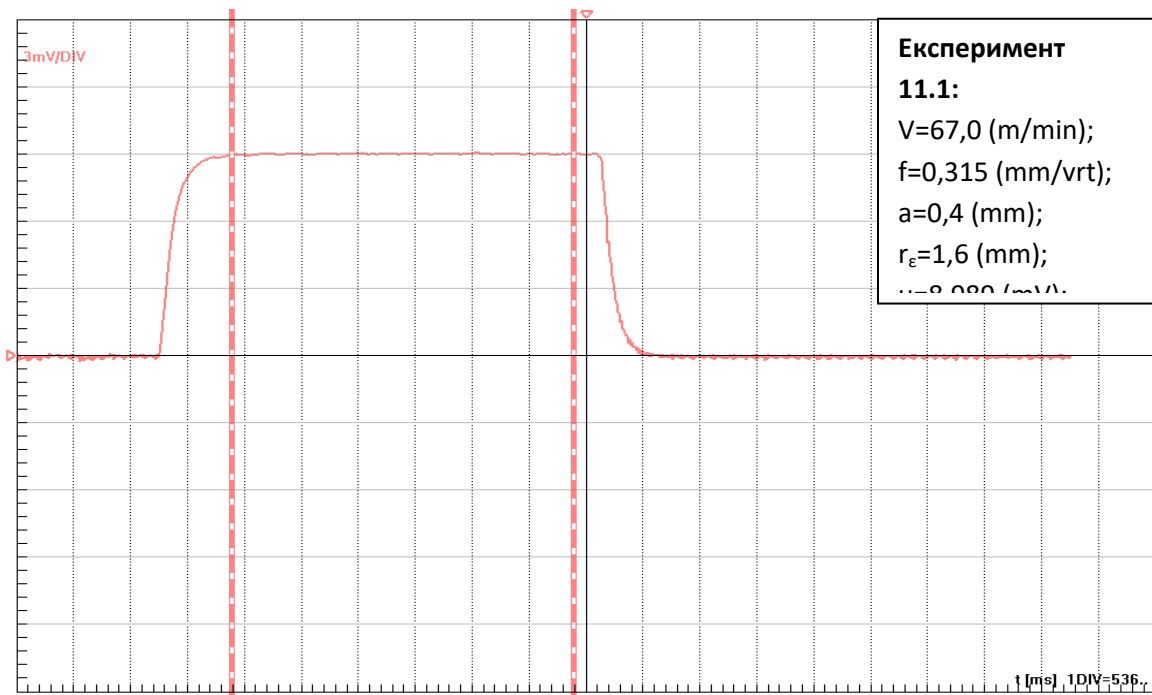
Слика 5.6.1.29: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 10.2

Figure 5.6.1.29: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 10.2



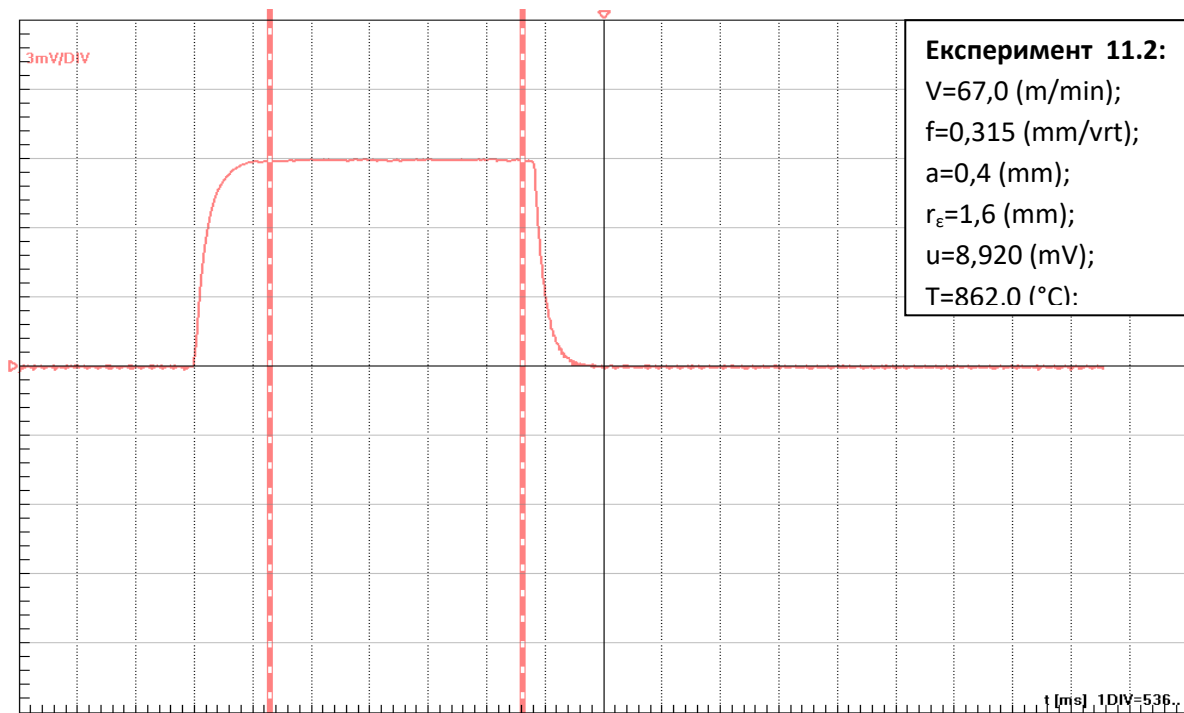
Слика 5.6.1.30: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 10.3

Figure 5.6.1.30: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 10.3



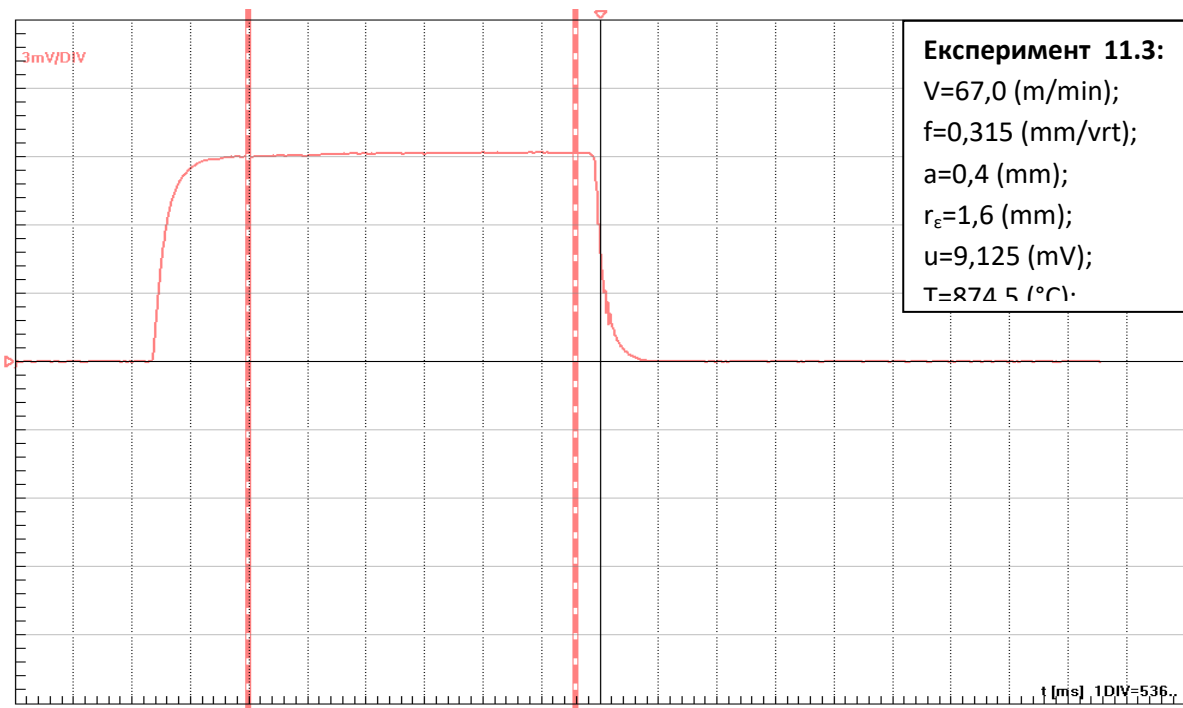
Слика 4.6.1.31: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 11.1

Figure 5.6.1.31: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 11.1



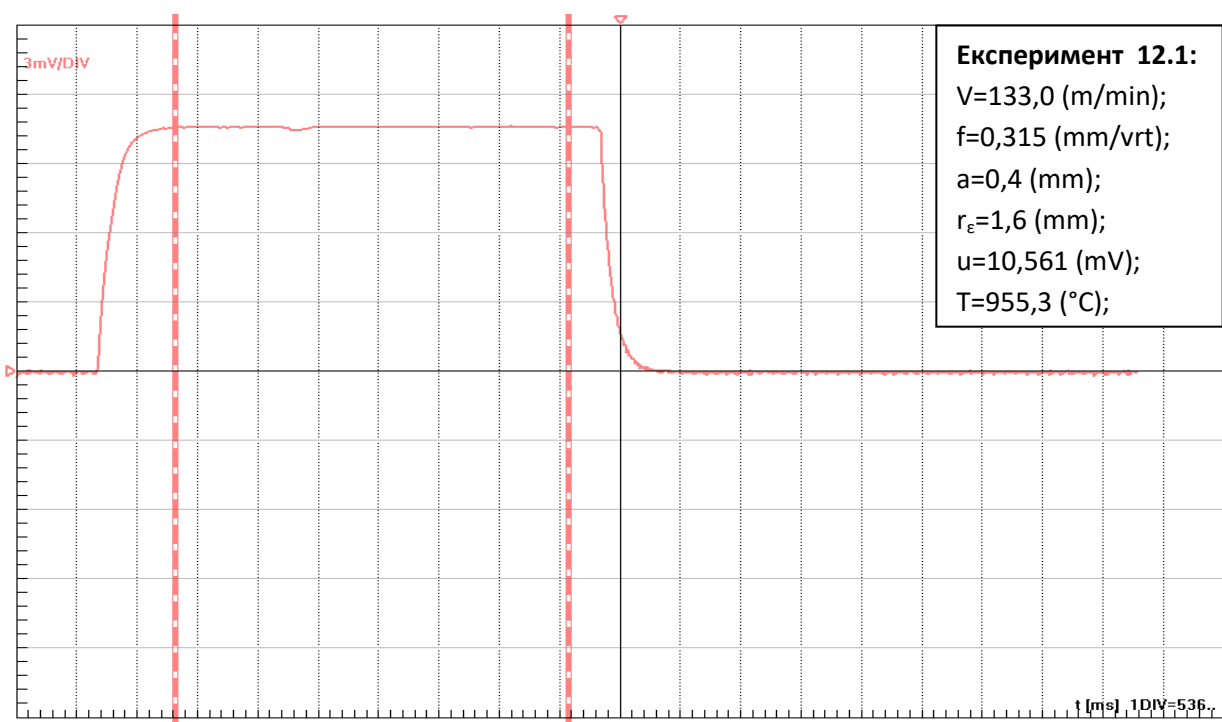
Слика 5.6.1.32: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 11.2

Figure 5.6.1.32: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 11.2



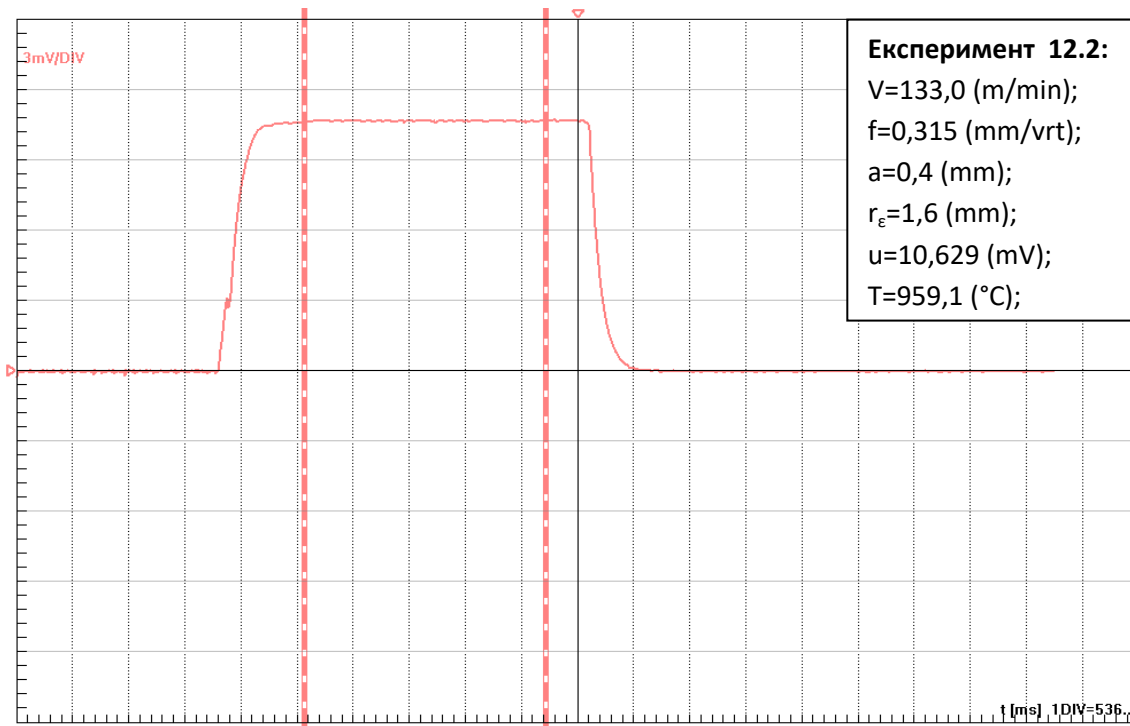
Слика 5.6.1.33: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 11.3

Figure 5.6.1.33: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 11.3



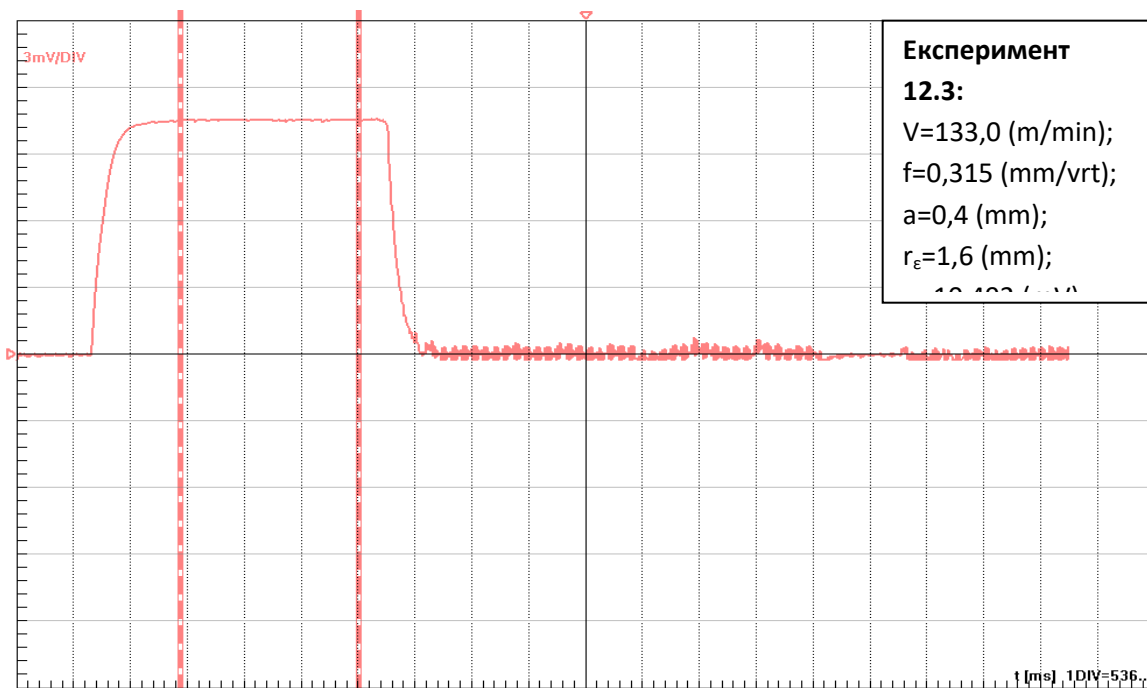
Слика 5.6.1.34: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 12.1

Figure 5.6.1.34: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 12.1



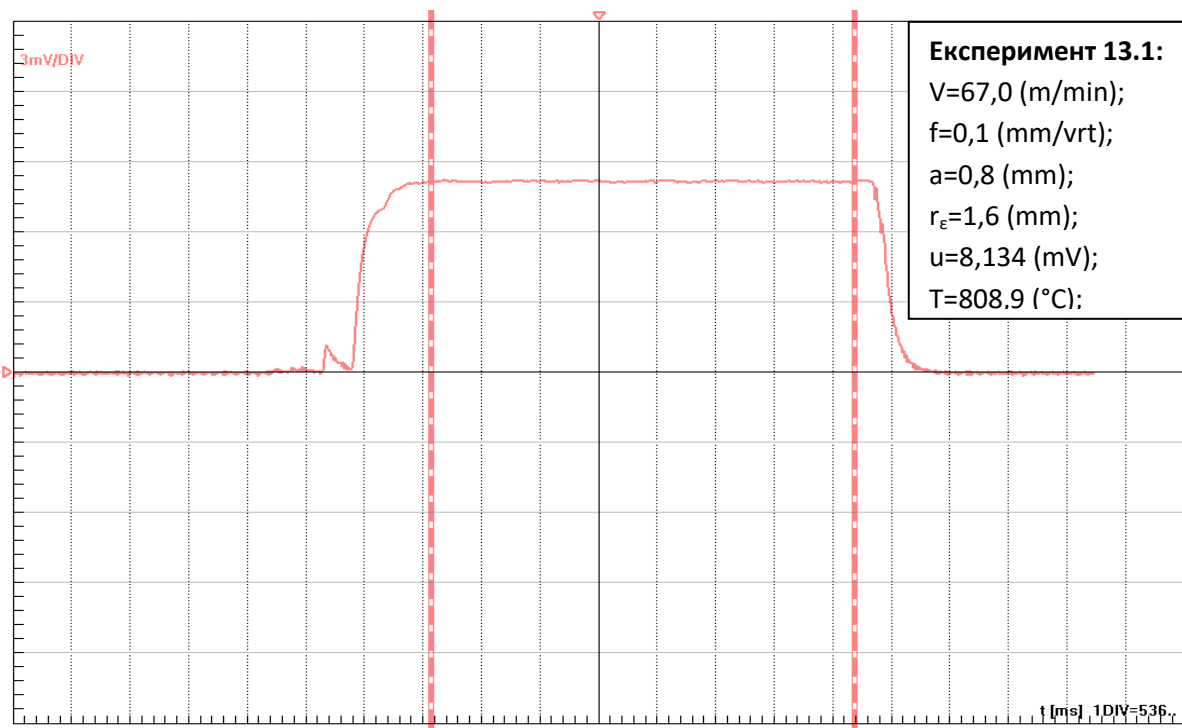
Слика 5.6.1.35: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 12.2

Figure 5.6.1.35: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 12.2



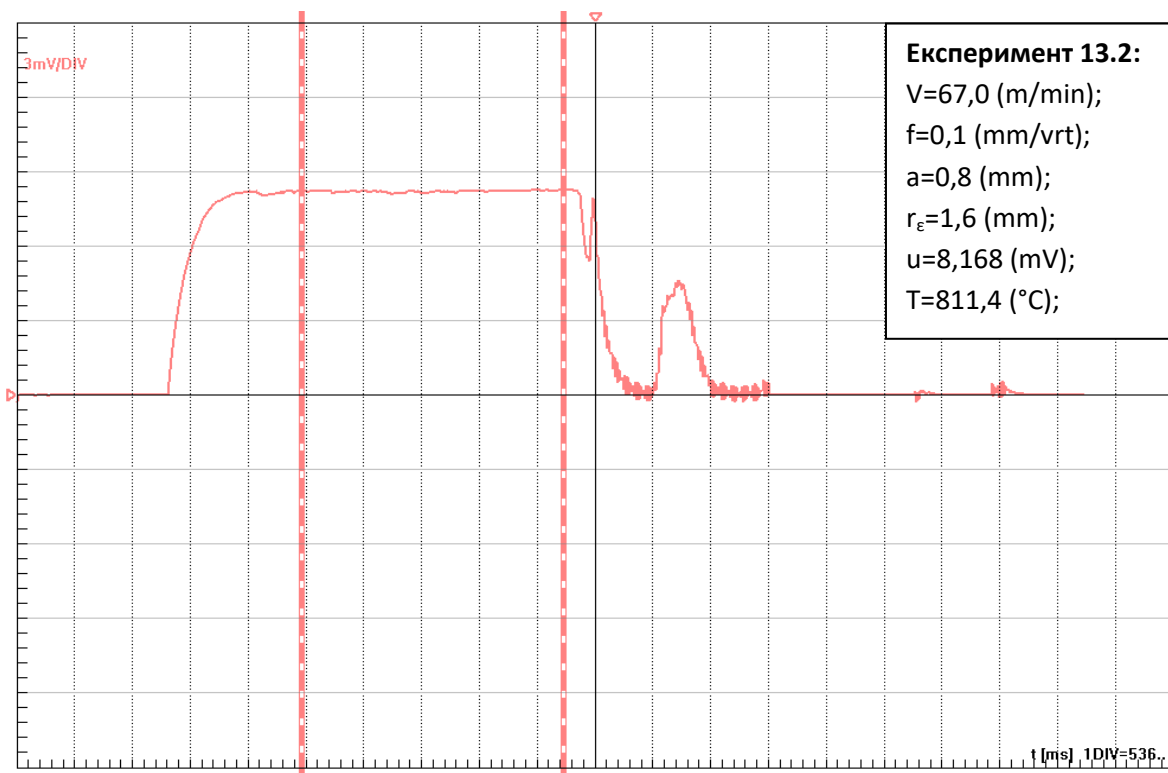
Слика 5.6.1.36: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 12.3

Figure 5.6.1.36: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 12.3



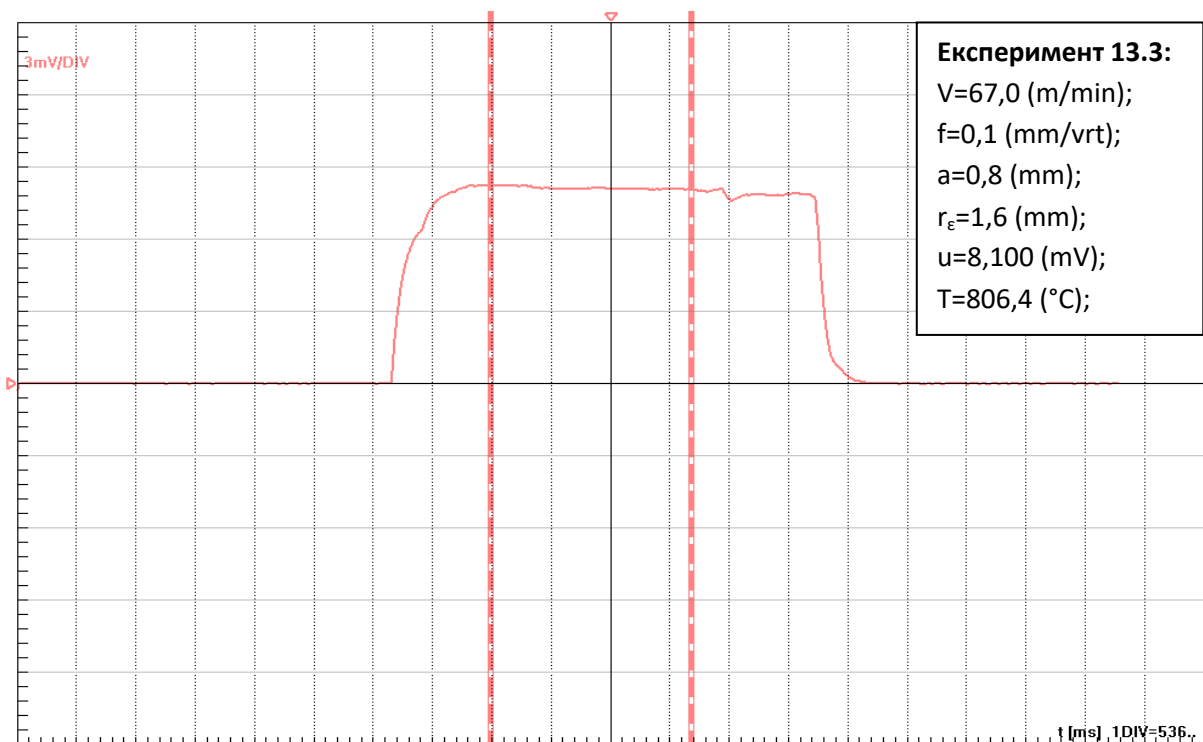
Слика 5.6.1.37: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 13.1

Figure 5.6.1.37: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 11.1



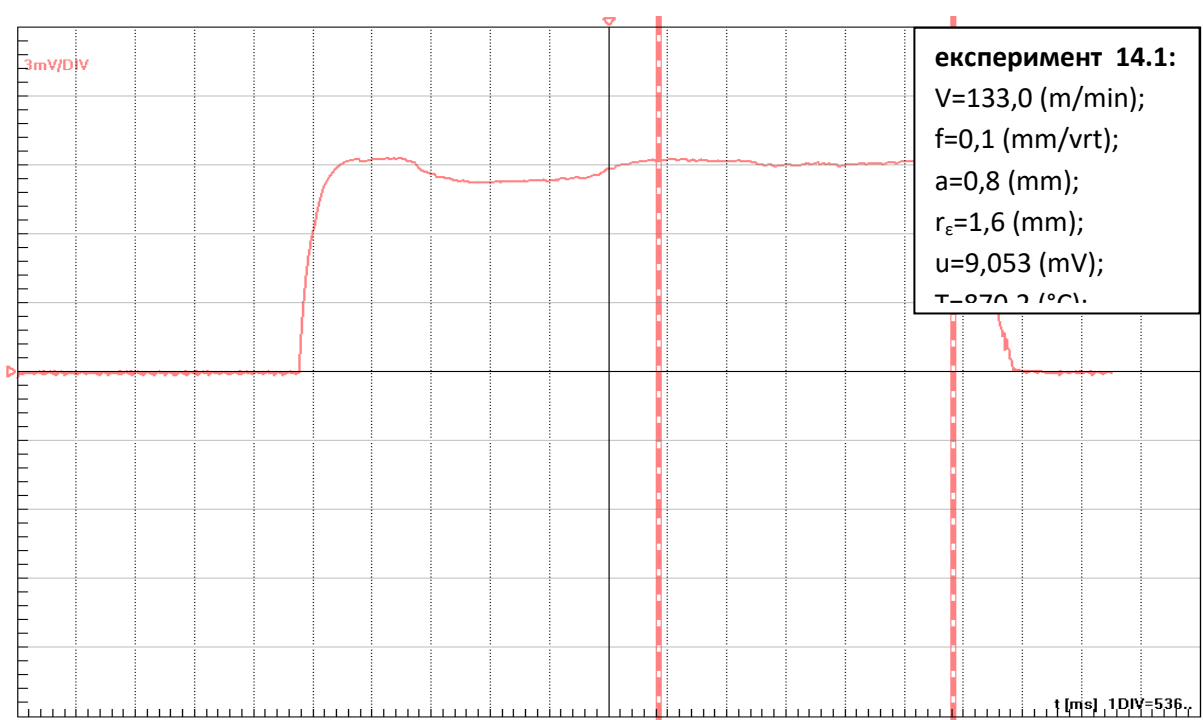
Слика 5.6.1.38: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 13.2

Figure 5.6.1.38: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 13.2



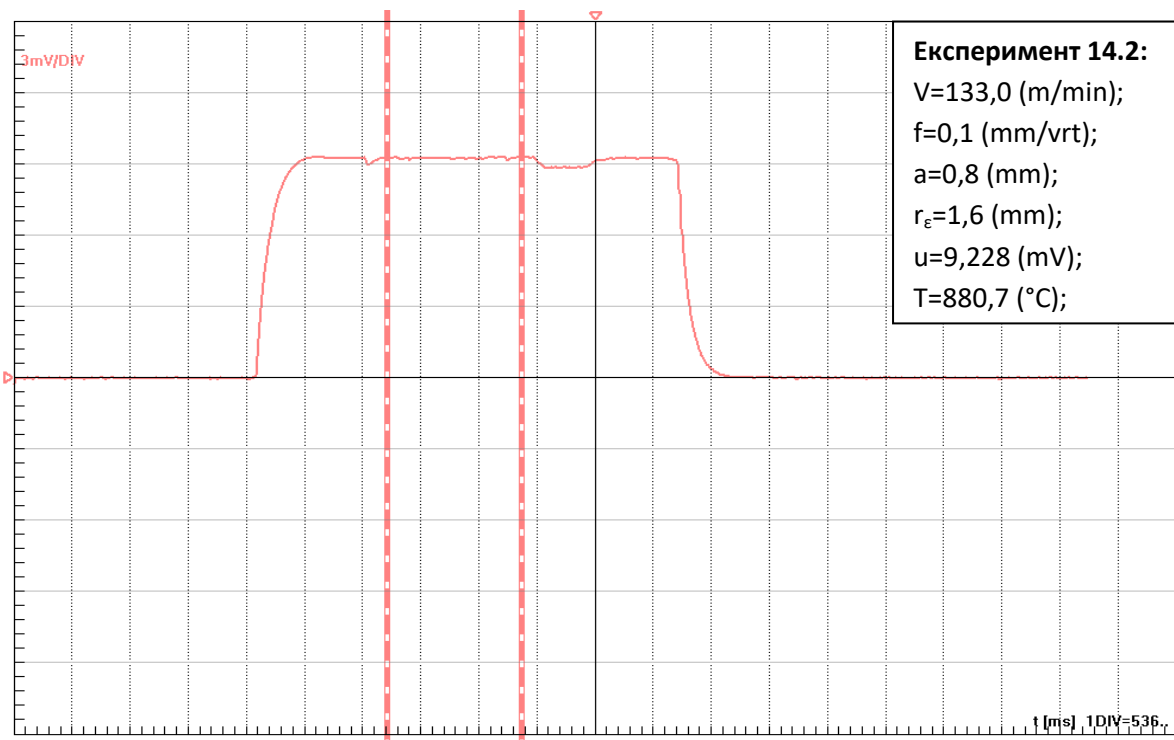
Слика 5.6.1.39: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 13.3

Figure 5.6.1.39: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 11.3



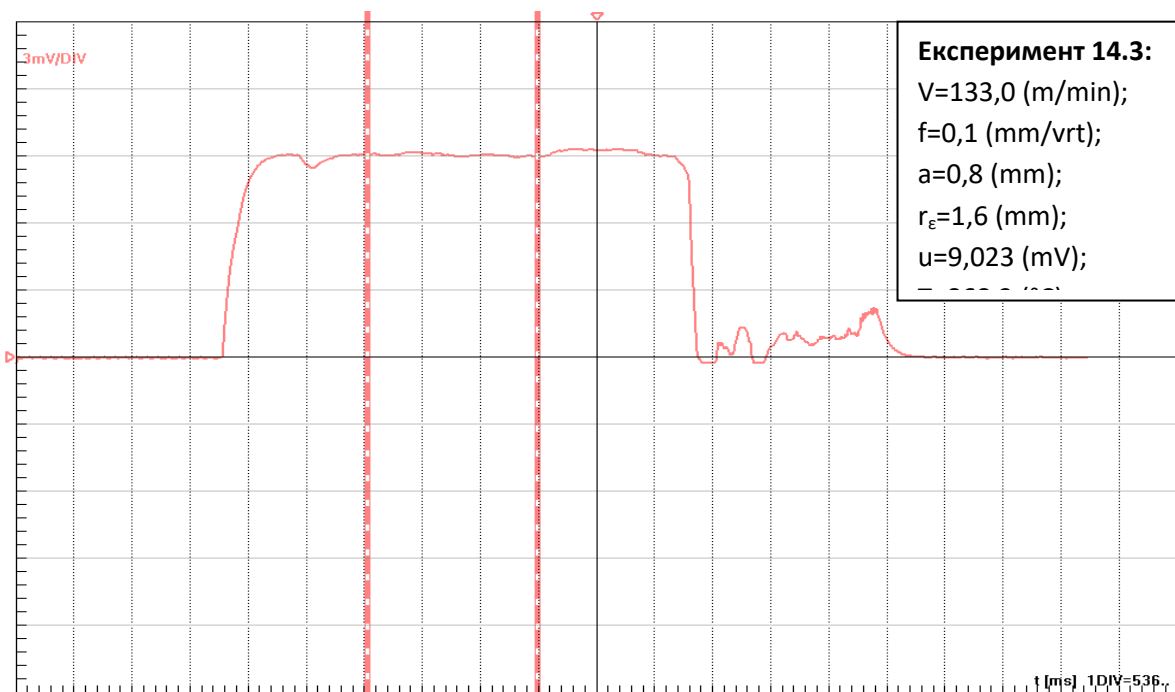
Слика 5.6.1.40: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 14.1

Figure 5.6.1.40: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 14.1



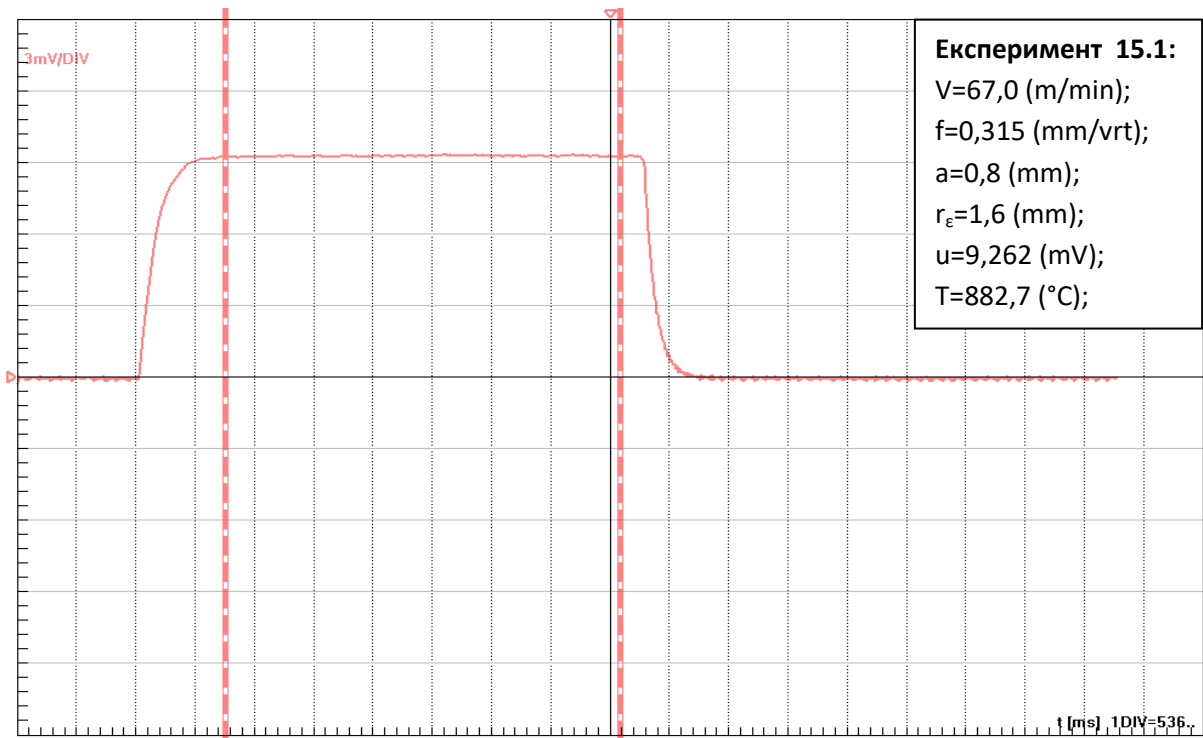
Слика 5.6.1.41: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 14.2

Figure 5.6.1.41: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 14.2



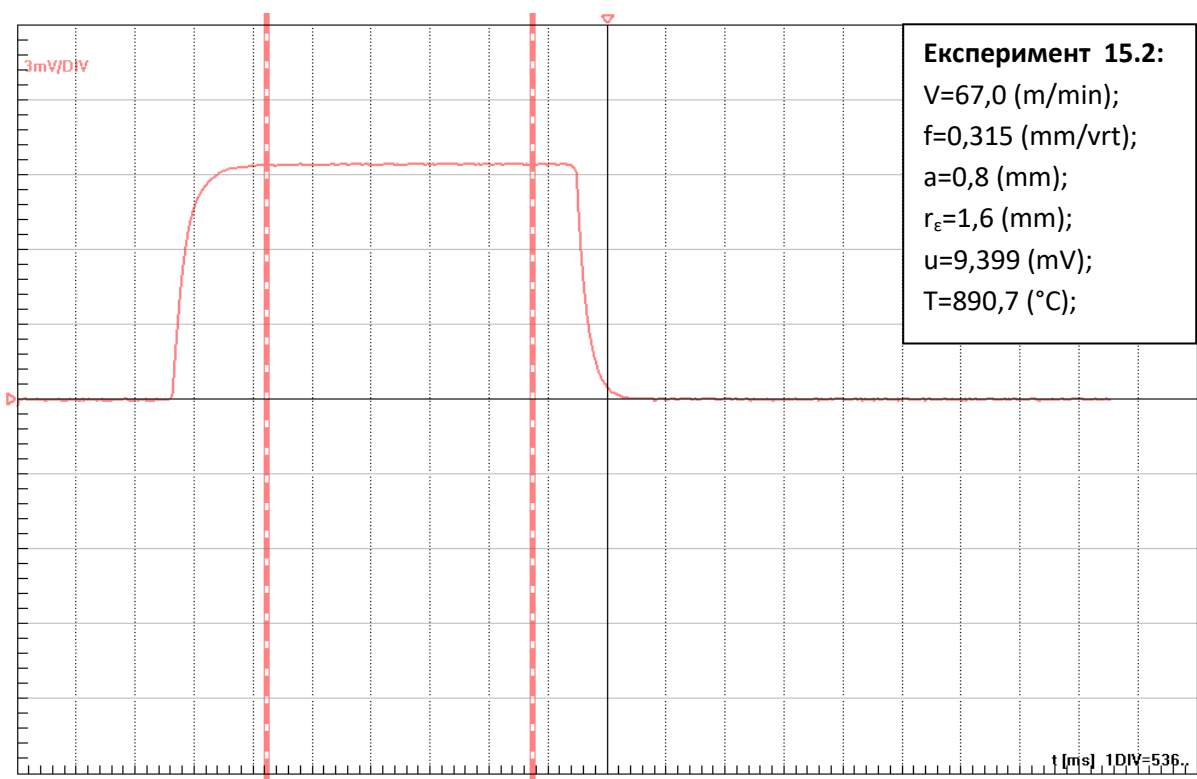
Слика 5.6.1.42: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 14.3

Figure 5.6.1.42: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 14.3



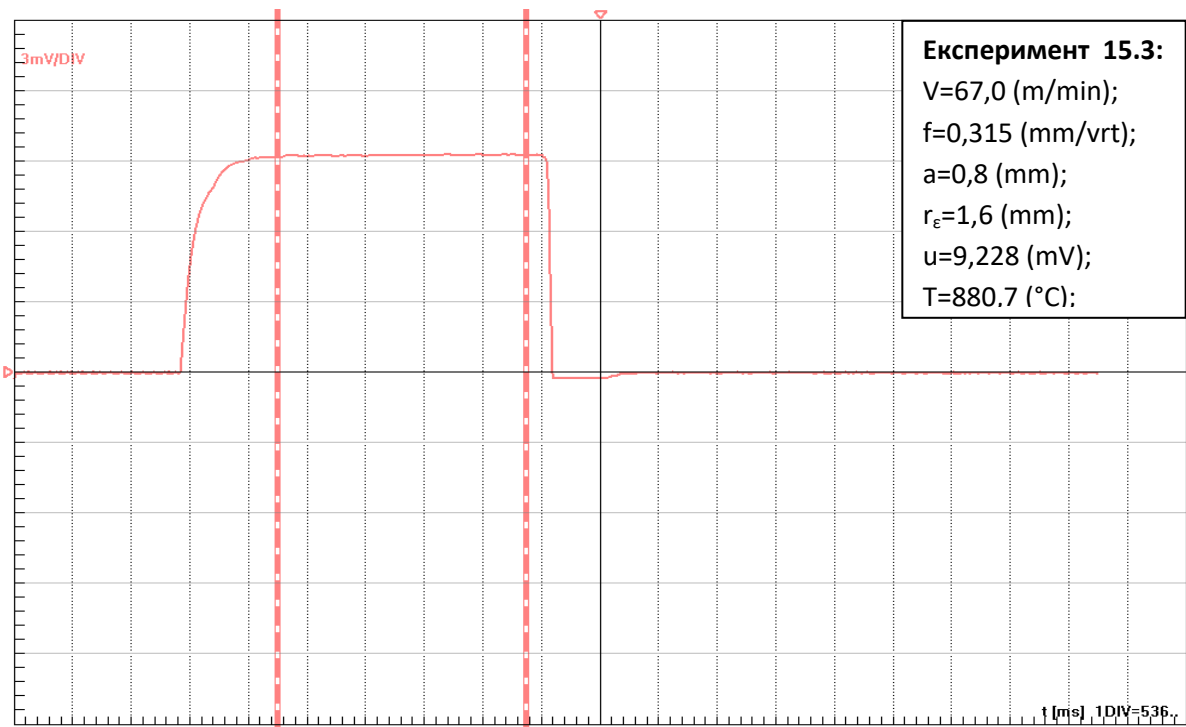
Слика 5.6.1.43: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 15.1

Figure 5.6.1.43: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 15.1



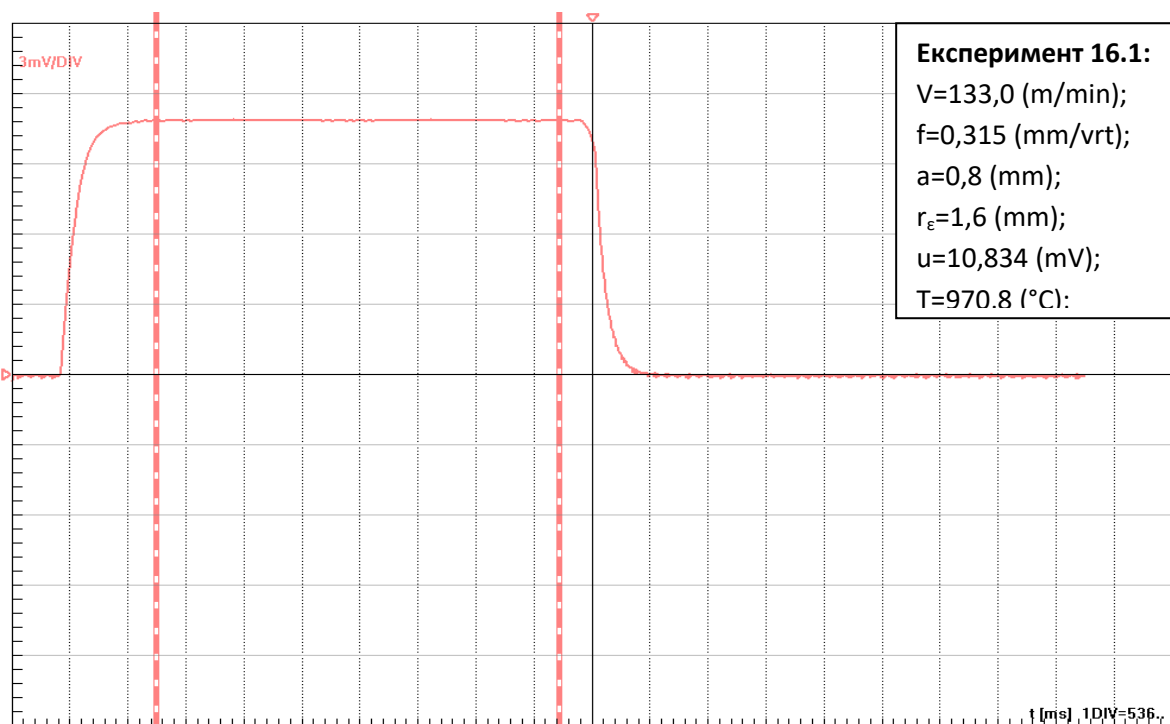
Слика 5.6.1.44: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 15.2

Figure 5.6.1.44: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 15.2



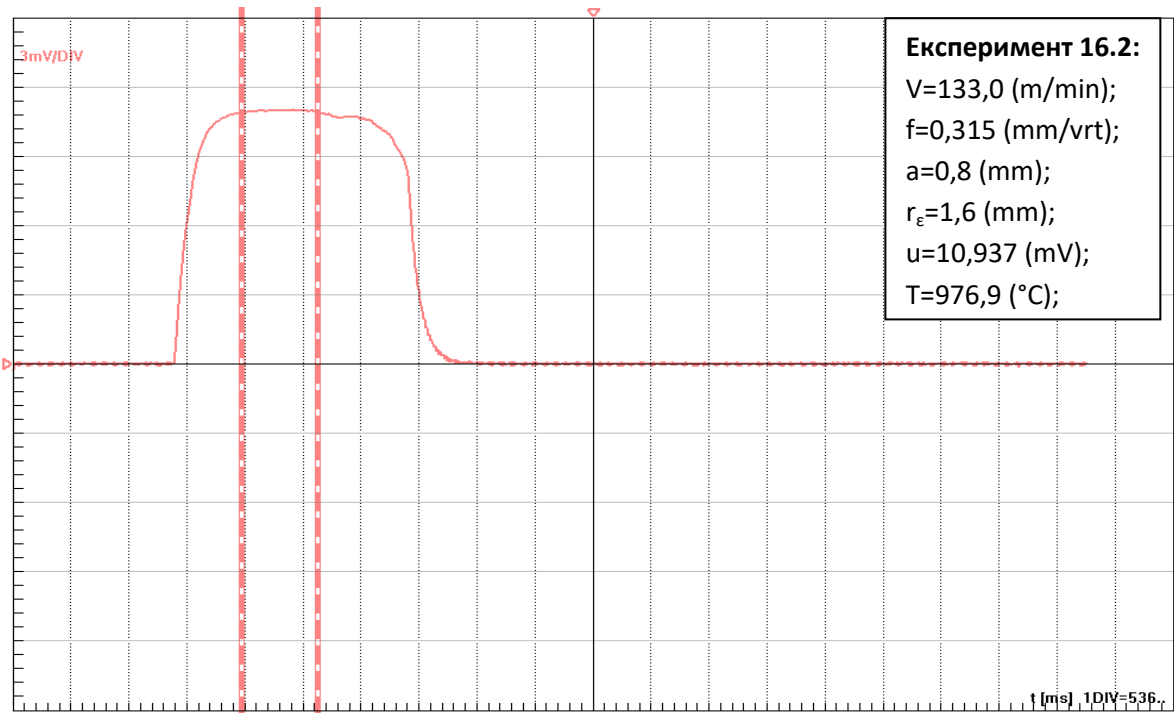
Слика 5.6.1.45: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 15.3

Figure 5.6.1.45: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 15.3



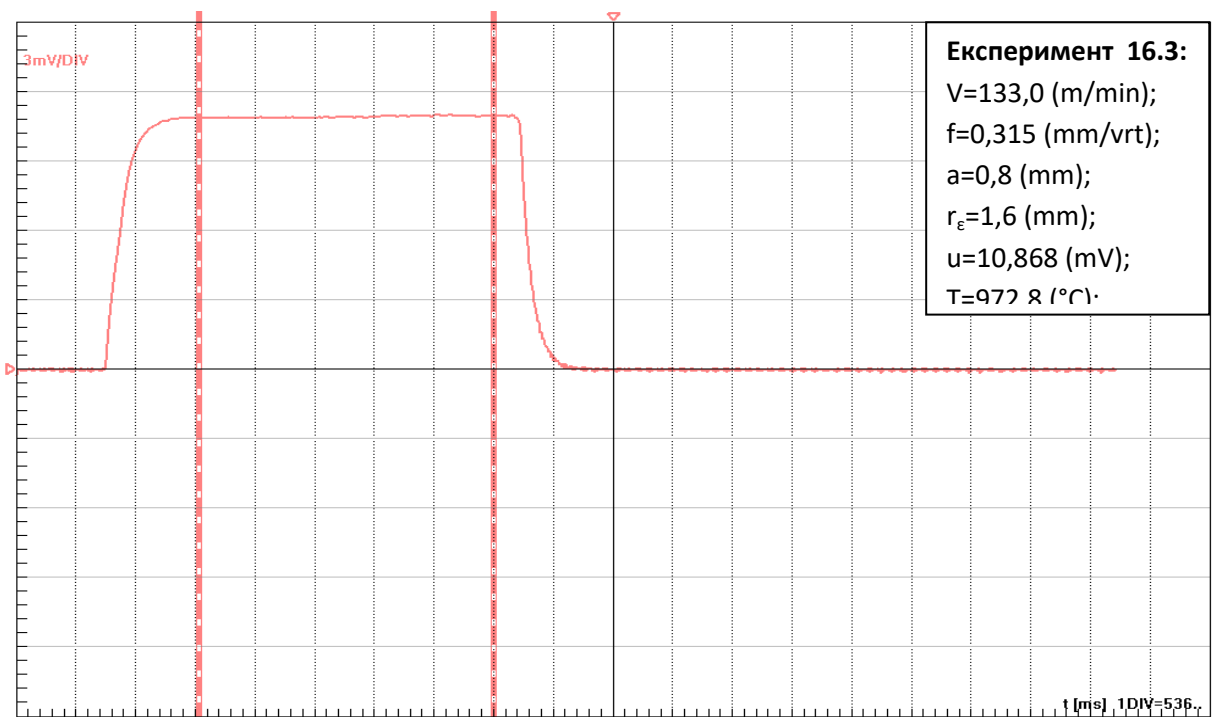
Слика 5.6.1.46: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 16.1

Figure 5.6.1.46: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 16.1



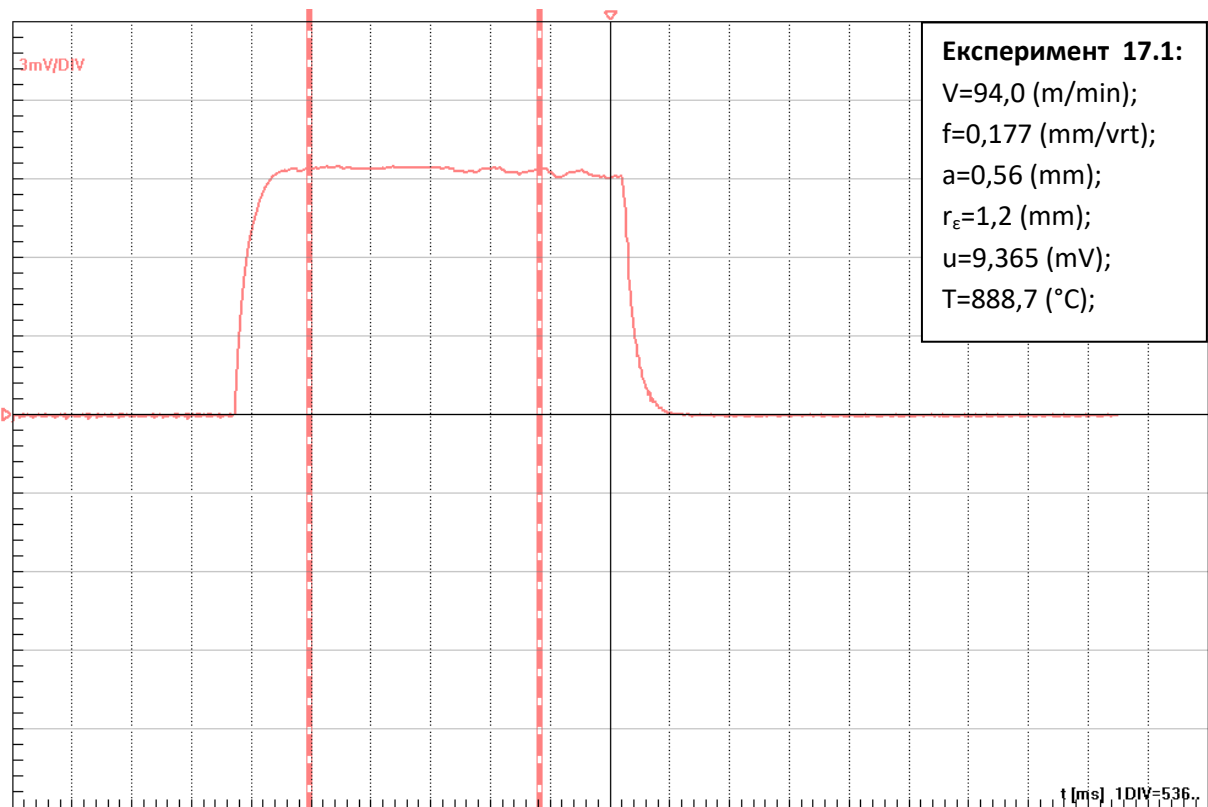
Слика 5.6.1.47: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 16.2

Figure 5.6.1.47: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 16.2



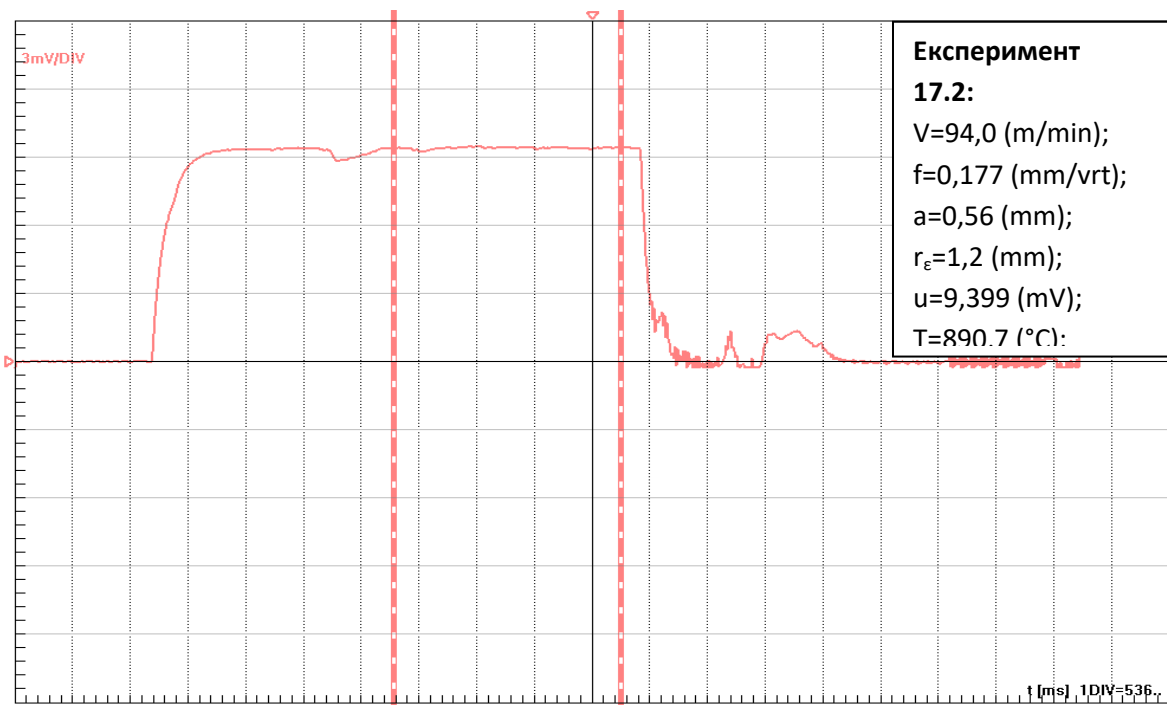
Слика 5.6.1.48: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 16.3

Figure 5.6.1.48: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 16.3



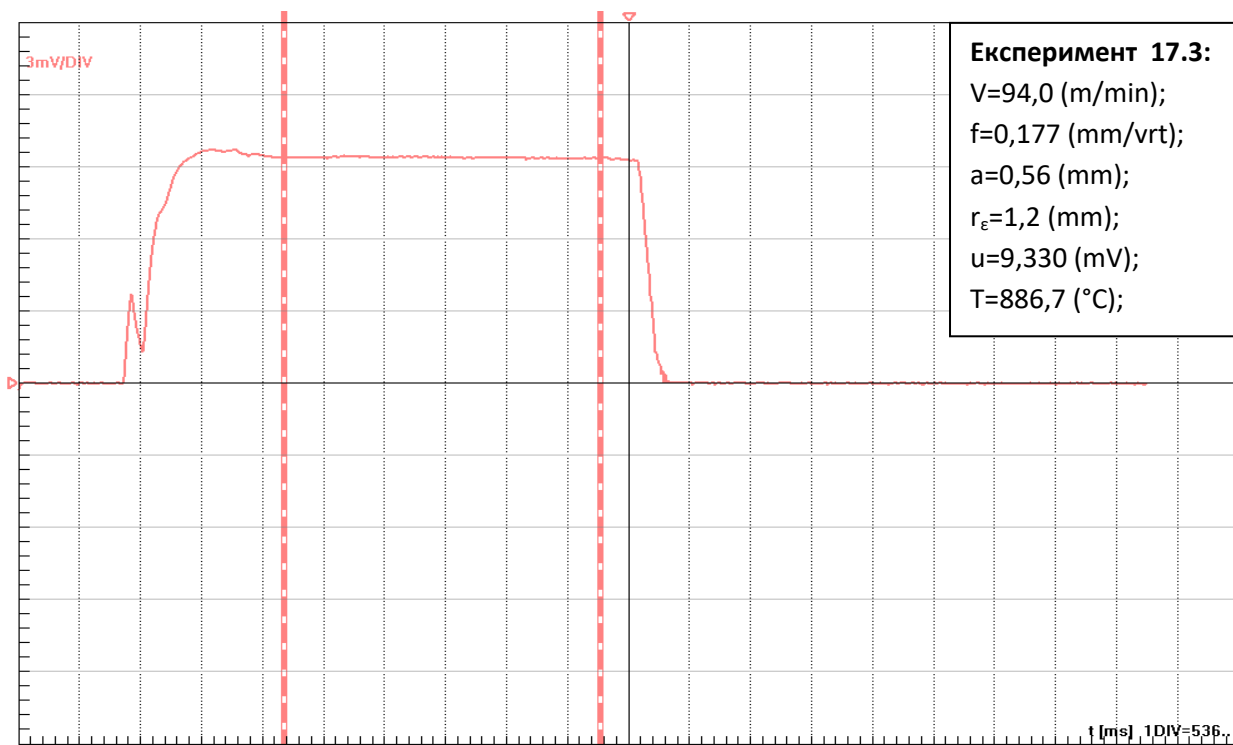
Слика 5.6.1.49: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 17.1

Figure 5.6.1.49: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 17.1



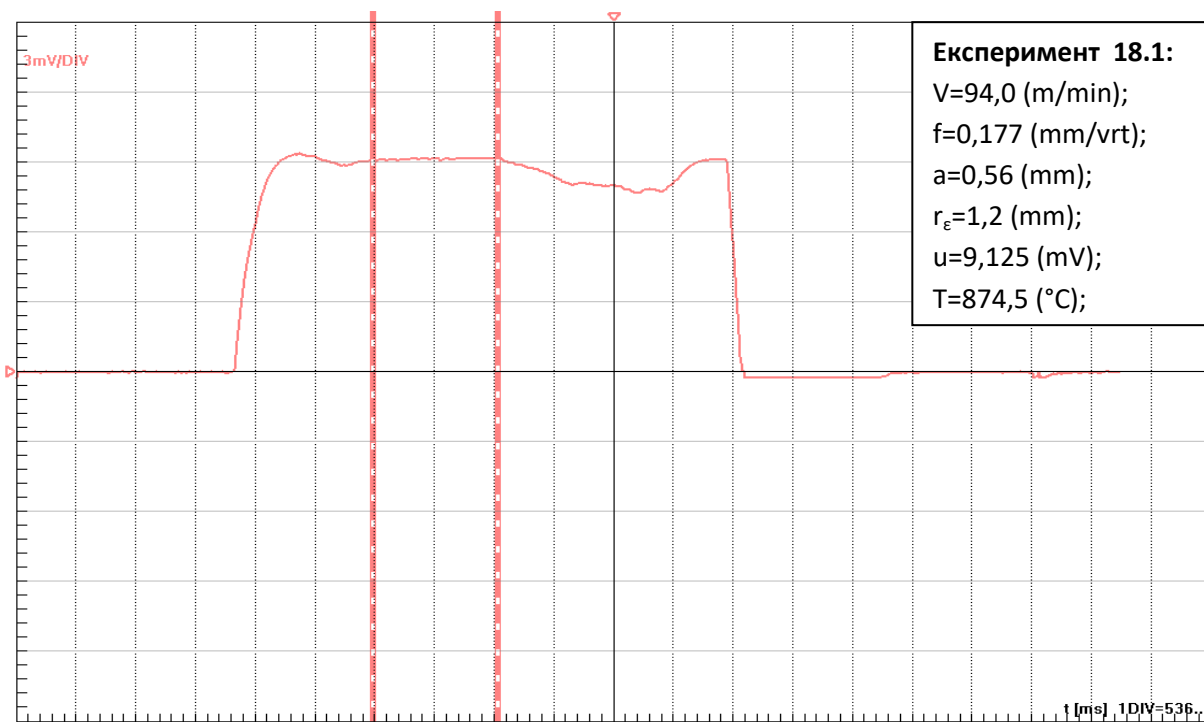
Слика 5.6.1.50: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 17.2

Figure 5.6.1.50: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 17.2



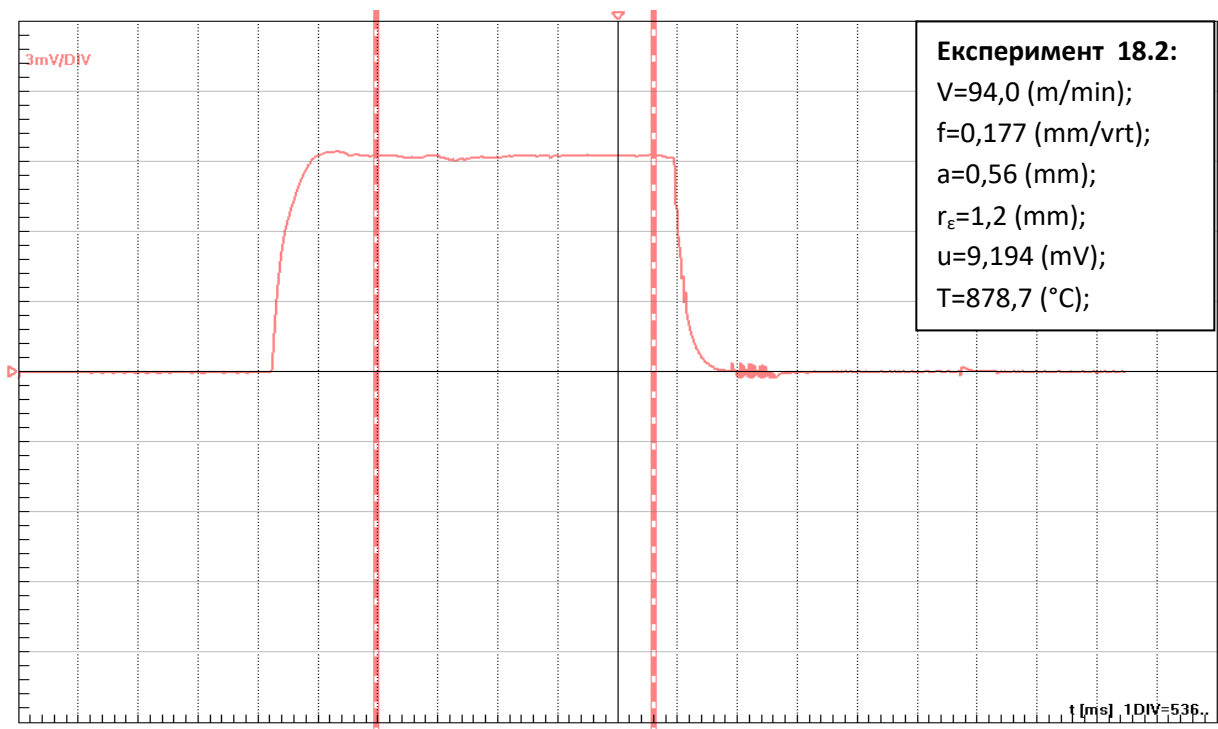
Слика 5.6.1.51: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 17.3

Figure 5.6.1.51: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 17.3



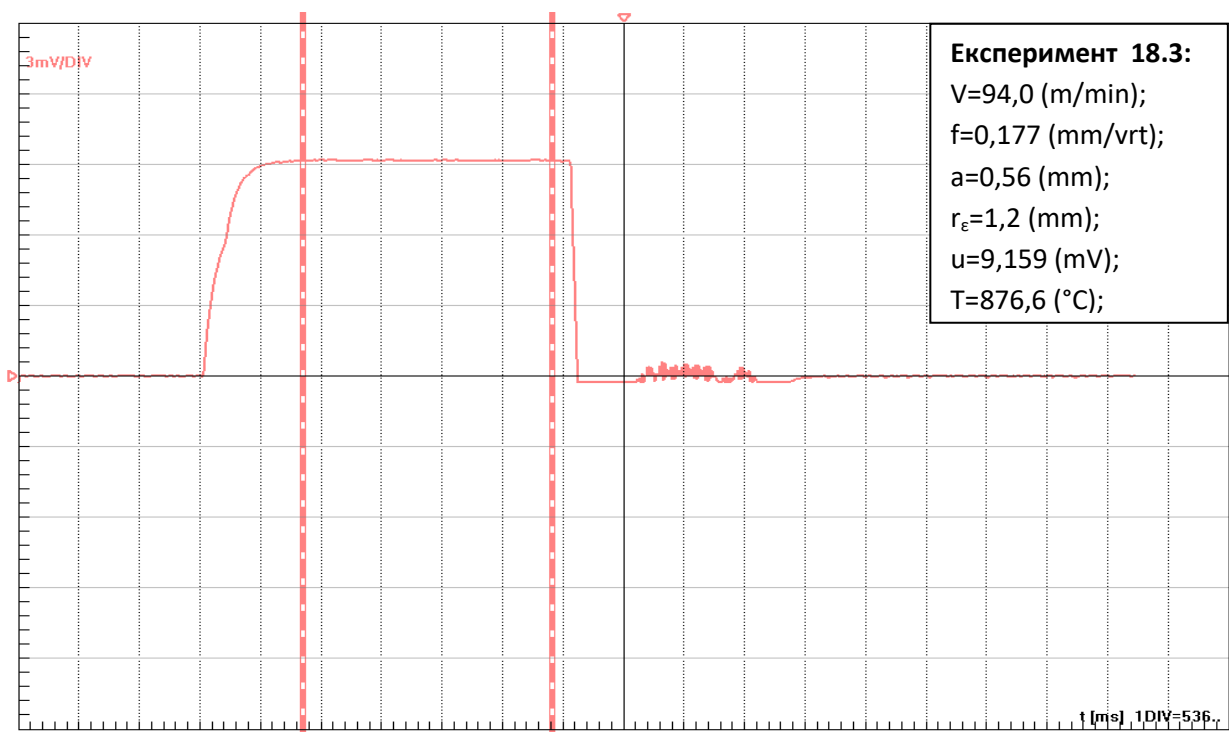
Слика 5.6.1.52: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 18.1

Figure 5.6.1.52: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 18.1



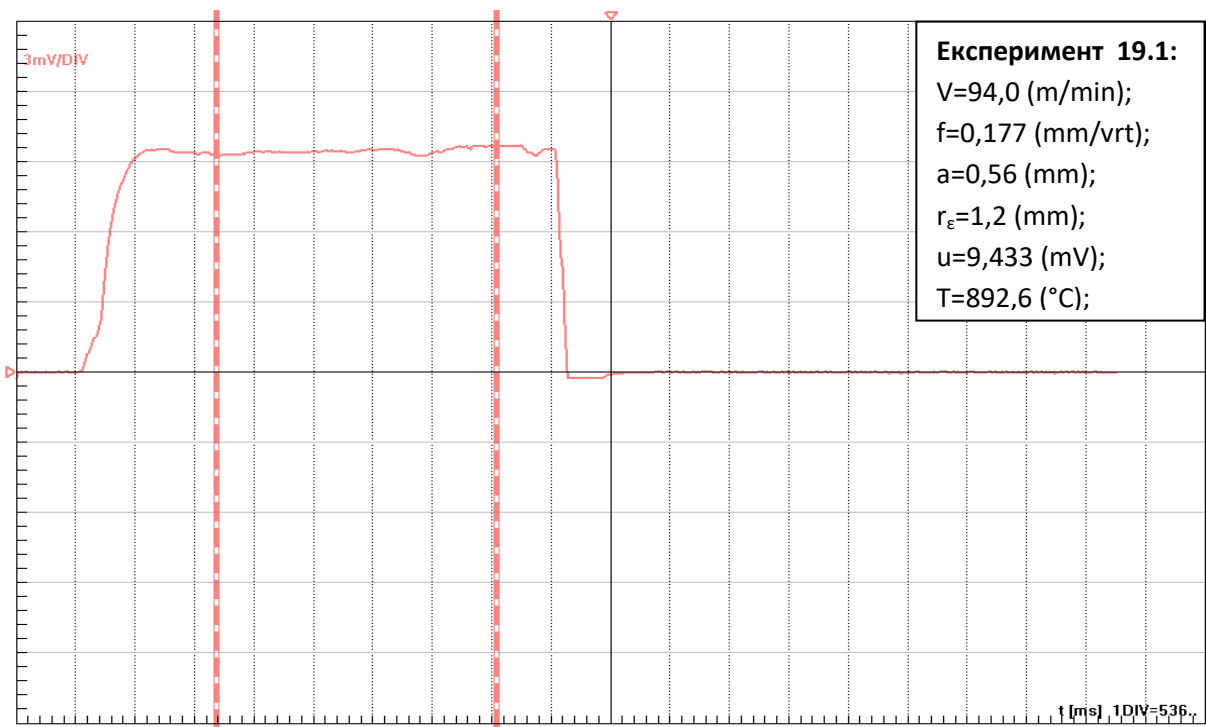
Слика 5.6.1.53: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 18.2

Figure 5.6.1.53: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 18.2



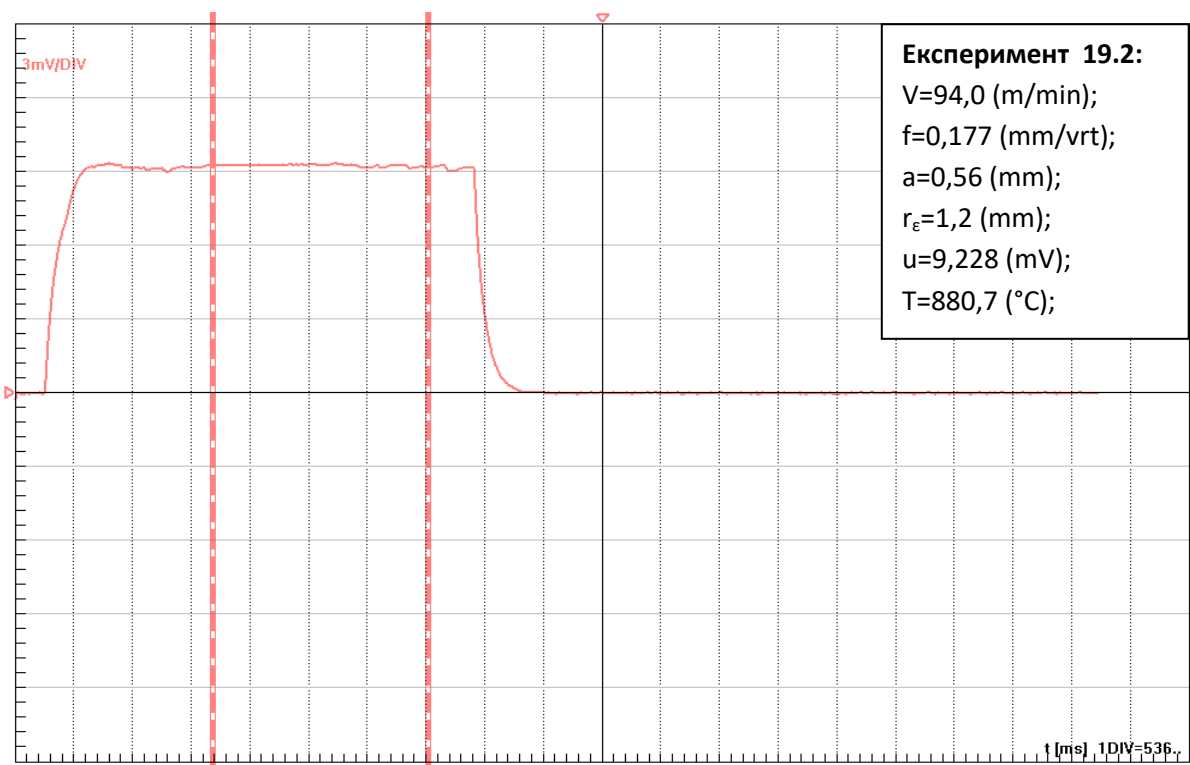
Слика 5.6.1.54: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 18.3

Figure 5.6.1.54: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 18.3



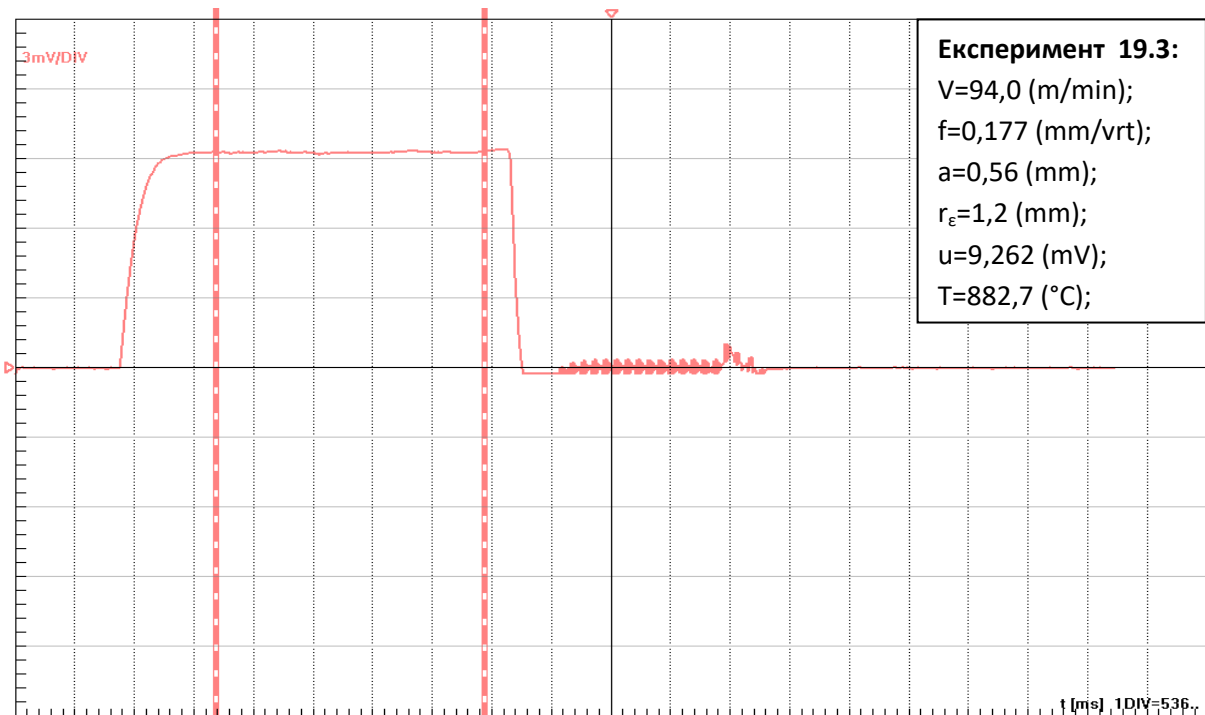
Слика 5.6.1.55: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 19.1

Figure 5.6.1.55: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 19.1



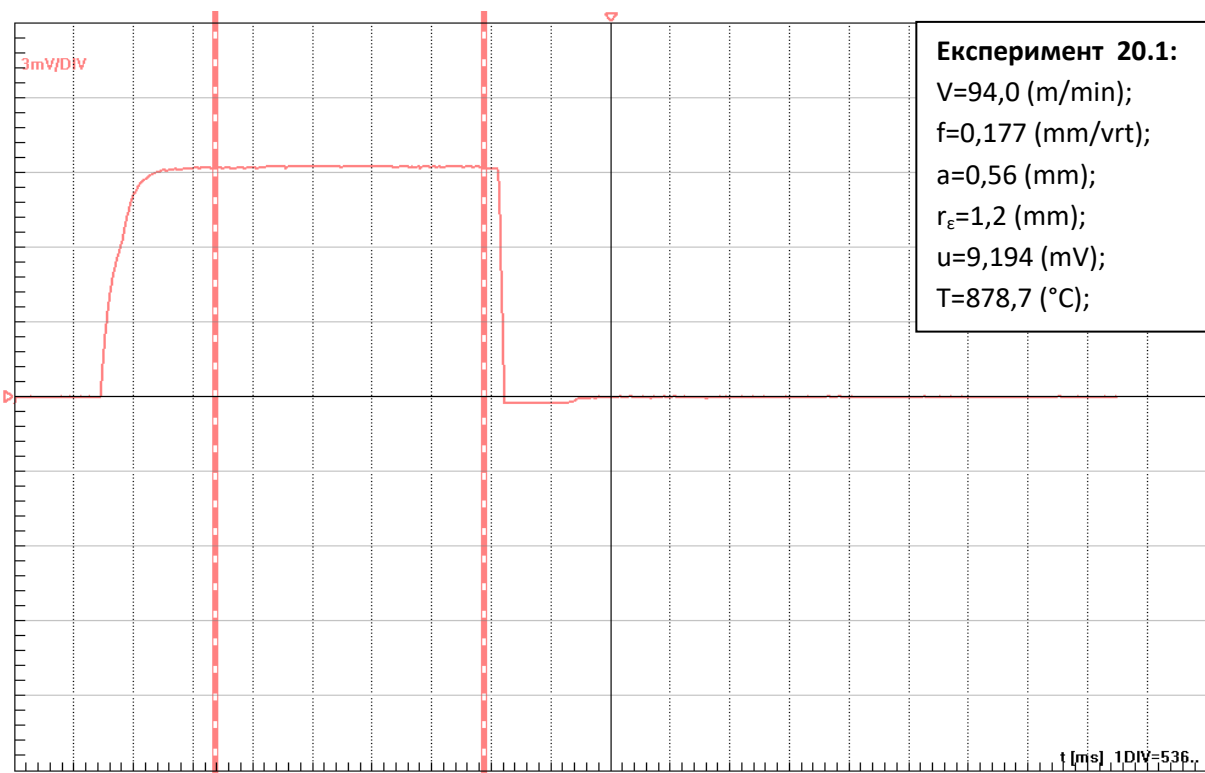
Слика 5.6.1.56: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 19.2

Figure 5.6.1.56: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 19.2



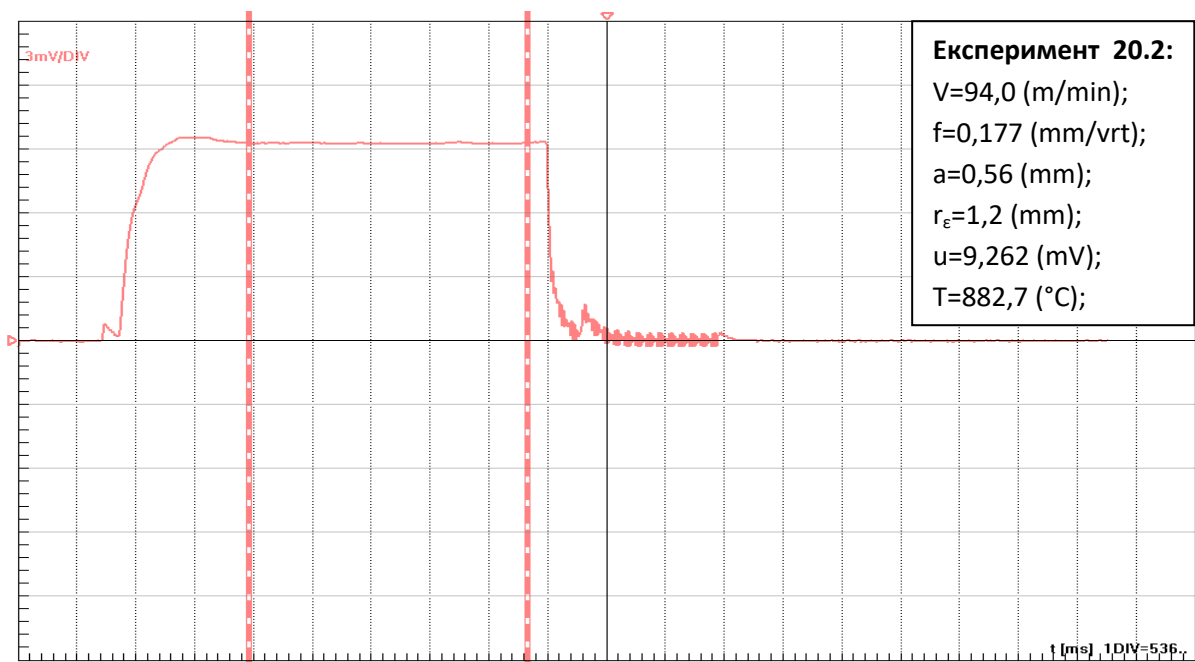
Слика 5.6.1.57: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 19.3

Figure 5.6.1.57: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 19.3



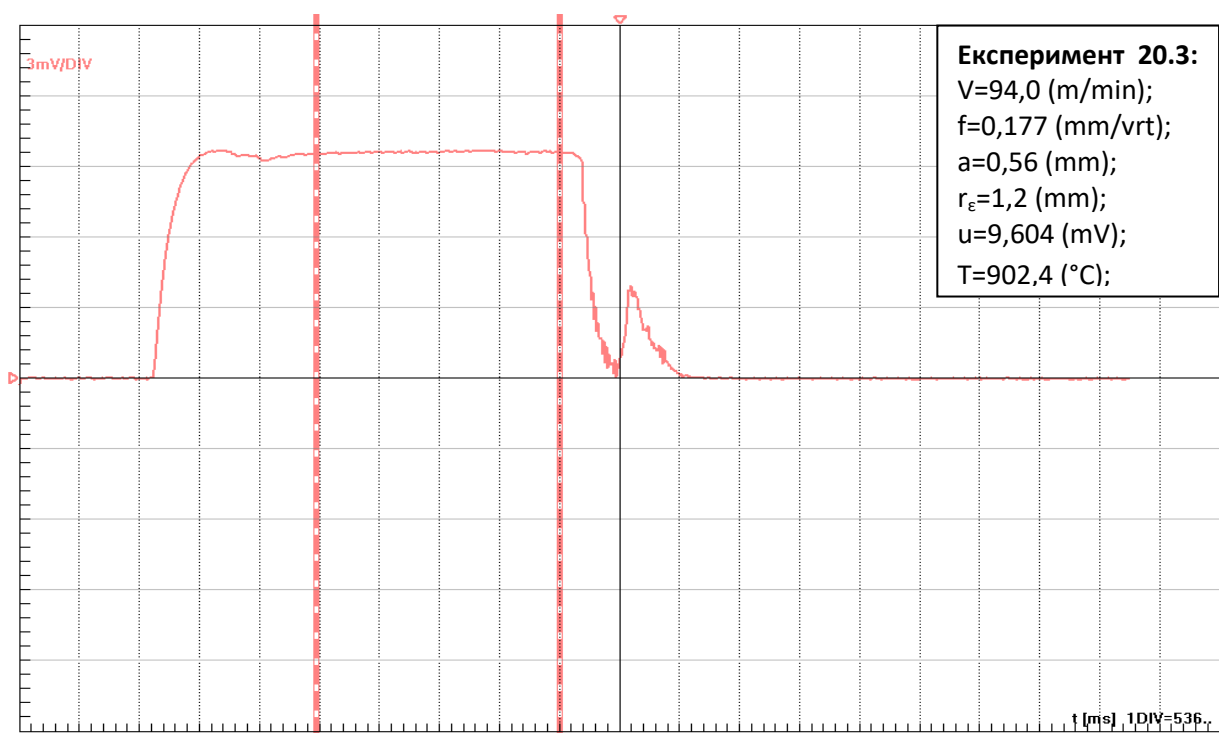
Слика 5.6.1.58: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 20.1

Figure 5.6.1.58: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 20.1



Слика 5.6.1.59: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 20.2

Figure 5.6.1.59: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 20.2

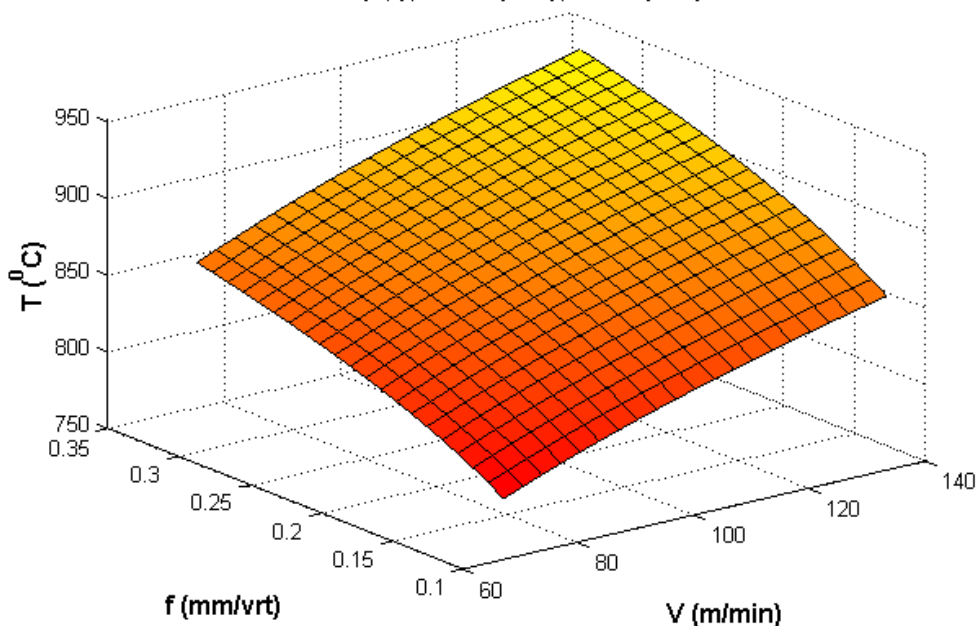


Слика 5.6.1.60: Сигнал за средната температура во процесот на режење за експеримент 20.3

Figure 5.6.1.60: Mean temperature signal in the cutting process for the experiment 20.2

6.3. ГРАФИЧКА ИНТЕРПРЕТАЦИЈА НА МАТЕМАТИЧКИТЕ МОДЕЛИ

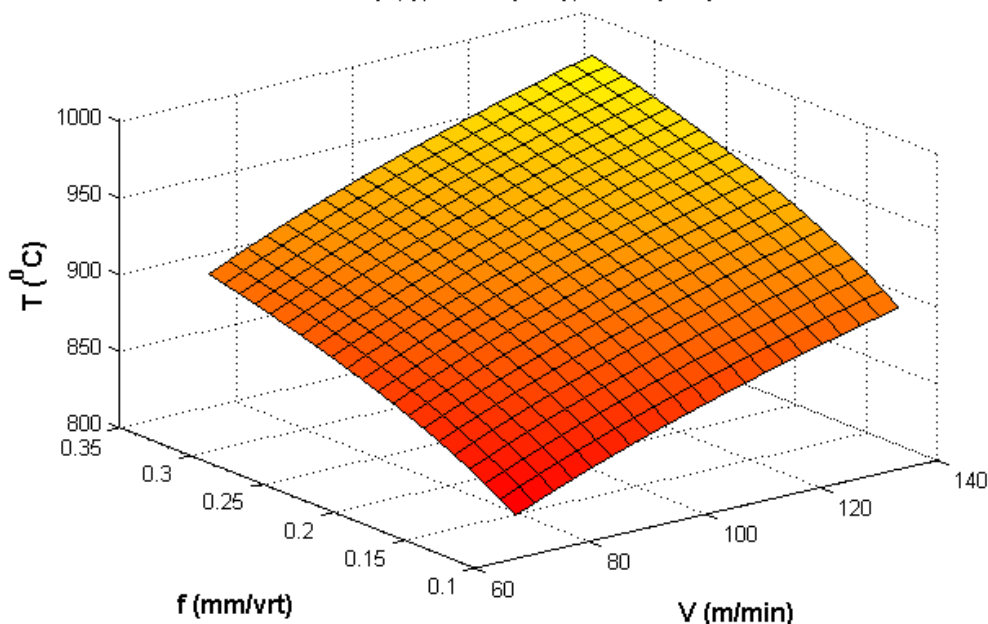
$$T=f(V,f); a=0.4 \text{ (mm)}; r=1.6 \text{ (mm)}$$



Слика 6.3.3: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од V (m/min) и f (mm/vrt), при $r=1,6$ (mm), $a=0,4$ (mm)

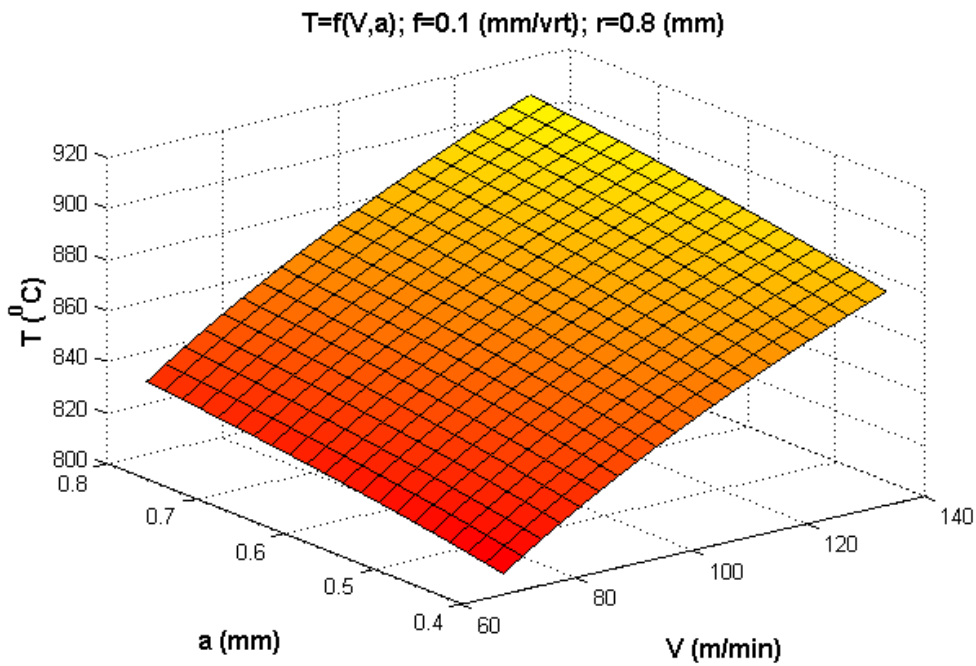
Figure 6.3.3: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of V (m/min) and f (mm/rev), at $a = 0,4$ (mm) and $r = 1,6$

$$T=f(V,f); a=0.8 \text{ (mm)}; r=0.8 \text{ (mm)}$$



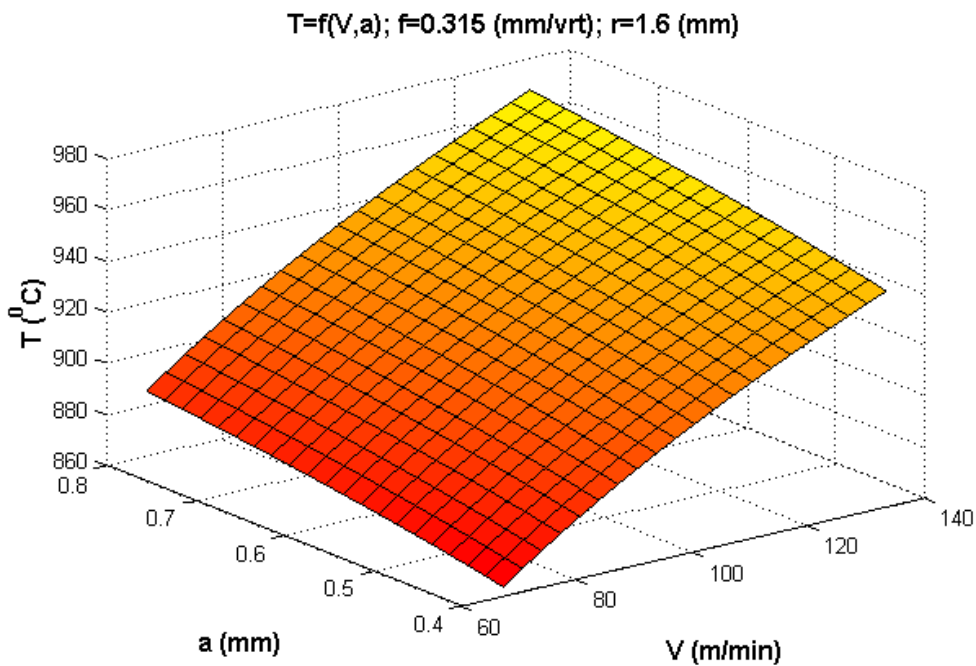
Слика 6.3.4: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од V (m/min) и f (mm/vrt), при $a=0,8$ (mm) $r=0,8$ (mm)

Figure 6.3.4: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of V (m/min) and f (mm/rev), at $a = 0,8$ (mm) and $r = 0,8$ (mm)



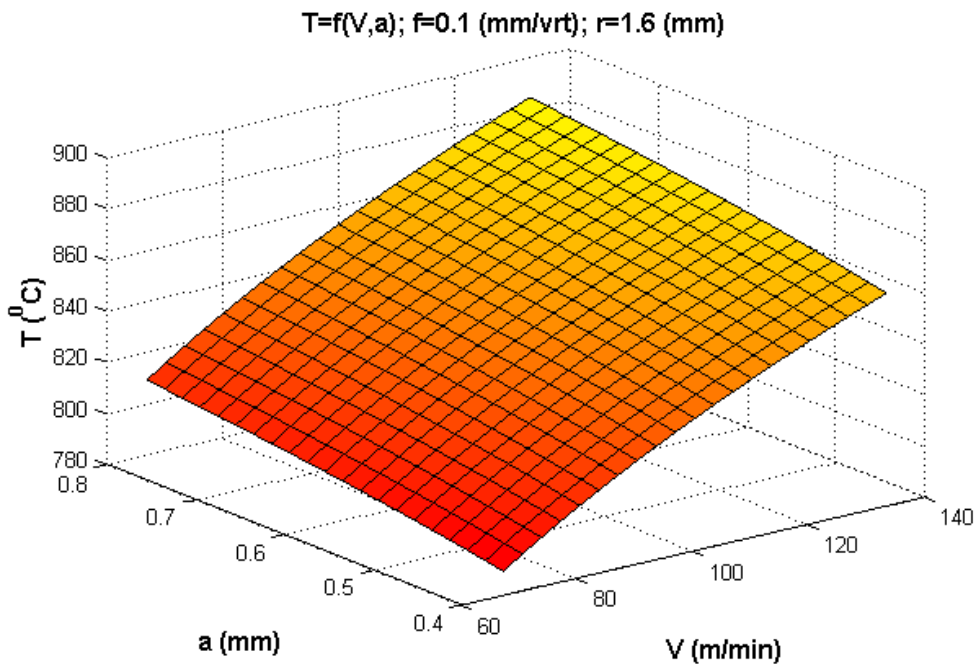
Слика 6.3.5: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од $V \text{ (m/min)}$ и $a \text{ (mm)}$, при $f=0,1 \text{ (mm/vrt)}$ и $r=0,8 \text{ (mm)}$

Figure 6.3.5: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of $V \text{ (m/min)}$ and $a \text{ (mm)}$, at $r = 0,8 \text{ (mm)}$ and $f=0,1 \text{ (mm/rev)}$



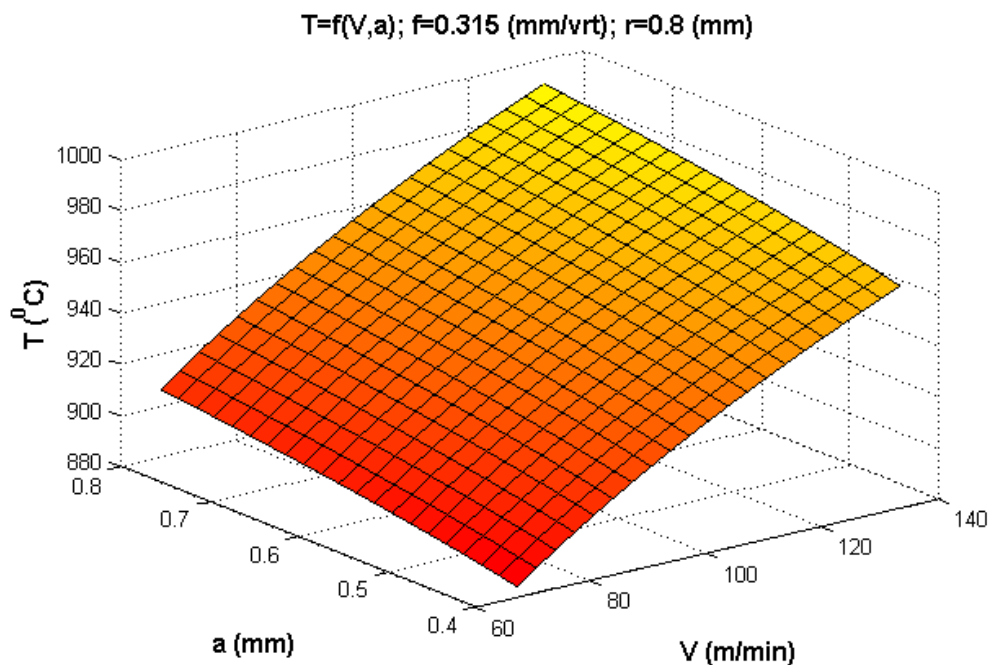
Слика 6.3.6: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од $V \text{ (m/min)}$ и $a \text{ (mm)}$, при $f=0,315 \text{ (mm/vrt)}$ и $r=1,6 \text{ (mm)}$

Figure 6.3.6: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of $V \text{ (m/min)}$ and $a \text{ (mm)}$, at $r = 1,6 \text{ (mm)}$ and $f=0,315 \text{ (mm/rev)}$



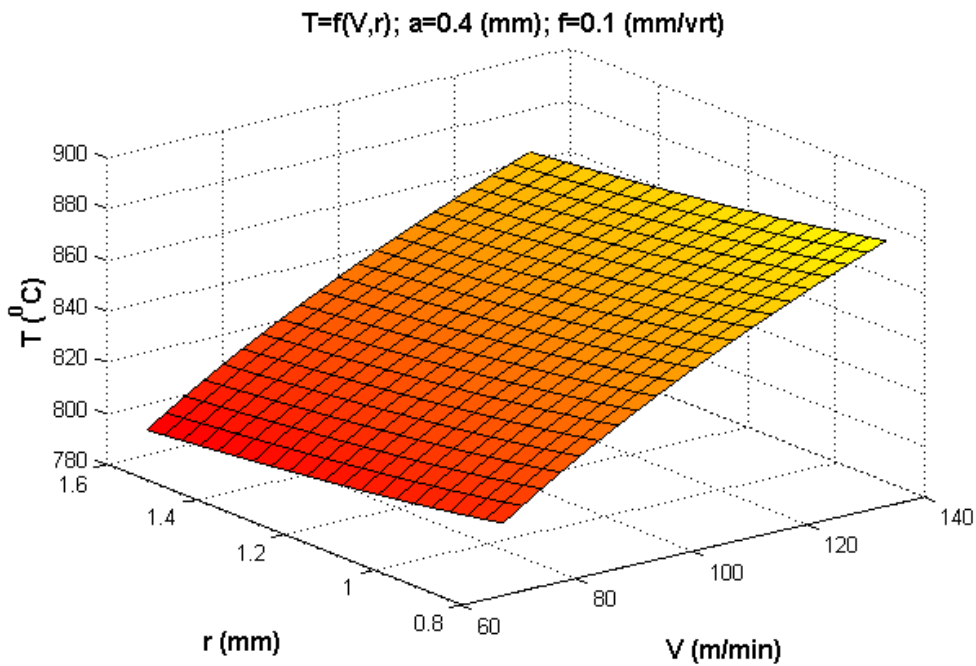
Слика 6.3.7: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од $V \text{ (m/min)}$ и $a \text{ (mm)}$, при $f=0,1 \text{ (mm/vrt)}$ и $r=1,6 \text{ (mm)}$

Figure 6.3.7: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of $V \text{ (m/min)}$ and $a \text{ (mm)}$, at $r = 1,6 \text{ (mm)}$ and $f=0,1 \text{ (mm/rev)}$



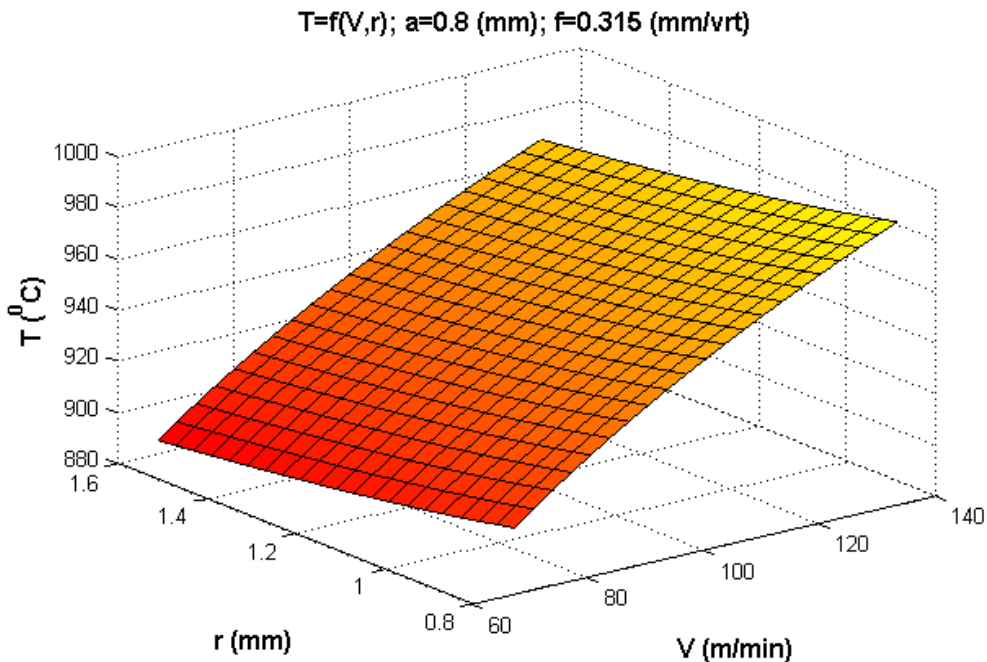
Слика 6.3.8: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од $V \text{ (m/min)}$ и $a \text{ (mm)}$, при $f=0,315 \text{ (mm/vrt)}$ и $r=0,8 \text{ (mm)}$

Figure 6.3.8: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of $V \text{ (m/min)}$ and $a \text{ (mm)}$, at $r = 0,8 \text{ (mm)}$ and $f=0,315 \text{ (mm/rev)}$



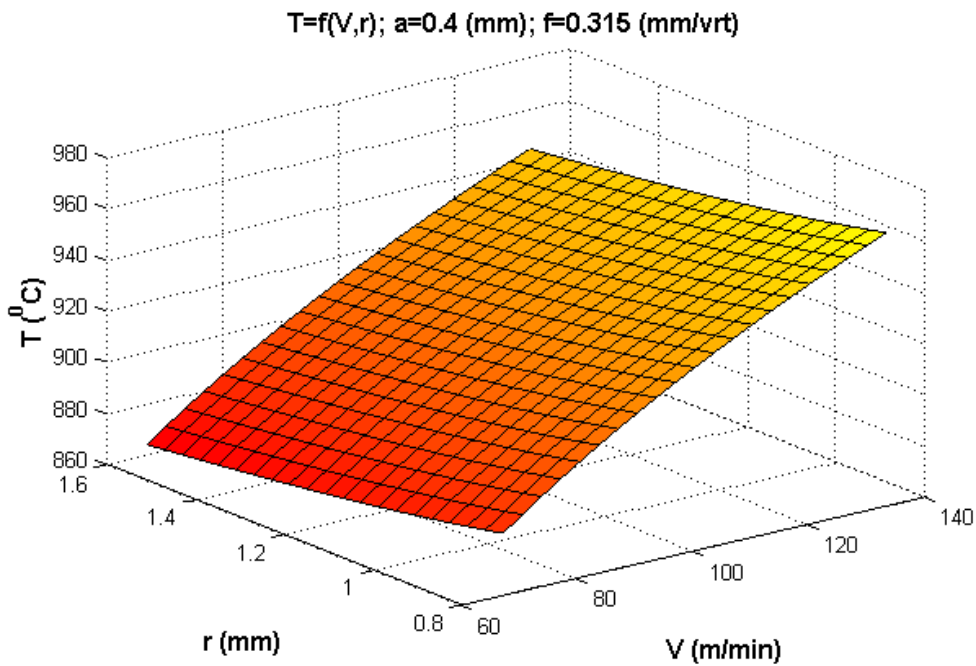
Слика 6.3.9: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од V (m/min) и r (mm), при $f=0,1$ (mm/vrt) и $a=0,4$ (mm)

Figure 6.3.9: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of V (m/min) and r (mm), at $a = 0,4$ (mm) and $f=0,1$ (mm/rev)



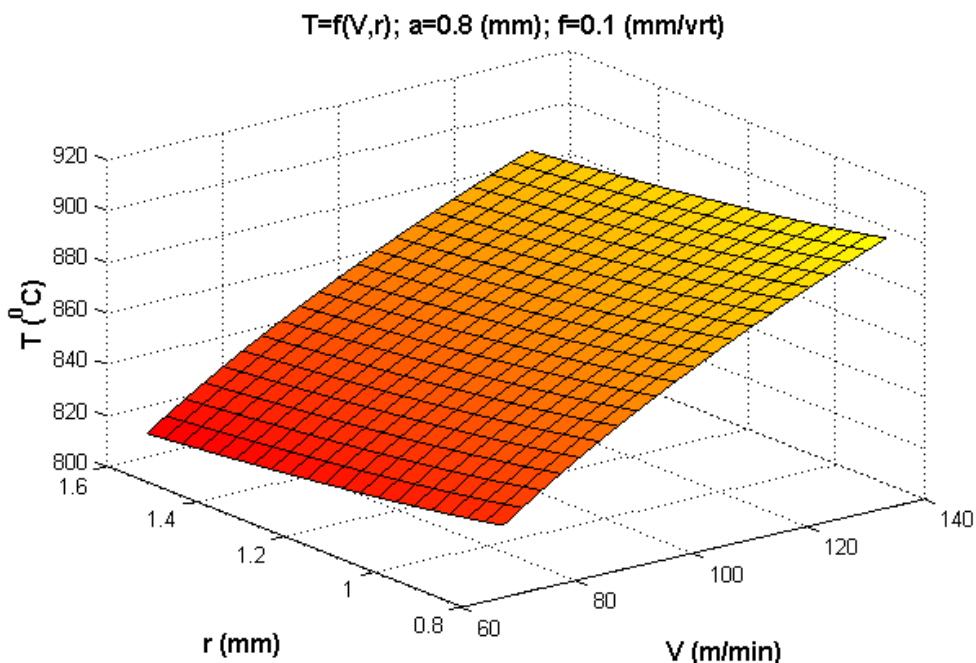
Слика 6.3.10: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од V (m/min) и r (mm), при $f=0,315$ (mm/vrt) и $a=0,8$ (mm)

Figure 6.3.10: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of V (m/min) and r (mm), at $a = 0,8$ (mm) and $f=0,315$ (mm/rev)



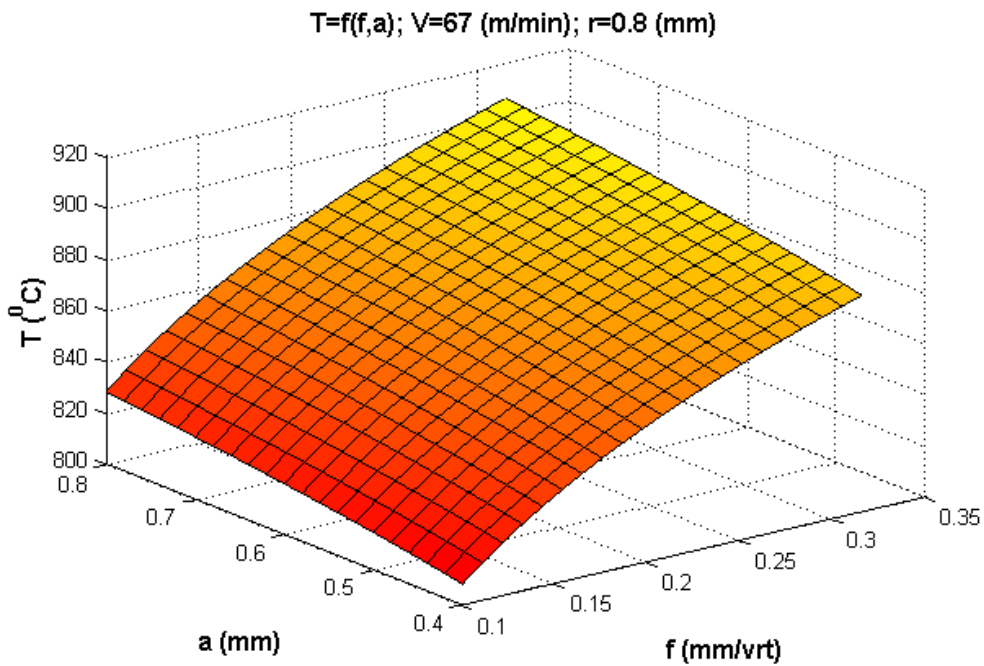
Слика 6.3.11: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од V (m/min) и r_{ϵ} (mm), при $f=0,315$ (mm/vrt) и $a=0,4$ (mm)

Figure 6.3.11: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of V (m/min) and r (mm), at $a = 0,4$ (mm) and $f=0,315$ (mm/rev)



Слика 6.3.12: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од V (m/min) и r_{ϵ} (mm), при $f=0,1$ (mm/vrt) и $a=0,8$ (mm)

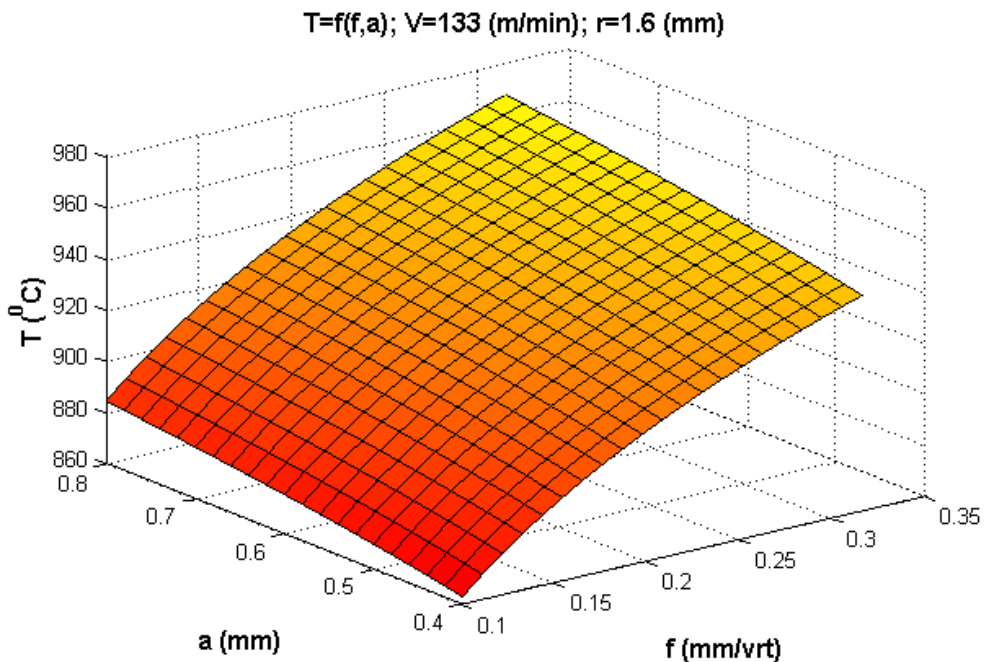
Figure 6.3.12: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of V (m/min) and r (mm), at $a = 0,8$ (mm) and $f=0,1$ (mm/rev)



5.3.

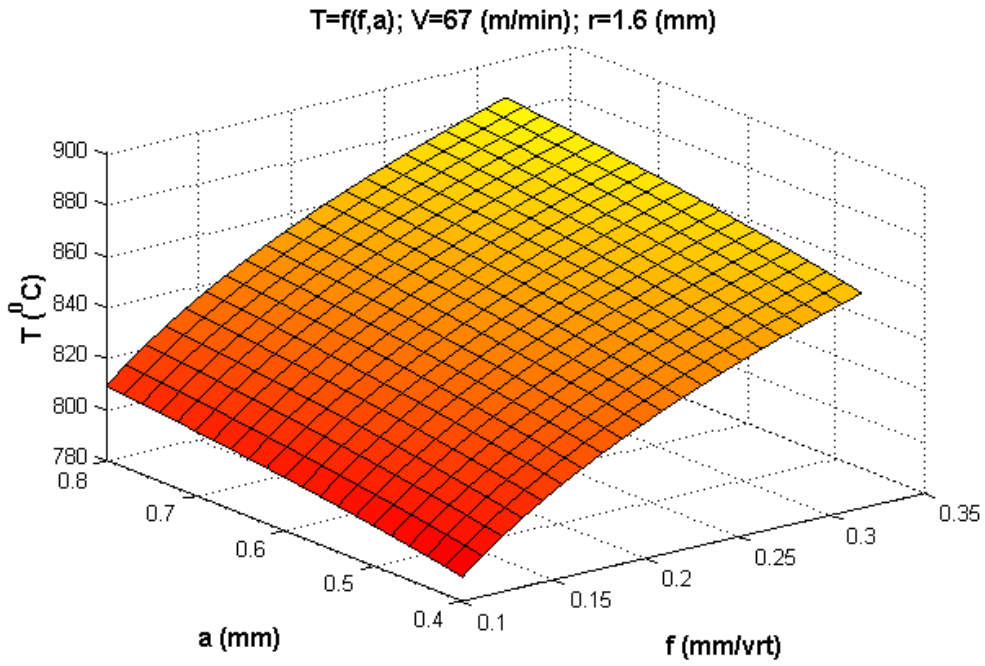
Слика 6.3.13: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од f (mm/vrt) и a (mm), при $V=67$ (m/min) и $r=0,8$ (mm)

Figure 5.3.13: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of $a =$ (mm) and $f=0,1$ (mm/rev), at $V=67$ (m/min) and $r=0,8$ (mm)



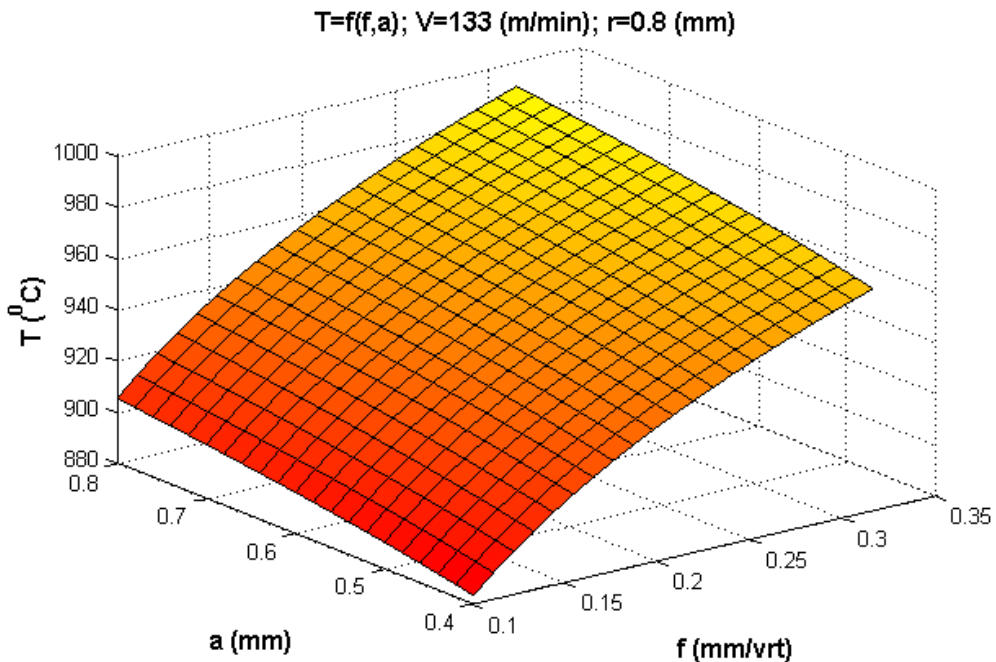
Слика 6.3.14: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од f (mm/vrt) и a (mm) при $V=133$ (m/min) и $r=1,6$ (mm)

Figure 6.3.14: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of a (mm) and f (mm/rev), at $V=133$ (m/min) and $r=1,6$ (mm),



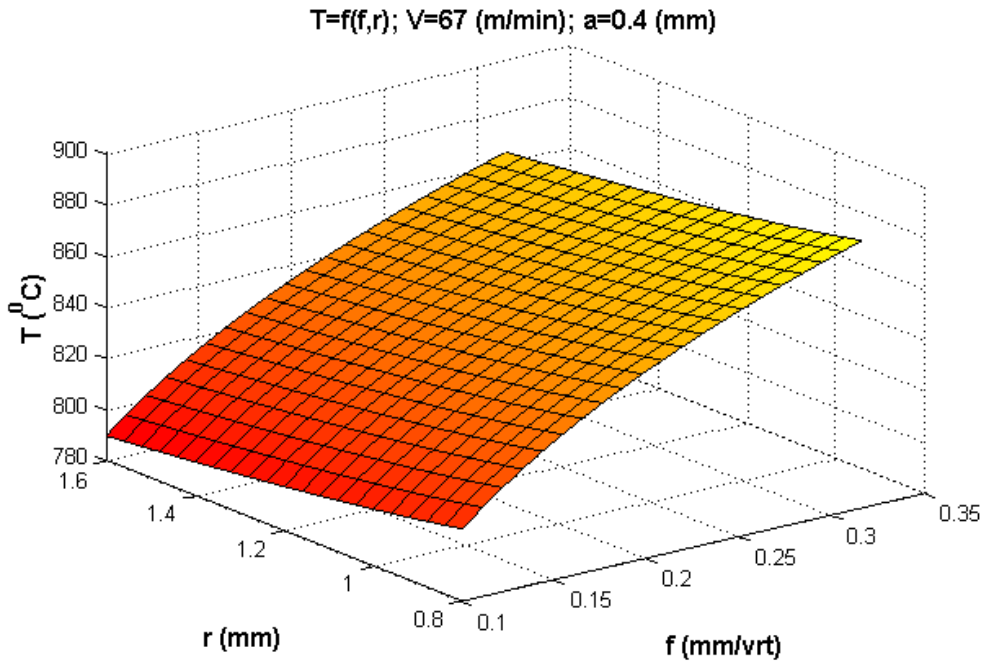
Слика 6.3.15: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од f (mm/vrt) и a (mm) при $V=67$ (m/min) и $r=1,6$ (mm)

Figure 6.3.15: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of a (mm) and f (mm/rev), at $V=67$ (m/min) and $r=1,6$ (mm)



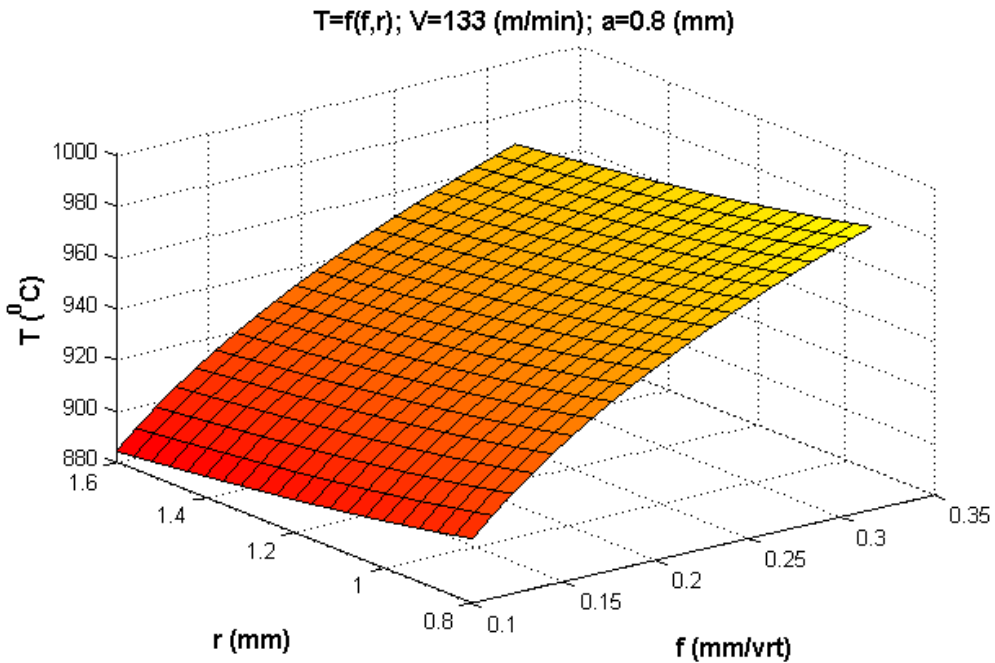
Слика 6.3.16: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од f (mm/vrt) и a (mm) при $V=133$ (m/min) и $r=0,8$ (mm)

Figure 6.3.16: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of a (mm) and f (mm/rev), at $V=133$ (m/min) and $r=0,8$ (mm)



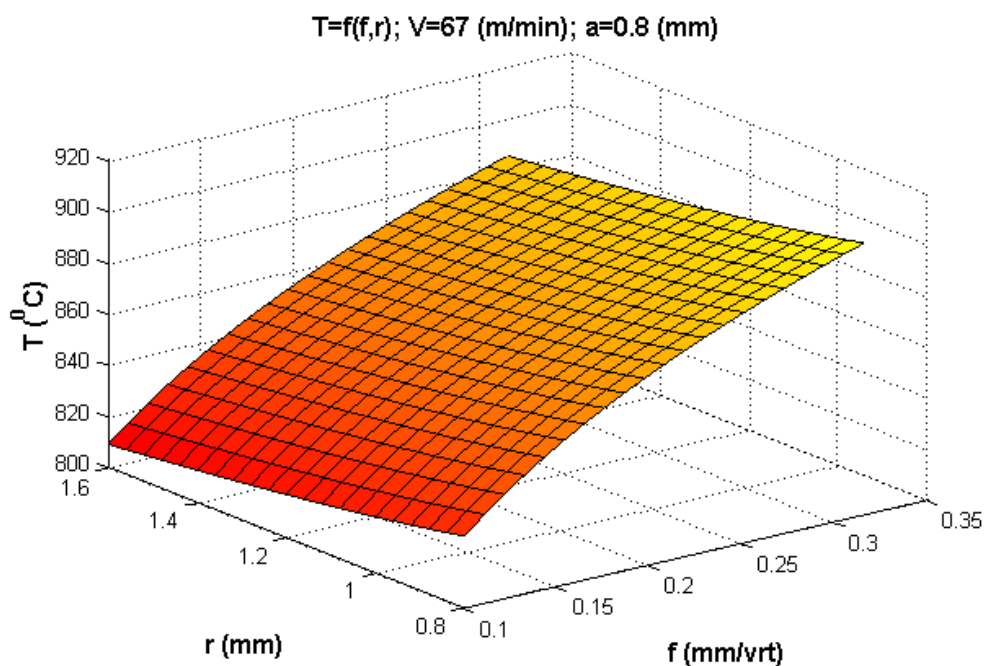
Слика 6.3.17: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од $f \text{ (mm/vrt)}$ и $r \text{ (mm)}$ при $V=67 \text{ (m/min)}$ и $a=0,4 \text{ (mm)}$

Figure 6.3.17: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of $r \text{ (mm)}$ and $f \text{ (mm/rev)}$, at $V=67 \text{ (m/min)}$ and $a=0,4 \text{ (mm)}$



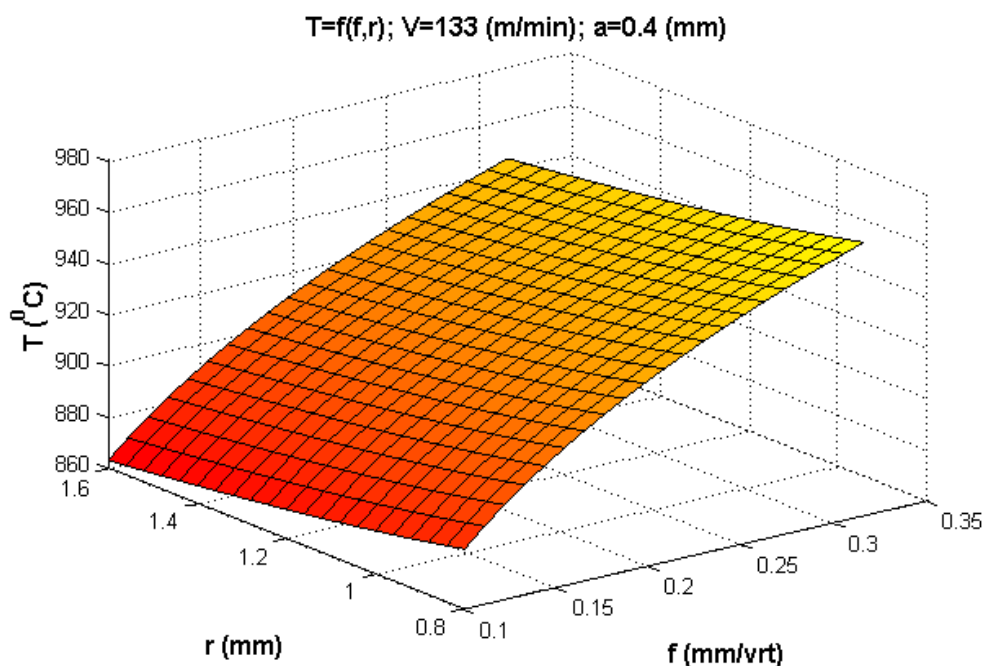
Слика 6.3.18: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од $f \text{ (mm/vrt)}$ и $r \text{ (mm)}$ при $V=133 \text{ (m/min)}$ и $a=0,8 \text{ (mm)}$

Figure 6.3.18: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of $r \text{ (mm)}$ and $f \text{ (mm/rev)}$, at $V=133 \text{ (m/min)}$ and $a=0,8 \text{ (mm)}$



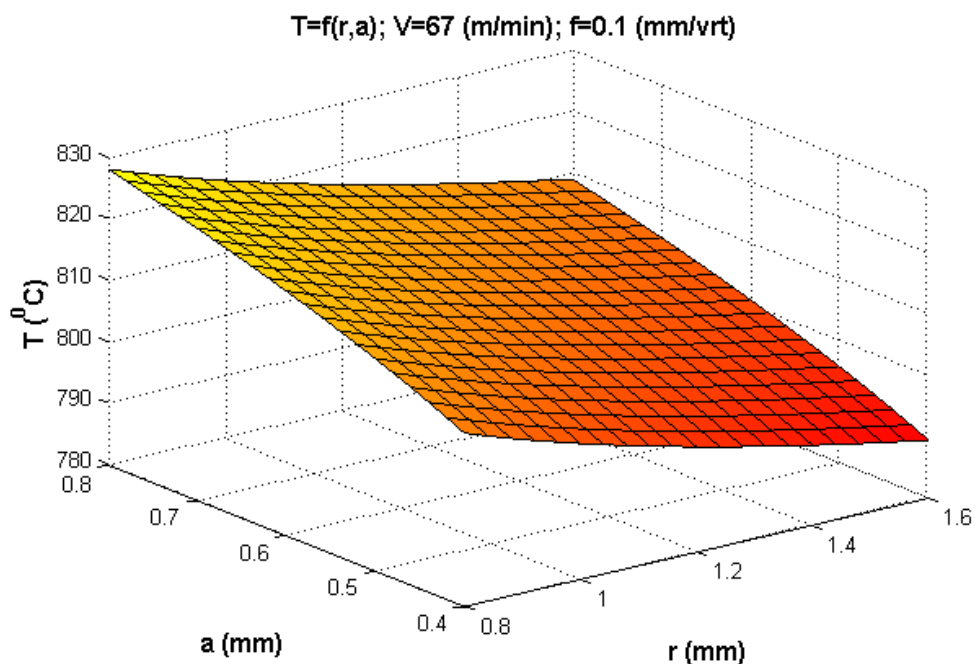
Слика 6.3.19: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од f (mm/vrt) и r (mm) при $V=67$ (m/min) и $a=0,8$ (mm)

Figure 6.3.19: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of r (mm) and f (mm/rev), at $V=67$ (m/min) and $a=0,8$ (mm)



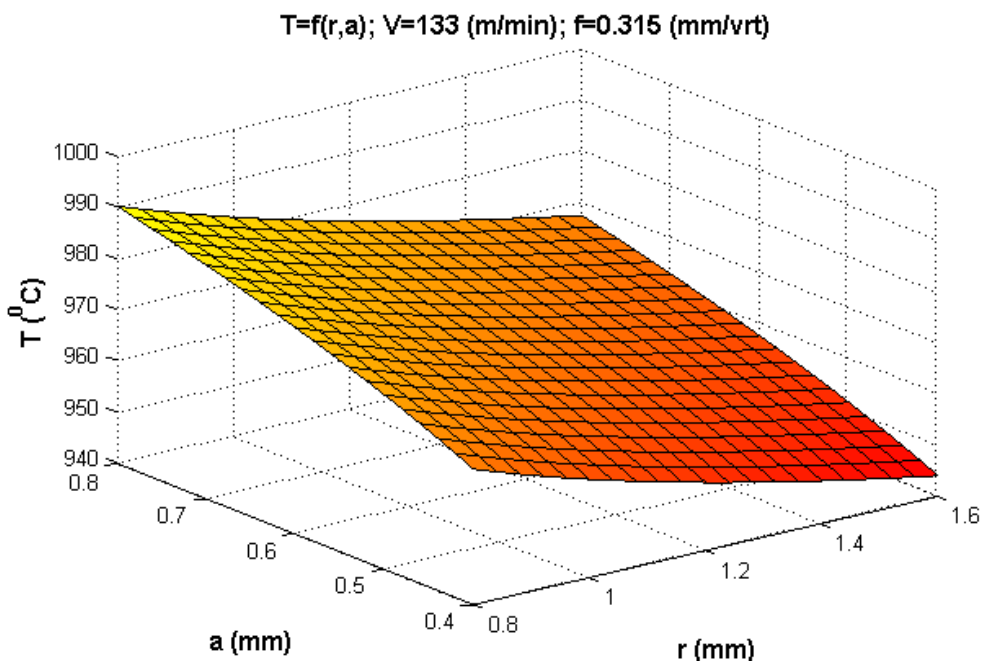
Слика 6.3.20: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од f (mm/vrt) и r (mm) при $V=133$ (m/min) и $a=0,4$ (mm)

Figure 6.3.20: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of r (mm) and f (mm/rev), at $V=133$ (m/min) and $a=0,4$ (mm)



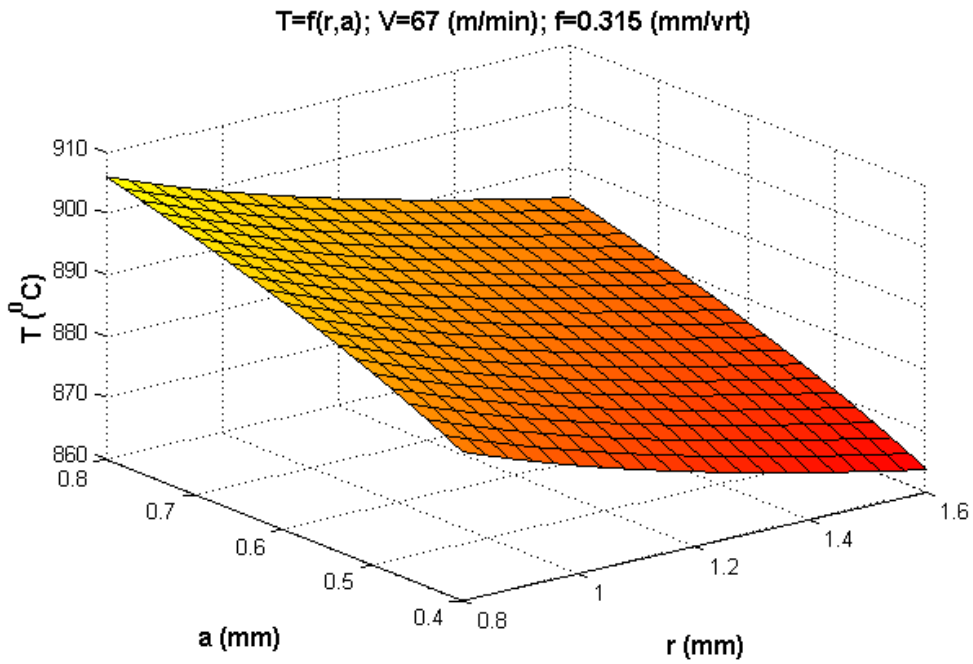
Слика 6.3.21: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од a (mm) и r (mm) при $V=67$ (m/min) и $f=0,1$ (mm/vrt)

Figure 6.3.21: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of r (mm) and a (mm), at $V=67$ (m/min) and $f=0,1$ (mm/rev)



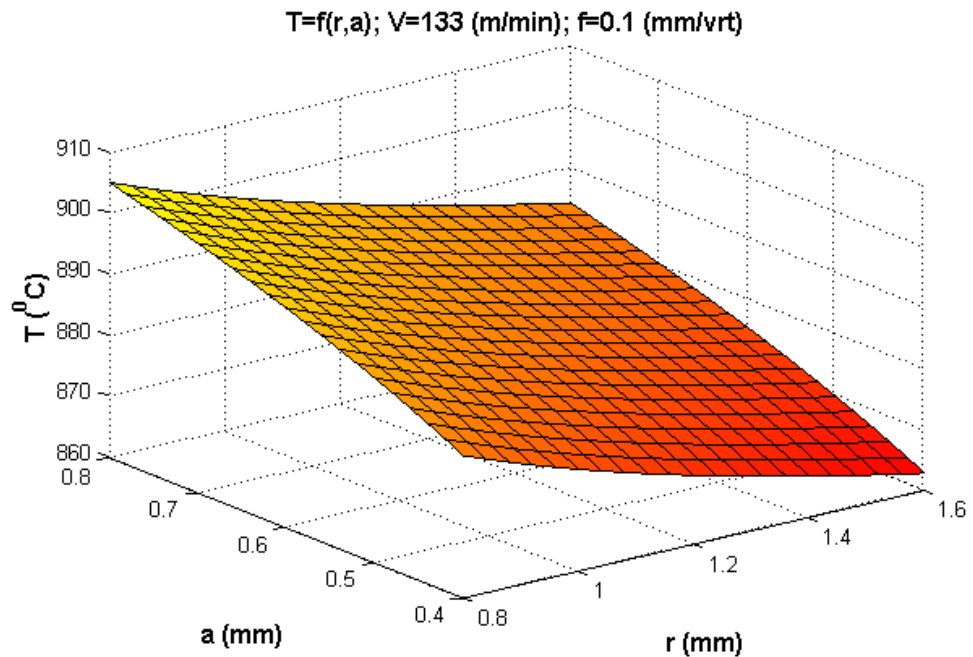
Слика 6.3.22: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од a (mm) и r (mm) при $V=133$ (m/min) и $f=0,315$ (mm/vrt)

Figure 6.3.22: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of r (mm) and a (mm), at $V=133$ (m/min) and $f=0,315$ (mm/rev)



Слика 6.3.23: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од a (mm) и r (mm) при $V=67$ (m/min) и $f=0,315$ (mm/vrt)

Figure 6.3.23: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of r (mm) and a (mm), at $V=67$ (m/min) and $f=0,315$ (mm/rev)



Слика 6.3.24: Графички приказ на средната температура во процесот на режење, во функција од a (mm) и r (mm) при $V=133$ (m/min) и $f=0,1$ (mm/vrt)

Figure 6.3.24: Graphic representation of the average temperature in the cutting process, as a function of r (mm) and a (mm), at $V=133$ m/min) and $f=0,1$ (mm/rev)