

IZOTERMALNO POBOLJŠANI NODULARNI LIV

AUSTEMPERED DUCTILE IRON

Hasan Avdušinović¹
 Šehzudin Dervišić²
 Almajda Gigović-Gekić¹

¹Fakultet za metalurgiju i materijale, Univerzitet u Zenici

²Pobjeda Tešanj d.d. – Livnica Turbe

Ključne riječi:
 nodularni liv, termička obrada, ausferit

Keywords:
 Ductile Iron, Heat Treatment, Ausferrite

Paper received:
 03.10.2016.

Paper accepted:
 09.12.2016.

Originalni naučni rad

REZIME

Izotermalno poboljšani nodularni liv je klasa nodularnog liva koji se dobije kao rezultat specifičnog postupka termičke obrade (austenitizacija i izotermalno poboljšanje). Rezultat ovog postupka termičke obrade su izvrsne vrijednosti mehaničkih svojstava sa naglaskom na povoljan odnos zatezne čvrstoće i težine proizvoda. Međutim, konstruktori u većini slučajeva nisu upoznati sa prednostima ovog materijala i mogućnosti uspješnog poređenja sa drugim vrstama metalnih materijala (čelici, aluminij i dr.). Visoka vrijednost zatezne čvrstoće izotermalno poboljšanog nodularnog liva je rezultat specifične ausferitne mikrostrukture. U ovom radu je predstavljen primjer proizvodnje uzoraka od izotermalno poboljšanog nodularnog liva.

Original scientific paper

SUMMARY

Austempered Ductile Iron is a class of ductile iron subjected to a specific heat treatment process (austenitization and austempering). The heat treatment gives to that type of Ductile Iron an excellent mechanical properties and an especially good strength-to-weight ratio. However, designers in most cases are unfamiliar with this material that can compete favorably with other type of metallic materials (steel, aluminum, etc). The high tensile strength of ADI is the result of its unique ausferrite microstructure. In this paper, an example of Ductile iron sample production is presented.

1. UVOD

U slučaju zagrijavanja odlivaka od nodularnog liva na temperaturu austenitizacije i brzog hlađenja u solnoj kupki ili bilo kojoj drugoj toploj kupki zagrijanoj na temperaturu izotermalnog poboljšanja (između 260°C i 420°C) uz dovoljno dugo držanje na toj temperaturi nastaje ausferitna mikrostruktura. Nodularni liv tretiran na ovakav način naziva se izotermalno poboljšani nodularni liv. Hlađenje do temperature izotermalnog poboljšanja mora biti dovoljno brzo da bi se izbjeglo formiranje perlita ili ferita, odnosno, da se dobije željena ausferitna mikrostruktura (maksimalna vrijednost mehaničkih svojstava i žilavosti). U slučaju korištenja nodularnog liva, ili bilo koje druge vrste željeznog liva, izotermalno poboljšanje mora biti provedeno na temperaturama iznad temperature početka martenzitne transformacije (M_s) [1,2,3].

1. INTRODUCTION

If ductile iron is austenitized and quenched into a salt bath or any other type of hot bath at a temperature of 260°C to 420°C and held at this temperature long enough, transformation to a structure containing mainly ausferrite takes place. Cast irons that are transformed in this manner are referred to as austempered ductile irons. Quenching to the austempering temperature must be fast enough to avoid pearlitic or ferritic transformation if the desired microstructure (or maximum attainable toughness/ductility) is to be realized. Using ductile iron or another type of iron, austempering has to be performed above martensite start (M_s) temperature. [1,2,3]

Proces izotermalnog poboljšanja može rezultirati različitim oblikom mikrostrukturnih konstituenata zavisno od temperature izotermalnog poboljšanja (temperatura solne kupke) i vremena držanja na toj temperaturi. Zajednička karakteristika nastalalih oblika finalne mikrostrukture su visoka vrijednost zatezne čvrstoće uz zadržavanje žilavosti materijala i mogućnost otvrdnjavanja tokom rada što daje bolju otpornost na trošenje novonastale u odnosu na polaznu mikrostrukturu. Ovako dobra kombinacija svojstava je u stvari rezultat novonastale mikrostrukture (ausferitna mikrostruktura). Ausferitna mikrostruktura sastoji se od ferita i austenita [1].

U početku istraživanja na polju izotermalnog poboljšanja livova nastala mikrostruktura se nazivala beinitna mikrostruktura povodeći se za procesom izotermalnog poboljšanja čelika. Nakon nekog vremena istraživači su se složili da postoji razlika između novonastale i beinitne mikrostrukture. Kao što je spomenuto ranije ausferitna mikrostruktura se sastoji od ferita i austenita dok se beinitna mikrostruktura sastoji od ferita i cementita (karbida). Nastali oblik feritne faze i količina ferita i austenita se može kontrolirati podešavanjem parametara termičke obrade (temperatura i vrijeme) a sve to određuje finalna svojstva tretiranog materijala. Feritna faza u okviru ausferitne mikrostrukture se često naziva acikularni (igličasti) ferit zbog svog igličastog oblika u kom se najčešće pojavljuje [1,2,4].

2. MIKROSTRUKTURA IZOTERMALNO POBOLJŠANOG NODULARNOG LIVA

U toku procesa izotermalnog poboljšanja acikularni ferit raste iz austenita a ugljik difundira u okolni austenit. Usljed povećanog sadržaja silicija onemogućeno je izdvajanje karbida u austenitu pri čemu austenit nastavlja da se obogaćuje sa ugljikom kako se odvija proces rasta feritne faze. Nakon što se austenit zasiti ugljikom usporava se i prestaje proces transformacije izdvajanja i rasta feritne faze. Zavisno od vrijednosti parametara termičke obrade (temperatura i vrijeme) ausferitna mikrostruktura može sadržavati do 50% zasićenog (stabilnog) austenita. Tako nastali ugljikom zasićeni austenit zadržava svoju stabilnost do temperatura ispod -80°C. Ausferitna transformacija je dvostepena transformacija gdje se austenit (γ) u prvoj fazi transformiše u ferit (α) i ugljikom zasićeni austenit (γ_{HC}) (Reakcija 1) [1,2,5,6].

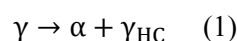


Austempering generates a range of microstructures, depending on temperature of transformation bath and holding time at the transformation temperature. The properties are characterized by a very high strength, some ductility and toughness, and often an ability to work harden, giving appreciably higher wear resistance than that of base material (ductile iron). This good/unusual combination of properties comes as a result of their unique microstructure (ausferrite microstructure). Ausferrite microstructure consists of ferrite and austenite.[1]

At the beginning of investigation on field of austempered ductile iron resulting microstructure was referred to as bainite microstructure, as in austempered steel. After some time researchers agreed about difference between those two microstructures (ausferrite/bainite microstructure). As mentioned before ausferrite microstructure consists of ferrite and austenite while bainite microstructure consists of ferrite and carbides. The exact shape of the ferrite phase and the relevant amounts of ferrite and austenite determine mechanical properties that can be controlled by the heat treatment parameters (temperature and time). Ferrite phase within ausferrite microstructure was usually named as acicular ferrite due to its needle-shaped form.[1,2,4]

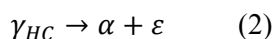
2. MICROSTRUCTURE OF DUCTILE IRON

During austempering process acicular ferrite grows from the austenite, while dissolved carbon is moved from the ferrite into the surrounding austenite. Because of the high silicon content, formation of the cementite (carbide) phase within the rich carbon austenite regions is suppressed. Consequently, the remaining austenite continues to absorb carbon as the transformation proceeds. As the austenite becomes enriched on carbon, growth of the acicular ferrite is inhibited and the transformation is stopped. Depending on the transformation temperature and time, ausferrite microstructure can contain up to 50% of carbon enriched (stable) austenite. Carbon enriched austenite, due to its high carbon content, is stable to temperature below -80°C. Ausferrite transformation is two-stage transformation process. In the first stage, the austenite (γ) transforms into ferrite (α) and carbon enriched austenite (γ_{HC}) (Reaction 1).[1,2,5,6]



Ausferitna mikrostruktura opisana reakcijom (1) je poželjna mikrostruktura kod izotermalno poboljšanog nodularnog liva koja daje izvanredna svojstva termički tretiranom materijalu.

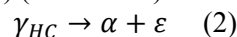
Austenit zadržava stabilnost ako je u njemu količina rastvorenog ugljika oko 2%. Ovakvo visoki sadržaj ugljika u austeniti pomijera M_s temperaturu znatno ispod sobne temperature što je razlog da ne dođe do pojave martenzita u samom materijalu. Međutim, ugljikom zasićeni austenit nije stabilan beskonačno, odnosno gubi svoju stabilnost u slučaju dugog držanja materijala na temperaturi izotermalnog poboljšanja. U tom slučaju dolazi do druge faze transformacije, pri čemu ugljikom zasićeni austenit (γ_{HC}) se dalje transformiše u ferit i karbide (ϵ) (Reakcija 2).



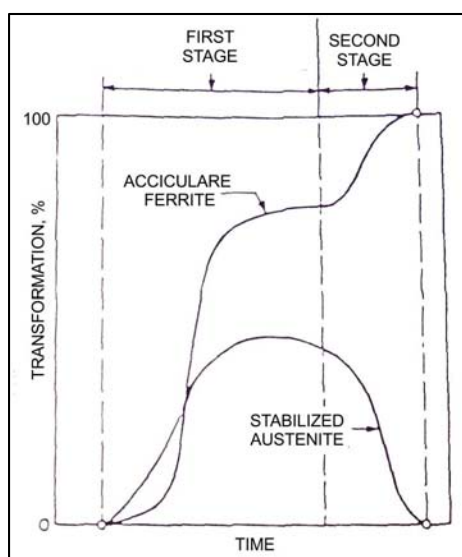
U slučaju da u materijalu dođe do odvijanja reakcije (2) materijal će sadržavati veliku količinu karbida što će ga pretvoriti u veoma krt materijal. Zbog prethodno navedenog reakcija (2) je nepoželjna i treba je izbjeći u toku proizvodnje izotermalno poboljšanog nodularnog liva. Spriječavanje (odlaganje) reakcije (2) moguće je izvesti legiranjem određenom količinom odgovarajućih hemijskih elemenata i tako poboljšati prokaljivost odlivaka odnosno dobiti veću slobodu rada sa odlivcima u toku procesa proizvodnje ove vrste materijala (processing window), slika 1 i slika 2.

Microstructure described by Reaction (1) is the desired microstructure in Austempered Ductile Iron that gives remarkable properties to it.

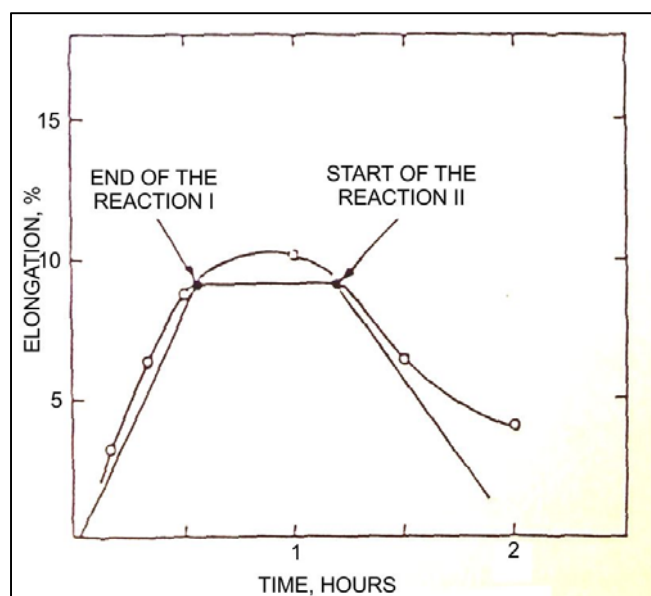
The carbon enriched austenite is stable because high carbon content as high as 2%. The high carbon content of the austenite lowers the martensite start temperature to temperatures considerably below room temperature, which helps that the austenite remains at room temperature and does not transform into a martensite. However, this high carbon austenite is not stable forever. If the heat treated material is held at the austempering temperature for too long it will undergo a second stage transformation process. During the second stage, the high carbon austenite (γ_{HC}) further transforms into ferrite (α) and carbide (ϵ) (Reaction 2)



In this case, heat treated material will contain a large amount of carbide and this makes the material very brittle. Therefore Reaction (2) is undesirable and has to be avoided. This embrittling reaction is of major concern since it can limit successful application of the heat treated material. Delaying the second reaction through alloying with certain amounts of some elements should improve austemperability of the castings on a production scale by allowing a greater freedom in austempering time and thus creating wider window for the austempering process, Figure 1 and Figure 2.



Slika 1. Udio mikrostrukturnih faza u toku izotermalnog poboljšanja
Figure 1. Microstructure phases during austempering transformation



Slika 2. Uticaj vremena izotermalnog poboljšanja na svojstva tretiranog uzorka
Figure 2. Influence of austempering time on properties of the treated sample

Vremenski interval između kraja reakcije (1) i početka reakcije (2) predstavlja dozvoljeno vrijeme trajanja procesa izotermalnog poboljšanja za postizanja maksimalne vrijednosti žilavosti. Kraća vremena izotermalnog poboljšanja će dovesti do pojave martenzita u mikrostrukturi dok u slučaju dužih vremena dolazi do odvijanja reakcije (2), odnosno, dolazi do pojave karbida u mikrostrukturi uzrokujući krtost materijala [1,2,4].

3. PARAMETRI KOJI UTIČU NA MIKROSTRUKTURNA I MEHANIČKA SVOJSTVA METERIJALA

3.1. Kvalitet polaznog materijala

Izgled mikrostrukture metalnog matriksa ima značajan efekat na mehanička svojstva nodularnog liva. Nodularnost i broj nodula, također, ima značajan uticaj na svojstva materijala. Pretpostavlja se da loša nodularnost i nizak broj nodula negativno utiču na svojstva izotermalno poboljšanog nodularnog liva. Znatno veći negativan uticaj na kvalitet izotermalno poboljšanog liva imaju karbidi i pojava poroznosti. Niža vrijednost nodularnosti polaznog materijala negativno utiče na vrijednost zatezne čvrstoće i udarne žilavosti tretiranih odlivaka. Visoka vrijednost broja nodula (po jedinici površine) polaznog materijala pozitivno utiče na nodularnost i pojavu segregacija i karbida na graničnim površinama zna. Povećanje debljine stijenke

The time interval between end of reaction (1) and beginning of the reaction (2) represents the allowable austempering time for processing iron for obtaining maximum toughness. Shorter austempering times would result in an iron having some martensite, while times beyond point of start of reaction (2) would result in an embrittling reaction with carbide in the microstructure. For commercial austempering, a wider process window is desirable.[1,2,4]

3. FACTORS AFFECTING MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES

3.1. Casting Quality

The matrix structure has the effect on mechanical properties of ductile cast iron. Nodularity and nodule count has a significant effect on the properties. It is expected that the properties of austempered ductile iron deteriorate due to casting quality factors such as poor nodularity and low nodule count. Undisclosed carbides or porosity will be more severe for austempered ductile iron. Decrease in nodularity cause decrease in tensile and impact properties. High nodule count promotes nodularity and minimizes segregation and carbide formation in the intercellular regions. Increasing the section size slows down the cooling rate which results in a lower nodule count and higher segregation at cell boundaries.

iziskuje poboljšanje prokaljivosti materijala što zahtijeva legiranje većim količinama određenih elemenata kao što su Cu, Ni, Mo [1,2]

3.2. Temperatura austenitizacije

Austenitizacija se uobičajeno izvodi u temperaturnom intervalu između 850°C i 920°C. Temperatura austenitizacije utiče na proces izotermalne transformacije tako što utiče na količinu rastvorenog ugljika u austenitu. Povećanjem temperature austenitizacije povećava se rastvorivost odnosno količina rastvorenog ugljika u austenitnoj metalnoj osnovi. Sa povećanjem količine rastvorenog ugljika povećava se udio stabilnog austenita po završetku reakcije (1). Odabrana vrijednost temperature austenitizacije također utiče na kinetiku samih transformacija.[7,8].

3.3. Dužina trajanja procesa austenitizacije

Količina rastvorenog ugljika u metalnom matriksu nije samo ovisna o temperaturi austenitizacije i hemijskom sastavu legure nego i o dužini vremena držanja na toj temperaturi. Sa produženjem vremena držanja na temperaturi austenitizacije raste količina rastvorenog ugljika. Prisustvo pojedinih legirajućih elemenata također utiču na količinu rastvorenog ugljika tako što utiču na njegovu topivost u austenitnom metalnom matriksu. Elementi kao što su Ni i Si smanjuju topivost ugljika dok elementi kao što su Mn, Cr, Mo, povećavaju njegovu topivost u austenitu. Produženje vremena držanja na temperaturi austenitizacije također utiče na topivost pojedinih karbida i poboljšava ravnomjernu topivost ugljika i povećava njegov sadržaj u austenitu[1,2].

3.4. Temperatura i vrijeme izotermalnog poboljšanja

Za nastanak finalne ausferitne mikrostrukture temperatura izotermalnog poboljšanja ima ključnu ulogu. Morfologija i udio acikularnog ferita i stabilnog austenita, zatim sadržaj rastvorenog ugljika uveliko ovise o temperaturi izotermalnog poboljšanja. Također, znatan uticaj na mikrostrukturu ima i vrijeme držanja na temperaturi izotermalnog poboljšanja (Slike 1 i 2). Zavisno o tome koje su željene vrijednosti mehaničkih i duktilnih svojstava temperatura izotermalnog poboljšanja se kreće u granicama između 260°C i 420°C. Opšti prikaz procesa izotermalnog poboljšanja se uobičajeno predstavlja dijagramom Vrijeme-Temperatur-Transformacija (TTT dijagrami) prikazan na slici 3.[2,4]

Larger section sizes also require increased hardenability of the material through additions of larger concentrations of, Cu, Ni, Mo.[1,2]

3.2. Austenitizing temperature

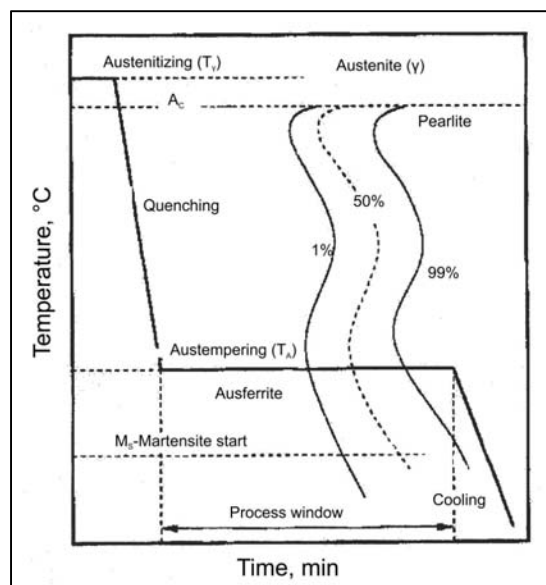
Austenitizing is commonly performed in the temperature range of 850°C to 920°C. The austenitizing temperature significantly affects transformation during austempering through its influence on dissolved carbon content. Increasing the austenitizing temperature increases the amount of carbon dissolved in austenite as the solubility of carbon increases. As the dissolved carbon content increases, the amount of stabilized austenite remaining at the end of the first reaction increases. Selected austenitizing temperature also affects the kinetics of the austempering reaction (transformation).[7,8]

3.3. Austenitizing time

Matrix carbon content is not only determined by the austenitizing temperature and the chemical composition but also by time holding on that temperature. By extending the austenitizing time the carbon content of matrix increases. Individual alloying elements also influence the carbon content of the austenite through their effect on carbon solubility. Elements like Ni and Si reduce solubility of carbon while Mn, Cr and Mo increase the solubility of carbon. Extending the austenitizing time also has an effect on graphitization of residual carbides, and makes carbon even more evenly distributed at a higher content in the matrix.[1,2]

3.4. Austempering temperature and time

In developing the final microstructure of austempered ductile iron, austempering temperature plays the most dominant role. The morphology of austempered ductile irons' ferrite, amount of carbon saturated austenite and carbon content of this austenite shows the effect of austempering temperature on microstructure remarkably. There is also considerable influence on the microstructure by the austempering time. Depending on strength and elongation required for the particular sample, austempering temperature was generally maintained between 260°C and 420°C. The general procedure for austempering ductile irons through Time-Temperature-Transformation was shown in the Figure 3.[2,4]



Slika 3. TTT dijagram izotermalnog poboljšanja
Figure 3. TTT Diagram of austempering proces

Na temperaturama izotermalnog poboljšanja ispod 330°C transformacija započinje tako što ferit počinje da se izdvaja na granicama austenitnih zrna i raste u unutrašnjost zrna. Pošto je proces difuzije veoma spor nastali ferit je u obliku uskih iglica. U slučaju ovako niskih temperatura izotermalnog poboljšanja količina nastalog stabilnog austenit aje veoma mala i postoji mogućnost pojave martenzita u mikrostrukuri[1,2].

U slučaju izotermalnog poboljšanja na temperaturama višim od 350°C nastaju krupnije iglice ferita (pločasti ferit). Udio stabilnog austenita u mikrostrukuri je znatno viši nego u slučaju izotermalnog poboljšanja na nižim temperaturama[2,4].

Vrijeme držanja na temperaturi izotermalnog poboljšanja je veoma bitno iz razloga što ausferitna mikrostruktura nastaje kao rezultat reakcije (1) u toku procesa transformacije a odvijanje reakcije (2) je nepoželjno jer utiče na sniženje duktilnosti i žilavosti tretiranog materijala. Ako je držanje na temperaturi izotermalnog poboljšanja kraće od 30 minuta veličina i broj feritne faze neće biti odgovarajući jer neće imati vremena da rastu i ostaće veoma sitne. Austenitna faza koja okružuje feritne iglice, u tom slučaju, neće biti dovoljno zasićena ugljikom da bi održala svoju stabilnost. U slučaju dužih vremena držanja na temperaturi izotermalnog poboljšanja (preko 5 sati) dolazi do pojave odvijanja reakcije (2) kada se zasićeni austenit razlaže na ferit i karbide što uzrokuje smanjenje duktilnih svojstava [1,2,7].

At the beginning of austempering of ductile iron at the isothermal temperatures below 330°C, acicular ferrite nucleate at the boundaries of austenite and growth into austenite continually, and as the diffusion rate of carbon is low the ferrite is in the shape of narrow needles. In that case only a small amount of retained austenite is present after cooling to room temperature. At lower austempering temperature, due to incomplete stabilization, these structures might contain some percent of martensite.[1,2]

After austempering at 350°C or higher, relatively coarser and distinct ferrite needles or platelets are formed. Percent of retained austenite is much higher than in case of austempering at lower temperature.[2,4]

Austempering time at the particular temperature is considered to be critical because the ausferrite microstructure is produced by the reaction (1), while the reaction (2) is undesirable because it reduces the ductility and toughness. At a shorter austempering time (less than 30 minutes), the nucleated ferrite needles cannot evolve in huge number and remain tiny in size. The austenite around these ferrite needles cannot receive enough carbon to become stable. If the transformation time is long enough (five hours and more) at the particular temperature, reaction (2) occurs where saturated austenite is decomposed to ferrite and carbide which leads in the reduction of ductility.[1,2,7]

4. IZVODENJE EKSPERIMENTA

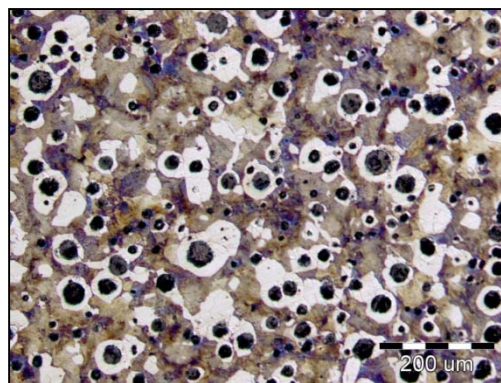
4.1. Korišteni materijal

Za eksperimentalna istraživanja korišten je legirani nodularni liv konvencionalnog hemijskog sastava. Hemijski sastav korištenog materijala je dat u tabeli 1 a na slici 4 je prikazana mikrostruktura korištenog materijala u odlivenom stanju. Materijal je perlitno feritni liv (sa oko 60% perlita).

Tabela 1. Hemijski sastav korištenog materijala

Table 1. Chemical composition of the base material

Composition	C	Si	Mn	S	P	Mg	Ni	Cu
%	3,29	2,53	0,31	0,013	0,015	0031	0,81	0,51

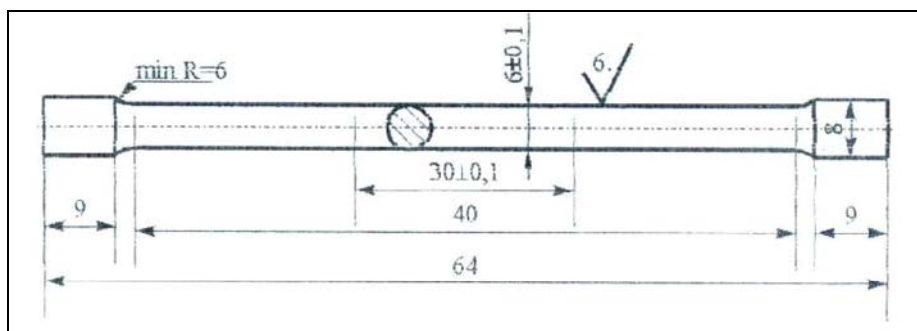


Slika 4. Mikrostruktura polaznog materijala u odlivenom stanju nakon nagrizanja (Nital, 100x)

Figure 4. Microstructure of base material in as-cast condition after etching (Nital, 100x)

Prema standardu BAS EN 1563:1997 polazni materijal se može svrstati u klasu EN-GJS-600. Materijal je odliven u U probe iz kojih su isječene epruvete za ispitivanje zatezne čvrstoće prema standardu BAS EN 10054-1/98. Izgled pripremljenih epruveta za ispitivanje zatezne čvrstoće dat je na slici 5.[8,9]

According the standard BAS EN 1563:1997 base material can be classified as an EN-GJS-600 class of ductile iron. This material was cast in the form of U blocks. From these U blocks, tensile strength samples were prepared according BAS EN 10054-1/98. A schematic of the cylindrical tensile test sample used for investigation is shown in the figure 5.[8,9]



Slika 5. Izgled probe za ispitivanje zatezne čvrstoće (mjere u mm)

Figure 5. Tensile test specimen (measures in mm)

4.2. Termički tretman

Pripremljene epruvete su prvobitno zagrijavane na temperaturu austenitizacije od 870°C i držane 60 minuta nakon čega su kaljene u otopljenoj kupki KNO₃ na temperaturi 370°C i držane 90 minuta nakon čega su hladene na zraku. Izvršeno je termičko tretiranje tri uzorka s ciljem obezbjeđenja ponovljivosti rezultata.

4.3. Ispitivanje zatezne čvrstoće

Nakon termičkog tretmana probe su očišćene i izvršeno je ispitivanje na zatezanja prema standardu BAS EN 100002:2002. Nakon ispitivanja na zatezanje izvršena je priprema uzoraka i provedeno je ispitivanje tvrdoće. Na svakom uzorku je provedeno najmanje 5 ispitivanja radi bolje tačnosti dobijenih rezultata. Ispitivanje tvrdoće je provedeno u skladu sa standardom BAS EN 6507-1/2007

Rezultati ispitivanja zatezne čvrstoće i tvrdoće dati su u tabeli 2[10,11]

4.2. Heat treatment

All the samples used in this work were initially austenitized at 870°C for one hour and they are austempered in molten salt bath (KNO₃) at 370°C for 1,5 hours. For the investigation three samples were prepared and heat treated as mentioned above. After heat treatment all samples were tested.

4.3. Tensile testing

After the heat treatment samples were prepared and the testing was performed per BAS EN 100002:2002. After tensile testing the same samples were polished with emery paper using different grits and then hardness measurements were taken. At least five readings were taken to get a better accuracy on a calibrated hardness tester. Hardness test were taken according BAS EN 6507-1/2007.[10,11]

The results of tensile testing and hardness testing are presented in table 2.

Tabela 2. Rezultati ispitivanja zatezne čvrstoće i tvrdoće

Table 2. Results of tensile strength and hardness

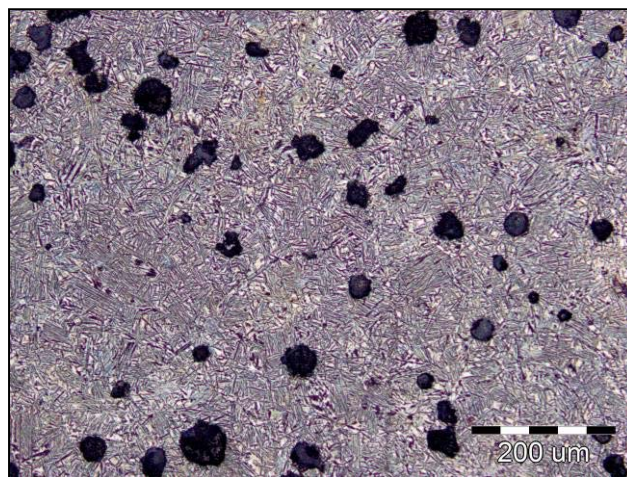
Sample number	Proof strength Rp0,2 / N/mm ²	Tensile strength Rm / N/mm ²	Elongation A / %	Reduction of area Z / %	Hardness HRC (Average of 5 measurments)
1.	770	920	10,6	9,0	20,1
2.	775	912	10,0	9,5	20,0
3.	764	914	10,9	9,1	20,7

4.4. Mikrostruktorna ispitivanja

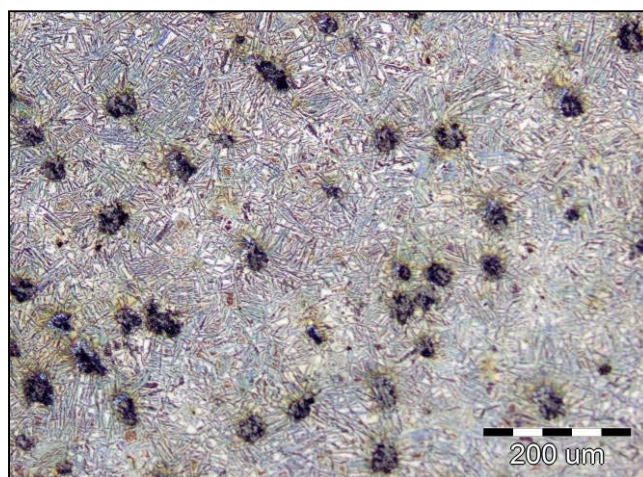
Nakon provedenih ispitivanja zatezne čvrstoće i tvrdoće od svake epruvete su uzeti uzorci za metalografska ispitivanja. Na mašini za rezanje odsječeni su odgovarajući mali uzorci koji su brušeni i polirani na poluautomatskoj mašini za pripremu uzoraka (tipa Struers). Nakon pripreme uzorci su posmatrani na optičkom mikroskopu (Olympus) nakon nagrizanja u 2% nitalu. Mikrostruktura termički tretiranih uzoraka predstavljena je na slikama 6 do 8.

4.4. Microstructure investigation

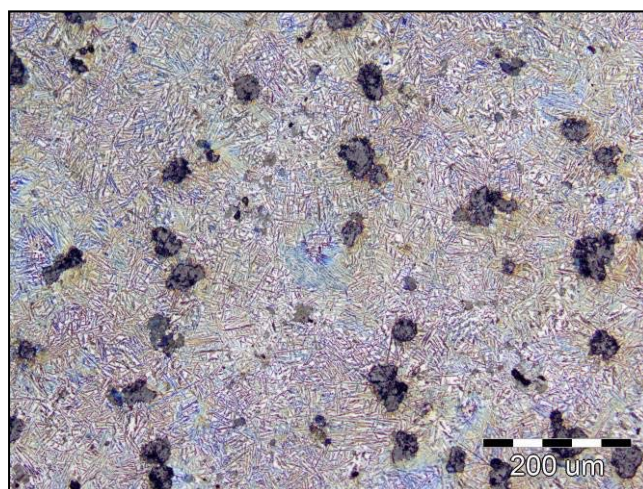
From each heat treated sample, after tensile and hardness testing were finished, test specimens for microstructure investigation were prepared. Using cutting machine small sample was prepared from the already tested material. Specimens for microstructure investigation were grinding and polished using semi-automatic machine (Struers semi automatic polishing machine). After preparation the samples were observed on optical microscope (Olympus) after etching with 2% nital. Microstructure of the heat treated samples was presented on figure 6 to 8.



Slika 6. Mikrostruktura nakon termičkog tretmana, Uzorak 1 (Nital, 100x)
Figure 6. Microstructure after heat treatment Sample 1(Nital, 100x)



Slika 7. Mikrostruktura nakon termičkog tretmana, Uzorak 2 (Nital, 100x)
Figure 7. Microstructure after heat treatment, Sample 2 (Nital, 100x)



Slika 8. Mikrostruktura nakon termičkog tretmana, Uzorak 3 (Nital, 100x)
Figure 8. Microstructure after heat treatment, Sample 3 (Nital, 100x)

5. ZAKLJUČCI

Nakon provedenih eksperimenata i ispitivanja tretiranog materijala može se zaključiti slijedeće:

- Potpuna ausferritna mikrostruktura se može postići na temperaturi izotermalnog poboljšanja od 370°C i vremenu držanja od 90 minuta
- Primjenom gore opisanog termičkog tretmana može se dobiti izotermalno poboljšani nodularni liv sa znatnim povećanjem vrijednosti zatezne čvrstoće polaznog materijala
- Tvrdoća tretiranog materijala je u granicama vrijednosti tvrdoće polaznog materijala
- Duktilne vrijednosti tretiranog materijala imaju slične vrijednosti kao i polazni materijal iako je povećanje vrijednosti zatezne čvrstoće znatno izraženo

6 LITERATURA – REFERENCES

- [1] R. Gupta: *Influence of austempering time and temperature on the fracture toughness of austempered ductile iron*, MSc Thesis, Wayne State University, Detroit, Michigan, USA, 1996
- [2] S. Kesani: *Development of austenite free austempered ductile iron*, MSc Thesis, Wayne State University, Detroit, Michigan, USA, 2005
- [3] M. Ostojić, A. Beroš: *Nodularni liv*, Fakultet za metalurgiju i materijale, Zenica, 2008
- [4] J. R. Keough, K. L. Hayrynen: *Designing with Austempered Ductile Iron (ADI)*, AFS Proceedings 2010, Schaumburg, IL USA, 2010, American Foundrymen Society, pp. 1 to 15.
- [5] Heat Treater's Guide: *Practices and procedures for Irons and Steels*" ASM International, Harry Chandler ed., Materials Park, Ohio, Second Edition, 1995, p 824-835.

5. CONCLUSIONS

After conducting all experiments and testing following can be concluded.

- A fully ausferritic microstructure of tested samples can be produced by austempering at 370°C for 1,5 hours
- Using the above mentioned heat treatment process was possible to produce austempered ductile iron with significant increase of tensile strength of the tested material
- The hardness of the tested material was the same as the base material
- The ductile properties of the tested material was kept at the same level as that of the base material even the tensile strength was significantly higher

- [6] H. Avdušinović, A. Gigović: *Heat Treatment of Nodular Cast Iron*, TMT Proceedings, S. Ekinovic ed. Hammamet Tunisia, 2009, p. 669-672.
- [7] M. Janjić, H. Avdušinović, Z. Jurković, F. Bikić, S. Savićević: *Influence of austempering heat treatment on mechanical and corrosion properties of ductile iron samples*, Metalurgija, 55 (2016) 3, pp. 325 - 328.
- [8] BAS EN 10054-1/98.
- [9] BAS EN 1563:1997.
- [10] BAS EN 100002:2002
- [11] BAS EN 6507-1/2007

Corresponding author:

Hasan Avdušinović
University of Zenica
Faculty of Metallurgy and Materials
Email: hasan.avdusinovic@famm.unze.ba
Phone: +387 32 401 831