

UNIVERZA V MARIBORU  
FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO

Marko PESKO

**VPLIV TOPLOTNE OBDELAVE TVP NA  
UDARNO ŽILAVOST NA JEKLU P91**

Magistrsko delo

študijskega programa 2. stopnje

Strojništvo

Maribor, september 2015





Univerza v Mariboru

---

Fakulteta za strojništvo

# **VPLIV TOPLOTNE OBDELAVE TVP NA UDARNO ŽILAVOST NA JEKLU P91**

Magistrsko delo

Študent: Marko PESKO

Študijski program  
2. stopnje: Strojništvo

Smer: Konstrukterstvo

Mentor: doc.dr. Tomaž VUHERER

Somentor: izr.prof.dr. Karl GOTLIH

Maribor, september 2015



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

Smetanova ulica 17  
2000 Maribor, Slovenija

Številka: S-BM0110  
Datum: 23.06.2015

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Uradni list RS, št. 46/2012 – UPB10) izdajam:

### SKLEP O MAGISTRSKEM DELU

**MARKU PESKU**, študentu študijskega programa 2. stopnje **Strojništvo**, se dovoljuje izdelati magistrsko delo.

Tema magistrskega dela je pretežno s področja **Katedre za konstruiranje in oblikovanje**.

Mentor: **doc. dr. Tomaž Vuherer**  
Somentor: **izr. prof. dr. Karl Gotlih**

Datum veljavnosti teme: **18.06.2015**  
Tema podaljšana: **18.06.2016**

Naslov magistrskega dela: **Vpliv toplotne obdelave TVP na udarno žilavost na jeklu P91**

Naslov magistrskega dela v angleškem jeziku: **Influence of HAZ heat treatment on impact toughness on steel P91**

Magistrsko delo je potrebno izdelati skladno z »Navodili za izdelavo magistrskega dela« in ga do 18.6.2016 v treh izvodih oddati v pristojni referat za študentske zadeve.

V skladu z Navodili o pripravi in oddaji e-diplom je potrebno magistrsko delo oddati v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 15 dni.



Dekan:

izr. prof. dr. Bojan Dolšak

Obvestiti:  
- kandidata  
- mentorja  
- somentorja  
- odložiti v arhiv

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju doc.dr. Tomažu Vuhererju in somentorju izr.prof.dr. Karlu Gotlihu za pomoč in vodenje pri opravljanju magistrskega dela.

Posebna zahvala velja staršem, ki so mi omogočili študij.

# KAZALO

<b>1</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>- 1 -</b>
1.1	Opis problema .....	- 1 -
1.2	Metode raziskovanja .....	- 2 -
1.3	Namen in cilji magistrske naloge .....	- 2 -
<b>2</b>	<b>PREGLED STANJA OBRAVNAVANE PROBLEMATIKE.....</b>	<b>- 3 -</b>
2.1	Jeklo P91 .....	- 3 -
2.2	Posebnosti feritnih nerjavnih jekel za povišane temperature .....	- 6 -
2.2.1	Vodikova hladna pokljivost.....	- 6 -
2.2.2	Problem trdot in žilavosti.....	- 7 -
2.2.3	Lezenje.....	- 8 -
2.3	Simuliranje mikrostrukture TVP.....	- 9 -
2.4	Toplotna obdelava.....	- 11 -
2.5	Instrumentirani Charpy preizkus.....	- 11 -
<b>3</b>	<b>EKSPERIMENTALNO DELO .....</b>	<b>- 13 -</b>
3.1	Izdelava vzorcev .....	- 13 -
3.1.1	Simulacija TVP.....	- 13 -
3.1.2	Dilatacijske krivulje .....	- 16 -
3.1.3	Toplotna obdelava .....	- 21 -
3.2	Preizkušanje vzorcev .....	- 26 -
<b>4</b>	<b>OBDELAVA REZULTATOV .....</b>	<b>- 27 -</b>
4.1	Temperature faznih premen .....	- 27 -
4.2	Charpy preizkus.....	- 30 -
4.2.1	Diagrami preizkusa.....	- 30 -
4.2.2	Žilavost, energija za lom .....	- 40 -
4.2.3	Upogibna napetost tečenja in upogibna trdnost.....	- 48 -
4.2.4	Razširitve prereza Charpy preizkušanca .....	- 55 -
4.2.5	Zožitve prereza Charpy preizkušanca.....	- 57 -
4.2.6	Dolžina ustnic .....	- 59 -
<b>5</b>	<b>DISKUSIJA .....</b>	<b>- 62 -</b>
5.1	Toplotna obdelava 760°C .....	- 62 -
5.2	Toplotna obdelava 780°C .....	- 65 -
<b>6</b>	<b>SKLEP.....</b>	<b>- 68 -</b>
<b>7</b>	<b>VIRI IN LITERATURA.....</b>	<b>- 69 -</b>
<b>8</b>	<b>PRILOGE.....</b>	<b>- 71 -</b>

## VPLIV TOPLOTNE OBDELAVE TVP NA UDARNO ŽILAVOST NA JEKLU P91

**Ključne besede:** jeklo P91, TVP, simulacija varjenja, toplotna obdelava, udarna žilavost, Charpy preizkus

**UDK:** 620.178.2:669.14-15(043.2)

### **POVZETEK**

*V magistrski nalogi smo analizirali vpliv toplotne obdelave TVP na udarno žilavost. Obravnavali smo temperaturi 760°C in 780°C, ter različne čase toplotne obdelave. Simulirali smo različna področja TVP, ki se pojavijo pri varjenju. Preizkušance smo ustrezno toplotno obdelali ter jih nato preizkusili z instrumentiranim Charpy preizkusom. Pri tem smo dobili podatke o udarni žilavosti materiala. Podatke smo med sabo primerjali in ugotavljali najbolj primerno temperaturo in čas toplotne obdelave, pri kateri dosežemo ustrezno udarno žilavost materiala. Pokazalo se je, da že majhna sprememba temperature pomembno vpliva na čas toplotne obdelave.*

# **INFLUENCE OF HAZ HEAT TREATMENT ON IMPACT TOUGHNESS ON STEEL P91**

**Key words:** steel P91, HAZ, weld simulation, heat treatment, impact toughness, Charpy test

**UDK:** 620.178.2:669.14-15(043.2)

## **ABSTRACT**

*In the thesis, we analyze the influence of heat treatment TVP on the impact toughness. We have considered the temperature of 760°C and 780°C, as well as various times of heat treatment. We simulated the different areas of TVP that occur during welding. The samples were properly heat treated and then tested with an instrumented Charpy test. We get information of the impact toughness of the material. Data were compared and identify the most suitable temperature and time for heat treatment in which to achieve adequate impact toughness of the material. It has been shown that even a small change of temperature has a significant influence on the time of heat treatment.*



## UPORABLJENI SIMBOLI

$R_{p0,2}$	-	napetost tečenja [MPa]
$R_m$	-	natezna trdnost [MPa]
$A_5$	-	raztezek ( $l_0 = 5 d_0$ ) [%]
$KV$	-	udarna žilavost [ $J/cm^2$ ]
$J$	-	Joule – enota za energijo
$\Delta t_{8/5}$	-	čas ohlajanja med $800^\circ C$ in $500^\circ C$
$A_{c3}$	-	konec premene v avstenit pri segrevanju [ $^\circ C$ ]
$A_{c1}$	-	začetek premene v avstenit pri segrevanju [ $^\circ C$ ]
$M_s$	-	začetek premene v martenzit pri ohlajanju [ $^\circ C$ ]
$M_f$	-	konec premene v martenzit pri ohlajanju [ $^\circ C$ ]
$T_p$	-	maksimalna temperatura v TVP [ $^\circ C$ ]
$F$	-	sila [N]
$t$	-	čas [s]
$F_{gy}$	-	sila, pri kateri se preizkušavec začne neelastično deformirati [N]
$F_m$	-	maksimalna sila pri Charpy preizkusu [N]
$F_{iu}$	-	sila, pri kateri se prične krhki lom [N]
$F_a$	-	sila, pri kateri se krhki lom ujame in se nadalje začne lomiti žilavo [N]
$E_i$	-	energija za nastanek razpoke [J]
$E_p$	-	energija za širjenje razpoke [J]
$\sigma_{yB}$	-	napetost tečenja pri tritočkovnem upogibu [MPa]
$\sigma_{mB}$	-	upogibna trdnost pri tritočkovnem upogibu [MPa]

## UPORABLJENE KRATICE

TVP	-	toplotno vplivano področje
GZ TVP	-	grobo zrnati del TVP
FZ TVP	-	fino zrnati del TVP
MK TVP	-	medkritični del TVP
PK TVP	-	podkritični del TVP
OM	-	osnovni material
TO	-	toplotna obdelava
P91	-	jeklo za povišane temperature
CCT	-	kontinuirani premenski diagram
EN	-	evropski standard

# 1 UVOD

## 1.1 Opis problema

Jekla za povišane temperature imajo določene posebnosti, ki jih je potrebno upoštevati pri načrtovanju zvarnih spojev. Potrebno je biti pozoren na temperaturo predgrevanja, s katero se prepreči pojav hladne pokljivosti, prav tako pa je treba paziti na vnos toplote, da se preveč ne zmanjša udarna žilavost ter zvišajo trdote. Za termoelektrarne se uporablja jeklo P91, ki je primerno za delo na povišanih temperaturah in je odporno na lezenje.

Termoenergetska postrojenja se po navadi izdelujejo z varjenjem, ker se mora zagotoviti varno obratovanje na dobo trajanja, ki je večja od 30 let. Pri varjenju tega jekla se lastnosti materiala spreminjajo v varu in okolici, ker se spremeni mikrostruktura. Torej mikrostruktura se spremeni v varu in v področju zraven vara, ki se imenuje toplotno vplivano področje. Po varjenju je potrebno zware nujno toplotno obdelati, da se poveča žilavost, znižajo trdote ter poveča odpornost na lezenje. Za toplotno obdelavo po varjenju je potrebno poznati temperaturo in čas, saj že majhne razlike pomembno vplivajo na žilavost in trdote.

Naš namen je raziskati vpliv toplotne obdelave TVP na udarno žilavost jekla P91 pri različnih režimih toplotne obdelave na 760°C in 780°C. Udarno žilavost bomo merili z instrumentiranim preizkusom po Charpy-ju, predvsem nas zanima vpliv toplotne obdelave na udarno žilavost. Vzorci se bodo izdelali iz materiala, ki je bil uporabljen v Termoelektrarni Šoštanj za gradnjo bloka 5. Dobljeni rezultati se bodo predstavili v diagramih, kjer bo razvidna potrebna energija za lom v odvisnosti od temperature in časa toplotne obdelave. Na osnovi teh pa se bodo izdelali napotki za varjenje in toplotno obdelavo takšnih jekel za doseg potrebnih mehanskih lastnosti zvara.

## 1.2 Metode raziskovanja

Za raziskave smo vzeli 44 vzorcev jekla P91 in na simulatorju varjenja pripravili vzorce različnih materialov TVP. Simulirali smo 4 področja TVP in sicer grobo zrnati TVP fino zrnati TVP, medkritični TVP in podkritični TVP na temperaturah 1350°C, 1100°C, 950°C ter 860°C.

Nato smo v peči toplotno obdelali vzorce in sicer 20 vzorcev na temperaturi 760°C ter 20 vzorcev na temperaturi 780°C za različne čase toplotne obdelave 0,5h, 1h, 2h, 4h in 8h. Ostale 4 vzorce nismo toplotno obdelali in so nam služili kot primerjava z ostalimi. Dobljene vzorce smo nato pripravili za Charpy preizkus in sicer standardne vrednosti, ki so 10 x 10 x 55 mm z ISO V zarezo globine 2 mm.

## 1.3 Namen in cilji magistrske naloge

Namen magistrske naloge je določiti vpliv toplotne obdelave TVP na udarno žilavost pri jeklu za termoelektrarne (P91). Vzorce bomo izdelali iz materiala, ki je bil uporabljen v Termoelektrarni Šoštanj. Zanimajo nas ali sta temperaturi 760°C ter 780°C ustrezni za toplotno obdelavo in dosego potrebne žilavosti in trdot.

Magistrska naloga ima naslednje cilje:

- pregled obstoječe literature s področja jekel za povišane temperature odporno na lezenje
- prikaz simuliranja mikrostrukture
- predstavitev priprave vzorcev za preizkus
- predstavitev preizkušanja vzorcev z instrumentiranim Charpy kladivom pri sobni temperaturi
- določitev energije za nastanek razpoke in energije za napredovanje razpoke pri Charpy preizkusu
- dokumentiranje in obdelava rezultatov

## 2 PREGLED STANJA OBRAVNAVANE PROBLEMATIKE

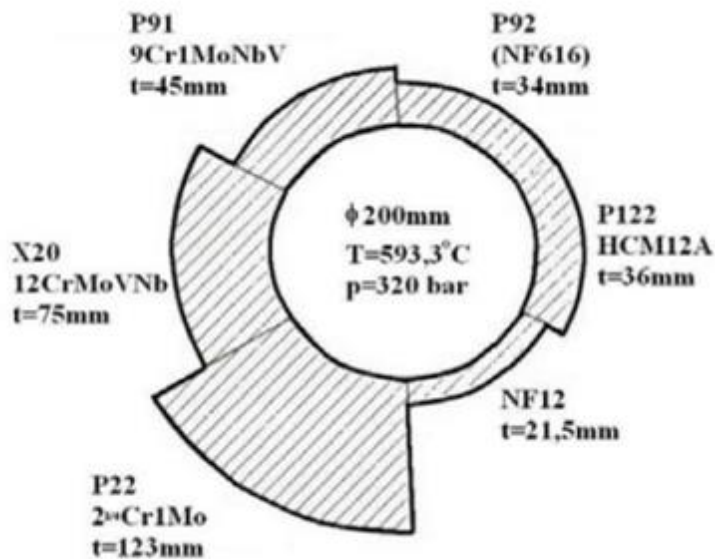
### 2.1 Jeklo P91

Jekla za povišane temperature se uporabljajo predvsem za gradnjo termoelektrarn, tlačnih posod, kotlov in podobno, kjer so obratovalne temperature zelo visoke, preko 500°C, velike obremenitve ter dolge dobe obratovanja tudi do 30 let in več. Za termoelektrarne se uporablja jeklo P91, ki je primerno za delo na povišanih temperaturah je in odporno na lezenje.

Takšno jeklo mora imeti specifične mehanske lastnosti, ki so poleg odpornosti na lezenje tudi korozijska odpornost, saj je konstantno izpostavljeno vodni pari in plinom. Odgovarjati pa mora tudi zahtevani udarni žilavosti ter trdotam. Lezenje materiala je časovno odvisna deformacija, ki se pojavi če je temperatura višja od 40%  $T_i$ , napetosti materiala pa so manjše od napetosti tečenja pri isti temperaturi. Korozijsko odpornost povečamo z deležem kroma, medtem ko se poboljša odpornost na lezenje z dodajanjem legirnega elementa V, z dodajanjem Ni pa povečamo duktilnost in žilavost.

Zaradi vedno večjih zahtev po večjih izkoristkih termoelektrarn in s tem povezanimi višjimi temperaturami in obremenitvami so bila razvita feritna nerjavna jekla. Za zahtevnejše razmere (325 bar - 620°C), so bile razvite zlitine kot so 7CRWVNb9-6 (T23) in 7CrMoVTiB10-10 (T24). Danes pa so se razvili še novejši feritni nerjavni jekli, ki vsebujeta več kroma za povečano odpornost proti lezenju in koroziji. Takšni zlitini sta X10CrMo9-1 (P91) in X10CrMoVNB9-2 (P92). Obstajajo tudi avstenitna jekla, vendar niso najbolj primerna zaradi višje cene. Za takšne razmere uporabo so primerne tudi nikljeve zlitine Inconel 617, ki so uporabne tudi na temperaturah nad 700°C. Takšne zlitine so prav tako dosti dražje od feritnih nerjavnih jekel, legiranih z Cr in Ni, vendar se njihova uporaba in cena upraviči zaradi njihovih dobrih lastnosti.

Spodnja slika prikazuje debelino cevi pri enakih pogojih obratovanja za različna jekla ki se uporabljajo za gradnjo energetskih objektov, tlačnih posod, kotlov in ostale procesne opreme. Pri eksperimentalnem delu za to magistrsko nalogo smo obravnavali jeklo P91, ki se že nekaj časa množično uporablja za gradnjo zahtevnih energetskih objektov. Primer takšne uporabe je blok 5 v termoelektrarni Šoštanj, ki je večinoma varjen iz jekla P91.



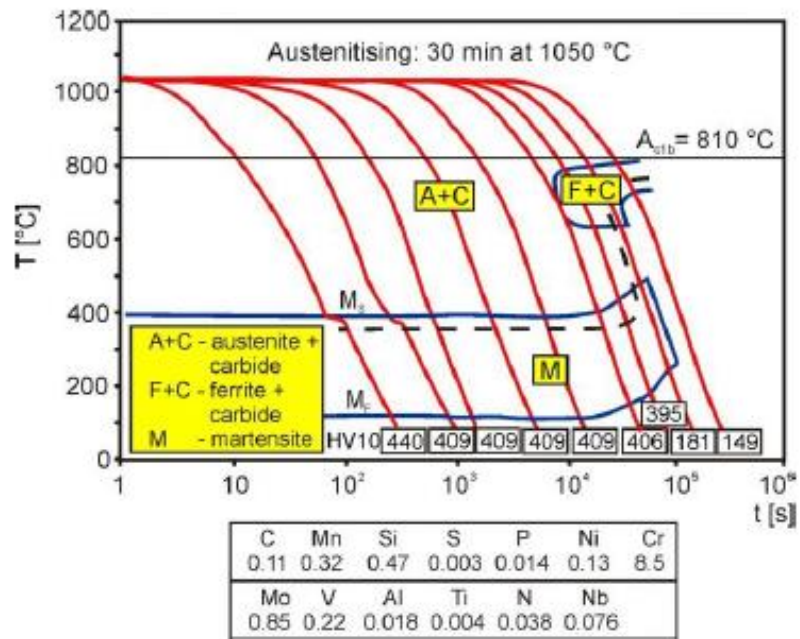
Slika 1: Primerjava debelin cevi [12]

Tabela 1: Kemična sestava jekla P91 (masni %)

C	Si	Mn	P	S
0,08-0,12	0,2-0,5	0,3-0,6	0,02	0,01
Nb/Cb	Al	N	Cr	V
0,06-0,1	0,04	0,03-0,07	8-9,5	0,18-0,25

Tabela 2: Mehanske lastnosti jekla P91

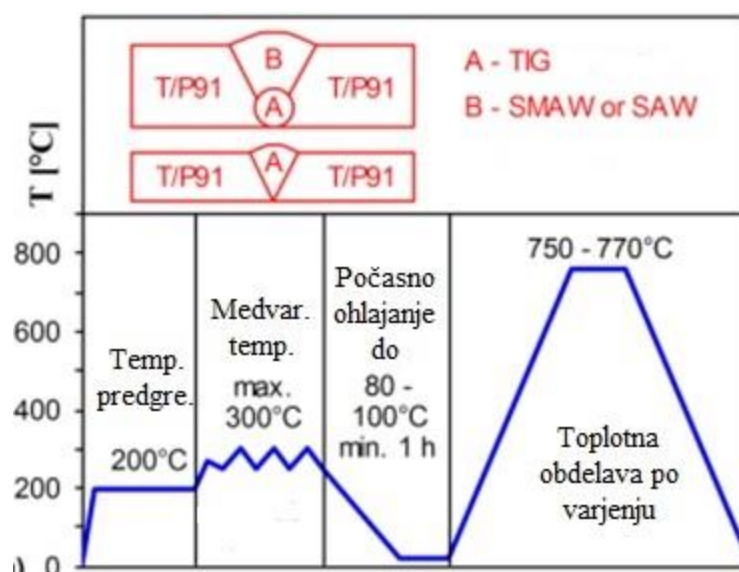
<b>Napetost tečenja</b>	$R_{p0,2} \geq 450\text{ Mpa}$
<b>Natezna trdnost</b>	$R_m \geq 620\text{ Mpa}$
<b>Raztezek</b>	$A_5 \geq 19\%$
<b>Udarna žilavost</b>	$240\text{ J/cm}^2$
<b>Energija za lom</b>	$192\text{ J}$



Slika 2: CCT diagram jekla P91 [15]

## 2.2 Posebnosti feritnih nerjavnih jekel za povišane temperature

Pri feritnih nerjavnih jeklih je potrebno biti pozoren na posebnosti takšnih jekel pri samem varjenju. Dodajni material mora biti podoben ali avstenitni, potrebno je paziti na pojav vodikove hladne pokljivosti, zato se ta jekla predgrevaajo pri temperaturi 200°C. Med samim varjenjem je potrebno biti pozoren na vnos toplote in medvarkovno temperaturo ter čas ohlajanja  $\Delta t_{8/5}$ . Obvezna je tudi toplotna obdelava po varjenju s katero se dosežejo željene trdote in žilavost zvarnega spoja.



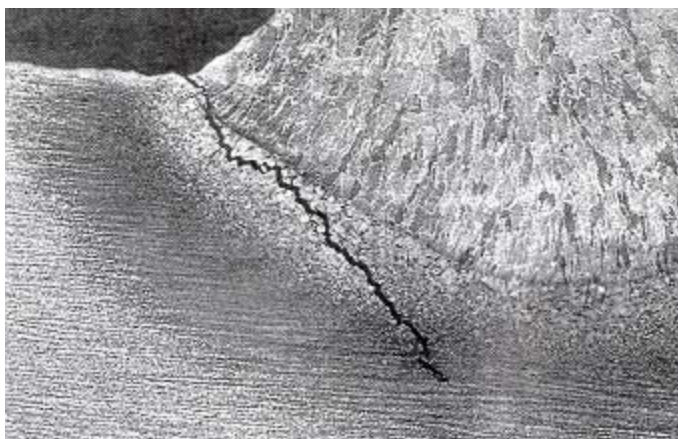
Slika 3: Priporočila za varjenje jekla P91 [15]

### 2.2.1 Vodikova hladna pokljivost

Vodikova hladna pokljivost pri jeklih je eden izmed najbolj nevarnih in nepojasnjenih problemov pri varjenju takšnih jekel. Pojavlja se v TVP ali v varu, odvisno od kemične sestave materiala. Hladne razpoke v TVP so vzdolžne, v varu pa prečne. Razpoke pri hladni pokljivosti nastanejo po varjenju, ko je zvar navadno že povsem ohlajen. Do nastanka razpok lahko pride še celo 24 ur po končanju varjenja. Osnovni pogoj za nastanek hladne pokljivosti je v jeklu raztopljen vodik, prav tako je pa je potrebna še nezadostna odpornost materiala proti lomu na mestu, kjer se vodik pri ohlajanju akumulira ter natezne zaostale napetosti.



Pri preprečevanju hladne pokljivosti moramo zmanjšati vnos vlage v sam zvar. To lahko dosežemo s sušenjem dodajnega materiala in predgrevanjem osnovnega materiala. S tem dosežemo odstranitev vlage, zmanjša pa se tudi hitrost ohlajanja in prenos toplote, s tem pa se omogoči tudi pravočasna difuzija vodika, prav tako pa dobimo bolj žilavo in duktilno mikrostrukturo in zmanjšamo trdoto v TVP. Višina predgrevanja je odvisna od več dejavnikov kot so oblika zvarnega spoja, debelina materiala, kemijska sestava in vnesena toplota. Nadzorovati moramo temperaturo predgrevanja, ki se po navadi giblje okoli 200°C in ves čas varjenja paziti da medvarkovna temperatura ne pade pod to temperaturo. Proti hladni pokljivosti lahko ukrepamo tudi z večjim vnosom toplote, kar pa je neugodno zaradi naraščanja zrn v TVP.



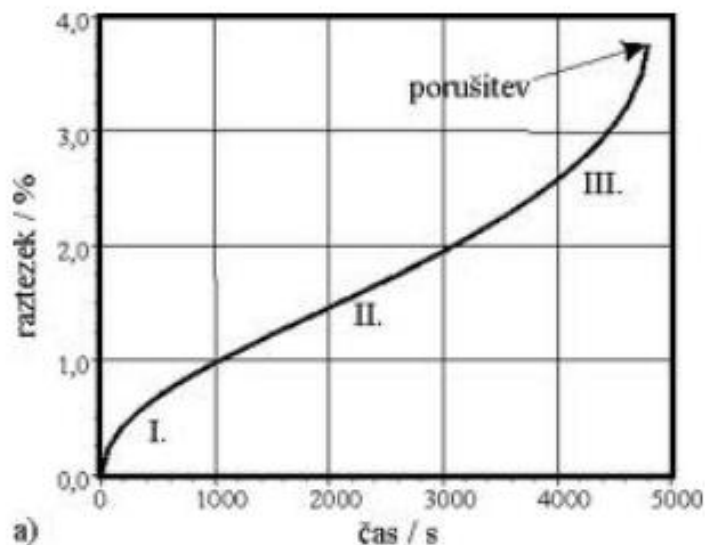
*Slika 4: Vodikova hladna pokljivost [14]*

### 2.2.2 Problem trdot in žilavosti

Pri vnosu toplote med varjenjem je treba paziti, da ne pride do prevelike temperature in posledično do rasti zrn. Ta pojav povzroči manjšo žilavost in prevelike trdote, zaradi česar je potrebno takšna jekla toplotno obdelati po varjenju. Toplotna obdelava za jeklo P91 po varjenju je obvezna. To obdelavo je potrebno izvajati po predpisanih standardih in priporočilih proizvajalca materiala. S toplotno obdelavo poboljšamo žilavost TVP in vara ter zmanjšamo trdote, prav tako pa se zmanjšajo notranje napetosti v materialu. Čim višja je temperatura več napetosti se odpravi, vendar pa je potrebno paziti, saj bi prevelika temperatura neugodno vplivala na mikrostrukturo. Z toplotno obdelavo pa tudi znižamo trdote v zvaru in povečamo žilavost zvarnega spoja. Potrebno je poznati temperaturo in čas pri toplotni obdelavi. Toplotna obdelava po varjenju se izvaja na temperaturah od 750-780°C odvisno od kemične sestave jekla in debeline.

### 2.2.3 Lezenje

Lezenje materiala je deformacija, ki se pojavi po daljšem času obratovanja na povišanih temperaturah. Pojavi se pri temperaturi ki je višja od 40% tališča kovine, napetosti v materialu pa so manjše od napetosti tečenja pri tej temperaturi. Obremenitev je konstantna sila oziroma napetost, ampak se zaradi toplotno aktiviranih procesov, ki potekajo v materialu trajna deformacija s časom povečuje. Deformacija se po navadi pojavi v treh stopnjah. Prva stopnja predstavlja primarno lezenje, kje se pojavi začetna deformacija zaradi obremenitve, nato pa hitrost deformacije pojema. Pri sekundarnem lezenju se hitrost deformacije časovno ne spreminja in je konstantna. Sledi terciarno lezenje, kjer je deformacija že tako obsežna, da se hitrost deformacije s časom povečuje, nastajajo razpoke, s tem se zmanjšuje nosilni prerez in na koncu sledi porušitev. Krivulja lezenja nam predstavlja odvisnost velikosti deformacije od časa deformiranja.



Slika 5: Krivulja lezenja [13]

## 2.3 Simuliranje mikrostrukture TVP

TVP ima več področij z različno mikrostrukturo. Dobljena mikrostruktura v posameznih področjih TVP je odvisna od vrste osnovnega materiala, maksimalne temperature, ki jo doseže to področje med varjenjem, hitrostjo ohlajanja, ki je v vseh področjih TVP približno enaka in od izhodnega stanja mikrostrukture, kar je pomembno pri večvarkovnem varjenju.

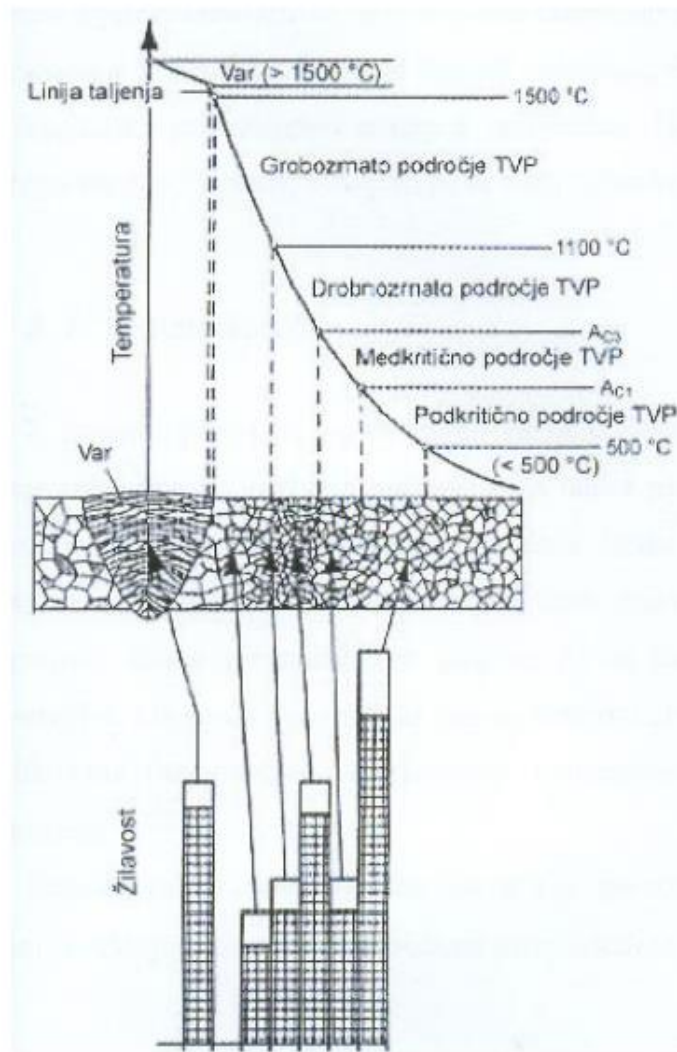
Na spodnji sliki so prikazana področja z različnimi mikrostrukturami v TVP in njihove žilavosti. TVP je sestavljeno iz grobo zrnatega področja, fino zrnatega področja, medkritičnega področja in področja rekristalizacije.

**Grobo znato področje** v TVP je tik ob varu, kjer pride do maksimalnih temperatur in je TVP podvržen za kratek čas maksimalni temperaturi okoli 1200 do 1350°C. V tem področju TVP ne pride do taljenja, vendar pa zrna težijo k rasti in tako zmanjšanju notranje energije. Od vnosa toplote in časa podvrženosti na najvišjih temperaturah je odvisna rast zrn in velikost grobozrnatega področja TVP. Prevelika zrna v TVP slabo vplivajo na lastnosti materiala, saj znižujejo žilavost in povečujejo trdoto.

**Fino znato področje** v TVP je je segreto malo nad  $A_{c3}$  mejo. Pri segrevanju nastane avstenit, ki je sprva drobno zrnat, odvisno od temperatur in časa izpostavljenosti. V tem področju pride do normalizacije. Pri ohlajanju se avstenit transformira v druge mikrostrukture, odvisno od kemijske sestave in časa ohlajanja.

**Medkritično področje** TVP je segreto med  $A_{c1}$  in  $A_{c3}$  linijo. Nekaj materiala se transformira v avstenit, nekaj pa se ne uspe zaradi prenizke temperature in časa izpostavljenosti. Del materiala, ki se je transformiral v avstenit, se pri ohlajanju transformira v vmesne mikrostrukture, del ki pa se ni transformiral v avstenit pa pri ohlajanju ostane isti, tako imamo v tem področju TVP dve področji mikrostruktur.

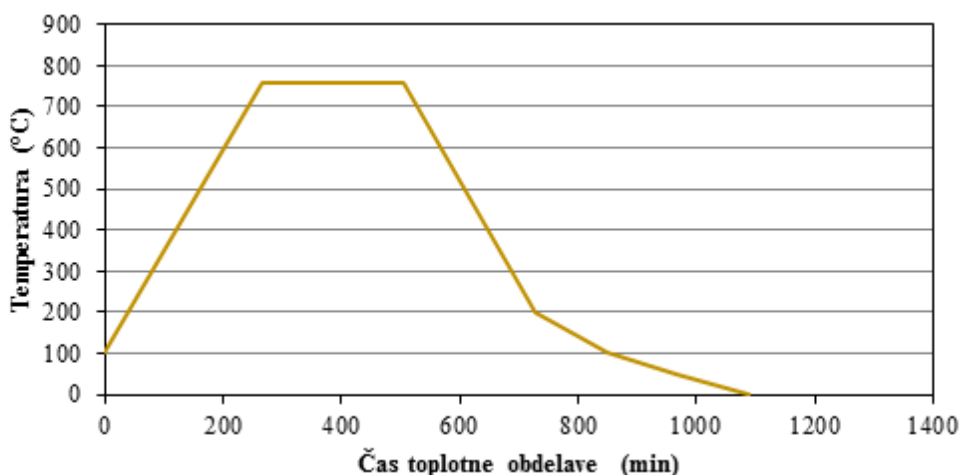
**Področje rekristalizacije** v TVP kjer ne pride do transformacije (segreto nad 600°C in pod  $A_{c1}$  črto) ampak le do rekristalizacije.



Slika 6: Področja TVP in žilavosti [5]

## 2.4 Toplotna obdelava

Po varjenju dobimo material, ki ima preveliko trdoto, notranje napetosti in premajhno žilavost, zato ga je obvezno treba toplotno obdelati. S tem se popusti martenzit, kar odpravi notranje napetosti in dosežemo boljše razporeditev karbidov v mikrostrukturi in s tem večjo odpornost vara in TVP na lezenje. Prav tako pa povečamo žilavost materiala in zmanjšamo trdote ob še vedno dovolj veliki trdnosti materiala. Poznati moramo temperaturo toplotne obdelave in čas držanja na najvišji temperatura, da dobimo željene lastnosti zvarnega spoja.



Slika 7: Primer diagrama toplotne obdelave

## 2.5 Instrumentirani Charpy preizkus

Charpy preizkus nam služi za ugotavljanje lastnosti materiala, ki jih pri ostalih mehanskih preizkusih ne dobimo. Tukaj gre predvsem za obnašanje materiala pri lomu in sicer žilavo oziroma krhko. Meri se energija, ki se absorbira pri lomljenju preizkušanca. Prav tako pri preizkušancu analiziramo kakšen je prelom. To dobimo z analiziranjem površine in sicer vizualno. Lahko je žilav ali krhek lom ali pa gre za mešanico teh dveh lomov. Tako dobimo odstotek žilavega loma.



Slika 8: Charpy kladivo [3]

Pri instrumentiranem Charpy preizkusu poleg energije dobimo tudi obremenitev v časovni odvisnosti. Tako lahko dobimo energijo, ki je potrebna za nastanek in nadaljnjo rast razpoke. Dobimo tudi silo, pri kateri se preizkušavec začne deformirati neelastično ( $F_g$ ) s pomočjo katere lahko določimo napetost tečenja pri upogibu ( $\sigma_{yB}$ ), če upoštevamo presek na zarezi. Določimo še lahko maksimalno silo ( $F_m$ ), silo pri kateri se krhki lom začne ( $F_u$ ) in silo pri kateri se krhki lom ujame ( $F_a$ ). S pomočjo teh podatkov lahko na osnovi diagrama določimo kolikšen je delež žilavega loma na prelomni ploskvi Charpy preizkušanca.

## 3 EKSPERIMENTALNO DELO

### 3.1 Izdelava vzorcev

#### 3.1.1 Simulacija TVP

Najprej smo na preizkušance privarili termoelement, nato pa smo prosta konca speli v simulator varjenja. Čeljusti simulatorja so iz bakra zaradi boljše toplotne prevodnosti, saj gre za elektro uporovno segrevanje. Nastavili smo še dilatometer, ki služi za merjenje spremembe volumna zaradi temperature in sprememb mikrostruktur.

Pri simuliranju mikrostrukture TVP se je uporabil simulator za varjenje Smitweld 1405. S simuliranjem smo želeli na preizkušancih dobiti mikrostrukturo, ki bi bila čim bolj podobna mikrostrukturi, ki se pojavi v praksi. Pojavijo se dve področji in sicer VAR in TVP. Simulirali smo 4 področja TVP: grobo zrnati TVP, fino zrnati TVP, medkritični TVP, in podkritični TVP. Simulacijo smo izvedli na 44 preizkušancih, od katerih smo jih 20 nadalje toplotno obdelali na 760°C, 20 na 780°C, na 4 pa smo simulirali področja TVP, vendar jih kasneje nismo toplotno obdelali in so nam služili za primerjavo.

V računalniku smo nato nastavili najvišje temperature v posameznih delih TVP, ki so bile 1350°C, 1100°C, 950°C in 860°C oziroma 875°C in čas ohlajanja  $\Delta t_{8/5}$ . Nato je sledilo predgretje do 200°C. Ko smo dosegli temperaturo sta se na monitorju pričela izrisovati diagrama temperature segrevanja in ohlajanja v odvisnosti od časa in spremembe dilatacije v odvisnosti od temperature. Željeno hitrost ohlajanja dosežemo z vodno hlajenimi čeljustmi. Vse preizkušance smo nato označili glede na vrsto TVP in temperaturo ter čas nadaljnje toplotne obdelave.

V naslednjih tabelah so prikazana vsa štiri območja TVP z maksimalnimi doseženimi temperaturami  $T_p$ . Oznako  $\Delta t_{8/5}$  predstavlja čas ohlajanja od 800 do 500°C in je bil pri vseh preizkušancih konstanten. Preizkušance smo označili glede na področje TVP in glede na temperaturo in čas nadaljnje toplotne obdelave.

Tabela 3: Serija preizkušancev brez toplotne obdelave

Oznaka preizkušanca	Vrsta TVP	$T_p$	$\Delta t_{8/5}$	Toplotna obdelava (°C/h)
OE	GZ TVP	1350	9	-
OD	FZ TVP	1100		
OT	MK TVP	950		
OS	PK TVP	860		

Tabela 4: Serija preizkušancev s toplotno obdelavo na 760°C

Oznaka preizkušanca	Vrsta TVP	$T_p$	$\Delta t_{8/5}$	Toplotna obdelava (°C/h)
VE	GZ TVP	1350	9	760/0,5
VD	FZ TVP	1100		
VT	MK TVP	950		
VS	PK TVP	860		
UE	GZ TVP	1350	9	760/1
UD	FZ TVP	1100		
UT	MK TVP	950		
US	PK TVP	860		
SE	GZ TVP	1350	9	760/2
SD	FZ TVP	1100		
ST	MK TVP	950		
SS	PK TVP	860		
IE	GZ TVP	1350	9	760/4
ID	FZ TVP	1100		
IT	MK TVP	950		
IS	PK TVP	875		
TE	GZ TVP	1350	9	760/8
TD	FZ TVP	1100		
TT	MK TVP	950		
TS	PK TVP	875		



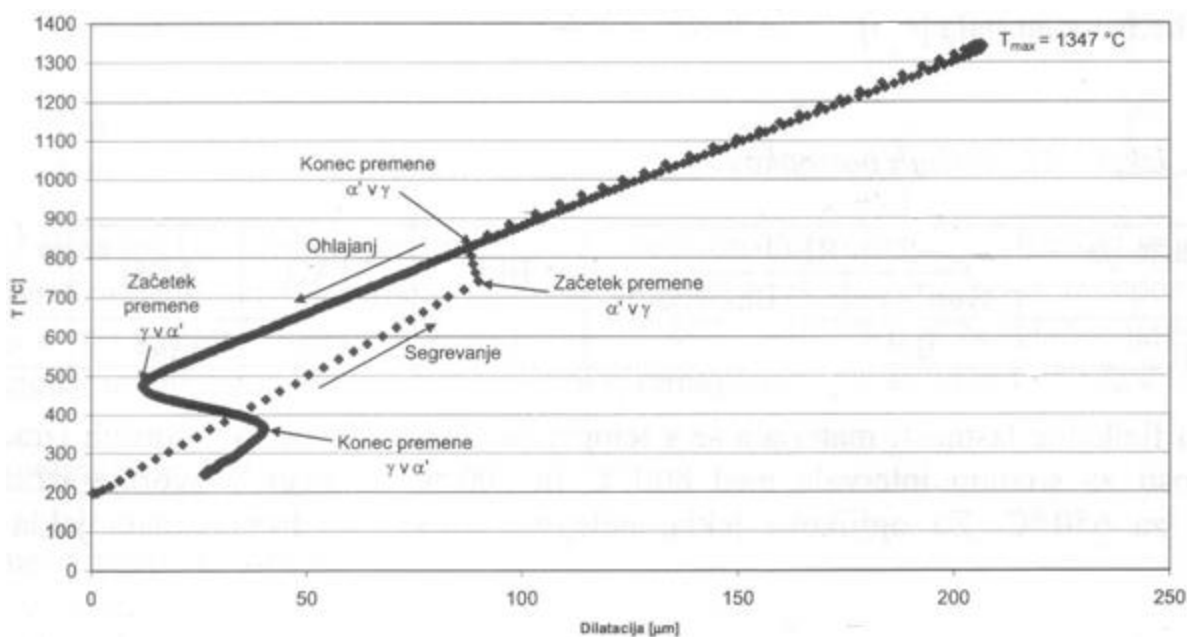
Tabela 5: Serija preizkušancev s toplotno obdelavo na 780°C

Oznaka preizkušanca	Vrsta TVP	$T_p$	$\Delta t_{8/5}$	Toplotna obdelava (°C/h)
2E	GZ TVP	1350	9	780/0,5
2D	FZ TVP	1100		
2T	MK TVP	950		
2S	PK TVP	860		
3E	GZ TVP	1350	9	780/1
3D	FZ TVP	1100		
3T	MK TVP	950		
3S	PK TVP	860		
4E	GZ TVP	1350	9	780/2
4D	FZ TVP	1100		
4T	MK TVP	950		
4S	PK TVP	860		
5E	GZ TVP	1350	9	780/4
5D	FZ TVP	1100		
5T	MK TVP	950		
5S	PK TVP	875		
6E	GZ TVP	1350	9	780/8
6D	FZ TVP	1100		
6T	MK TVP	950		
6S	PK TVP	875		

### 3.1.2 Dilatacijske krivulje

S pomočjo programskega paketa Smitweld smo izvozili podatke in izrisali diagrame varilnega cikla in diagrame temperature v odvisnosti od dilatacije. Na spodnjih diagramih so prikazane najbolj izrazite dilatacijske krivulje, zraven pa je še diagram varilnega cikla za vsa 4 področja TVP. Prikazana je najvišja temperatura varjenja  $T_p$  v določenem delu TVP. Označene točke  $A_{c3}$ ,  $A_{c1}$ ,  $M_s$ ,  $M_f$  nam predstavljajo temperature, pri katerih se je zgodila določena premena. Točke  $A_{c1}$  in  $A_{c3}$  predstavljata začetek oziroma konec premene v avstenit pri segrevanju, medtem ko točke  $M_s$  in  $M_f$  predstavljata začetek in konec premene v martenzit pri ohlajanju. Čas ohlajanja  $\Delta t_{8/5}$  je za vse preizkušance približno enak in znaša 9 sekund.

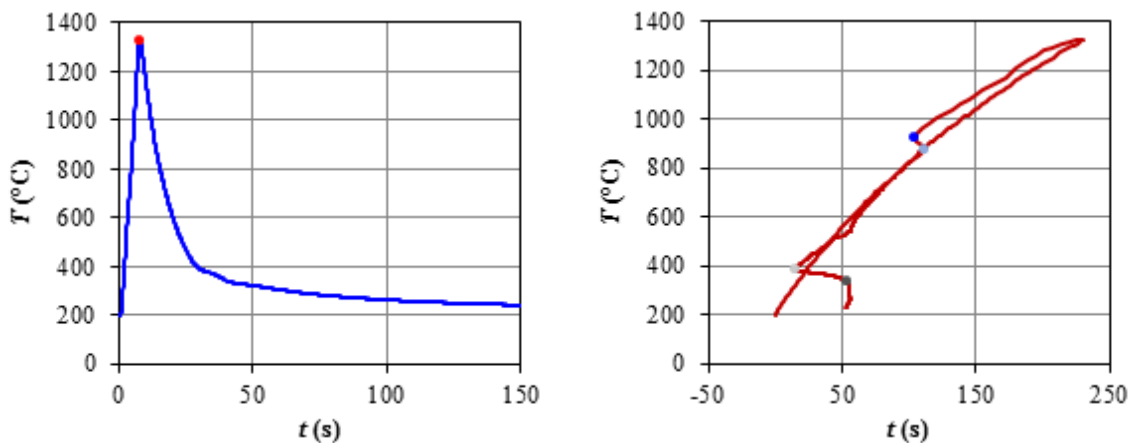
Z diagramov je razvidno da se dilatacijske krivulje razlikujejo glede na področje TVP oziroma maksimalno temperaturo, ki smo jo dosegli. Glede na temperaturo tudi dosežemo določene premene. Če je temperatura  $T_p$  prenizka in ne dosežemo temperaturne meje  $A_{c1}$  ne pride do premene v avstenit in se material ne transformira.



Slika 9: Primer dilatacijske krivulje [3]

SE (GZ TVP) 760°C / 2h

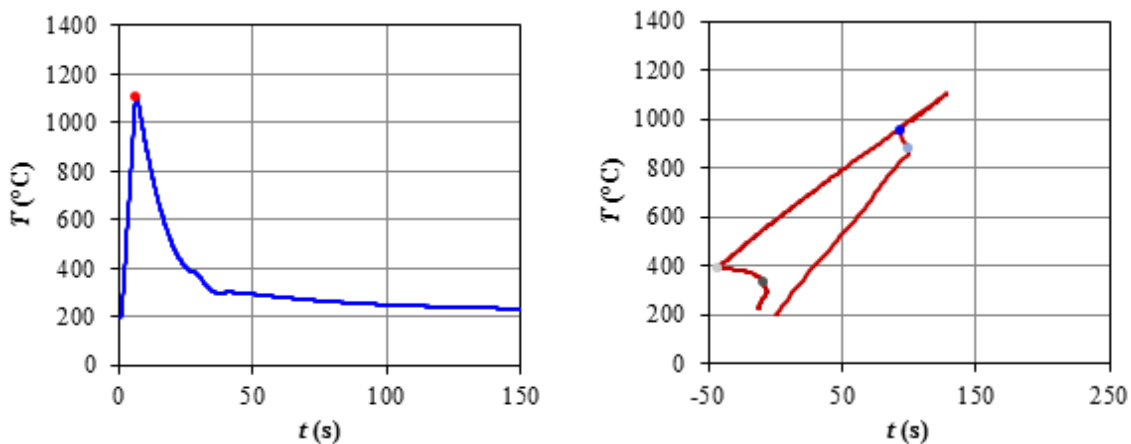
	$t$	$T$	$dil$		$t$	$T$	$dil$
$A_{c1}$	4,9	871,9	111,28	$M_s$	31,3	382,1	14,8
$A_{c3}$	5,2	922,5	104,12	$M_f$	41,8	334,7	53,72
$T_p$	7,7	1327,4					



Slika 10: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za GZ TVP

SD (FZ TVP) 760°C / 2h

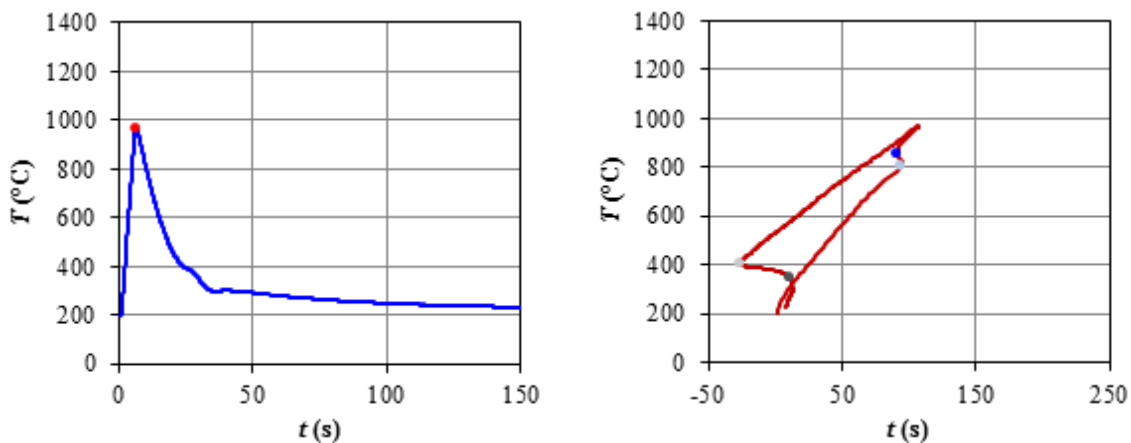
	$t$	$T$	$dil$		$t$	$T$	$dil$
$A_{c1}$	4,8	877,4	100,6	$M_s$	25,8	392,3	-41,96
$A_{c3}$	5,2	955	93,72	$M_f$	32,3	332,4	-8,96
$T_p$	6,4	1106,4					



Slika 11: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za FZ TVP

ST (MK TVP) 760°C / 2h

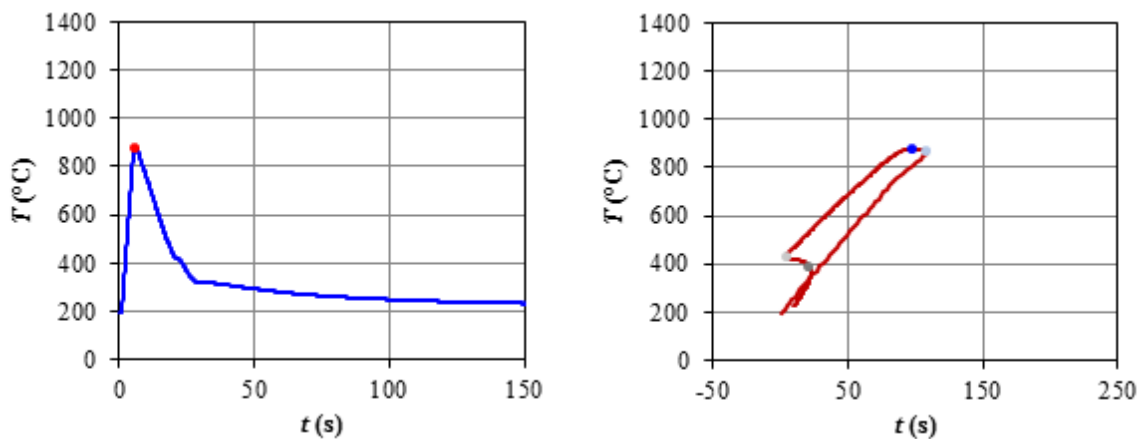
	$t$	$T$	$dil$		$t$	$T$	$dil$
$A_{c1}$	4,8	802,7	94,32	$M_s$	23,3	404,4	-25,68
$A_{c3}$	5,1	852,5	90,84	$M_f$	29,8	347,8	10,4
$T_p$	6,2	968					



Slika 12: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za MK TVP

SS (PK TVP) 760°C / 2h

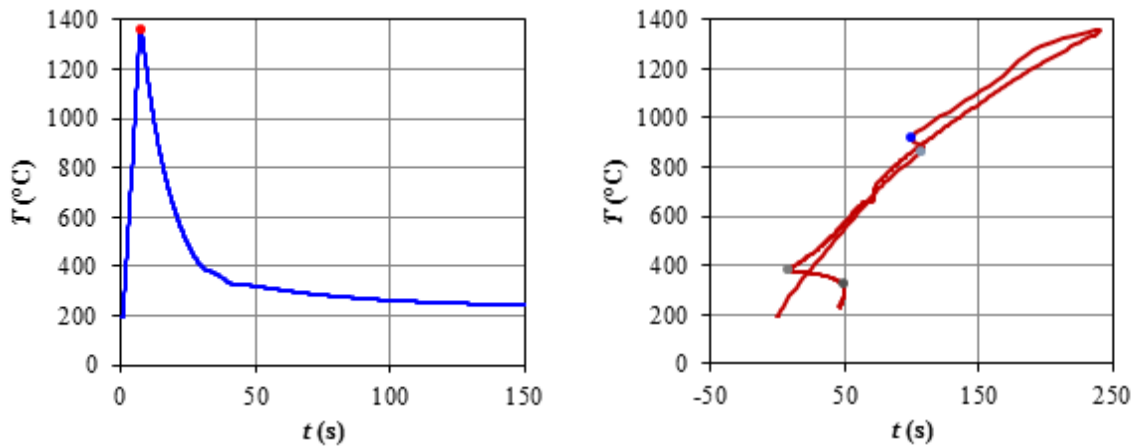
	$t$	$T$	$dil$		$t$	$T$	$dil$
$A_{c1}$	5,3	865,4	108,76	$M_s$	20,5	426,3	4,6
$A_{c3}$	5,8	877,5	97,68	$M_f$	24	386,2	21,64
$T_p$	5,8	877,5					



Slika 13: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za PK TVP

## 5E (GZ TVP) 780°C / 4h

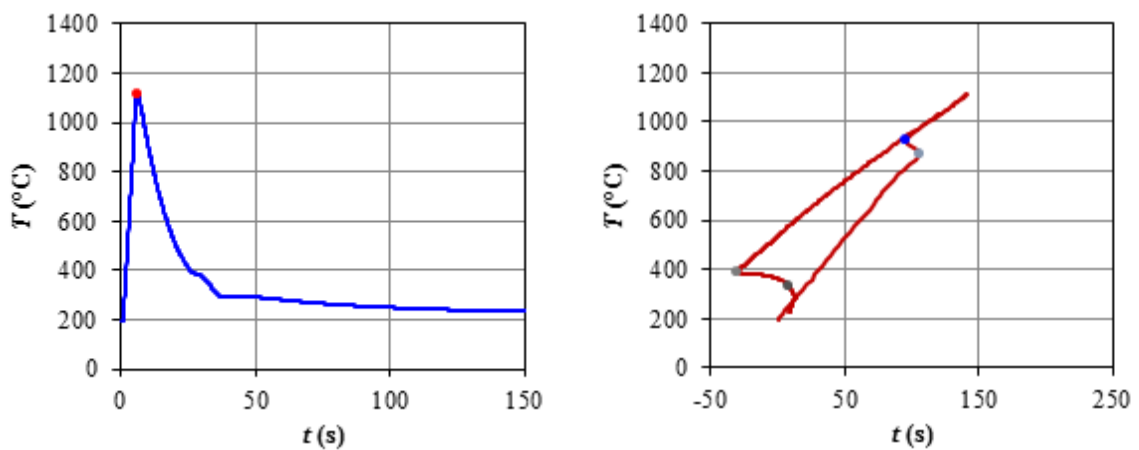
	$t$	$T$	$dil$		$t$	$T$	$dil$
$A_{c1}$	4,5	863,9	106,96	$M_s$	32,4	380,9	8,56
$A_{c3}$	4,8	921,2	99,40	$M_f$	45,8	323,3	48,96
$T_p$	7,4	1358,6					



Slika 14: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za GZ TVP

## 5D (FZ TVP) 780°C / 4h

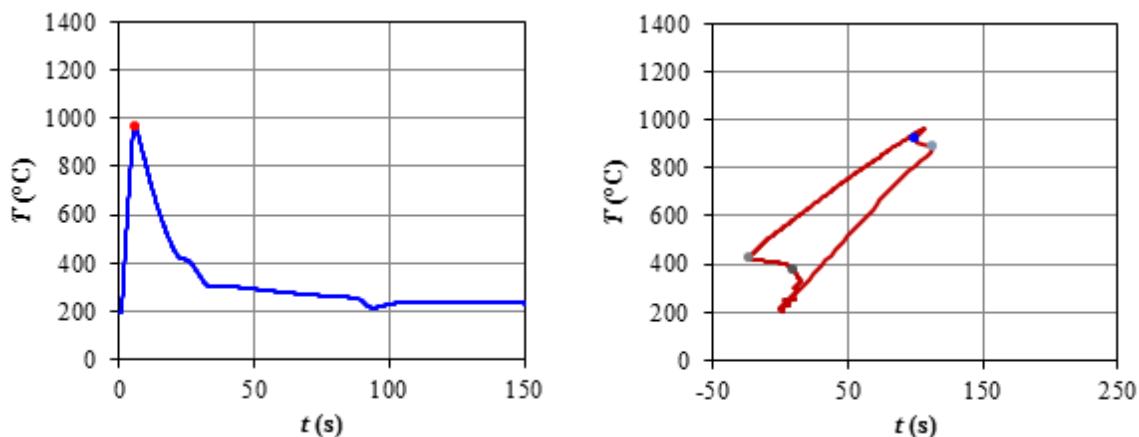
	$t$	$T$	$dil$		$t$	$T$	$dil$
$A_{c1}$	4,4	868,8	106,44	$M_s$	27,2	388,5	-30,76
$A_{c3}$	4,7	928,2	95,8	$M_f$	33,3	336,4	8
$T_p$	6,2	1113,3					



Slika 15: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za FZ TVP

5T (MK TVP) 780°C / 4h

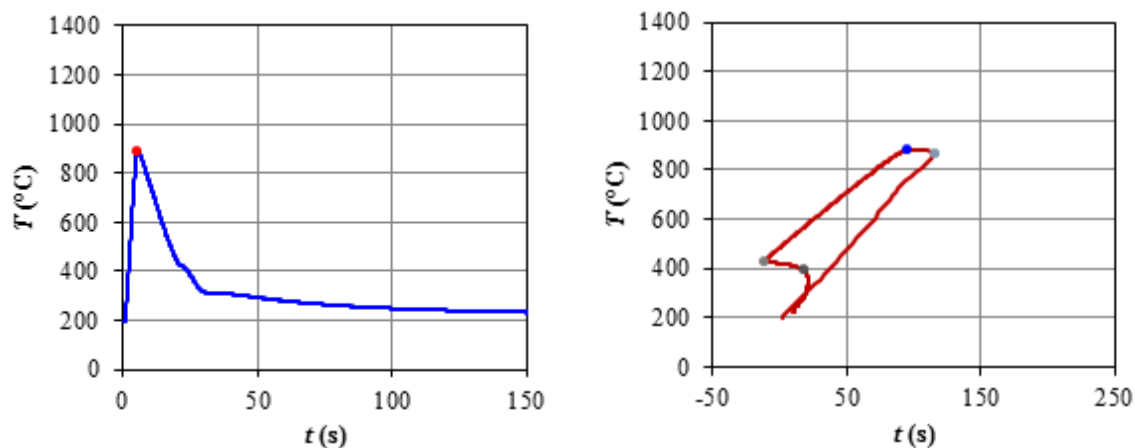
	$t$	$T$	$dil$		$t$	$T$	$dil$
$A_{c1}$	4,6	886,5	112,04	$M_s$	22,3	424,6	-23,68
$A_{c3}$	4,9	920,5	99,44	$M_f$	27,8	380,1	9,36
$T_p$	5,8	964,3					



Slika 16: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za MK TVP

5S (PK TVP) 780°C / 4h

	$t$	$T$	$dil$		$t$	$T$	$dil$
$A_{c1}$	4,9	867,8	115,68	$M_s$	20,8	428,6	-10,8
$A_{c3}$	5,9	882,9	95,04	$M_f$	24,8	389,5	17,96
$T_p$	5,7	883,9					



Slika 17: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za PK TVP

### 3.1.3 Toplotna obdelava

Po varjenju dobimo material, ki ima preveliko trdoto, notranje napetosti in premajhno žilavost, zato ga je obvezno treba toplotno obdelati. S tem se popusti martenzit, kar odpravi notranje napetosti in dosežemo boljše razporeditev karbidov v mikrostrukturi in s tem večjo odpornost vara in TVP na lezenje. Prav tako pa povečamo žilavost materiala in zmanjšamo trdote ob še vedno dovolj veliki trdnosti materiala.

V tej magistrski nalogi smo se posvetili toplotni obdelavi na 760 in 780°C. Pri teh temperaturah smo imeli različen čas držanja na najvišji temperaturi in sicer 0,5h, 1h, 2h, 4h, 8h. Vzorce smo si ustrezno pripravili in označili, da smo jih kasneje ločili in pripravili za Charpy preizkus.

Področja TVP so označevale črke:

**E** - GZ TVP (1350°C)

**D** - FZ TVP (1100°C)

**T** - MK TVP (950°C)

**S** - PK TVP (860°C)

Področja toplotne obdelave so bila označena:

**O** – brez toplotne obdelave

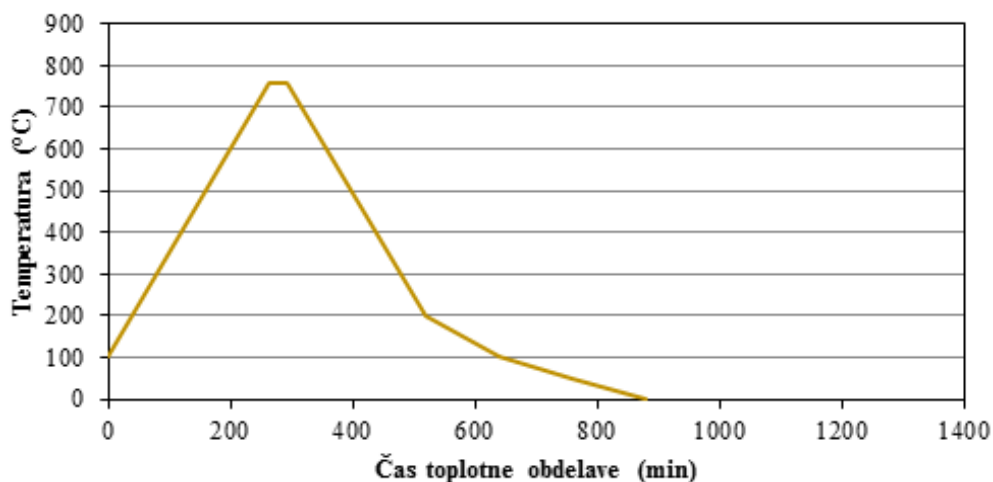
**V, U, S, I, T** – toplotna obdelava na 760°C

**2, 3, 4, 5, 6** – toplotna obdelava na 780°C

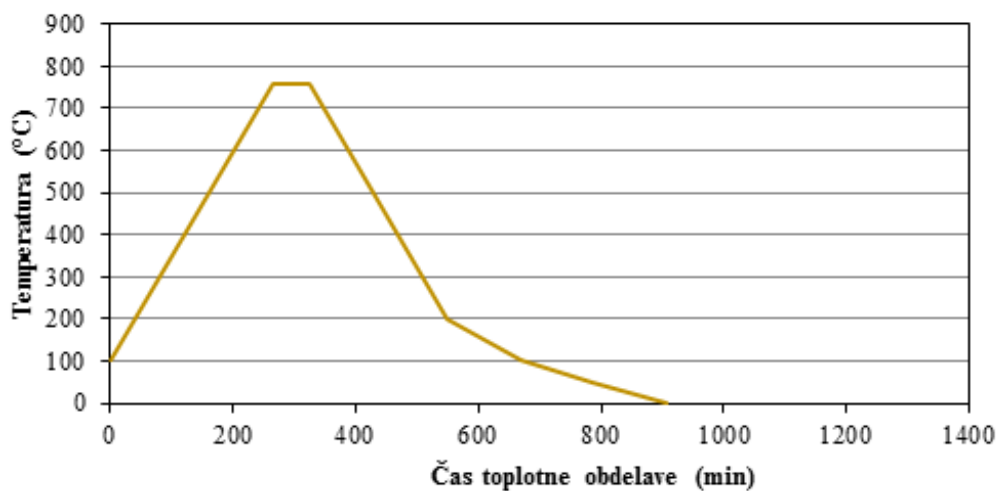
Toplotna obdelava je potekala v peči Bosio EUP-K20/1200, ki smo jo najprej predgrela na 100°C, šele nato smo vanjo dali preizkušance. Pazili smo na hitrost segrevanja in ohlajanja, ki je bila 150°C/h. Pri segrevanju smo držali 10 minut na enaki temperaturi in tak postopek imeli vse do temperature 760 oziroma 780°C in tako odpravili temperaturne razlike v raztezanju.

Za vsak interval smo povečali temperaturo za 25°C in tako dobili, da je temperatura naraščala linearno. Enak postopek smo ponovili za ohlajanje in sicer do temperature 200°C, nato pa smo vzorce vzeli iz peči in jih pustili da se ohladijo na zraku.

Ko smo zaključili z toplotno obdelavo smo na podlagi spremljanja temperatur in časa izrisali diagrame toplotne obdelave, ki so predstavljali postopek toplotne obdelave in iz katerih je razvidna začetna temperatura ki je  $100^{\circ}\text{C}$ , najvišja temperatura ki je  $760^{\circ}\text{C}$  oziroma  $780^{\circ}\text{C}$ , čas držanja na najvišji temperaturi in celoten čas toplotne obdelave.

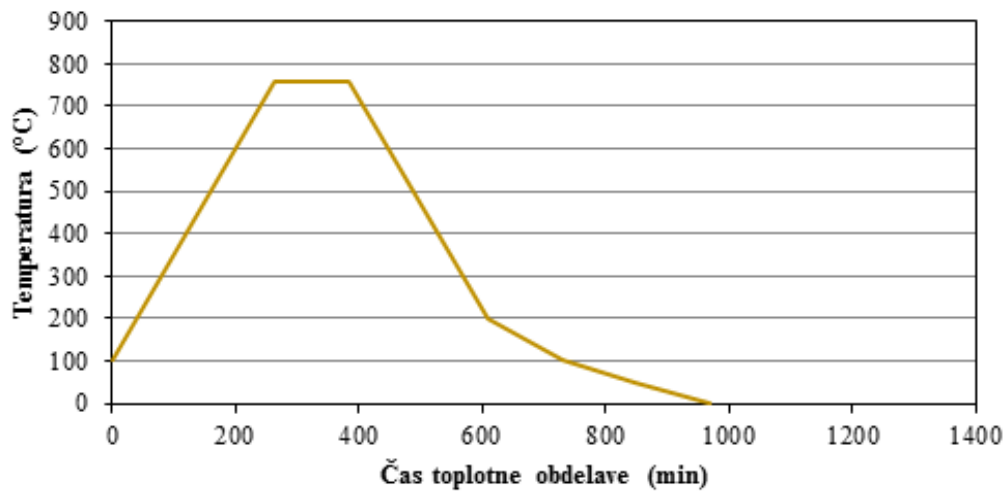


Slika 18: Diagram toplotne obdelave po varjenju  $760^{\circ}\text{C}/0,5h$

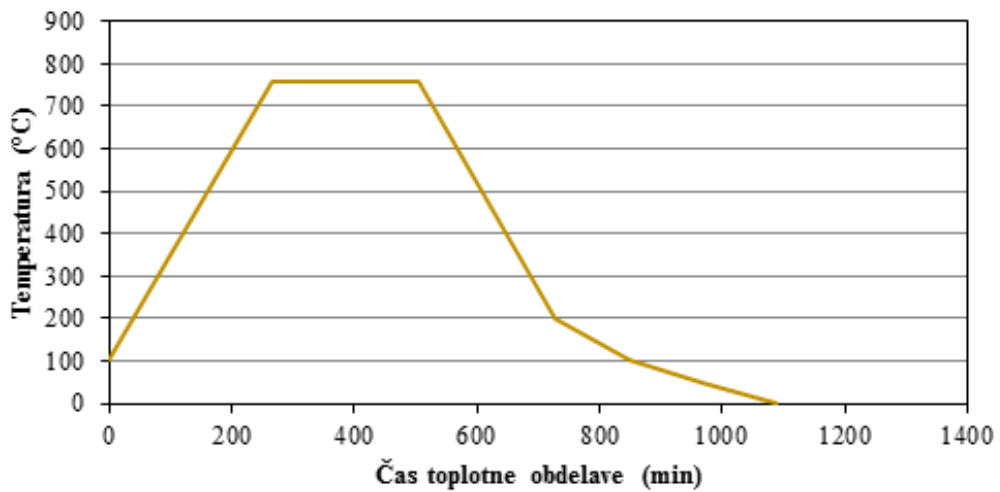


Slika 19: Diagram toplotne obdelave po varjenju  $760^{\circ}\text{C}/1h$

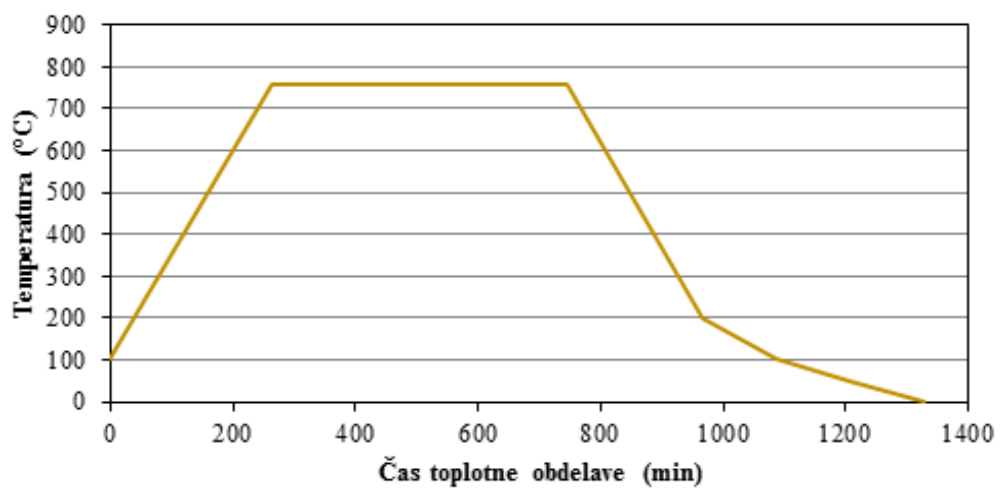




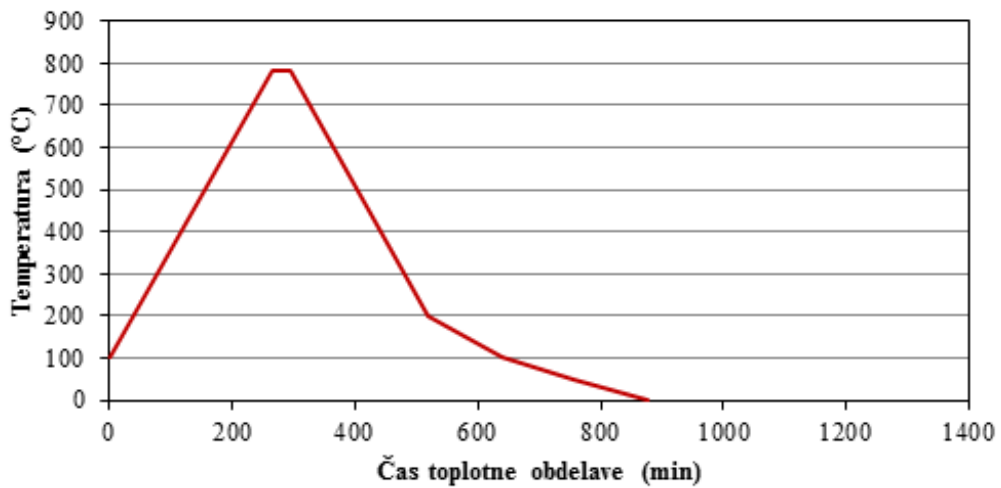
Slika 20: Diagram toplotne obdelave po varjenju 760°C/2h



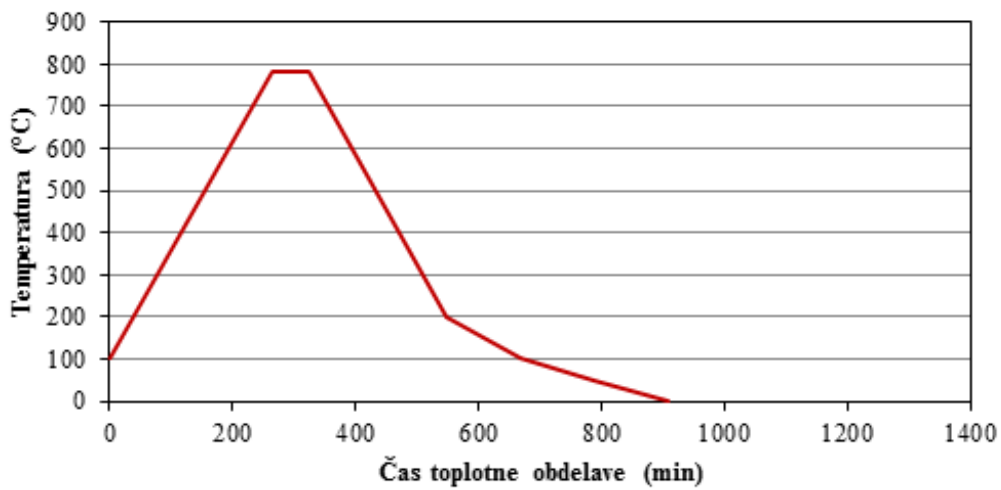
Slika 21: Diagram toplotne obdelave po varjenju 760°C/4h



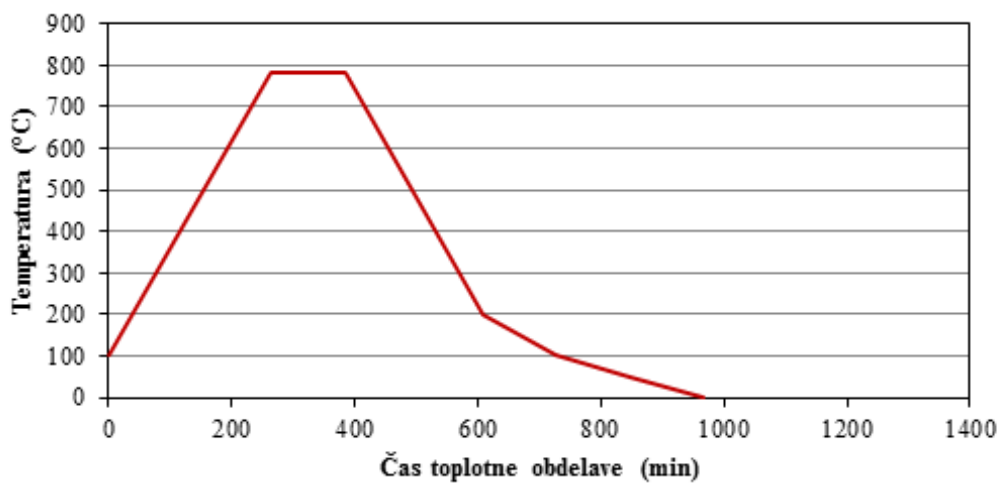
Slika 22: Diagram toplotne obdelave po varjenju 760°C/8h



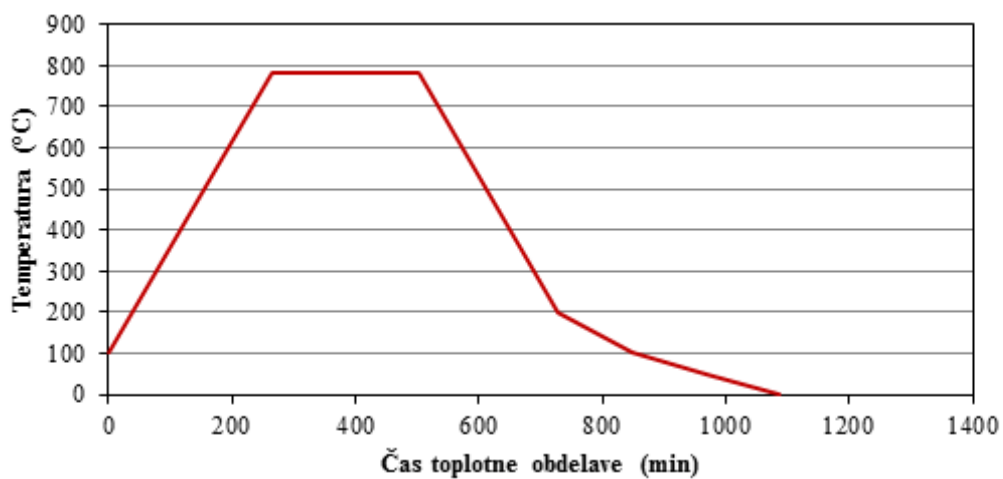
Slika 23: Diagram toplotne obdelave po varjenju 780°C/0,5h



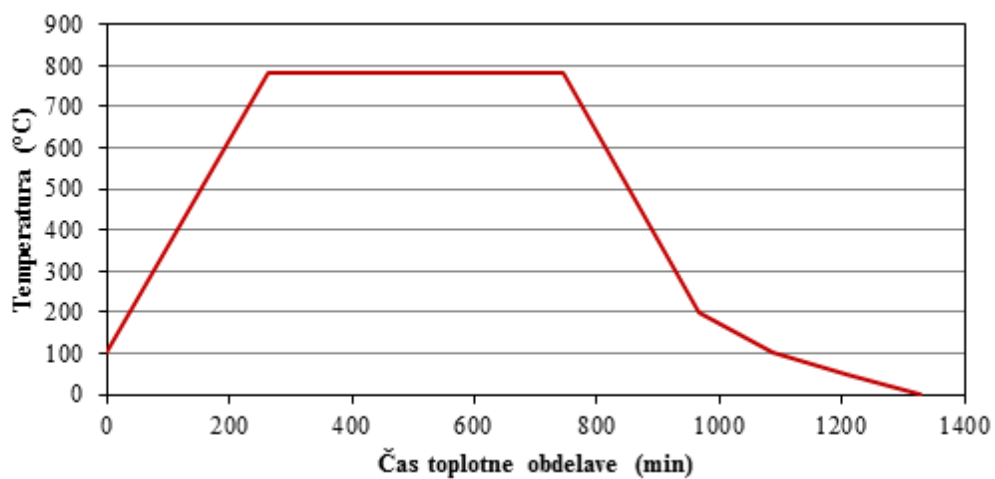
Slika 24: Diagram toplotne obdelave po varjenju 780°C/1h



Slika 25: Diagram toplotne obdelave po varjenju 780°C/2h



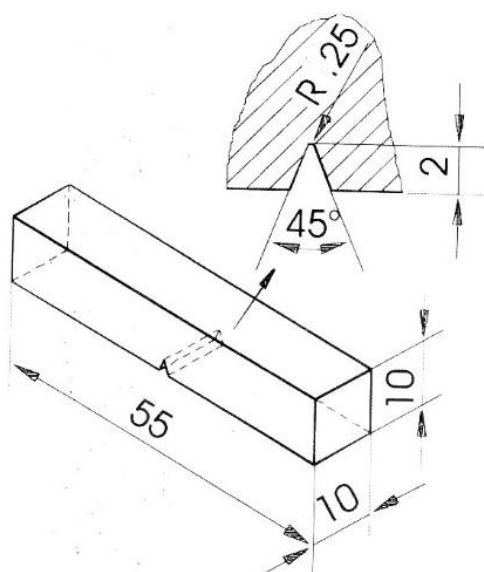
Slika 26: Diagram toplotne obdelave po varjenju 780°C/4h



Slika 27: Diagram toplotne obdelave po varjenju 780°C/8h

### 3.2 Preizkušanje vzorcev

Preizkušanec je standardiziran z ISO-V zarezo in je pri preizkusu podprt na vsaki strani. Razdalja med podporami znaša 40 mm. Preizkušanec obremenimo s pomočjo nihajočega težkega kladiva z zadnje strani nasproti zareze. Koliko energije za lom Charpy preizkušanca imamo na razpolago pri preizkusu in kakšna je hitrost kladiva v trenutku, ko kladivo udari ob preizkušanec, je odvisno od začetne potencialne energije. Ta se v spodnji mrtvi legi pretvori v kinetično energijo, ki je odvisna od mase kladiva in višine s katere spustimo kladivo. Preizkušanec se zaradi udarne obremenitve upogne in zlomi pri veliki hitrosti deformacije.



Slika 28: Charpy preizkušanec [3]

S instrumentiranim Charpy preizkusom smo zlomili 44 preizkušancev, ki so bili pred tem ustrezno označeni glede na prehodno simuliranje TVP in toplotno obdelavo. Nato smo izvozili podatke, ki smo jih dobili med preizkusom.

## 4 OBDELAVA REZULTATOV

### 4.1 Temperature faznih premen

Preizkušance smo označili glede na vrsto TVP in toplotno obdelavo ki sledi. Imeli smo 4 vrste TVP, 2 temperaturi toplotne obdelave in sicer 760 in 780°C ter pri vsaki temperaturi čas zadrževanja na tej temperaturi: 0,5h, 1h, 2h, 4h, 8h.

#### 760-0-1

760 – temperatura toplotne obdelave (760°C)

0 – čas toplotne obdelave (0,5h) - (1h, 2h, 4h, 8h)

1 – področje TVP (GZ TVP) – (2 - FZ TVP, 3 - MK TVP, 4 - PK TVP)

V spodnjih tabelah so prikazane temperature faznih premen  $A_{c3}$ ,  $A_{c1}$ ,  $M_s$ ,  $M_f$  pri preizkušancih po simulaciji jekla P91 na simulatorju Smitweld 1405, dobljene na podlagi dilatacijskih krivulj. Predstavljene vrednosti se nanašajo na posamezno področje TVP.

Tabela 6: Temperature za GZ TVP

VZOREC	$A_{c3}$	$A_{c1}$	$M_s$	$M_f$
760-2-1	922,5	871,9	382,1	334,7
760-8-1	917,5	880,4	382,5	322,5
780-0-1	907,1	848,8	380,9	323,4
780-1-1	913,7	876,2	384,6	335,5
780-2-1	907,8	845,3	378,5	328,1
780-4-1	921,2	863,9	380,9	323,3
780-8-1	898,0	858,5	378,5	325,4
POVPREČJE	912,5	863,6	381,1	327,6

1350°C

Tabela 7: Temperature za FZ TVP

VZOREC	$A_{c3}$	$A_{c1}$	$M_s$	$M_f$
760-2-2	955,0	877,4	392,3	332,4
760-8-2	892,5	836,8	383,8	312,6
780-0-2	905,4	866,1	385,6	324,8
780-1-2	898,9	859,0	389,2	319,0
780-2-2	923,2	863,8	387,0	321,0
780-4-2	928,2	868,8	388,5	336,4
780-8-2	905,2	841,2	385,4	323,2
POVPREČJE	915,5	859,0	387,4	324,2

1100°C

Tabela 8: Temperature za MK TVP

VZOREC	$A_{c3}$	$A_{c1}$	$M_s$	$M_f$
760-2-3	852,5	802,7	404,4	347,8
760-8-3	913,7	872,3	419,6	357,0
780-0-3	916,0	875,0	417,1	384,2
780-1-3	828,9	775,9	387,5	334,9
780-2-3	919,1	886,7	425,5	373,5
780-4-3	920,5	886,5	424,6	380,1
780-8-3	913,9	857,4	419,1	360,8
POVPREČJE	894,9	850,9	414,0	362,6

950°C

Tabela 9: Temperature za PK TVP

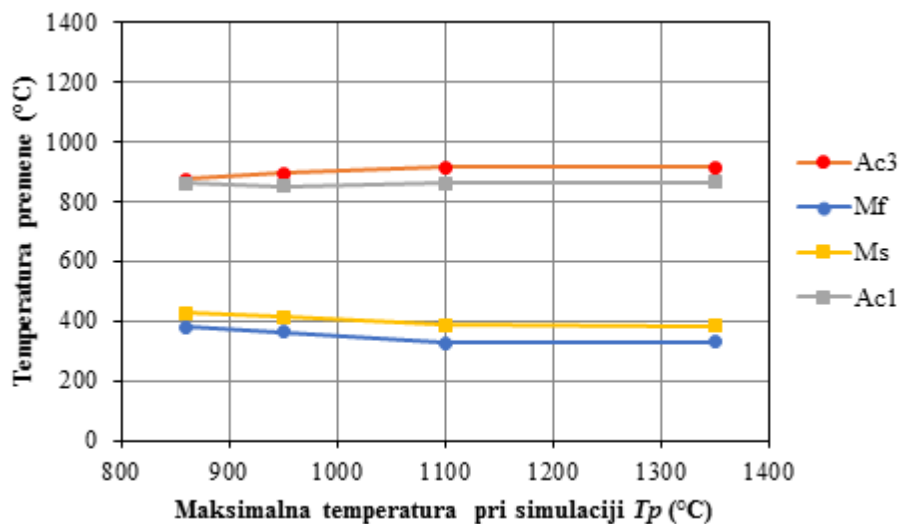
VZOREC	$A_{c3}$	$A_{c1}$	$M_s$	$M_f$
760-2-4	877,5	865,4	426,3	386,2
760-8-4	870,4	860,5	423,5	373,0
780-0-4	878,3	854,2	425,2	366,5
780-1-4	881,7	861,3	426,1	372,9
780-2-4	873,9	867,6	426,9	381,3
780-4-4	882,9	867,8	428,6	389,5
780-8-4	868,2	853,6	424,5	385,6
POVPREČJE	876,1	861,5	425,9	379,3

860°C

Tabela 10: Povprečne temperature faznih premen

		$A_{c3}$	$A_{c1}$	$M_s$	$M_f$
GZ TVP	1350	912,5	863,6	381,1	327,6
FZ TVP	1100	915,5	859,0	387,4	324,2
MK TVP	950	894,9	850,9	414,0	362,6
PK TVP	860	876,1	861,5	425,9	379,3

Spodnji diagram predstavlja povprečne temperature posamezni premen v odvisnosti od najvišje temperature za posamezna področja TVP. Vidimo da so posamezne temperature v istem rangu, prihaja le do manjših odstopanj. Te temperature smo nato primerjali s CCT-diagramom iz literature za jeklo P91. Razvidno je, da temperature niso popolnoma skladne z diagramom iz literature. Najbolj odstopa temperatura  $M_f$ , ki je bistveno višja od vrednosti v CCT-diagramu. Ostale temperature so nekje v rangu vrednosti iz literature. Do odstopanj pride, saj je šlo pri nas za hitro segrevanje in ohlajanje in nismo držali na temperaturi avstenizacije kot je to predvideno v CCT-diagramu. Razlike pa povzročijo tudi različna kemijska sestava jekel, ki ni popolnoma enaka.



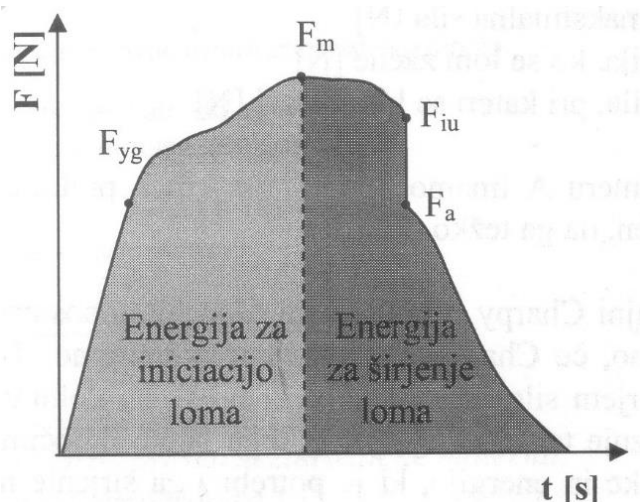
Slika 29. Diagram temperatur faznih premen

## 4.2 Charpy preizkus

### 4.2.1 Diagrami preizkusa

Pri preizkusu smo dobili energijo, ki je potrebna, da se pojavi začetna razpoka ter energijo za širjenje razpoke. Prav tako smo dobili skupno energijo za lom in udarno žilavost vzorca, ki se meri v  $\text{J}/\text{cm}^2$  ter odstotek žilavega loma. Določili smo napetost tečenja  $\sigma_{yB}$  in napetost pri porušitvi  $\sigma_{mB}$ .

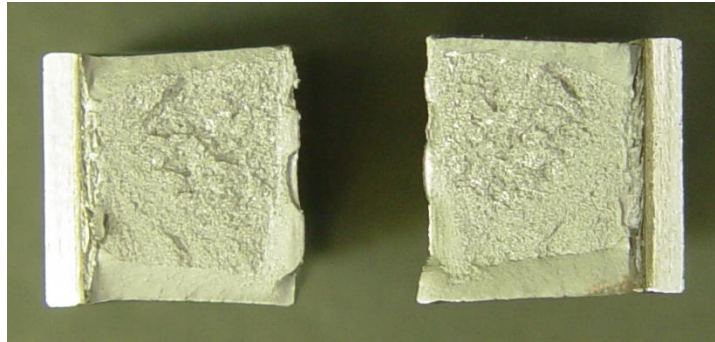
Za nadaljnjo analizo rezultatov so nam služili diagrami odvisnosti energije od časa in poti, sile od časa in poti ter odvisnost sile od energije. Preizkušance smo po preizkusu fotografirali in s tem pridobili vizualne podatke o vrsti loma, da samo lahko kasneje določili delež žilavega loma glede na delež krhke in žilave površine. Diagram sile v odvisnosti od časa in njegova oblika nam pokaže do kakšnega loma pride. Pri krhkem lomu sila hitro pade, pri žilavem pa bolj postopoma.



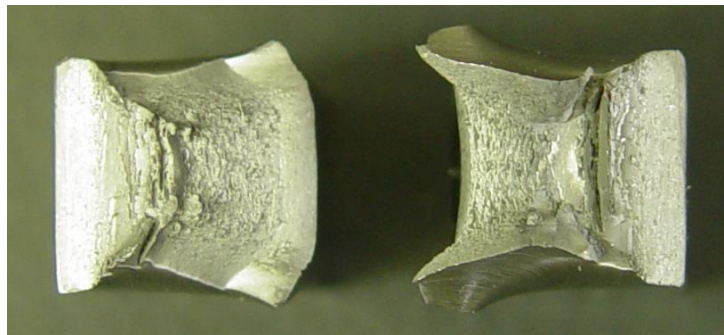
Slika 30: Diagram Charpy preizkusa [3]

Diagram sile v odvisnosti od poti nam kaže spremembo sile v odvisnosti od poti. Površina pod njim predstavlja delo, ki je potrebno za porušitev preizkušanca. Diagram energije v odvisnosti od časa oziroma poti nam pokažeta odvisnost energije od vrste loma in odstotka žilavega loma. Bolj kot gre za žilav lom več energije je potrebno za prelom preizkušanca. Na diagramu sile v odvisnosti od energije je razvidna rast sile dokler ne dosežemo energije porušitve preizkušanca. Podatke iz diagramov pridobljenih pri Charpy preizkusu smo nato združili po posameznih področjih TVP in temperaturi ter času toplotne obdelave. Ti diagrami so nam služili za kasnejšo analizo in diskusijo. Ena stran diagramov predstavlja en preizkušanelec. Zraven so priložene slike, ki prikazujejo, kako se je preizkušanelec zlomil.





*Slika 31: Primer bolj krhkega loma*



*Slika 32: Primer bolj žilavega loma*

**Oznaka epruvete:** OE (GZ TVP)

**Toplotna obdelava** /

**REZULTATI**

**Energija za lom:** 72,7 J

**Udarna žilavost:** 90,88 J/cm<sup>2</sup>

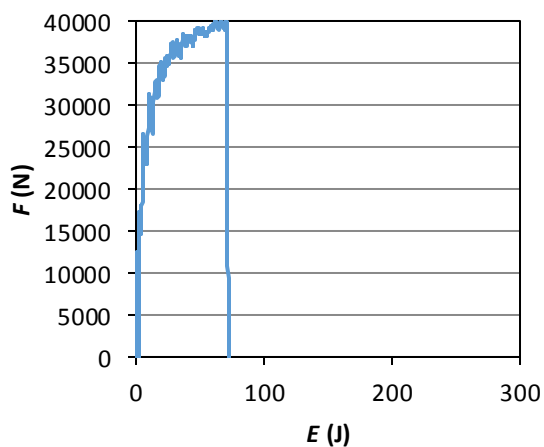
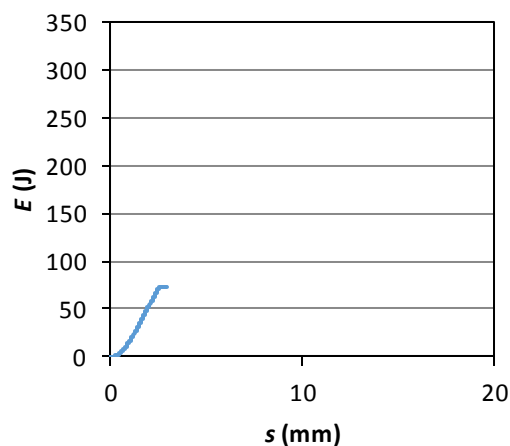
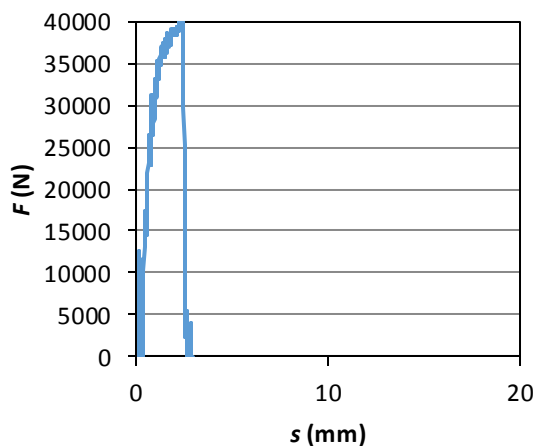
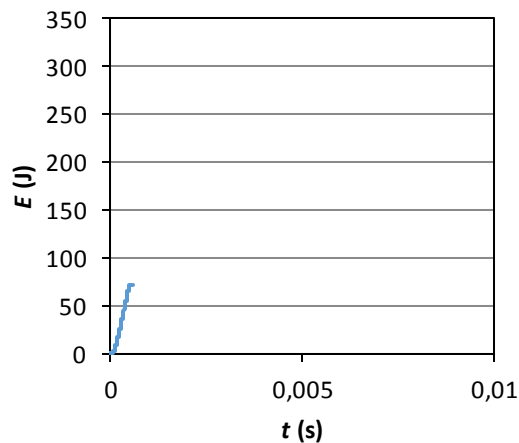
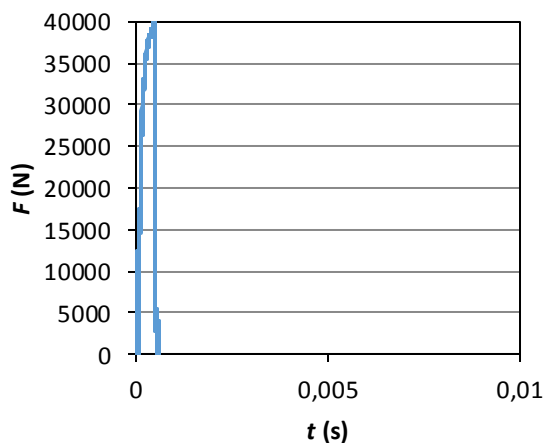
**$E_i$ :** 66,56 J

**$E_p$ :** 6,14 J

**$\sigma_{YB}$ :** 328,83 MPa

**$\sigma_{mB}$ :** 505,08 MPa

**Procent žilavega loma:** 11,73 %



Slika 33: Rezultati Charpy preizkusa – vzorec OE

**Oznaka epruvete:** OD (FZ TVP)

**Toplotna obdelava:** /

**REZULTATI**

**Energija za lom:** 120,95 J

**Udarna žilavost:** 151,18 J/cm<sup>2</sup>

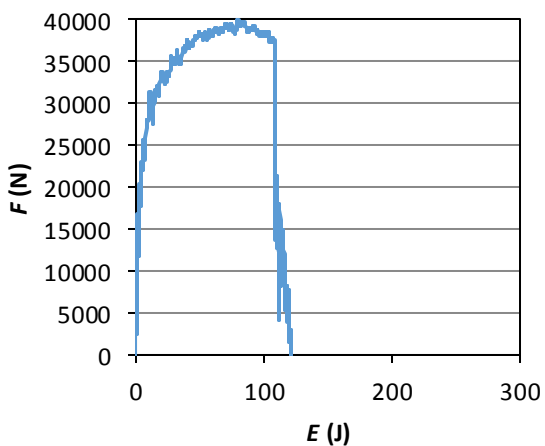
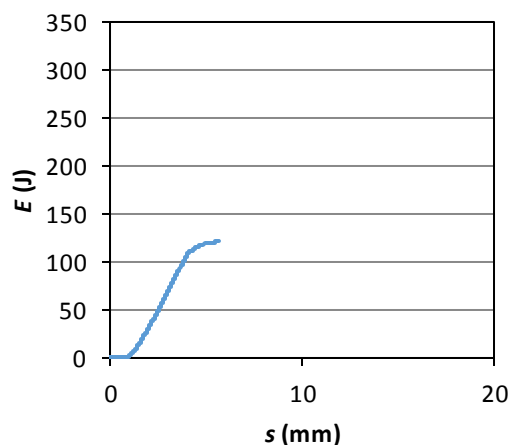
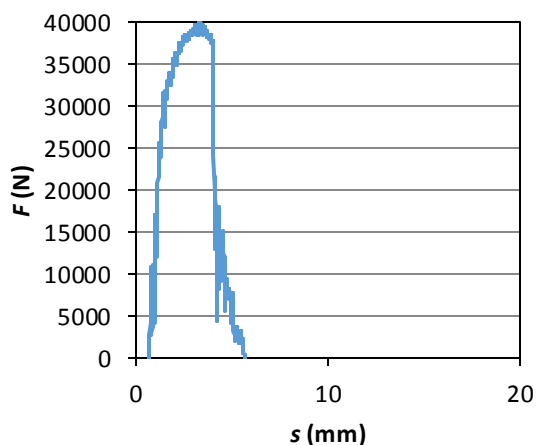
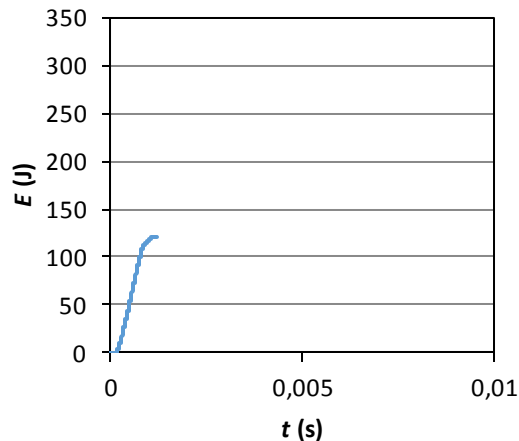
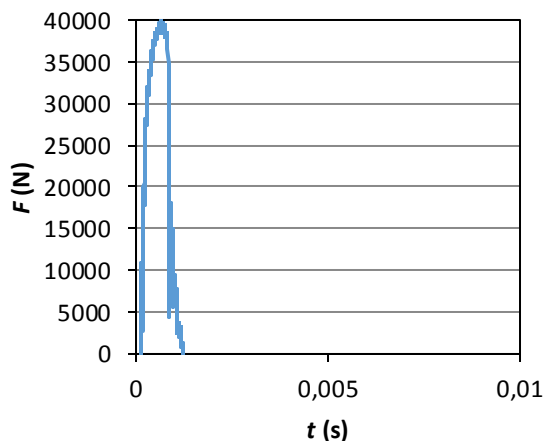
**$E_i$ :** 79,92 J

**$E_p$ :** 41,03 J

**$\sigma_{YB}$ :** 237,32 MPa

**$\sigma_{mB}$ :** 501,29 MPa

**Procent žilavega loma:** 50,8 %



Slika 34: Rezultati Charpy preizkusa – vzorec OD

**Oznaka epruvete:** OT (MK TVP)

**Toplotna obdelava** /

**REZULTATI**

**Energija za lom:** 172,04 J

**Udarna žilavost:** 215,06 J/cm<sup>2</sup>

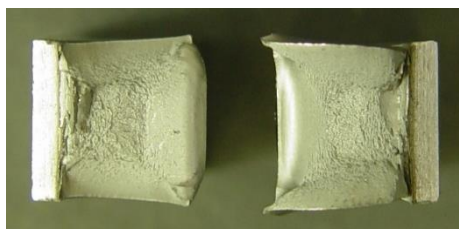
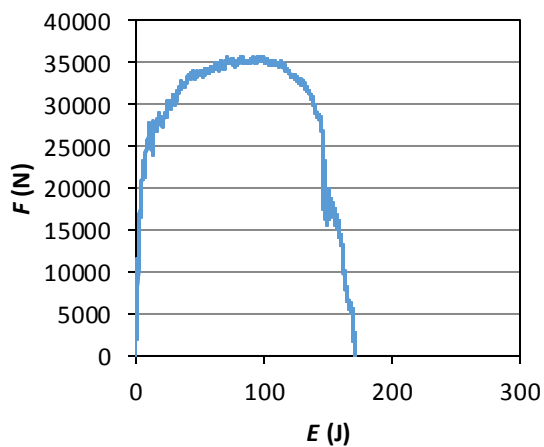
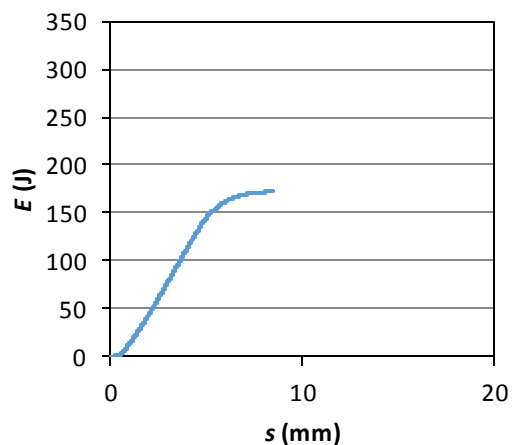
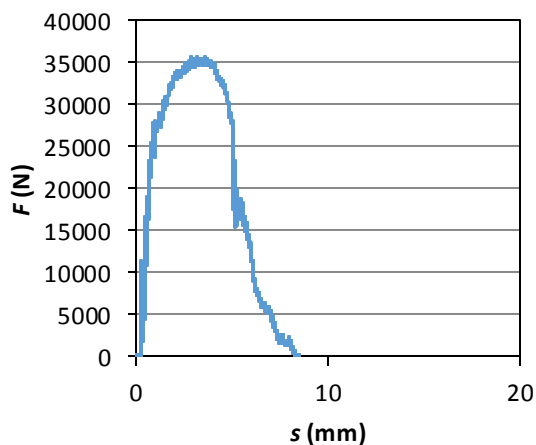
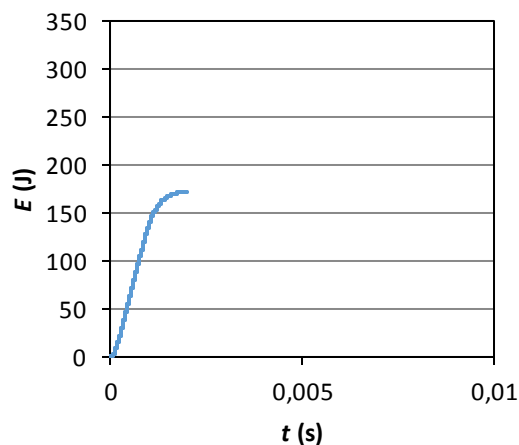
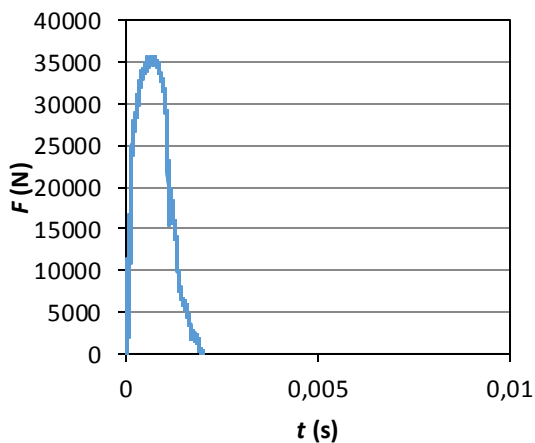
**$E_i$ :** 99,69 J

**$E_p$ :** 72,35 J

**$\sigma_{YB}$ :** 250,39 MPa

**$\sigma_{YB}$ :** 445,77 MPa

**Procent žilavega loma:** 100 %



Slika 35: Rezultati Charpy preizkusa – vzorec OT

**Oznaka epruvete:** OS (PK TVP)

**Toplotna obdelava:** /

**REZULTATI**

**Energija za lom:** 246,38 J

**Udarna žilavost:** 307,97 J/cm<sup>2</sup>

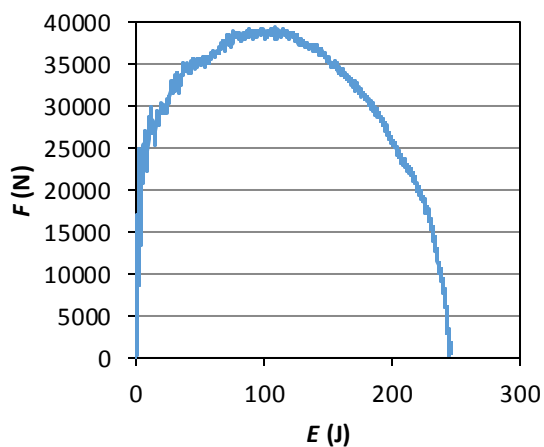
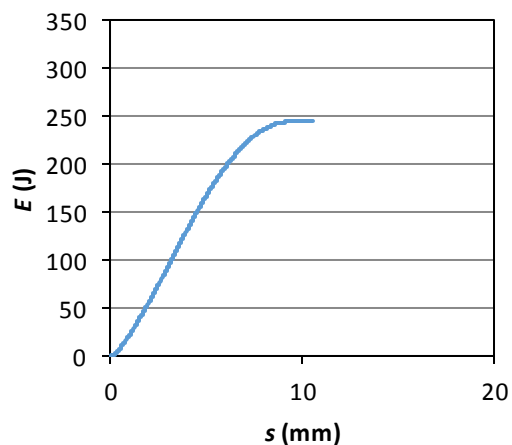
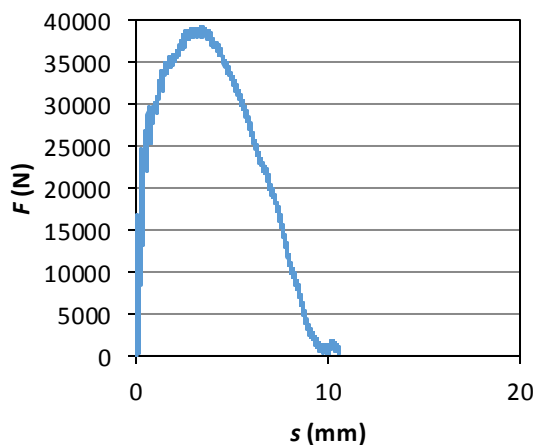
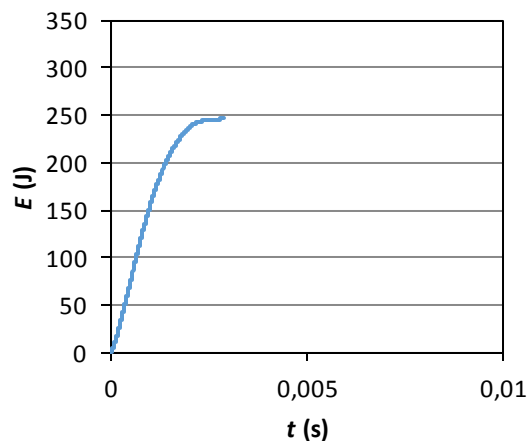
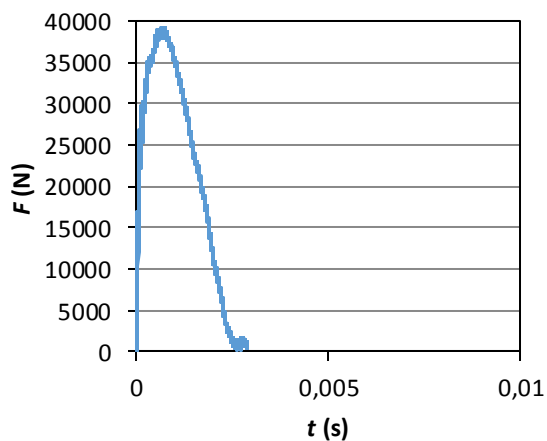
**$E_i$ :** 104,63 J

**$E_p$ :** 141,75 J

**$\sigma_{YB}$ :** 312,93 MPa

**$\sigma_{mB}$ :** 473,83 MPa

**Procent žilavega loma:** 99,56 %



Slika 36: Rezultati Charpy perizkusa – vzorec OS

**Oznaka epruvete:** VE (GZ TVP)

**Toplotna obdelava:** 760°C / 0,5h

**REZULTATI**

**Energija za lom:** 98 J

**Udarna žilavost:** 122,5 J/cm<sup>2</sup>

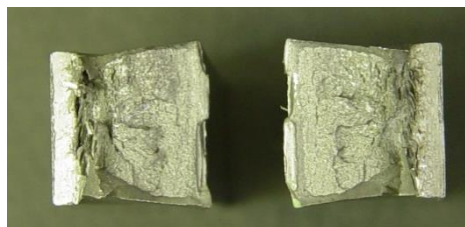
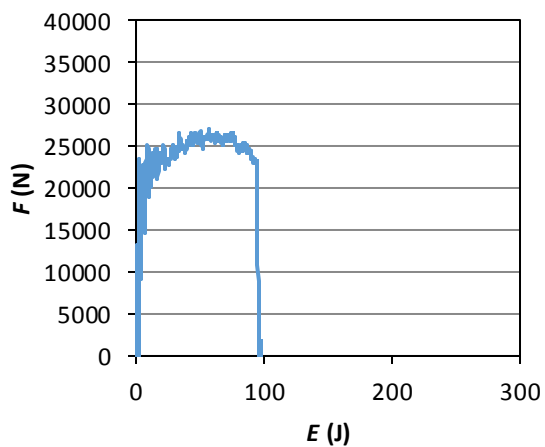
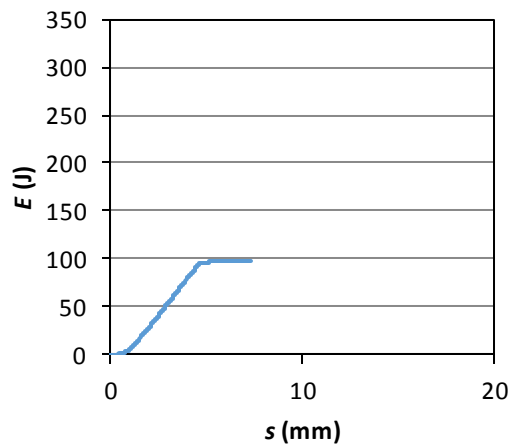
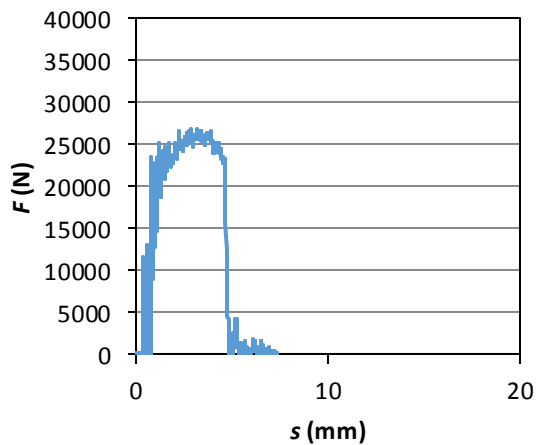
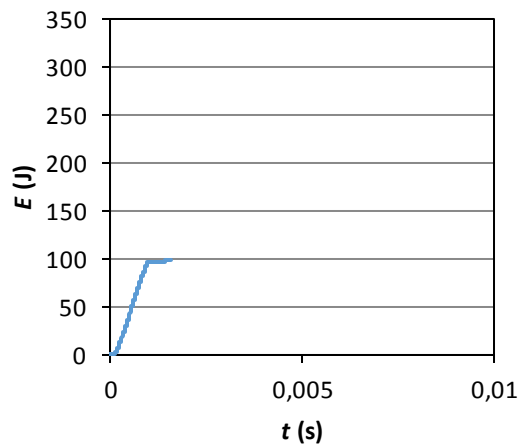
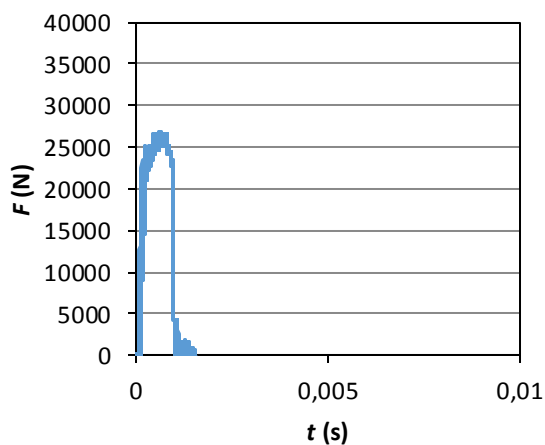
$E_i$ : 50,42 J

$E_p$ : 47,58 J

$\sigma_{YB}$ : 245,09 MPa

$\sigma_{mB}$ : 334,81 MPa

**Procent žilavega loma:** 14,3 %

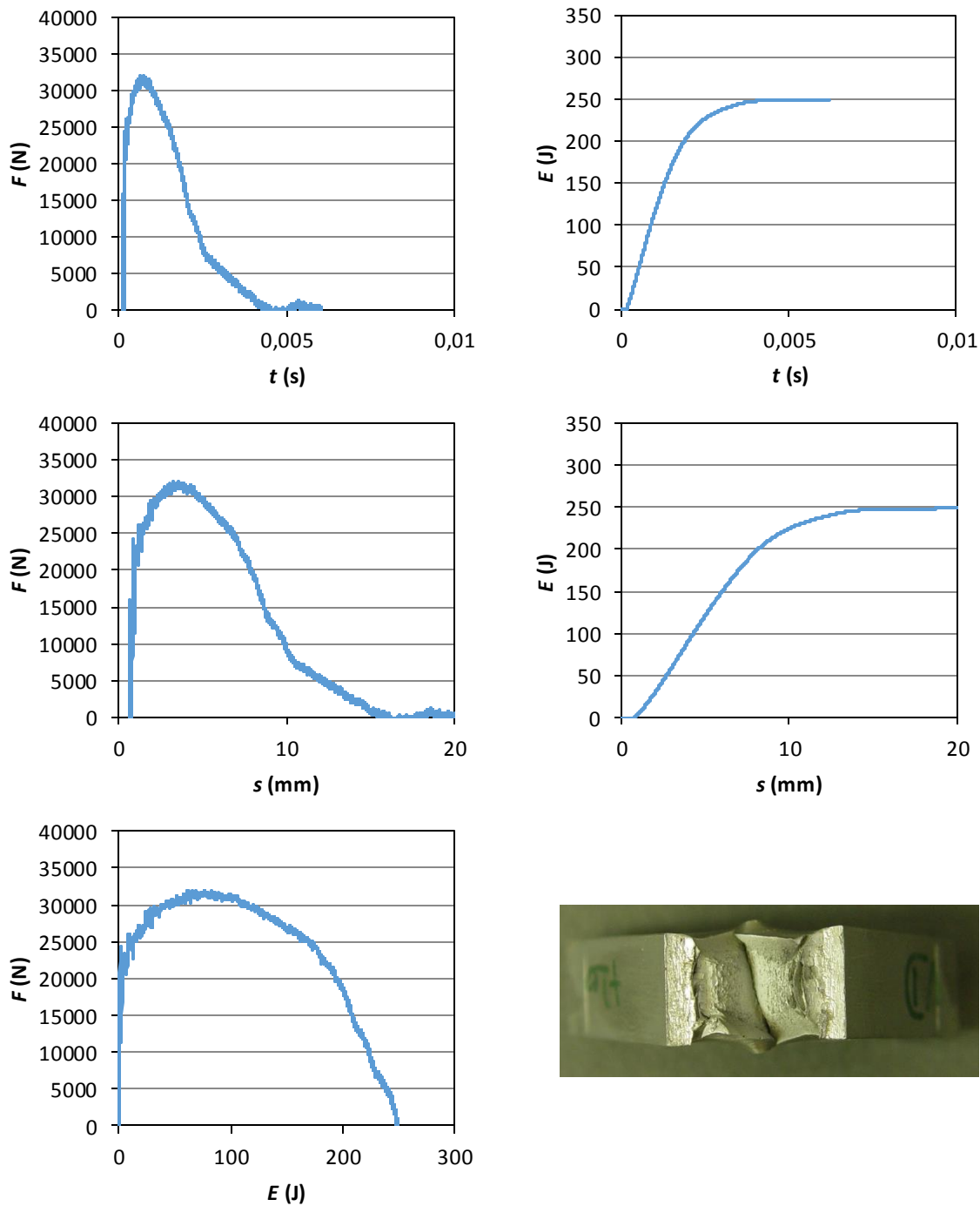


Slika 37: Rezultati Charpy preizkusa – vzorec VE

**Oznaka epruvete:** VD (FZ TVP)  
**Toplotna obdelava:** 760°C / 0,5h

**REZULTATI**

**Energija za lom:** 248,58 J  
**Udarna žilavost:** 310,72 J/cm<sup>2</sup>     **$\sigma_{yB}$ :** 284,59 MPa  
 **$E_i$ :** 76,71 J     **$\sigma_{mB}$ :** 399,66 MPa  
 **$E_p$ :** 171,87 J    **Procent žilavega loma:** 100 %



Slika 38: Rezultati Charpy preizkusa – vzorec VD

**Oznaka epruvete:** VT (MK TVP)

**Toplotna obdelava:** 760°C / 0,5h

**REZULTATI**

**Energija za lom:** 286,06 J

**Udarna žilavost:** 357,57 J/cm<sup>2</sup>

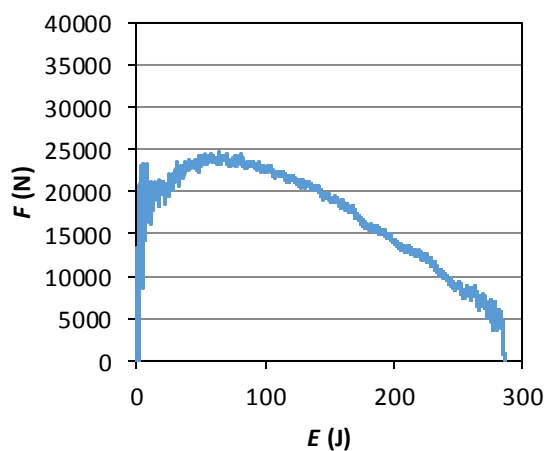
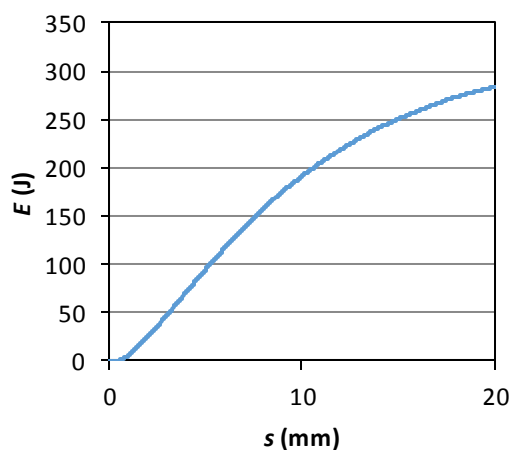
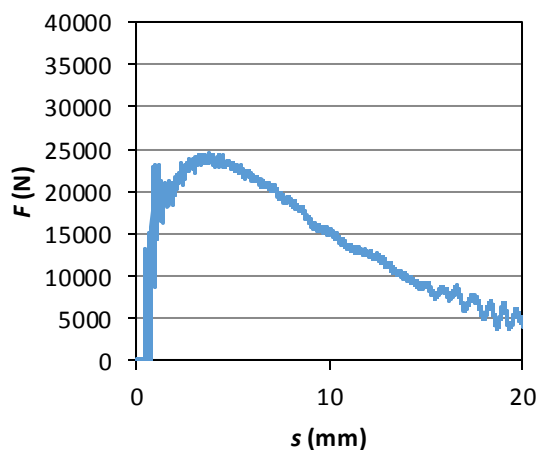
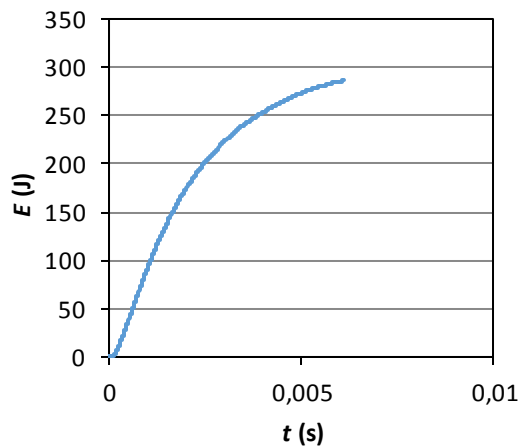
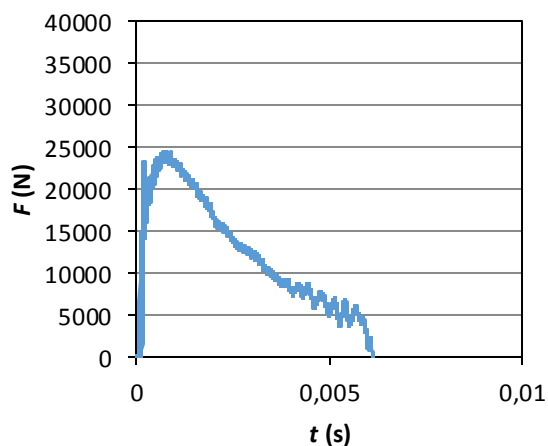
$E_i$ : 64,46 J

$E_p$ : 121,6 J

$\sigma_{VB}$ : 223,83 MPa

$\sigma_{mB}$ : 306,94 MPa

**Procent žilavega loma:** 100 %



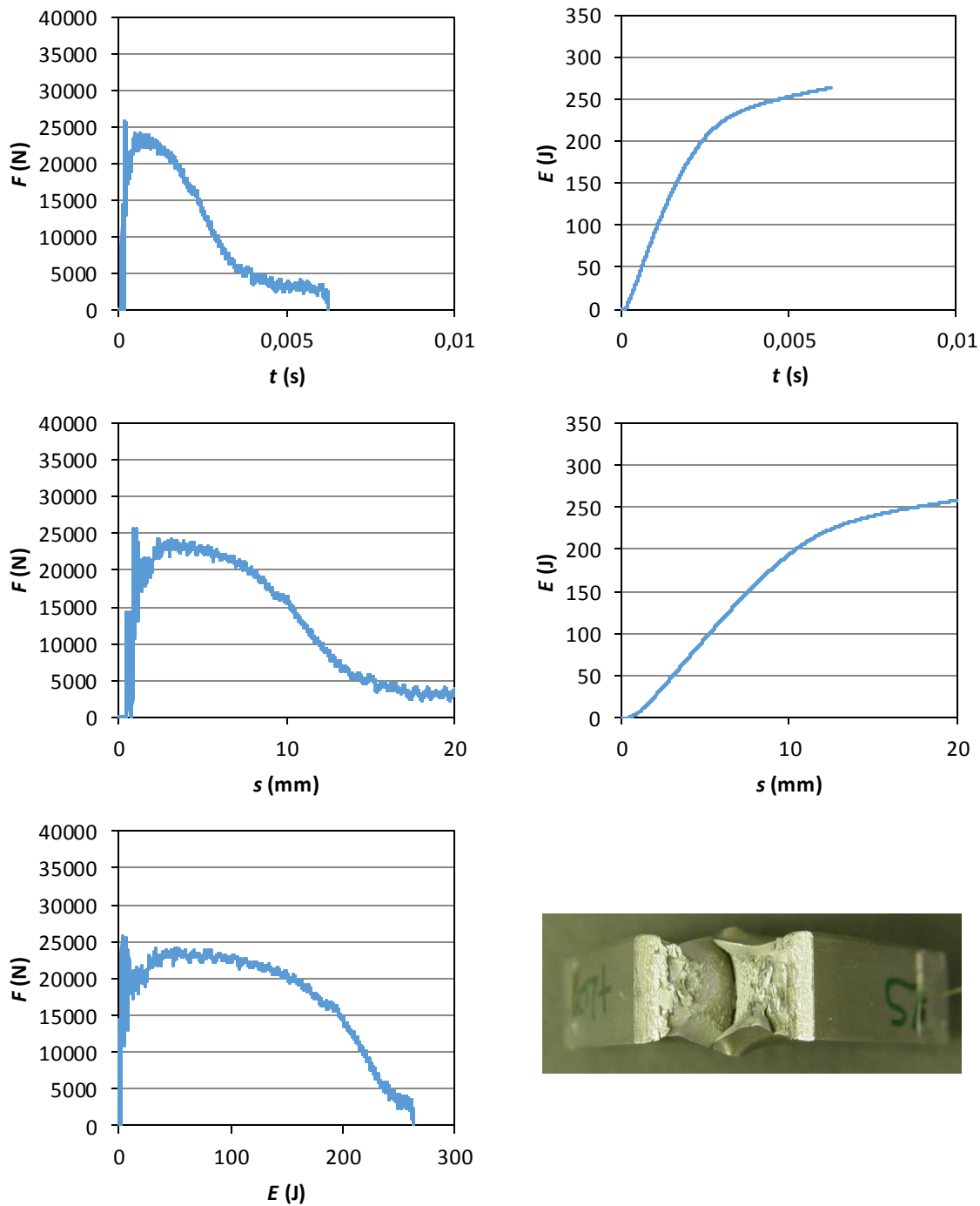
Slika 39: Rezultati Charpy preizkusa – vzorec VT



**Oznaka epruvete:** VS (PK TVP)  
**Toplotna obdelava:** 760°C / 0,5h

**REZULTATI**

**Energija za lom:** 262,8 J  
**Udarna žilavost:** 328,5 J/cm<sup>2</sup>     **$\sigma_{VB}$ :** 221,02 MPa  
 **$E_i$ :** 53,96 J     **$\sigma_{mB}$ :** 300,61 MPa  
 **$E_p$ :** 208,84 J    **Procent žilavega loma:** 98,53 %



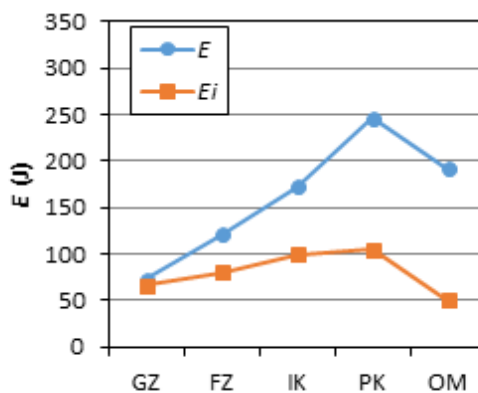
Slika 40: Rezultati Charpy preizkusa – vzorec VS

#### 4.2.2 Žilavost, energija za lom

Podatke iz diagramov energije v odvisnosti od časa smo združili in jih razvrstili glede na posamezno področje TVP, nato pa še glede na toplotno obdelavo. Med seboj smo primerjali diagrame za 760°C in 780°C. Celotno energijo za lom smo razdelili na dva dela in sicer energijo potrebno za iniciacijo razpoke iz mehanske zareze ( $E_i$ ) in na energijo za napredovanje razpoke ( $E_p$ ).

Tabela 11: Primerjava energije za lom po področjih TVP brez toplotne obdelave

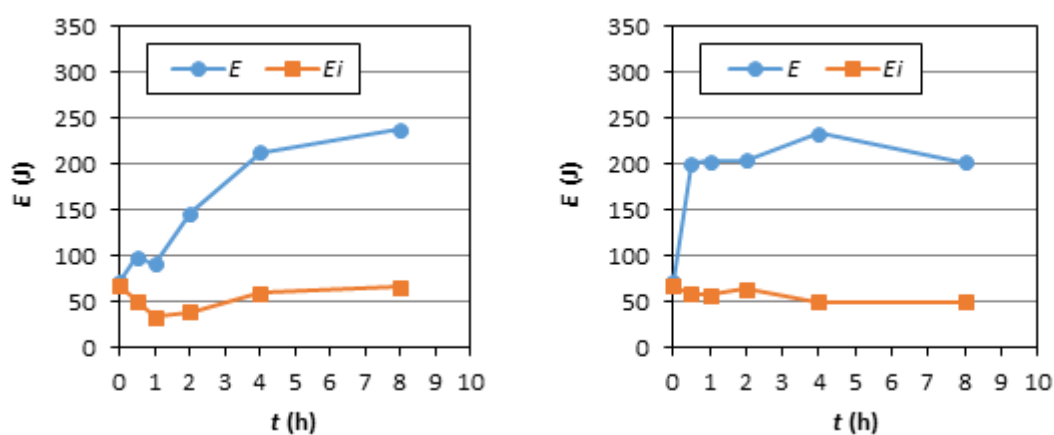
	$E$ (J)	$E_i$ (J)	$E_p$ (J)	$KV$ (J/cm <sup>2</sup> )	delež žil. loma (%)
GZ	72,70	66,56	6,14	90,88	12
FZ	120,95	79,92	41,03	151,18	51
IK	172,04	99,69	72,35	215,06	100
PK	246,38	104,63	141,75	307,97	100
OM	192,00	50,00	142,00	240,00	100



Slika 41: Primerjava energije za lom po področjih TVP brez toplotne obdelave

Tabela 12: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času TO za GZ TVP

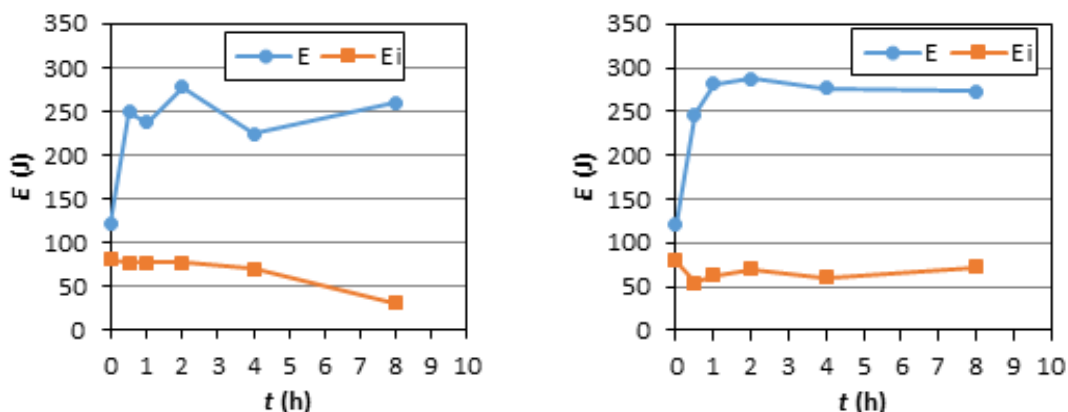
GZ TVP	$T_{TO}$ (°C)	$t_{TO}$ (h)	$E$ (J)	$E_i$ (J)	$E_p$ (J)	$KV$ (J/cm <sup>2</sup> )	delež žil. loma (%)
0E	(-)	(-)	72,70	66,56	6,14	90,88	12
VE	760	0,5	98,00	50,42	47,58	122,50	14
UE		1	90,63	33,30	57,33	113,29	46
SE		2	146,46	38,49	107,98	183,08	100
IE		4	212,62	59,42	153,20	265,77	100
TE		8	238,08	65,74	172,34	297,60	100
2E	780	0,5	200,87	57,85	143,02	251,09	100
3E		1	202,79	57,36	145,43	253,48	100
4E		2	203,48	63,03	140,45	254,35	100
5E		4	233,21	49,54	183,67	291,51	100
6E		8	201,74	49,56	152,18	252,18	100



Slika 42: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času TO za GZ TVP

Tabela 13: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času TO za FZ TVP

FZ TVP	$T_{TO}$ (°C)	$t_{TO}$ (h)	$E$ (J)	$E_i$ (J)	$E_p$ (J)	$KV$ (J/cm <sup>2</sup> )	delež žil. loma (%)
0D	(-)	(-)	120,95	79,92	41,03	151,18	51
VD	760	0,5	248,58	76,71	171,87	310,72	100
UD		1	236,79	76,70	160,09	295,98	100
SD		2	277,14	76,94	200,2	346,42	100
ID		4	223,95	69,81	154,14	279,93	100
TD		8	259,80	29,98	229,82	324,75	100
0D	780	0,5	246,22	54,23	191,99	307,78	100
2D		1	281,44	62,82	218,63	351,80	100
3D		2	286,86	70,49	216,37	358,58	100
4D		4	276,29	60,64	215,65	345,37	100
5D		8	273,31	72,45	200,86	341,64	100

Slika 43: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času  $T_O$  za FZ TVPTabela 14: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času  $T_O$  za MK TVP

MK TVP	$T_{TO}$ (°C)	$t_{ro}$ (h)	$E$ (J)	$E_i$ (J)	$E_p$ (J)	$KV$ (J/cm <sup>2</sup> )	delež žil. loma (%)
0T	(-)	(-)	172,04	99,69	72,35	215,06	100
VT	760	0,5	286,06	64,46	221,6	357,57	100
UT		1	309,11	84,63	224,48	386,38	100
ST		2	281,99	59,31	222,68	352,49	100
IT		4	292,12	63,46	228,66	365,15	100
TT		8	294,82	75,75	219,07	368,52	100
2T	780	0,5	290,04	60,02	230,02	362,55	100
3T		1	299,83	79,19	220,64	374,79	100
4T		2	307,37	85,86	221,51	384,22	100
5T		4	308,53	79,39	229,14	385,66	100
6T		8	358,47	71,7	286,77	448,09	100

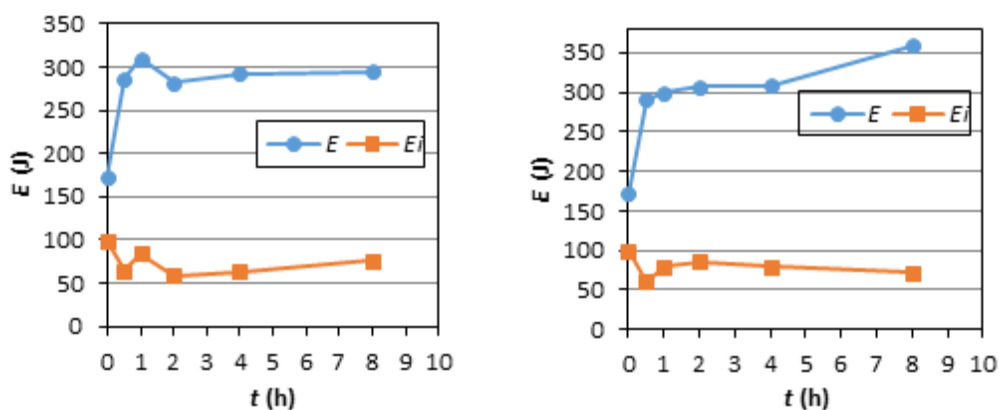
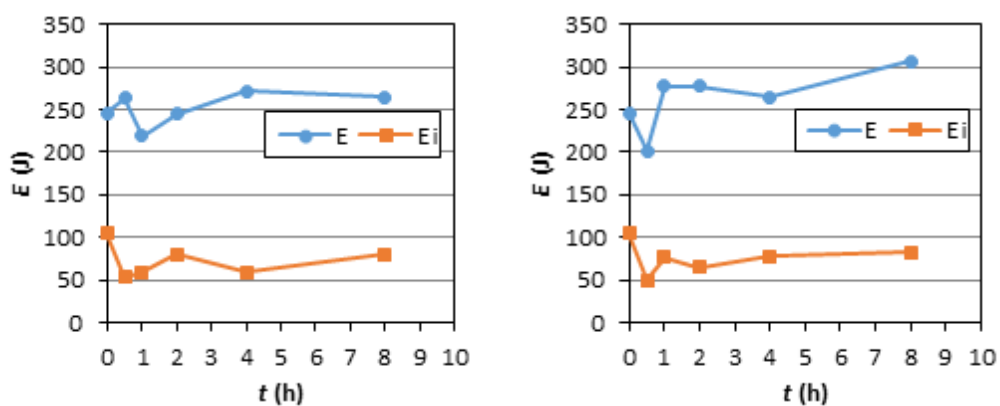
Slika 44: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času  $T_O$  za MK TVP

Tabela 15: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času TO za PK TVP

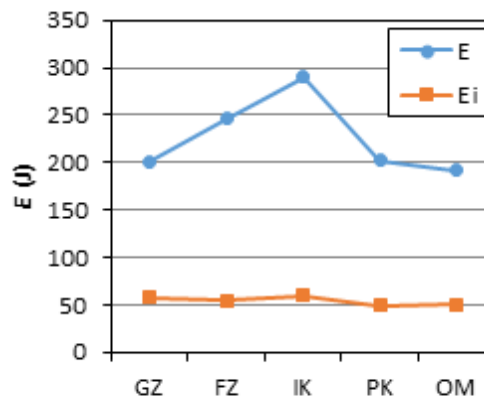
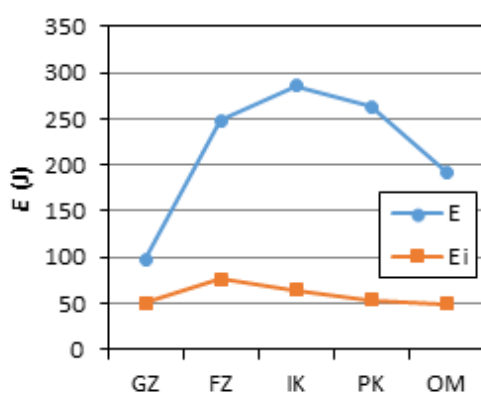
PK TVP	$T_{TO}$ (°C)	$t_{TO}$ (h)	$E$ (J)	$E_i$ (J)	$E_p$ (J)	$KV$ (J/cm <sup>2</sup> )	delež žil. loma (%)
0S	(-)	(-)	246,38	104,63	141,75	307,97	100
VS	760	0,5	262,80	53,96	208,84	328,50	100
US		1	219,58	59,54	160,04	274,48	100
SS		2	244,16	80,59	163,58	305,20	100
IS		4	272,03	58,88	213,15	340,03	100
TS		8	264,29	80,76	183,53	330,36	100
2S		780	0,5	201,74	49,56	152,18	252,18
3S	1		277,84	76,29	201,55	347,30	100
4S	2		277,28	65,41	211,86	346,60	100
5S	4		264,29	77,64	186,64	330,36	100
6S	8		306,09	82,21	223,88	382,61	100



Slika 45: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času TO za PK TVP

Tabela 16: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 0,5 ure

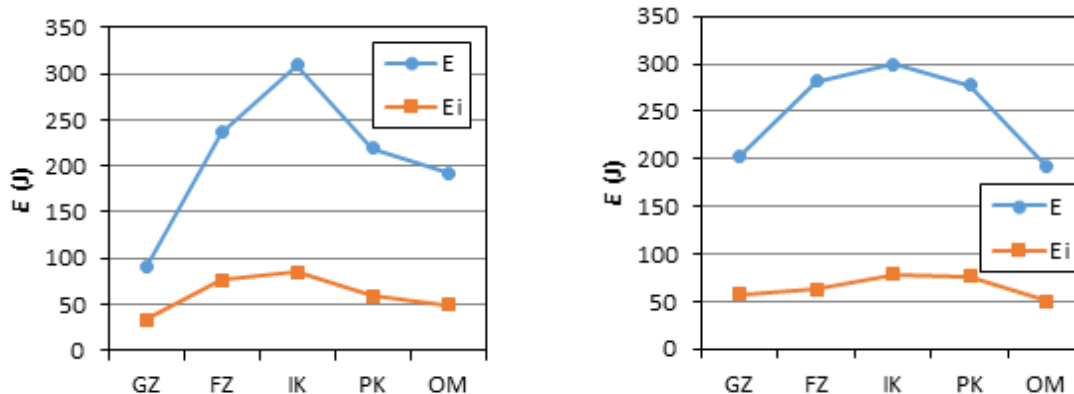
	TO (°C/H)	TVP	E (J)	E <sub>i</sub> (J)	E <sub>p</sub> (J)	KV (J/cm <sup>2</sup> )	delež žil. loma (%)
VE	760/0,5	GZ	98,00	50,42	47,58	122,50	14,3
VD		FZ	248,58	76,71	171,87	310,72	100
VT		IK	286,06	64,46	221,60	357,57	100
VS		PK	262,80	53,96	208,84	328,50	100
2E	780/0,5	GZ	200,87	57,85	143,02	251,09	100
2D		FZ	246,22	54,23	191,99	307,78	100
2T		IK	290,04	60,02	230,02	362,55	100
2S		PK	201,74	49,56	152,18	252,18	100
OM		OM	192,00	50,00	142,00	240,00	100



Slika 46: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 0,5 ure

Tabela 17: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 1 uro

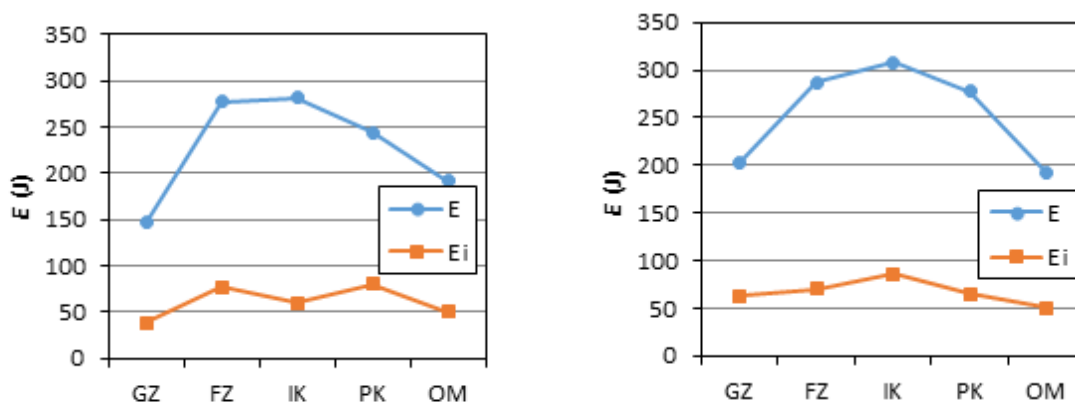
	TO (°C/H)	TVP	E (J)	E <sub>i</sub> (J)	E <sub>p</sub> (J)	KV (J/cm <sup>2</sup> )	delež žil. loma (%)
UE	760/1	GZ	90,63	33,30	57,33	113,29	46,11
UD		FZ	236,79	76,70	160,09	295,98	100
UT		IK	309,11	84,63	224,48	386,38	100
US		PK	219,58	59,54	160,04	274,48	100
3E	780/1	GZ	202,79	57,36	145,43	253,48	100
3D		FZ	281,44	62,82	218,63	351,80	100
3T		IK	299,83	79,19	220,64	374,79	100
3S		PK	277,84	76,29	201,55	347,30	100
OM	(-)	OM	192,00	50,00	142,00	240,00	100



Slika 47: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 1 uro

Tabela 18: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 2 ure

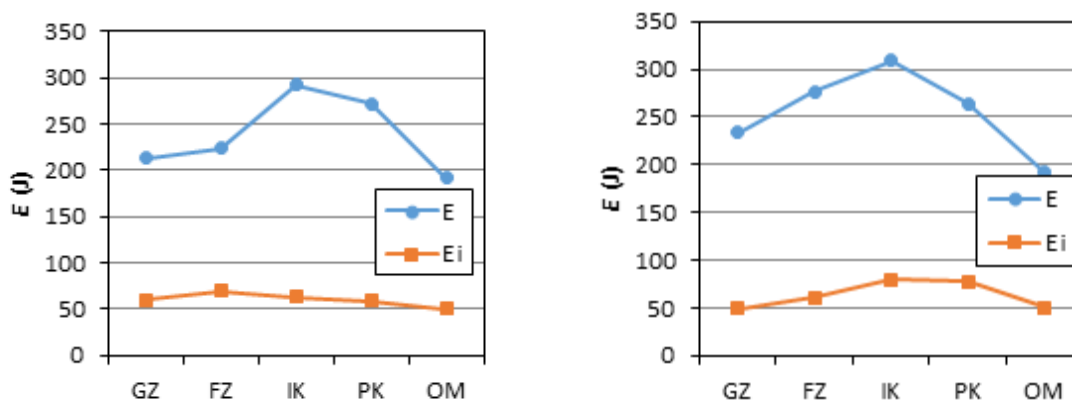
	TO (°C/H)	TVP	E (J)	E <sub>i</sub> (J)	E <sub>p</sub> (J)	KV (J/cm <sup>2</sup> )	delež žil. loma (%)
SE	760/2	GZ	146,46	38,49	107,98	183,08	100
SD		FZ	277,14	76,94	200,20	346,42	100
ST		IK	281,99	59,31	222,68	352,49	100
SS		PK	244,16	80,59	163,58	305,20	100
4E	780/2	GZ	203,48	63,03	140,45	254,35	100
4D		FZ	286,86	70,49	216,37	358,58	100
4T		IK	307,37	85,86	221,51	384,22	100
4S		PK	277,28	65,41	211,86	346,60	100
OM	(-)	OM	192,00	50,00	142,00	240,00	100



Slika 48: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 2 ure

Tabela 19: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 4 ure

	TO (°C/H)	TVP	E (J)	E <sub>i</sub> (J)	E <sub>p</sub> (J)	KV (J/cm <sup>2</sup> )	delež žil. loma (%)
IE	760/4	GZ	212,62	59,42	153,2	265,77	100
ID		FZ	223,95	69,81	154,14	279,93	100
IT		IK	292,12	63,46	228,66	365,15	100
IS		PK	272,03	58,88	213,15	340,03	100
5E	780/4	GZ	233,21	49,54	183,67	291,51	100
5D		FZ	276,29	60,64	215,65	345,37	100
5T		IK	308,53	79,39	229,14	385,66	100
5S		PK	264,29	77,64	186,64	330,36	100
OM	(-)	OM	192,00	50,00	142,00	240,00	100

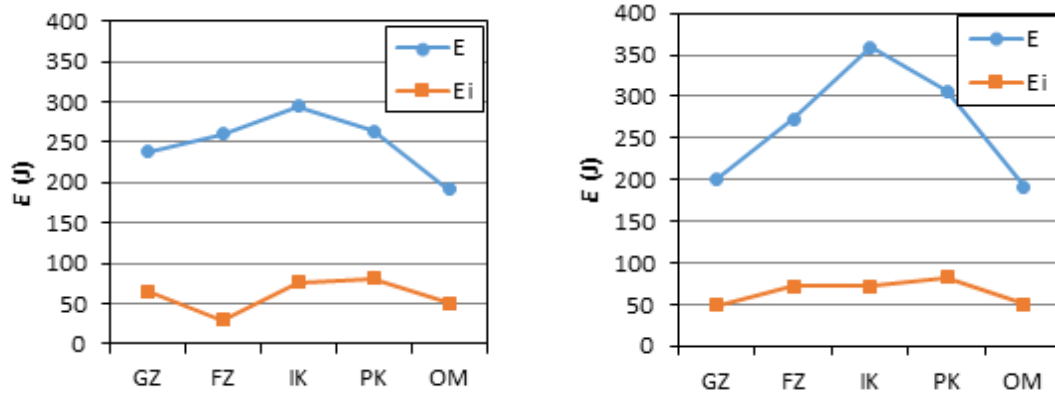


Slika 49: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 4 ure

Tabela 20: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 8 ur

	TO (°C/H)	TVP	E (J)	E <sub>i</sub> (J)	E <sub>p</sub> (J)	KV (J/cm <sup>2</sup> )	delež žil. loma (%)
TE	760/4	GZ	238,08	65,74	172,34	297,60	100
TD		FZ	259,80	29,98	229,82	324,75	100
TT		IK	294,82	75,75	219,07	368,52	100
TS		PK	264,29	80,76	183,53	330,36	100
6E	780/4	GZ	201,74	49,56	152,18	252,18	100
6D		FZ	273,31	72,45	200,86	341,64	100
6T		IK	358,47	71,70	286,77	448,09	100
6S		PK	306,09	82,21	223,88	382,61	100
OM	(-)	OM	192,00	50,00	142,00	240,00	100





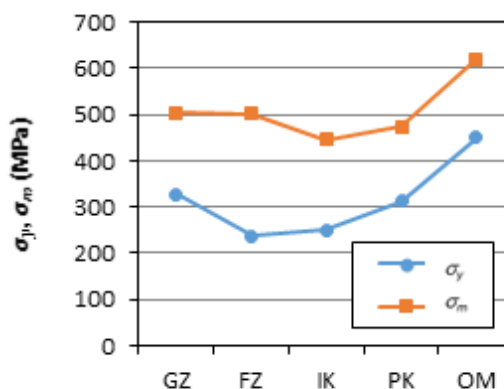
Slika 50: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 8 ur

### 4.2.3 Upogibna napetost tečenja in upogibna trdnost

Podatke iz diagramov sile v odvisnosti od časa smo združili in jih razvrstili glede na posamezno področje TVP, nato pa še glede na toplotno obdelavo. Med seboj smo primerjali diagrame za 760°C in 780°C. Upogibna trdnost je bila določena pri instrumentiranem Charpy preizkusu, pri katerem kladivo udari Charpy preizkušanelec s hitrostjo 5,23 m/s. Pri preizkusu je bila določena upogibna napetost tečenja ( $\sigma_{yB}$ ) in upogibna trdnost ( $\sigma_{mB}$ ).

Tabela 21: Primerjava upogibnih trdnosti po področjih TVP brez toplotne obdelave

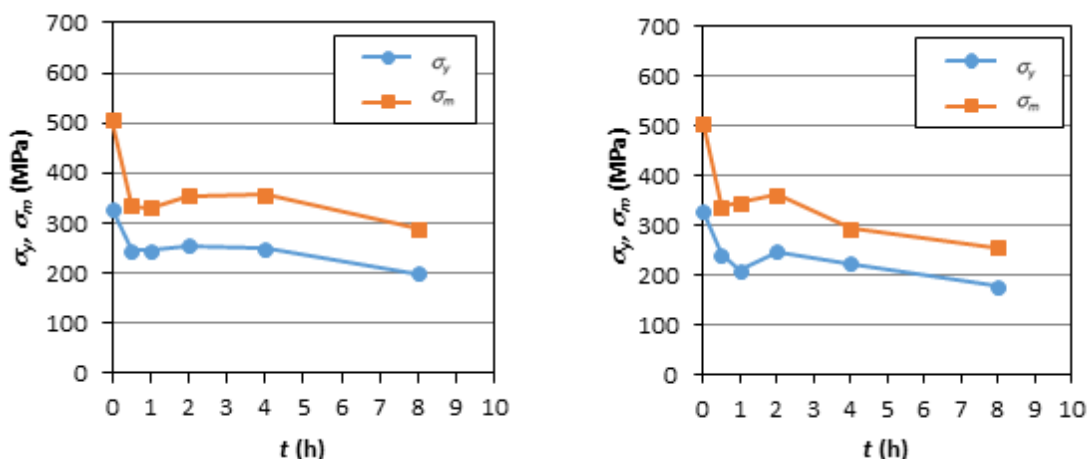
OM	TVP	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)
0E	GZ	328,83	505,08
0D	FZ	237,32	501,29
0T	IK	250,39	445,77
0S	PK	312,93	473,83
0M	OM	450,00	620,00



Slika 51: Primerjava upogibnih trdnosti po področjih TVP brez toplotne obdelave

Tabela 22: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO za GZ TVP

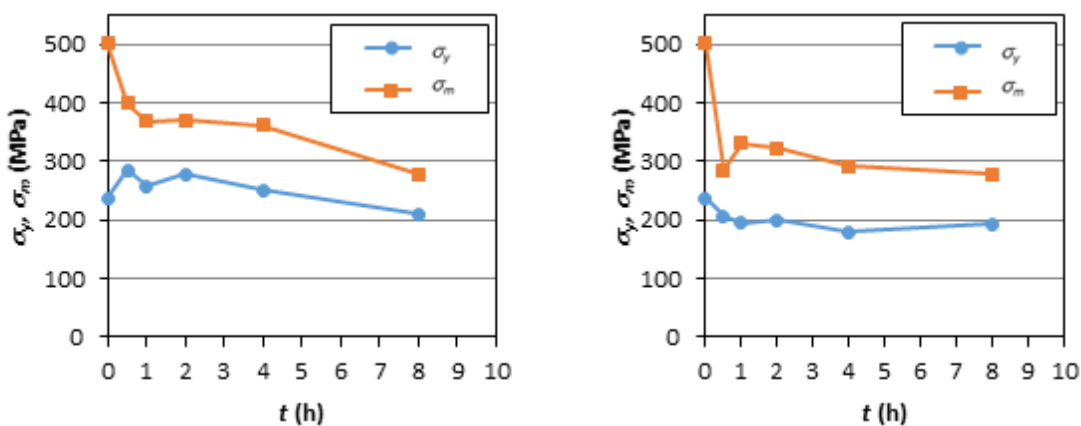
GZ TVP	$T_{TO}$ (°C)	$t_{TO}$ (h)	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)	GZ TVP	$T_{TO}$ (°C)	$t_{TO}$ (h)	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)
0E	760	0	328,83	505,08	0E	780	0	328,83	505,08
VE		0,5	245,09	334,81	2E		0,5	242,64	338,10
UE		1	245,38	330,91	3E		1	210,17	346,92
SE		2	254,86	355,18	4E		2	249,04	362,01
IE		4	249,00	356,56	5E		4	224,59	294,05
TE		8	199,44	288,21	6E		8	178,16	255,64



Slika 52: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO za GZ TVP

Tabela 23: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO za FZ TVP

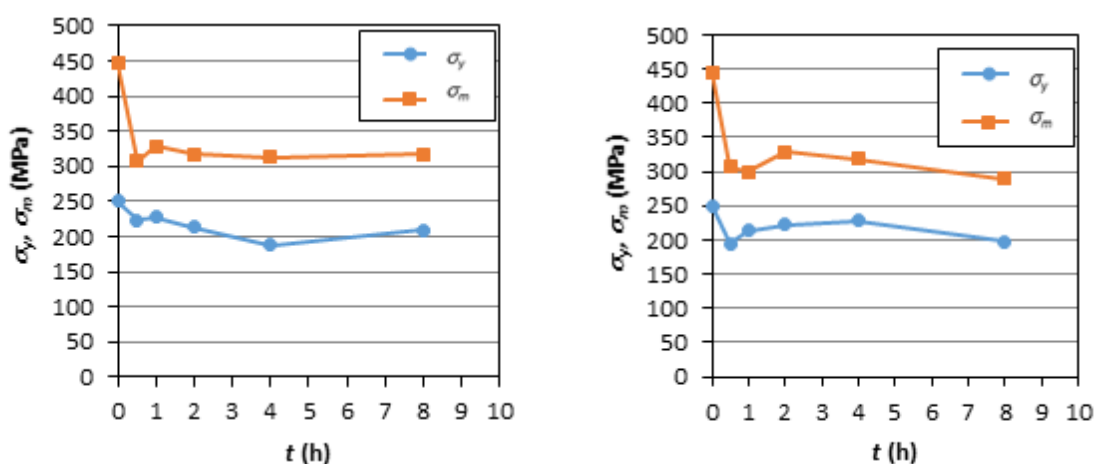
FZ TVP	$T_{TO}$ (°C)	$t_{TO}$ (h)	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)	FZ TVP	$T_{TO}$ (°C)	$t_{TO}$ (h)	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)
0D	760	0	237,32	501,29	0D	780	0	237,32	501,29
VD		0,5	284,59	399,66	2D		0,5	207,11	284,55
UD		1	257,64	369,23	3D		1	195,33	330,32
SD		2	278,74	369,70	4D		2	199,95	322,77
ID		4	250,79	361,09	5D		4	179,82	291,88
TD		8	210,72	277,55	6D		8	193,52	279,03



Slika 53: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO FZ TVP

Tabela 24: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO za MK TVP

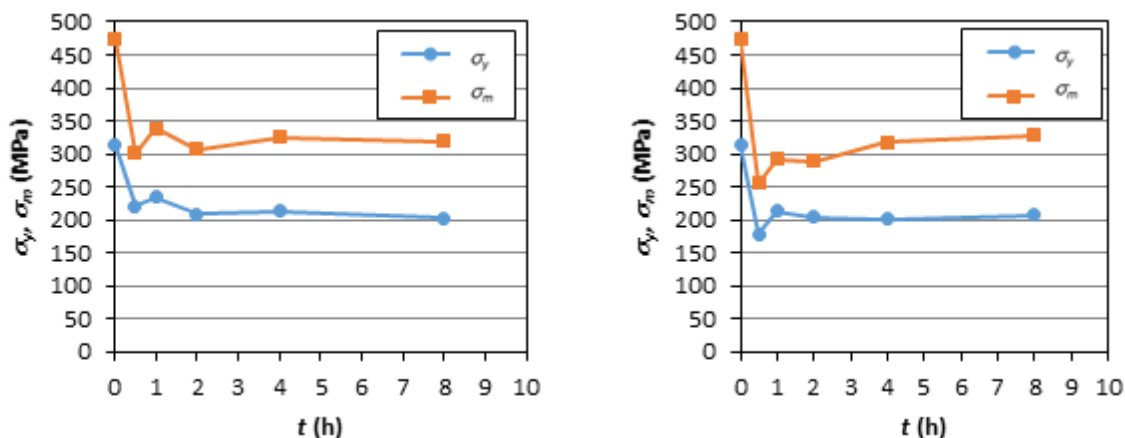
MK TVP	$T_{TO}$ (°C)	$t_{TO}$ (h)	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)	MK TVP	$T_{TO}$ (°C)	$t_{TO}$ (h)	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)
OT	760	0	250,39	445,77	OT	780	0	250,39	445,77
VT		0,5	223,83	306,94	2T		0,5	194,38	306,51
UT		1	226,94	328,83	3T		1	213,59	299,04
ST		2	213,40	317,26	4T		2	222,10	329,33
IT		4	187,09	312,84	5T		4	227,72	319,05
TT		8	208,86	316,59	6T		8	197,27	290,17



Slika 54: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO za MK TVP

Tabela 25: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO za PK TVP

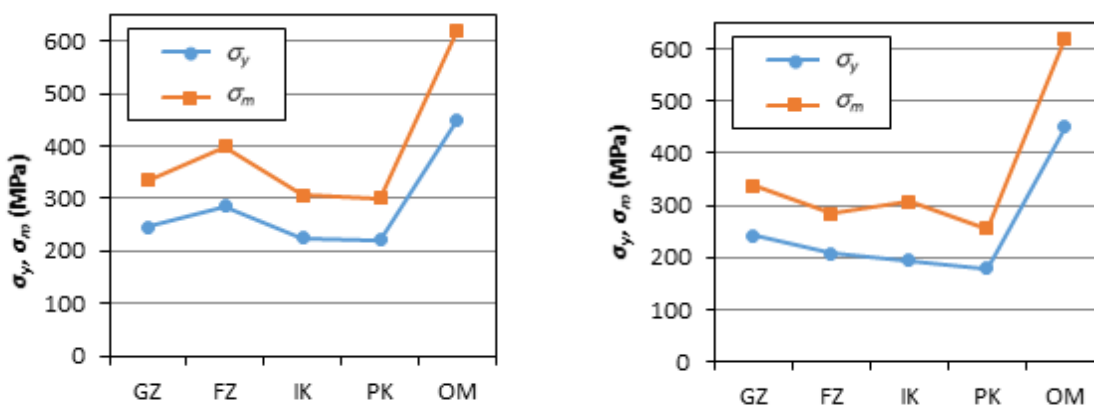
PK TVP	$T_{TO}$ (°C)	$t_{TO}$ (h)	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)	PK TVP	$T_{TO}$ (°C)	$t_{TO}$ (h)	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)
OS	760	0	312,93	473,83	OS	780	0	312,93	473,83
VS		0,5	221,02	300,61	2S		0,5	178,16	255,64
US		1	234,01	339,24	3S		1	213,83	292,45
SS		2	208,61	306,65	4S		2	204,62	289,16
IS		4	213,62	325,50	5S		4	201,48	317,14
TS		8	202,11	318,68	6S		8	207,22	328,12



Slika 55: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO za PK TVP

Tabela 26: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 0,5 ure

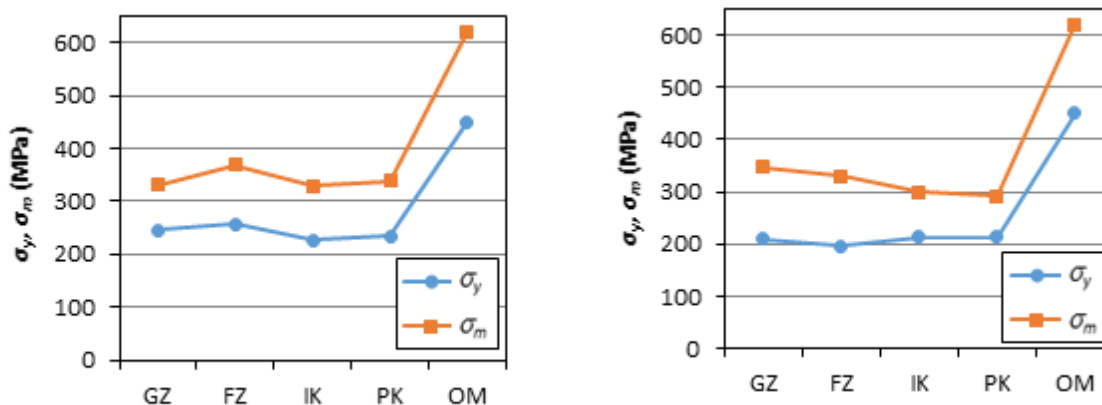
	TO (°C/H)	TVP	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)		TO (°C/H)	TVP	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)
OM	(-)	OM	450,00	620,00	OM	(-)	OM	450,00	620,00
VE	760/0,5	GZ	245,09	334,81	2E	780/0,5	GZ	242,64	338,10
VD		FZ	284,59	399,66	2D		FZ	207,11	284,55
VT		IK	223,83	306,94	2T		IK	194,38	306,51
VS		PK	221,02	300,61	2S		PK	178,16	255,64



Slika 56: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 0,5 ure

Tabela 27: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 1 uro

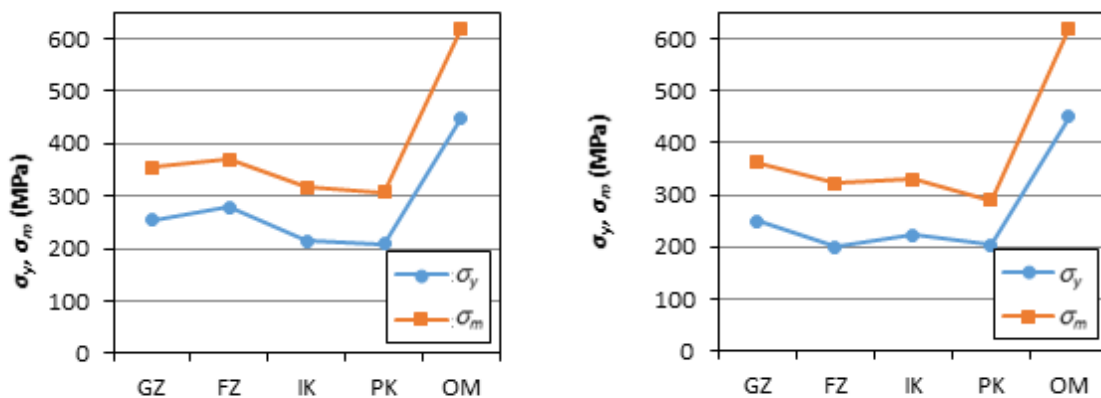
	TO (°C/H)	TVP	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)		TO (°C/H)	TVP	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)
OM	(-)	OM	450,00	620,00	OM	(-)	OM	450,00	620,00
UE	760/1	GZ	245,38	330,91	3E	780/1	GZ	210,17	346,92
UD		FZ	257,64	369,23	3D		FZ	195,33	330,32
UT		IK	226,94	328,83	3T		IK	213,59	299,04
US		PK	234,01	339,24	3S		PK	213,83	292,45



Slika 57: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 1 uro

Tabela 28: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 2 ure

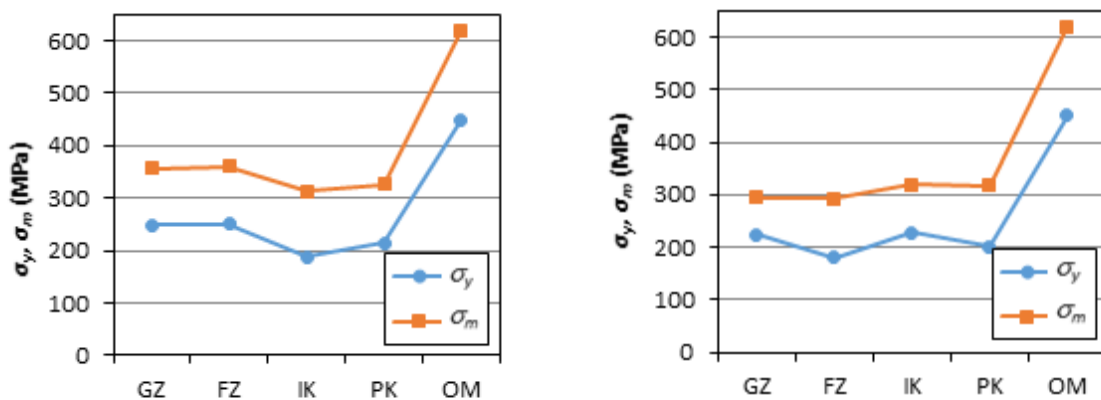
	TO (°C/H)	TVP	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)		TO (°C/H)	TVP	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)
OM	(-)	OM	450,00	620,00	OM	(-)	OM	450,00	620,00
SE	760/2	GZ	254,86	355,18	4E	780/2	GZ	249,04	362,01
SD		FZ	278,74	369,70	4D		FZ	199,95	322,77
ST		IK	213,40	317,26	4T		IK	222,10	329,33
SS		PK	208,61	306,65	4S		PK	204,62	289,16



Slika 58: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 2 ure

Tabela 29: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 4 ure

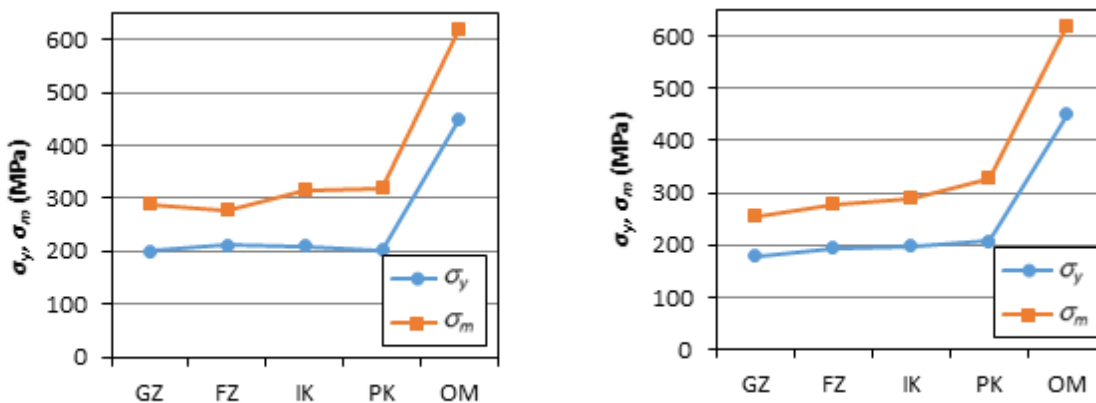
	TO (°C/H)	TVP	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)		TO (°C/H)	TVP	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)
OM	(-)	OM	450,00	620,00	OM	(-)	OM	450,00	620,00
IE	760/4	GZ	249,00	356,56	5E	780/4	GZ	224,59	294,05
ID		FZ	250,79	361,09	5D		FZ	179,82	291,88
IT		IK	187,09	312,84	5T		IK	227,72	319,05
IS		PK	213,62	325,5	5S		PK	201,48	317,14



Slika 59: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 4 ure

Tabela 30: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 8 ur

	TO (°C/H)	TVP	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)		TO (°C/H)	TVP	$\sigma_{yB}$ (MPa)	$\sigma_{mB}$ (MPa)
OM	(-)	OM	450,00	620,00	OM	(-)	OM	450,00	620,00
TE	760/4	GZ	199,44	288,21	6E	780/4	GZ	178,16	255,64
TD		FZ	210,72	277,55	6D		FZ	193,52	279,03
TT		IK	208,86	316,59	6T		IK	197,27	290,17
TS		PK	202,11	318,68	6S		PK	207,22	328,12

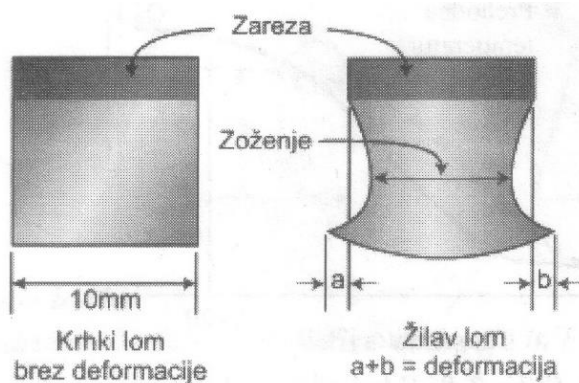


Slika 60: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 8 ur



#### 4.2.4 Razširitve prereza Charpy preizkušanca

Na prelomljenih Charpy preizkušancih smo izmerili karakteristične veličine, ki so v neki meri odvisne od same žilavosti materiala oziroma odstotka žilavega loma. Te veličine so bile zožitev prereza, razširitev prereza ter dolžina ustnic preizkušanca.



Slika 61: Deformacija Charpy preizkušanca [3]

Razširitve in zožitve prereza smo izmerili pod mikroskopom kot prikazuje zgornja slika. Podatke smo nato predstavili v tabelah in izrisali graf odvisnosti razširitev prereza glede na energijo. Podatke v tabelah smo ločili glede na toplotno obdelavo. Za boljšo preglednost smo uporabili logaritemsko skalo. Ugotovili smo da načeloma pri večji energiji pride do večjih razširitev, saj se material obnaša bolj žilavo. Vendar pa so bila ta odstopanja pri naših primerih dokaj majhna, tako da ni prišlo do bistveno večje razširitve prereza pri večjih energijah preloma.

Tabela 31: Razširitve prereza toplotno neobdelanih Charpy preizkušancev

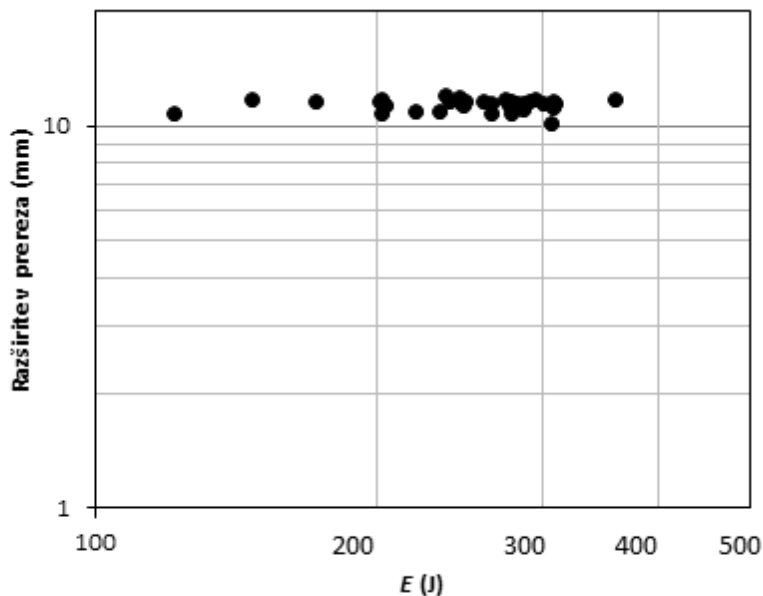
Oznaka	Vrsta TVP	Energija za lom (J)	Razširitev (mm)
OE	GZ TVP	72,70	10,26
OD	FZ TVP	120,95	10,53
OT	MK TVP	172,04	10,91
OS	PK TVP	246,38	11,60

Tabela 32: Razširitve prereza toplotno obdelanih Charpy preizkušancev na 760°C

Oznaka	Vrsta TVP	Energija za lom (J)	Razširitev (mm)
SE	GZ TVP	146,46	11,44
SD	FZ TVP	277,14	11,75
ST	MK TVP	277,14	11,61
SS	PK TVP	244,16	11,34
TE	GZ TVP	238,08	11,90
TD	FZ TVP	259,80	11,64
TT	MK TVP	294,82	11,71
TS	PK TVP	264,29	11,75
UE	GZ TVP	90,63	10,87
UD	FZ TVP	236,79	11,56
UT	MK TVP	309,11	12,02
US	PK TVP	219,58	11,47
VE	GZ TVP	98,00	11,03
VD	FZ TVP	248,58	10,89
VT	MK TVP	286,06	11,61
VS	PK TVP	262,80	11,11

Tabela 33: Razširitve prereza toplotno obdelanih Charpy preizkušancev na 780°C

Oznaka	Vrsta TVP	Energija za lom (J)	Razširitev (mm)
2D	FZ TVP	246,22	11,72
2T	MK TVP	290,04	11,46
2S	PK TVP	201,74	11,65
3E	GZ TVP	202,79	10,81
3D	FZ TVP	281,44	11,38
3T	MK TVP	299,83	11,48
3S	PK TVP	277,84	11,58
4E	GZ TVP	203,48	11,63
4D	FZ TVP	286,86	11,41
4T	MK TVP	307,37	11,58
4S	PK TVP	277,28	11,73
5E	GZ TVP	233,21	10,79
5D	FZ TVP	276,29	11,04
5T	MK TVP	308,53	11,57
5S	PK TVP	264,29	11,29
6E	GZ TVP	201,74	11,55
6D	FZ TVP	273,31	11,80
6T	MK TVP	358,47	11,87
6S	PK TVP	306,09	11,82



Slika 62: Razširitve prereza vseh Charpy preizkušancev

#### 4.2.5 Zožitve prereza Charpy preizkušanca

Zožitve prereza preizkušancev smo prav tako izmerili pod mikroskopom in jih razvrstili v tabelah. Ločili smo jih glede na toplotno obdelavo in sicer brez toplotne obdelave, toplotna obdelava na 760°C in toplotna obdelava na 780°C. Podatke smo predstavili tudi na diagramu z logaritemsko skalo in sicer zožitev v odvisnosti od energije, ki je potrebna za lom. Pri tej analizi smo ugotovili da se pri bolj žilavih materialih preizkušanelec bolj zoži, vendar pa je bila ta odvisnost zelo majhna v našem primeru.

Tabela 34: Zožitve prereza toplotno neobdelanih Charpy preizkušancev

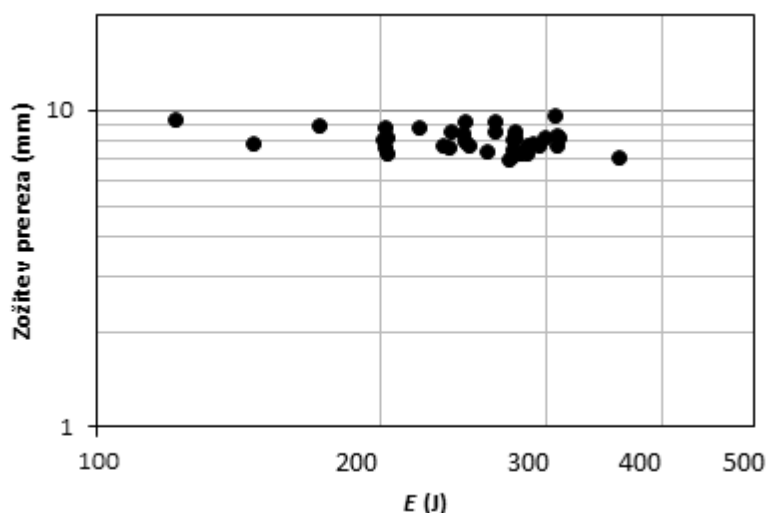
Oznaka	Vrsta TVP	Energija za lom (J)	Zožitev (mm)
OE	GZ TVP	72,70	9,65
OD	FZ TVP	120,95	9,85
OT	MK TVP	172,04	9,36
OS	PK TVP	246,38	8,99

Tabela 35: Zožitve prereza toplotno obdelanih Charpy preizkušancev na 760°C

Oznaka	Vrsta TVP	Energija za lom (J)	Zožitev (mm)
SE	GZ TVP	146,46	9,29
SD	FZ TVP	277,14	7,93
ST	MK TVP	277,14	7,61
SS	PK TVP	244,16	8,12
TE	GZ TVP	238,08	8,46
TD	FZ TVP	259,80	8,57
TT	MK TVP	294,82	7,50
TS	PK TVP	264,29	7,75
UE	GZ TVP	90,63	9,34
UD	FZ TVP	236,79	8,39
UT	MK TVP	309,11	7,73
US	PK TVP	219,58	8,27
VE	GZ TVP	98,00	8,86
VD	FZ TVP	248,58	8,28
VT	MK TVP	286,06	7,77
VS	PK TVP	262,80	7,82

Tabela 36: Zožitve prereza toplotno obdelanih Charpy preizkušancev na 780°C

Oznaka	Vrsta TVP	Energija za lom (J)	Zožitev (mm)
2D	FZ TVP	246,22	8,16
2T	MK TVP	290,04	8,04
2S	PK TVP	201,74	7,91
3E	GZ TVP	202,79	8,83
3D	FZ TVP	281,44	8,21
3T	MK TVP	299,83	7,33
3S	PK TVP	277,84	8,21
4E	GZ TVP	203,48	8,61
4D	FZ TVP	286,86	7,37
4T	MK TVP	307,37	7,33
4S	PK TVP	277,28	8,40
5E	GZ TVP	233,21	8,26
5D	FZ TVP	276,29	7,82
5T	MK TVP	308,53	7,25
5S	PK TVP	264,29	7,80
6E	GZ TVP	201,74	8,64
6D	FZ TVP	273,31	7,64
6T	MK TVP	358,47	7,04
6S	PK TVP	306,09	7,19



Slika 63: Zožitve prereza vseh Charpy preizkušancev

#### 4.2.6 Dolžina ustnic

Dolžino ustnic na prelomu smo izmerili ter jih analizirali s pomočjo tabele in diagrama. Predstavili smo povprečno dolžino ustnic posameznega preizkušanca in maksimalno dolžino. Po pričakovanjih bi napovedali, da pride pri bolj žilavih materialih do bolj žilavega obnašanja in s tem večjih ustnic pri prelomu preizkušanca. Te ugotovitve so se deloma pokazale, predvsem pri maksimalnih dolžinah ustnic, drugače pa so te spremembe majhne.

Tabela 37: Dolžina ustnic toplotno neobdelanih Charpy preizkušancev

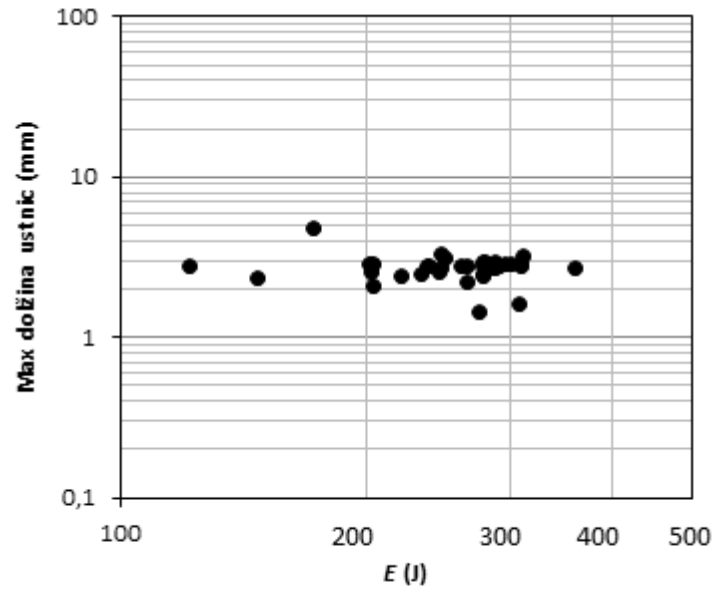
Oznaka	Vrsta TVP	Energija za lom (J)	Max.dolžina ustnic (mm)	Povprečna dolžina ustnic (mm)
OE	GZ TVP	72,70	1,64	1,06
OD	FZ TVP	120,95	2,50	2,30
OT	MK TVP	172,04	2,78	2,60
OS	PK TVP	246,38	4,88	2,81

Tabela 38: Dolžina ustnic toplotno obdelanih Charpy preizkušancev na 760°C

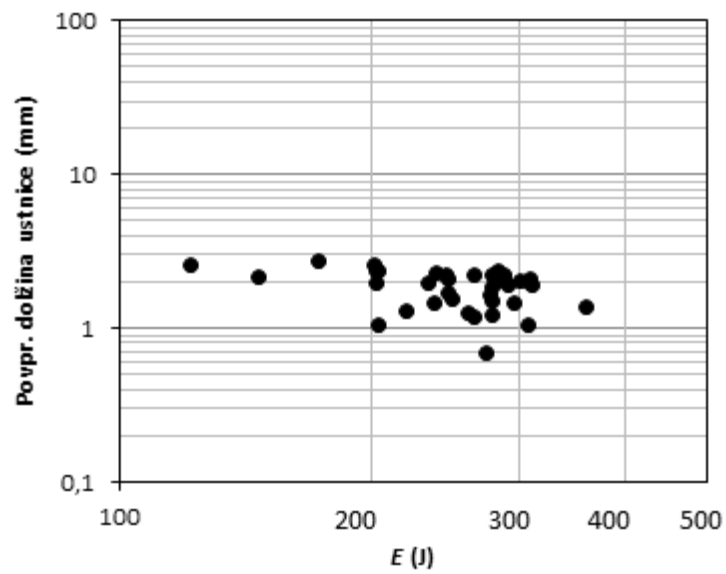
Oznaka	Vrsta TVP	Energija za lom (J)	Max.dolžina ustnic (mm)	Povprečna dolžina ustnic (mm)
SE	GZ TVP	146,46	3,36	2,14
SD	FZ TVP	277,14	2,34	2,17
ST	MK TVP	277,14	2,53	1,25
SS	PK TVP	244,16	2,47	1,88
TE	GZ TVP	238,08	2,60	2,23
TD	FZ TVP	259,80	2,81	2,34
TT	MK TVP	294,82	2,82	1,28
TS	PK TVP	264,29	2,93	1,49
UE	GZ TVP	90,63	2,25	1,22
UD	FZ TVP	236,79	2,69	2,26
UT	MK TVP	309,11	2,84	1,48
US	PK TVP	219,58	3,20	1,96
VE	GZ TVP	98,00	2,45	1,31
VD	FZ TVP	248,58	2,67	2,19
VT	MK TVP	286,06	3,14	1,55
VS	PK TVP	262,80	2,71	2,06

Tabela 39: Dolžina ustnic toplotno obdelanih Charpy preizkušancev na 780°C

Oznaka	Vrsta TVP	Energija za lom (J)	Max.dolžina ustnic (mm)	Povprečna dolžina ustnic (mm)
2D	FZ TVP	246,22	2,88	2,60
2T	MK TVP	290,04	2,77	1,70
2S	PK TVP	201,74	2,82	1,95
3E	GZ TVP	202,79	2,93	1,99
3D	FZ TVP	281,44	2,09	1,07
3T	MK TVP	299,83	2,70	2,41
3S	PK TVP	277,84	2,86	2,05
4E	GZ TVP	203,48	2,98	2,23
4D	FZ TVP	286,86	2,86	2,36
4T	MK TVP	307,37	2,99	2,26
4S	PK TVP	277,28	2,92	2,13
5E	GZ TVP	233,21	2,81	1,52
5D	FZ TVP	276,29	2,53	1,98
5T	MK TVP	308,53	3,02	1,67
5S	PK TVP	264,29	2,83	1,97
6E	GZ TVP	201,74	2,80	2,22
6D	FZ TVP	273,31	2,62	2,41
6T	MK TVP	358,47	1,44	0,71
6S	PK TVP	306,09	2,70	1,39



Slika 64: Maksimalne dolžine ustnic vseh Charpy preizkušancev



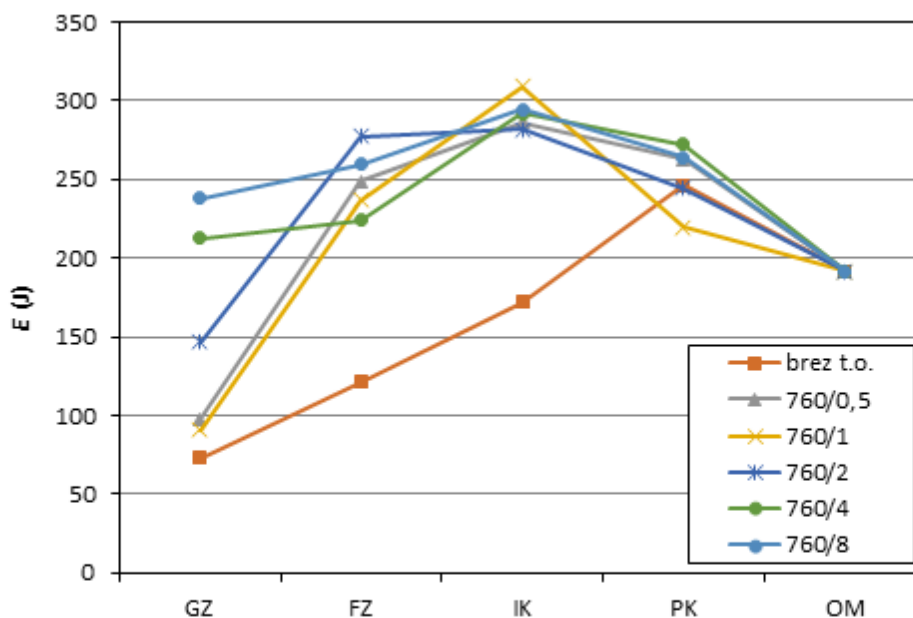
Slika 65: Povprečne dolžine ustnic vseh Charpy preizkušancev

## 5 DISKUSIJA

Diagrame energij potrebnih za lom in upogibne trdnosti smo med seboj združili za lažjo analizo in primerjavo med seboj. Tako smo predstavili posamezne toplotne obdelave glede na vrsto TVP in nato še na čas toplotne obdelave. Med seboj smo primerjali energije, ki so potrebne za prelom in dinamično upogibno trdnost preizkušancev.

### 5.1 Toplotna obdelava 760°C

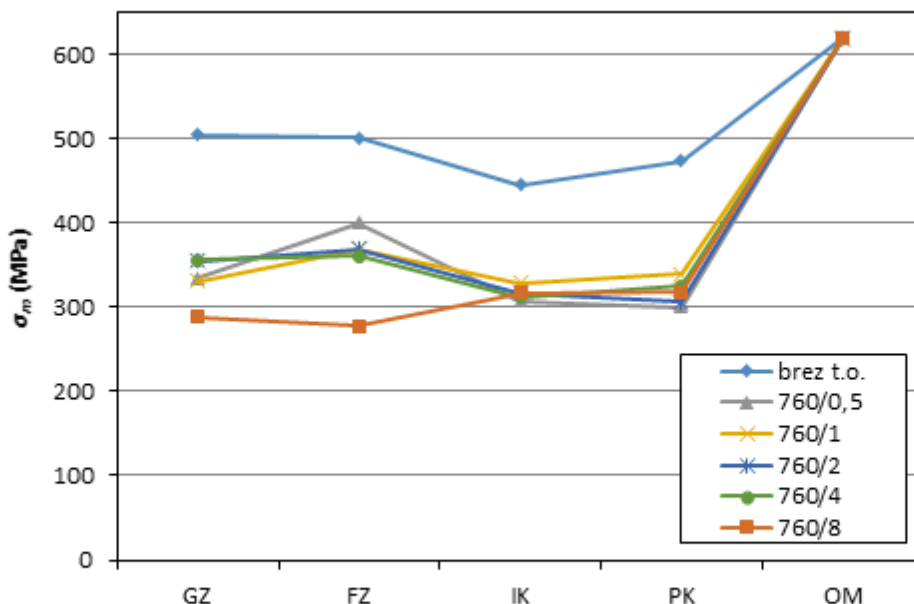
Med seboj smo primerjali različne čase toplotnih obdelav na 760°C in analizirali energijo potrebno za lom Charpy preizkušancev v posameznem področju TVP in za primerjavo dodali še osnovni material, ki ni toplotno obdelan. Ugotovili smo da se pri toplotni obdelavi na tej temperaturi poveša energija za lom na zadovoljivo raven po 4 urah obdelave in je nekako po velikosti enaka osnovnemu materialu. To je je razvidno predvsem iz grobo znatega dela TVP, kjer je pred obdelavo najmanjša energija za lom Charpy preizkušanca.



Slika 66: Energija loma glede na področje TVP za 760°C

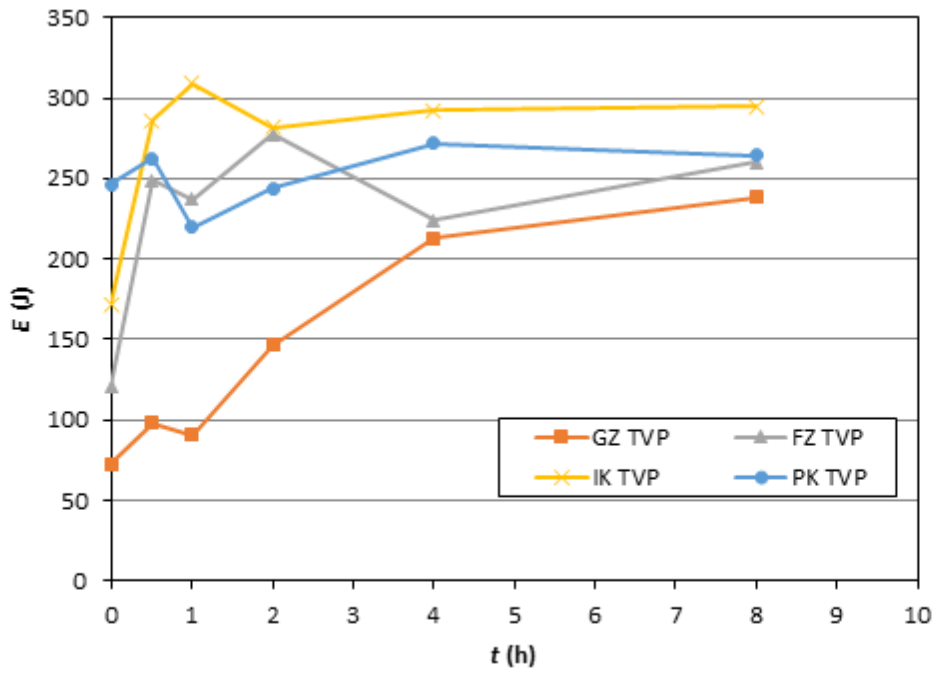


Toplotna obdelava vpliva tudi na zmanjšanje upogibne trdnosti, ki jo znižamo na nižjo vrednost. Vidimo, da se že pri najmanjšem času toplotne obdelave ta vrednost zmanjša. S tem ugotovimo, da se pozna razlika v upogibni trdnosti že po pol ure obdelave na tej temperaturi.

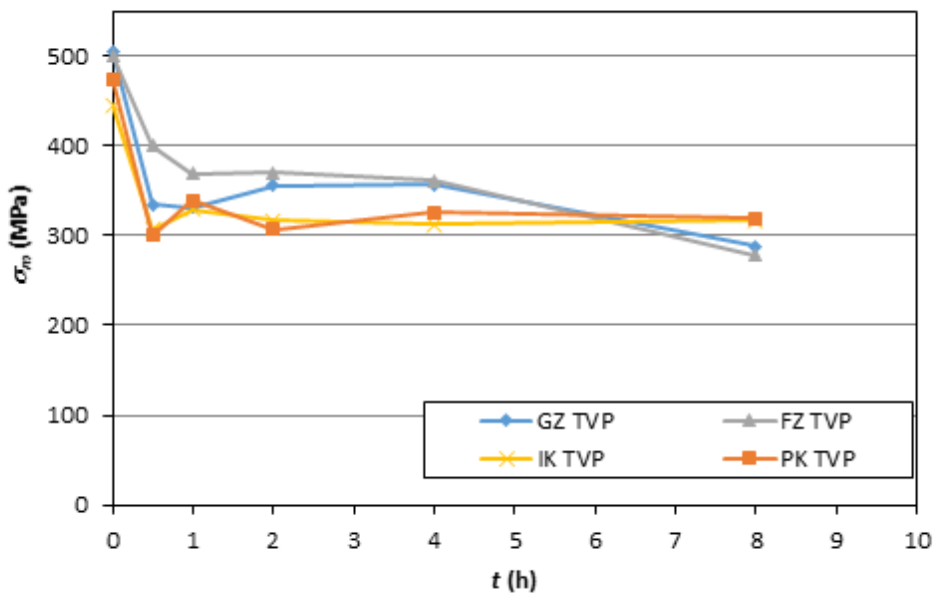


Slika 67: Upogibna trdnost glede na področje TVP za 760°C

Tudi pri primerjavi diagramov energije v odvisnosti od časa toplotne obdelave opazimo, da se energija za lom poveča na zadovoljivo raven po 4 urah toplotne obdelave. Upogibna trdnost materiala pa se prav tako zniža že po eni ali dveh urah toplotne obdelave. Ugotovili smo, da je primerna dolžina toplotne obdelave na 760°C 4 ure, saj s tem pridobimo željene spremembe tako na področju žilavosti kot upogibni trdnosti.



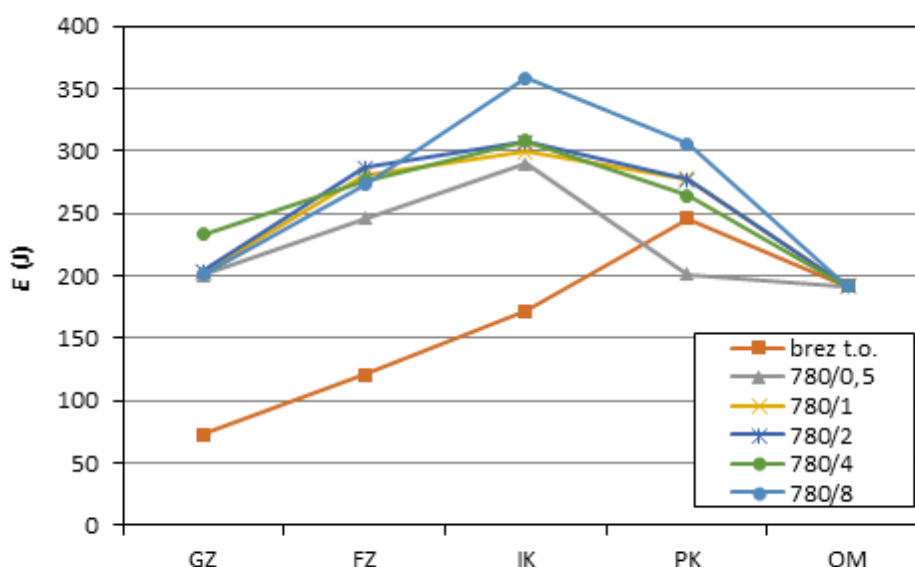
Slika 68: Energija loma glede na čas toplotne obdelave za 760°C



Slika 69: Upogibna trdnost glede na čas toplotne obdelave za 760°C

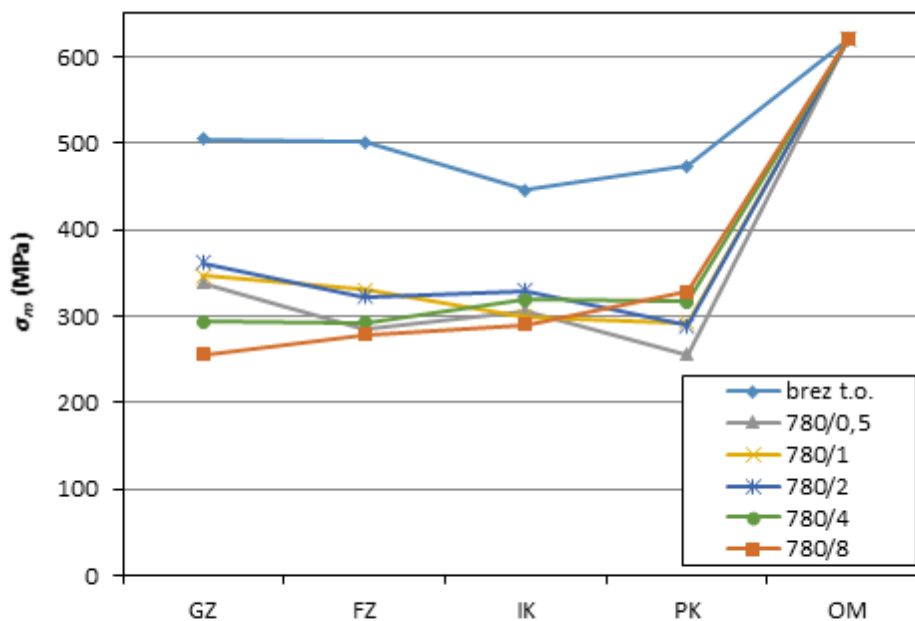
## 5.2 Toplotna obdelava 780°C

Pri toplotni obdelavi na 780°C se pojavi vidna sprememba energije za lom že po pol urni toplotni obdelavi. Vrednosti energije se dvignejo bistveno v grobo zrnatem področju TVP in dobimo zadovoljive vrednosti primerljive z osnovnim materialom. Vidimo da pri daljši toplotni obdelavi ne pride do bistvenih sprememb pri povečanju energije za lom. Tako tudi ni smiselno toplotno obdelovati dlje, saj s tem ne pridobimo bistveno na lastnostih materiala, povečajo pa se stroški.



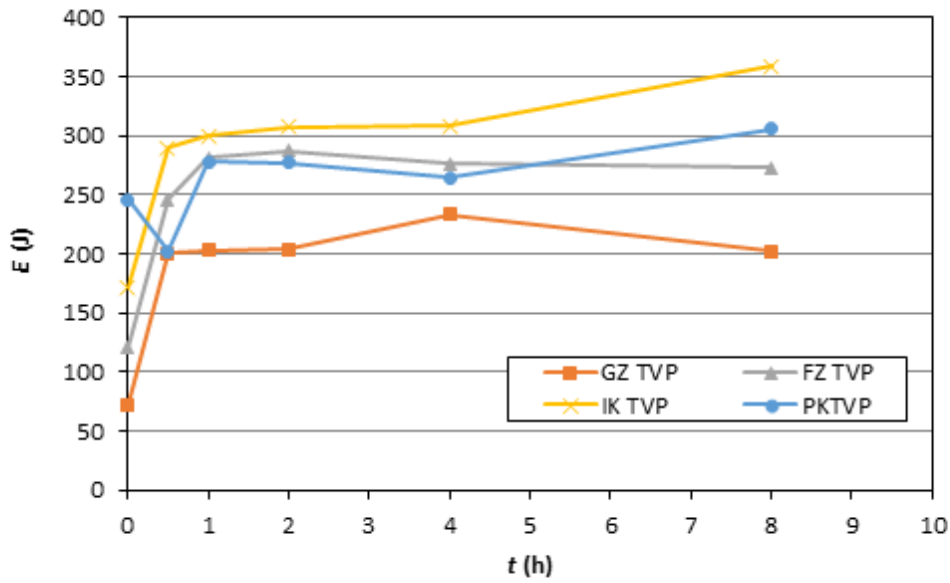
Slika 70: Energija loma glede na področje TVP za 780°C

Tudi pri diagramu upogibnih trdnosti vidimo da se le ta bistveno zmanjša že po polurni obdelavi na tej temperaturi. Tako je smiselno da se na temperaturi 780°C toplotno obdeluje pol ure, saj se s tem dosežejo željene spremembe v lastnostih materiala, daljši čas toplotno obdelana pa bi bil vprašljiv iz ekonomskega vidika, saj bi s tem le povečali stroške, ne bi pa pridobili bistveno na samih lastnostih materiala.

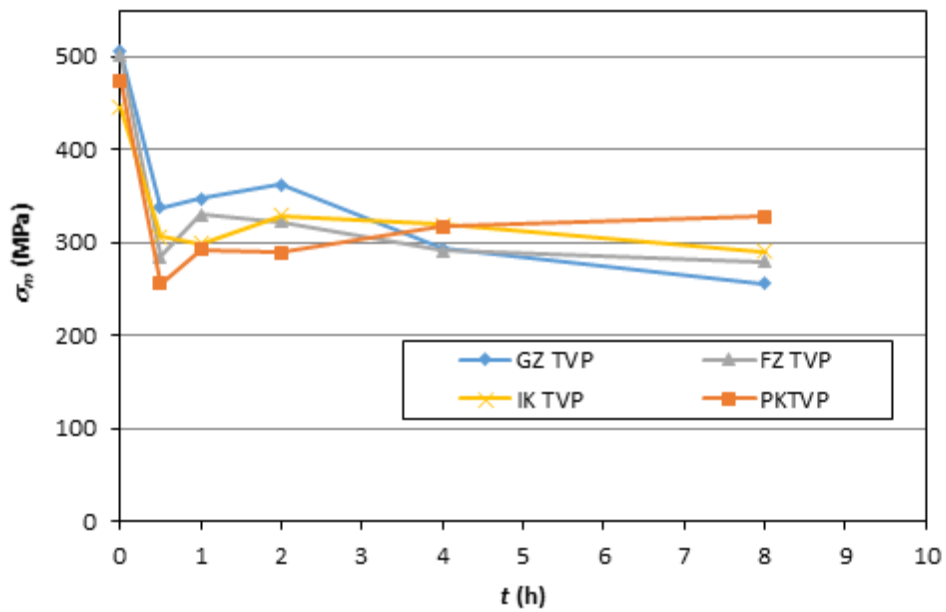


Slika 71: Trdnost glede na področje TVP za 780°C

Pri diagramih energije in upogibnih trdnosti po času toplotne obdelave tudi vidimo, da se spremembe pokažejo že po pol ure toplotne obdelave na tej temperaturi. Tako da ugotovimo da je to primeren čas za na 780°C. In če primerjamo toplotno obdelavo na različnih temperaturah in čase, ki so potrebni za doseg željenih rezultatov ugotovimo da je temperatura 780°C bolj smiselna iz ekonomskega vidika, saj prihranimo na času toplotne obdelave in s tem tudi na stroških.



Slika 72: Energija loma glede na čas toplotne obdelave za 780°C



Slika 73: Upogibna trdnost glede na čas toplotne obdelave za 780°C

## 6 SKLEP

V tej magistrski nalogi smo obravnavali vpliv toplotno obdelavo TVP na udarno žilavost pri jeklu P91. Analizirali smo toplotno obdelavo na temperaturah 760°C in 780°C in ugotavljali ustrezen čas in temperaturo toplotne obdelave. Namreč že majhna sprememba temperature toplotne obdelave zvarjencev močno vpliva na njegove lastnosti.

Najprej smo simulirali željena področja TVP. Iz simulacije varjenja smo dobili diagrame varilnega cikla in dilatacijske krivulje, ki so nam služile za določitev temperatur faznih premen. Nato smo preizkušance toplotno obdelovali na določeni temperaturi. Pri vsaki temperaturi smo imeli več časov toplotne obdelave in sicer: 0,5, 1, 2, 4, 8 ur. Preizkušance smo nato preizkušali z instrumentiranim Charpy preizkusom. Pri tem smo dobili potrebne podatke, ki smo jih izvozili za določitev lastnosti materiala. Pridobili smo ustrezne podatke o vrsti loma ter žilavosti materiala. Prav tako smo dobili podatke o upogibni trdnosti materiala.

Na podlagi teh podatkov in diagramov smo izrisali diagrame za analizo. Med seboj smo primerjali različne čase toplotne obdelave in različna področja TVP. Videli smo, da se pojavijo bistvene razlike med različnimi področji TVP in različnimi časi toplotne obdelave v žilavosti in upogibni trdnosti materiala. Velikost temperature odločilno vpliva na sam čas toplotne obdelave. Višja kot je temperatura, prej dosežemo željene spremembe v lastnostih materiala. Primerjali smo temperature 760°C in 780°C in ugotovili da rabimo za 760°C najmanj 4 ure toplotne obdelave, medtem ko pri 780°C samo pol ure, da dosežemo željene učinke.

Tako lahko rečemo, da je za toplotno obdelavo takšnega jekla bolj primerna temperatura 780°C in čas 0,5 ure, saj tako prihranimo na času in stroških, ki so s tem povezani. Dobimo željene izboljšave žilavosti materiala, ki se ustrezno poveča, zmanjša pa se upogibna trdnost materiala. Vidimo da že 20°C pomeni bistveno krajši čas toplotne obdelave. Potrebno je tudi paziti na trdote materiala, ki jih moramo s toplotno obdelavo ustrezno zmanjšati, vendar pa se s trdotam v tem magistrskem delu ni smo posebej ukvarjali, saj je bil poudarek na udarni žilavosti toplotno vplivanega področja zvara.

## 7 VIRI IN LITERATURA

- [1] Rak I. Tehnologija varjenja. Ljubljana: Modrijan, 2008
- [2] Gliha V. Fizikalno-metalurške osnove varjenja: učbenik. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2007
- [3] Gliha V., Pučko B., Vuherer T. Vaje iz varilne tehnologije: navodila za vaje. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2007
- [4] Gliha V., Pučko B., Vuherer T. Vaje iz varilne tehnike: navodila za vaje. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2007
- [5] Grdun V., Godec B. Neugodne mikrostrukturne sestavine v zvarnih spojih konstrukcijskih jekel. materiali in tehnologije
- [6] Gliha V., Pučko B. Postopki spajanja: skripta. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2006
- [7] Kraut B. Krautov strojniški priročnik, 15. Slovenska izdaja. Ljubljana: Littera picta, 2011
- [8] Zupanič F., Anžel I. Gradiva. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2007
- [9] Charpy impact test, [svetovni splet], dostopno na [www:http://en.wikipedia.org/](http://en.wikipedia.org/) [15.5.2015]
- [10] Creep (Deformation), [svetovni splet], dostopno na [www:http://en.wikipedia.org/](http://en.wikipedia.org/) [15.5.2015]
- [11] Annealing\_(metallurgy) [svetovni splet], dostopno na [https://en.wikipedia.org/wiki/Annealing\\_\(metallurgy\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Annealing_(metallurgy)) [20.6.2015]
- [12] Milović L. Integritete i vek konstrukcija: Vol. 8, br I, str. 55-64, 2008
- [13] Krivulja lezenja, [svetovni splet], dostopno na [http://fs-server.uni-mb.si/si/inst/itm/lm/GRADIVA\\_UC/Mehanski\\_preskusi/trajni\\_mirujoi\\_preskus.html](http://fs-server.uni-mb.si/si/inst/itm/lm/GRADIVA_UC/Mehanski_preskusi/trajni_mirujoi_preskus.html) [25.6.2015]
- [14] Hydrogen cracks in steel, [svetovni splet], dostopno na <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/defects-hydrogen-cracks-in-steels-identification-045/> [10.5.2015]
- [15] Vuherer T. Razvoj jekel in varivnost jekel za termoelektrarne, predstavitev za predavanje

[16] Fekonja, Luka. Vpliv nezadostne in prevelike toplotne obdelave TVP na udarno žilavost na jekla za povišane temperature: diplomsko delo. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2014

[17] Materials and Processes, [svetovni splet], dostopno na [https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/cc\\_mat\\_index.htm](https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/cc_mat_index.htm) [10.7.2015]

[17] Impact testing, [svetovni splet], dostopno na <http://www.labtesting.com/services/materials-testing/mechanical-testing/impact-testing/> [10.7.2015]

[18] Charpy impact test, [svetovni splet], dostopno na <http://www.wmtr.com/en.charpy.html> [12.7.2015]

[18] Heat treating, [svetovni splet], dostopno na <http://www.metlabheattreat.com/index.html> [15.7.2015]



## 8 PRILOGE

### KAZALO SLIK:

Slika 1: Primerjava debelin cevi [12].....	- 4 -
Slika 2: CCT diagram jekla P91 [15] .....	- 5 -
Slika 3: Priporočila za varjenje jekla P91 [15] .....	- 6 -
Slika 4: Vodikova hladna pokljivost [14] .....	- 7 -
Slika 5: Krivulja lezenja [13].....	- 8 -
Slika 6: Področja TVP in žilavosti [5].....	- 10 -
Slika 7: Primer diagrama toplotne obdelave .....	- 11 -
Slika 8: Charpy kladivo [3] .....	- 12 -
Slika 9: Primer dilatacijske krivulje [3].....	- 16 -
Slika 10: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za GZ TVP .....	- 17 -
Slika 11: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za FZ TVP.....	- 17 -
Slika 12: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za MK TVP .....	- 18 -
Slika 13: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za PK TVP .....	- 18 -
Slika 14: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za GZ TVP .....	- 19 -
Slika 15: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za FZ TVP.....	- 19 -
Slika 16: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za MK TVP .....	- 20 -
Slika 17: Primer varilnega cikla in dilatacijske krivulje za PK TVP .....	- 20 -
Slika 18: Diagram toplotne obdelave po varjenju 760°C/0,5h .....	- 22 -
Slika 19: Diagram toplotne obdelave po varjenju 760°C/1h .....	- 22 -
Slika 20: Diagram toplotne obdelave po varjenju 760°C/2h .....	- 23 -
Slika 21: Diagram toplotne obdelave po varjenju 760°C/4h .....	- 23 -
Slika 22: Diagram toplotne obdelave po varjenju 760°C/8h .....	- 23 -
Slika 23: Diagram toplotne obdelave po varjenju 780°C/0,5h .....	- 24 -
Slika 24: Diagram toplotne obdelave po varjenju 780°C/1h .....	- 24 -
Slika 25: Diagram toplotne obdelave po varjenju 780°C/2h .....	- 24 -
Slika 26: Diagram toplotne obdelave po varjenju 780°C/4h .....	- 25 -
Slika 27: Diagram toplotne obdelave po varjenju 780°C/8h .....	- 25 -
Slika 28: Charpy preizkušane [3].....	- 26 -
Slika 29: Diagram temperatur faznih premen .....	- 29 -
Slika 30: Diagram Charpy preizkusa [3] .....	- 30 -
Slika 31: Primer bolj krhkega loma.....	- 31 -
Slika 32: Primer bolj žilavega loma.....	- 31 -
Slika 33: Rezultati Charpy preizkusa – vzorec OE.....	- 32 -
Slika 34: Rezultati Charpy preizkusa – vzorec OD.....	- 33 -
Slika 35: Rezultati Charpy preizkusa – vzorec OT.....	- 34 -
Slika 36: Rezultati Charpy preizkusa – vzorec OS.....	- 35 -
Slika 37: Rezultati Charpy preizkusa – vzorec VE.....	- 36 -
Slika 38: Rezultati Charpy preizkusa – vzorec VD.....	- 37 -
Slika 39: Rezultati Charpy preizkusa – vzorec VT.....	- 38 -
Slika 40: Rezultati Charpy preizkusa – vzorec VS.....	- 39 -
Slika 41: Primerjava energije za lom po področjih TVP brez toplotne obdelave .....	- 40 -
Slika 42: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času TO za GZ TVP .....	- 41 -
Slika 43: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času TO za FZ TVP.....	- 42 -

Slika 44: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času TO za MK TVP .....	- 42 -
Slika 45: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času TO za PK TVP .....	- 43 -
Slika 46: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 0,5 ure .....	- 44 -
Slika 47: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 1 uro .....	- 45 -
Slika 48: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 2 ure .....	- 45 -
Slika 49: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 4 ure .....	- 46 -
Slika 50: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 8 ur .....	- 47 -
Slika 51: Primerjava upogibnih trdnosti po področjih TVP brez toplotne obdelave .....	- 48 -
Slika 52: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO za GZ TVP .....	- 49 -
Slika 53: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO FZ TVP .....	- 49 -
Slika 54: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO za MK TVP .....	- 50 -
Slika 55: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO za PK TVP .....	- 51 -
Slika 56: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 0,5 ure .....	- 51 -
Slika 57: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 1 uro .....	- 52 -
Slika 58: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 2 ure .....	- 53 -
Slika 59: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 4 ure .....	- 53 -
Slika 60: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 8 ur .....	- 54 -
Slika 61: Deformacija Charpy preizkušanca [3] .....	- 55 -
Slika 62: Razširitve prereza vseh Charpy preizkušancev .....	- 57 -
Slika 63: Zožitve prereza vseh Charpy preizkušancev .....	- 59 -
Slika 64: Maksimalne dolžine ustnic vseh Charpy preizkušancev .....	- 61 -
Slika 65: Povprečne dolžine ustnic vseh Charpy preizkušancev .....	- 61 -
Slika 66: Energija loma glede na področje TVP za 760°C .....	- 62 -
Slika 67: Upogibna trdnost glede na področje TVP za 760°C .....	- 63 -
Slika 68: Energija loma glede na čas toplotne obdelave za 760°C .....	- 64 -
Slika 69: Upogibna trdnost glede na čas toplotne obdelave za 760°C .....	- 64 -
Slika 70: Energija loma glede na področje TVP za 780°C .....	- 65 -
Slika 71: Trdnost glede na področje TVP za 780°C .....	- 66 -
Slika 72: Energija loma glede na čas toplotne obdelave za 780°C .....	- 67 -
Slika 73: Upogibna trdnost glede na čas toplotne obdelave za 780°C .....	- 67 -

**KAZALO TABEL:**

Tabela 1: Kemična sestava jekla P91 (masni %)	- 4 -
Tabela 2: Mehanske lastnosti jekla P91	- 4 -
Tabela 3: Serija preizkušancev brez toplotne obdelave	- 14 -
Tabela 4: Serija preizkušancev s toplotno obdelavo na 760°C	- 14 -
Tabela 5: Serija preizkušancev s toplotno obdelavo na 780°C	- 15 -
Tabela 6: Temperature za GZ TVP	- 27 -
Tabela 7: Temperature za FZ TVP	- 28 -
Tabela 8: Temperature za MK TVP	- 28 -
Tabela 9: Temperature za PK TVP	- 28 -
Tabela 10: Povprečne temperature faznih premen	- 29 -
Tabela 11: Primerjava energije za lom po področjih TVP brez toplotne obdelave	- 40 -
Tabela 12: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času TO za GZ TVP	- 41 -
Tabela 13: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času TO za FZ TVP	- 41 -
Tabela 14: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času TO za MK TVP	- 42 -
Tabela 15: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po času TO za PK TVP	- 43 -
Tabela 16: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 0,5 ure	- 44 -
Tabela 17: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 1 uro	- 44 -
Tabela 18: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 2 ure	- 45 -
Tabela 19: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 4 ure	- 46 -
Tabela 20: Primerjava energije za lom 760°C/780°C po področju TVP za 8 ur	- 46 -
Tabela 21: Primerjava upogibnih trdnosti po področjih TVP brez toplotne obdelave	- 48 -
Tabela 22: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO za GZ TVP	- 48 -
Tabela 23: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO za FZ TVP	- 49 -
Tabela 24: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO za MK TVP	- 50 -
Tabela 25: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po času TO za PK TVP	- 50 -
Tabela 26: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 0,5 ure	- 51 -
Tabela 27: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 1 uro	- 52 -
Tabela 28: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 2 ure	- 52 -
Tabela 29: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 4 ure	- 53 -
Tabela 30: Primerjava upogibnih trdnosti 760°C/780°C po področju TVP za 8 ur	- 54 -
Tabela 31: Razširitve prereza toplotno neobdelanih Charpy preizkušancev	- 55 -
Tabela 32: Razširitve prereza toplotno obdelanih Charpy preizkušancev na 760°C	- 56 -
Tabela 33: Razširitve prereza toplotno obdelanih Charpy preizkušancev na 780°C	- 56 -
Tabela 34: Zožitve prereza toplotno neobdelanih Charpy preizkušancev	- 57 -
Tabela 35: Zožitve prereza toplotno obdelanih Charpy preizkušancev na 760°C	- 58 -
Tabela 36: Zožitve prereza toplotno obdelanih Charpy preizkušancev na 780°C	- 58 -
Tabela 37: Dolžina ustnic toplotno neobdelanih Charpy preizkušancev	- 59 -
Tabela 38: Dolžina ustnic toplotno obdelanih Charpy preizkušancev na 760°C	- 60 -
Tabela 39: Dolžina ustnic toplotno obdelanih Charpy preizkušancev na 780°C	- 60 -

**ŽIVLJENJEPIS****OSEBNI PODATKI**

Ime in priimek: Marko Pesko  
Datum rojstva: 14.12.1989  
Državljanstvo: Slovensko

**IZOBRAŽEVANJE**

2004-2008: Gimnazija Celje Center  
2008-2012: Univerza v Mariboru; Fakulteta za Gradbeništvo  
Program: Gradbeništvo UN  
Naziv: Diplomirani inženir gradbeništva UN  
2012-2015: Univerza v Mariboru; Fakulteta za Strojništvo  
Program: Strojništvo MAG  
Naziv: Magister inženir strojništva

**DELOVNE IZKUŠNJE**

Študentsko delo (2008-2015): Airtech d.o.o.  
Bial d.o.o.  
Hetit d.o.o.  
Herrenknecht AG

UNIVERZA V MARIBORU  
FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO

**IZJAVA MAGISTRSKEGA KANDIDATA**

Podpisani **MARKO PESKO** vpisna številka S2002198

**izjavljam,**

da je magistrsko delo z naslovom:

**VPLIV TOPLOTNE OBDELAVE TVP NA UDARNO ŽILAVOST NA JEKLU P91**

- rezultat lastnega raziskovalnega dela,
- da predloženo delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe po študijskem programu druge fakultete ali univerze,
- da so rezultati korektno navedeni in
- da nisem kršil-a avtorskih pravic in intelektualne lastnine drugih.

Maribor, \_\_\_\_\_

Podpis: \_\_\_\_\_