

Otpornost na trošenje kugličarenoga izotermički poboljšanoga nodularnoga lijeva

Veljačić, Zoran

Doctoral thesis / Disertacija

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:885896>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Zoran Veljačić

**OTPORNOST NA TROŠENJE
KUGLIČARENOM IZOTERMIČKI
POBOLJŠANOM NODULARNOM
LIJEVA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2021.



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Zoran Veljačić

**OTPORNOST NA TROŠENJE
KUGLIČARENAGA IZOTERMIČKI
POBOLJŠANOGA NODULARNOGA
LIJEVA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof.dr.sc. Krešimir Grilec

Zagreb, 2021.



University of Zagreb

The Faculty of Mechanical Engineering and Naval
Architecture

Zoran Veljačić

WEAR RESISTANCE OF SHOT PEENED AUSTEMPERED DUCTILE IRON

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor: prof.dr.sc. Krešimir Grilec

Zagreb, 2021.

Krešimir Grilec rođen je 25.08.1969. godine u Zagrebu. Diplomirao je 1994. godine na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na kojem radi od 1995. godine (Zavod za materijale). Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu je magistrirao 1999. godine, a doktorirao 2003. godine. U znanstveno-nastavno zvanje docenta izabran je 2006. godine, u zvanje izvanrednog profesora 2011., a u zvanje redovitog profesora 2016. godine.

Znanstveno istraživačka djelatnost odvija se poglavito unutar znanstvenog područja tehničkih znanosti, znanstvenog polja strojarstva pri čemu je objavio 22 znanstvena rada u časopisima i 82 znanstvena rada u zbornicima radova sa znanstvenih skupova. Kao suradnik aktivno je sudjelovao u radu 11 znanstveno istraživačkih i tri tehnolojska projekta. Bio je glavni urednik Zbornika radova 10 znanstvenih savjetovanja

Prof.dr.sc. Krešimir Grilec je jedan od nositelja 2 obavezna (Materijali II, Tribologija i inženjerstvo površina) i 2 izborna kolegija (Materijali cestovnih vozila, Nanomaterijali) preddiplomskog studija strojarstva, kolegija Tribologija diplomskog studija strojarstva i 4 kolegija poslijediplomskog doktorskog studija (Znanost i inženjerstvo materijala, Čelijasti materijali, Nanostrukturirani materijali, Tribologija), Nositelj je i kolegija Materijali na studiju Vojno inženjerstvo i istoimenog kolegija na Studiju energetske učinkovitosti i obnovljivih izvora u Šibeniku. Mentorski je vodio 39 diplomskih i 37 završnih radova.

Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje je obnašao dužnosti prodekana za nastavu, predstojnika Zavoda za materijale i voditelja Katedre za materijale i tribologiju. Bio je predsjednik Hrvatskog društva za materijale i tribologiju.

Zahvaljujem svom mentoru prof. dr. sc. Krešimiru Grilecu na stručnom vodstvu, savjetima te podršci tijekom istraživanja uključenih u ovaj rad.

Prof. dr. sc. Mati Jurjeviću sa Sveučilišta u Dubrovniku, zahvaljujem na nemjerljivoj podršci i poticanju da ovaj rad privedem kraju.

Prof. dr. sc. Draženu Živkoviću zahvaljujem na korisnim savjetima i ustupljenim laboratorijima Zavoda za proizvodno strojarstvo, Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu.

Zahvalnost dugujem sljedećim umirovljenim i sadašnjim zaposlenicima brodogradilišta Brodosplit d.d.:

- Franji Jarčeviću, dipl. ing. strojarstva, glavnom tehnologu lijevanja Tvornice dizel motora d.o.o. – ljevaonica, na ustupljenoj literaturi i pomoći u praktičnom shvaćanju postupka lijevanja, te izradi odljevaka korištenih u eksperimentalnom dijelu ovog rada;
- Josipu Papiću, dipl. ing. strojarstva i Branku Stanišiću, dipl. ing. strojarstva, vodećim stručnjacima laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava, na pomoći u izradi epruveta i njihovom ispitivanju.
- Nikoli Muši, dipl. ing. strojarstva, rukovoditelju radionice održavanja alata, strojne i toplinske obrade, na izradi dijela elemenata naprave za kugličarenje i epruveta za ispitivanje na trošenje.
- Božidaru Tomiću, dipl. ing. strojarstva, rukovoditelju strojne obrade u Tvornici dizel motora d.o.o. na izradi zupčanika.

Zahvaljujem umirovljenom dr. sc. Ognjenu Milatu iz Instituta za fiziku u Zagrebu na podršci i ustupljenom laboratoriju s opremom za mjerenje mikrotvrdoće (u prvom ciklusu ispitivanja).

Kolegama sa Zavoda za opću i analognu kemiju i Minerološkog zavoda geološkog odjela na PMF-u u Zagrebu zahvaljujem na pomoći kod pripreme uzoraka i snimanju difraktograma.

Zahvaljujem gđi. Nataši Lipovšek, dipl.ing. iz Laboratorija za metalografiju IMT-a na pripremi uzoraka za svjetlosnu i FESEM mikroskopiju.

Zahvalnost dugujem prof. dr. sc. Sanji Šolić na pomoći u analizi mikrostrukture na svjetlosnom i FESEM mikroskopu, komentiranju rezultata XRD analize.

Posebno zahvaljujem Stanislavu Viskoviću, univ. spec. mag. oec., doktorandu Ekonomskog fakulteta u Splitu, na informatičkoj podršci i velikom strpljenju.

Na kraju zahvaljujem svojoj obitelji, supruzi Luči i kćerima Anamariji i Danieli te majci Danici, koje su me svih ovih godina podržavale i poticale.

Dosadašnja istraživanja nodularnog lijeva pokazala su da isti može imati široku primjenu u strojogradnji te da može biti kvalitetna i jeftinija zamjena za neke čelike.

Cilj ovog doktorskog rada je istraživanje mogućnosti primjene nodularnog lijeva kod elemenata koji imaju zahtjev za boljim i višim mehaničkim svojstvima i drugačijom mikrostrukturom. Za potrebe rada izrađeni su uzorci odljevaka EN-GJS-600-3 iz kojih su kasnije izrađeni uzorci za ispitivanje mehaničkih svojstava, uzorci za ispitivanje otpornosti materijala na abraziju i eroziju i stvarni uzorci - zupčanici. Iz odljevaka je napravljena serija standardnih epruveta za određivanje udarnog rada loma. Na dijelu tih epruveta ispitana je žilavost i tvrdoća osnovnog materijala, a ostatak je podvrgnut različitim temperaturama izotermičke pretvorbe s ciljem utvrđivanja njihovog utjecaja na mikrostrukturu lijeva, a time i na mehanička svojstva. Ranije provedenim postupcima prikupljeni su i analizirani eksperimentalni podaci na temelju kojih su određeni parametri za toplinsku obradu uzoraka za ispitivanje otpornosti materijala na abraziju i eroziju. Uzorci za ispitivanje otpornosti materijala na abraziju i eroziju podvrgnuti su izotermičkom poboljšavanju na temperaturu izotermičke pretvorbe koja je osigurala veću tvrdoću i žilavost. S ciljem dodatnog površinskog očvrćavanja iste su tretirane postupkom kugličarenja. Parametri kugličarenja određeni su standardnim Almen postupkom. Nakon definiranja utjecaja parametara naknadne obrade NL-a i provedenih laboratorijskih ispitivanja osnovnog materijala pristupilo se izradi i ispitivanju zupčanika. Zupčanici od nodularnog lijeva izotermički su poboljšani, a dio ih je i kugličaren. Na uređaju koji se koristi za ispitivanje maziva (FZG ispitna metoda) simulirana je transmisija gdje su zupčanici od NL-a, ADI-a i kugličarenog ADI-a (ADI K) bili u kontaktu s čeličnim zupčanicom. Izotermičkim poboljšavanjem značajno je povećana otpornost trošenju površine i mogućnost prijenosa većeg opterećenja. Zupčanic koji je izotermički poboljšan na višoj temperaturi te još i kugličaren, pokazao je jasnu razliku u povećanju trajnosti, u odnosu na izotermički poboljšan zupčanic bez kugličarenja. Zbog razlike u strukturi osnovnog materijala zupčanici poboljšani na nižoj temperaturi izotermičke pretvorbe ukazali su na drugačije stanje površinske otpornosti. U drugom dijelu istraživanja, izrađeni su novi uzorci za ispitivanje na abraziju i eroziju. Isti su izotermički poboljšani i podvrgnuti ispitivanju na trošenje različitim medijima i različitim kutovima u slučaju erozije. Dobiveni rezultati služe kao smjernice za daljnja istraživanja s ciljem definiranja optimalnih parametara naknadne obrade kao i izrade modela za predviđanje dinamičke izdržljivosti ADI-a. To će omogućiti njegovu znatno širu primjenu u izradi visoko opterećenih strojnih elemenata.

Ključne riječi: nodularni lijev, mehanička svojstva, izotermičko poboljšavanje,
mikrostruktura, kugličarenje, abrazija, erozija

Ductile iron is a quasi-ternary alloy of iron and carbon that is predominantly extracted in the form of spherical graphite. The microstructure of ductile iron can be ferritic, pearlitic, ferritic-pearlitic or austenitic. The proportion of individual phases in the metal matrix depends on the chemical composition, the cooling rate through the area of eutectoid conversion and the volume fraction and number of graphite nodules. Previous research on ductile iron has shown that it can be widely used in mechanical engineering and that it can be a quality and cheaper replacement for some steels.

Subsequent isothermal conversion of ductile iron to obtain better mechanical properties yields austempered ductile iron (ADI) a material of better quality than conventional ductile iron, many other castings and even some steels. The combination of such good properties cannot be obtained by classical quenching and tempering, but is achieved by isothermal conversion (austempering process). The properties ADI achieves after heat treatment depend on the time and temperature of austenitization and isothermal conversion and the chemical composition of the starting material. Depending on the austempering parameters, different auspherite microstructures can be obtained. ADI is a material that offers a good combination: low cost, construction flexibility and good machinability. Austempering ductile iron forms an ausferite matrix composed of bainite ferrite and carbon-rich austenite (15-40 %). With cold deformation, austenite can be transformed into martensite, which brings another favourable characteristic of ADI material, the possibility that after isothermal conversion the surface is further hardened by shot peening or hammering processes. Increased hardness contributes to greater wear resistance of the surface exposed to variable cyclic stress, which expands the possibility of applying ADI material.

The shot peening process selected for this research is a controlled technological process which, under normal environmental conditions, achieves plastic deformation, in other words, it introduces compressive stress into the surface layer of the metal. The main purpose of shot peening is to increase the surface hardness and dynamic durability, and it also has a surface cleaning effect. The shot peening achieved cold plastic deformation changes the stress distribution in the surface layer, which was created by earlier technological process. The applied compressive stress reduces the possibility of the formation and spread of surface micro cracks that can be caused by corrosion, stress corrosion, fatigue and cavitation erosion, which will increase the dynamic endurance.

The effect of the shot peening is influenced by the intensity (strength) of the shot peening. The intensity of shot peening is an indicator of the energy transfer of the shot jet to the surface layer of the sample. The same depends on the size, shape, hardness, material, speed and angle of incidence of the shots. It is accepted that a method based on measuring the deformation of the test strip (Almen strip) after shot peening is used to check the strength of shot peening. The means used in shot peening are made of cast steel, glass, ceramics and cut steel wire. Of these, the most commonly used are cast steel shots. Steel shots with a diameter of 1 mm were used in this study.

The aim of this doctoral thesis is to determine the possible influence of shot peening on the mechanical properties of austempered ductile iron by scientific research methods, based on laboratory tests. It is to be assumed that the cold deformation of the surface will achieve the transformation of austenitic into martensitic structure, which increases the hardness of the material, and thus the resistance to some wear mechanisms.

Wear is the process of gradual loss of material from the surface of a solid body due to dynamic contact with another solid body, fluid and/or particles. There is no unambiguous connection between friction and wear in one tribosystem. In most cases, the increase in friction is accompanied by intensive wear, but there are also cases when it is the other way around. Wearing always involves the process of crack formation and the process of crack progression. The appearance of worn surfaces and the shape of wear particles are the basic indicators for identifying the wear mechanism.

For the wear resistance test, in this thesis, three procedures were selected: the abrasion test procedure, the erosion test procedure and the FZG (Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau) gear test method.

Abrasion wear is the extrusion of material caused by hard particles or hard protrusions. About 50% of all wear cases are due to abrasion. A characteristic of this type of wear is the presence of hard abrasive particles of mostly mineral origin, so it is often called mineral wear. For the experimental determination of abrasion resistance in this paper, the standard method according to ASTM G56 – 94, "dry sand/rubber wheel".

Erosion is the loss of material from the surface of a solid body due to the relative motion (flow) of the fluid in which the erosive is located (solid particles). Erosion in which the flow is at a small angle (up to 30°) in relation to the surface is called abrasive erosion, and when the erosive strikes the surface at larger angles (60-90°) the dominant wear mechanism is surface fatigue and this form of erosion is called impact erosion. There are several methods and devices for experimentally determining the resistance of materials to erosion. In this case, a method was

used in which the sample rotates and strikes a jet of falling erosive. The angle of impact of the erosive can be changed.

For the needs of the work, according to the "Tundisch cover" procedure, samples of castings EN-GJS-600-3 were made, from which samples for testing mechanical properties, samples for testing the resistance of materials to abrasion and erosion and actual gear samples were made. During the process of casting the samples, the chemical composition of the melt was controlled, so that in the end, castings of standard quality EN-GJS-600-3 were cast. Prior to the use of castings for the production of samples, their homogeneity was examined in order to detect possible defects caused by casting. The samples were tested using an X-Ray device.

Samples were made to test the microstructure of ductile iron EN-GJS-600 (cast state) and later to test the microstructure of the austempered EN-GJS-600 (ADI). Light microscopy and FE SEM (Field emission scanning electron microscope) analysis of the microstructure were performed. Based on the performed metallographic analysis of the samples, it was concluded that the graphite was mostly excreted in the form of nodules. Graphite nodules are of form VI, size 5/6, in a large percentage regular (80-85%) and evenly distributed in the structure. Ferrite is distributed around graphite nodules. Surface hardness and fracture impact work were examined. The obtained measurements and images of the structure are in accordance with the standard for EN-GJS-600-3.

In the first cycle of the ADI test, samples for microstructure testing, impact fracture testing, abrasion and erosion wear test specimens, and gears were austempered. Of all the samples, part of the total was austempered at 240°C and the rest at 380°C. Heat treatment in both cases consisted of heating to the austenitization temperature (900 °C), holding for one hour at that temperature, and rapid cooling to the isothermal conversion temperature. The samples were rapidly cooled and kept for one hour in an AB1 salt bath at 240°C and 380°C, respectively, followed by gradual cooling in air to room temperature.

The microstructure of ADI was analyzed by light and FE SEM microscope. Samples EN-GJS-600-3, that were austempered at 240°C, have higher sub cooling of austenite with lower carbon diffusion rate resulting in ausferite structure.

Bainite ferrite has the characteristic appearance of "lower" bainite - needle-shaped, and the rest of the structure consists of high-carbon stabilized austenite and graphite nodules. No perlite and carbides were observed in the structure, which is a confirmation of a well-performed isothermal conversion.

Metallographic analysis of austempered ductile iron at 380°C (ADI 380) revealed a change in the structure of the matrix from perlite-ferrite to ausferite structure. The ausferite structure of ADI 380 consists of: bainite ferrite of fluffy shape characteristic for the area of the so-called "upper" bainite, high-carbon stabilized austenite and graphite nodules. No formation of perlite and carbide was observed, which confirms that the heat treatment by austempering was performed correctly.

By changing the microstructure by the austempering process, there was an increase in hardness. The ADI 240 samples have a high hardness of the "lower" bainite which is in accordance with the EN 1564:2011 standard. While the ADI 380 samples have a lower hardness since it is a fluffy bainite ferrite - "upper" bainite. The hardness of this iron matrix is in accordance with the standard EN 1564:2011.

The isothermal conversion process for both temperatures significantly increased the values of the fracture impact work, with the fact that in the ADI 380 samples the fracture impact work is significantly higher than in the ADI 240.

The reason for this is the difference in the form of bainite ferrite, which was confirmed by light and FE SEM analysis. The impact fracture performance of these two ADI materials is inversely proportional to their hardness.

Austempering in ADI 240 samples resulted in a significantly higher increase in hardness compared to ADI 380 samples, and samples of this condition were selected for further wear resistance tests. In the first test cycle, samples of ADI 240 were subjected to the shot peening process. The samples were shot peened with three different intensities, "1.32 A", "1.11 A" and "0.99 A". The intensity of "1.11 A" proved to be the most economical.

By measuring the hardness with the Brinell method on samples for testing the resistance to wear of ADI 240 and shot peened ADI 240 (ADI 240 K), an increase in hardness was found in shot peened samples. In the thin surface layer there was an introduction of deformations, crushing of grains, and thus an increase in hardness. The increase in hardness was found to depend on the intensity of shot peening.

Abrasion wear - the lowest weight loss was achieved with the highest intensity shot samples. This can be explained by the highest surface hardness achieved by the highest shot peening intensity. From the test results it can be concluded that the shot peening process is a surface hardening mechanism that has a favourable effect on increasing the resistance of ADI materials to abrasion.

Erosion wear by higher granulation quartz sand shows that the wear resistance of non shot peened ADI samples is better than shot peened ADI materials, for the same applied

conditions. Softer material has a better ability to flow, compared to harder and more fragile ones. By flowing, parts of (non shot peened) material move but without breaking off. In the case of harder material, this is not the case, but the loss of microparticles begins much earlier. Based on the average mass losses per test cycle, it can be observed that the lowest total mass loss after five test cycles has non shot peened samples, while the largest mass loss is shown by samples shot peened with an intensity of "1.11 A". It follows from the above that shot peening has no significant effect on sand erosion resistance. Compared to sand erosion, steel shot eroded specimens show less overall loss in weight, which means that this wear mechanism has less detrimental effect on the test material. The reason for this can be found in the dimensional and geometric diversity of erosives.

The results of the FZG gear wear test showed a significantly higher durability of austempered gears compared to a ductile iron gear. Gears from ADI withstood a significantly higher number of cycles until complete wear of the tooth surface compared to NL (EN-GJS-600-3) gear. The ADI 240 gear showed the greatest durability. For the ADI 380 and ADI 380 K samples, there is a clear difference in wear resistance due to the shot peening effect. The surface layer of the teeth was hardened by the shot peening process by crushing the crystal grains and forming martensite. This has resulted in significantly higher wear resistance, and thus the possibility of achieving more cycles until wear. The test showed less durability of the ADI 240 K gear compared to the ADI 380 K gear. This is also caused by the difference in crystal grain size and toughness in the subsurface layer, where cracks form.

On all gears, the measurement of microhardness in the surface layer to the depth was 600 μm . From the obtained measurement results, two quantitatively different groups of hardness distribution by cross section are derived. In the case of a sample in the raw (cast) state and in the case of austempered samples, regardless of the temperature of the austempering (380°C or 240°C), a decrease in hardness along the edge of the samples is noticeable. This drop in hardness along the very edge of the samples extends to a depth of about 60 μm .

To expand the impact of different media on ADI wear, new abrasion and erosion test specimens were developed. They were austempered in another austempering procedure. The samples spent one hour in the oven at an austenitization temperature of 900°C, after which they were immersed in an AS 140 salt bath, the temperature of which was 240°C, where they also spent one hour. They were then cooled to room temperature.

After the austempering samples were shot peened, Almen intensities "1,32 A", "1,11 A" and "0,99 A".

In order to determine the effect of shot peening after the second cycle of isothermal conversion, the surface hardness of ADI 240 (non shot peened) was tested. There was an increase in hardness on all shot peened samples, regardless of the intensity of shot peening. The obtained results once again confirmed that the surface hardness increased more in samples that were shot peened with higher intensity.

In order to determine the influence of shot peening, micro hardness was measured in the edge layer of the samples. For comparison, the micro hardness of the non shot peened sample was also measured. In non shot peened austempered samples, a decrease in hardness along the edge of the samples is noticeable while it is uniform in depth above 200 μm . In austempered and shot peened specimens, there is no drop in edge hardness, and the hardness is slightly lower than in the non shot peened specimen. All shot peened samples show an increase in micro hardness from surface to depth 600 μm , followed by a gradual decrease.

After measuring the micro hardness, tribological tests were performed. From the analysis of the obtained test results on abrasion wear by different abrasives in the second test cycle, it is concluded that shot peening and its intensity has a positive effect on abrasion wear with SiO_2 – high. The intensity of shot peening has no significant effect on abrasive wear SiO_2 – low as well as in abrasive markings Al_2O_3 . Considering the type, mass (size) and shape of the abrasive: SiO_2 – high (0,25-0,50 mm); SiO_2 – low (0,15-0,25 mm); Al_2O_3 (0,063-0,2 mm) it can be seen that the wear intensity of ADI 240 K material is more influenced by the granulation of the abrasive, than the chemical composition (type).

The intensity of shot peening has a positive effect on the reduction of abrasion wear in abrasives of higher granulation. This is not the case with smaller granulation abrasives.

In the case of erosion wear by different erosives, the intensity of shot peening does not have a significant impact on the tribological properties of ADI material, if the erosion takes place under the same parameters (type of erosive, impact angle). However, a difference in wear with regard to erosive is observed. In erosion of the erosive marked SiO_2 – high, wear is significantly higher compared to erosion of the erosive marked Al_2O_3 or steel shots. The reason for this is the shape and mass of the erosive.

For all erosives, the lowest wear was shown at an angle of 60° , which indicates that the impact angle affects the erosion effect of ADI and ADI K materials.

KEYWORDS

Keywords: nodular cast iron, mechanical properties, austempering, misrostructure, shot peening, abrasion, erosion

SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

1. UVOD.....	1
1.1 DEFINIRANJE PROBLEMA.....	3
1.2 HIPOTEZA RADA.....	3
2. TEORETSKI DIO.....	5
2.1 NODULARNI LIJEV (NL)	5
2.1.1 Kemijski sastav i njegov utjecaj na svojstva nodularnog lijeva.....	7
2.1.1.1 Ugljik i silicij	7
2.1.1.2 Mangan	13
2.1.1.3 Sumpor.....	14
2.1.1.4 Fosfor.....	15
2.1.1.5 Magnezij	16
2.1.1.6 Cerij i rijetki elementi (RE).....	17
2.1.1.7 Bakar.....	18
2.1.1.8 Kositar	18
2.1.1.9 Molibden.....	19
2.1.1.10 Nikal	19
2.1.1.11 Krom.....	19
2.1.1.12 Vanadij.....	20
2.1.1.13 Bor	20
2.1.1.14 Štetni elementi.....	20
2.1.2 Mikrostruktura i mehanička svojstva nodularnog lijeva.....	21
2.1.2.1 Nodularnost grafita	24
2.1.2.2 Cijepljenje.....	27
2.1.2.3 Broj nodula	28
2.1.3 Klasifikacija nodularnog lijeva	29
2.1.4 Primjena nodularnog lijeva	31
2.2 IZOTERMIČKI POBOLJŠANI NODULARNI LIJEV (ADI).....	31
2.2.1 Utjecaj kemijskog sastava na svojstva ADI-a.....	33
2.2.2 Izotermička transformacija nodularnog lijeva	34
2.2.3 Mehanička svojstva i podjela ADI-a (usporedba s NL-om)	40
2.3 KUGLIČARENJE.....	43
2.3.1 Čimbenici koji utječu na učinak kugličarenja.....	43
2.3.2 Zaostala naprezanja unesena kugličarenjem.....	47
2.3.3 Strukturne promjene koje mogu nastati kugličarenjem	50

2.3.3.1	Dislokacije	50
2.3.3.2	Transformacija austenita u martenzit	51
2.4	METODE ISPITIVANJA OTPORNOSTI NA TROŠENJE	56
2.4.1	Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje	56
2.4.2	Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje	57
2.4.3	FZG metoda ispitivanja.....	58
2.5	RENDGENSKA DIFRAKCIJA (XRD).....	60
3.	EKSPERIMENTALNI DIO	62
3.1.	CILJ I METODE RADA	62
3.2.	ISPITIVANJE SVOJSTAVA NODULARNOG LIJEVA	63
3.2.1	Lijevanje odljevaka EN-GJS-600-3.....	63
3.2.1.1	Postupak lijevanja odljevaka i Y-proba.....	63
3.2.1.2	Sirovine korištene za proizvodnju EN-GJS-600-3	66
3.2.1.3	Kemijski sastav odljevaka EN-GJS-600-3	67
3.2.1.4	Ispitivanje homogenosti osnovnog materijala (X-ray metoda)	68
3.2.1.5	Analiza mikrostrukture nodularnog lijeva EN-GJS-600	69
3.2.1.6	Statičko vlačno ispitivanje.....	73
3.2.1.7	Ispitivanje tvrdoće.....	75
3.2.1.8	Ispitivanje udarnog rada loma	76
3.3.	IZRADA UZORAKA ZA TRIBOLOŠKA ISPITIVANJA	77
3.4.	PRVI CIKLUS ISPITIVANJA SVOJSTAVA IZOTERMIČKI POBOLJŠANOG NODULARNOG LIJEVA	80
3.4.1.	Postupak izotermičkog poboljšavanja	80
3.4.2.	Analiza mikrostrukture ADI-a.....	81
3.4.3.	Ispitivanje mehaničkih svojstava izotermički poboljšanog nodularnog lijeva	94
3.4.3.1.	Tvrdoća ADI materijala (ADI 380, ADI 240)	94
3.4.3.2.	Udarni rad loma ADI 240 i ADI 380.....	95
3.4.4.	Kugličarenje izotermički poboljšanog nodularnog lijeva	95
3.4.4.1.	Opis postupka kugličarenja	95
3.4.4.2.	Površinska tvrdoća kugličarenih uzoraka	99
3.4.5.	Ispitivanje otpornosti na trošenje.....	99
3.4.5.1.	Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje (kugličareni - nekugličareni uzorci).....	99
3.4.5.2.	Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje (kugličareni – nekugličareni uzorci)....	102
3.4.5.3.	FZG test	108
3.4.6.	Analiza kugličarenog ADI materijala.....	112
3.4.6.1	Mikrotvrdoća kugličarenog sloja.....	112
3.4.6.2	Analiza mikrostrukture kugličarenog ADI materijala.....	115
3.4.6.3	XRD analiza.....	125

3.5. DRUGI CIKLUS ISPITIVANJA SVOJSTAVA IZOTERMIČKI POBOLJŠANOG NODULARNOG LIJEVA	128
3.5.1. Izrada uzoraka za ispitivanje na trošenje	128
3.5.2. Izotermičko poboljšavanje	129
3.5.3. Kugličarenje	130
3.5.4. Ispitivanje površinske tvrdoće kugličarenih uzoraka	132
3.5.5. Mikrotvrdoća kugličarenog sloja	134
3.5.6. Otpornost na abrazijsko trošenje ADI 240 K i ADI 240	136
3.5.6.1 Abrazija ADI 240 K -- SiO ₂ - veliki	136
3.5.6.2 Abrazija ADI 240 K – SiO ₂ - mali	138
3.5.6.3 Abrazija ADI 240 K - Al ₂ O ₃	139
3.5.6.4 Abrazija različitim abrazivima nekugličarenih, površinski neobrađenih uzoraka ADI 240	141
3.5.6.5 Abrazija različitim abrazivima nekugličarenih, površinski obrađenih uzoraka ADI 240	142
3.5.6.6 Abrazija različitim abrazivima, različitim intenzitetom kugličarenih uzoraka ADI 240	144
3.5.7. Otpornost na erozijsko trošenje ADI 240 K i ADI 240	149
3.5.7.1 ADI 240 kugličaren intenzitetom „0,94 A“, erodiran različitim erozivima i kutovima erodiranja	149
3.5.7.2 ADI 240 kugličaren intenzitetom „1,04 A“, erodiran različitim erozivima i kutovima erodiranja	151
3.5.7.3 ADI 240 kugličaren intenzitetom „1,19 A“, erodiran različitim erozivima i kutovima erodiranja	152
3.5.7.4 ADI 240 kugličaren različitim intenzitetom, erodiran erozivom oznake SiO ₂ -veliki, pod promjenjivim kutom	154
3.5.7.5 ADI 240 kugličaren različitim intenzitetom, erodiran erozivom oznake Al ₂ O ₃ pod promjenjivim kutom	156
3.5.7.6 ADI 240 kugličaren različitim intenzitetom, erodiran čeličnim kuglicama pod promjenjivim kutom	159
3.5.7.7 ADI 240 nekugličaren, erodiran pod promjenjivim kutom, različitim erozivima	161
4. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA	167
5. ZAKLJUČAK	195
6. LITERATURA	198
PRILOZI	202

POPIS SLIKA

Slika 1: Usporedba svojstava različitih željeznih lijevova [5].....	6
Slika 2: Proizvodnja nodularnog lijeva u svijetu od 1950. godine [6].....	6
Slika 3: Prikaz ljevačke proizvodnje u R. Hrvatskoj od 1997. do 2007. godine [7].....	7
Slika 4: Optimalno područje ugljika i silicija u proizvodnji nodularnog lijeva [6].....	8
Slika 5: Utjecaj udjela ugljika na udarni rad loma feritnog nodularnog lijeva [10]	9
Slika 6: Utjecaj silicija na mehanička svojstva nelegiranog nodularnog lijeva u lijevanom i žarenom stanju (debljina stjenke 25 mm) [11]	10
Slika 7: Utjecaj silicija na udarni rad loma pri različitim temperaturama za feritni nodularni lijev [11].....	11
Slika 8: Utjecaj silicija na prijelaznu temperaturu udarnog rada loma [11]	11
Slika 9: Utjecaj silicija na prijelaznu temperaturu i udarni rad loma feritnog nodularnog lijeva [10].....	12
Slika 10: Udio C i Si u različitim vrstama željeznog lijeva [5]	13
Slika 11: Utjecaj udjela silicija i debljine stjenke na dopušteni udio mangana [11]	14
Slika 12: Utjecaj fosfora i silicija na udarni rad loma [10].....	15
Slika 13: Utjecaj fosfora i silicija na prijelaznu temperaturu udarnog rada loma [6,13].....	16
Slika 14: Mikrostruktura nodularnog lijeva nagriženog 4 % nitalom [15].....	21
Slika 15: Konvencionalna granica razvlačenja i vlačna čvrstoća nodularnog lijeva pri različitim udjelima perlita i nodularnostima [16]	22
Slika 16: Utjecaj mikrostrukture i temperature na udarni rad loma [13].....	23
Slika 17: Utjecaj debljine stjenke na mehanička svojstva nodularnog lijeva [16]	23
Slika 18: Klasifikacija grafita u Fe-C lijevovima vizualnim pregledom (100:1) [17].....	24
Slika 19: Normirane veličine grafitnih nodula (grafit oblika VI) u nodularnom lijevu (100:1) [17].....	25
Slika 20: Mikrostruktura nodularnog lijeva sa nodularnošću iznad 95 % [16]	25
Slika 21: Utjecaj nodularnosti feritnog nodularnog lijeva na udarni rad loma [13]	26
Slika 22: Utjecaj nodularnosti na vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja nodularnog lijeva [16]	26
Slika 23: Utjecaj udjela silicija (cjepivo) na broj nodula/mm ² za tri debljine stjenke [16]	27
Slika 24: Utjecaj broja nodula na udarni rad loma feritnog nodularnog lijeva [13]	28
Slika 25: Gustoća (specifična masa) po jedinici vlačne čvrstoće [13].....	32
Slika 26: Cijena po jedinici čvrstoće [13].....	32
Slika 27: Shematski prikaz postupka izotermičkog poboljšavanja [24]	35
Slika 28: Shematski prikaz ovisnosti istezljivosti i žilavosti o strukturnim procesima tijekom izotermičke pretvorbe [22].....	37
Slika 29: Shematski prikaz TTT-dijagrama izotermičkog poboljšavanja nodularnog lijeva [25].....	38
Slika 30: Shematski prikaz udjela faza tijekom izotermičke pretvorbe [26]	38
Slika 31: Mikrostruktura ADI-a [27]	39
Slika 32: Shematski prikaz usporedbe mehaničkih svojstava NL i ADI-a [21]	41
Slika 33: Lomna žilavost NL-a i ADI [13]	41
Slika 34: Dijagram ovisnosti kinetičke energije kuglica u odnosu na brzinu projiciranja mlaza i promjera kuglica [30].....	45
Slika 35: Dijagram utjecaja kuta udara na Almen intenzitet [32].....	46
Slika 36: Shematski prikaz profila teoretske razdiobe zaostalog naprezanja [33].....	47
Slika 37: Razdioba deformacije u području udara kuglice [30]	48
Slika 38: Dijagram usporedbe razdiobe tvrdoće po dubini za kugličareni i nekugličareni materijal [30].....	49

Slika 39: Razdioba tvrdoće po dubini materijala C67S [30]	49
Slika 40: Mikroskopski izgled dislokacija [34]	50
Slika 41: Položaj atoma ugljika u pretvorbi γ u α' rešetku [35].....	51
Slika 42: Bain-ov model pretvorbe FCC u BCT [36]	51
Slika 43: FCC Austenit [38]	52
Slika 44: BCT Martenzit [38]	52
Slika 45: Shematski prikaz pomicanja atoma i nastanak pločice martenzita [37].....	53
Slika 46: Prikaz raspodjele naprezanja u graničnoj ravni austenit - martenzit [35]	54
Slika 47: Reljef površine nastao formiranjem martenzita [35].....	54
Slika 48 a), b): Shematski prikaz razmještaja grupa martenzitnih pločica [35]	55
Slika 49: Skica uređaja „suhi pijesak/gumeni kotač“ [41].....	57
Slika 50: Princip uređaja za ispitivanje erozijskog trošenja suhim česticama [41]	58
Slika 51: Oblik zubi [42].....	59
Slika 52: Manji zupčanik obrađen Maagovim križnim brušenjem.....	59
Slika 53: Digitalni snimak rendgenskog difraktograma polikristalnog uzorka korunda [44] .	61
Slika 54: Mrežno frekventna indukcijska peć „MF-ILP 5/1600“ s loncem za noduliranje.....	64
Slika 55: Odljevci EN-GJS-600-3 [45].....	65
Slika 56: Odljevak Y-proba	66
Slika 57: Rendgenska cijev	68
Slika 58: Rendgenski snimak uzoraka (film).....	68
Slika 59: Uzorci za ispitivanje mikrostrukture EN-GJS-600.....	69
Slika 60: FE SEM, JEOL JSM – 6500F	70
Slika 61: a), b), c), d): EN-GJS-600-3 mikrostruktura snimljena svjetlosnim mikroskopom .	72
Slika 62: FE SEM snimci EN-GJS-600-3 mikrostrukture s različitim povećanjem.....	73
Slika 63: Uzorak za statičko vlačno ispitivanje	73
Slika 64: Dimenzije uzorka za statičko vlačno ispitivanje	74
Slika 65: Kidalica MAN 60	74
Slika 66: Tvrdomjer Emco-Test N3D 000.....	75
Slika 67: Charpy V uzorci za ispitivanje udarnog rada loma	76
Slika 68: Charpyjev bat.....	77
Slika 69: Uzorci za ispitivanje otpornosti na trošenje [46]: a) abrazija; b) erozija.....	77
Slika 70: Ispitni zupčanik.....	79
Slika 71: Zupčanici za FZG ispitivanje	80
Slika 72: Dijagrami izotermske pretvorbe.....	81
Slika 73: ADI 380 nagrižen 2% nitalom u trajanju od 5 s i pri povećanju 500X	82
Slika 74: Površina uzorka nagriženog 2% nitalom u trajanju od 5 s. (500X).....	83
Slika 75: ADI 380 nagrižen 2% nitalim u trajanju od 10 s i pri povećanju 500X	84
Slika 76: ADI 240 nagrižen 2% nitalim u trajanju od 5 s i pri povećanju 500X.....	85
Slika 77: Površina uzorka ADI 240 nagrižen 2% nitalim u trajanju od 5 s (500X)	86
Slika 78: ADI 240 nagrižen 2% nitalim u trajanju od 10 s i pri povećanju 500X.....	87
Slika 79: Sredina uzorka (2500X).....	88
Slika 80: Sredina uzorka (5000X).....	88
Slika 81: Sredina uzorka (10000X).....	89
Slika 82: Površina uzorka (1000X).....	89
Slika 83: Površina uzorka (2000X).....	90
Slika 84: Površina uzorka (3000X).....	90
Slika 85: Sredina uzorka (2500X).....	91
Slika 86: Sredina uzorka (5000X).....	91
Slika 87: Sredina uzorka (10000X).....	92
Slika 88: Površina uzorka (1000X).....	92

Slika 89: Površina uzorka (2000X).....	93
Slika 90: Površina uzorka (3000X).....	93
Slika 91: Uređaj za kugličarenje UZK-1	96
Slika 92: Nosač Almen trake s trakom na sebi	97
Slika 93: Dijagram ovisnosti visine Almen luka o vremenu izlaganja mlazu kuglica	98
Slika 94: Uređaj „suhi pijesak/gumeni kotač“	100
Slika 95: Izgled uzorka nakon ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje[46]	100
Slika 96: Gubitak mase uslijed trošenja na abraziju	101
Slika 97: Prosječni gubitak mase ADI 240 po ciklusu abradiranja	102
Slika 98: Uređaj za ispitivanje otpornosti na eroziju suhim česticama	102
Slika 99: Izgled unutrašnjosti uređaja za ispitivanje otpornosti na eroziju	103
Slika 100: Izgled uzorka nakon erodiranja[46].....	104
Slika 101: Kvarcni pijesak.....	104
Slika 102: Gubitak mase uzoraka ADI 240 ispitanih na trošenje pijeskom	105
Slika 103: Prosječni gubitak mase ADI 240 po ciklusu erodiranja pijeskom.....	105
Slika 104: Čelična kuglica	106
Slika 105: Gubitak mase uzoraka ADI 240 ispitanih na trošenje čeličnim kuglicama.....	107
Slika 106: Prosječan gubitak mase ADI 240 po ciklusu erodiranja kuglicama.....	107
Slika 107: FZG ispitni uređaj [49]	108
Slika 108: Zupčanički par u zahvatu [49].....	109
Slika 109: Gubitak mase zupčanika u odnosu na stupanj opterećenja [49].....	109
Slika 110: Gubitak mase zupčanika u odnosu na preneseni rad [49]	110
Slika 111: Površina bokova zubi zupčanika nakon ispitivanja [49]	110
Slika 112: Oštećenja površine zuba [49]	111
Slika 113: Mjesta gdje su bile nodule grafita - inicijalna mjesta pukotina [49]	111
Slika 114: Uzorci zubi pripremljeni za ispitivanje mikrotvrdoće.....	112
Slika 115: Mikroskop LEITZ METALLUX 3 s dodatnom opremom.....	113
Slika 116: Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku zuba zupčanika.....	114
Slika 117: Površina zuba (200X)	115
Slika 118: Sredina zuba (200X).....	115
Slika 119: Površina zuba (500X)	116
Slika 120: Sredina zuba (500X).....	116
Slika 121: Površina zuba (200X)	117
Slika 122: Sredina zuba (200X).....	117
Slika 123: Površina zuba (500X)	118
Slika 124: Sredina zuba (500X).....	118
Slika 125: Sredina zuba (2500X).....	119
Slika 126: Sredina zuba (5000X).....	119
Slika 127: Sredina zuba (10000X).....	120
Slika 128: Površina zuba (1000X)	120
Slika 129: Površina uzorka (2000X).....	121
Slika 130: Površina uzorka (3000X).....	121
Slika 131: Sredina zuba (2500X).....	122
Slika 132: Sredina zuba (5000X).....	122
Slika 133: Sredina zuba (10000X).....	123
Slika 134: Površina zuba (1000X)	123
Slika 135: Površina zuba (2000X)	124
Slika 136: Površina zuba (3000X)	124
Slika 137: Uzorci pripremljeni za snimanje difraktograma	125
Slika 138: Pregledni difraktogram svih pet uzoraka (ADI + EN-GJS-600-3).....	126

Slika 139: Detaljni difraktogram ADI uzoraka (380, 380 K, 240, 240 K)	127
Slika 140: Kada s kupkom, uzorci nakon ADI postupka, peć	129
Slika 141: Košarica s uzorcima nakon vađenja iz solne kupke	130
Slika 142: Manometar na ulazu u napravu za kugličarenje	131
Slika 143: Uzorci na kojima je ispitana tvrdoća	132
Slika 144: Tvrdomjer Wolpert	133
Slika 145: Mikro tvrdomjer PMT-2	134
Slika 146: Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku uzorka ADI 240 K i ADI 240	135
Slika 147: Kumulativni gubitak mase ADI 240 K uslijed abrazije abrazivom oznake SiO ₂ – veliki	137
Slika 148: Prosjek gubitka mase ADI 240 K za sva tri ciklusa abrazije abrazivom oznake SiO ₂ - veliki	137
Slika 149: Kumulativni gubitak mase ADI 240 K uslijed abrazije abrazivom oznake SiO ₂ – mali	138
Slika 150: Prosjek gubitka mase ADI 240 K za sva tri ciklusa abrazije abrazivom oznake SiO ₂ - mali	139
Slika 151: Kumulativni gubitak mase ADI 240 K uslijed abrazije abrazivom oznake Al ₂ O ₃	140
Slika 152: Prosjek gubitka mase ADI 240 K za sva tri ciklusa abrazije abrazivom oznake Al ₂ O ₃	140
Slika 153: Kumulativni gubitak mase nekugličarenog ADI 240, mehanički neobrađenog	141
Slika 154: Prosjek gubitka mase ADI 240 za sva tri ciklusa abrazije različitim abrazivima	142
Slika 155: Kumulativni gubitak mase nekugličarenog ADI 240, mehanički obrađenog	143
Slika 156: Prosječan gubitak mase ADI 240, za tri ciklusa abrazije različitim abrazivima	143
Slika 157: Kumulativni gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“), uslijed abrazije različitim abrazivima	145
Slika 158: Prosječan gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“), za tri ciklusa abrazije različitim abrazivima	145
Slika 159: Kumulativni gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“), uslijed abrazije različitim abrazivima	146
Slika 160: Prosječan gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“), za tri ciklusa abrazije različitim abrazivima	147
Slika 161: Kumulativni gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“), uslijed abrazije različitim abrazivima	148
Slika 162: Prosječan gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“), za tri ciklusa abrazije različitim abrazivima	148
Slika 163: Gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“), uslijed erodiranja različitim erozivima i pod različitim kutovima	150
Slika 164: Prosječan gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“) za različite erozive	150
Slika 165: Gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“), uslijed erodiranja različitim erozivima i različitim kutovima	151
Slika 166: Prosječan gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“), za različite erozive	152
Slika 167: Gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“), uslijed erodiranja različitim erozivima i različitim kutovima	153
Slika 168: Prosječni gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“), za različite erozive	153
Slika 169: Gubitak mase ADI 240 K po kutu erodiranja erozivom oznake SiO ₂ – veliki	154
Slika 170: Gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“) erodiranog erozivom oznake SiO ₂ - veliki, po kutu erodiranja	155
Slika 171: Gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“) erodiranog erozivom oznake SiO ₂ – veliki, po kutu erodiranja	155

Slika 172: Gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“) uslijed erodiranog erozivom oznake SiO ₂ - veliki, po kutu erodiranja.....	156
Slika 173: Gubitak mase ADI 240 K po kutu erodiranja erozivom oznake Al ₂ O ₃ , za različite intenzitete kugličarenja	157
Slika 174: Gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“) erodiranog erozivom oznake Al ₂ O ₃ , po kutu erodiranja	157
Slika 175: Gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“) erodiranog erozivom oznake Al ₂ O ₃ , po kutu erodiranja	158
Slika 176: Gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“) erodiranog erozivom oznake Al ₂ O ₃ , po kutu erodiranja	158
Slika 177: Gubitak mase ADI 240 K po kutu erodiranja čeličnim kuglicama	159
Slika 178: Gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“) erodiranog čeličnim kuglicama, po kutu erodiranja	160
Slika 179: Gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“) erodiranog čeličnim kuglicama, po kutu erodiranja	160
Slika 180: Gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“) erodiranog čeličnim kuglicama, po kutu erodiranja	161
Slika 181: Gubitak mase po kutu erodiranja različitim erozivima	162
Slika 182: Gubitak mase po kutu erodiranja, nekugličarenog, neobrađenog ADI 240, uslijed erodiranja erozivom oznake SiO ₂ - veliki.....	162
Slika 183: Gubitak mase po kutu erodiranja, nekugličarenog, neobrađenog ADI 240, uslijed erodiranja erozivom oznake Al ₂ O ₃	163
Slika 184: Gubitak mase po kutu erodiranja, nekugličarenog, neobrađenog ADI 240, uslijed erodiranja čeličnim kuglicama.....	163
Slika 185: Gubitak mase po kutu erodiranja strojno obrađenih uzoraka ADI 240.....	164
Slika 186: Gubitak mase po kutu erodiranja nekugličarenog, glodanog ADI 240, uslijed erodiranja erozivom oznake SiO ₂ - veliki.....	165
Slika 187: Gubitak mase po kutu erodiranja nekugličarenog, glodanog ADI 240, uslijed erodiranja erozivom oznake Al ₂ O ₃	165
Slika 188: Gubitak mase po kutu erodiranja nekugličarenog, glodanog ADI 240, uslijed erodiranja čeličnim kuglicama.....	166
Slika 189: Shematski prikaz nastanka i razvoje pukotina u području nodula grafita [54]	174
Slika 190: Pregledni difraktogram uzoraka ADI 380 i ADI 380 K	177
Slika 191: Detaljni difraktogram uzoraka ADI 380 i ADI 380 K.....	178
Slika 192: Pregledni difraktogram uzoraka ADI 240 i ADI 240 K.....	179
Slika 193: Detaljni difraktogram uzoraka ADI 240 i ADI 240 K.....	180

POPIS TABLICA

Tablica 1: Normom propisane minimalne vrijednosti mehaničkih svojstava nodularnog lijeva [19].....	29
Tablica 2: Normom propisani udarni rad loma nodularnog lijeva, ovisno o debljini stjenke [19].....	30
Tablica 3: Normiranje nodularnog lijeva prema tvrdoći [19].....	30
Tablica 4: Sastav nodularnog lijeva prikladan za izotermičko poboljšavanje [21]	34
Tablica 5: Normom EN 1564:2011 propisane minimalne vrijednosti vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i istezljivosti za različite debljine stjenke ADI-a [23]	40
Tablica 6: Normom EN 1564 : 2011 propisane vrijednosti tvrdoće ADI-a [23].....	42
Tablica 7: Normom EN 1564:2011 propisane vrijednosti udarnog rada loma za ADI [23]..	42
Tablica 8: Kemijski sastav niskomanganskog željeza	66
Tablica 9: Kemijski sastav čeličnih limova	66
Tablica 10: Kemijski sastav nodulatora	67
Tablica 11: Kemijski sastav cjepiva	67
Tablica 12: Kemijski sastav uzoraka EN-GJS-600-3	67
Tablica 13: Rezultat statičkog vlačnog ispitivanja EN-GJS-600-3	75
Tablica 14: Tvrdoća EN-GJS-600-3	75
Tablica 15: Udarni rad loma EN-GJS-600-3	77
Tablica 16: Način označavanja uzoraka [46].....	78
Tablica 17: Tvrdoća ADI 380	94
Tablica 18: Tvrdoća ADI 240	94
Tablica 19: Površinska tvrdoća uzoraka za ispitivanje otpornosti na trošenje ADI 240	94
Tablica 20: Udarni rad loma ADI 380	95
Tablica 21: Udarni rad loma ADI 240	95
Tablica 22: Srednje vrijednosti visina Almen luka ovisno o tlaku i vremenu izlaganja mlazu kuglica.....	98
Tablica 23: Srednje vrijednosti površinske tvrdoće kugličarenih uzoraka ADI 240 K	99
Tablica 24: Parametri ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje [46]	100
Tablica 25: Masa uzoraka ADI 240 nakon svakog ciklusa abradiranja [46].....	101
Tablica 26: Parametri ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje	103
Tablica 27: Masa uzoraka ADI 240 nakon svakog ciklusa erodiranja pijeskom [46]	104
Tablica 28: Masa uzoraka ADI 240 nakon svakog ciklusa erodiranja kuglicama [46]	106
Tablica 29: Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku zuba zupčanika	114
Tablica 30: Način označavanja uzoraka za prošireno ispitivanje	128
Tablica 31: Površinska tvrdoća nekugličarenih uzoraka za ispitivanje otpornosti na trošenje ADI 240	133
Tablica 32: Srednje vrijednosti površinske tvrdoće kugličarenih uzoraka ADI 240	133
Tablica 33: Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku kugličarenog i nekugličarenog ADI 240.....	135
Tablica 34: Gubitak mase ADI 240 K uslijed abrazije abrazivom oznake SiO ₂ - veliki.....	136
Tablica 35: Gubitak mase ADI 240 K uslijed abrazije abrazivom oznake SiO ₂ - mali	138
Tablica 36: Gubitak mase ADI 240 K uslijed abrazije abrazivom oznake Al ₂ O ₃	139
Tablica 37: Gubitak mase površinski neobrađenih uzoraka ADI 240 uslijed abrazije različitim abrazivima.....	141
Tablica 38: Gubitak mase mehanički obrađenog ADI 240 uslijed abrazije različitim abrazivima.....	142
Tablica 39: Gubitak mase uzoraka ADI 240 K („0,94 A“) uslijed abrazije različitim abrazivima.....	144

Tablica 40: Gubitak mase uzoraka ADI 240 K („1,04 A“) uslijed abrazije različitim abrazivima.....	146
Tablica 41: Gubitak mase uzoraka ADI 240 K („1,19 A“) uslijed abrazije različitim abrazivima.....	147
Tablica 42: Prosječan gubitak mase uzoraka ADI 240 K („0,94 A“) nakon erodiranja različitim erozivima i kutevima	149
Tablica 43: Gubitak mase uzoraka ADI 240 K („1,04 A“) nakon erodiranja različitim erozivima i kutevima erodiranja.	151
Tablica 44: Gubitak mase uzoraka ADI 240 K („1,19 A“) nakon erodiranja različitim erozivima i kutevima erodiranja.	152
Tablica 45: Rezultati ispitivanja ADI 240 K na eroziju erozivom oznake SiO ₂ – veliki	154
Tablica 46: Rezultati ispitivanja ADI 240 K na eroziju erozivom oznake Al ₂ O ₃	156
Tablica 47: Rezultati ispitivanja ADI 240 K na eroziju čeličnim kuglicama	159
Tablica 48: Gubitak mase po kutu erodiranja različitim erozivima, uzoraka nekugličarenog, strojno neobrađenog ADI 240.....	161
Tablica 49: Gubitak mase uzoraka strojno obrađenog ADI 240, nakon erodiranja različitim erozivima i kutevima erodiranja	164
Tablica 50: Ukupan broj pokusa	187
Tablica 51: Rezultati statističke analize abrazijskog trošenja s tri različita abraziva	188
Tablica 52: Ukupan broj ispitivanja na eroziju s tri različita eroziva, za različite intenzitete kugličarenja i različite kuteve erodiranja	189
Tablica 53: Rezultati statističke analize erozijskog trošenja s tri različita eroziva, za različite intenzitete kugličarenja i različite kutove erodiranja	190
Tablica 54: Broj ponavljanja pokusa za svaku udaljenost od površine	193
Tablica 55: Rezultati statističke analize mikrotvrdoće, za različite udaljenost od površine i intenzitete kugličarenja	193
Tablica 56 - Optimalni intenzitet kugličarenja pri abrazijskom trošenju različitim abrazivima	194
Tablica 57 - Optimalni intenzitet kugličarenja pri erozijskom trošenju različitim erozivima i kutovima upada čestica	194

OZNAKE PREMA LATINSKOJ ABECEDI:

OZNAKA	OPIS OZNAKE	MJERNA JEDINICA
<i>A</i>	istezljivost	%
ADI	(Austempered Ductile Iron) izotermički poboljšani nodularni lijev	-
B	bainit	-
<i>b</i>	korisna širina zupca	Mm
<i>C</i> ₁	prekrivenost nakon jednog prolaza mlaza kuglica	%
CE	ekvivalent ugljika	-
<i>C</i> _{<i>n</i>}	prekrivenosti nakon <i>n</i> prolaza mlaza kuglica	%
<i>d</i> _{b1}	promjer dodirne kružnice manjeg zupčanika	Mm
<i>d</i> _{b2}	promjer dodirne kružnice većeg zupčanika	Mm
<i>d</i> _{hkl}	udaljenost susjednih mrežnih ravnina određen pomoću Millerovih indeksa	-
<i>d</i> _{v1}	promjer tjemene kružnice manjeg zupčanika	Mm
<i>d</i> _{v2}	promjer tjemene kružnice većeg zupčanika	Mm
<i>E</i> _k	kinetička energija	kg·m ² / s ²
EMV	elektromagnetski valovi	-
<i>F</i>	sila kojom kotač pritišće uzorak	N
FZG	Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (Ispitni uređaj za transmisiju i mjenjače)	-
<i>g</i> _a	dužina dodirnice manjeg zupčanika	Mm
<i>g</i> ₁	dužina dodirnice većeg zupčanika	Mm
HB	tvrdoća po Brinellu	-
HRC	tvrdoća po Rockwellu	-
HV	tvrdoća po Vickersu	-
<i>I</i>	intenzitet kugličarenja	A
<i>KV</i>	udarni rad loma	J
<i>l</i>	razmak osi	Mm
LT	(low temperature) niska temperatura	°C
<i>m</i>	modul zupčanika	Mm
NL	nodularni lijev	-

P	perlit	-
p_{k1}	Hertzov tlak na glavi manjeg zupca	MPa
p_{k2}	Hertzov tlak na glavi većeg zupca	MPa
Pr	prekrivenost površine	%
R_m	vlačna čvrstoća	MPa
$R_{p0,2}$	konvencionalna granica razvlačenja	MPa
RT	(room temperature) sobna temperatura	°C
S_c	stupanj zasićenja	-
V_d	brzina na dodirnoj kružnici	m/s
V_δ	brzina abraziva	m/s
v_{g1}	najveća klizna brzina manjeg zupčanika	m/s
v_{g2}	najveća klizna brzina većeg zupčanika	m/s
\bar{X}	srednja vrijednost	-
x_1	pomak profila manjeg zupčanika	Mm
x_2	pomak profila većeg zupčanika	Mm
XRD	rendgenska difrakcija	-
y	zavisna varijabla	-
z_1	broj zubaca manjeg zupčanika	-
z_2	broj zubaca većeg zupčanika	-

OZNAKE PREMA GRČKOJ ABECEDI:

OZNAKA	OPIS OZNAKE	MJERNA JEDINICA
α	ferit	-
α_1	kut zahvata manjeg zupčanika	stupanj (°)
α_w	kut zahvata većeg zupčanika	stupanj (°)
β_0	konstantni član	-
β_1	regresijski koeficijent	-
σ	površinsko naprezanje (naprezanje izmjereno na površini)	MPa
σ^-_{\max}	najveće tlačno naprezanje (najveći iznos unesenog tlačnog naprezanja)	MPa
σ^+_{\max}	najveće vlačno naprezanje (najveći iznos unesenog vlačnog naprezanja)	MPa
γ_{HD}	ugljikom bogati austenit	-
γ_o	austenit	-
ΔV	promjena volumena kod trošenja	mm ³
\mathcal{G}_a	temperatura austenitizacije	°C
\mathcal{G}_{iz}	temperatura izotermičke pretvorbe	°C

1. UVOD

Život čovječanstva, kroz cjelokupnu povijest, određen je postojanjem, otkrivanjem, proizvodnjom te preradom i primjenom određenih materijala. U početku su to bili prirodni materijali kao što su drvo, kamen, glina, koža i kosti, koji su uz pomoć vještine oblikovani na različite primitivne načine (bušenjem, brušenjem, rezanjem, lomljenjem) u oruđe, oružje te ostale predmete za svakidašnju uporabu. Kasnije su na temelju iskustva proizvedeni prvi tehnički materijali kao što su bronca, željezni ljevovi i nelegirani čelici.

Tek se u novijoj povijesti, koristeći kvantitativna znanja iz matematike, fizike, kemije i ostalih područja primjenom znanstvenih i istraživačkih pristupa, otkrivaju postupci za dobivanje suvremenijih materijala npr. legiranih čelika, željeznih ljevova, aluminijskih legura, polimernih materijala i slično.

Inovacije u konstrukcijskom oblikovanju proizvoda i u procesima proizvodnje bitno su određene svojstvima tehničkih materijala. Dosadašnja iskustva pokazuju da se primjenom novih materijala i tehnologija ostvaruju značajne prednosti na tržištu što je primarni cilj svih istraživanja pa i ovog.

Primjena suvremenih materijala dovodi do razvoja proizvoda poboljšanih karakteristika, naročito u industriji strojeva i alata, industriji vozila, energetskim i procesnim postrojenjima itd. Današnji se razvoj materijala odvija primjenom znanstvenih pristupa, interdisciplinarnom suradnjom fundamentalnih i primijenjenih disciplina, kvantitativnih metoda i računala, a ne kao nekada na temelju vještina i empirije. Zahvaljujući navedenim karakteristikama istraživanja, znanost i inženjerstvo materijala obilježavaju generiranje novih spoznaja o vezama između sastava, mikrostrukture te svojstava i ponašanja materijala.

Proizvodnja novih materijala usko je povezana s postupcima koji bi se uvjetno mogli nazvati "tehnologijama materijala". Radi se o svim onim postupcima tijekom kojih se bitno mijenja sastav i struktura, odnosno formiraju svojstva materijala, a često i svojstva konačnog proizvoda. To su npr. klasični postupci lijevanja, postupci oblikovanja, postupci modificiranja i prevlačenja površina itd. [1].

Tehnologija lijevanja jedna je od najstarijih i najdjelotvornijih načina oblikovanja predmeta od metala. Rastaljeni metal oblikuje se ulijevanjem u kalupe na način da poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine i zadržava ga nakon skrućivanja. Visoka produktivnost i laka mogućnost izrade replika čine tu tehnologiju iznimno pogodnom za serijsku i masovnu proizvodnju. To je često i jedina tehnologija kojom se mogu izraditi vrlo složeni dijelovi s unutarnjim šupljinama ili za velika i masivna kućišta strojeva.

Problemi s kvalitetom odljevaka pojavili su se odmah u početku, prije šest tisuća godina, pojavom poroznosti pri lijevanju bakrenih legura. Na tehnološko unaprjeđenje lijevanja moralo se čekati skoro tisuću godina da bi ga se primijenilo tek kod lijevanja bronce. Nakon toga uslijedio je ubrzan razvoj ove tehnologije izradom boljih peći i kvalitetnijim rješenjima kalupa. Tijekom prve polovine srednjeg vijeka došlo je do zastoja u razvoju ljevarstva kao i svih ostalih djelatnosti. Sve do kraja 19. stoljeća ljevarstvo odlikuje individualna proizvodnja, gdje dominira majstor-pojedinaac. Krajem 19. i početkom 20. stoljeća konstruirana je kupolna peć koja donosi promjene u koncepciji po kojoj se proizvodnja bazira na sofisticiranim strojevima, a ne kao ranije na kvalificiranim radnicima-majstorima [2].

Za dobivanje svakog lijevanog proizvoda/materijala postoje određene specifičnosti u procesu lijevanja koje treba poštivati kako bi se dobila zahtijevana struktura, a time i svojstva. Stoga ljevarstvo još uvijek spada u rizične tehnologije, jer je proces kontinuiran, pa ga je teško u cijelosti kontrolirati. Sve navedeno posebno vrijedi za nodularni lijev, čije su otkriće i razvoj dio novije metalurške povijesti.

Nodularni lijev ima znatno veću čvrstoću od sivog lijeva, ali mu je sposobnost prigušivanja vibracija i obradivost lošija od one koju ima sivi lijev. Posebna prednost nodularnog lijeva, u odnosu na sivi lijev i nelegirane čelike, je visina granice razvlačenja. Obzirom da kemijski i fizikalni utjecaji koji povisuju granicu razvlačenja, snižavaju vrijednost udarne žilavosti, kod nodularnog lijeva su u dobroj međusobnoj recipročnoj vezi granica razvlačenja i udarna žilavost. Dobra mehanička svojstva nodularnog lijeva su posljedica povoljne mikrostrukture koja se postiže već u lijevanom stanju, a ovisi o kemijskom sastavu te metalurškim postupcima. Naknadnim toplinskim i mehaničkim obradama ranije spomenuta svojstva odljevaka mogu se dodatno poboljšati [3].

Sve su to razlozi stalnog porasta proizvodnje nodularnog lijeva od njegovog otkrića do danas.

Ovaj je rad usmjeren na istraživanje postupaka modifikacije površine izotermički poboljšanog nodularnog lijeva (eng. Austempered Ductile Iron-ADI) s ciljem poboljšavanja njegovih mehaničkih svojstava.

Ispitivanje stvarnih uzoraka-zupčanika, pripremljenih na bazi analize rezultata ispitivanjem epruveta, dovest će do zaključka o mogućnosti i ekonomskoj opravdanosti njegove praktične primjene.

1.1 DEFINIRANJE PROBLEMA

Rezultati dosadašnjih istraživanja i praktična iskustva korištenja nodularnog lijeva razlog su njegove značajne primjene u strojogradnji.

Dobra mehanička svojstva u lijevanom stanju, niža cijena proizvodnje u odnosu na čelik i mogućnost dodatnog poboljšavanja mehaničkih svojstava, razlog su zašto se taj materijal i dalje istražuje. Mogućnost dodatnog poboljšavanja mehaničkih svojstava toplinskim i mehaničkim obradama bitno su proširili njegovu upotrebu.

Danas se u primjeni nalaze različiti tipovi izotermički poboljšanog nodularnog lijeva sa svojstvima ovisnim o vremenu i temperaturi austenitizacije, temperaturi izotermičke pretvorbe te kemijskom sastavu lijevanog materijala.

Kombinacijom tih parametara mogu se postići vrlo dobra svojstva ADI materijala s vlačnom čvrstoćom (R_m) do 1400 MPa, tvrdoćom iznad 45 HRC te istežljivosti 1-3 %. Obzirom na ranije navedene komparativne prednosti tog materijala u odnosu na čelik te bolju obradivost, manju gustoću, izotermički poboljšan lijev primjenjuje se u strojogradnji već više od četrdeset godina. Osnovni ograničavajući faktor u još široj primjeni tog materijala (npr. kod elemenata opterećenih visokim dinamičkim-promjenljivim opterećenjem) je relativno slaba otpornost na različite mehanizme trošenja što je posljedica mikrostrukture ADI-a.

1.2 HIPOTEZA RADA

Mikrostruktura izotermički poboljšanog nodularnog lijeva može imati 15-40 % austenita kojeg je moguće hladnom deformacijom transformirati u martenzit. Optimalnim parametrima postupka kugličarenja (dimenzijom i oblikom kuglica, brzinom i kutom udara) deformirat će se površina ADI-a i ostvariti dijelom martenzitna struktura. Promjenom mikrostrukture površine doći će do povećanja tvrdoće i krutosti što omogućuje primjenu ADI-a i za izradu vrlo opterećenih dijelova u eksploataciji. Unosom površinskih zaostalih tlačnih naprezanja smanjit će se mogućnost nastajanja i širenja mikropukotina, uzrokovanih promjenljivim površinskim opterećenjem.

Cilj ovog rada je istražiti mogućnosti stvaranja nove kombinacije svojstava ADI-a, kako bi se dobio materijal lakši od čelika, jeftiniji i jednostavniji za strojnu obradu, a zadovoljavajuće otpornosti na trošenje. Predložena istraživanja ostvarit će doprinos u razumijevanju i primjeni postojećih tehnologija u obradi ADI-a .

Pretpostavljena je slijedeća hipoteza:

- *Povećanjem intenziteta kugličarenja površine izotermički poboljšanog nodularnog lijeva moguće je povećati njegovu otpornost u uvjetima abrazijskog i erozijskog trošenja.*

2. TEORETSKI DIO

2.1 NODULARNI LIJEV (NL)

Ljevovi na bazi željeza dijele se prema obliku izlučenog grafita. Temeljem tog kriterija razlikuje se pet vrsta lijevanih željeza: bijelo, temper, sivo, nodularno i vermikularno. Nodularni ili žilavi lijev je kvaziternarna legura željeza i ugljika koji je pretežno izlučen u obliku kuglastog grafita.

C. Adey je 1938. godine proizveo lijev s kuglicama grafita intenzivnim pregrijavanjem sivog lijeva pod bazičnom troskom. H. Morroh i W. J. Williams su 1948. godine prvi put uspjeli dobiti nodularni lijev dodavanjem 0,5 % cerija nadeutektičkom sivom lijevu. K. D. Millis, A. P. Gagnebin i N. B. Pilling, dodavanjem 0,5 % magnezija podeutektičkom sivom lijevu, proizveli su odljevke u kojima je grafit bio izlučen u obliku kuglica. Taj postupak je bio znatno jeftiniji, pa je potisnuo postupak s cerijem.

Nodularni lijev patentiran je 1949. godine [3]. Prije tog vremena lijevaonice željeznog lijeva bile su sposobne proizvoditi odljevke maksimalne čvrstoće 300 MPa i bez žilavosti, što je značajno ograničavalo upotrebu željeznih lijevova. Za odljevke gdje se zahtijevala kombinacija čvrstoće i žilavosti, koristio se čelični lijev, odnosno kovkasti (temper) lijev. Taj materijal je bio ograničen mogućom debljinom stjenke odljevka, ostvarivom vlačnom čvrstoćom i troškovima nužne visoko temperaturne toplinske obrade, te ujedno s opasnošću od distorzija. Nodularni lijev ima iste faze kao i sivi lijev samo što se razlikuju po obliku grafita. Dok je u sivom lijevu grafit izlučen u obliku listića, dotle je kod nodularnog lijeva izlučen u obliku kuglica [4].

Štetna djelovanja koja se zbog grafitnih listića odražavaju na čvrstoću, rastezljivost i žilavost sivog lijeva, u nodularnom su lijevu zbog kuglica grafita izbjegnuta. Taj lijev je u prednosti ispred sivog i čeličnog lijeva jer ima dobru žilavost i čvrstoću jednaku nelegiranom čeličnom lijevu, a livljivost dobru kao sivi lijev. Osim toga, puno se lakše obrađuje odvajanjem čestica nego čelični lijev, zbog čega se njegova upotreba stalno širi, posebice u strojogradnji zbog mogućeg postizanja povoljne kombinacije svojstava istezljivosti, žilavosti, čvrstoće i otpornosti na trošenje, uz jeftinu proizvodnju u odnosu na ostale željezne ljevove.

Uz niz prednosti u odnosu na ostale ljevove nodularni lijev ima i nedostatke.

Zbog grafitnih kuglica ima manju sposobnost prigušivanja vibracija [4].

Slika 1 prikazuje usporedbu svojstava nodularnog, kovkastog, sivog, čeličnog i bijelog tvrdog lijeva.

Karakteristike	Nodularni lijev	Kovkasti lijev	Sivi lijev	Čelični lijev s 0,3%C	Bijeli tvrdi lijev
Livljivost	Black	Blue	Black	Orange	Green
Obradivost	Blue	Blue	Black	Green	NP
Prigušenje vibracija	Blue	Blue	Black	Orange	Orange
Zakaljivost	Black	Black	Black	Green	NP
Modul elastičnosti	Black	Blue	Green	Black	NP
Otpornost na udarce	Blue	Green	Yellow	Black	NP
Otpornost koroziji	Black	Blue	Black	Orange	Blue
Čvrstoća/ masa	Black	Orange	Yellow	Green	NP
Otpornost trošenju	Blue	Orange	Green	Yellow	Black
Troškovi proizvodnje	Blue	Green	Black	Orange	Green

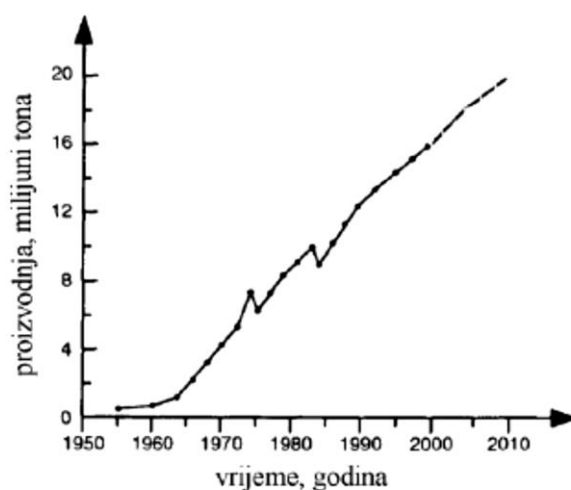
NP – NIJE PRIMJENJIVO



Slika 1: Usporedba svojstava različitih željeznih ljevova [5]

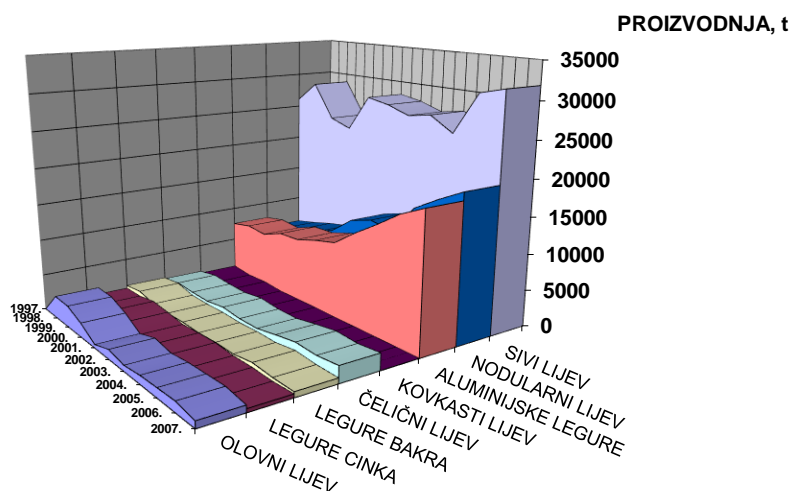
Razvoj nodularnog ljeva od 1949. godine promijenio je odnose u uporabi materijala na bazi željeza u svijetu, tako da je danas upravo to materijal koji je uvelike zamijenio ostale ljeveve i čelične otkivke.

Dobra svojstava i niski troškovi proizvodnje po jedinici čvrstoće, u odnosu na konkurentne materijale, doveli su do stalnog rasta svjetske proizvodnje nodularnog ljeva, kako je prikazano na slici 2.



Slika 2: Proizvodnja nodularnog ljeva u svijetu od 1950. godine [6]

Proizvodnja većine vrsta odljevaka u Hrvatskoj od 1997. do 2007. godine bilježi uglavnom stagnaciju ili pad, dok odljevci od nodularnog ljeva imaju značajan porast. Kretanje proizvodnje odljevaka u tom periodu prikazano je na slici 3.



Slika 3: Prikaz ljevačke proizvodnje u R. Hrvatskoj od 1997. do 2007. godine [7]

I u Hrvatskoj, nodularni lijev, zbog svojih mehaničkih svojstava, uspješno zamjenjuje sivi i čelični lijev, što je razlog odnosa ostvarene proizvodnje odljevaka vidljivih u gornjem histogramu.

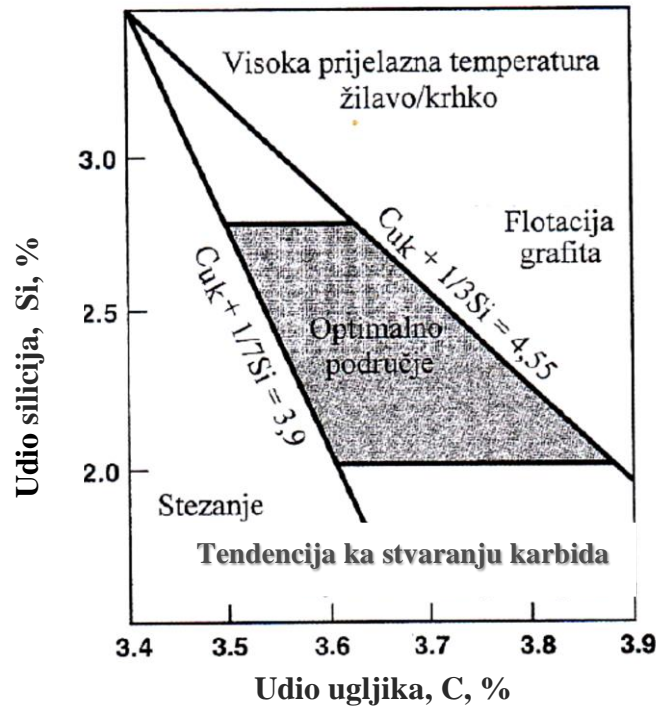
2.1.1 Kemijski sastav i njegov utjecaj na svojstva nodularnog lijeva

Nodularni lijev je visokougljična željezna legura, kod koje se ugljik izlučuje u obliku kuglica grafitu. Mikrostruktura i mehanička svojstva nodularnog lijeva ovise o kemijskom sastavu i uvjetima pri skrućivanju taline. Kemijski sastav je važan faktor koji utječe na oblik grafitu i strukturu metalne matrice. U nastavku je dat prikaz kemijskih elemenata (prema važnosti/utjecaju) koji se koriste u proizvodnji nodularnog lijeva i njihov utjecaj na mikrostrukturu i mehanička svojstva.

2.1.1.1 Ugljik i silicij

Udio ugljika, a posebno silicija ima značajan utjecaj na mikrostrukturu u lijevanom stanju [6].

Područja mogućih udjela i optimalni udio ugljika i silicija prikazani su u Handersenovom dijagramu, slika 4.



Slika 4: Optimalno područje ugljika i silicija u proizvodnji nodularnog lijeva [6]

Dijagram na slici 4 definira optimalni udio ugljika u nodularnom lijevu, koji se kreće u granicama 3,5-3,9 % ovisno o udjelu silicija i osigurava približno eutektički sastav lijeva ($CE \sim 4,3$). Udio ugljika, silicija (i fosfora) može se promatrati zajedno i izraziti preko stupnja zasićenja S_c :

$$S_c = \frac{\%C}{4.3 - 0.3(\%Si + \%P)} \quad (2.1)$$

Kad je S_c manji od 1, nodularni lijev je podeutektičkog sastava, a ako je S_c veći od 1, govori se o nadeutektičkom sastavu. U slučaju kad je S_c jednak 1, radi se o eutektičkom sastavu. Češći slučaj iskazivanja sastava nodularnog lijeva je preko ekvivalenta ugljika CE.

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \quad (2.2)$$

Ako je vrijednost ekvivalenta ugljika niža od 4,3 (podeutektička legura) prva faza koja nastaje pri skrućivanju je austenit, zbog čega na početku skrućivanja dolazi do stezanja.

U slučaju kad je ekvivalent ugljika, $CE = 4,3$ govori se o eutektičkom sastavu, pa odmah na početku skrućivanja započinje eutektička reakcija i izlučivanje sekundarnog grafita. Grafit je alotropska modifikacija ugljika i ima značajno manju gustoću ($2,2 \text{ g/cm}^3$) u odnosu na talinu

($\sim 7,0 \text{ g/cm}^3$). Zbog razlike u gustoćama, tijekom izlučivanja grafita dolazi do porasta volumena, odnosno ekspanzije.

Kad je vrijednost ekvivalenta ugljika veća od 4,3 (nadeutektička legura) kao prva faza, isto kao kod eutektičkog sastava, izlučuje se primarni grafit, što dovodi do ekspanzije [8].

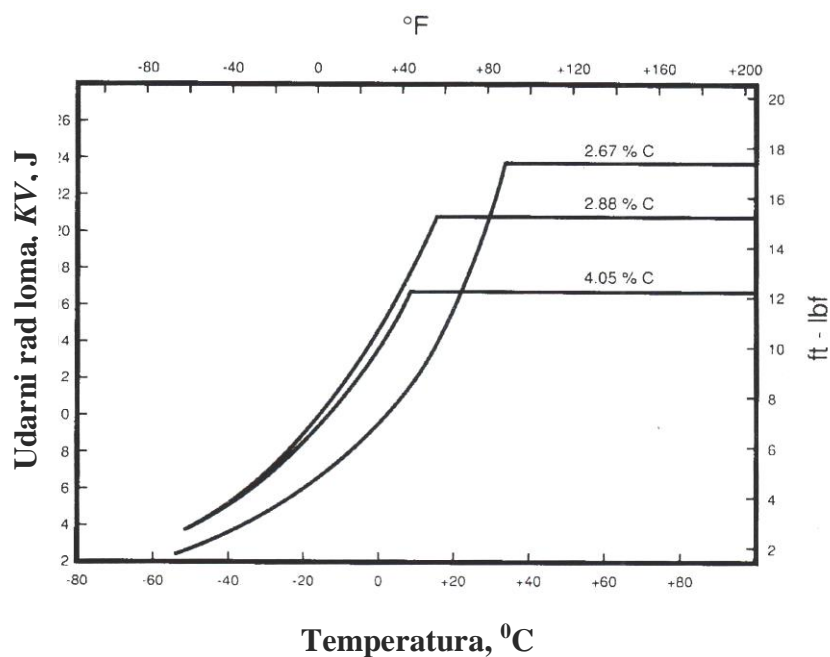
CE se računa iz poznatog kemijskog sastava, a nije ga moguće mjeriti.

Prema jednadžbi (2.2.) ista vrijednost CE se može dobiti s različitim udjelima C, Si i P, ali se pri tom ne dobivaju ista svojstva lijeva. Na primjer, ugljik ima dva puta veći utjecaj na sprječavanje skupljanja pri skrućivanju nego što to pokazuje CE [9]. Stoga treba biti vrlo oprezan pri interpretaciji navedene jednadžbe.

Prevelik udio ugljika može uzrokovati isplivavanje (flotaciju) kuglica grafita kod odljevaka deblje stjenke. Razlog tome je mala brzina hlađenja, koja osim flotacije, rezultira i degeneracijom nodula što ima negativan učinak na mehanička svojstva lijeva .

Kod tanjih stjenki preporuča se veći udio ugljika, jer kod njih nema opasnosti od flotacije, a veći udio ugljika poboljšava livljivost. Većom vrijednosti CE kod tankostjenih odljevaka izbjegava se stvaranje karbida [3].

Povišen udio ugljika smanjuje sklonost ka stezanju, povećava vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja, a smanjuje istežljivosti. Utjecaj udjela ugljika na udarnu žilavost je kompleksan jer ovisi o prijelaznoj temperaturi udarnog rada loma. Na slici 5 prikazan je utjecaj udjela ugljika na udarni rad loma feritnog nodularnog lijeva.

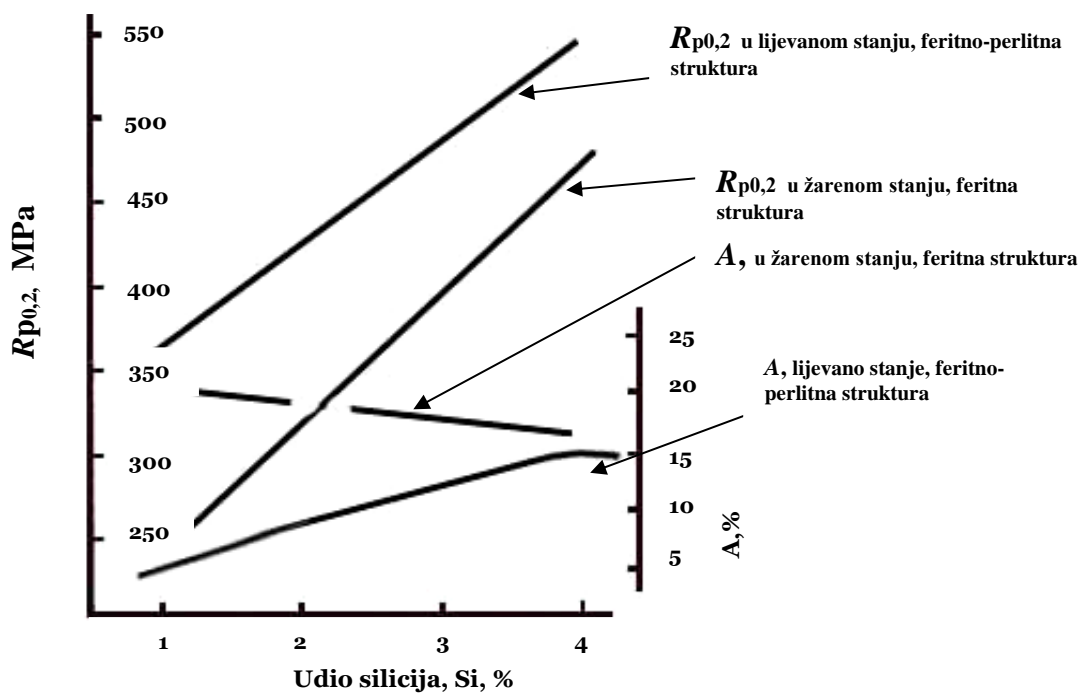


Slika 5: Utjecaj udjela ugljika na udarni rad loma feritnog nodularnog lijeva [10]

Iz slike 5 zaključuje se da porast udjela ugljika povećava udio nakupina grafita u lijevanom stanju, a smanjuje udarni rad loma i njegovu prijelaznu temperaturu.

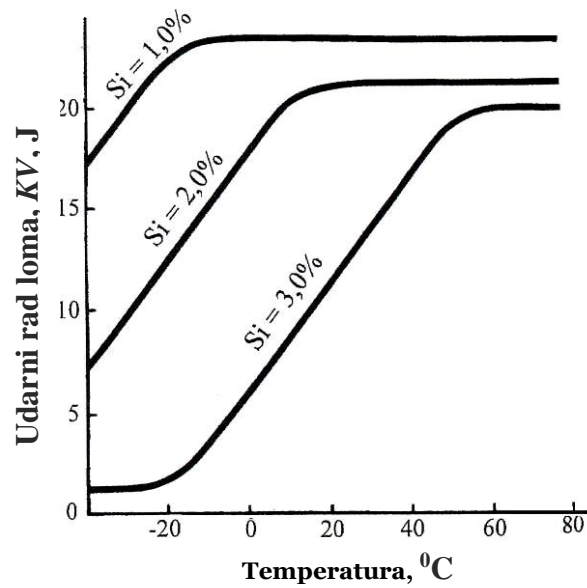
Kod definiranja ekvivalenta ugljika, važno je voditi računa o odnosu ugljika i silicija, jer silicij ima bitan utjecaj na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Obzirom da otežava stvaranje karbida, pospješuje stvaranje ferita, silicij povoljno utječe na povećanje vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i istezljivosti feritnih vrsta nodularnog lijeva.

Kada je feritna željezna matrica rezultat žarenja, zbog očvršćivanja ferita od strane silicija, smanjuje se istezljivost, slika 6.

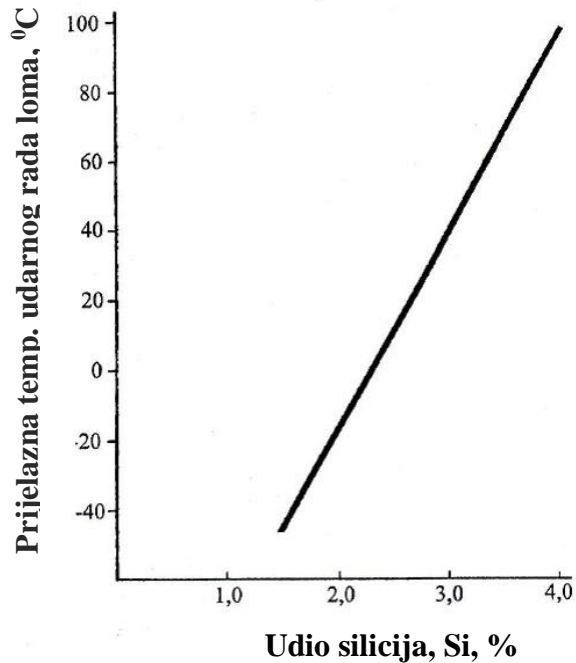


Slika 6: Utjecaj silicija na mehanička svojstva nelegiranog nodularnog lijeva u lijevanom i žarenom stanju (debljina stjenke 25 mm) [11]

S druge strane povećan udio silicija snižava vrijednost udarnog rada loma, slika 7 i linearno povećava prijelaznu temperaturu udarnog rada loma zbog očvršćivanja ferita, slika 8.



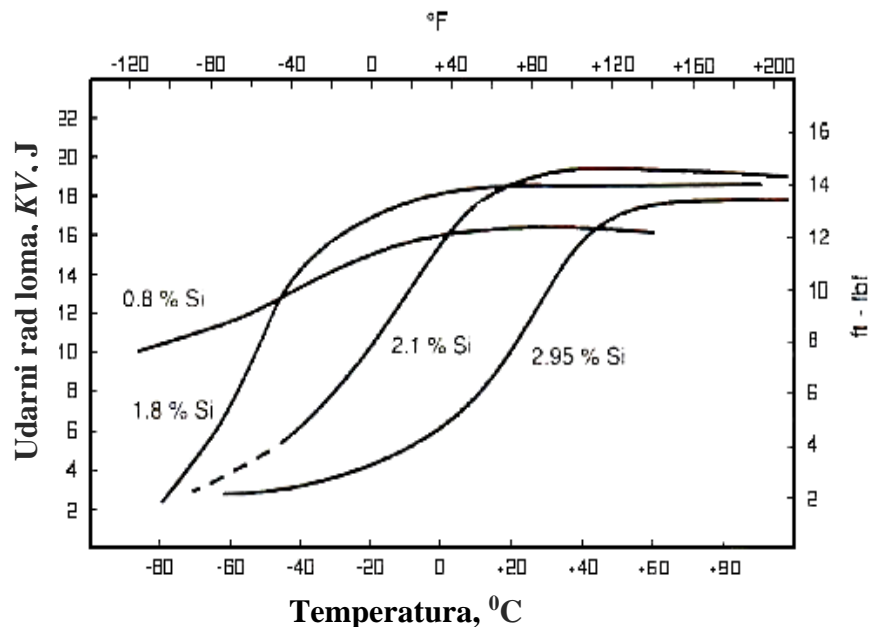
Slika 7: Utjecaj silicija na udarni rad loma pri različitim temperaturama za feritni nodularni lijev [11]



Slika 8: Utjecaj silicija na prijelaznu temperaturu udarnog rada loma [11]

Negativan utjecaj povišenog udjela silicija izraženiji je kod feritnih nodularnih ljevova u odnosu na one kod kojih je udio perlita veći.

Tvrdnje temeljene na slikama 7 i 8 potvrđuje izvor [10] i slika 9.

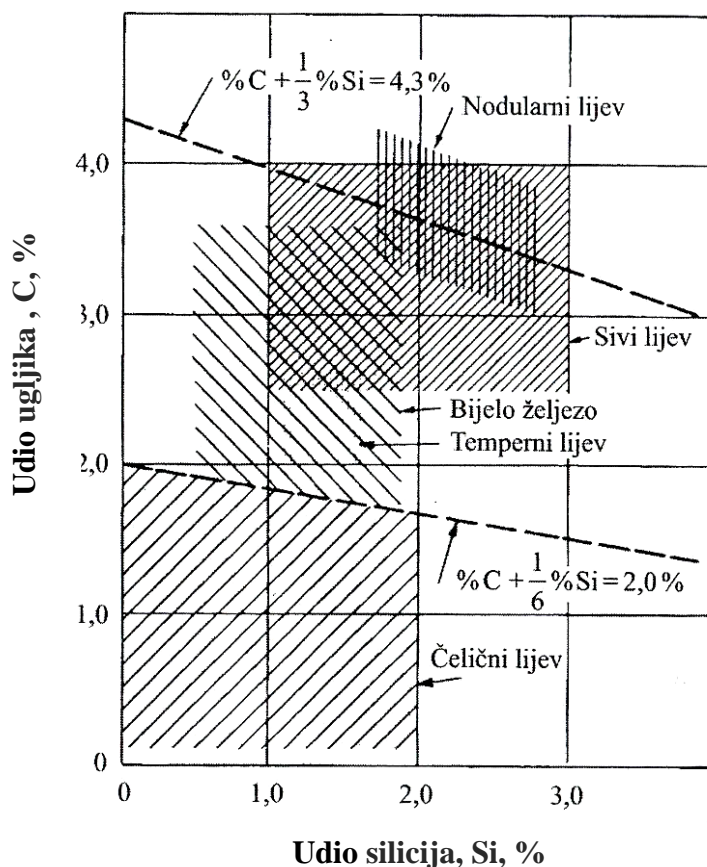


Slika 9: Utjecaj silicija na prijelaznu temperaturu i udarni rad loma feritnog nodularnog lijeva [10]

Slika 9 prikazuje utjecaj udjela silicija na udarni rad loma ovisno o prijelaznoj temperaturi. Utjecaj prijelazne temperature udarnog rada loma znatno je izraženiji kod lijeva s povećanim udjelom silicija. S porastom udjela silicija raste prijelazna temperatura udarnog rada loma, tvrdoća i vlačna čvrstoća. Razlog tome je snažan utjecaj silicija na otvrdnjavanje ferita. Zbog svega naprijed iznesenog, a s ciljem postizanja optimalnih svojstava nodularnih ljevova, raspon udjela silicija kreće se 2,0-2,8 % [12].

Radi usporedbe s nodularnim lijevom, na slici 10. dat je prikaz udjela C i Si kod još nekih vrsta željeznih ljevova.

Iz dijagrama na slici 10 vidljivo je da udio C i Si može biti identičan kod sivog i nodularnog lijeva, s time da sivi lijev može imati nešto veći raspon odnosa mogućih udjela C i Si.



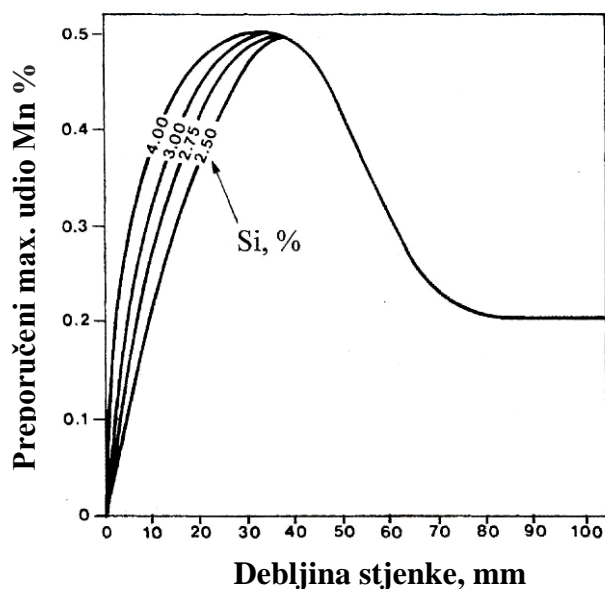
Slika 10: Udio C i Si u različitim vrstama željeznog lijeva [5]

2.1.1.2 Mangan

Mangan (Mn) je slijedeći kemijski element u sastavu nodularnog lijeva po važnosti, nakon ugljika i silicija. Glavni izvor mangana je čelični otpad koji se koristi u zasipu šarže. Njegov udio mora biti kontroliran kako bi se izbjeglo stvaranje karbida u lijevanom stanju.

Mangan je vrlo jak karbidotvorni element, stoga njegov udio mora biti ograničen ovisno o udjelu silicija i debljini stjenke. Slika 11 prikazuje odnose preporučenog maksimalnog udjela mangana u funkciji udjela silicija i maksimalne debljine stjenke.

Osim karbida, mangan pospješuje stvaranje perlita [6]. Prisustvo eutektičkih karbida u mikrostrukturi utječe na smanjenje vlačne čvrstoće, produljenja i udarne žilavosti. Iz toga razloga potrebno je udio mangana održavati što nižim.



Slika 11: Utjecaj udjela silicija i debljine stjenke na dopušteni udio mangana [11]

Kod debelostjenih odljevaka utjecaj mangana na stvaranje karbida ne može se kontrolirati udjelom silicija jer mangan preferirano segregira u talinu koja se zadnja skrućuje. Pri tome dolazi do stvaranja karbida po granicama zrna. Obzirom da prisustvo karbida i povećani udio perlita u mikrostrukturi negativno utječu na udarnu žilavost, udio mangana potrebno je održavati nižim od 0,2 %. Ako se traži visoka tvrdoća i otpornost na trošenje, a žilavost je manje bitna, udio mangana može rasti do 1,0 % [12].

2.1.1.3 Sumpor

U procesu proizvodnje željeznih ljevova, sumpor (S) u osnovnu talinu dolazi uglavnom iz uporabljenih goriva i maziva iz zasipa. Pri proizvodnji nodularnog lijeva u polaznoj talini (prije obrade magnezijem) smije biti do 0,02 % S, budući da on u talini reagira s magnezijem pa manje magnezija ostaje za noduliranje grafita, što može rezultirati nastankom vermikularnog, listićavog i drugih degenerativnih oblika grafita [9].

Obzirom da Mg ima snažan afinitet prema S kod obrade primarne taline s visokim udjelom sumpora predlegurom na bazi magnezija stvara se MgS koji se spaja s MgO i SiO₂ stvarajući MgSiO₃.

Rezultat tih interakcija je stvaranje nepoželjnih čestica troske, koje nakon skrućivanja formiraju uključke u odljencima, zbog čega im se smanjuje čvrstoća i žilavost.

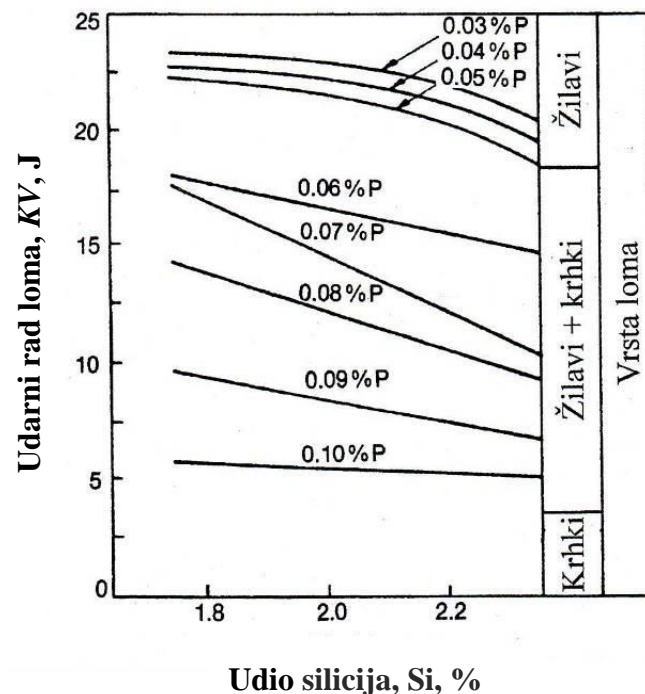
Prethodno spomenute negativne interakcije nastoje se spriječiti održavanjem sumpora u baznoj talini unutar granica 0,008-0,015 %.

Prenizak udio sumpora (<0,005 %) također nije poželjan jer su čestice magnezijeva sulfida inicijalna mjesta nodulacije grafita. Zbog toga primarna talina slabo nodulira, što se manifestira malim brojem nodula po jedinici površine i nastankom karbida.

2.1.1.4 Fosfor

Fosfor (P) je element koji se pojavljuje u svim vrstama željeznog lijeva, pa tako i u nodularnom. Nepoželjan je jer uzrokuje krhkost, zbog čega ga je u nodularnom lijevu potrebno držati ispod 0,03 % [3]. Fosfor ne utječe bitno na oblik izlučenog grafita, ali jako nepovoljno utječe na mehanička svojstva. Sa željezom tvori fosfidni eutektik Fe_3P koji segregira po granicama zrna kao tvrda i krhka faza, uslijed čega se značajno smanjuju istežljivost i žilavost nodularnog lijeva te podiže prijelazna temperatura udarnog rada loma.

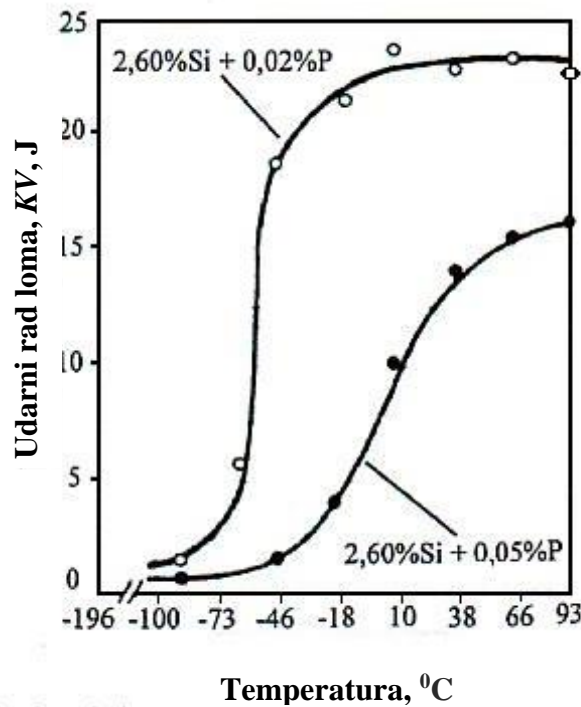
Slika 12 prikazuje utjecaj udjela fosfora i silicija na udarni radni loma nodularnog lijevu.



Slika 12: Utjecaj fosfora i silicija na udarni rad loma [10]

Fosfor očvršćuje ferit i stabilizira perlit, čime se povećava tvrdoća i čvrstoća te smanjuje istežljivost. Najnepovoljniji je učinak fosfora na povišenje prijelazne temperature udarnog rada

loma. Slika 13 prikazuje promjenu žilavosti i prijelazne temperature udarnog rada loma nodularnog lijeva za različite udjele fosfora.



Slika 13: Utjecaj fosfora i silicija na prijelaznu temperaturu udarnog rada loma [6,13]

Smanjenje žilavosti i povišenje prijelazne temperature udarnog rada loma pod utjecajem fosfora potpomognuto je udjelom silicija, (slika 12 i 13). Zbog toga, promjena udjela silicija zahtjeva promjenu udjela fosfora. Porast silicija za 0,25 % pretpostavlja smanjenje fosfora od 0,03 %. Kada je udarna žilavost svojstvo koje primarno treba ostvariti, udio silicija treba biti manji od 2,1 %, a fosfora manji od 0,03 % [6]

2.1.1.5 Magnezij

Modificiranje oblika grafita, odnosno stvaranje nodularnog grafita, najčešće se provodi obradom primarne taline predlegurom čiji je glavni sastojak magnezij (Mg). Dodavanjem magnezija u baznu talinu, najprije dolazi do dezoksidacije, zatim odsumporavanja, a nakon toga se njegovo djelovanje usmjerava na oblikovanje kuglica grafita.

Magnezij ima vrelište na 1107 °C, pa se pri njegovom dodavanju u talinu željeznog lijeva, obično zagrijanu na približno 1500 °C, događa vrlo burna reakcija uz nastajanje karakterističnog dima.

Ovisno o udjelu sumpora u baznoj talini, potrebna količina magnezija za stvaranje potpuno nodularne strukture grafita je 0,02-0,06 %, što ovisi o udjelu sumpora [6]. Omjer Mg/S važan je za održavanje nodularnosti u nodularnom lijevu.

Produkt dezoksidacijskog djelovanja magnezija je vrlo stabilni spoj MgO.

MgO je kemijski vrlo stabilan spoj, niske gustoće i niske topivosti u željezu te visokog tališta, a nastaje kao produkt dezoksidacije taline magnezijem. Skuplja se na površini taline, a ukoliko ostane zarobljen pri ulijevanju, može uzrokovati nastajanje štetnih tvrdih uključaka u odljevku. Produkt odsumporavajućeg djelovanja magnezija je spoj MgS. Taj spoj ima manju gustoću i nastoji isplivati na površinu taline u trosku. Obzirom da se radi o relativno nestabilnom spoju, MgS se spaja s kisikom tvoreći MgO pri čemu se oslobađa sumpor koji se može vratiti u talinu i ponovo vezati s magnezijem. Zbog toga je vrlo važno uklanjanje MgS s površine taline. Ako je udio sumpora i kisika u talini nizak tada je već 0,018 % magnezija dovoljno za stvaranje potpuno nodularne strukture grafita. Udio magnezija obično se kreće 0,035–0,050 %. Ako je udio magnezija veći od preporučenog može doći do stvaranja karbida, poroznosti i troske. Nedovoljan udio magnezija rezultira smanjenom nodularnošću i brojem nodula. Dakle, udio magnezija ima važan utjecaj na mikrostrukturu, a time i na mehanička svojstva nodularnog lijeva [6].

2.1.1.6 Cerij i rijetki zemnih elementi (RE)

Cerij (Ce) je element koji bitno utječe na nodularnost, odnosno stvaranje i oblikovanje grafita. Slično kao i magnezij, cerij snažno dezoksidira i desulfurira talinu. Za razliku od magnezija, cerij ima znatno veću točku vrelišta (3443 °C), pa pri dodavanju u talinu neće izazvati burnu reakciju. Cerij ima manju sklonost stvaranju troske, a time i stvaranja uključaka zbog stabilnijih oksida i sulfida koji nastaju njegovim dodavanjem talini.

U slučaju kada je cerij primarni nodulator, dovoljan je udio ~ 0,035 % Ce za formiranje nodularnog grafita u nadeutektskom željeznom lijevu.

Obzirom da je cerij jak karbidotvorac, primarna talina mora imati visok udio ugljika (> 3,8 %), što zahtjeva i odgovarajuće cijepljenje. Proizvodnja odljevaka kod kojih je cerij primarni nodulator je osjetljiva, zbog utjecaja debljine stjenke i pojave karbida. Kod tankih stjenki postoji opasnost od stvaranja karbida, dok kod debelih stjenki, obzirom na manju brzinu hlađenja, postoji opasnost od flotacije i degeneracije grafita.

Zbog prethodno navedenog, cerij se ne koristi kao primarni nodulator, već kao komponenta rijetkih zemnih elemenata (RE) u legurama FeSiMg. Uobičajeni udio rijetkih zemnih

elemenata u tim legurama kreće se 0,5-1,0 % [6]. Rijetki zemnih elementi su metali, koji su po kemijskim osobinama slični jedan drugom, a naziv su dobili po tome što se nalaze u vrlo malim količinama u Zemljinoj kori [14]. Od ostalih rijetkih zemnih elemenata u nodularnom lijevu susreću se još lantan (La), neodimij (Nd) i praseodimij (Pr). Lantan je slabiji karbidotvorac, daje veći broj nodula i smanjuje opasnost od pojave pukotina uslijed stezanja radi čega ima prednost pred cerijem u FeSiMg legurama.

Prekomjeran udio rijetkih zemnih elemenata u nodularnom lijevu je štetan, jer čini graničnu površinu grafit/talina nestabilnom i uzrokuje degeneraciju nodularnog grafita (grananje) tijekom skrućivanja.

2.1.1.7 Bakar

Bakar (Cu) je grafitizirajući element koji ima značajan utjecaj na metalnu matricu pogodujući nastajanje perlita bez poticanja stvaranja karbida.

Dodaje se u talinu kada se želi ostvariti potpuno perlitna struktura nodularnog lijeva, jer pri skrućivanju segregira na površinu nodula grafita sprječavajući difuziju ugljika. Time je austenitu onemogućena pretvorba u ferit i grafit.

Iako je topivost bakra u nodularnom lijevu ~2,5 %, obično ga se dodaje najviše 1,5 % zbog ranije opisanog negativnog utjecaja na formiranje nodula grafita [6]. Udio od 0,82 % bakra može biti dovoljan da se ostvari potpuno perlitna struktura, dok je za postizanje slične strukture potrebno 1,74 % Mn [3]. U feritnom lijevu udio bakra je ograničen na 0,03 %

Zbog izraženog poticanja stvaranja perlita, bakar povećava vlačnu čvrstoću i tvrdoću, a smanjuje rastezljivost i udarni rad loma te podiže prijelaznu temperaturu udarnog rada loma.

U usporedbi s manganom, bakar ima 5-10 puta snažniji utjecaj na stvaranje perlita, uz smanjenu mogućnost nastanka karbida.

Negativnost korištenja bakra u proizvodnji nodularnog lijeva je povećanje cijene.

2.1.1.8 Kositar

Kositar (Sn) snažno potiče stvaranje perlita, te ne potiče stvaranje karbida sve do 0,15 % udjela. Udio kositra >0,1 % nije poželjan, jer se tijekom skrućivanja nakuplja na površini grafitnih kuglica stvarajući nepropusne barijere koje sprječavaju difuziju ugljika. Na taj način ugljik iz austenitnih zrna ostaje zarobljen i ne može difundirati u grafitne nakupine te se austenit transformira u perlit. Posljedica toga je značajno smanjenje istezljivosti i žilavosti odljevka.

U odnosu na bakar, kositar je ~10 puta efikasniji u stvaranju perlitne strukture. Za postizanje potpuno perlitne strukture potrebno ga je 0,03-0,08 %, ovisno o debljini stjenke odljevka [6].

2.1.1.9 Molibden

Molibden (Mo) poboljšava prokaljivost, vlačnu čvrstoću (pri sobnoj i povišenoj temperaturi), granicu razvlačenja, otpornost na lom, otpor puzanju i toplinski umor nodularnog lijeva [6]. Negativno utječe na rastezljivost i udarni rad loma.

Snižava temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektikuma te povisuje eutektoidnu temperaturu. Udio molibdena u nodularnom lijevu 0,1-0,3 % pogoduje stvaranju feritnog lijeva povećavajući njegovu tvrdoću i granicu razvlačenja. Pri udjelu iznad 0,3 % pogoduje stvaranju perlita, čime se smanjuje žilavost.

Spada u skupinu elemenata koji pogoduju stvaranju interkristalnih karbida.

2.1.1.10 Nikal

Nikal (Ni) je grafitizirajući element koji pri različitim udjelima bitno utječe na svojstva lijeva. U udjelu 0,5-4,0 %, poboljšava prokaljivost i mehanička svojstva feritnog nodularnog lijeva pri niskim temperaturama.

Znatno veći udio nikla, 18,0-36,0 %, pogoduje stvaranju austenitne strukture kod lijeva s niskim udjelom silicija [6].

Nikal u feritnom nodularnom lijevu povećava granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću bez štetnog utjecaja na udarnu žilavost. Zbog tih kvaliteta ponekad ga se koristi kao zamjenu za silicij, iako je znatno slabiji grafitizator od silicija.

Nikal ima visoku topivost u tekućem željezu, ali negativno utječe na topivost ugljika. Obzirom da povisuje temperaturu skrućivanja stabilnog eutektikuma i snižava temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektikuma, smanjuje mogućnost nastanka karbida.

2.1.1.11 Krom

Krom (Cr) spada u skupinu karbidotvoraca, koji pogoduje stvaranju perlita. Kromovi karbidi teško se mogu ukloniti iz metalne matrice čak i dugotrajnim žarenjem na visokim temperaturama. Karbidi kroma poželjni su kod nodularnog lijeva kod kojeg je izražen zahtjev za povećanom otpornošću na trošenje.

Da bi se izbjeglo stvaranje karbida, udio kroma u nodularnom lijevu treba biti manji od 0,05 % [6]. U prisustvu mangana sklonost stvaranja kromovih karbida se povećava.

2.1.1.12 Vanadij

Vanadij (V), kao i krom, spada u skupinu karbidotvoraca zbog čega se njegov udio ograničava na manje od 0,03 %. Pri udjelu 0,2–0,3 % značajno povećava vlačnu čvrstoću i tvrdoću žarenog feritnog nodularnog lijeva bez bitnijeg negativnog utjecaja na produljenje i udarnu žilavost [6].

2.1.1.13 Bor

Bor (B) je snažan karbidotvorac, čiji karbidi su stabilni i ne daju se ukloniti žarenjem. I pri malom udjelu od 0,002 % može doći do stvaranja interkristalnih karbida i velikog pada mehaničkih svojstava. Već 0,01 % bora može značajno smanjiti produljenje.

Kod perlitnog nodularnog lijeva udio bora je ograničen na 0,0006 % zbog neutraliziranja učinka bakra u pogledu stvaranja perlita i smanjenja tvrdoće odljevaka [6].

2.1.1.14 Štetni elementi

Osim elemenata navedenih u podnaslovima 2.1.1.1. do 2.1.1.13., koji ovisno o udjelu, mogu pozitivno utjecati na svojstva nodularnog lijeva, ima i onih koji već u jako malom postotku imaju negativan učinak na mehanička svojstva, otežavajući nastanak i formiranje grafita. Elementi s negativnim učinkom na formiranje grafita, a time na mehanička svojstva nodularnog lijeva su aluminij, antimon, arsen, bizmut, kadmij, olovo, titan, cirkonij i selen [6].

- Aluminij potiče stvaranje vermikularnog i listićavog grafita te nastanak mikroporoznosti. Zbog toga njegov udio treba biti manji od 0,03 %.
- Antimon kod debelostjenih odljevaka sprječava stvaranje nodularnog grafita već pri udjelu od 0,004 %, a potiče stvaranje perlita.
- Bizmut potiče stvaranje listićavog grafita pri udjelu iznad 0,003 %. Ako se njegov loš utjecaj neutralizira cijepljenjem, bizmut može potaknuti nodulaciju. Ta pojava ima pozitivan učinak kod proizvodnje tankostjenih odljevaka jer otežava nastanak karbida.
- Kadmij iznad 0,002 % udjela potiče stvaranje listićavog grafita.
- Olovo, kao i kadmij, potiče stvaranje listića grafita pri istom udjelu od 0,002 %.
- Titan ima izraženiji negativan utjecaj kod debelih stjenki i to u vidu stvaranja vermikularnog grafita. Zbog toga se njegov udio ograničava na manje od 0,035 %.
- Cirkonij, slično titanu, potiče stvaranje vermikularnog grafita, što je razlog ograničavanja njegova udjela u nodularnom lijevu na manje od 0,01 %.
- Selen je karbidotvorac, a ima i sklonost otežavanju stvaranja nodularnog grafita, pa mu

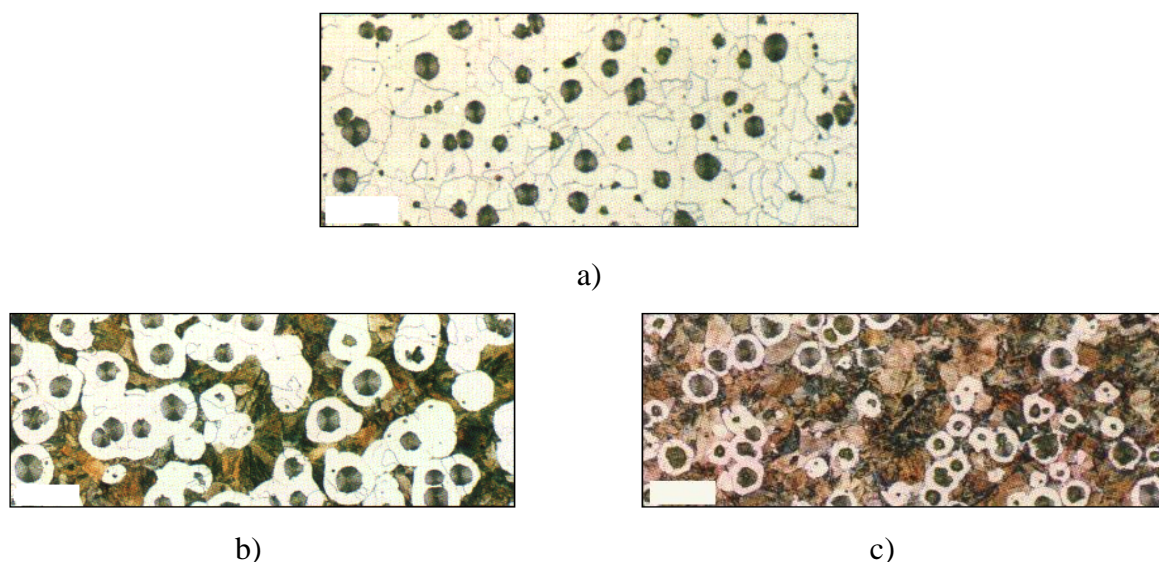
udio mora biti manji od 0,002 %.

2.1.2 Mikrostruktura i mehanička svojstva nodularnog lijeva

Mikrostruktura ljevova na bazi željeza određena je skrućivanjem i naknadnom prekrizacijom u čvrstom stanju. O mikrostrukturi željezne matrice ovise svojstva lijeva/odljevka.

Tipičan nodularni ljev je približno eutektičkog sastava, u lijevanom stanju na sobnoj temperaturi. Mikrostruktura se sastoji od željezne matrice ferita (α) i perlita ($\alpha^{id} + Fe_3C^{id}$) s nodulama grafita. Nodule grafita najčešće su okružene feritom, a ostatak željezne matrice je perlit.

Mikrostruktura nodularnog lijeva može biti feritna, perlitna, feritno-perlitna ili austenitna. Slika 14 prikazuje mikrostrukture feritnog (a), feritno-perlitnog (b) i perlitno-feritnog (c) nodularnog lijeva, pri povećanju 100:1, nagrižene 4 % nitalom.



Slika 14: Mikrostruktura nodularnog lijeva nagriženog 4 % nitalom [15]

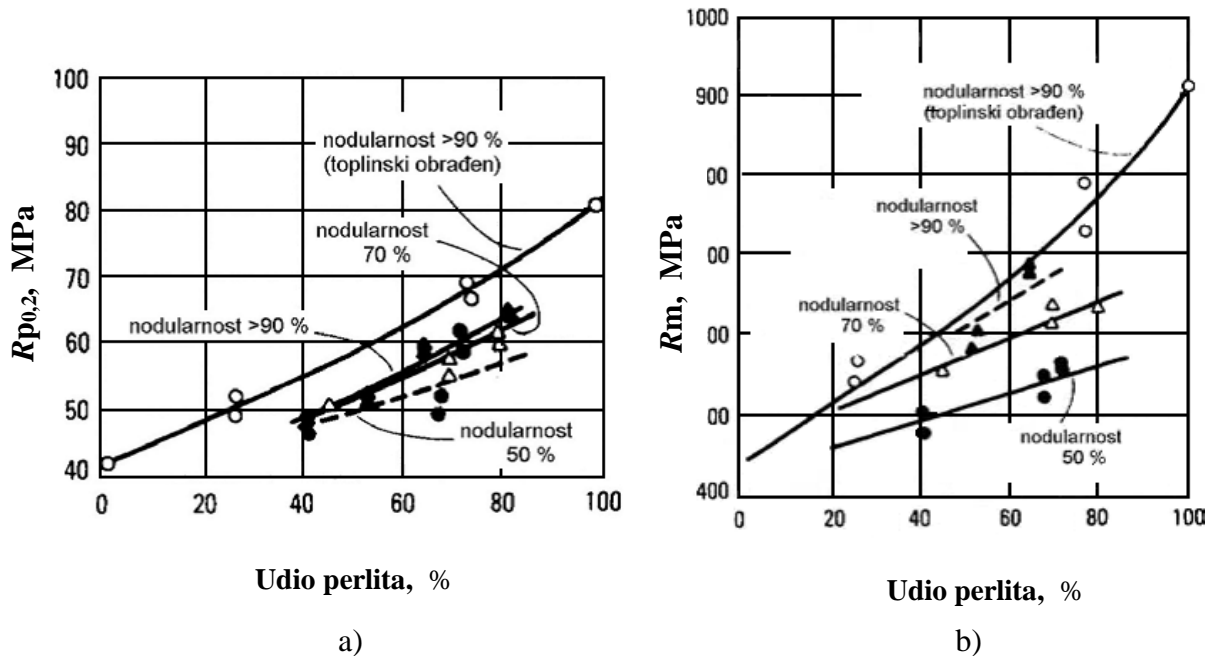
a) feritni nodularni ljev, b) feritno-perlitni nodularni ljev, c) perlitno-feritni nodularni ljev

Udio pojedinih faza u metalnoj matrici ovisi o kemijskom sastavu, brzini hlađenja kroz područje eutektoidne pretvorbe te volumnom udjelu i broju grafitnih nodula. Brzina hlađenja utječe na morfologiju grafita, segregacije legirajućih elemenata u austenitu, te kinetiku naknadne pretvorbe austenita u ferit. Povećanje brzine hlađenja rezultira smanjenjem udjela ferita, a povećanjem udjela perlita u mikrostrukturi.

Eutektoidna pretvorba je difuzijski kontroliran proces i može se podijeliti u dvije faze: nastanak ferita (stabilne faze) i stvaranje perlita (metastabilne faze) iz austenita.

Obzirom da mehanička svojstva nodularnog lijeva ovise o mikrostrukтури, jasno je da se varijacijama u mikrostrukтури može postići širok spektar različitih mehaničkih svojstava.

Slika 15 prikazuje ovisnost konvencionalne granice razvlačenja (a) i vlačne čvrstoće (b) o udjelu perlita za različite nodularne ljevove.

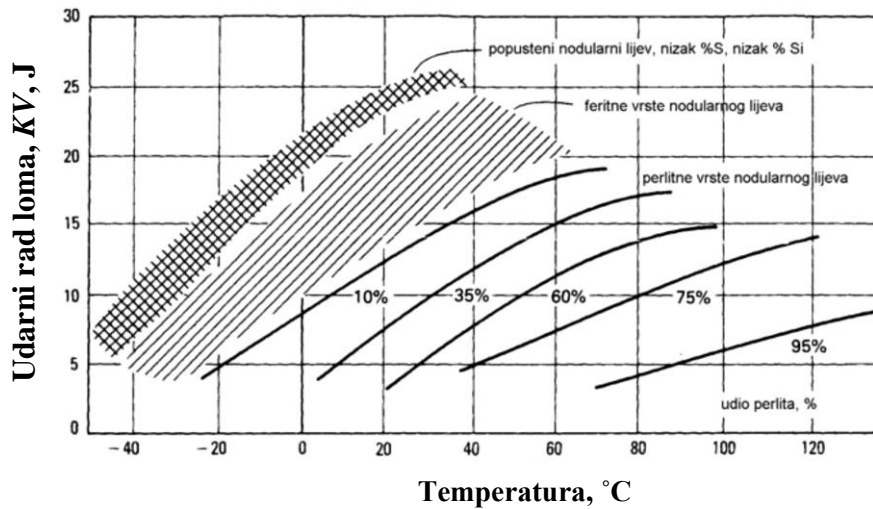


Slika 15: Konvencionalna granica razvlačenja i vlačna čvrstoća nodularnog lijeva pri različitim udjelima perlita i nodularnostima [16]

a) granica razvlačenja; b) vlačna čvrstoća

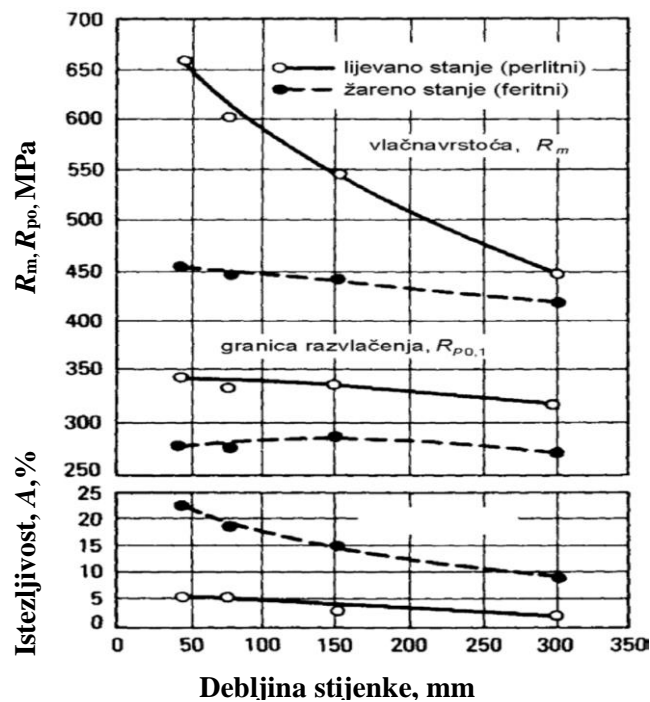
Slika 16 prikazuje svojstva više struktura nodularnog lijeva pri različitim temperaturama ispitivanja i različitom udarnom opterećenju (Charpy V).

Iz dijagrama na slici 16 uočava se da feritni nodularni lijev ima visoku udarnu žilavost što pretpostavlja povećanu sposobnost materijala da se odupre inicijaciji pukotina i pri nižim temperaturama.



Slika 16: Utjecaj mikrostrukture i temperature na udarni rad loma [13]

Prijelazna temperatura ovisi o kemijskom sastavu, nodularnosti grafita i toplinskoj obradi. Perlitni nodularni ljev ima povećanu čvrstoću, ali smanjenu udarnu žilavost, stoga nije preporučljiv za upotrebu pri niskim temperaturama, gdje se zahtjeva otpornost na pojavu krhkog loma [13]. Na strukturu i svojstva nodularnog lijeva, zbog brzine hlađenja, utječe i debljina stjenke odljevka. Slika 17 prikazuje promjenu mehaničkih svojstava nodularnog lijeva pri većim debljinama stjenke za perlitnu strukturu u lijevanom stanju i za feritnu strukturu za odljevak u žarenom stanju.



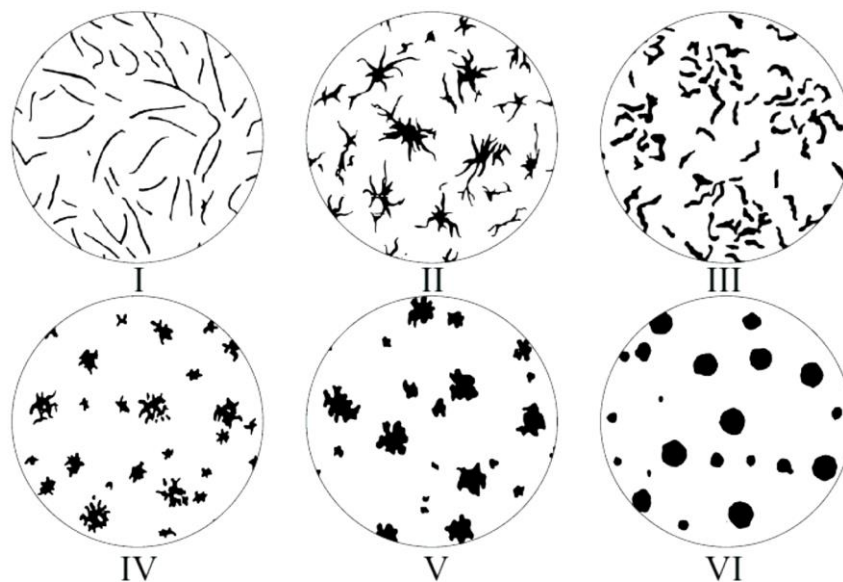
Slika 17: Utjecaj debljine stjenke na mehanička svojstva nodularnog lijeva [16]

Kod tankih stjenki, povećana je brzina hlađenja pa uslijed toga i kristalizacija što uzrokuje nastajanje sitnozrnate mikrostrukture, a mogu se pojaviti i karbidi koji povećavaju tvrdoću, smanjuju žilavost i obradivost odvajanjem čestica. Za postizanje mekane duktilne strukture u tankim presjecima potrebno je pojačano cijepiti talinu, kako bi se pogodovalo stvaranju ferita uz pomoć visokog broja nodula. S povećanjem debljine stjenke smanjuje se broj nodula i sve je izraženija mogućnost nastanka segregacija te se smanjuje udjela ferita u lijevanom stanju.

2.1.2.1 Nodularnost grafita

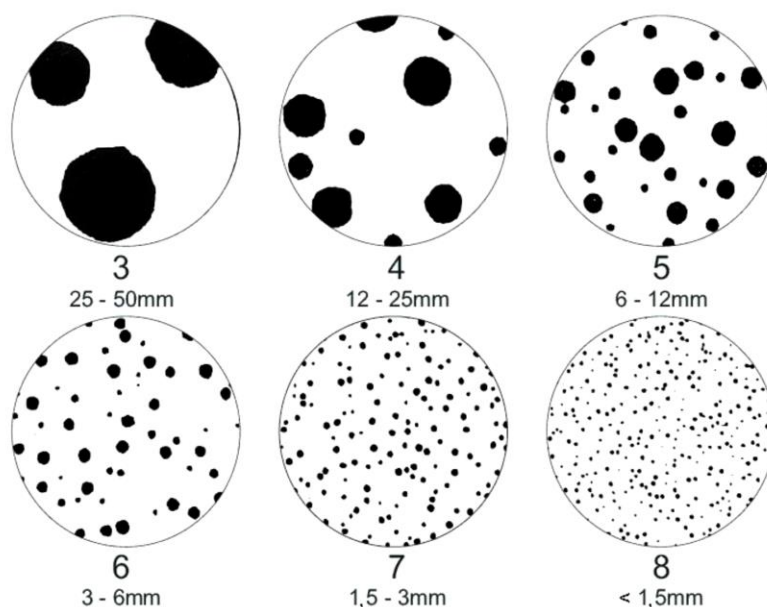
U strukturi nodularnog lijeva često su pored idealnih oblika nodula prisutni i različiti tipovi (oblici) grafitnih nakupina, npr. čvorići, zvjezdasti oblici, oblici pahuljice itd., odnosno degenerativni oblici grafita, zbog čega je oblik grafita normiran.

Normom HRN EN ISO 945:2002 propisana je klasifikacija grafita u Fe-C ljevovima, slika 18.



Slika 18: Klasifikacija grafita u Fe-C ljevovima vizualnim pregledom (100:1) [17]

Prema toj normi, nodularni lijev ima oblik grafita VI. Ista norma propisuje veličine grafitnih nodula (oblika VI) u nodularnom lijevu, pri čemu se promatraju najveće nodule, slika 19.

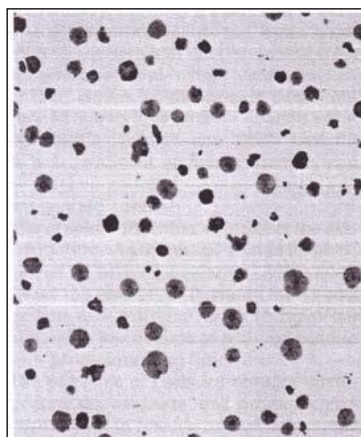


Slika 19: Normirane veličine grafitnih nodula (grafit oblika VI) u nodularnom lijevu (100:1) [17]

Žilavost nodularnog lijeva usko je povezana s mikrostrukturom, tj. oblikom izlučenog grafita (nodularnosti) i strukturom željezne matrice [18].

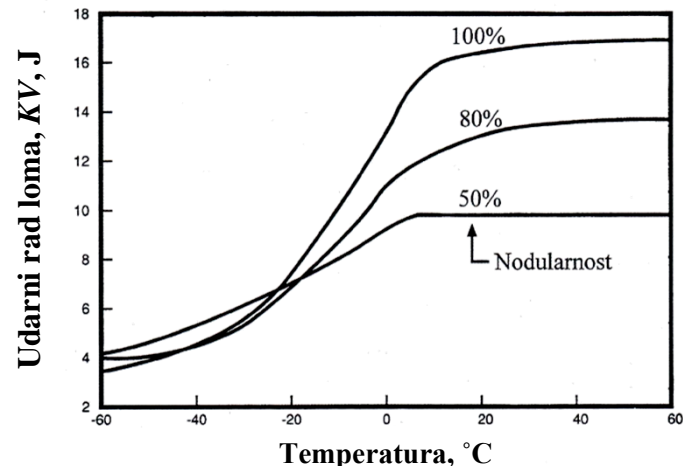
Degenerativni oblici grafita, vermikularni ili listićavi grafit, zbog oštih bridova negativno utječu na žilavost nodularnog lijeva, stoga je utjecaj nodularnosti na svojstva nodularnog lijeva vrlo velik.

Nodularnost je volumni udio kuglastih nakupina grafita u odnosu na ukupni udio grafitnih nakupina. U proizvodnji nodularnog lijeva teži se što većem broju pravilnih kuglica grafita (iznad 90 %), slika 20.



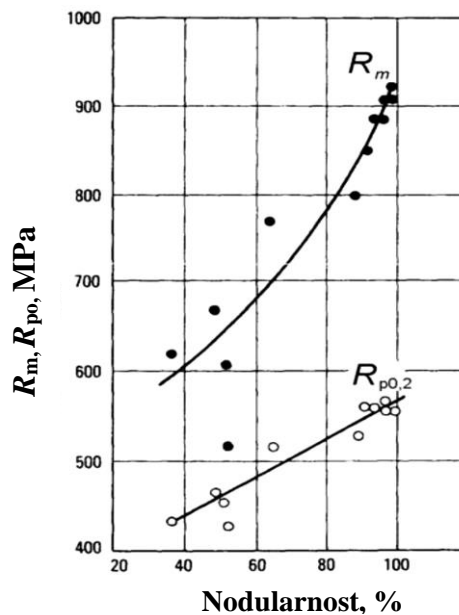
Slika 20: Mikrostruktura nodularnog lijeva sa nodularnošću iznad 95 % [16]

Smanjenje nodularnosti utječe na sniženje udarnog rada loma, što se može vidjeti na primjeru feritnog nodularnog lijeva, slika 21.



Slika 21: Utjecaj nodularnosti feritnog nodularnog lijeva na udarni rad loma [13]

Vlačna čvrstoća i dinamička izdržljivost izrazito opadaju s porastom udjela nekuglastih oblika grafita, dok se granica razvlačenja ne mijenja tako drastično, slika 22.



Slika 22: Utjecaj nodularnosti na vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja nodularnog lijeva [16]

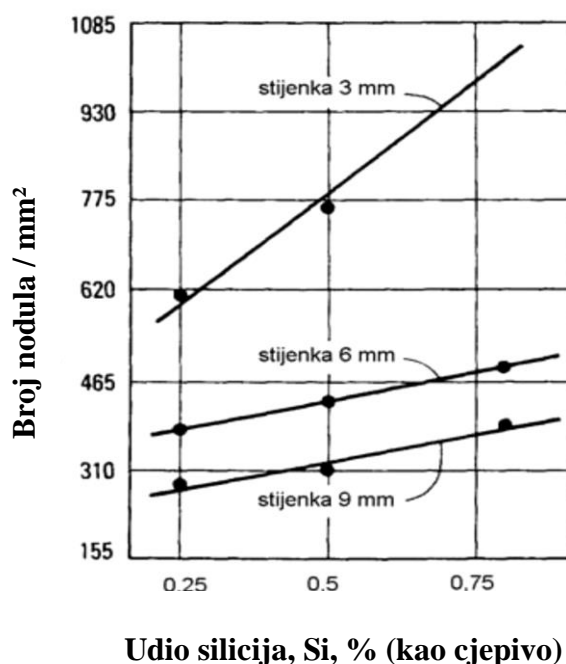
Smanjena nodularnost utječe i na modul elastičnosti, snižava žilavost, povećava sposobnost prigušenja vibracija, povećava toplinsku vodljivost i smanjuje električni otpor. U cilju dobivanja optimalnog broja što pravilnijih kuglica grafita, prilikom proizvodnje odljevaka od nodularnog lijeva, talina se cijepi.

2.1.2.2 Cijepljenje

Osnovna talina najčešće nema dovoljno klica za kristalizaciju i izlučivanje kuglastog grafita, pa ju je potrebno cijepiti. Cijepljenje predstavlja kemijsku modifikaciju taline kojom se kontrolira struktura i svojstva željeznog lijeva putem minimalizacije brzine skrućivanja i povećanja broja aktivnih nukleusa tijekom skrućivanja. Cjepivo se dodaje u maloj količini u talinu neposredno prije i/ili za vrijeme lijevanja taline u kalup, kako bi se osigurale odgovarajuće faze za nukleaciju grafita tijekom naknadnog skrućivanja. Cijepljenjem se izbjegava stvaranje primarnih karbida (cementita), a istovremeno povećava broj nodula, poboljšava nodularnost te homogenost metalne matrice [6].

Učinak cjepiva ovisi o njegovom kemijskom sastavu, a najveći je neposredno nakon dodavanja te opada s vremenom. Brzina opadanja učinka cijepljenja ovisi o brojnim čimbenicima, a najvažniji su kemijski sastav cjepiva, sastav taline u koju se dodaje cjepivo, temperatura taline te brzina hlađenja između likvidusa i solidusa.

Najčešće korišteno cjepivo danas je ljevaonički FeSi u kojem je udio silicija 75 % (FeSi75) i 1,0-2,0 % aluminijska te 0,2-1,0 % kalcija. Učinak cjepiva ovisi o prisutnosti manjinskih elemenata kao što su aluminij, barij, kalij i stroncij [6]. Slika 23 prikazuje za tri odljevka različite debljine stjenke utjecaj udjela silicija, koji je dodan u talinu kao cjepivo, na broj nodula po jedinici površine.



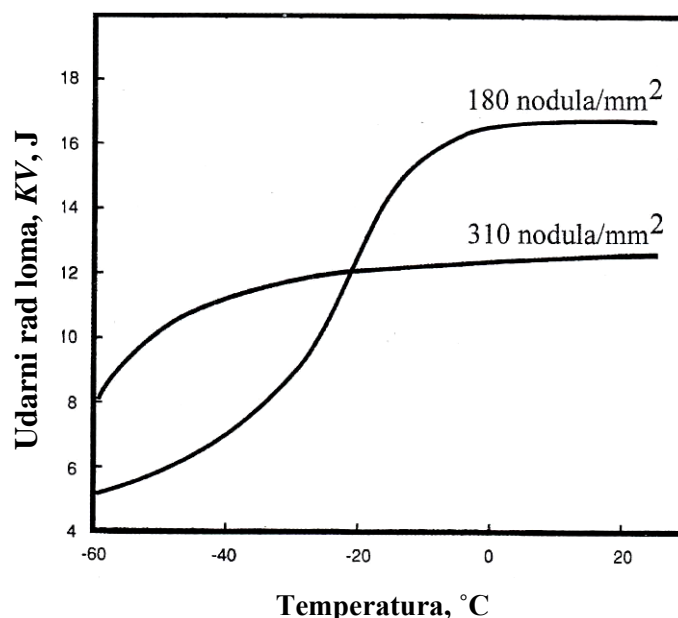
Slika 23: Utjecaj udjela silicija (cjepivo) na broj nodula/mm² za tri debljine stjenke [16]

Cijepljenje s FeSi u kojem ima kalcija (do 1,0 %) i aluminijsa (do 2,0 %) dobivaju se bolja mehanička svojstva, a smanjuje se sklonost stvaranju karbida. Dodatkom barija, bizmuta ili stroncija u malim koncentracijama, značajno se povećava broj nodula/mm², a dodatno se smanjuje mogućnost stvaranja karbida [6].

2.1.2.3 Broj nodula

Prethodno je navedeno da cijepljenje ima pozitivan učinak na nastanak nodula, međutim, taj učinak treba biti kontroliran/ograničen. Naime, utvrđeno je da za svaku debljinu stjenke, odnosno presjek odljevka, postoji optimalan broj nodula. Odstupanje od tog broja rezultira pogoršanjem mehaničkih svojstava. Povećanjem broja nodula smanjuje se udio perlita u mikrostrukturi, što rezultira smanjenjem vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i porastom istezljivosti [18].

Na slici 24 dat je primjer utjecaja broja nodula na udarni rad loma kod feritnog nodularnog lijeva.



Slika 24: Utjecaj broja nodula na udarni rad loma feritnog nodularnog lijeva [13]

Na gornjem dijagramu, slika 24, uočava se dvojak učinak povećanog broja nodula ugljika. Povećani broj nodula snižava udarni rad loma pri sobnoj temperaturi, što je pozitivno, ali istovremeno snižava prijelaznu temperaturu udarnog rada loma, što nije poželjno.

2.1.3 Klasifikacija nodularnog lijeva

U svijetu postoji više prihvaćenih normi klasificiranja nodularnog lijeva. Republika Hrvatska je preuzela europsku normu EN 1563:1997, koja se primjenjuje u zemljama EU. Prema toj normi (HRN EN 1563:1997) nodularni lijev se klasificira u više kvaliteta prema minimalnim vrijednostima vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i žilavosti ljevova [19]. U tablici 1 prikazane su minimalne vrijednosti mehaničkih svojstava nodularnog lijeva izmjerene na ispitnim uzorcima koji su dobiveni mehaničkom obradom odvojeno lijevanih probnih štapova, za svaku pojedinu kvalitetu.

Tablica 1: Normom propisane minimalne vrijednosti mehaničkih svojstava nodularnog lijeva [19]

Označavanje materijala:		Vlačna čvrstoća, R_m , MPa, min.	Konv. granica razvlačenja, $R_{p0,2}$, MPa, min.	Istezljivost, A , %, min.
Oznaka:	Broj:			
EN-GJS-350-22-LT ¹⁾	EN-JS1015	350	220	22
EN-GJS-350-22-RT ²⁾	EN-JS1014	350	220	22
EN-GJS-350-22	EN-JS1010	350	220	22
EN-GJS-400-18-LT ¹⁾	EN-JS1025	400	240	18
EN-GJS-400-18-RT ²⁾	EN-JS1024	400	250	18
EN-GJS-400-18	EN-JS1020	400	250	18
EN-GJS-400-15	EN-JS1030	400	250	15
EN-GJS-450-10	EN-JS1040	450	310	10
EN-GJS-500-7	EN-JS1050	500	320	7
EN-GJS-600-3	EN-JS1060	600	370	3
EN-GJS-700-2	EN-JS1070	700	420	2
EN-GJS-800-2	EN-JS1080	800	480	2
EN-GJS-900-2	EN-JS1090	900	600	2

¹⁾ LT (engl. low temperature) – žilavost pri niskoj temperaturi

²⁾ RT (engl. room temperature) – žilavost pri sobnoj temperaturi

Iz tablice 1 uočava se da se oznake kvaliteta nodularnog lijeva sastoje od kombinacije brojeva i slova. Dok su brojčane oznake prilično jasne, jer predstavljaju minimalnu vlačnu čvrstoću i istežljivost, slovne treba pojasniti. EN se odnosi na europsku normu, slovo G označava lijev, slovo J željezo, a slovo S označava nodularni ugljik. U tablici 2 prikazane su normom propisane vrijednosti udarnog rada loma nodularnog lijeva prema normi HRN EN 1563:1997, uzevši u obzir i utjecaj debljine stjenke.

Prikazane su vrijednosti udarnog rada loma pri sobnoj temperaturi te pri $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mjerenje je provedeno na uzorcima s V-zarezom koji su dobiveni mehaničkom obradom odvojeno lijevanih probnih uzoraka.

Tablica 2: Normom propisani udarni rad loma nodularnog lijeva, ovisno o debljini stjenke [19]

Označivanje materijala:		Debljina stjenke s [mm]	Minimalna vrijednost udarnog rada loma, KV, J					
Oznaka:	Broj:		Pri sobnoj temperaturi $23\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$		Pri $-20\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$		Pri $-40\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$	
			Sr.vr. 3 mj. ¹⁾	Pojed. vr. ²⁾	Sr.vr. 3 mj.	Pojed. vr.	Sr.vr. 3 mj.	Pojed. v r.
EN-GJS-350-22U-LT	EN-JS1019	$S \leq 60$	-	-	-	-	12	9
		$60 < s \leq 200$	-	-	-	-	10	7
EN-GJS-350-22U-RT	EN-JS1029	$S \leq 60$	17	14	-	-	-	-
		$60 < s \leq 200$	15	12	-	-	-	-
EN-GJS-400-18U-LT	EN-JS1049	$S \leq 60$	-	-	12	9	-	-
		$60 < s \leq 200$	-	-	10	7	-	-
EN-GJS-400-18U-RT	EN-JS1059	$S \leq 60$	14	11	-	-	-	-
		$60 < s \leq 200$	12	9	-	-	-	-

Tablica 3 prikazuje propisane vrijednosti tvrdoće nodularnog lijeva prema HRN EN 1563:1997.

Tablica 3: Normiranje nodularnog lijeva prema tvrdoći [19]

Označivanje materijala		Tvrdoća HB	Ostale karakteristike (informativno)	
Oznaka	Broj		Rm (MPa)	Rp0,2 (MPa)
EN-GJS-HB130	EN-JS2010	manje od 160	350	220
EN-GJS-HB150	EN-JS2020	130 do 175	400	250
EN-GJS-HB155	EN-JS2030	135 do 180	400	250
EN-GJS-HB185	EN-JS2040	160 do 210	450	310
EN-GJS-HB200	EN-JS2050	170 do 230	500	320
EN-GJS-HB230	EN-JS2060	190 do 270	600	370
EN-GJS-HB265	EN-JS2070	225 do 305	700	420
EN-GJS-HB300*)	EN-JS2080*)	245 do 335	800	480
EN-GJS-HB330*)	EN-JS2090*)	270 do 360	900	600

*) EN-GJS-HB300 (EN-JS2080) i EN-GJS-HB330 (EN-JS2090) ne preporučuju se za

tankostjene odljevke

2.1.4 Primjena nodularnog lijeva

Zbog povoljnih mehaničkih svojstava nodularni lijev se koristi kao zamjena za čelični lijev ili čelične otkivke srednje i veće mase. Tipični primjeri primjene su [20]:

- koljenasta i bregasta vratila motora,
- košuljice cilindara motora i kompresora,
- klipnjače,
- zupčanici,
- poklopci kliznih ležaja,
- rotor pumpi i sl.

2.2 IZOTERMIČKI POBOLJŠANI NODULARNI LIJEV (ADI)

Izotermički poboljšani nodularni lijev ili skraćeno ADI (eng. Austempered Ductile Iron) zajednički je naziv za toplinski obrađene nodularne ljevove s dobrim mehaničkim i tribološkim svojstvima kao što su: visoka čvrstoća, žilavost, istezljivost i otpornost na trošenje.

Naknadnom izotermičkom pretvorbom nodularnog lijeva u svrhu dobivanja boljih mehaničkih svojstava dobije se ADI materijal kvalitetniji od konvencionalnog nodularnog lijeva, mnogih drugih ljevovima pa i nekih čelika. Kombinacija tako dobrih svojstava ne može se dobiti klasičnim kaljenjem i popuštanjem, već je to postignuto izotermičkom pretvorbom (austempering process).

ADI je materijal koji nudi dobru kombinaciju: niske cijene, konstrukcijske fleksibilnosti i dobre obradivosti.

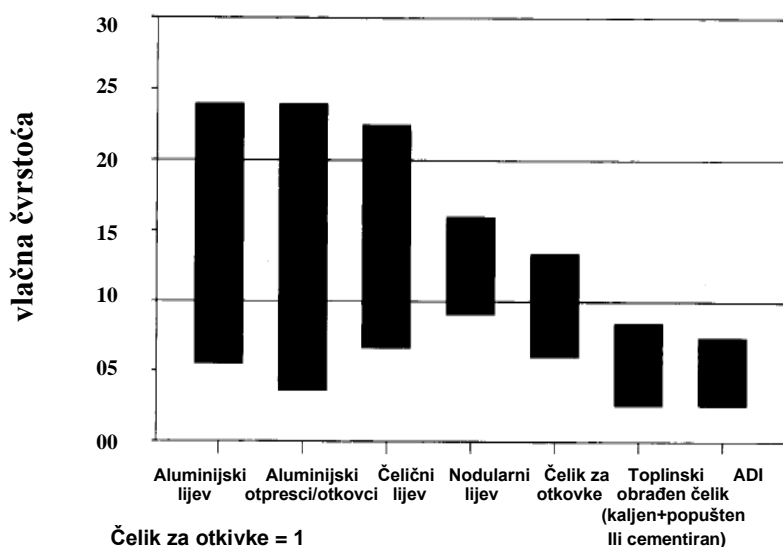
Značajnija komercijalna primjena ADI-a počinje 1979. godine. Dvadesetak godina poslije (1998.) svjetska proizvodnja ADI-a iznosila je oko 100 000 tona godišnje, a glavnina te mase, oko 65 % proizvedena je u SAD-u, Dalekom istoku i Europi.

U razdoblju od 1995. do 2001. godine zabilježen je rast proizvodnje za približno 300 % u usporedbi s razdobljem prije 1995. godine [21].

Izotermičko poboljšavanje NL-a uspješno se koristi više od 40 godina jer osigurava mehanička svojstva potrebna za izdržavanje visoke razine opterećenja što je osobito važno za dinamički opterećene elemente.

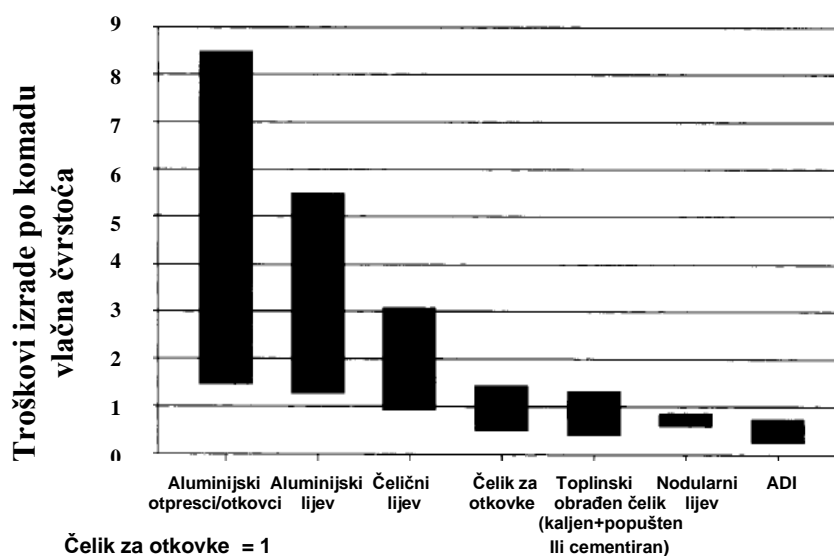
ADI ima 10 % manju gustoću od čelika. Kada se usporedi njegova specifična masa (gustoća) po jedinici vlačne čvrstoće s čelikom lako se uočavaju konstruktivne prednosti ADI-a.

Slika 25 daje usporedbu specifične mase po jedinici čvrstoće različitih metalnih materijala s ADI-em.



Slika 25: Gustoća (specifična masa) po jedinici vlačne čvrstoće [13]

S uobičajenim kemijskim sastavom, cijena ADI-a po jedinici mase je 20 % manja od čelika. Slika 26 prikazuje usporedbu cijena po jedinici čvrstoće u odnosu na čelične materijale, iz koje je vidljiva ekonomska prednost na strani ADI-a.



Slika 26: Cijena po jedinici čvrstoće [13]

2.2.1 Utjecaj kemijskog sastava na svojstva ADI-a

Kemijski sastav nodularnog lijeva ima veliki utjecaj na njegovu mikrostrukturu i svojstva nakon izotermičkog poboljšavanja. Pri tom treba razlikovati utjecaj elemenata koji su stalno prisutni u tom materijalu, kao što su ugljik, silicij i mangan od legiranih elemenata bakra, nikla i molibdena [22].

Promjene ukupnog udjela **ugljika** ne utječu bitno na svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva. Međutim, varijacije u udjelu ugljika utječu na vrijeme koje je potrebno da se dostignu ravnotežni uvjeti za vrijeme austenitizacije, koja se odvija prilikom izotermičkog poboljšavanja.

Utjecaj povećanja udjela **silicija** očituje se u poboljšanju karakteristika udarnog rada loma. Povećanjem udjela silicija raste i temperatura izotermičke transformacije na kojoj se postiže optimalna istezljivost lijeva. Na ostala mehanička svojstva silicij ne utječe u većoj mjeri.

Mangan vrlo efikasno povećava izotermičku prokaljivost nodularnog lijeva, ali se ne dodaje iznad 0,5 % zbog nastajanja segregacija. Vlačna čvrstoća i granica razvlačenja opadaju s porastom udjela mangana 0,04-0,93 %. Istezljivost također opada s porastom udjela mangana 0,5-1,0 %. Isti ne utječe na tvrdoću izotermički poboljšanog nodularnog lijeva. Povećanjem udjela mangana pojavljuju se strukturne heterogenosti uslijed segregacija za vrijeme skrućivanja nodularnog lijeva. Pojavljuje se austenit između kristalnih zrna, koji je vrlo stabilan u području uobičajenih temperatura izotermičkog poboljšavanja.

Udio **bakra** do 1,5 % kod izotermičke transformacije u području temperatura 300 do 400 °C nema većeg utjecaja na vlačnu čvrstoću i tvrdoću ovog lijeva. Kada se izotermička transformacija odvija na temperaturama ispod 350 °C dodatkom bakra smanjuje se plastično istezanje izotermički poboljšanog nodularnog lijeva. Bakar sprječava pojavu karbida u donjem bainitnom području i zato izotermički poboljšan nodularni lijev na temperaturi ispod 350 °C pokazuje povećanu istezljivost.

Dodatak **nikla** do 1 % nema značajnijeg utjecaja na svojstva čvrstoće, tvrdoće i istezljivosti nodularnog lijeva koji je izotermički transformiran u temperaturnom području od 300 do 400 °C. Povećanjem udjela nikla 1-4 %, vlačna čvrstoća i tvrdoća opadaju. Istezljivost se poboljšava s porastom udjela nikla do 2 %. Zavisnost istezljivosti od udjela nikla je naročito izražena za slučajeve izotermičkog poboljšavanja na temperaturi ispod 350 °C. Nikal sprječava tvorbu karbida u donjem bainitnom području izotermičke transformacije.

Molibden pokazuje najveću efikasnost u povećanju izotermičke prokaljivosti NL-a. Dodatkom 0,3 % molibdena udvostruči se promjer epruvete, koja se potpuno transformira u

bainit u odnosu na najveću epruvetu od nelegiranog nodularnog lijeva. Dodaci molibdena veći od 0,5 % uzrokuju pojavu segregacija na granicama kristalnih zrna i time pojavu karbida i krhkosti. Vlačna čvrstoća, tvrdoća i istežljivost opadaju s porastom molibdena iznad 0,2 %. Uzrok tome su segregacije molibdena za vrijeme skrućivanja, pri čemu se stvaraju stabilni karbidi i martenzit između kristalnih zrna [22].

Krom i vanadij su snažni karbidotvorci, zbog toga su nepoželjni u nodularnom lijevu predviđenom za izotermičko poboljšavanje.

U tablici 4 prikazan je kemijski sastav nodularnog lijeva prikladan za izotermičko poboljšavanje.

Tablica 4: Sastav nodularnog lijeva prikladan za izotermičko poboljšavanje [21]

Kemijski element	Udio kemijskog elementa	Granice variranja
C	3,7 %*	±0,20 %
Si	2,5 %*	±0,20 %
Mn	0,5 %	±0,03 %
Cu	< 0,8 %**	±0,05 %
Ni	< 2,0 %**	±0,10 %
Mo	< 0,25 %***	±0,03 %
Fe	ostatak do 100 %	-

Udio ugljika i silicija određuje se ovisno o traženom stupnju zasićenja prema debljini stijenke odljevka

** Prema potrebi

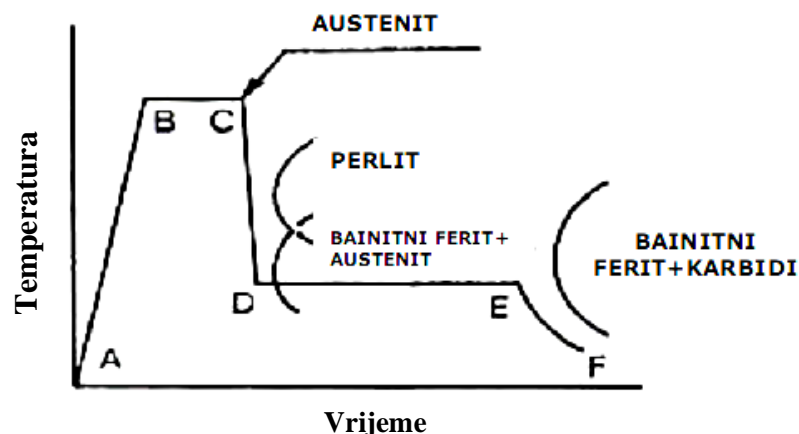
*** Samo za posebne namjene

2.2.2 Izotermička transformacija nodularnog lijeva

Izotermičko poboljšavanje s ciljem postizanja bainitne strukture izvodi se za čelike, uglavnom manjih debljina stijenke, dugi niz godina. Sastoji se od zagrijavanja na temperaturu austenitizacije, držanja na toj temperaturi određeno vrijeme, naglog hlađenja (gašenja) na temperaturu izotermičke pretvorbe u području između 200 i 400 °C te držanja na toj temperaturi dovoljno dugo kako bi se potpuno završila bainitna transformacija [22].

Kod izotermičke transformacije nodularnog lijeva u strukturu bainitnog ferita, gašenje s temperature austenitizacije (900 °C) na temperaturu izotermičke pretvorbe (250-400 °C)

[23], mora biti dovoljno brzo kako bi se izbjegla transformacija u perlit te postigla maksimalna vrijednost žilavosti i istežljivosti, slika 27.



Slika 27: Shematski prikaz postupka izotermičkog poboljšavanja [24]

Na gornjem dijagramu uočavaju se tri važne faze toplinskog ciklusa izotermičkog poboljšavanja nodularnog lijeva: austenitizacija (A-C), gašenje (C-D) i izotermička pretvorba (D-E).

Austenitizacija – najčešće se provodi u peći pod zaštitnom atmosferom. Sastoji se od zagrijavanja (A-B), čija brzina nema značajan utjecaj na konačna svojstva i držanja (B-C) na temperaturi austenitizacije. To je vremenski ovisan proces u kojem se α - γ pretvorba događa brzo, kad se γ kristali mješanci popunjavaju ugljikom. Količina ugljika u željeznoj matrici određena je vremenom držanja na temperaturi austenitizacije te kemijskim sastavom lijeva. Obzirom da je proces difuzijski, sličan efekt se postiže višom temperaturom austenitizacije i kraćim vremenom držanja na njoj, u odnosu na nižu temperaturu i dulje vrijeme držanja.

Gašenje – druga važna faza u TTT dijagramu izotermičkog poboljšavanja. Intenzitet odnosno brzina hlađenja mora biti dovoljna da se izbjegne perlitno područje prije početka reakcije izotermičke pretvorbe. Dodatkom legirnih elemenata moguće je i pri manjim brzinama hlađenja s temperature austenitizacije izbjeći pojavu perlita u mikrostrukturi izotermički poboljšanog nodularnog lijeva.

Izotermička pretvorba – je najvažnija faza ove toplinske obrade. Odvija se u prikladnim kupkama (solnim, fluidiziranim, a samo za niže temperature do 230 °C u zagrijanom ulju za kaljenje/gašenje) koje moraju imati preciznu regulaciju i održavanje zadane temperature. Opadanjem temperature izotermičke pretvorbe raste čvrstoća, a opada žilavost. Vrijeme zadržavanja na toj temperaturi je presudno za mehanička svojstva ADI-a. Izotermička pretvorba nodularnog lijeva sastoji se od dvije faze [22]:

I faza – pretvorbe austenita u bainitni ferit i austenit

II faza – pretvorba austenita u bainitni ferit i karbide

I. faza pretvorbe

U području D-E, slika 27, dolazi do stvaranja mješavine faza bainitnog ferita i visokougličnog stabiliziranog austenita ($\gamma_0 \rightarrow \alpha + \gamma_{HC}$) koje daju visoku istezljivost i žilavost materijalu. Visoki postotak silicija koji je prisutan kod nodularnog lijeva sprječava stvaranje cementita. Budući da je u tom slučaju stvaranje cementita znatno otežano ili spriječeno, austenitna matrica postaje zasićena ugljikom, rast pločica bainitnog ferita je zaustavljen i reakcija transformacije je privremeno zaustavljena. Morfologija bainitnog ferita i udjeli, kod prve reakcije nastalog ferita i austenita, određeni su temperaturom i trajanjem izotermičke pretvorbe. Izotermička pretvorba pri višim temperaturama (iznad 350 °C) stvara relativno krupne i jasno izražene bainitno-feritne pločice u austenitu. Prekratko vrijeme zadržavanja na temperaturi izotermičke pretvorbe za posljedicu ima manju količinu ugljika u austenitu od nužne za njegovu stabilizaciju te se on transformira u martenzit. Prisustvo martenzita u željeznoj matrici značajno podiže tvrdoću, a umanjuje istezljivosti žilavost.

Produkt pretvorbe prve reakcije, u slučaju nižih temperatura izotermičke pretvorbe, su značajno sitniji/finiji bainitni ferit i stabilizirani austenit. Prijevremeni prekid reakcije vodi stvaranju mješovite strukture bainitnog ferita sa stabiliziranim austenitom uz prisustvo martenzita i austenita s nižim udjelom ugljika. Istraživanja su pokazala, da udio otopljenog ugljika u austenitu može doseći 2 % C i da je takav austenit, s visokim postotkom ugljika, toplinski stabilan do 120 °C [22].

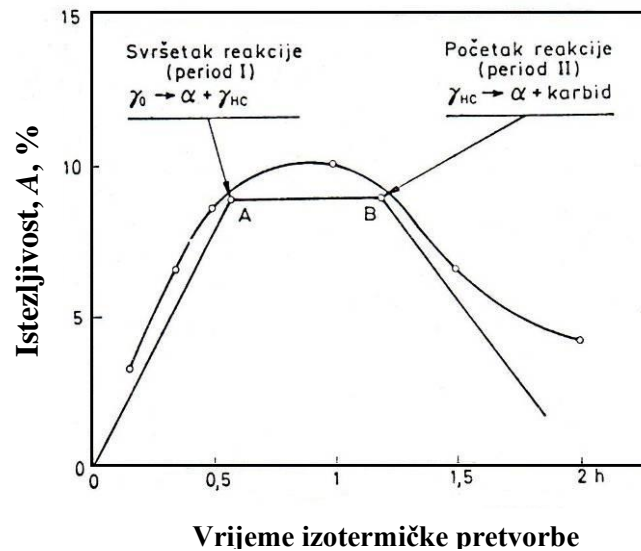
II. faza pretvorbe

Ako je vrijeme zadržavanja duže od potrebnog, područje desno od točke E, slika 27, ugljik precipitira u obliku bainitnog ferita i karbida ($\gamma_{HC} \rightarrow \alpha + Fe_3C$). Precipitacija ili izlučivanje iz prezasićenih čvrstih otopina pretpostavlja proces otapanja atoma nekog elementa pri višim

temperaturama u jednofaznoj čvrstoj otopini, a pri hlađenju na nižim temperaturama kad postanu prezasićeni izlučuju se u obliku precipitata u dvofazni sustav te se u metalnoj matrici mijenja koncentracija otopljenih atoma.

To dovodi do opadanja istezljivosti i žilavosti, što je nepoželjno za ADI materijale.

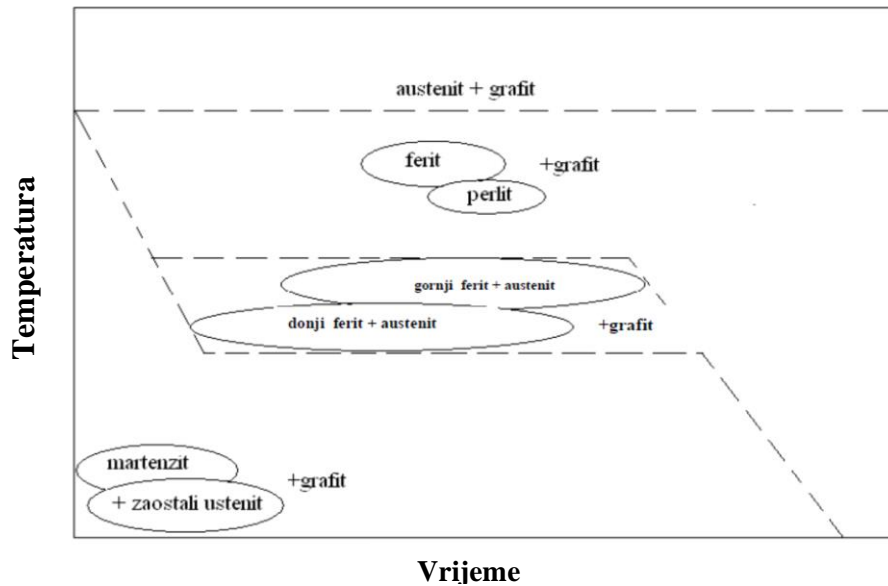
Slika 28 prikazuje dijagram ovisnosti istezljivosti žilavosti o strukturnim promjenama tijekom izotermičke pretvorbe, odnosno vremenu trajanja izotermičke pretvorbe.



Slika 28: Shematski prikaz ovisnosti istezljivosti i žilavosti o strukturnim procesima tijekom izotermičke pretvorbe [22]

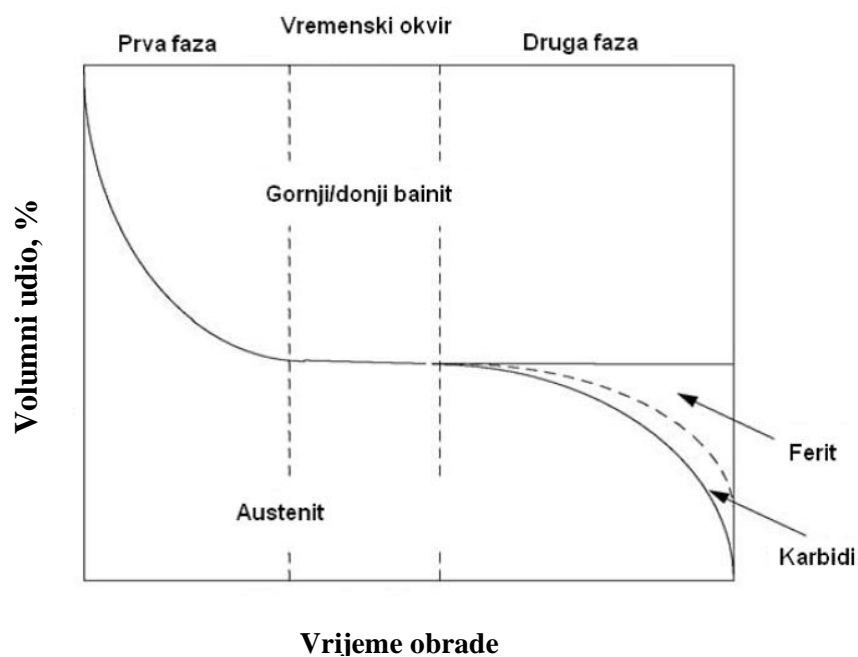
Obzirom na prethodno navedene činjenice, za relativno široko područje izotermičke transformacije (temperatura, vrijeme), svi praktični slučajevi mogu se podijeliti u dvije vrste izotermički poboljšanih ljevova, slika 29:

- 1) Ljevovi poboljšani u području nižih temperatura izotermičke transformacije, koji imaju finiju ausferitnu strukturu (donjeg bainita) i odlikuju se visokom čvrstoćom, malom duktilnošću i relativno visokom tvrdoćom.
- 2) Ljevovi poboljšani u području viših temperatura izotermičke transformacije, koji imaju grublju ausferitnu strukturu (gornjeg bainita) i odlikuju se visokom duktilnošću, visokom čvrstoćom i umjerenom tvrdoćom.



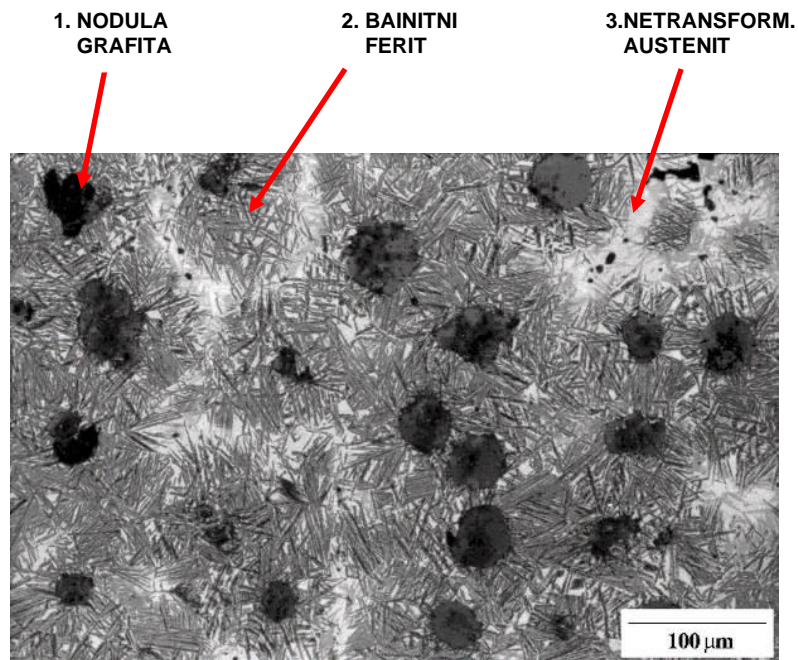
Slika 29: Shematski prikaz hlađenja u TTT-dijagramu izotermičkog poboljšavanja nodularnog lijeva [25]

Na slici 30 shematski je prikazan udio pojedinih faza u mikrostrukтури nodularnog lijeva tijekom trajanja izotermičke pretvorbe.

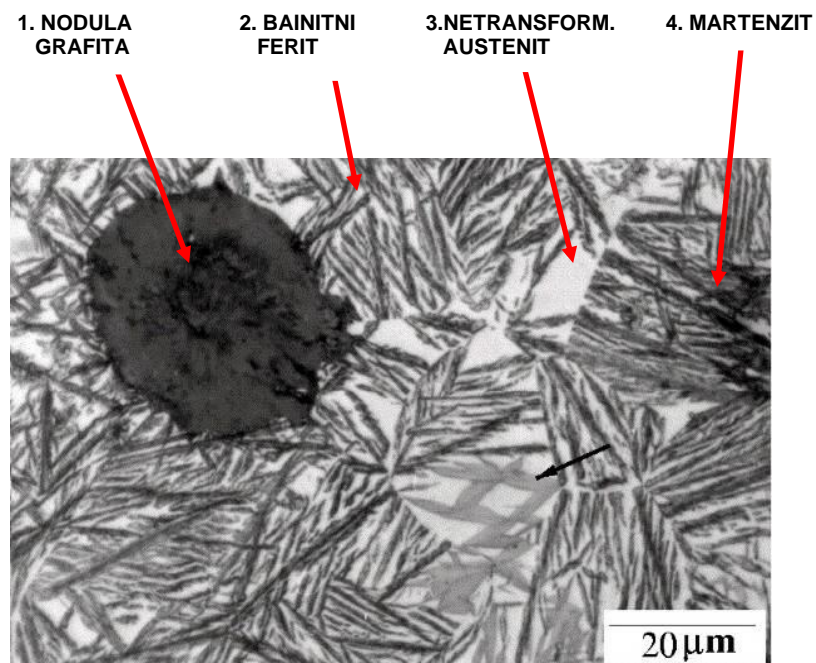


Slika 30: Shematski prikaz udjela faza tijekom izotermičke pretvorbe [26]

Slika 31 prikazuje mikrostrukturo izotermički poboljšanog nodularnog lijeva, pri različitim povećanjima, s fazama koje se mogu naći u njemu.



a)



b)

Slika 31: Mikrostruktura ADI-a [27]

a) manje povećanje; b) veće povećanje

Dakle, za postizanje traženih svojstava ADI materijala, nužno je točno odrediti i osigurati sljedeće važne parametre postupka izotermičke pretvorbe [21]:

- temperaturu austenitizacije,
- vrijeme držanja na temperaturi austenitizacije,
- brzinu hlađenja s temperature austenitizacije na temperaturu izotermičke pretvorbe,
- temperaturu izotermičke pretvorbe,
- vrijeme držanja na temperaturi izotermičke pretvorbe,
- hlađenje na zraku do sobne temperature.

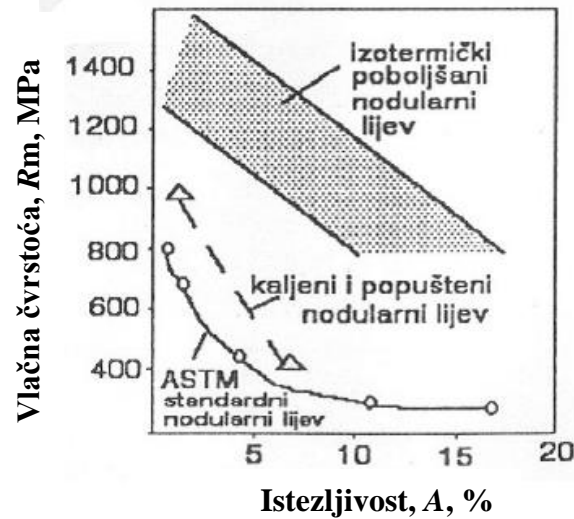
2.2.3 Mehanička svojstva i podjela ADI-a (usporedba s NL-om)

Mehanička svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva određena su na ispitnim uzorcima koji su dobiveni mehaničkom obradom odvojeno lijevanih probnih štapova, norma EN 1564:2011, tablica 5 [23].

Tablica 5: Normom EN 1564:2011 propisane minimalne vrijednosti vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i istezljivosti za različite debljine stjenke ADI-a [23]

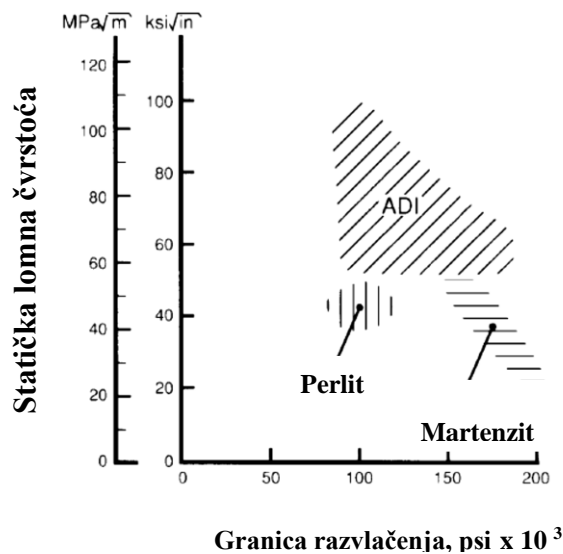
Označavanje materijala:		Referentna debljina stijenke t mm	Konv. Granica razvlačenja, $R_{p0,2}$, MPa, min.	Vlačna čvrstoća, R_m , MPa, min.	Istezljivost, A , %, min.
Oznaka:	Broj:				
EN-GJS-800-10 EN-GJS-800-10-RT	5.3400	$t \leq 30$	500	800	10
	5.3401	$30 < t \leq 60$		750	6
		$60 < t \leq 100$		720	5
EN-GJS-900-8	5.3402	$t \leq 30$	600	900	8
		$30 < t \leq 60$		850	5
		$60 < t \leq 100$		820	4
EN-GJS-1050-6	5.3403	$t \leq 30$	700	1050	6
		$30 < t \leq 60$		1000	4
		$60 < t \leq 100$		970	3
EN-GJS-1200-3	5.3404	$t \leq 30$	850	1200	3
		$30 < t \leq 60$		1170	2
		$60 < t \leq 100$		1140	1
EN-GJS-1400-1	5.3405	$t \leq 30$	1100	1400	1
		$30 < t \leq 60$		Dogovoriti između proizvođača i naručitelja	
		$60 < t \leq 100$			

Izotermički poboljšani nodularni lijev postiže vrijednost čvrstoće koja je dva puta veća od čvrstoće standardnih kvaliteta nodularnog lijeva, a da pri tome ima jednaku vrijednost žilavosti i istežljivost [18]. Osim toga ima dinamičku izdržljivost jednaku ili bolju od kovanih čelika. Kao kod svakog metalnog materijala, mehanička svojstva pri upotrebi ovise o stanju mikrostrukture. Slika 32 prikazuje odnos mehaničkih svojstava vlačna čvrstoća – istežljivost nodularnog lijeva (lijevano stanje strukture) i izotermički poboljšanog nodularnog lijeva.



Slika 32: Shematski prikaz usporedbe mehaničkih svojstava NL i ADI-a [21]

Slika 33 prikazuje odnos lomne žilavosti i granice razvlačenja za nodularni lijev i izotermički poboljšani nodularni lijev.



$$1 \text{ psi} = 6894,76 \text{ Pa} \quad 1 \text{ Pa} = 145,04 \times 10^{-6} \text{ psi} \Rightarrow 1 \text{ Mpa} = 145,04 \text{ psi}$$

Slika 33: Lomna žilavost NL-a i ADI [13]

Tablica 6 donosi normom EN 1564 : 2011 (Anex D) propisane vrijednosti tvrdoće ADI materijala.

Tablica 6: Normom EN 1564 : 2011 propisane vrijednosti tvrdoće ADI-a [23]

Oznaka materijala	Tvrdoća HB
EN-GJS-800-10, EN-GJS-800-10-RT	250-310
EN-GJS-900-8	280-340
EN-GJS-1050-6	320-380
EN-GJS-1200-2	340-420
EN-GJS-1400-1	380-480

Normom EN 1564:2011 propisan je minimalni udarni rad loma. Vrijednosti udarnog rada loma mjerene su na ispitnim uzorcima s V-zarezom koji su dobiveni mehaničkom obradom odvojeno lijevanih probnih štapova, tablica 7.

Tablica 7: Normom EN 1564:2011 propisane vrijednosti udarnog rada loma za ADI [23]

Označavanje materijala		Referentna debljina stijenke t mm	Min. Udarni rad loma pri sobnoj temp. (23±5) °C	
Oznaka	Broj		Sr. Vrij. 3 mjer. J min	Pojedinačna vrij. J min
EN-GJS-800-10-RT	5.3401	$t \leq 30$	10	9
		$30 < t \leq 60$	9	8
		$60 < t \leq 100$	9	7

Izotermičkim poboljšavanjem nodularnog lijeva nastaje ausferitna matrica sačinjena od bainitnog ferita i ugljikom bogatog austenita (15-40 %). Hladnom deformacijom austenit se može transformirati u martenzit, što donosi još jednu povoljnu karakteristiku ADI materijala, mogućnost da se nakon izotermičke pretvorbe površinski dodatno očvrstne postupcima kugličarenja ili čekićanja. Povećana tvrdoća doprinosi većoj otpornosti trošenju površine izložene promjenljivom cikličkom naprezanju, što proširuje mogućnost primjene ADI materijala.

2.3 KUGLIČARENJE

Povoljni učinci kugličarenja, čiji je cilj unošenje površinskih napreznja, uočeni su početkom dvadesetog stoljeća. Unošenje površinskih napreznja počelo se ostvarivati pomoću mlaza sitnih kuglica koje se gibaju velikom brzinom. Taj hladni postupak površinskog očvršćavanja postao je poznat pod nazivom *kugličarenje* (eng. "Shot peening") [28].

Postupak kugličarenja je kontrolirani tehnološki postupak kojim se pri normalnim uvjetima okoline ostvaruje plastična deformacija odnosno unosi tlačno napreznje u površinski sloj metala. Osnovna svrha kugličarenja je povećanje površinske tvrdoće i dinamičke izdržljivosti, a ima i učinak čišćenja površine [29].

Kada pojedinačne kuglice u mlazu kuglica velike brzine udare u metalnu površinu dolazi do radijalnog razvlačenja površine metala u područje plastičnih deformacija što rezultira povećanjem površinske tvrdoće. Učinci ove hladne deformacije uočavaju se u dubini do 1 mm ovisno o intenzitetu kugličarenja i karakteristikama materijala kuglica [30].

Kugličarenjem ostvarena hladna plastična deformacija mijenja razdiobu napreznja u površinskom sloju, koja je bila stvorena nekim ranijim tehnološkim postupkom. Ono je posebno učinkovito kod strojno obrađenih površina jer mijenja uvjete zaostalog vlačnog napreznja u povoljnije uvjete tlačnog napreznja.

Tlačno napreznje smanjuje mogućnost nastajanja i širenja površinskih mikropukotina koje mogu biti izazvane korozijom, napetosnom korozijom, umorom i kavitacijskom erozijom čime će se povećati dinamička izdržljivost [31].

Također, djelotvorno je kod ublažavanja negativnih utjecaja postupka zavarivanja, tako što smanjuje utjecaj koncentracije napreznja u zoni utjecaja topline neposredno uz zavar.

2.3.1 Čimbenici koji utječu na učinak kugličarenja

Intenzitet (jačina) kugličarenja je pokazatelj prijenosa energije mlaza kuglica na površinski sloj uzorka. Isti ovisi o veličini, obliku, tvrdoći, materijalu, brzini i naletnom kutu kuglica. Prihvaćeno je da se za provjeru jačine kugličarenja koristi metoda osmišljena i patentirana od strane Johna O. Almena. Metoda je bazirana na mjerenju deformacije ispitne trake (Almenov luk) nastale nakon kugličarenja.

Danas se koristi metoda određena normama J442 i J443.

Postoje tri tipa Almen trake koje se razlikuju prema debljini:

- Almen traka "A" najčešće se upotrebljava za određivanje intenziteta kugličarenja s lijevanim kuglicama ili rezanom žicom;

- "N" traka, koristi se kod kugličarenja sa staklenim i keramičkim zrnima;
- "C" Almen traka je znatno deblja, namijenjen za određivanje većih intenziteta, i rjeđe se koristi od prethodna dva tipa.

Sredstvo za kugličarenje – Sredstva koja se koriste prilikom kugličarenja izrađuju se od čeličnog lijeva, stakla, keramike i rezane čelične žice. Od navedenih najčešće se u upotrebi nalaze kuglice iz čeličnog lijeva.

Kuglice se klasificiraju na određene veličine i toplinski obrađuju kako bi se postigla željena tvrdoća. Prema normi SAE J 827 preporučena tvrdoća čeličnih kuglica mora se nalaziti u granicama od 40 do 50 HRC.

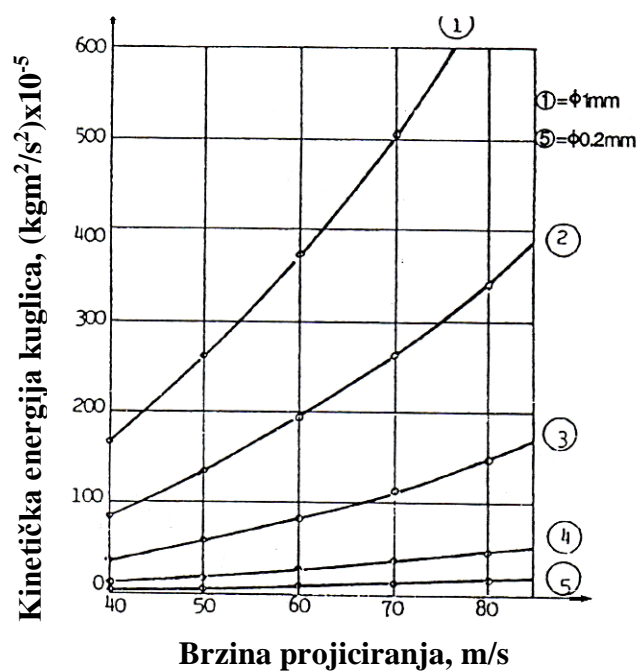
Različitost u tvrdoćama kuglica ne utječe na intenzitet kugličarenja uz uvjet da je tvrdoća kuglice veća od tvrdoće uzorka. Ako je kuglica mekša od materijala uzorka, doći će do pada intenziteta kugličarenja [28]. Kada su drugi parametri kugličarenja nepromijenjeni, povećanje dimenzije kuglice rezultira povećanjem intenziteta kugličarenja i debljine stlačenog sloja, ali i padom stupnja prekrivanja.

Izbor veličine kuglice diktiran je oblikom uzorka koji se kugličari. S obzirom na neravnine površina koje se kugličare, a u svrhu ostvarivanja što većeg stupnja prekrivanja, u praksi se najčešće koriste kuglice S330 (\varnothing 0,85 mm) i S390 (\varnothing 1 mm).

Da bi se ostvario željeni intenzitet i osigurali ispravni uvjeti kugličarenja potrebno je konstantno uklanjati slomljene i oštećene kuglice iz procesa.

Postotak ispravnih kuglica u sustavu ne smije biti niži od 85 %. Oštri rubovi slomljenih kuglica mogu izbrazdati uzorak te tako ostvariti dodatne koncentracije naprezanja.

Brzina kuglice - Brzina projiciranja kuglica na uzorak i masa kuglica uvjetuju energiju sudara. Povećanje brzine za posljedicu ima povećanje intenziteta kugličarenja i povećanje dubine djelovanja kugličarenja u materijal, obzirom da kinetička energija raste s povećanjem brzine, što se može vidjeti na dijagramu, slika 34.



Slika 34: Dijagram ovisnosti kinetičke energije kuglica u odnosu na brzinu projiciranja mlaza i promjera kuglica [30]

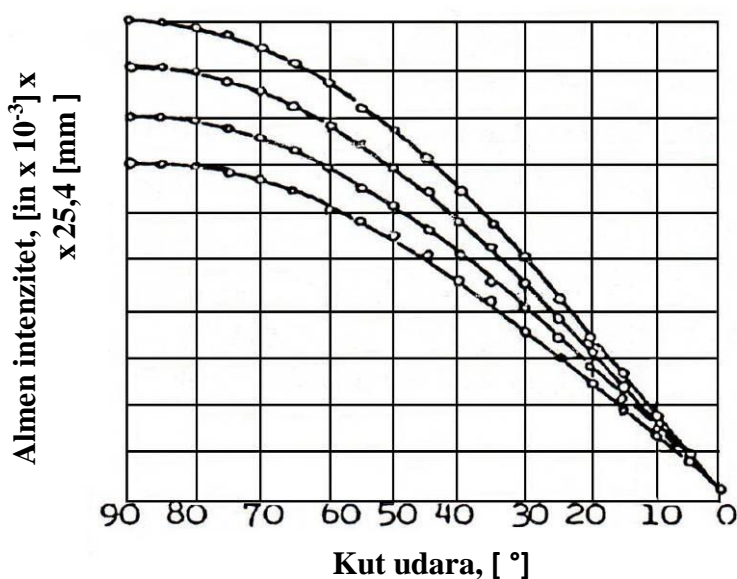
Na gornjoj slici vidljivo je da povećanje brzine ima manji utjecaj na povećanje kinetičke energije za kuglice manjeg promjera. Iz toga proizlazi da regulacija brzine mora biti finija za kuglice većeg promjera.

Povećanje brzine projiciranja povećava dubinu promjene stanja u materijalu, kao i vrijednost zaostalih naprezanja [30].

Kut naleta kuglica ima značajan utjecaj na površinsku hrapavost i energiju koja se stvara prilikom udara odnosno na intenzitet kugličarenja.

Kut naleta je kut između površine kugličarenog uzorka i pravca kretanja mlaza kuglica. Najveći učinak ima mlaz kuglica koji dolazi pod kutom od 90° . Kako se taj kut smanjuje dolazi do pada intenziteta kugličarenja. Uočeno je da se kuglice koje se odbijaju od površine i vraćaju u suprotnom smjeru sudaraju s novo nadolazećim, pa neki literaturni izvori predlažu korištenje kuta naleta nekoliko stupnjeva manjeg od 90° .

Na slici 35 prikazan je dijagram promjene intenziteta kugličarenja u funkciji sinusa kuta naleta.



Slika 35: Dijagram utjecaja kuta udara na Almen intenzitet [32]

Stupanj prekrivanja površine – Prekrivenost površine proporcionalna je veličini površine koja je zahvaćena velikim brojem kuglica. U pravilu, ako se kugličarenjem ne ostvari stupanj prekrivenosti od 100 % neće se ostvariti ni maksimalno moguće povećanje otpornosti na umor. Kako je prikazano u normi SAE J 443 ("Postupak za korištenje probnih traka kod kugličarenja") postoji određeni kvantitativan odnos između stupnja prekrivanja i vremena izlaganja mlazu kuglica koji se može izraziti jednadžbom 2.3 [32].

$$C_n = 1 - (1 - C_1)^n \quad (2.3)$$

- gdje je:
- C_n - postotak prekrivanja nakon n-tog prolaza
 - C_1 - postotak prekrivanja nakon jednog prolaza (decimalna vrijednost)
 - n - broj prolaza

Precizna mjerenja iznad 98 % teško su ostvariva, ali zato mjerenja kod nižih vrijednosti stupnja prekrivanja služe kao smjernice za određivanje vremena izlaganja mlazu i ekvivalentnog vremena potrebnog za ostvarivanje bilo kojeg željenog prekrivanja.

Vezano uz činjenicu da se precizna mjerenja prekrivanja mogu provesti do najviše 98 % prekrivenosti, ta se vrijednost uzima kao potpuna prekrivenost ili zasićenost.

Pored navedenih, utjecaj na efikasnost intenziteta kugličarenja imaju još i:

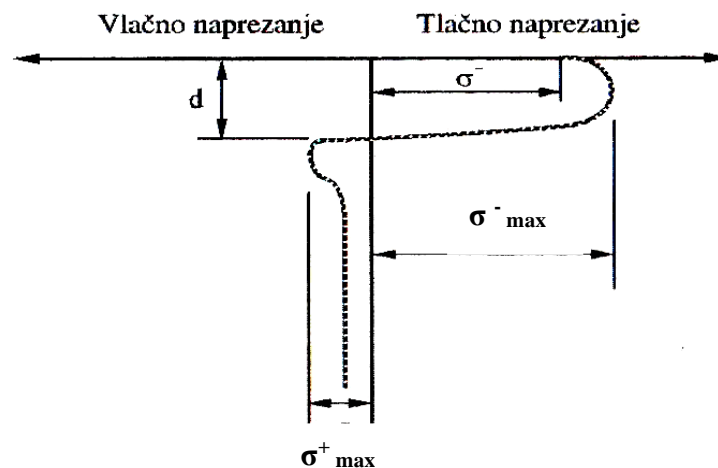
- udaljenost mlaznica od elemenata koji se obrađuje (H),
- oblik i dimenzije mlaznice,
- brzina kretanja mlaznice (V_y i V_z),
- brzina kretanja elemenata (V_x) itd.,

ali se svi navedeni parametri, u krajnjem ishodu, svode na glavne parametre intenziteta (I), prekrivanja (Pr) i vremena izlaganja (t).

2.3.2 Zaostala naprezanja unesena kugličarenjem

Pod zaostalim naprežanjem najčešće se podrazumijeva naprežanje koje ostaje u strojnom dijelu nakon što je završen proces izrade, a na istog ne djeluje nikakvo vanjsko opterećenje. Zaostala naprežanja mogu biti vlačna i tlačna.

Iznos zaostalog naprežanja koje se unosi kugličarenjem ograničeno je svojstvima kugličarenog metala. Razdioba naprežanja unesenih kugličarenjem u površinu metala, koji prethodno nije bio pod utjecajem drugih zaostalih naprežanja, prikazana je na slici 36.



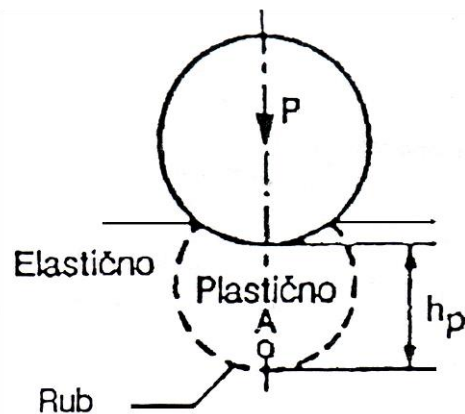
Slika 36: Shematski prikaz profila teoretske razdiobe zaostalog naprežanja [33]

U tako nastaloj razdiobi naprežanja, u površinskom sloju metala uneseno je zaostalo tlačno naprežanje paralelno s površinom, dok se u podpovršinskom sloju reakcijom metala induciralo vlačno naprežanje.

Iz slike 36 vidljivo je da postoje četiri važne karakteristike unesenog naprezanja, a to su:

- σ - površinsko naprezanje (naprezanje izmjereno na površini)
- σ^-_{\max} - najveće tlačno naprezanje (najveći iznos unesenog tlačnog naprezanja, koje se nalazi nešto ispod površine)
- d - dubina (dubinom je određeno mjesto gdje tlačno zaostalo naprezanje prelazi u vlačno, tj. iznos dubine ujedno predstavlja i debljinu površinskog sloja u kojem vlada tlačno zaostalo naprezanje.)
- σ^+_{\max} - najveće vlačno naprezanje (najveći iznos unesenog vlačnog naprezanja, za koji se ne smije dozvoliti da naraste do mjere kada može izazvati pojavu ranih unutrašnjih pogrešaka).

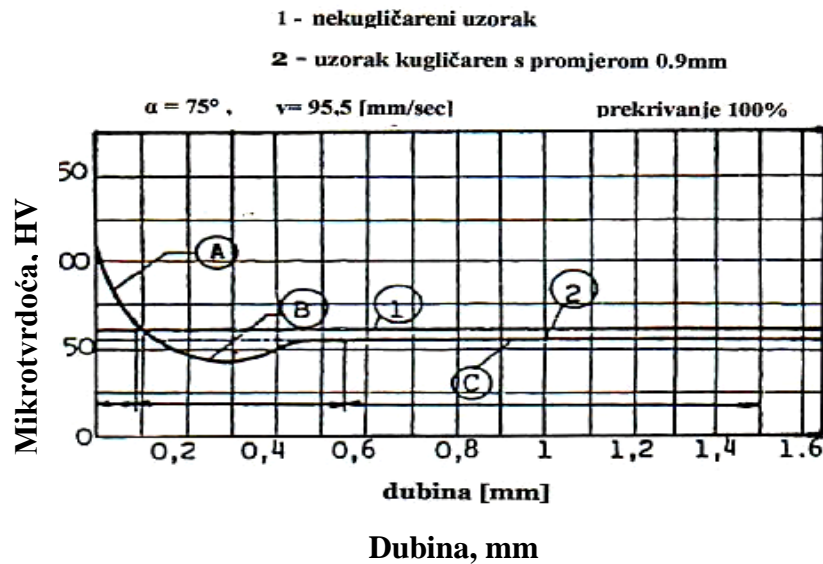
Povećanjem opterećenja preko granice razvlačenja materijala povećava se i plastično razvlačenje materijala u "krateru" otiska, potpuno okruženom materijalom koji je još uvijek elastičan, slika 37.



Slika 37: Razdioba deformacije u području udara kuglice [30]

Takve površinske deformacije povećavaju tvrdoću kugličarenog materijala sve dok je isti plastičan u hladnom stanju.

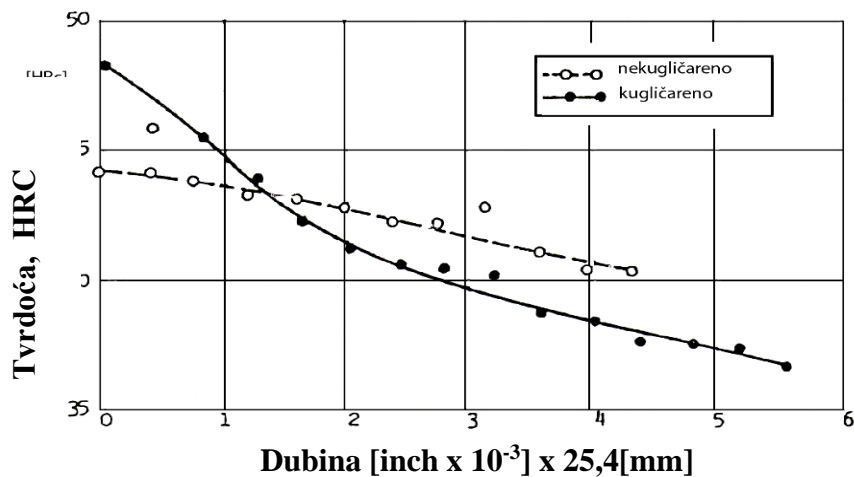
Prema istraživanju na čeličnom limu C10 s kuglicama \varnothing 0,9 mm dobila se krivulja mikrotvrdoće na kojoj su određena tri područja, slika 38.



Slika 38: Dijagram usporedbe razdiobe tvrdoće po dubini za kugličareni i nekugličareni materijal [30]

- Područje A je područje povećane površinske tvrdoće gdje je tvrdoća veća od tvrdoće osnovnog (nekugličarenog) materijala;
- Područje B je područje gdje je tvrdoća manja od tvrdoće osnovnog materijala;
- Područje C je područje u kojem kugličarenje, praktično, nema utjecaja.

Prethodnu tvrdnju potvrđuju i Almen-ova ispitivanja na čeliku tvrdoće 45 HRC na čijoj je površini ustanovljeno povećanje tvrdoće, a smanjenje u nešto dubljem sloju materijala, slika 39.

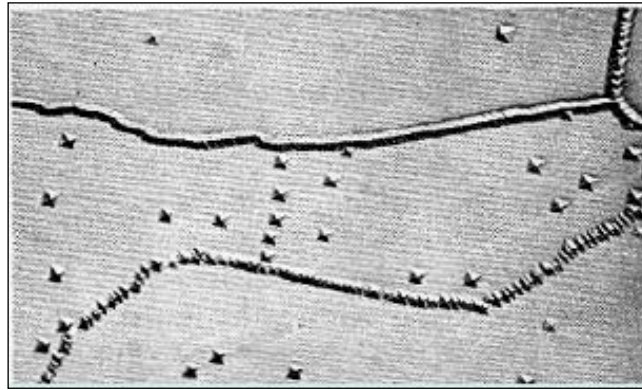


Slika 39: Razdioba tvrdoće po dubini materijala C67S [30]

2.3.3 Strukturne promjene koje mogu nastati kugličarenjem

2.3.3.1 Dislokacije

Dislokacije su jednodimenzijske, linijske nesavršenosti koje nastaju uslijed klizanja dijelova kristala tijekom njegovog rasta, ili pri plastičnoj deformaciji. Nastaju nagomilavanjem niza točkastih nepravilnosti koje uzrokuju distorziju kristalne rešetke, slika 40.



Slika 40: Mikroskopski izgled dislokacija [34]

Za opis dimenzija i smjera najvećih pomaka u kristalnoj rešetki, a koje uzrokuju distorzije, služi tzv. Burgersov vektor.

Obzirom na međusoban položaj Burgersovog vektora i dislokacijske crte, dislokacije se dijele na bridne (rubne) i vijčane (spiralne).

Kod djelovanja smičnog naprezanja, bridne dislokacije se kreću tako da se miče red atoma za redom te se jedan dio kristala pomiče u odnosu na drugi. Kada dislokacija prođe kroz kristal, dio kristala u blizini klizne plohe se pomakne jedan atomski red u odnosu na dio ispod klizne plohe.

Kretanje dislokacija uzrokuje promjenu oblika kristala koji ostaje trajno deformiran – plastična deformacija. Kretanje dislokacija se najlakše događa na najgušće zaposjednutim plohama kristala. Dislokacije imaju bitnu ulogu u definiranju mehaničkih svojstva materijala, jer njihovo postojanje u kristalima osigurava mehanizam pomoću kojeg dolazi do promjene oblika i mehaničke deformacije.

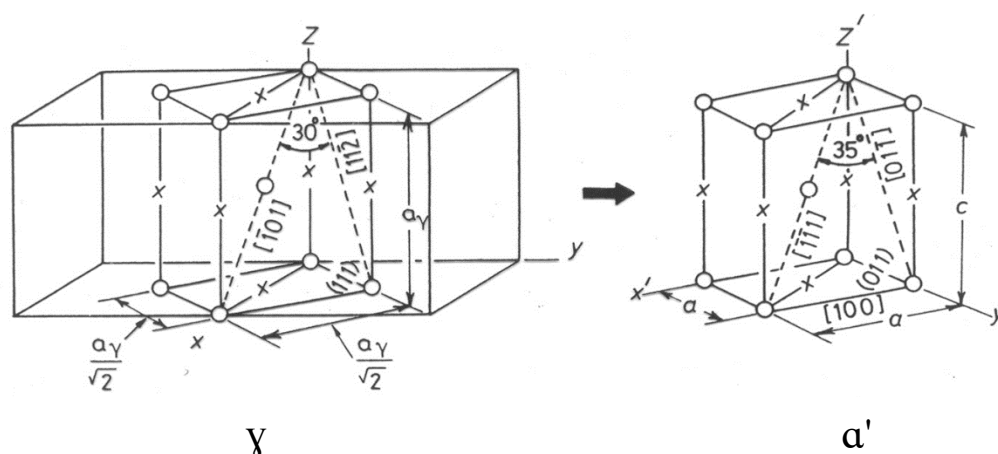
Postojanje dislokacija u kristalima osigurava istežljivost (sposobnost deformiranju), jer se teorijska čvrstoća kristalnih krutina drastično smanjuje zbog njihove prisutnosti.

Materijali čiji kristali nemaju dislokacija su krhki i praktički neupotrebljivi kao konstrukcijski materijali u strojogradnji.

Može se zaključiti da su dislokacije vrlo važne u određivanju čvrstoće i istezljivosti, te da mehanička svojstva kristalnih krutih materijala ovise o dislokacijama [34].

2.3.3.2 Transformacija austenita u martenzit

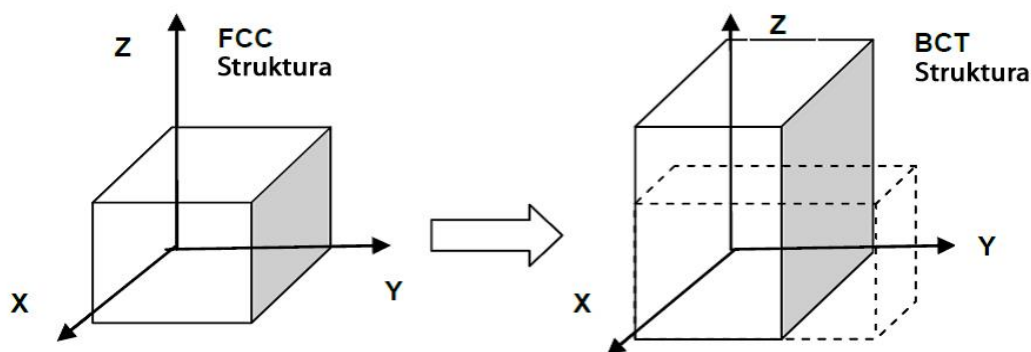
Austenitna pretvorba je bezdifuzijska pretvorba pri kojoj FCC (eng. face centered cubic) kristalna rešetka austenita preklomom prelazi u BCT (engl. body centered tetragonal) kristalnu rešetku pri čemu nastaje nova faza koja se naziva martenzit. Bain-ov model fazne pretvorbe austenita u martenzit prikazan je na slici 41.



Slika 41: Položaj atoma ugljika u pretvorbi γ u α' rešetku [35]

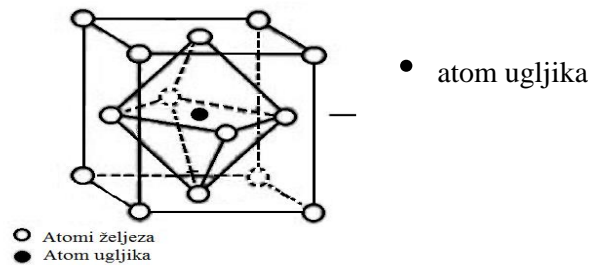
Na slici 41 isprekidanim linijama prikazana je mogućnost uključinskog položaja atoma ugljika. Bain je razjasnio pretvorbu FCC u BCT s minimalnim pomakom atoma i naprežanjem u osnovnoj rešetki (granična ravnina naprežanja).

Pretvorba u BCT rešetku temeljena je na preklopu uz povećanje kristalne rešetke 20% duž Z-osi i 12% duž X i Y osi [36], slika 42, što rezultira porastom volumena u martenzitnoj strukturi do 4% [37].



Slika 42: Bain-ov model pretvorbe FCC u BCT [36]

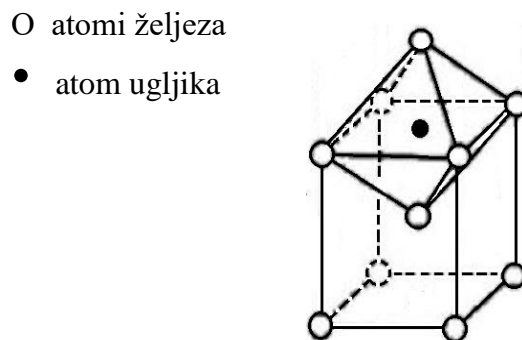
Austenit je kristal mješanac ugljika u kristalnoj rešetki γ željeza FCC u kojoj ugljik formira čvrstu interkristalnu otopinu zauzimajući oktaedarske praznine tipa $(1/2; 1/2; 1/2)$ i $(0; 0; 1/2)$ [37], kako je prikazano na slici 43.



Slika 43: FCC Aus

Udarnim djelovanjem u površinskom sloju osnovnog materijala dolazi do fazne promjene u čvrstom stanju pri sobnoj temperaturi, odnosno plošno centrirana FCC rešetka austenita se transformira u BCT prostorno centriranu tetragonalnu rešetku martenzita [39].

Atomi ugljika smješteni su u intersticijskim oktaedarskim prazninama na pozicijama $(0; 0; 1/2)$ i $(1/2; 1/2; 0)$ formirajući čvrstu otopinu zasićenu ugljikom u rešetki željeza [37], slika 44.



Slika 44: BCT Martenzit [38]

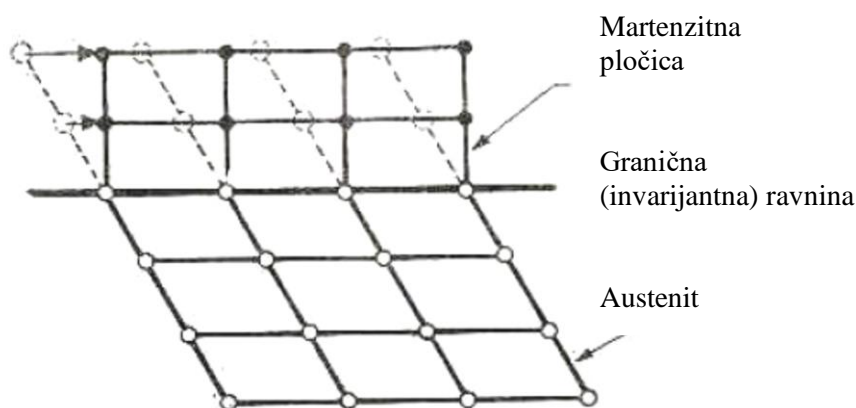
Zasićenost ugljikom izaziva distorziju kristalne rešetke zbog čega u martenzitu ima zaostalih naprezanja. Distorzija rešetke uzrokuje povećanje tvrdoće i čvrstoće, a gubitak istezljivosti.

Martenzitna pretvorba započinje uslijed poremećaja ravnoteže uravnoteženih i nedeformiranih faza metalne matrice. Mali poremećaji tijekom martenzitne pretvorbe, uzrokovani kontinuiranim vanjskim utjecajem neće dovesti do potpunog nestanka početne faze iz koje nastaje nova faza.

Dakle, konačni udio novonastale faze ovisi o veličini poremećaja ravnoteže polazne matrice. Rast martenzitnih kristala je brz ($10^4 - 10^5$ cm/s) i ne pokazuje vidljivu ovisnost o temperaturi.

Pomicanje atoma koji sudjeluju u formiranju martenzita može se usporediti s mehanizmom smicanja.

Premještanje atoma tijekom martenzitne transformacije prikazano je na slici 45.



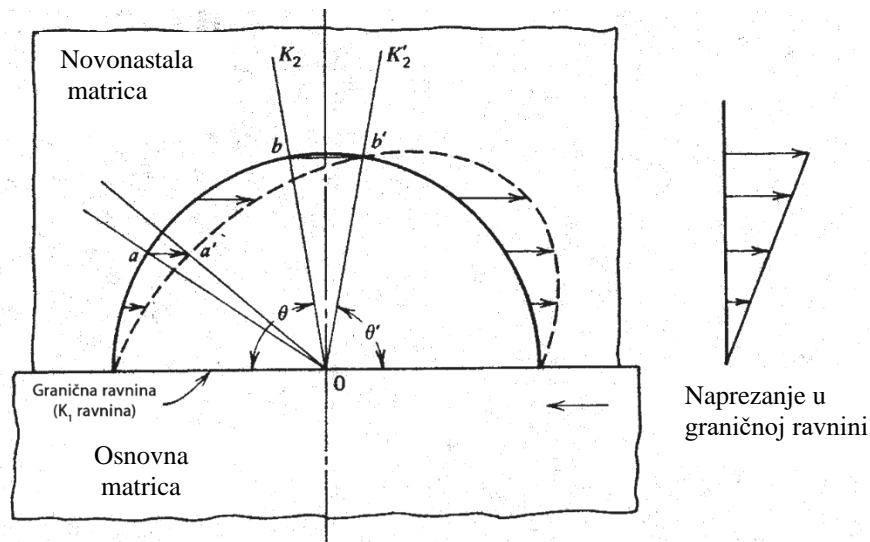
Slika 45: Shematski prikaz pomicanja atoma i nastanak pločice martenzita [37]

Mehanizam transformacije prikazan na slici 45 stvara strukturu drugačiju od polazne (austenitne) te ukazuje na postojanje veze između dvije kristalne rešetke. Lokalna promjena kristalne strukture tijekom transformacije praćena je deformacijom kristalne rešetke komponentom dominantnog preusmjeravanja.

Gotovo svi mehanizmi nastanka martenzita ostvareni deformacijom su na principu nastanka granične ravnine naprezanja [37].

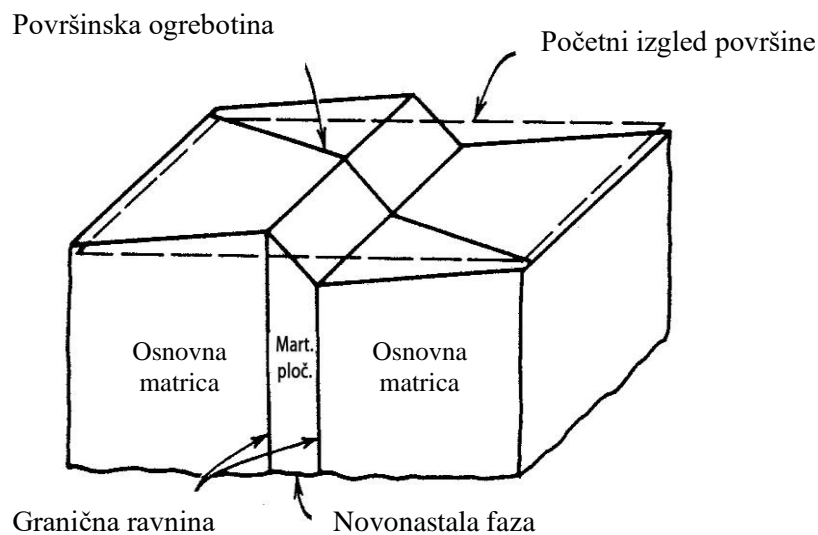
Granična ravnina ima usmjerenu orijentaciju prema osima kristala početne (austenitne) i konačne (martenzitne) faze.

Slika 46, pokazuje raspodjelu naprezanja u graničnoj ravlini austenit-martenzit uz pomoć ucrtanog polukruga.



Slika 46: Prikaz raspodjele naprezanja u graničnoj ravnini austenit - martenzit [35]

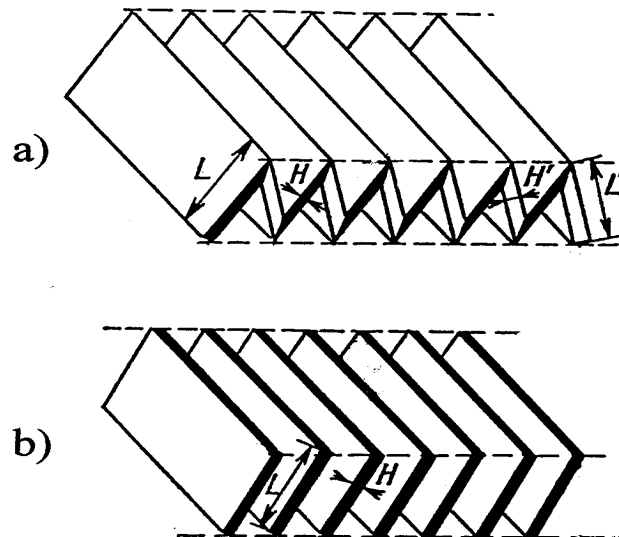
Fazna pretvorba podrazumijeva promjenu oblika transformiranog područja koja se manifestira u nastanku karakterističnog reljefa u području pojave pločica nove faze, slika 47.



Slika 47: Reljef površine nastao formiranjem martenzita [35]

Nastale mikro deformacije su pravilne i uniformne te predstavljaju kombinaciju jednostavnih smikova duž površine što utječe na porast tlačnih naprezanja u površinskom sloju.

Karakterističan morfološki oblik martenzita je pločica s malom debljinom u odnosu na ostale dimenzije. Martenzitni kristali imaju pravilnu unutarnju strukturu, a imaju i jasno određenu tendenciju ka pravilnoj distribuciji pločica pri nastanku nove faze, slika 48.



Slika 48: Shematski prikaz razmještaja grupa martenzitnih pločica [35]

Obzirom na kinetiku nukleacije, martenzitna pretvorba može biti neovisna o promjeni temperature tj. izotermička.

Brzina nukleacije kod takve pretvorbe vrlo je velika pri čemu stupanj transformacije dostiže svoju krajnju vrijednost brzo, a da bi se pretvorba dalje odvijala, potreban je daljnji poremećaj ravnoteže, prvenstveno promjenom temperature [35].

Da bi se minimizirala energija deformacije, martenzit se formira u obliku umetaka, ovisno o rasporedu kristala.

Utjecaj plastične deformacije

Plastična deformacija koja djeluje na pomicanje atoma ima utjecaj i na dislokacije unutar kristalne rešetke. Dislokacijska energija naprezanja pomaže transformaciji reducirajući nastanak prepreka za formiranje koherentnih jezgri martenzita.

DGd predstavlja interakcijsku energiju dislokacija koja ublažava nastanak energetske barijere [36].

$$DGd = 2\mu Spacb$$

S – smično naprezanje jezgre;

b – Burger-ov vektor dislokacija;

a – dijametar martenzitnih jezgri;

c – debljina martenzitne jezgre;

μ – smični moment austenita

Povećana gustoća dislokacija rezultira povećanjem broja potencijalnih martenzitnih jezgri kod deformacija. Plastična deformacija pomaže nastanku i rastu martenzita, ali prevelika deformacija sprječava pretvorbu.

Nastanak martenzita, deformiranjem pri sobnoj temperaturi ovisi o stabilnosti austenita, koja raste s porastom veličine zrna. Količina stvorenog martenzita ovisi o nekoliko faktora kao što su kemijski sastav, temperatura, stanje deformacija, veličina i orijentacija kristalnih zrna [40]. Porast udjela martenzita nastalog plastičnom deformacijom mijenja fizikalna svojstva metalne matrice. Martenzit ima visoku tvrdoću i čvrstoću zbog interkristalnih ugljikovih atoma koji sprječavaju kretanje dislokacija i klizanje ravnina unutar BCT kristalne rešetke čime se povećava otpornost trošenju te smanjuje mogućnost širenja pukotina kod promjenjivog naprezanja.

Viša temperatura austenitne pretvorbe stvara ADI veće istezljivosti i otpornosti na umor kod kojeg se unosom naprezanja ostvaruje znatno bolji efekt dodatnog povećanja istezljivost i otpornost na umor u odnosu na ADI nastao pri nižoj temperaturi izotermičke pretvorbe [36].

2.4 METODE ISPITIVANJA OTPORNOSTI NA TROŠENJE

Trošenje je proces postupnog gubitka materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama [41].

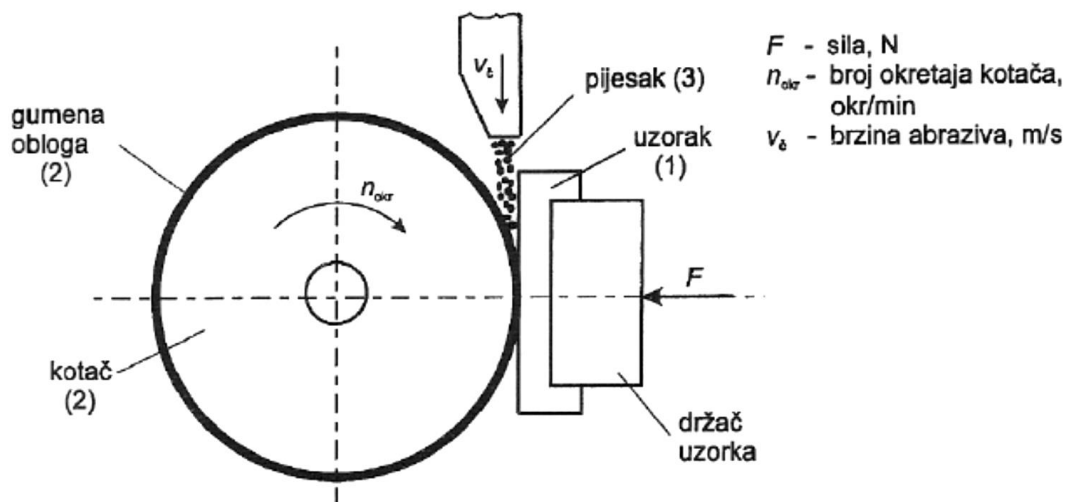
Između trenja i trošenja u jednom tribosustavu nema jednoznačne veze. U većini slučajeva povećanje trenja popraćeno je intenzivnim trošenjem, ali postoje i slučajevi kad je to obratno. Trošenje uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotine. Izgled trošenih površina i oblik čestica trošenja osnovni su pokazatelji za identifikaciju mehanizma trošenja.

2.4.1 Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Abrazijsko trošenje je istiskivanje materijala izazvano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Oko 50 % svih slučajeva trošenja otpada na abrazijsko. Karakteristika te vrste trošenja je prisutnost tvrdih abrazijskih čestica uglavnom mineralnog podrijetla, pa se često i naziva mineralno trošenje.

Za eksperimentalno određivanje otpornosti na abrazijsko trošenje postoji veliki broj uređaja i metoda. U ovom istraživanju korištena je standardna metoda "suhi pijesak/gumeni kotač".

Standardni uređaj prema ASTM G56 – 94 shematski je prikazan na slici 49.



Slika 49: Skica uređaja „suhi pijesak/gumeni kotač“ [41]

Ispitivanje se sastoji od abradiranja uzorka materijala (1) (dimenzija 25x12x75 mm) standardnim zaobljenim kvarcnim pijeskom Ottawa AFS 50/70 (3).

Uzorak se naslanja na kotač obložen gumom (2) (tvrdoće oko 60 Shore A), a opterećen je utezima preko koljenaste osovine. Sila F iznosi 45 N ili 130 N, ovisno o varijanti postupka. Ukupni broj okretaja kotača je promjenjiv, a registrira se brojačem.

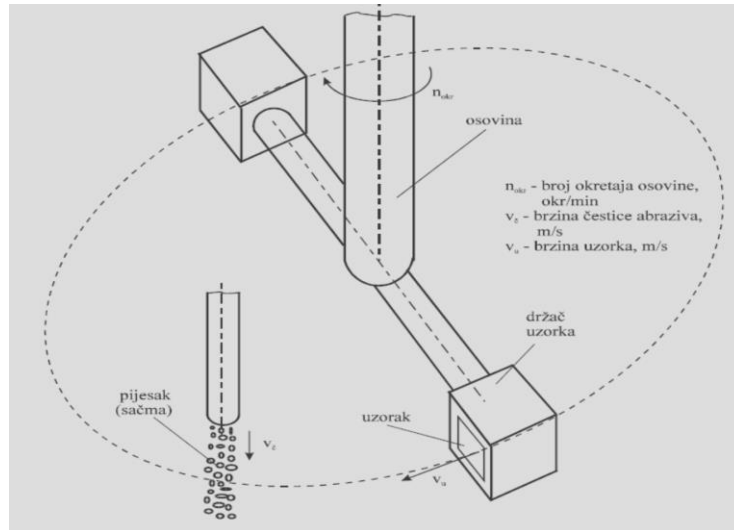
Vaganjem uzorka prije i poslije ispitivanja utvrđuje se gubitak mase koji se preračunava u gubitak volumena. Ta metoda omogućuje relativno rangiranje otpornosti na abrazijsko trošenje različitih materijala ako je prevladavajući mehanizam trošenja abrazija.

Najveća prednost te metode je to što je standardizirana, čime je omogućena usporedivost rezultata dobivenih u različitim laboratorijima [41].

2.4.2 Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje

Erozija je gubitak materijala s površine krutog tijela zbog relativnog gibanja (strujanja) fluida u kojem se nalazi eroziv (krute čestice). Erozijska erozija kod koje je strujanje pod malim kutom (do 30°) u odnosu na površinu naziva se abrazijska erozija, a pri udaru eroziva u površinu pod većim kutovima (60-90°) dominantni mehanizam trošenja je umor površine te se ovaj oblik erozije naziva udarna erozija [41].

Za eksperimentalno utvrđivanje otpornosti materijala na eroziju postoji više metoda i uređaja. Shematski prikaz metode korištene u ovom radu prikazan je na slici 50.



Slika 50: Princip uređaja za ispitivanje erozijskog trošenja suhim česticama [41]

Kut sudara eroziva s ispitnim površinama moguće je mijenjati. U uređaju se mogu koristiti erozivi raznih oblika i veličina, od pijeska do krupnije sačme. Vaganjem uzorka prije i poslije ispitivanja utvrđuje se gubitak mase.

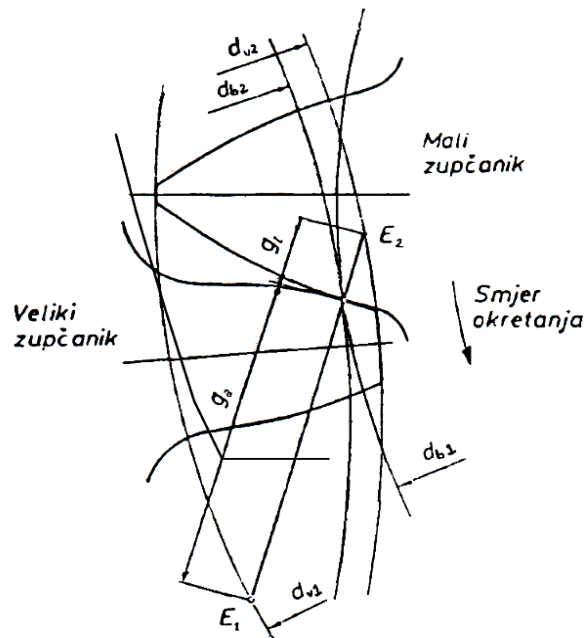
2.4.3 FZG metoda ispitivanja

Za ispitivanje mogućnosti primjene EN-GJS-600-3 u izradi zupčanika, odabrana je FZG metoda (njem. Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau), koja se inače koristi za ispitivanje motornih ulja. Ta metoda zasnovana je na normi DIN 51354 [42].

FZG metoda se služi standardnim zupčanicima koji rade uronjeni u ispitivanom mazivom ulju pri konstantnom broju okretaja i propisanoj početnoj temperaturi ulja.

Opterećenje zupčanika povećava se stupnjevito. Poslije svakog stupnja opterećenja utvrđuju se promjene na bokovima zubi opisivanjem, fotografiranjem, mjerenjem hrapavosti ili kontrastnim otiskom te se utvrđuje promjena mase ispitnih zupčanika.

Stupnjem štetnog opterećenja, nakon kojeg se prekida ispitivanje, smatra se stupanj opterećenja u kojem je suma promjene mase malog i velikog zupčanika najmanje 10 miligrama (mg) veća od prosjeka suma promjena mase u prethodnim stupnjevima opterećenja. Na slici 51. prikazan je oblik zuba oba zupčanika u zahvatu.



Slika 51: Oblik zubi [42]

Standardni zupčanici za ispitivanje ulja izrađeni su od čelika 20MnCr5 i zakaljeni su do dubine od 0,6 do 0,8 mm na tvrdoću 60 do 62 HRC. Obradeni su Maagovim križnim brušenjem na prosječno odstupanje profila R_a od 0,4 do 0,6 μm , slika 52.



Slika 52: Manji zupčanik obraden Maagovim križnim brušenjem

(karakterističan oblik zuba i izgled površine)

Manji zupčanik ima velik pomak profila što rezultira zašiljenošću zubi i to s ciljem postizanja velike brzine klizanja te povećanja osjetljivosti na adheziju.

Veći zupčanik koji je ujedno i pogonski ima evolventni profil zuba (slika 51).

Pokazatelj trošenja (oštećenja) na zupčanicima je promjena njihove mase. Unošenjem izmjerenih vrijednosti u dijagram formira se krivulja promjene mase pomoću koje se definira stupanj štetnog opterećenja.

Stupanj štetnog opterećenja je stupanj opterećenja u kojem dolazi do skoka u područje velikog trošenja. Porast stupnja štetnog opterećenja prati skok temperature ulja.

2.5 RENDGENSKA DIFRAKCIJA (XRD)

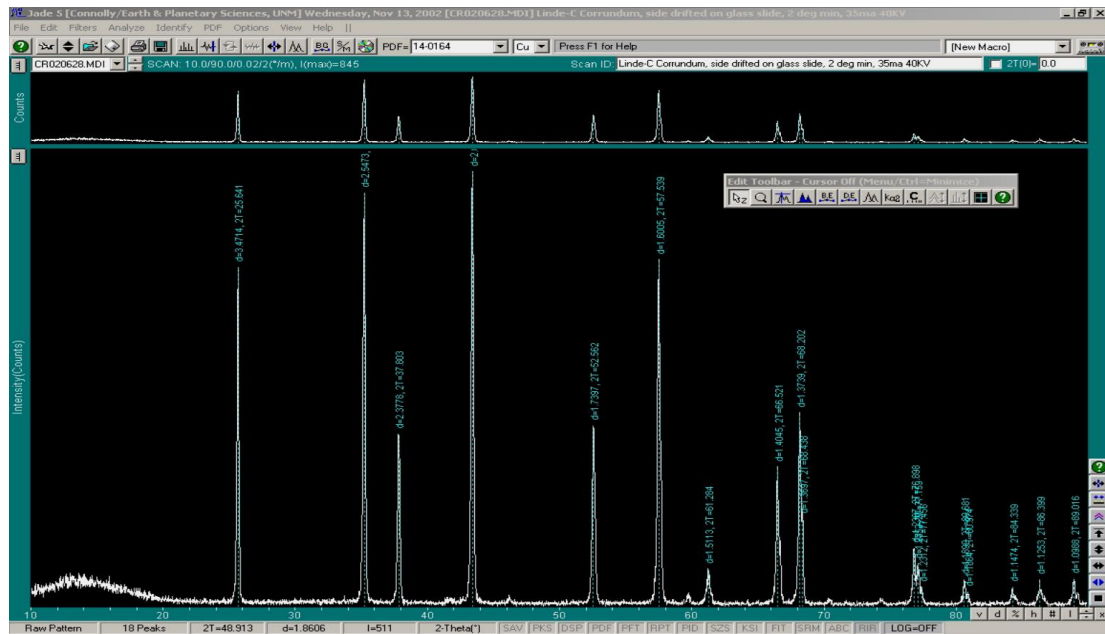
Rendgenska difrakcija je analitička metoda određivanja kristalne strukture, kemijskog sastava i fizikalnih svojstava materijala. Bazira se na promatranju intenziteta raspršenih rendgenskih zraka u funkciji upadnog kuta, polarizacije, valne dužine ili energije.

Rendgenske zrake su po prirodi elektromagnetski valovi (EMV). To znači da su nositelji promjenljivog elektromagnetskog polja. Ako se elektron nađe na putu takvog elektromagnetskog vala (npr. elektron u atomu), on biva pobuđen na vibracije i sam postaje izvor elektromagnetskog vala iste frekvencije i valne duljine. Uslijed interakcije osnovnog vala i elektrona nastaje novi kuglasti val s elektronom kao ishodištem, došlo je do raspršenja prvotnog snopa. Kako se atom sastoji iz većeg broja elektrona, koji okružuju pozitivno nabijenu jezgru, rendgenske zrake se raspršuju na svim elektronima, pa tako intenzitet raspršenih zraka ovisi o broju elektrona u atomu [43].

Kada EMV padne na kristalnu rešetku, tada svaki element rešetke (atom) djeluje kao izvor novog kuglastog vala, pa će intenzitet biti funkcija kuta raspršenja i dobiva se difrakcija. Intenzitet raspršenog snopa imat će jedan maksimum u smjeru upadnog snopa, no postojat će i sporedni maksimumi u onim smjerovima, gdje razlika hoda među valovima nastalim na susjednim atomima iznosi 1, 2, 3, ... n valnih duljina.

Tako se govori o spektru prvog, drugog, trećeg, ... n -tog reda. Spektar u smjeru upadnog snopa je nultog reda. Kristalne/mrežne ravnine kao niz međusobno ekvidistantnih polupropusnih zrcala, na koje pada snop rendgenskih zraka, djelomično se reflektirajući na prvoj, ali ulazeći dublje i reflektirajući se na svakoj slijedećoj i ulazeći i do nekoliko milijuna slojeva u dubinu prije nego se sasvim apsorbiraju. Reflektirani dijelovi snopa izlaze van paralelno i međusobno interferiraju.

Kao laboratorijski izvor rendgenskog zračenja kod rendgenske difrakcije, najviše se koristi bakarna anoda. Na slici 53 prikazan je primjer snimke difraktograma.



Slika 53: Digitalni snimak rendgenskog difraktograma polikristalnog uzorka korunda [44]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. CILJ I METODE RADA

Iz literaturnih izvora ustanovljen je niz faktora koji utječu na mehanička svojstva izotermički poboljšanoga nodularnoga lijeva, što značajno određuje mogućnost njegove primjene u industrijskoj proizvodnji. Problematika izotermički poboljšanoga nodularnoga lijeva, površinski dodatno mehanički tretiranog, te njegova primjena uz garanciju zadovoljavajuće trajnosti u izradi dinamički jače opterećenih elemenata još uvijek se istražuje.

Cilj ovog rada je da se znanstveno istraživačkim metodama zasnovanim na laboratorijskim ispitivanjima utvrdi mogući utjecaj kugličarenja na mehanička svojstva izotermički poboljšanoga nodularnoga lijeva.

Rad je usmjeren na istraživanje postupka modifikacije ADI materijala sa svrhom poboljšavanja njegovih mehaničkih i triboloških svojstava.

Za pretpostaviti je da će se hladnom deformacijom površine postići transformacija austenitne u martenzitnu strukturu čime se povećava tvrdoća materijala, a time i otpornost na neke mehanizme trošenja.

Stoga se ovo istraživanje bavi ispitivanjem mogućnosti primjene postupka kugličarenja u modifikaciji površine ADI materijala kao i analizom utjecaja tehnoloških parametara tog postupka na mikrostrukturu, a time i na svojstva tretirane površine.

Očvrnućem osnovnog materijala postupkom kugličarenja dobit će se materijal koji je lakši, jeftiniji i jednostavniji za proizvodnju te koji će prilikom rada proizvoditi manju buku u odnosu na čelik.

Istraživanje je kompleksno te uključuje laboratorijske metode ispitivanja uzoraka materijala i pogonske metode ispitivanja realnih dijelova. Obzirom da je za uspješnu realizaciju projekta najvažniji kvalitetno odliveni nodularni lijev i dobro provedena toplinska obrada, posebna pažnja je usmjerena na kontrolu kemijskog sastava i mikrostrukturu materijala uzoraka na kojima će se provoditi istraživanje.

Kako bi se povećala kvaliteta uzoraka svi izrađeni odljevci prolaze defektoskopsku kontrolu rendgenom u svrhu otkrivanja eventualnih grešaka u materijalu nastalih u procesu lijevanja. Nakon izotermičkog poboljšavanja, laboratorijske metode ispitivanja uzoraka se proširuju na ispitivanja mehaničkih i triboloških svojstava.

Dio izotermički poboljšanih uzoraka podvrgnut je kugličarenju kako bi se utvrdio učinak tog postupka te definirali parametri za pogonsku metodu ispitivanja. Postupak kugličarenja i utjecaj pojedinih parametara tog postupka kontrolira se ispitivanjem mikrostrukture i profila

tvrdooe na tretiranim površinama. Na tako pripremljenim površinama ispituje se otpornost na abrazijsko i erozijsko trošenje.

Nakon provedenih laboratorijskih ispitivanja i definiranja optimalnih parametara obrade pristupilo se ispitivanju pogonskom metodom (FZG test). Iz odljevaka nodularnog lijeva izrađeni se zupčanici koji se izotermički poboljšani i kugličareni parametrima utvrđenim prethodnim fazama ispitivanja.

Na FZG (Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau), uređaju koji se koristi za ispitivanje motornih ulja, simulira se transmisija motornog vozila, gdje je zupčanik od ADI-a u kontaktu sa zupčanicom od čelika. Ispitivanje na tom uređaju daje dodatan uvid u ponašanje različito tretiranih ADI zupčanika te stanje površine nakon određenog broja rada.

U nastavku istraživanja, ispitivanje na abrazijsku je prošireno na veći broj uzoraka sa tri različita abraziva, umjesto jednim kako je to bio slučaj u prvom ciklusu ispitivanja. Parametri, ukupan broj okretaja i opterećenje ostali su isti.

I kod erozijskog ispitivanja postupak ispitivanja je proširen na veći broj uzoraka s više dodatnih parametara: više različitih eroziva, variranje kuta udara i broja ponavljanja ciklusa.

Na kraju ispitivanja donose se zaključci o utjecaju parametara kugličarenja na trajnost ADI-a i njegovu otpornost u pogonskim uvjetima.

3.2. ISPITIVANJE SVOJSTAVA NODULARNOG LIJEVA

3.2.1 Lijevanje odljevaka EN-GJS-600-3

Za ovo istraživanje odabran je nodularni lijev EN-GJS-600-3 s prevladavajućom perlitnom strukturom, zbog dobrih mehaničkih svojstava (već u lijevanom stanju) i mogućnosti njihovog dodatnog poboljšanja izotermičkom pretvorbom i kugličarenjem.

Odljevci za izradu uzoraka te zupčanika za pogonsko ispitivanja FZG postupkom, izliveni su u certificiranoj lijevaonici "Brodosplit-Tvornica diesel motora d.o.o.", prema "Tundisch cover" postupku, prilikom lijevanja 6 komada uljnih cilindara brodskog motora 6S 50 MC-C.

3.2.1.1 Postupak lijevanja odljevaka i Y-proba

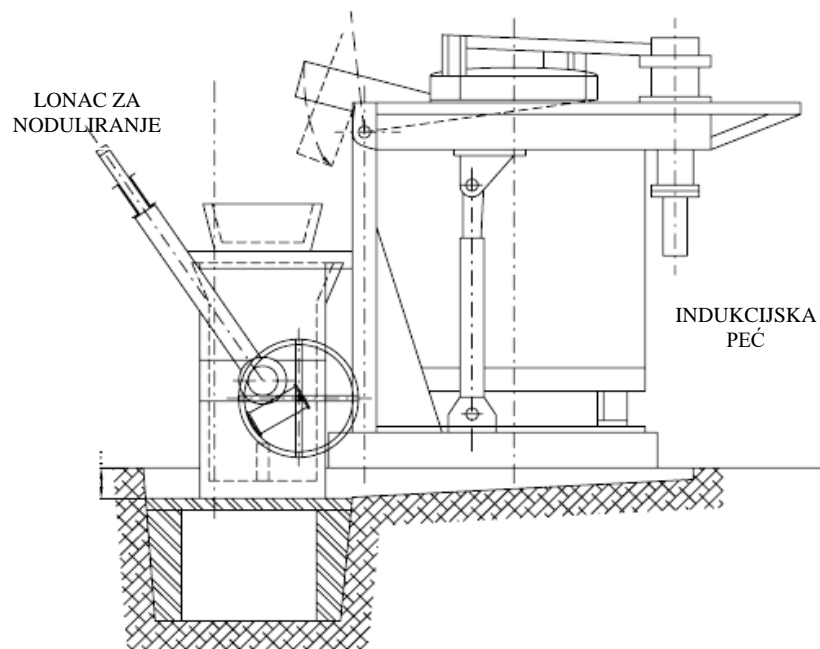
Bazna talina pripremana je u loncu mrežno frekventne indukcijske peći po ustaljenom postupku i s propisanim sastavom uloška. Nakon što se sadržaj lonca potpuno rastalio provedena je prva kontrola kemijskog sastava taline i to pri temperaturi od 1420 °C.

Iz lonca je uzet uzorak taline, uliven u kalup, brzo ohlađen i poslan na kemijsku analizu. Po provedenoj analizi obavljena je korekcija kemijskog sastava. Nakon korekcije nastavljeno je s

daljnjim zagrijavanjem taline do temperature od 1520 °C. Ponavljanjem postupka kemijske analize utvrđeno je da je talina zahtijevanog sastava te je prelivena u lonac za noduliranje.

U zagrijani lonac za noduliranje stavljen je nodulator i 1/3 cjepiva u za to predviđenu komoru. Nodulator i cjepivo su prekriveni pokrovnim materijalom (strugotinama, otpadnim limovima i sl.) sa svrhom usporavanja procesa nodulacije. Zbog prethodno navedenog, reakcija prilikom ulijevanja taline započinje sa zakašnjenjem od oko 1 minute i traje otprilike isto toliko (do potpunog izlivanja lonca peći).

Izvedbeno stanje s postavljenim loncem za noduliranje kod indukcijske peći, slika 54.

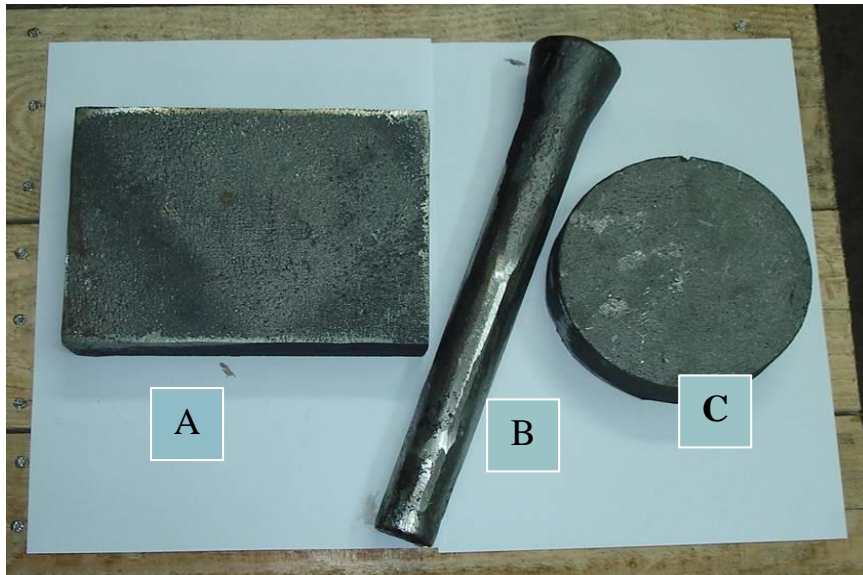


Slika 54: Mrežno frekventna indukcijska peć „MF-ILP 5/1600“ s loncem za noduliranje

Nodulirana talina iz lonca za noduliranje je prelivena u lonac za lijevanje. U tijeku prelijevanja u mlaz taline dodan je preostali dio sredstva (2/3) za cijepljenje. Time je završen proces pripreme taline prije lijevanja u kalup.

Budući da se radilo o relativno maloj količini odljevaka vezanih za ovaj rad, talina je iz lonca za lijevanje vađena grafitnim lončićem (kapacitet 10 kg taline) i ulijevana u kalupe.

Za potrebe ovog istraživanja izlivena su tri različita tipa odljevaka, različita oblikom i dimenzijama, slika 55.



Slika 55: Odljevci EN-GJS-600-3 [45]

Dimenzije odljevaka:

- A 180 x 130 x 35 mm
- B $\text{Ø}35 \times 350$ mm
- C $\text{Ø}130 \times 35$ mm

Za svaki tip odljevka izrađena su po dva kalupa. U jednom kalupu izliveno je 6 komada uzoraka istog oblika. Dimenzije odljevaka su određene prema njihovoj namjeni. Odljevci A i B na slici 55 su predviđeni za izradu uzoraka za laboratorijsko ispitivanje materijala EN-GJS-600-3, različitog stanja mikrostrukture i tretmana površine. Odljevak C predviđen je za izradu zupčanika namijenjenih ispitivanju pogonskom metodom (FZG test).

Izliven je nešto veći broj odljevaka od onog koji je potreban za ovo istraživanje, za slučaj da se prilikom ispitivanja rendgenskom metodom kod nekog odljevka utvrdi greška u strukturi. Odljevci s greškom se izuzimaju iz daljnjih istraživanja.

Istovremeno s odljercima na slici 55 izlivena su tri odljevka Y-proba za potrebe komercijalnog lijevanja i tri odljevka za potrebe ovog istraživanja, slika 56.



Slika 56: Odljevak Y-proba

Y-probe su označene i oznakom vezane za odljevke, odnosno proizvode koji su izliveni iz te šarže. Iz donjeg dijela svake Y-probe kasnije je izrađen po jedan uzorak za ispitivanje mehaničkih svojstava (vlačne čvrstoće i istezljivosti), u skladu s normom HRN EN 1563:1997. Cijeli postupak (za svu količinu taline), koji uključuje noduliranje, prelijevanje, cijepljenje i lijevanje u kalupe obavljen je za nešto manje od 10 minuta.

Maksimalno vrijeme u kojem navedeni postupak mora biti obavljen je 15 minuta.

3.2.1.2 Sirovine korištene za proizvodnju EN-GJS-600-3

Sirovine korištene za proizvodnju nodularnog lijeva EN-GJS-600-3 (i njihovo podrijetlo) su:

- Niskomangansko željezo-južna Afrika, kemijski sastav je prikazan u tablici 8.

Tablica 8: Kemijski sastav niskomanganskog željeza

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Fe %
3,95-4,25	0,9-1,1	0,03-0,08	< 0,03	< 0,003	ostatak

- Čelični limovi (brodski lim), kemijski sastav je prikazan u tablici 9.

Tablica 9: Kemijski sastav čeličnih limova

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Fe %
0,14-0,18	0,25-0,35	0,6-0,8	< 0,02	< 0,03	ostatak

- Vlastiti povrat (ostaci od prethodnog lijevanja)
- Legure FeSi 75 i FeMn 75
- Nodulator-Bjomet-Elkem Norveška, kemijski sastav je prikazan u tablici 10.

Tablica 10: Kemijski sastav nodulatora

Si %	Mg%	RE %	Ca %	Ac %	ostatak %
44-48	5,5-6,2	0,8-1,2	0,8-1,2	1,0 max	tajna proizvođača

- Cjepivo–Barinoc–Elkem Norveška, kemijski sastav je prikazan u tablici 11.

Tablica 11: Kemijski sastav cjepiva

Si %	Ba %	Ca %	Al %	ostatak %
72-78	2,0–3,0	1,0-2,0	1,5 max	tajna proizvođača

Navedene sirovine su univerzalne i koriste se za proizvodnju svih kvaliteta nodularnog lijeva. Spomenuta ljevaonica zahtijevanu kvalitetu NL-a dobiva isključivo mijenjanjem sadržaja Cu u talini.

Za EN-GJS-600-3 sadržaj Cu se kreće 0,3-0,5 % ovisno o debljini stjenke odljevka.

3.2.1.3 Kemijski sastav odljevaka EN-GJS-600-3

Rezultat konačne kemijske analize taline izuzete iz lonca za lijevanje, prije lijevanja u kalupe prikazan je u tablici 12.

Tablica 12: Kemijski sastav uzoraka EN-GJS-600-3

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cu %	Mg %	Fe %
3,57	2,49	0,113	0,029	0,007	0,4	0,057	ostatak

Kemijski sastav NL-a prikazan u tablici 3.5 je u granicama normiranog kemijskog sastava za tip EN-GJS-600-3, što je prvi preduvjet za osiguravanje zahtijevanih mehaničkih svojstava za tu kvalitetu NL-a.

3.2.1.4 Ispitivanje homogenosti osnovnog materijala (X-ray metoda)

Prije početka korištenja odljevaka za izradu uzoraka, rendgenski je ispitana njihova homogenost radi uočavanja eventualnih grešaka nastalih prilikom lijevanja.

Ispitivanje homogenosti odljevaka obavljeno je u ovlaštenom Laboratoriju brodogradilišta „Brodosplit“.d.d. Uzorci su ispitani pomoću uređaja "SMART 300 X-Ray".

Slika 57 prikazuje rendgensku cijev, odnosno izvor zračenja, ispod koje se vide ispitivani uzorci i filmska traka.



Slika 57: Rendgenska cijev

Ispod uzoraka postavljen je film na kojem se evidentira snimak, slika 58.



Slika 58: Rendgenski snimak uzoraka (film)

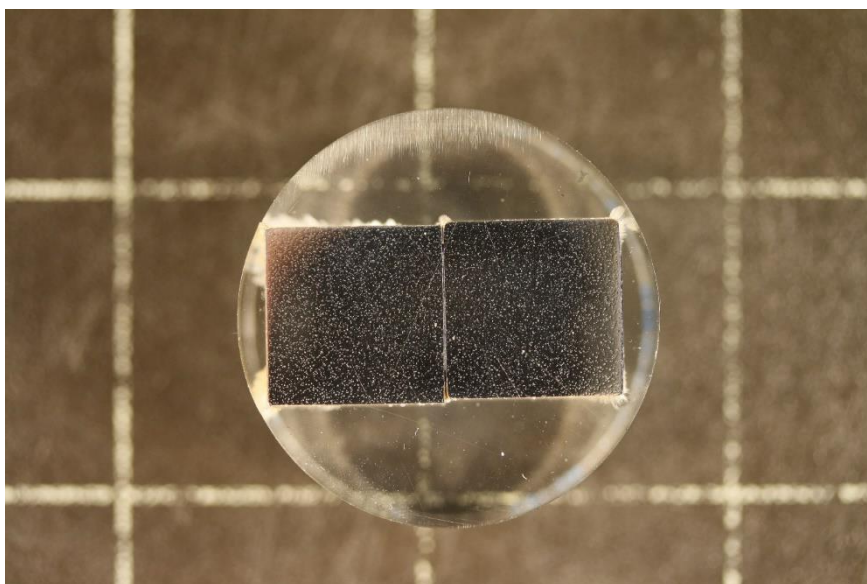
Dobiveni snimci su uspoređeni sa slikama snimaka iz radiografskog atlasa (ENERGOINVEST-LABORATORIJ, Sarajevo) izrađenog prema normi „Američkog društva za radiografsko ispitivanje materijala“, ASTM radiografske norme za odljevke. Atlas se sastoji od trideset i jednog (31) radiografskog snimka grešaka u željeznom lijevu, koje služe klasificiranju (određivanju klase kvalitete) lijeva.

Greške su podijeljene u više kategorija: A, B, C, D, E, F, G, a kvaliteta lijeva u klase od I–V, o čemu ovisi mogućnost njegove primjene. Rezultati ispitivanja X-zrakama su pokazali da je većina odljevaka klase I bez grešaka u strukturi koje bi onemogućavale njihovu primjenu kod daljnjih istraživanja. Nekoliko odljevaka klase II i III izuzeto je iz daljnje upotrebe.

3.2.1.5 Analiza mikrostrukture nodularnog lijeva EN-GJS-600

Izrađeno je osam identičnih uzoraka, dva za ispitivanje mikrostrukture nodularnog lijeva EN-GJS-600, a šest za kasnije ispitivanje mikrostrukture izotermički poboljšanog EN-GJS-600 (ADI).

Priprema uzoraka (slika 59) za ispitivanje mikrostrukture EN-GJS-600, urađena je u Laboratoriju za metalografiju Instituta za materijala in tehnologiju u Ljubljani.



Slika 59: Uzorci za ispitivanje mikrostrukture EN-GJS-600

Analiza mikrostrukture nodularnog lijeva EN-GJS-600 provedena je na svjetlosnom mikroskopu Nikon Microphot FXA s 3CCD kamerom Hitachi HV-C20AMP i FE SEM (eng. Field emission scanning electron microscope) JEOL JSM – 6500F, slika 60.



Slika 60: FE SEM, JEOL JSM – 6500F

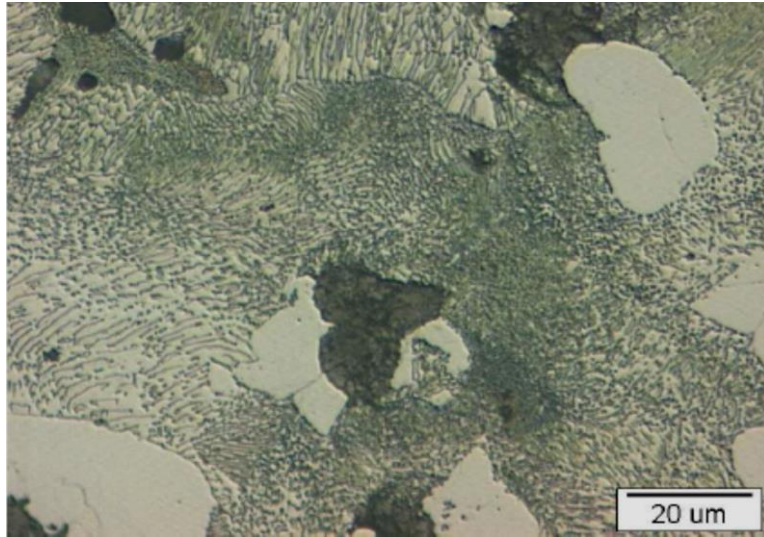
Svjetlosna mikroskopija

Na osnovu provedene metalografske analize uzoraka zaključeno je da je grafit većim dijelom izlučen u obliku nodula. Oblik i veličina izlučenog grafita određeni su prema normi HRN EN ISO 945:2002. Nodule grafita su oblika VI, veličine 5/6, u velikom postotku pravilne (80-85 %) i ravnomjerno raspoređene u strukturi. Ferit je raspoređen oko nodula grafita.

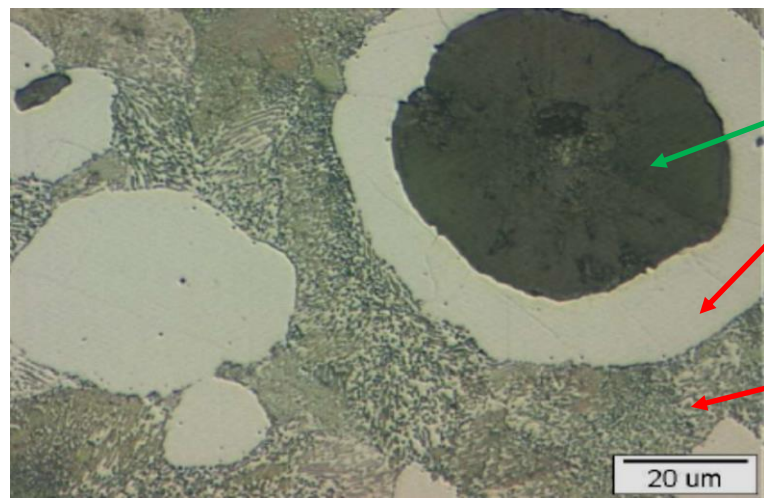
Volumni udio faza u osnovnom materijalu EN-GJS-600-3:

Perlit – 61,4 % ; Ferit - 26,4 % ; Grafit - 12,2 % ; br. nodula / mm² – 129

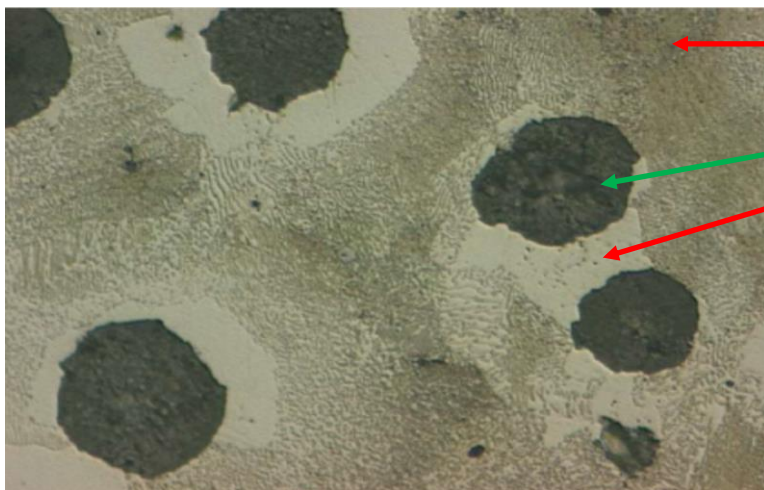
Slika 61 prikazuje mikrostrukturu EN-GJS-600-3 snimljenu pomoću svjetlosnog mikroskopa.



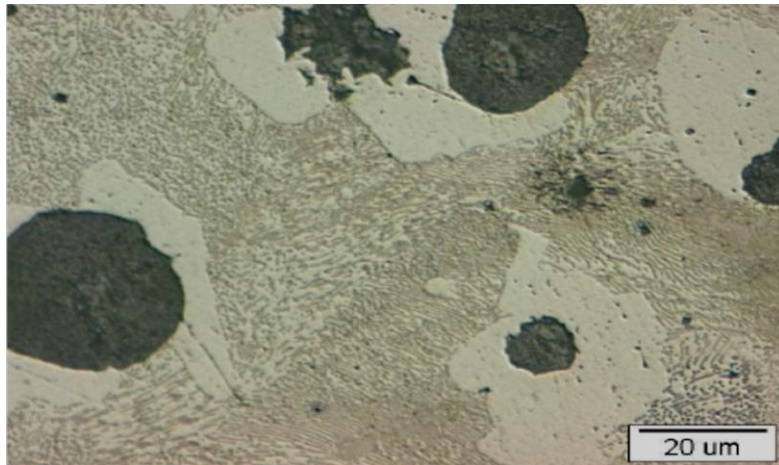
a)



b)



c)

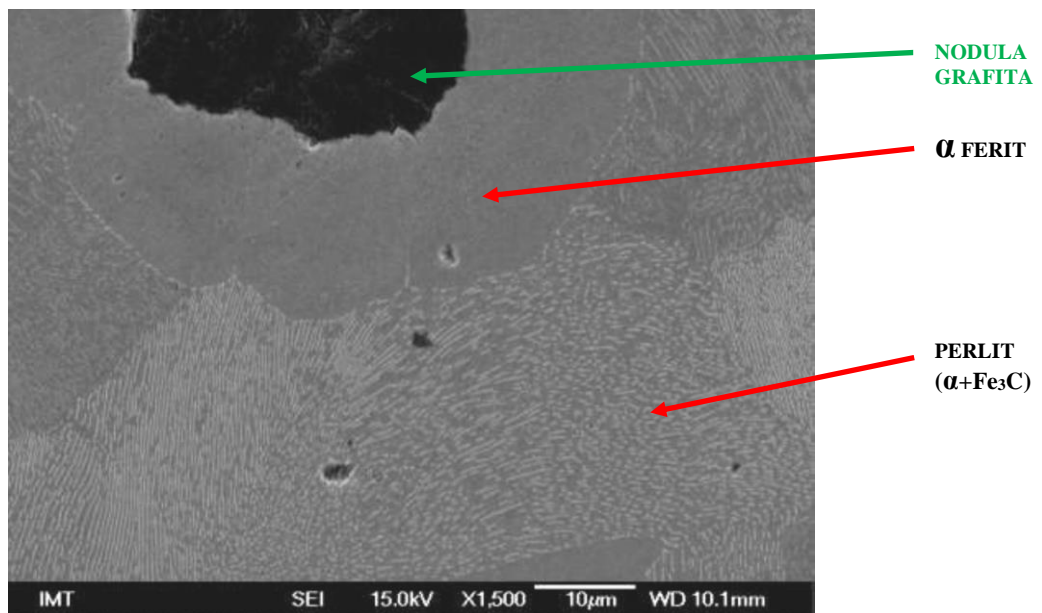


d)

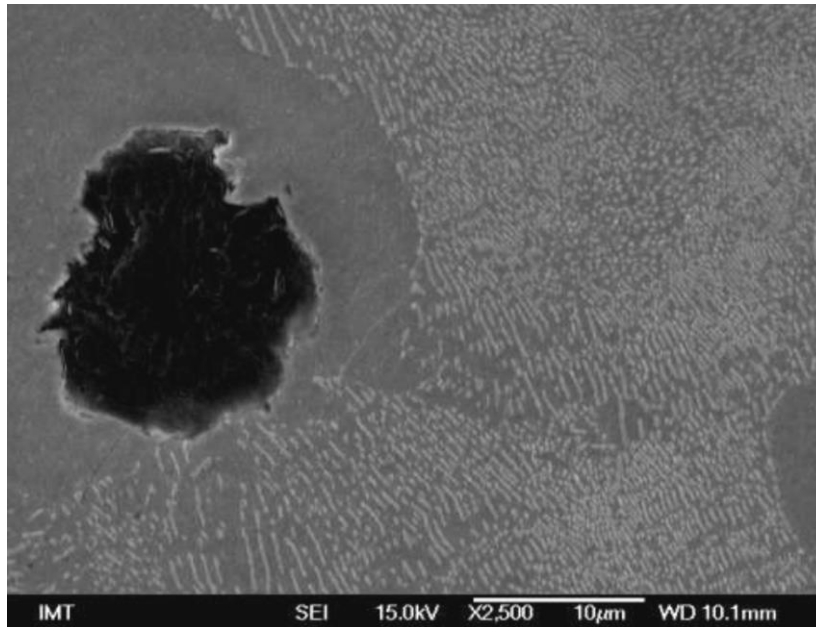
Slika 61: a), b), c), d): EN-GJS-600-3 mikrostruktura snimljena svjetlosnim mikroskopom

FE SEM analiza

Na slici 62 (a, b) prikazani su FE SEM snimci mikrostrukture nodularnog lijeva EN-GJS-600-3.



a)



b)

Slika 62: FE SEM snimci EN-GJS-600-3 mikrostrukture s različitim povećanjem

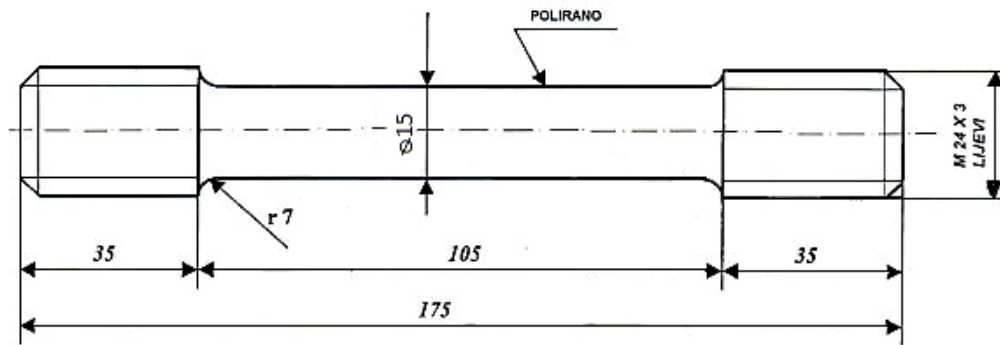
3.2.1.6. Statičko vlačno ispitivanje

Uzorci za statičko vlačno ispitivanje EN-GJS-600-3 izrađeni su iz donjeg dijela odljevaka Y-proba, slika 63.



Slika 63: Uzorak za statičko vlačno ispitivanje

Za potrebe ovog istraživanja izrađena su tri uzorka. Dimenzije uzorka prikazane na slici 64, određene su na temelju norme HRN EN 1563:1997+A1: 2002 za odljevke debljine do 50 mm i odobrene su od Hrvatskog registra brodova (Br./No.02-001219/022446).



Slika 64: Dimenzije uzorka za statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala, brodogradilišta „Brodosplit“ d.d.. Na kidalici MAN 60, slika 65, određena je vlačna čvrstoća (R_m), konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0,2}$) i istežljivost (A).



Slika 65: Kidalica MAN 60

Srednje vrijednosti statičkog vlačnog ispitivanja na tri uzorka, prikazane su u tablici 13.

Tablica 13: Rezultat statičkog vlačnog ispitivanja EN-GJS-600-3

Vlačna čvrstoća, R_m , MPa	638
Granica razvlačenja, $R_{p0,2}$, MPa	452
Istezljivost, A , %	11

3.2.1.7. Ispitivanje tvrdoće

Tvrdoća EN-GJS-600-3 je ispitana u Laboratoriju, brodogradilišta „Brodosplit“ d.d., Brinell metodom na tvrdomjeru Emco-Test N3D 000, slika 66.



Slika 66: Tvrdomjer Emco-Test N3D 000

Za mjerenje tvrdoće korištena je ispitna jedinica NIU, u skladu s metodom HB 2,5/187,5. Na utiskivač s kuglicom od tvrdog metala promjera 2,5 mm narinuto je opterećenje 1840 N, s trajanjem utiskivanja od 15 s. Tvrdoća EN-GJS-600-3 ispitana je na uzorcima za ispitivanje udarnog rada loma. Na svakom uzorku su napravljene po tri izmjere tvrdoće. Prikaz srednjih vrijednosti po uzorku dat je u tablici 14. Rezultati svih izmjera nalaze se u prilogu br. 1

Tablica 14: Tvrdoća EN-GJS-600-3

Uzorak br.	1	2	3	4	5	6	\bar{x}
Tvrdoća, HB	207	206	209	209	205	206	207 (18 HRC)

3.2.1.8. Ispitivanje udarnog rada loma

Za potrebe laboratorijskih ispitivanja s ciljem ispitivanja udarnog rada loma toplinski neobrađenog, a kasnije izotermički poboljšanog EN-GJS-600-3, prema normi EN 1563:1997+A1: 2002, izrađena su dvadeset i dva uzorka dimenzija 10x10x55 mm sa standardnim „V“ utorom, slika 67.

- šest uzoraka je predviđeno za ispitivanje udarnog rada loma u primarnom - lijevanom stanju strukture;
- osam uzoraka za ispitivanje nakon izotermičkog poboljšavanja na temperaturi 240 °C;
- osam na temperaturi 380 °C.



Slika 67: Charpy V uzorci za ispitivanje udarnog rada loma

Prilikom postupka izrade vodilo se računa o parametrima obrade kako bi se izbjegao unos topline, a time i eventualne strukturne promjene.

Udarni rad loma ispitan je u Laboratoriju brodogradilišta „Brodosplit“ d.d., na uzorcima prikazanim na slici 67. Uređaj čije je mjerno područje 0 - 300 J, prikazan je na slici 68.



Slika 68: Charpy bat

Rezultati mjerenja udarnog rada loma EN-GJS-600-3 prikazani su u tablici 15.

Tablica 15: Udarni rad loma EN-GJS-600-3

Uzorak br.	1	2	3	4	5	6	\bar{X}
Udarni rad loma, KV, J	3	3	3	3	3	3	3

3.3. IZRADA UZORAKA ZA TRIBOLOŠKA ISPITIVANJA

Uzorci za ispitivanje na abraziju i eroziju

Istim tehnološkim postupkom, kojim su izrađeni uzorci za ispitivanje udarnog rada loma, izrađeni su i uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko i erozijsko trošenje, slika 69 (a i b).



a)



b)

Slika 69: Uzorci za ispitivanje otpornosti na trošenje [46]: a) abrazija; b) erozija

Dimenzije uzoraka

- ispitivanje otpornosti materijala na abrazijsko trošenje: 10x25x75 mm
- ispitivanje otpornosti materijala na erozijsko trošenje: 18x18x18 mm

Za ispitivanje otpornosti materijala na abrazijsko trošenje izrađena su četiri uzorka, a za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje izrađeno je osam uzoraka, od čega četiri za trošenje kvarcnim pijeskom, a četiri čeličnim kuglicama.

Nakon izotermičkog poboljšavanja odnosno kugličarenja, svi uzorci su označeni kombinacijom slova, kako je prikazano u tablici 16.

Tablica 16: Način označavanja uzoraka [46]

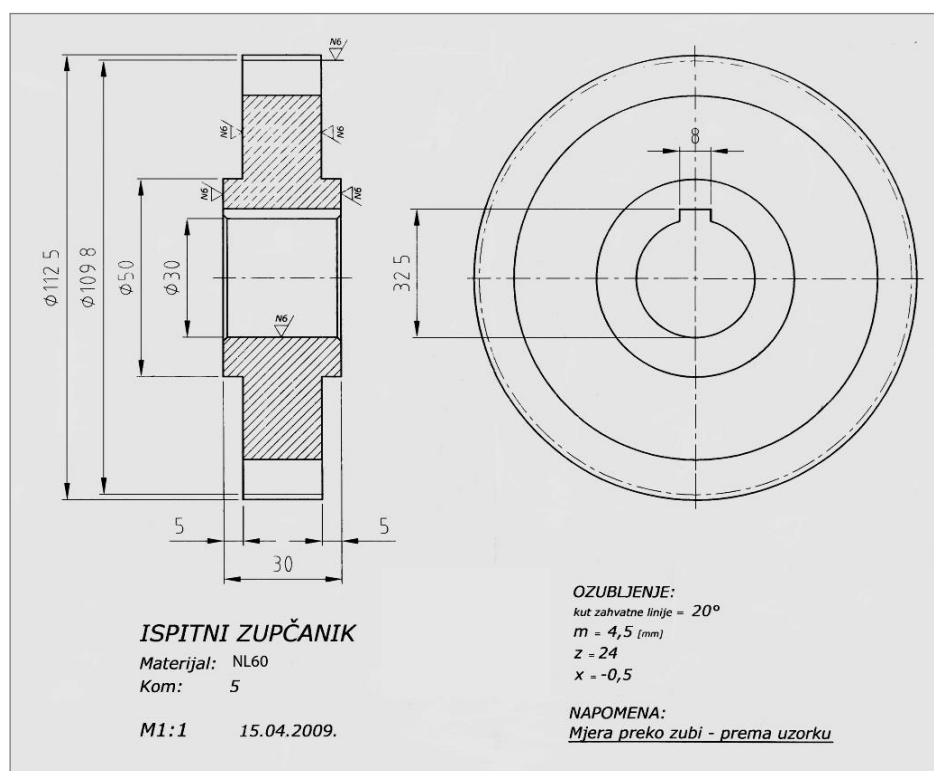
OZNAKA	INTENZITET KUGLIČARENJA	VRSTA ISPITIVANJA
AA	„ 1,32 A “	erozija kvarcnim pijeskom
AB		erozija sitnim čeličnim kuglicama
AC		abrazija kvarcnim pijeskom
BA	„ 1,11 A “	erozija kvarcnim pijeskom
BB		erozija sitnim čeličnim kuglicama
BC		abrazija kvarcnim pijeskom
CA	„ 0,99 A „	erozija kvarcnim pijeskom
CB		erozija sitnim čeličnim kuglicama
CC		abrazija kvarcnim pijeskom
DA	nekugličareno	erozija kvarcnim pijeskom
DB		erozija sitnim čeličnim kuglicama
DC		abrazija kvarcnim pijeskom

Izrada zupčanika

Za ovo istraživanje, s ciljem ispitivanja ADI materijala u realnim uvjetima, izrađeni su zupčanici.

Zupčanici su izrađeni u brodogradilištu Split, "Tvornica dizel motora" d.o.o. - radionica strojne obrade. Za tu svrhu odabran je veći zupčanik FZG uređaja za ispitivanje motornih ulja.

Crtež s detaljima ozubljenja zupčanika prikazan je na slici 70.



Slika 70: Ispitni zupčanik

Zupčanici, slika 71, su izrađeni FFAUTER metodom, odvalnim glodanjem, na glodalici ÄLMHULTS BRUK AB. ÄLMHULT.

Zupčanici su označeni: NL, 380, 240, te 380K i 240K, ovisno o stanju strukture (lijevano, izotermički poboljšano) s dodatkom oznake „K“ za one koji su i kugličareni, obzirom da će četiri zupčanika naknadno biti izotermički poboljšana, a dva i kugličarena.



Slika 71: Zupčanici za FZG ispitivanje

3.4. PRVI CIKLUS ISPITIVANJA SVOJSTAVA IZOTERMIČKI POBOLJŠANOG NODULARNOG LIJEVA

3.4.1. Postupak izotermičkog poboljšavanja

Postupak izotermičkog poboljšavanja obavljen je u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

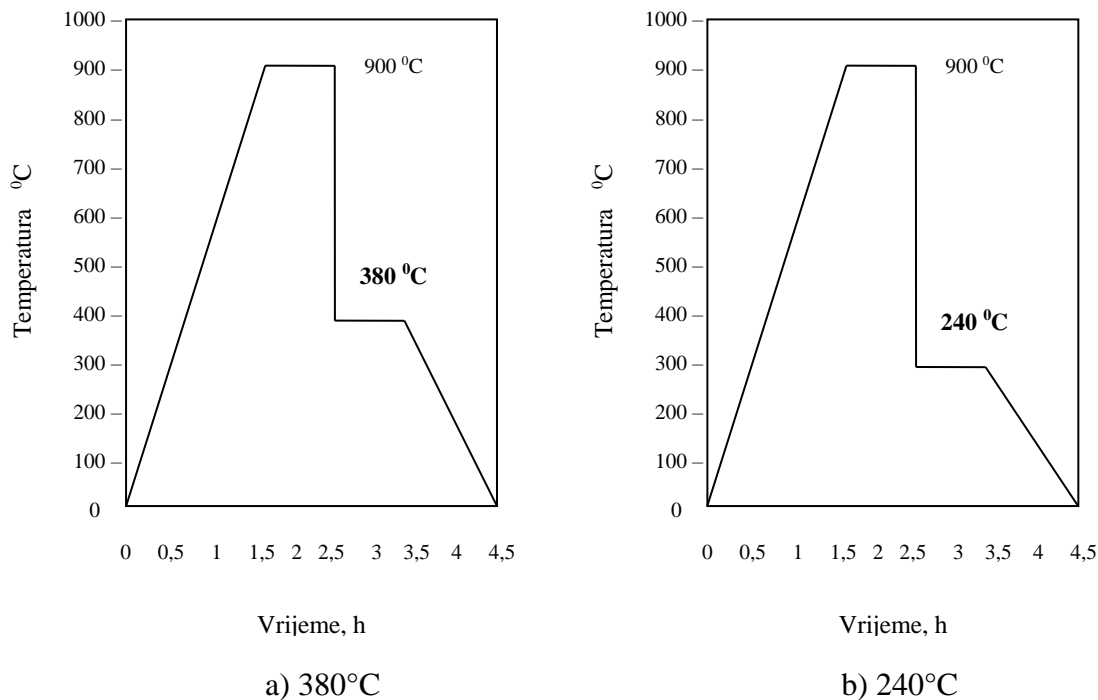
Izotermički su poboljšani uzorci za ispitivanje mikrostrukture, udarnog rada loma, uzorci za ispitivanje trošenja na abraziju i eroziju te zupčanici.

Dva uzorka za mikroskopiju, osam uzoraka za ispitivanje udarnog rada loma, dva uzorka za abraziju, četiri za eroziju te dva zupčanika poboljšano je na 240 °C i isto toliki broj uzoraka izotermički je poboljšan na 380°C.

Toplinska obrada u oba slučaja se sastojala od zagrijavanja na temperaturu austenitizacije (900 °C), držanja jedan sat na toj temperaturi i naglog hlađenja na temperaturu izotermičke pretvorbe.

Uzorci su naglo ohlađeni i držani jedan sat u solnoj kupki AB1 na 240 °C, odnosno na 380 °C, a nakon toga je uslijedilo postupno hlađenje na zraku do sobne temperature.

Postupak je dijagramski prikazan na slici 72 a) i b).



Slika 72: Dijagrami izotermičke pretvorbe

Odabrane su dvije temperature izotermičkog poboljšavanja kako bi se eksperimentalno utvrdio njihov utjecaj na mehanička svojstva nodularnog lijeva

3.4.2. Analiza mikrostrukture ADI-a

Ispitivanje mikrostrukture ADI -a na svjetlosnom i FE SEM mikroskopu provedeno je u Laboratoriju za metalografiju Instituta za materijala in tehnologijo u Ljubljani, na istim uređajima na kojima je provedena analiza mikrostrukture EN-GJS-600-3.

Svjetlosna mikroskopija

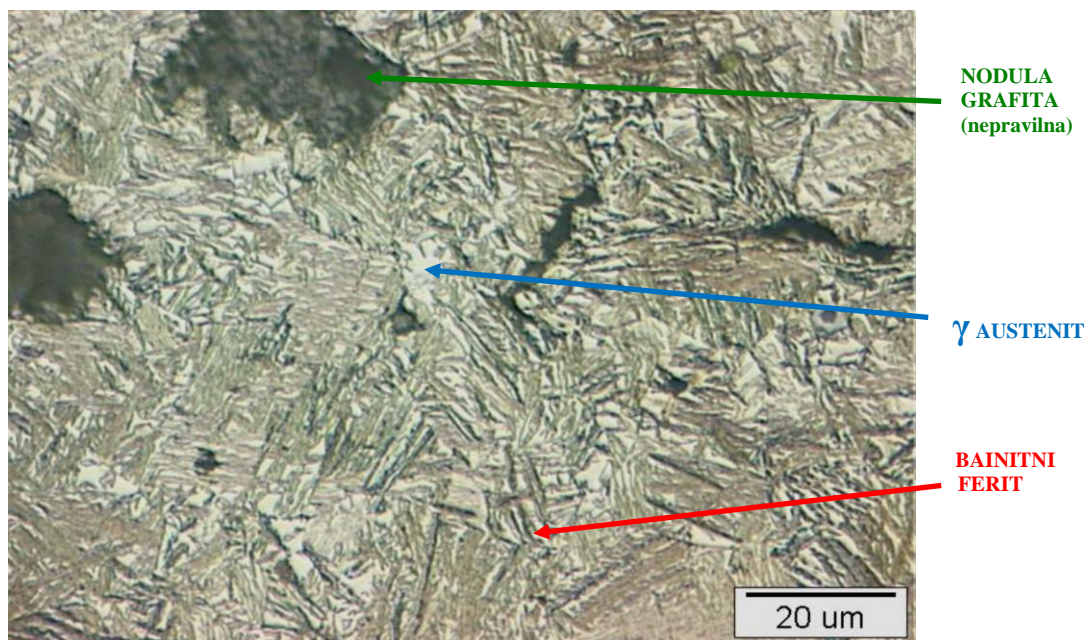
ADI 380

Mjerenje udjela grafita i broja nodula obavljeno je na tri uzoraka, na svakom uzorku na tri različita mjesta i utvrđena je srednja vrijednost:

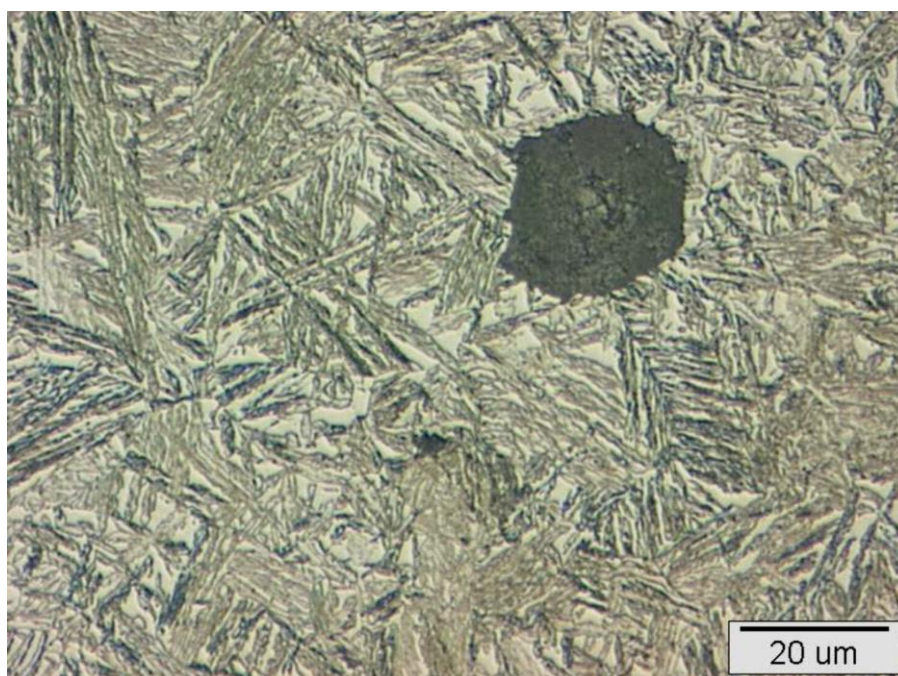
Grafit-11,9 % Br. nodula/mm²-130

Temperatura 380 °C je visoka temperatura izotermičke pretvorbe, pri kojoj se difuzija ugljika odvija ubrzano, što za posljedicu ima ubrzano nastajanje bainitnog ferita. Rezultat toga je matrica grubljeg ausferita, slika 73 i 75.

Na slici 73 uočava se ravnomjerna razdioba svijetlih polja austenita po presjeku uzorka, bez prisutnosti segregacija. Tamna polja u vidu iglica, unutar austenita, predstavljaju bainitni ferit.



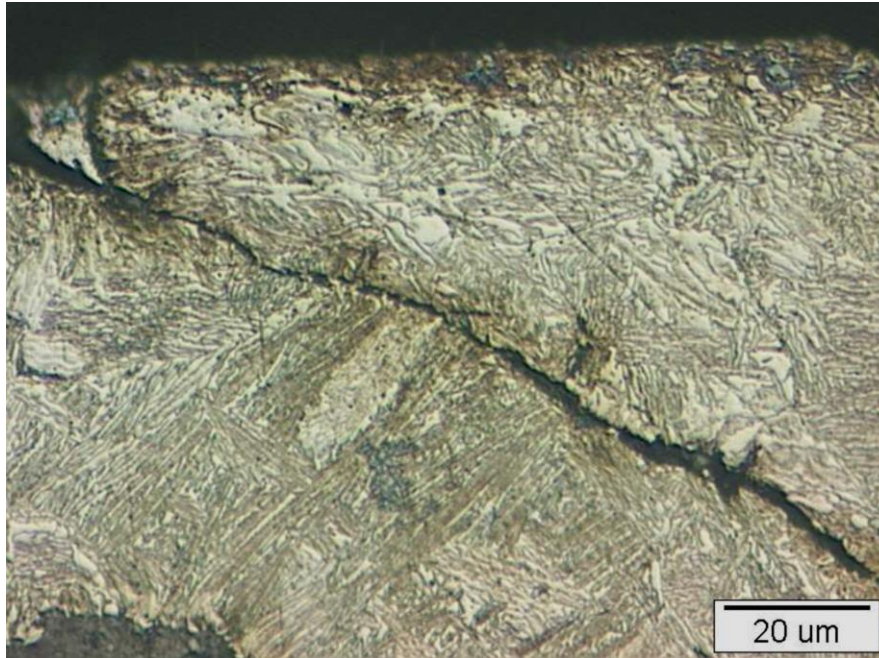
a)



b)

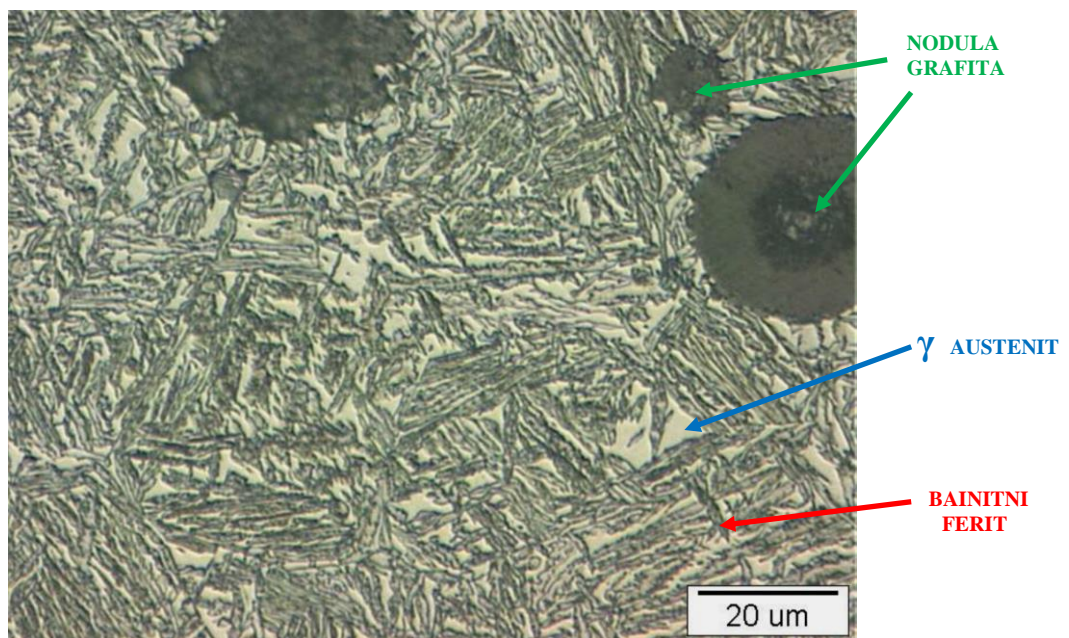
Slika 73: ADI 380 nagrižen 2% nitalom u trajanju od 5 s i pri povećanju 500X

Slika 74 daje prikaz površinske strukture uzorka ADI 380

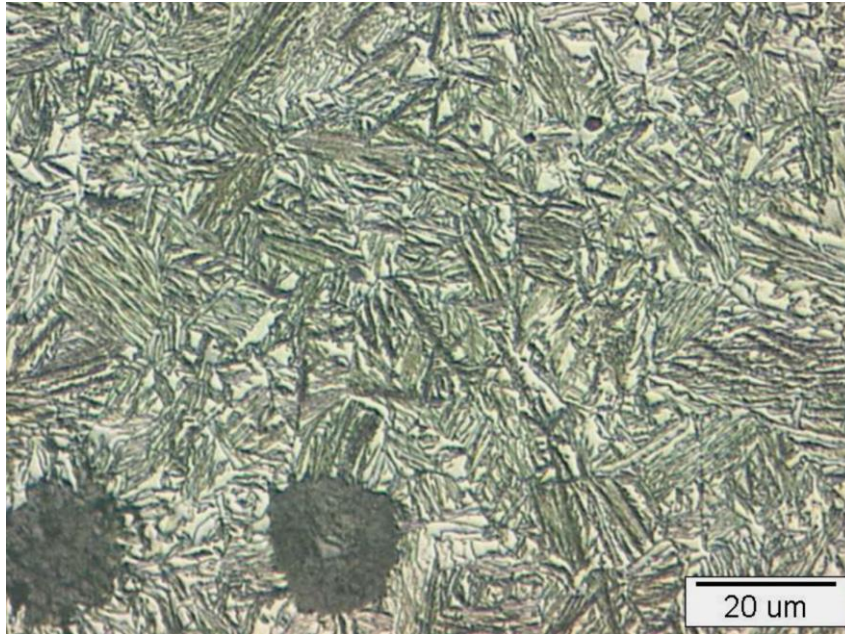


Slika 74: Površina uzorka nagriženog 2% nitalom u trajanju od 5 s. (500X)

Slika 75 daje još prikaza strukture iz sredine uzorka ADI 380 nagriženog 2% nitalom u trajanju od 10 s.



a)



b)

Slika 75: ADI 380 nagrižen 2% nitalom u trajanju od 10 s i pri povećanju 500X

(a i b - dvije različite pozicije u materijalu)

Na slici 75 vidi se ausferitna struktura karakteristična za više temperature izotermičkog poboljšavanja, u području tzv. gornjeg bainita:

- **svjetlija područja** –visokouglični stabilizirani austenit;
- **tamnija područja** – bainitni ferit paperjastog oblika karakterističnog za područje tzv. „gornjeg“ bainita;
- **tamna područja** – grafitne nodule.

ADI 240

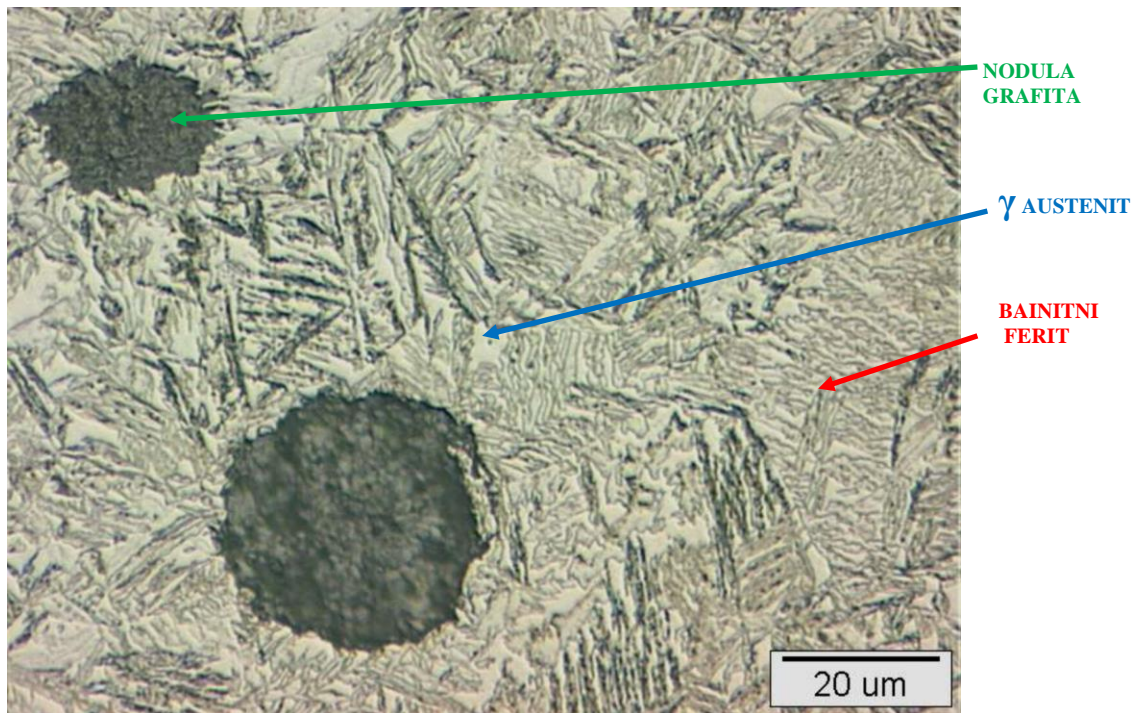
Mjerenje udjela grafita i broja nodula obavljeno je na tri uzorka, na svakom uzorku na tri mjesta te je utvrđena srednja vrijednost:

Grafit-10,8 %

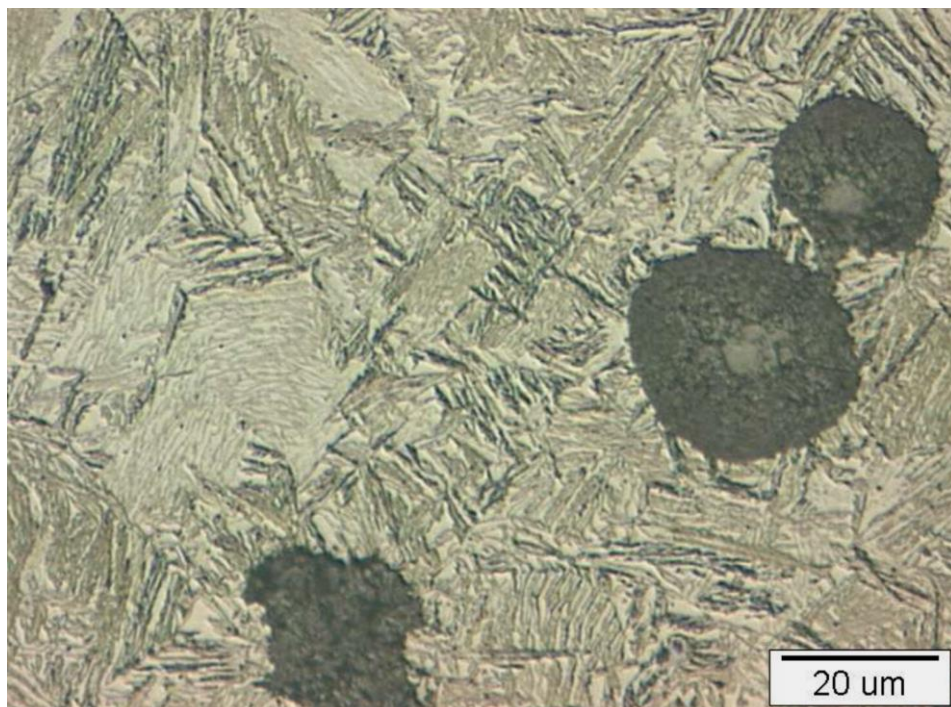
Br. nodula/mm²-135

Pri temperaturi izotermičke pretvorbe od 240°C pothlađivanje austenita bilo je veće, difuzija ugljika bila je sporija, pa je nastala struktura sitnijeg (finijeg) ausferita, slika 76 i 78.

Slika 76 prikazuje strukturu ADI 240, nagriženu 2% nitalom u trajanju od 5 s.



a)

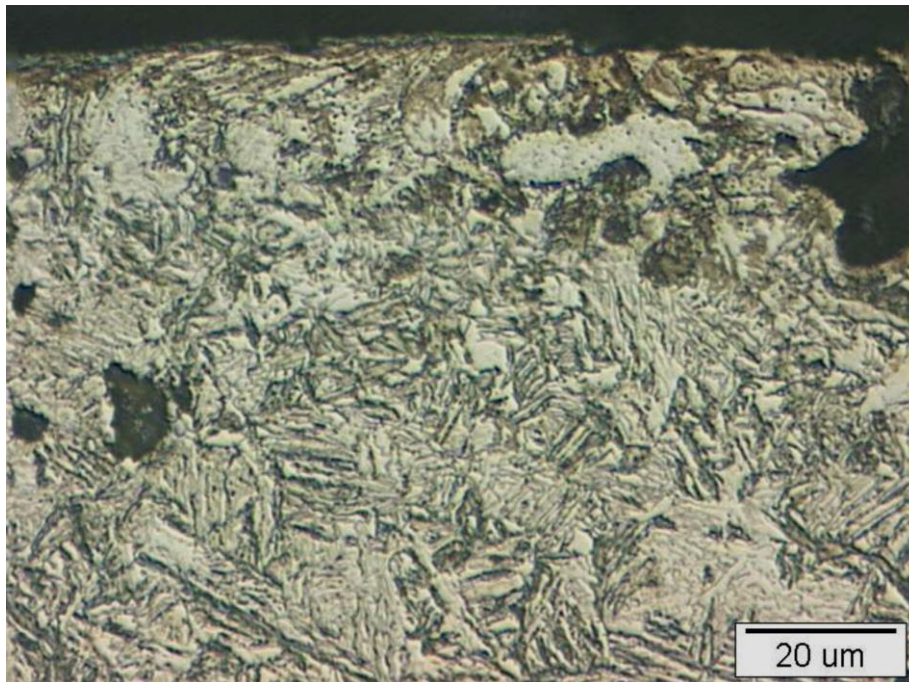


b)

Slika 76: ADI 240 nagrižen 2% nitalom u trajanju od 5 s i pri povećanju 500X

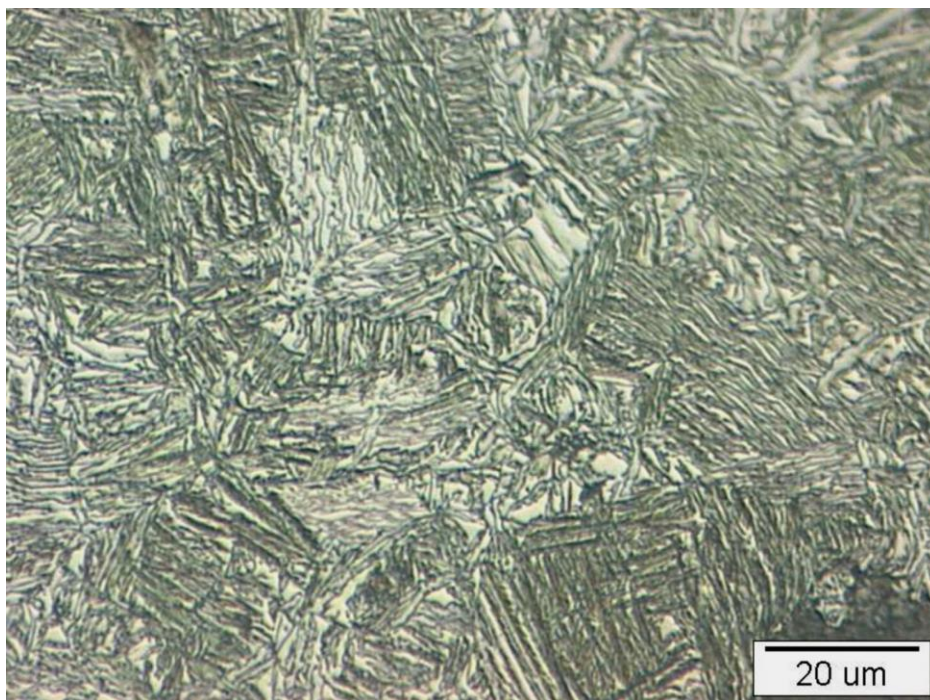
(a i b - dvije različite pozicije u materijalu, ali ista struktura)

Slike 77 prikazuje površinsku strukturu uzorka ADI 240.

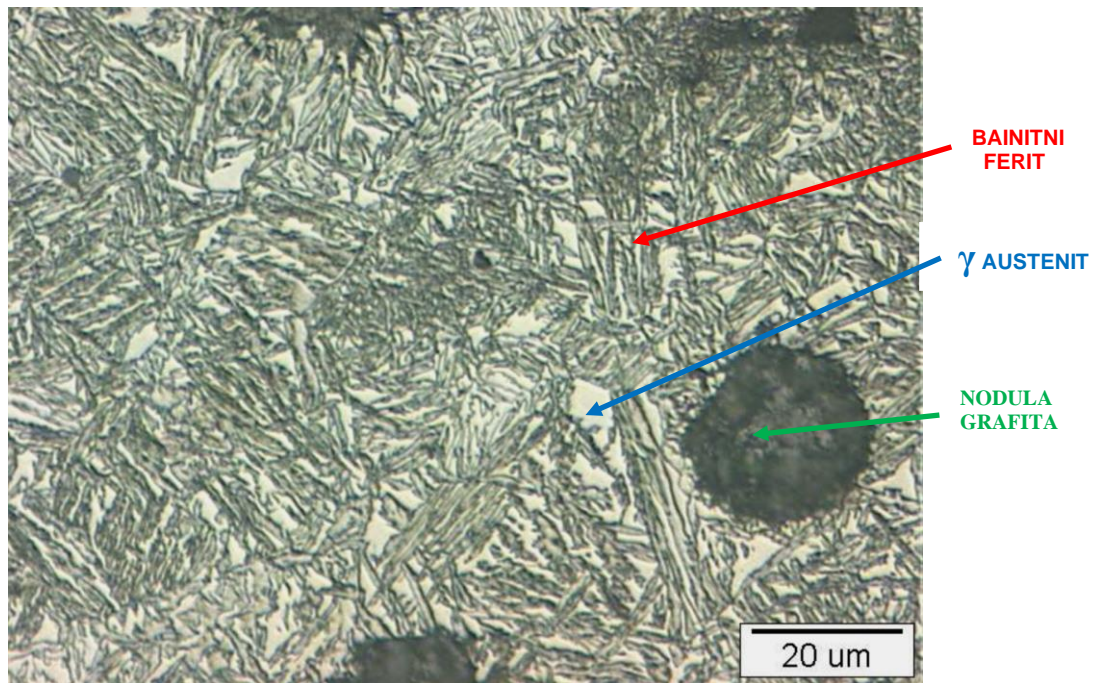


Slika 77: Površina uzorka ADI 240 nagrižen 2% nitalom u trajanju od 5 s (500X)

Slika 78 daje prikaz središnje strukture ADI 240 nagrižen 2% nitalom u trajanju od 10 s.



a)



b)

Slika 78: ADI 240 nagrižen 2% nitalom u trajanju od 10 s i pri povećanju 500X

(a i b - dvije različite pozicije u materijalu)

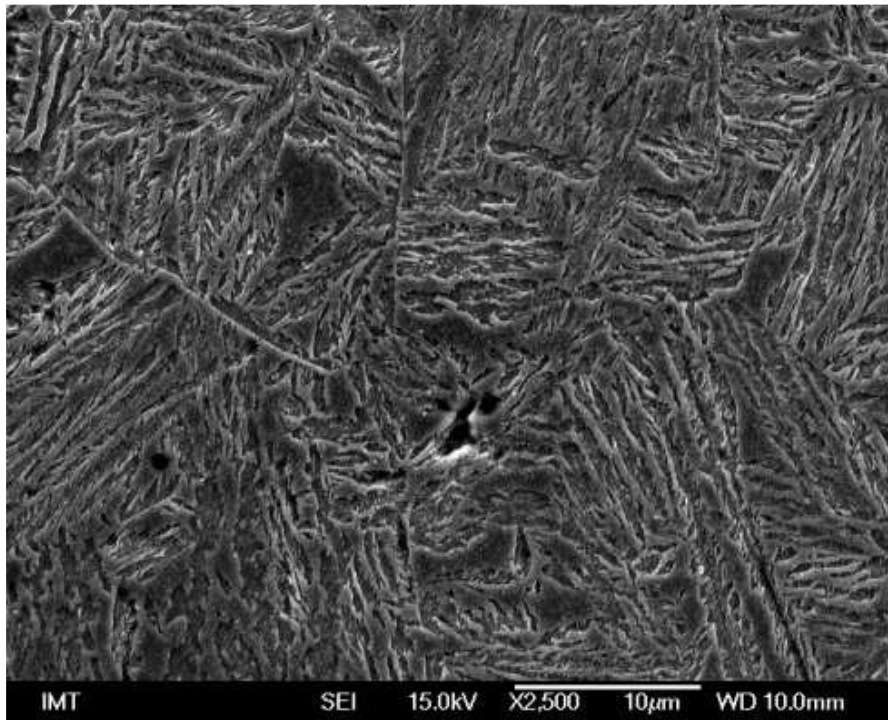
Na slikama 76 i 78 prikazana je ausferitna struktura koja nastaje na nižim temperaturama izotermičke pretvorbe:

- **bijela područja** – visokouglični stabilizirani austenit;
- **tamnija područja** – bainitni ferit karakterističnog izgleda „donjeg“ bainita - igličasti ferit (needle – like ferrite);
- **tamna područja** – grafitne nodule.

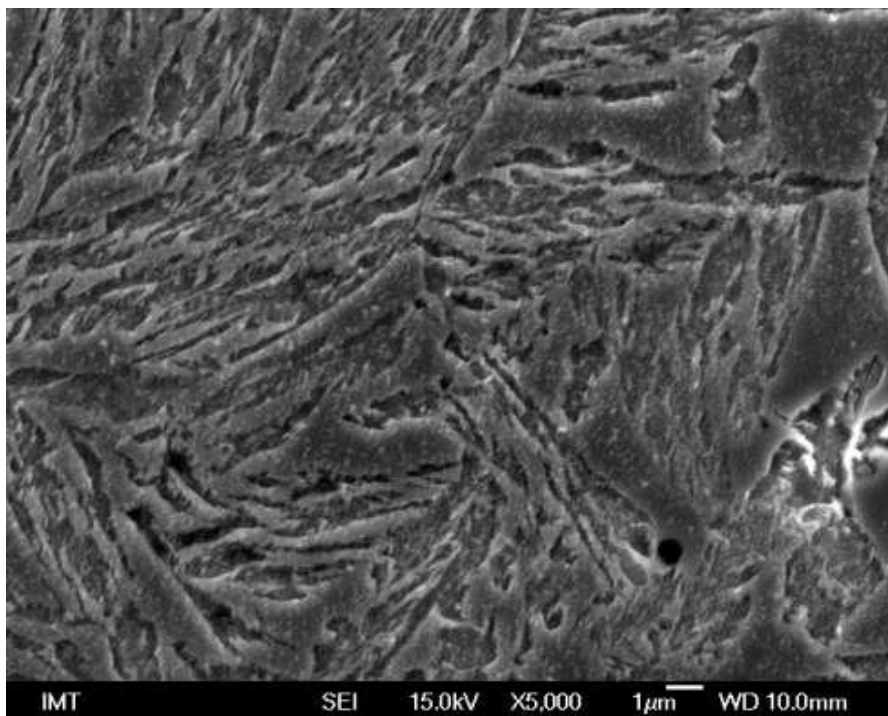
FE SEM analiza

(Field emission Scanning Electron Microscope)

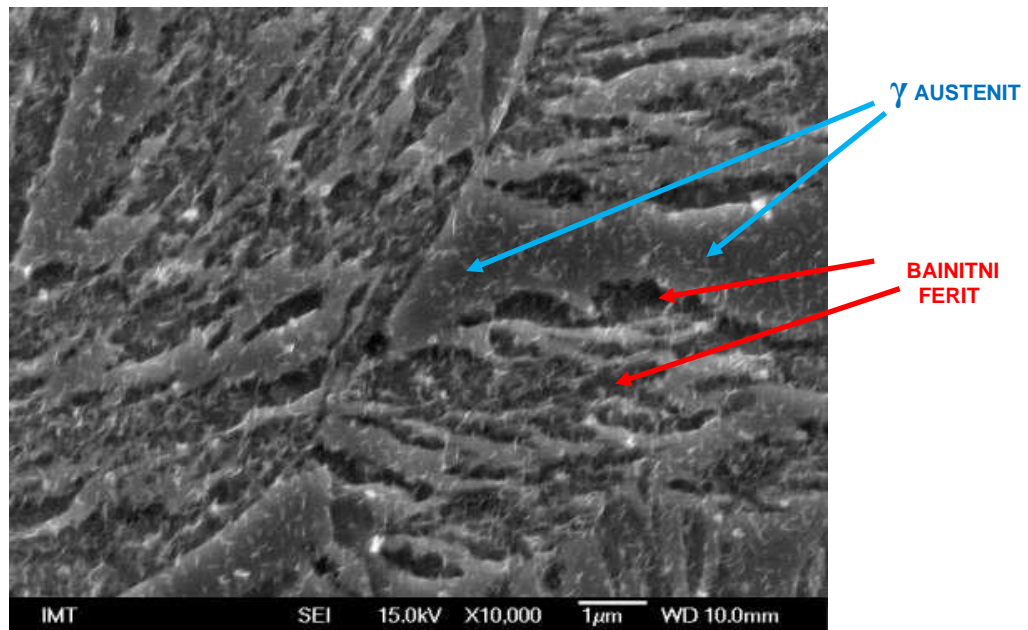
Uzorak ADI 380 - sredina uzorka



Slika 79: Sredina uzorka (2500X)



Slika 80: Sredina uzorka (5000X)

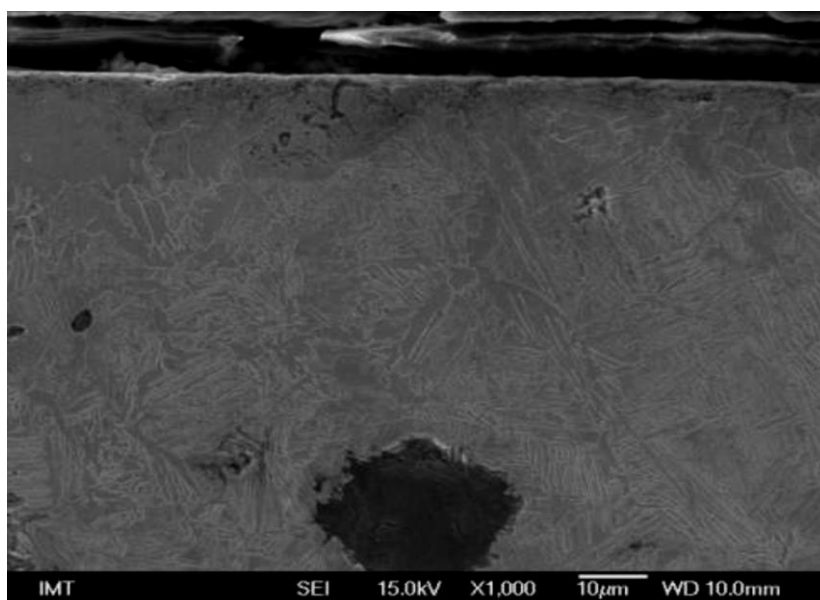


Slika 81: Sredina uzorka (10000X)

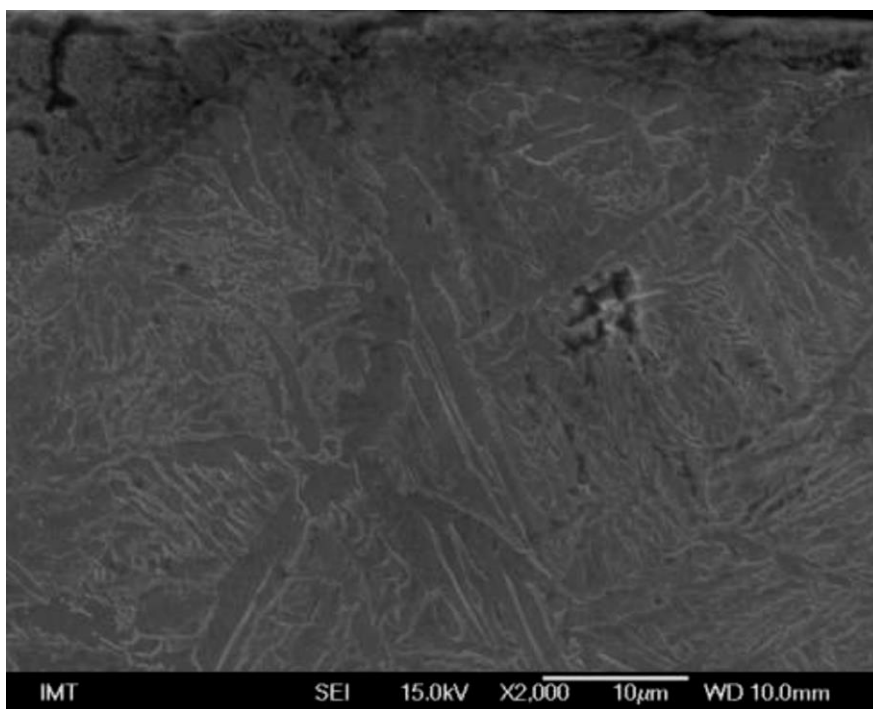
Na slikama 79, 80 i 81 vidljiva je ausferitna struktura tipična za područje izotermičke pretvorbe u području viših temperatura tj. „gornjeg“ bainita.

Austenitna zrna (visokouglični stabilizirani austenit) su izbočena, a bainitni ferit je u reljefu (udubine) i tipičnog je izgleda za „gornji“ bainit. Bainitni ferit je paperjastog oblika, što se na FESEM snimcima jasno vidi.

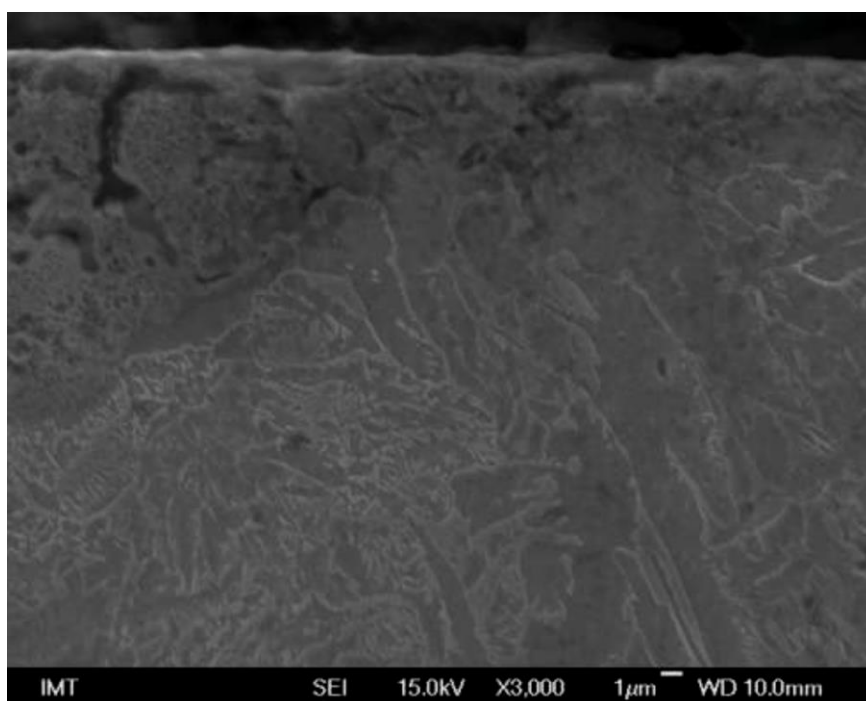
Uzorak ADI 380 – površina uzorka



Slika 82: Površina uzorka (1000X)



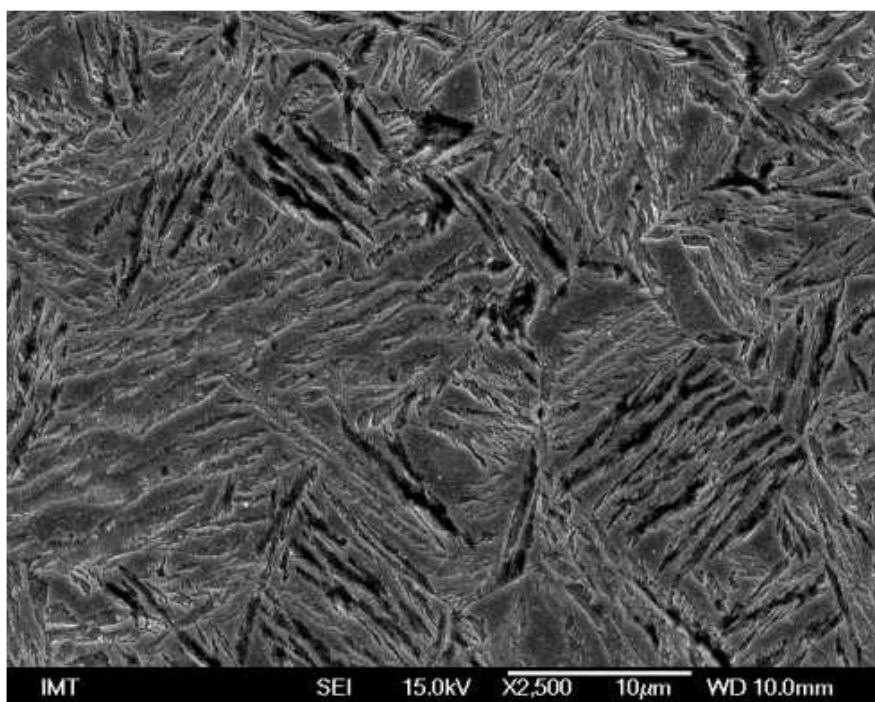
Slika 83: Površina uzorka (2000X)



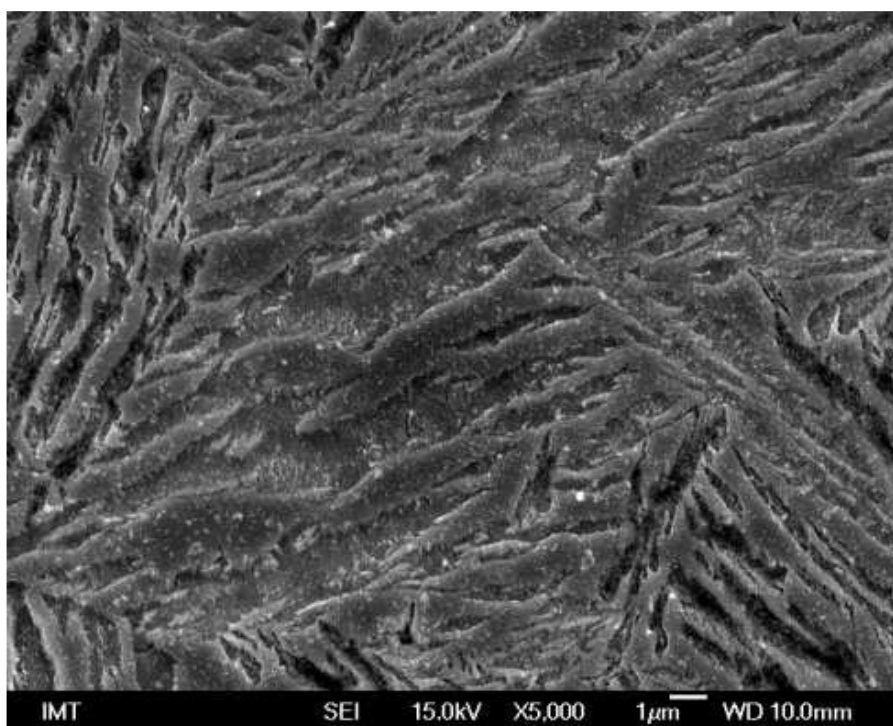
Slika 84: Površina uzorka (3000X)

Na slikama 82, 83 i 84, površine nekugličarenog uzorka vidljivo je da nema razlike površinske strukture u odnosu na strukturu sredine uzorka.

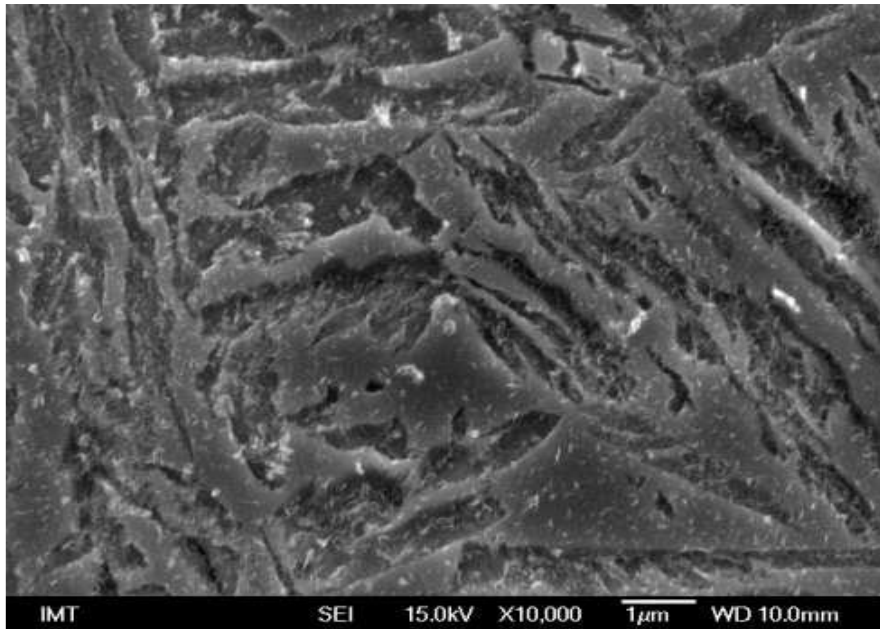
Uzorak ADI 240 - sredina uzorka



Slika 85: Sredina uzorka (2500X)



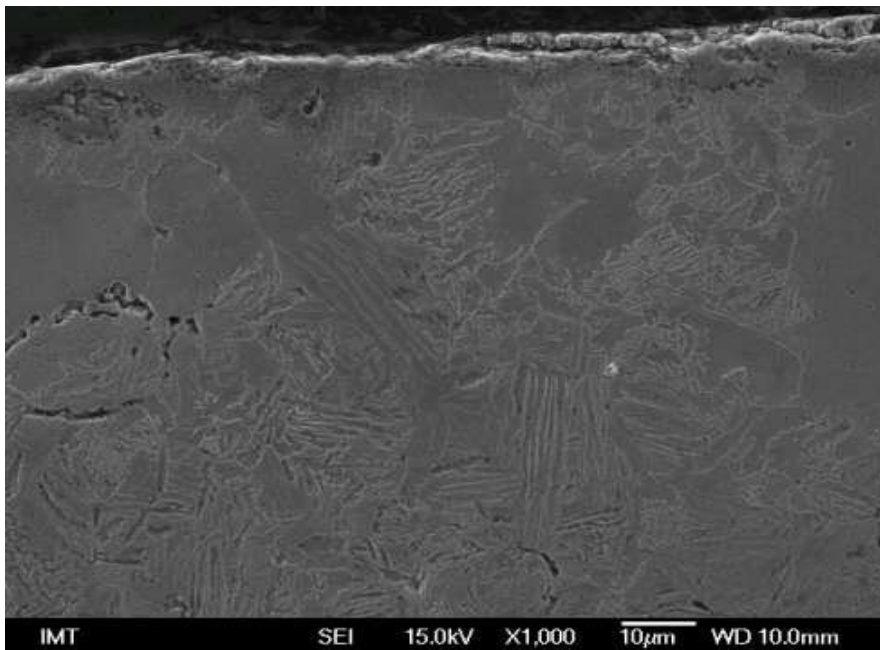
Slika 86: Sredina uzorka (5000X)



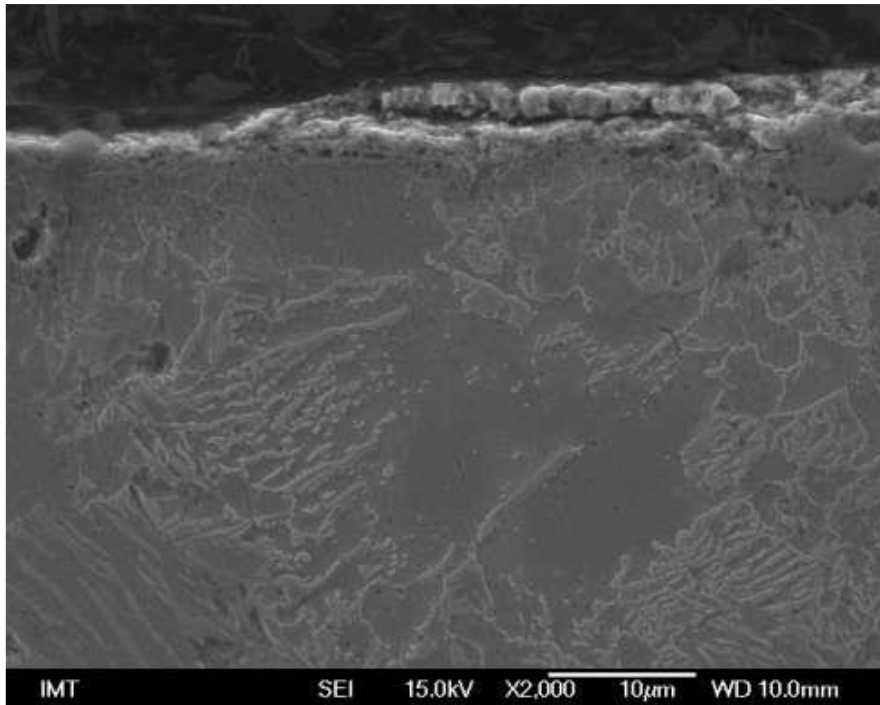
Slika 87: Sredina uzorka (10000X)

Na slikama 85, 86 i 87 vidljiva je ausferitna struktura tipična za područje izotermičke pretvorbe u području nižih temperatura tj. „donjeg“ bainita. Austenitna zrna (visokouglični stabilizirani austenit) su izbočena, a bainitni ferit je u reljefu (udubine).

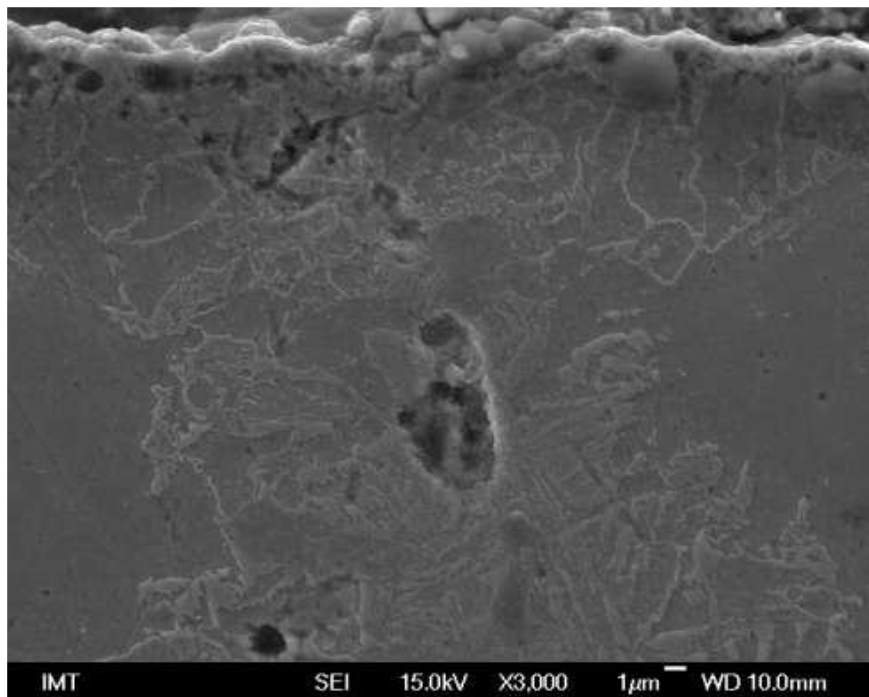
Uzorak ADI 240 – površina uzorka



Slika 88: Površina uzorka (1000X)



Slika 89: Površina uzorka (2000X)



Slika 90: Površina uzorka (3000X)

Na slikama 88, 89 i 90, površine uzorka vidljivo je da nema razlike u strukturi u odnosu na sredinu uzorka, slika 85, 86 i 87.

3.4.3. Ispitivanje mehaničkih svojstava izotermički poboljšanog nodularnog lijeva

3.4.3.1. Tvrdoća ADI materijala (ADI 380, ADI 240)

Tvrdoća ADI materijala izmjerena je na uzorcima za ispitivanje udarnog rada loma Brinell metodom, na istom tvrdomjeru na kojem je mjerena tvrdoća EN-GJS-600-3.

Na svakom uzorku su napravljene tri izmjere tvrdoće. Prikaz srednjih vrijednosti po uzorku dat je u tablicama: 17 i 18. Rezultati svih izmjera nalaze se u prilogu br. 2

Tablica 17: Tvrdoća ADI 380

Uzorak br.	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{X}
Tvrdoća, HB	272	267	268	271	269	272	267	271	270 (27,8 HRC)

Tablica 18: Tvrdoća ADI 240

Uzorak br.	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{X}
Tvrdoća, HB	423	425	428	426	429	424	425	427	426 (45 HRC)

U svrhu dobivanja što točnijih rezultata, Brinell-ovom metodom ispitana je još jednom tvrdoća ADI 240 na uzorcima za abraziju i eroziju. Prikaz svih izmjera dat je u prilogu 3. Srednja vrijednost tvrdoće ispitanih uzoraka prikazana je u tablici 19.

Tablica 19: Površinska tvrdoća uzoraka za ispitivanje otpornosti na trošenje ADI 240

Uzorak br.	Uzorci za ispitivanje na abrazijsko trošenje				Uzorci za ispitivanje na erozijsko trošenje				\bar{X}
	1	2	3	4	1	2	3	4	
Tvrdoća, HB	419	423	415	420	418	420	415	422	418 (44,5 HRC)

3.4.3.2. Udarni rad loma ADI 240 i ADI 380

Nakon toplinske obrade uzoraka, izotermički poboljšanih, ispitan je udarni rad loma ADI materijala. Ispitivanje ADI uzoraka je napravljeno na istom uređaju na kojem su prethodno ispitani uzorci EN-GJS-600-3.

Rezultati mjerenja udarnog rada loma ADI-a prikazani su u tablicama 20 i 21.

Tablica 20: Udarni rad loma ADI 380

Uzorak br.	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{X}
Udarni rad loma, KV, J	9	9	30	9	9	8	28	10	14

Tablica 21: Udarni rad loma ADI 240

Uzorak br.	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{X}
Udarni rad loma, KV, J	12	5	5	5	6	13	5	5	7

3.4.4. Kugličarenje izotermički poboljšanog nodularnog lijeva

3.4.4.1. Opis postupka kugličarenja

S ciljem utvrđivanja utjecaja intenziteta kugličarenja na otpornost trošenju površine EN-GJS-600-3, izotermički poboljšanog pri 240 °C, postupku kugličarenja podvrgnuto je ukupno devet uzoraka:

- tri za ispitivanje otpornosti na abrazijsko i
- šest za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje (tri kvarcnim pijeskom, a tri čeličnim kuglicama).

Uzorci su kugličareni intenzitetima: "1,32 A", "1,11 A" i "0,99 A". Odabrani tlakovi obuhvaćaju područje tlaka kojeg preporuča literatura [47], a u praksi su se pokazali učinkovitim kod metalnih materijala.

Kugličarenje je provedeno pomoću uređaja za kugličarenje UZK-1, slika 91, u Zavodu za proizvodno strojarstvo Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu.



Slika 91: Uređaj za kugličarenje UZK-1

Korišteno sredstvo za kugličarenja je visokouglični toplinski obrađen granulat Abrasiv Muta S 390 (Ø 1 mm). Osnovna svojstva korištenog granulata su visoka otpornost na trošenje, dinamička izdržljivost i dugi vijek trajanja.

Karakteristike granulata su [48]:

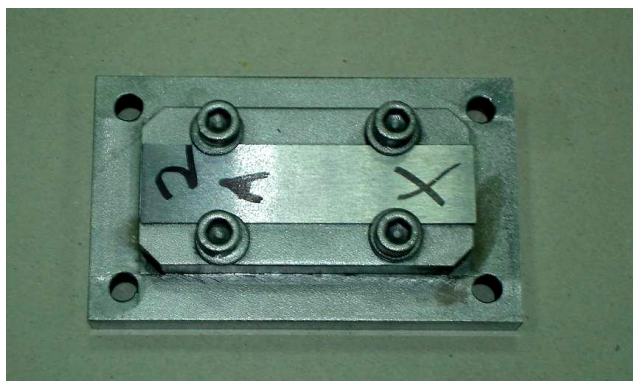
- ✓ Oblik: okrugli
- ✓ Analiza: prosijavanjem: prema normi SAE J444
- ✓ Kemijski sastav: C 0,85-1,2 %; S max 0,04 %;
P max 0,04 % ; tajna proizvođača;
- ✓ Tvrdoa: 43-48 HRC
- ✓ Specifična težina: 7,5 kg/dm³
- ✓ Mikrostruktura: popušteni sitnozrnati martenzit

Umjeravanje uređaja za kugličarenje

Prije kugličarenja uzoraka za ispitivanje na trošenje potrebno je bilo obaviti umjeravanje uređaja za kugličarenje: odrediti kut udara kuglica o površinu, udaljenost mlaznice od kugličarene površine i vrijeme trajanja ciklusa. Prethodna ispitivanja na tom uređaju dala su najbolje rezultate za kut od 90° i udaljenost mlaznice 90 mm pa su kao takva preuzeta, a vrijeme trajanja izlaganja mlazu određeno je postupkom opisanim u nastavku rada.

Umjeravanje uređaja obavljeno je pomoću Almen trake tipa A, koje se koriste za određivanje intenziteta kod kugličarenja željeznih materijala.

Za potrebe kugličarenja Almen traka izrađen je čelični nosač prema dimenzijama iz norme SEA J 442 na kojeg su pričvršćivane trake, slika 92.



Slika 92: Nosač Almen trake s trakom na sebi

Prije početka kugličarenja izmjerena je tvrdoća na tri uzorka Almen trake, a vrijednosti se nalaze u prilogu br. 4. Prosječna vrijednost tvrdoće iznosila je 445 HB (46 HRC), u granicama kako je proizvođač specificirao (45 ± 1 HRC). Sa svakim od spomenutih tlakova, kugličarene su po četiri Almen trake. Nakon svakog ciklusa kugličarenja mjerene su visine luka pomoću Almen komparatora.

Za određivanje Almen intenziteta, ovisno o vremenu izlaganja mlazu kuglica, uzeta je srednja vrijednost kod sva tri tlaka. Vrijednost jačine kugličarenja izražava se brojem koji opisuje visinu luka i oznakom tipa Almen uzorka na kojem je obavljeno mjerenje.

Prikaz svih rezultata mjerenja Almen luka dat je u prilogima:

Prilog 5. Visine Almen luka za tlak 8 bar ovisno o vremenu izlaganja mlazu

Prilog 6. Visine Almen luka za tlak 6,5 bar ovisno o vremenu izlaganja mlazu

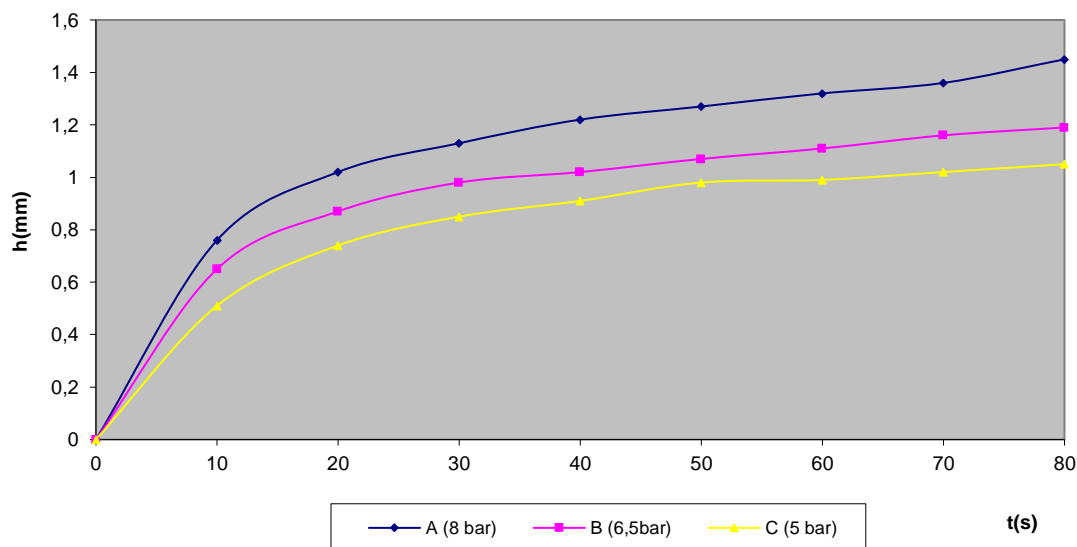
Prilog 7. Visine Almen luka za tlak 5 bar ovisno o vremenu izlaganja mlazu

U tablici 22 dat je tablični prikaz srednjih vrijednosti visina luka ovisno o tlaku i vremenu izlaganja mlazu.

Tablica 22: Srednje vrijednosti visina Almen luka ovisno o tlaku i vremenu izlaganja mlazu kuglica

Tlak na ulazu u mlaznicu (bar)	Vrijeme izlaganja mlazu kuglica, s							
	10	20	30	40	50	60	70	80
	Visina Almen luka h, mm							
8,0	0,76	1,02	1,13	1,22	1,27	1,32	1,36	1,45
6,5	0,65	0,87	0,98	1,02	1,07	1,11	1,16	1,19
5,0	0,51	0,74	0,85	0,91	0,98	0,99	1,02	1,05

Dijagramski prikaz rezultata ovisnosti visine Almen luka o vremenu izlaganja mlazu kuglica prikazan je na slici 93.



Slika 93: Dijagram ovisnosti visine Almen luka o vremenu izlaganja mlazu kuglica

Pomoću dijagrama na slici 93 određena je točka zasićenja za sva tri tlaka. To je točka na krivulji lučne visine (h) u odnosu na vrijeme izlaganja mlazu kuglica (t), kada udvostručenje vremena izlaganja (2t) rezultira povećanjem visine luka manje od 20 % za manje opterećene uzorke i manje od 10 % za zahtjevnije uzorke [47].

Pri izlaganju Almen traka mlazu kuglica u trajanju od 60 sekundi postignuto je zadovoljavajuće zasićenje kod sva tri tlaka sa sljedećim postocima:

Tlak Zasićenje

8 bar	86 %
6,5 bar	87 %
5 bar	86 %

Za tlakove i vrijeme trajanja izlaganja mlazu kuglica, iz tablice 3.9 očitani su Almen intenziteti kako slijedi:

Tlak	Vrijeme	Almen intenzitet
8 bar	60 s	"1,32 A"
6,5 bar	60 s	"1,11 A"
5 bar	60 s	"0,99 A"

3.4.4.2. Površinska tvrdoća kugličarenih uzoraka

Nakon kugličarenja uzoraka ADI 240 s tri različita intenziteta ("1,32 A", "1,11 A", "0,99 A") ponovo je izmjerena tvrdoća na kugličarenoj površini. Rezultati svih izmjera dati su u prilogu 8, a srednje vrijednosti za svaki uzorak prikazane su u tablici 23.

Tablica 23: Srednje vrijednosti površinske tvrdoće kugličarenih uzoraka ADI 240 K

Uzorak	"1,32 A"				"1,11 A"				"0,99 A"			
	AA	AB	AC	\bar{X}	BA	BB	BC	\bar{X}	CA	CB	CC	\bar{X}
Tvrdoća, HB	446	439	444	443 (46,7HRC)	439	434	435	436 (46HRC)	422	427	420	423 (45HRC)

3.4.5. Ispitivane otpornosti na trošenje**3.4.5.1. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje (kugličareni - nekugličareni uzorci)**

U sklopu ove disertacije napravljena su ispitivanja trošenja na abraziju, čiji rezultati su prethodno objavljeni u literaturi [46].

Ispitivanje otpornosti uzoraka na abrazijsko trošenje provedeno je u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, pomoću standardnog uređaja (ASTM G65-94) „suhi pijesak/gumeni kotač“ prikazanog na slici 94.



Slika 94: Uređaj „suhi pijesak/gumeni kotač“

Parametri ispitivanja prikazani su u tablici 24.

Tablica 24: Parametri ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje [46]

Ukupan broj okretaja kotača po ciklusu	N = 100
Brzina rotacije kotača	n = 60 ^{okr} /min
Sila pritiska uzorka o kotač	F = 130 N
Broj ispitivanja po uzorku	3

Korišteni abraziv je kvarcni pijesak SiO₂ promjera zrna od 0,25-0,50 mm

Stupanj intenziteta abrazijskog trošenja, kao i kod erozijskog, određen je gubitkom mase nakon svakog ciklusa ispitivanja (3 x 100 okret.). Masa uzoraka izmjerena je na vagi preciznosti 10⁻⁴ g.

Izgled abradirane površine uzorka prikazuje slika 95.



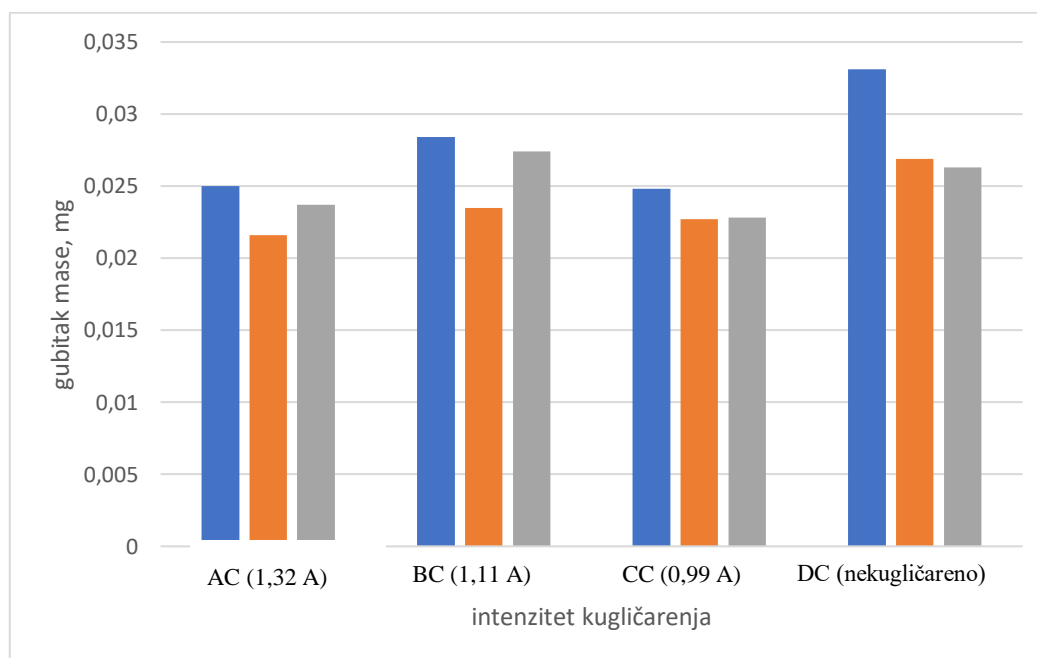
Slika 95: Izgled uzorka nakon ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje[46]

Na svakom uzorku napravljena su tri ispitivanja (3 x 100 okr.). Rezultati mjerenja (promjene) mase prikazani su u tablici 25.

Tablica 25: Masa uzorka ADI 240 nakon svakog ciklusa abradiranja [46]

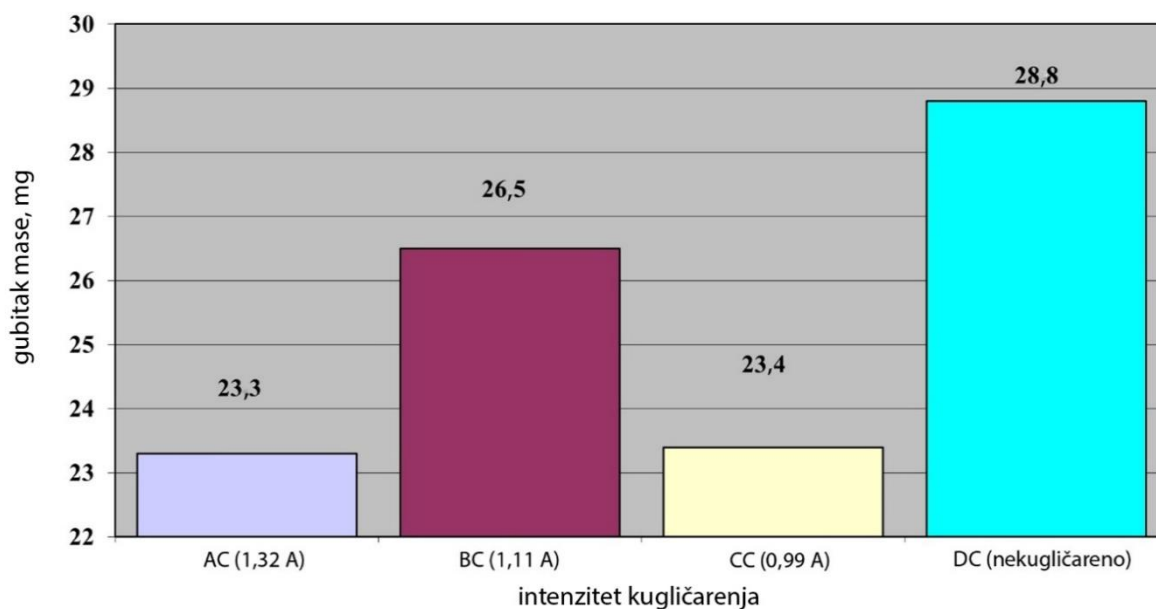
Uzorak	Masa uzorka, g			
	Početna masa	Nakon 1. ispitivanja	Nakon 2. ispitivanja	Nakon 3. ispitivanja
AC	154,5750	154,5500	154,5284	154,5047
BC	159,5824	159,5540	159,5305	159,5031
CC	159,6758	159,6510	159,6283	159,6055
DC	159,2060	159,1729	159,1460	159,1197

Na slici 96, vidi se grafički prikaz gubitka mase.



Slika 96: Gubitak mase uslijed trošenja na abraziju

Prosječni gubitci mase ADI 240 po ciklusu abradiranja grafički su prikazani na slici 97.



Slika 97: Prosječni gubitak mase ADI 240 po ciklusu abradiranja

3.4.5.2. Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje (kugličareni – nekugličareni uzorci)

Ispitivanje otpornosti uzoraka na erozijsko trošenje provedeno je u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, pomoću uređaja prikazanog na slici 98.



Slika 98: Uređaj za ispitivanje otpornosti na eroziju suhim česticama

U sklopu ove disertacije napravljena su ispitivanja trošenja na eroziju, čiji rezultati su prethodno objavljeni u literaturi [46].

Uzorci su ispitivani sa dva eroziva: kvarcnim pijeskom i sitnim kuglicama. Oba ispitivanja su provedena s istim parametrima, prikazanim u tablici 26.

Tablica 26: Parametri ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje

Vrijeme trajanja ispitivanja	$t = 13' 53''$
Brzina vrtnje	$n_{okr} = 1440^{okr}/min$
Broj udara uzorka o mlaz eroziva	$\sim 20\ 000$
Kut udara eroziva	$\alpha = 90^0$

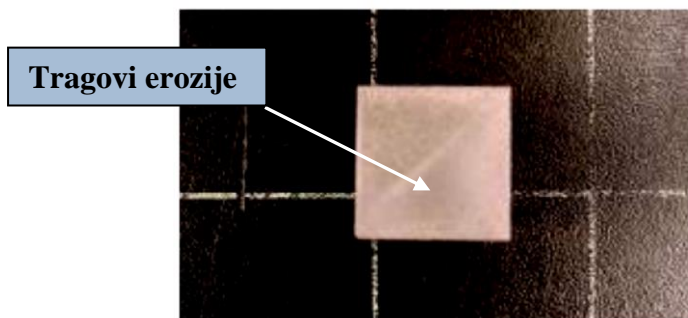
Pri ispitivanju dva uzorka su istovremeno učvršćena u držač pod kutom od 90° . Nakon zatvaranja zaštitne posude držač se zarotirao do brzine od 1440 okr/min i omogućio prolaz uzoraka ispod mlaza eroziva u slobodnom padu, slika 99.



Slika 99: Izgled unutrašnjosti uređaja za ispitivanje otpornosti na eroziju

Jedan ciklus ispitivanja trajao je 13 minuta i 53 sekunde, a za to vrijeme uzorci su udareni mlazom eroziva približno 20 000 puta. Nakon isteka tog vremenskog intervala uređaj je zaustavljen, uzorci su skinuti s držača, očišćeni od zaostalog pijeska i prašine te izvagani.

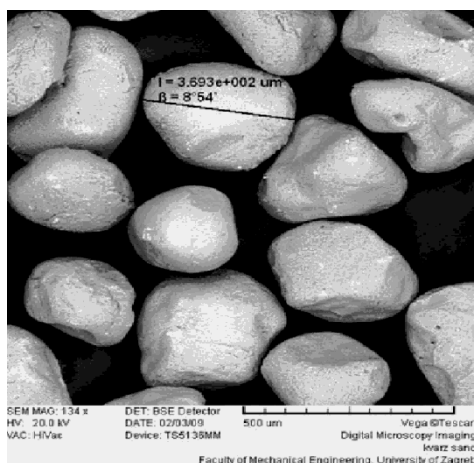
Stupanj intenziteta erozijskog trošenja utvrđen je gubitkom mase nakon svakog ispitivanja pojedinog uzorka. Postupak je ponovljen pet puta. Izgled uzorka nakon ispitivanja prikazan je na slici 100.



Slika 100: Izgled uzorka nakon erodiranja [46]

Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje pijeskom

Pri ispitivanju otpornosti na erozijsko trošenje pijeskom kao eroziv korišten je kvarcni pijesak Ottawa AFS 50/70, prikazan na slici 101.



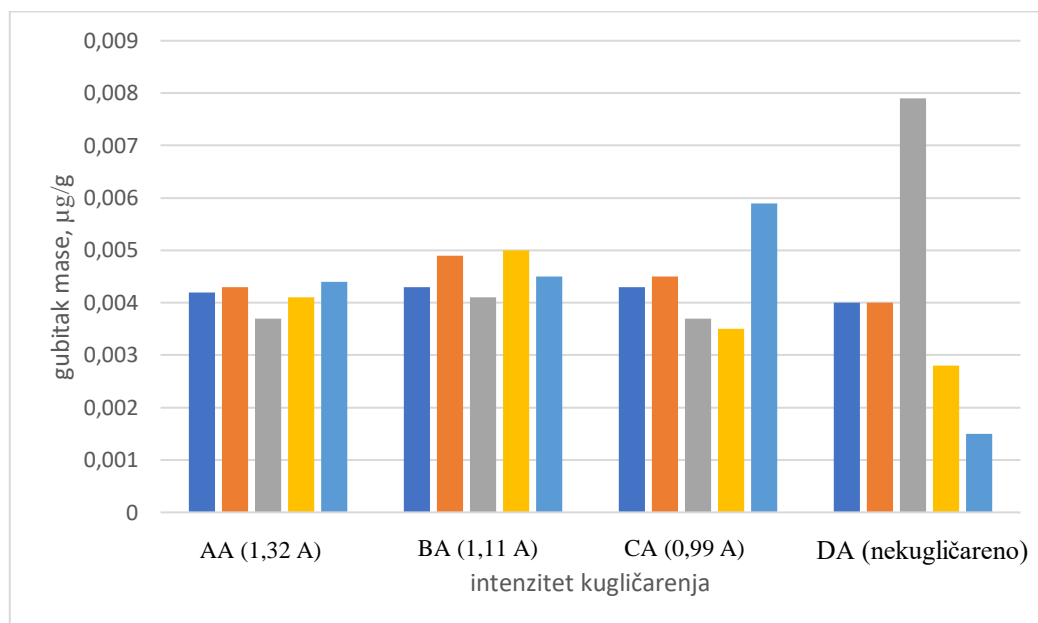
Slika 101: Kvarcni pijesak

Gubitak mase uzorka ADI 240 nakon svakog ciklusa izlaganja eroziji prikazan je u tablici 27.

Tablica 27: Masa uzorka ADI 240 nakon svakog ciklusa erodiranja pijeskom [46]

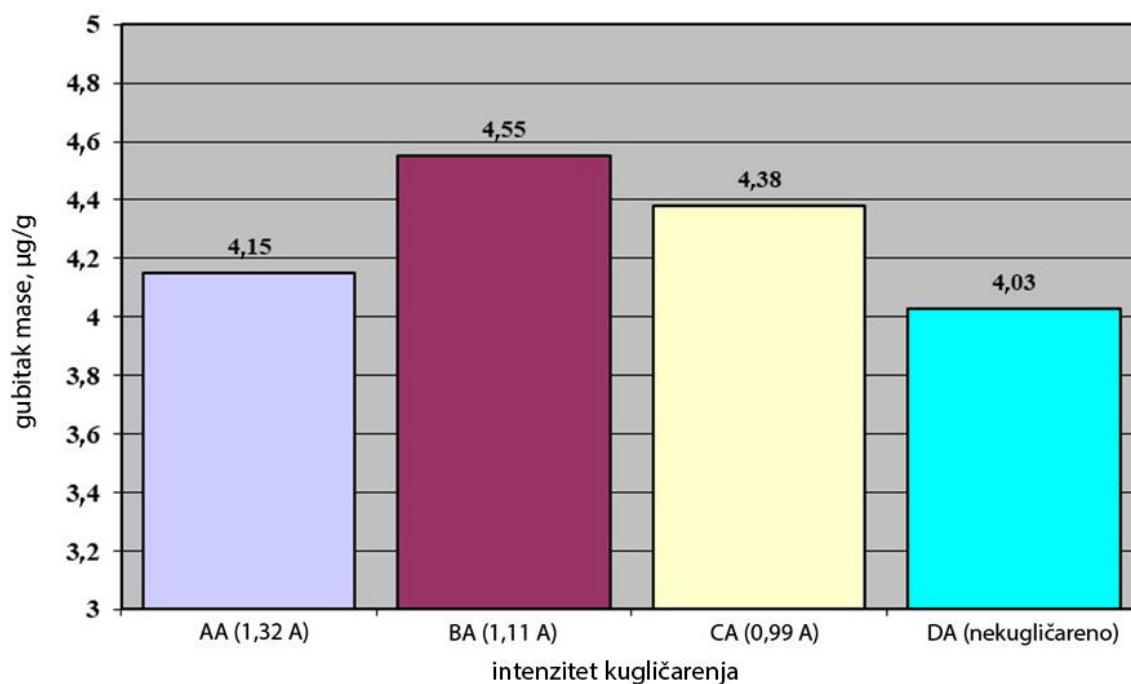
Uzorak	Masa uzorka, g					
	Početna masa	Nakon 1. ispitivanja	Nakon 2. ispitivanja	Nakon 3. ispitivanja	Nakon 4. ispitivanja	Nakon 5. ispitivanja
AA	41,5871	41,5829	41,5786	41,5749	41,5708	41,5664
BA	41,5547	41,5504	41,5455	41,5414	41,5364	41,5319
CA	41,6178	41,6135	41,6090	41,6053	41,6018	41,5959
DA	41,5087	41,5047	41,5007	41,4928	41,4900	41,4885

Gubitak mase uzoraka ADI 240 po ciklusu, grafički je prikazan na slici 102.



Slika 102: Gubitak mase uzoraka ADI 240 ispitanih na trošenje pijeskom

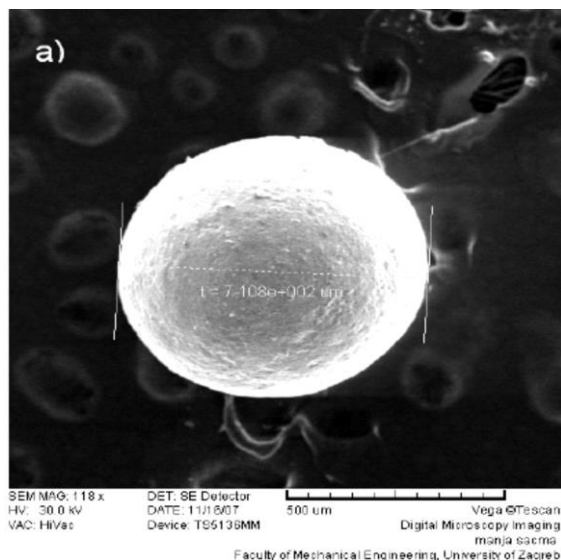
Grafički prikaz prosječnih gubitaka mase ADI 240 po ciklusu ispitivanja prikazan je na slici 103.



Slika 103: Prosječni gubitak mase ADI 240 po ciklusu erodiranja pijeskom

Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje čeličnim kuglicama

Pri ispitivanju otpornosti na trošenje kuglicama kao eroziv korištene su sitne čelične kuglice srednjeg promjera $D = 0,7 \text{ mm}$, slika 104.



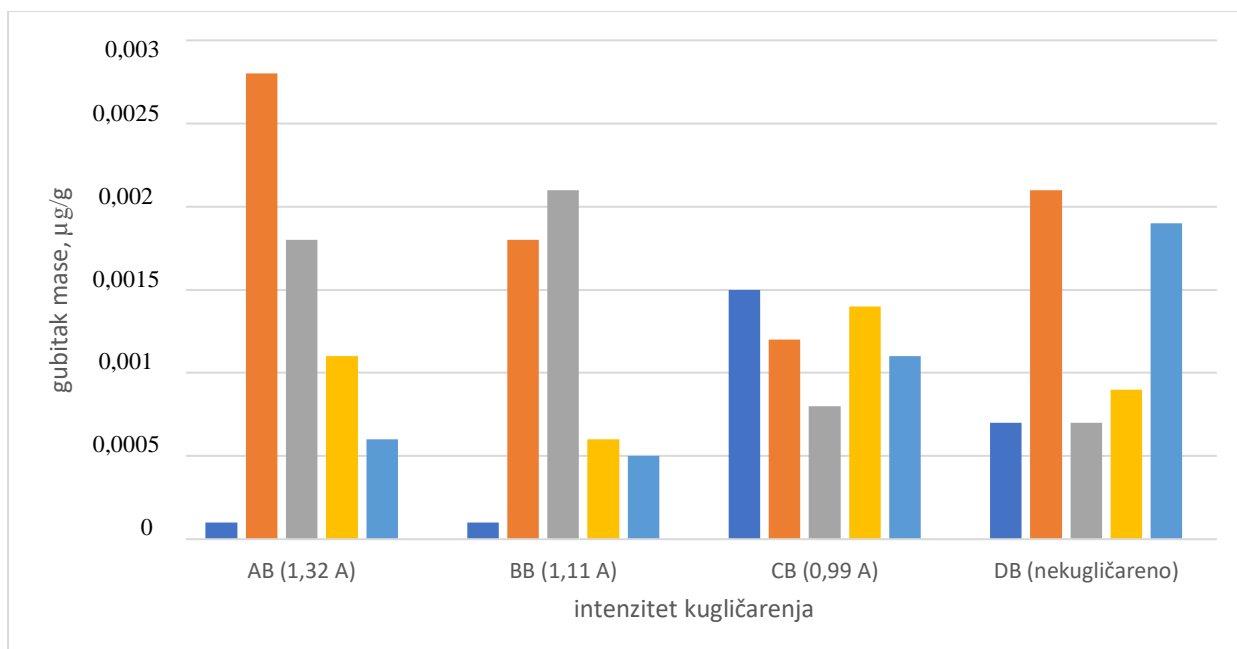
Slika 104: Čelična kuglica

Gubitak mase uzoraka ADI 240 nakon svakog ciklusa izlaganja kuglicama prikazan je u tablici 28.

Tablica 28: Masa uzoraka ADI 240 nakon svakog ciklusa erodiranja kuglicama [46]

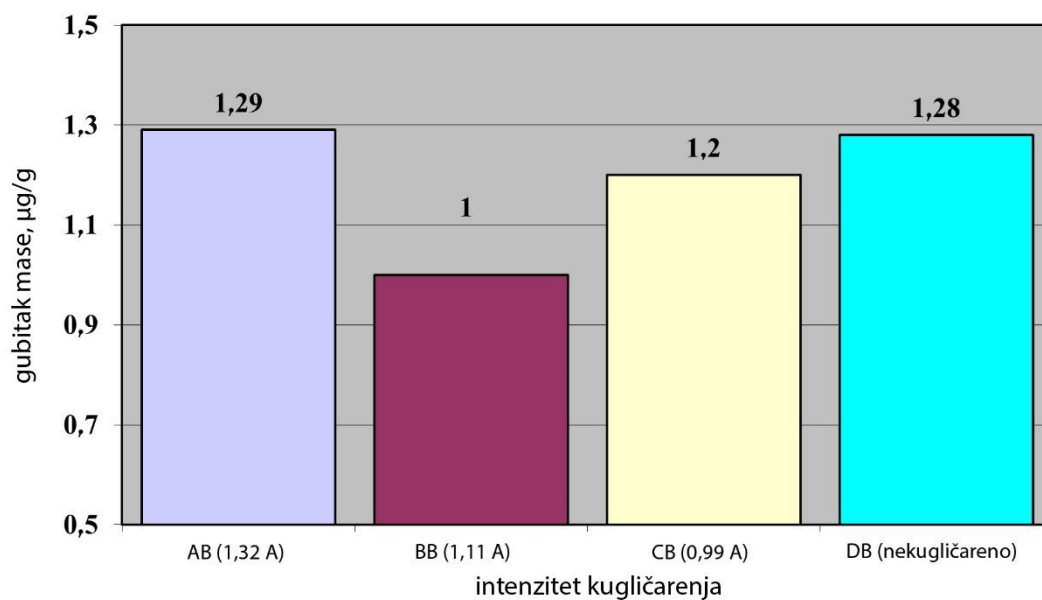
Uzorak	Masa uzorka, g					
	Početna masa	Nakon 1. ispitivanja	Nakon 2. ispitivanja	Nakon 3. ispitivanja	Nakon 4. ispitivanja	Nakon 5. ispitivanja
AB	41,4663	41,4662	41,4634	41,4616	41,4605	41,4599
BB	41,8385	41,8384	41,8366	41,8345	41,8339	41,8334
CB	41,6142	41,6127	41,6115	41,6107	41,6093	41,6082
DB	41,6094	41,6087	41,6066	41,6059	41,6050	41,6031

Na slici 105 vidi se grafički prikaz gubitka mase po ciklusu, uzoraka ADI 240 ispitanih na trošenje kuglicama.



Slika 105: Gubitak mase uzoraka ADI 240 ispitanih na trošenje čeličnim kuglicama

Na slici 106 grafički je prikazan prosječni gubitak mase ADI 240 po ciklusu erodiranja čeličnim kuglicama.

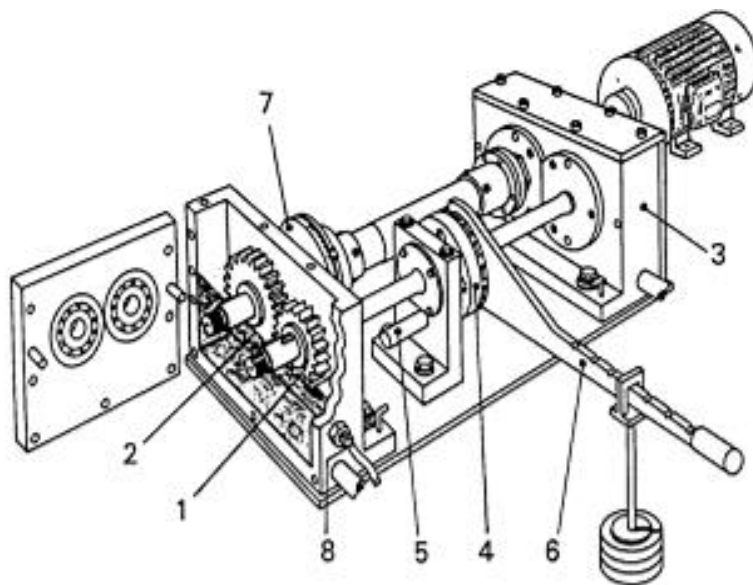


Slika 106: Prosječan gubitak mase ADI 240 po ciklusu erodiranja kuglicama

3.4.5.3. FZG test

U sklopu ovog istraživanja napravljen je diplomski rad u kojem su ispitani zupčanici izrađeni za potrebe ove disertacije. Rezultati ispitivanja, gubitak mase zupčanika (trošenja) i preneseni rad, objavljeni su u literaturi [49].

Ispitivanje je obavljeno u laboratoriju tvrtke „Maziva Zagreb“ d.o.o., na FZG ispitnom uređaju shematski prikazanom na slici 107.



Slika 107: FZG ispitni uređaj [49]

Promjenom pozicije tereta na poluzi (poz.6), preko spojke (poz.4) i osovine mijenja se moment odnosno opterećenje na ispitnim zupčanicima (poz.1 i 2). Zupčanici su uronjeni u ulju čija se temperatura prati pomoću temperaturnog osjetila (poz.8).

Uređaj ima mogućnost odabira brzine vrtnje 1500 ili 3000 okr./min većeg-pogonskog (ispitivanog) zupčanika [42]. Za ovo istraživanje odabrana brzina vrtnje većeg zupčanika je 3000 okr./min, kako bi se skratilo vrijeme trajanja ciklusa ispitivanja.

Ispitni zupčanici u zahvatu prikazani su na slici 108.



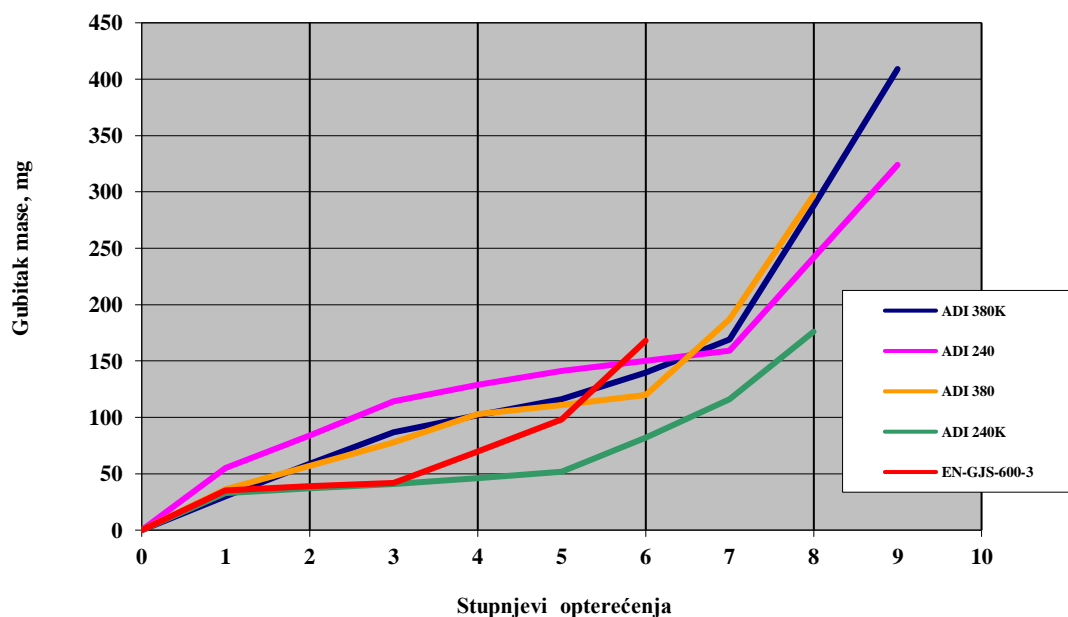
Slika 108: Zupčanički par u zahvatu [49]

Postupak ispitivanja započeo je opterećenjem prvog stupnja uz istovremeno zagrijavanje ulja do temperature od 90 °C. Po stupnju opterećenja ciklus je trajao 15 min (45 000 okretaja). Nakon svakog ciklusa ispitivanja zupčanici su demontirani, odmašćeni, izvagani i obavljena je kontrola stanja površine bokova zubi.

U slijedećem ciklusu opterećenje je povećano. Postupak se nastavio do pojave adhezije/istrošenja na ispitivanom zupčaniku.

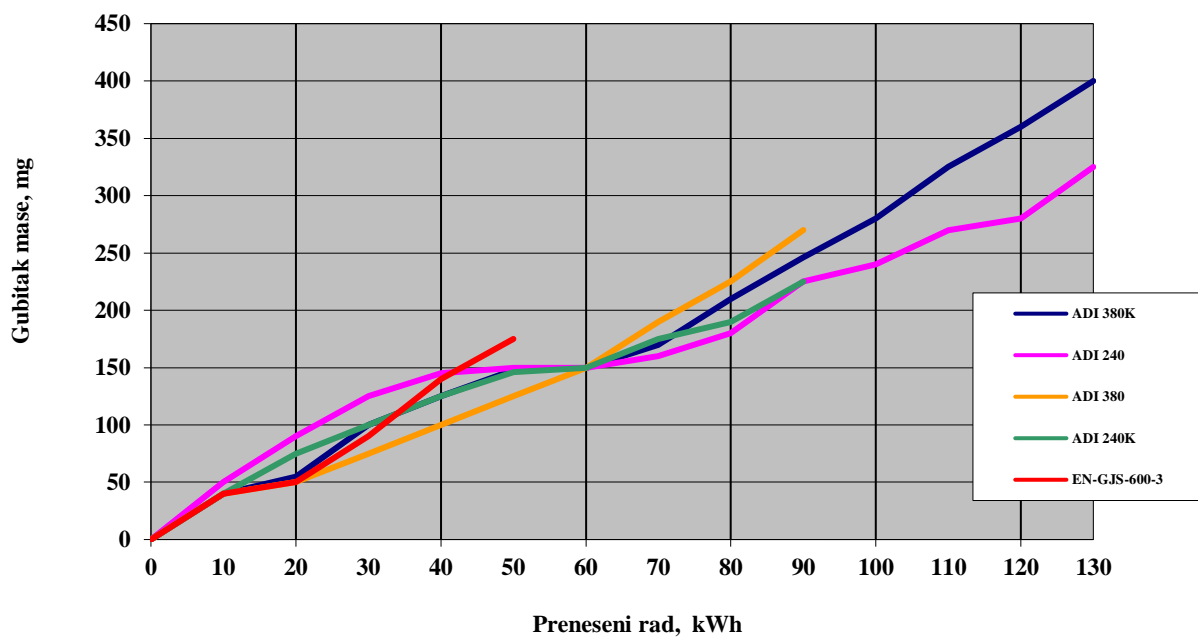
Gubitci mase zupčanika i porast temperature ulja prikazani su u prilogu 9.

Gubitak mase u odnosu na stupanj opterećenja dijagramski je prikazan na slici 109.



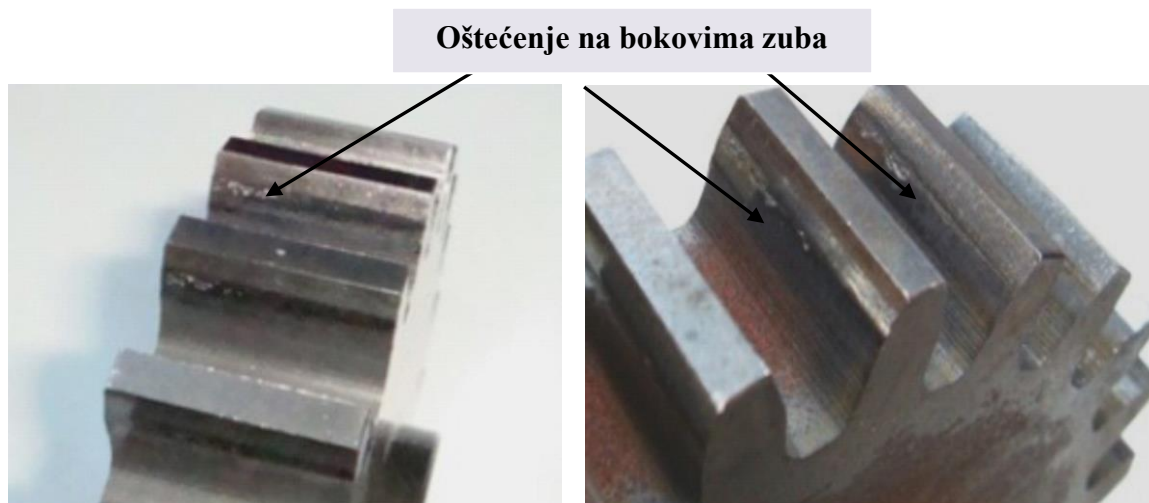
Slika 109: Gubitak mase zupčanika u odnosu na stupanj opterećenja [49]

Dijagramski prikaz gubitka mase u odnosu na preneseni rad prikazan je na slici 110.



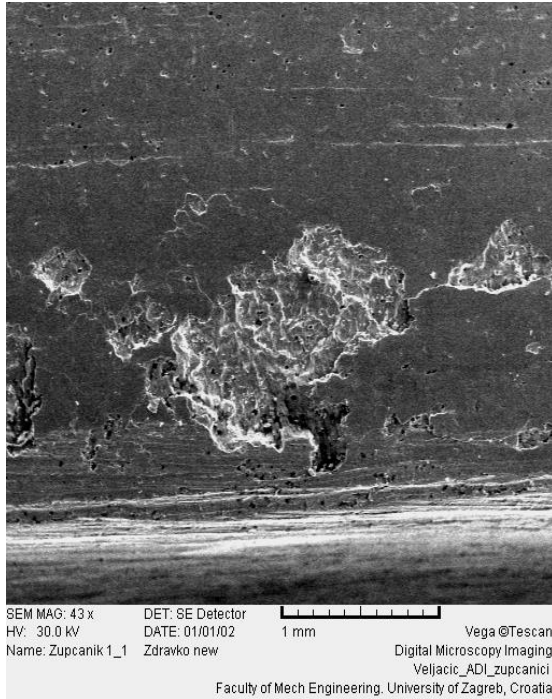
Slika 110: Gubitak mase zupčanika u odnosu na preneseni rad [49]

Slika 111 prikazuje stanje površine zubi zupčanika po završetku ispitivanja.

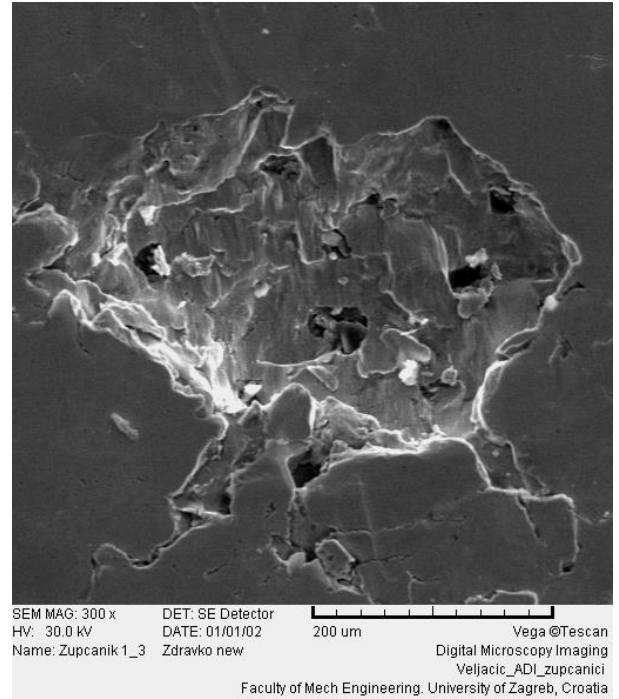


Slika 111: Površina bokova zubi zupčanika nakon ispitivanja [49]

Detalji oštećenja površine zubi analizirani su skenirajućim elektronskim mikroskopom i prikazani su na slikama 112 a i b i 113 a i b.

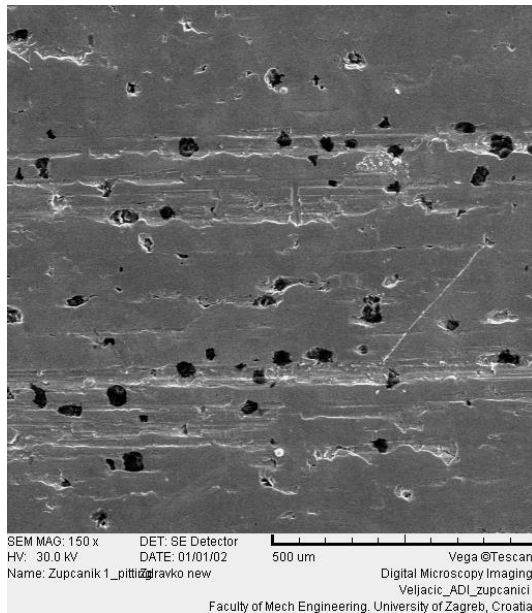


a) detalji oštećenja

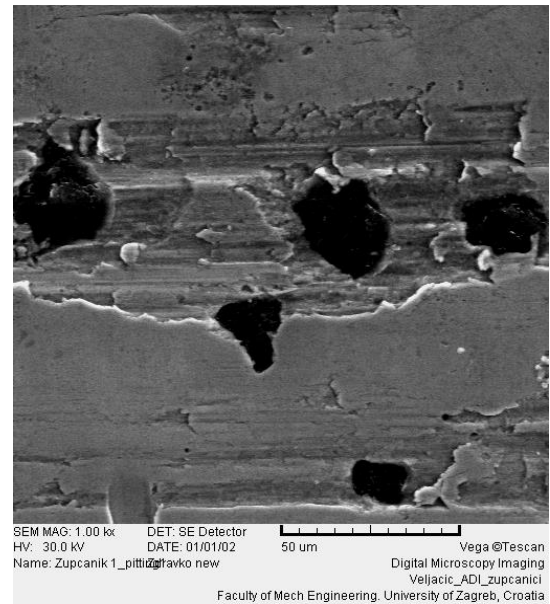


b) veće povećanje

Slika 112: Oštećenja površine zuba [49]



a) manje povećanje

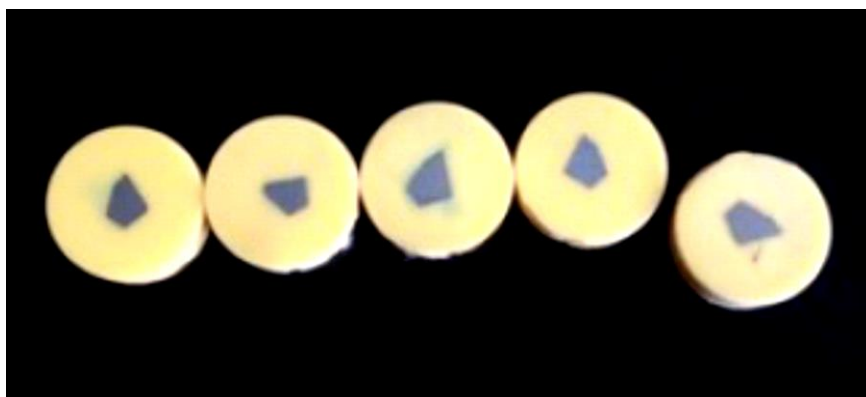


b) veće povećanje

Slika 113: Mjesta gdje su bile nodule grafita - inicijalna mjesta pukotina [49]

3.4.6. Analiza kugličarenog ADI materijala

Po završetku ispitivanja na FZG ispitnom uređaju od svakog zupčanika odrezan je po širini jedan zub na kojem je ispitana mikrotvrdoća, mikrostruktura i obavljena rendgenska difrakcija. Uzorci za ispitivanje mikrotvrdoće i mikrostrukture pripremljeni su u Laboratoriju za metalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Zubi su zaliveni na hladno u akrilnu masu “Durofix-2 kit”, brušeni i polirani, slika 114.

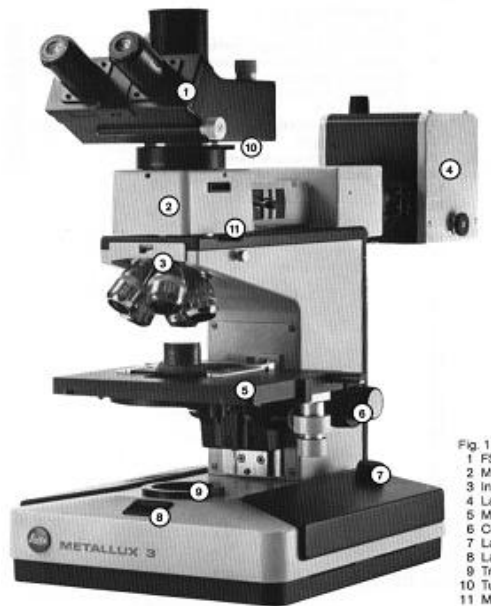


Slika 114: Uzorci zubi pripremljeni za ispitivanje mikrotvrdoće

Nakon ispitivanja mikrotvrdoće, u laboratoriju Zavoda za opću i analognu kemiju PMF-a u Zagrebu uzorci zubi su oslobođeni akrilne mase, očišćeni te pripremljeni za rendgensku difrakciju.

3.4.6.1 Mikrotvrdoća kugličarenog sloja

Mjerenje mikrotvrdoće obavljeno je na poprečnom presjeku zubi, u laboratoriju Instituta za fiziku u Zagrebu, uz pomoć svjetlosnog mikroskopa LEITZ METALLUX 3 sa specijalnim dodatkom za mjerenje mikrotvrdoće LEITZ MINILOAD 2 i digitalnom kamerom LEICA EC 3, slici 115.



Slika 115: Mikroskop LEITZ METALLUX 3 s dodatnom opremom

Vickersova metoda mjerenja mikrotvrdoće zasniva se na mjerenju duljine dijagonale otiska na ispitivanom materijalu. Opterećenje na utiskivaču ostvaruje se utezima od 5 do 250 grama. Prije početka mjerenja mikrotvrdoće napravljeno je nekoliko probnih mjerenja s više utega različite mase (5, 10, 25, 50 g), u cilju odabira optimalne sile utiskivanja i pozicioniranja indentora što je moguće bliže rubu uz površinu uzoraka.

Obzirom da se željela postići što veća točnost, a vezano za mikroskopsko povećanje 1000 X, odabrana je masa utega od 25 grama (HV 0,025). Njegovim otiskom moguće je dovoljno se približiti rubu uzorka i očitati veličinu uz odabrano povećanje. Probnim mjerenjima definirana su mjesta udaljenosti od površine (dubine) na kojima su se ispitivale tvrdoće (30, 60, 150, 300 i 600 μm). Na svakoj navedenoj udaljenosti od površine (dubini) napravljeno je 15 izmjera u liniji s odmakom 100 μm između otisaka i izračunata je srednja vrijednost. Pri tom se vodilo računa da se ne dodiruju jasno vidljive nodule ugljika.

Iznos tvrdoće određuje se prema izrazu:

$$HV = (189 \times 10^3 \times F) / d^2 \quad (3.1)$$

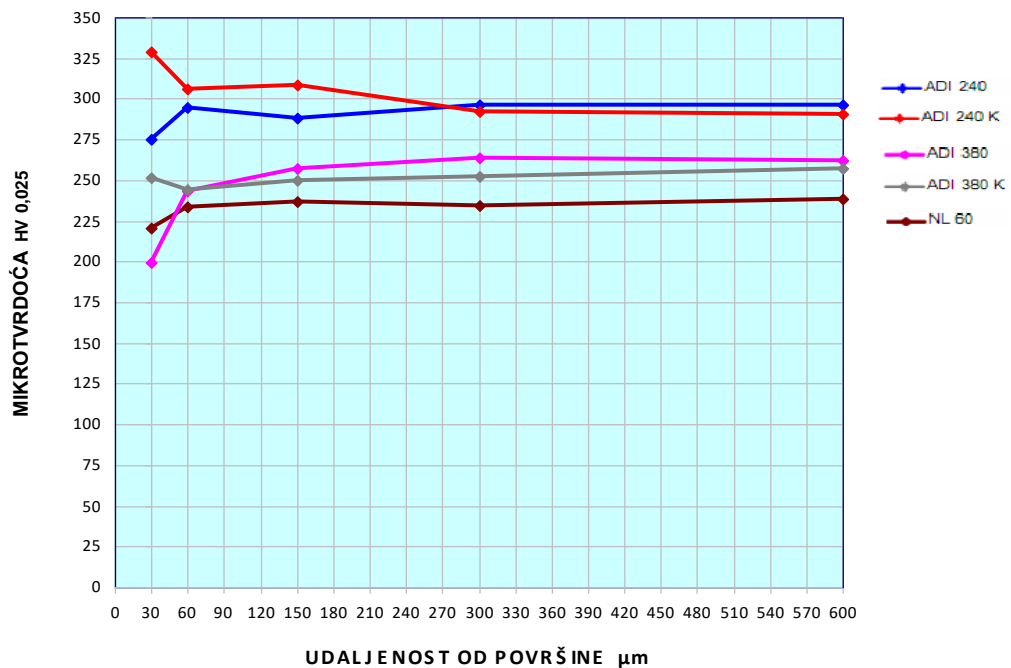
gdje je: HV – tvrdoća; F – opterećenje u N; d – dijagonala otiska u μm

Tablica 29 daje prosječan raspored tvrdoće po poprečnom presjeku različito toplinski i površinski obrađenih zupčanika od nodularnog lijeva EN-GJS-600-3.

Tablica 29: Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku zuba zupčanika

Udaljenost od površine, μm	Tvrdoća, HV 0,025				
	EN-GSJ-600-3	ADI 380	ADI 380 K	ADI 240	ADI 240 K
30	221	199	251	275	329
60	234	243	244	295	306
150	236	257	249	287	309
300	235	263	252	296	292
600	238	261	257	296	291

Slika 116 daje dijagramski prikaz rezultata iz tablice 3.20.



Slika 116: Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku zuba zupčanika

Rezultati svih izmjera mikrotvrdoće po poprečnom presjeku zuba dati su u prilogima:

Prilog 10. Tvrdoća po poprečnom presjeku zuba EN-GJS-600-3

Prilog 11. Tvrdoća po poprečnom presjeku zuba zupčanika ADI 380

Prilog 12. Tvrdoća po poprečnom presjeku zuba zupčanika ADI 380 K

Prilog 13. Tvrdoća po poprečnom presjeku zuba zupčanika ADI 240

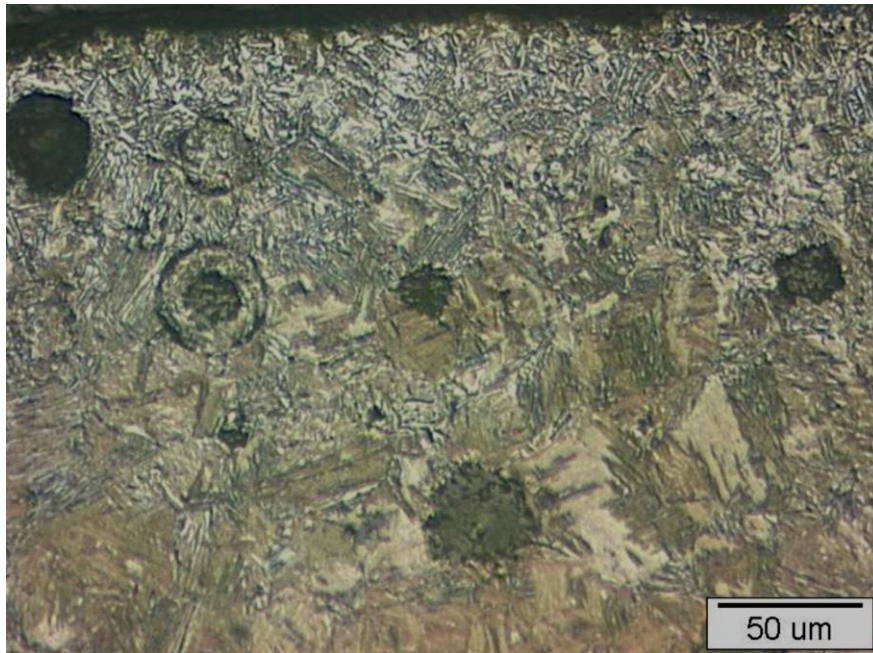
Prilog 14. Tvrdoća po poprečnom presjeku zuba zupčanika ADI 240 K

3.4.6.2 Analiza mikrostrukture kugličarenog ADI materijala

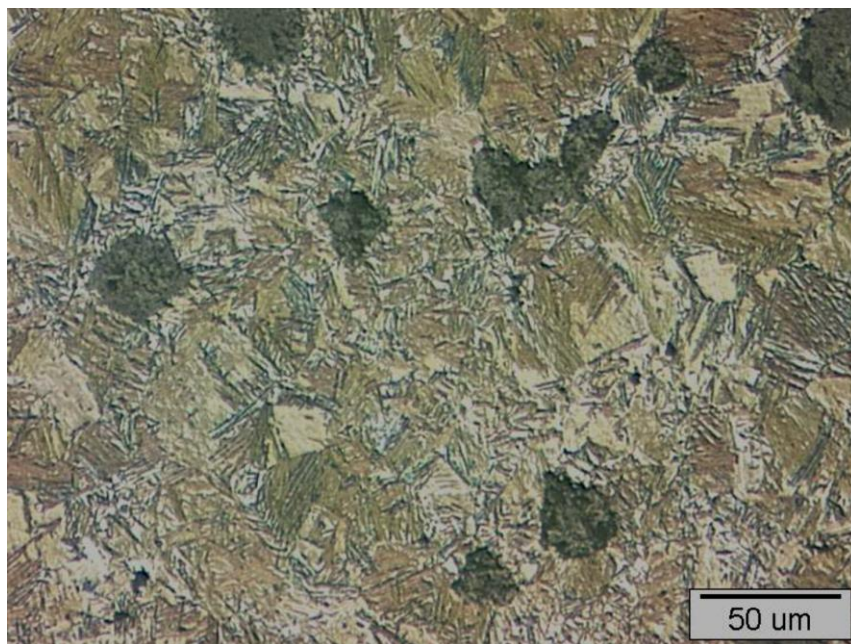
Svjetlosna mikroskopija

Uzorak ADI 380 K – manje povećanje

Na slici 117 vidljivo je znatno sitnije zрно na površini uslijed kugličarenja, u usporedbi sa sredinom uzorka, slika 118.



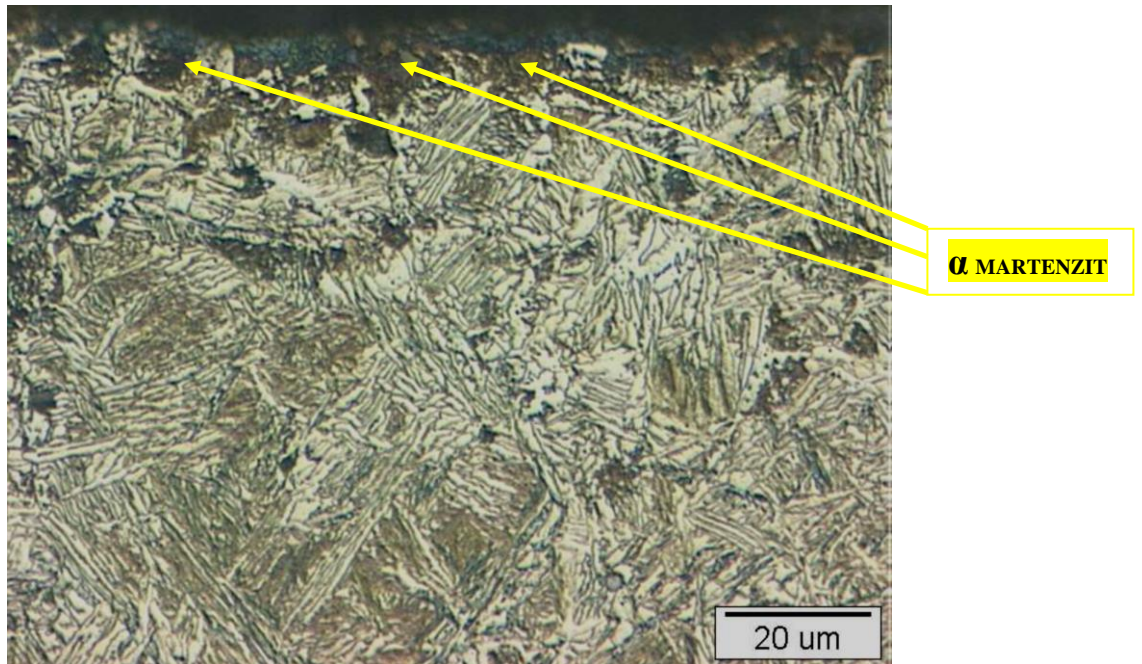
Slika 117: Površina zuba (200X)



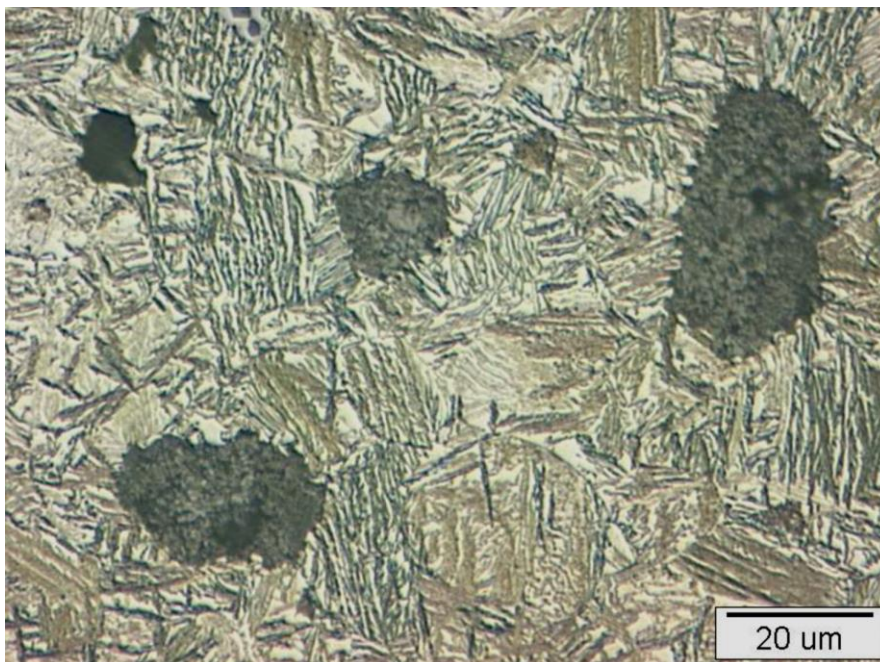
Slika 118: Sredina zuba (200X)

Uzorak ADI 380 K – veće povećanje

Na slici 119, u površinskom sloju do dubine cca 10 μm uočen je martenzit nastao prilikom kugličarenja.



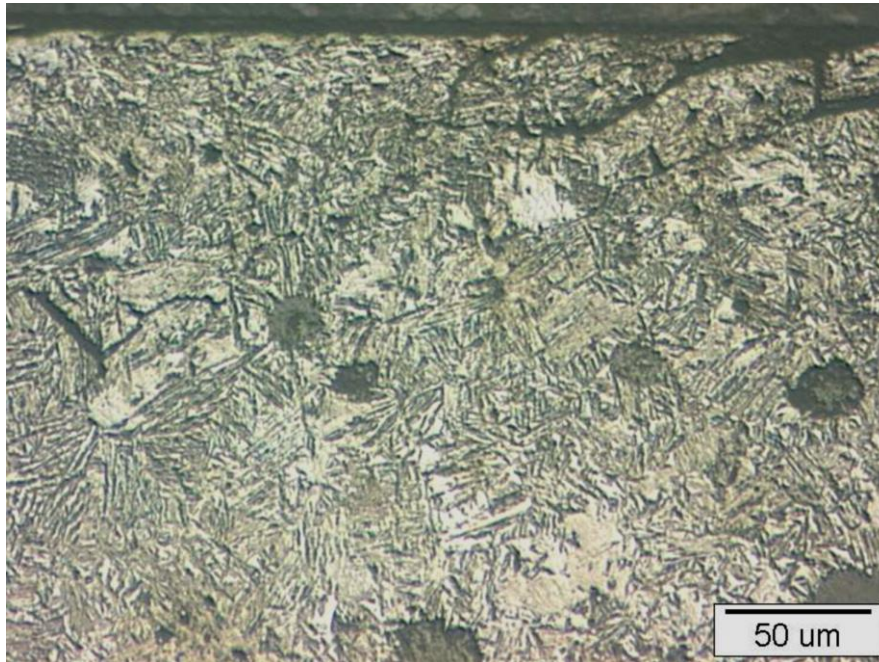
Slika 119: Površina zuba (500X)



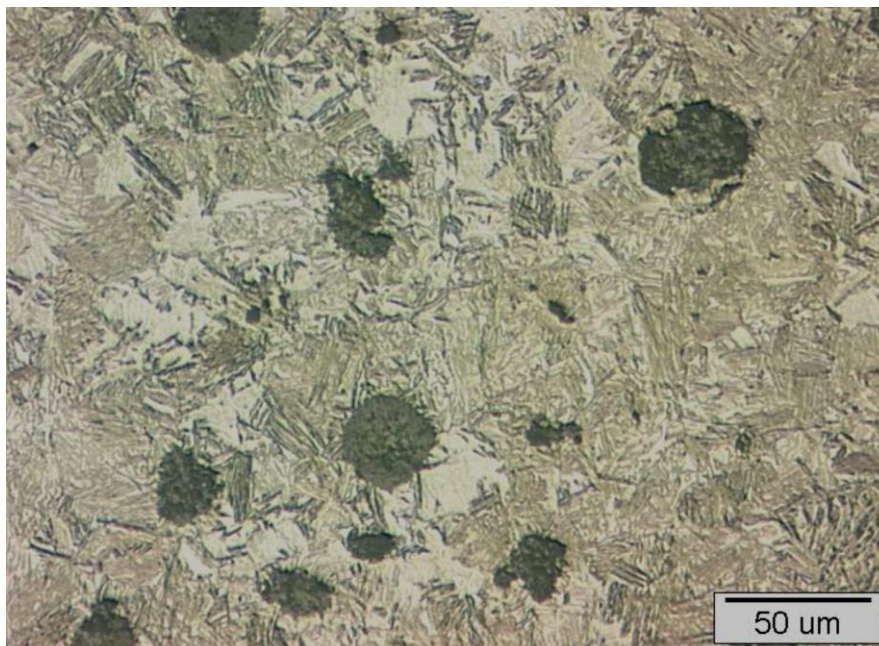
Slika 120: Sredina zuba (500X)

Uzorak ADI 240 K – manje povećanje

Na slici 121, u površinskom sloju opažaju se znatno sitnija kristalna zrna u odnosu na sredinu uzorka, slika 122, do kojih je došlo uslijed kugličarenja.



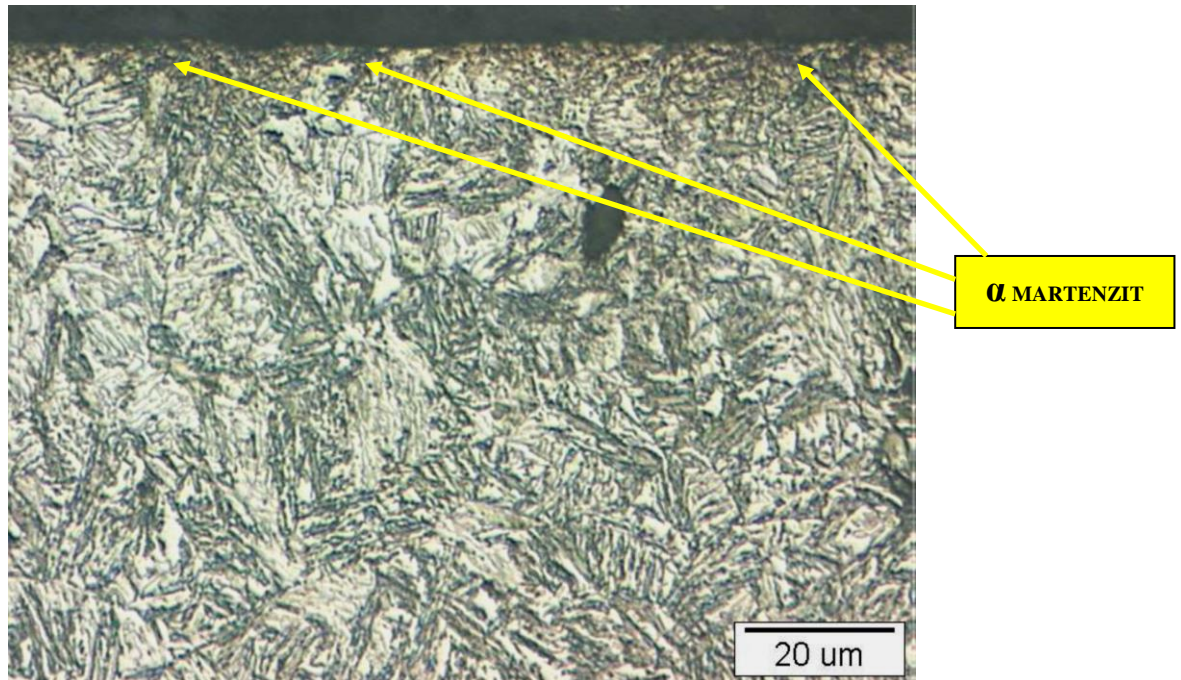
Slika 121: Površina zuba (200X)



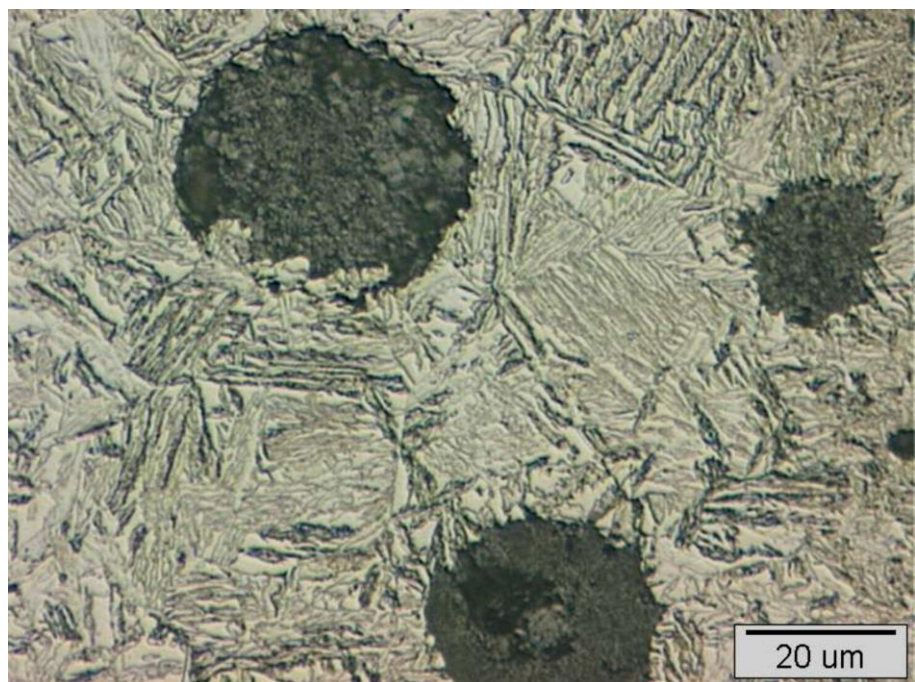
Slika 122: Sredina zuba (200X)

Uzorak ADI 240 K – veće povećanje

Na slici 123, u površinskom sloju vidljiva je pojava martenzita uz znatno sitnija kristalna zrna u odnosu na ona u strukturi prikazanoj na slici 124. Uzrok tome je kugličarenje.



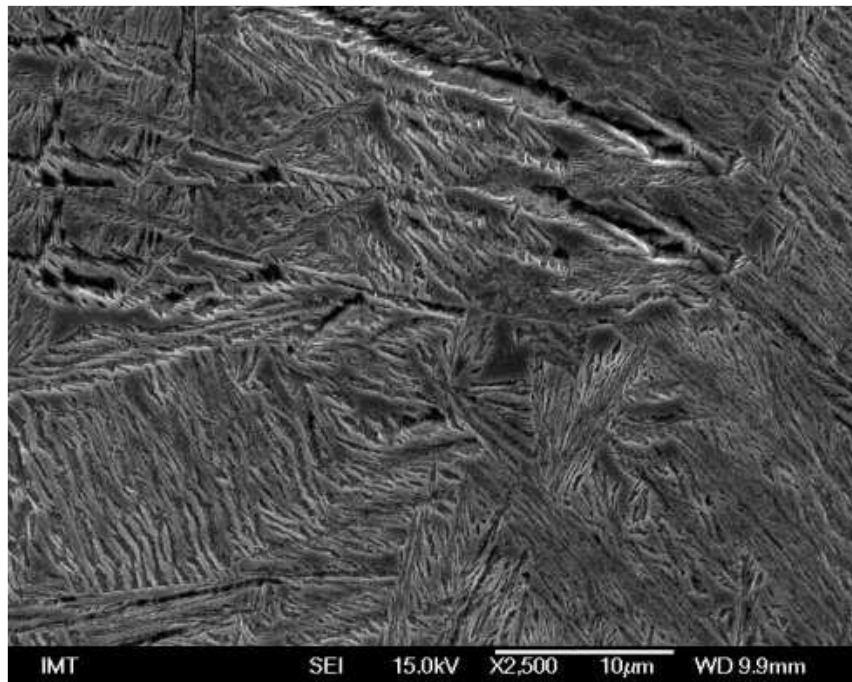
Slika 123: Površina zuba (500X)



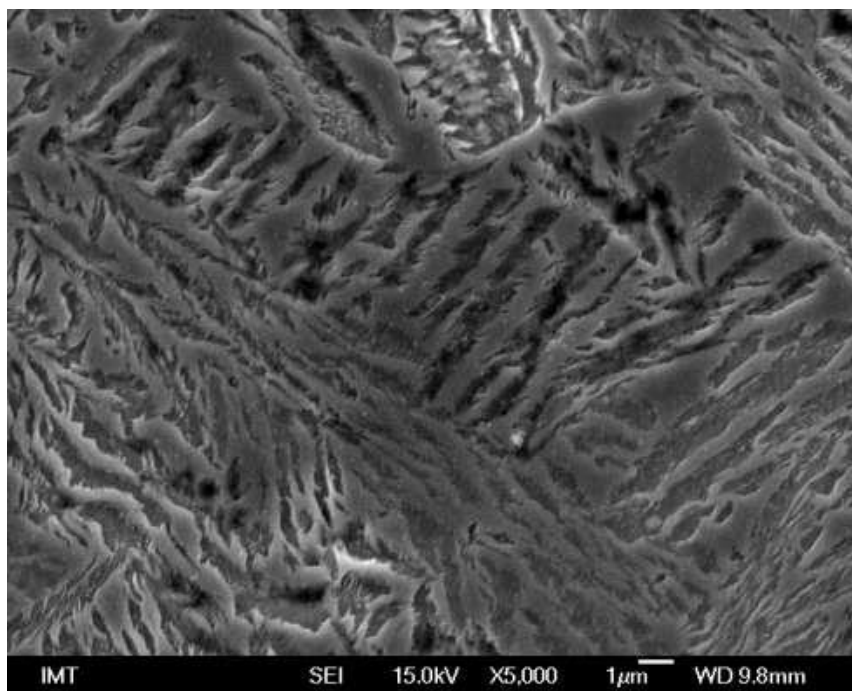
Slika 124: Sredina zuba (500X)

FE SEM analiza

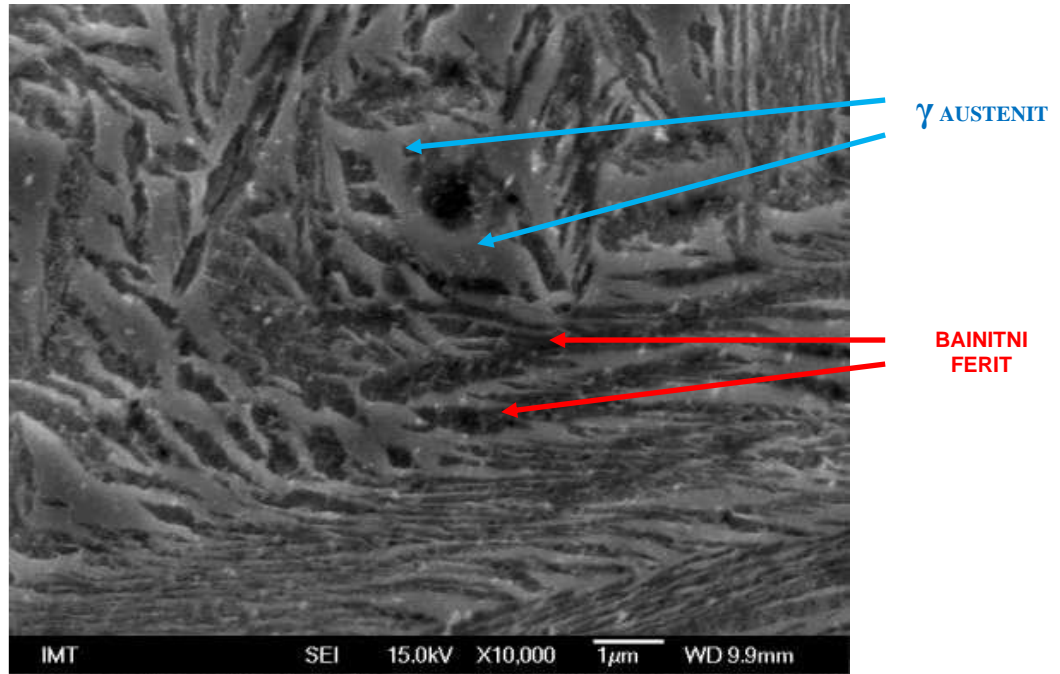
Uzorak ADI 380 K - sredina uzorka



Slika 125: Sredina zuba (2500X)



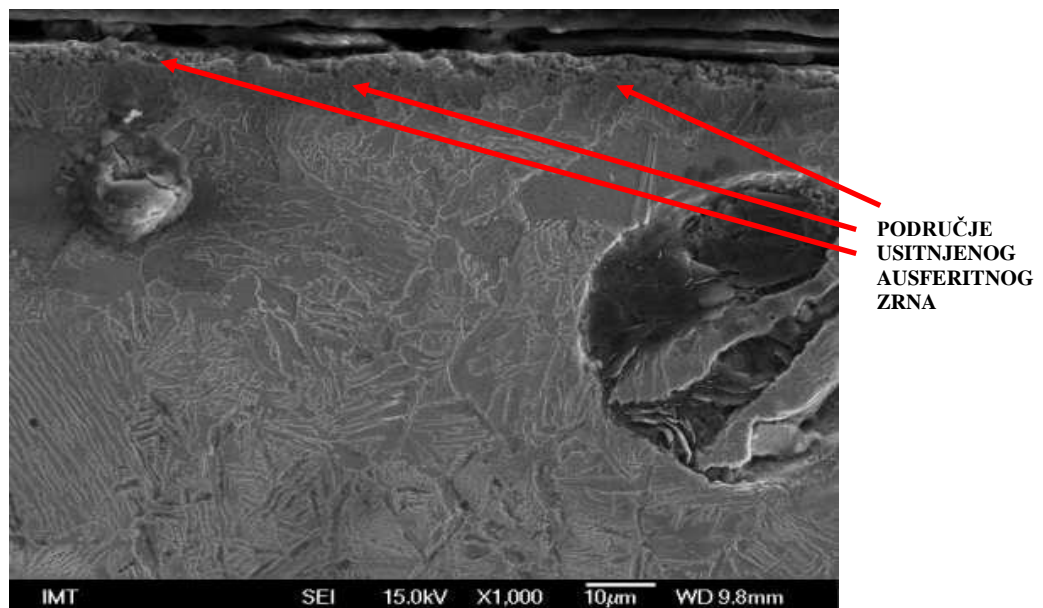
Slika 126: Sredina zuba (5000X)



Slika 127: Sredina zuba (10000X)

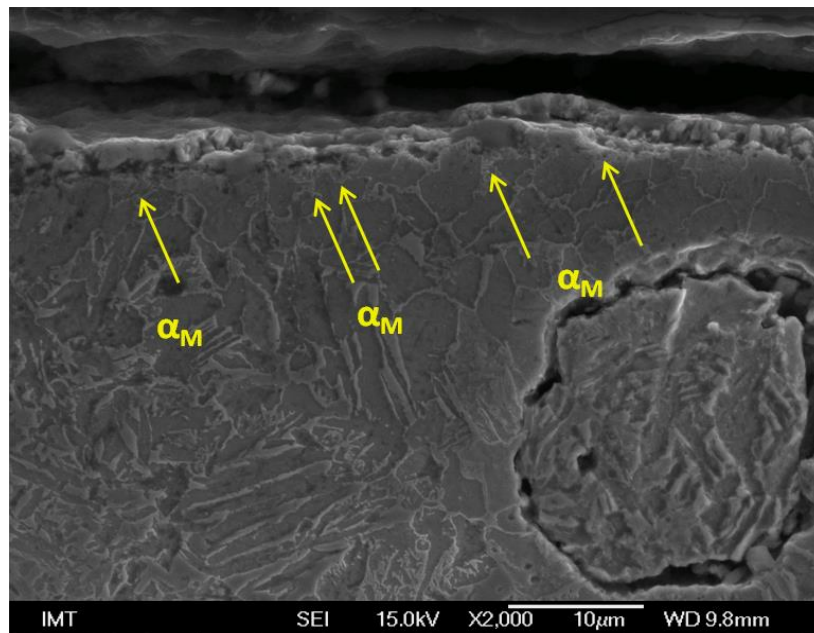
Na slikama 125, 126 i 127 vidljiva je ausferitna struktura tipična za područje izotermičke pretvorbe u području viših temperatura tj. „gornjeg“ bainita. Austenitna zrna (visokouglični stabilizirani austenit) su izbočena, a bainitni ferit je u reljefu (udubine) i tipičnog je izgleda za „gornji“ bainit. Bainitni ferit je paperjastog oblika, što se na FESEM snimcima jasno vidi.

Uzorak ADI 380 K – površina uzorka



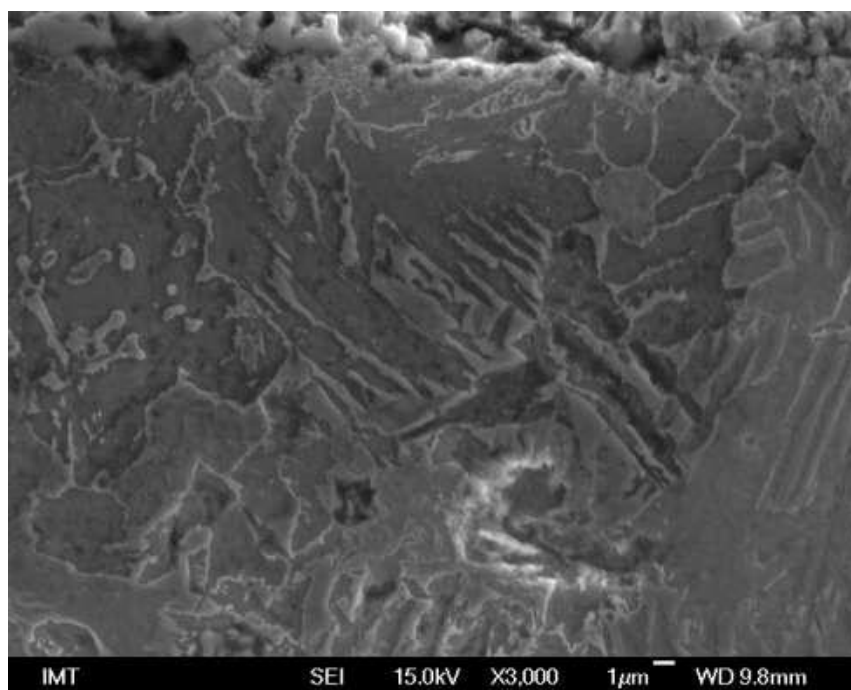
Slika 128: Površina zuba (1000X)

Na slici površina uzorka 128, uz samu površinu do dubine cca 10 μm vidljivo je usitnjenje kristalnih zrna, nastalo kao posljedica kugličarenja.



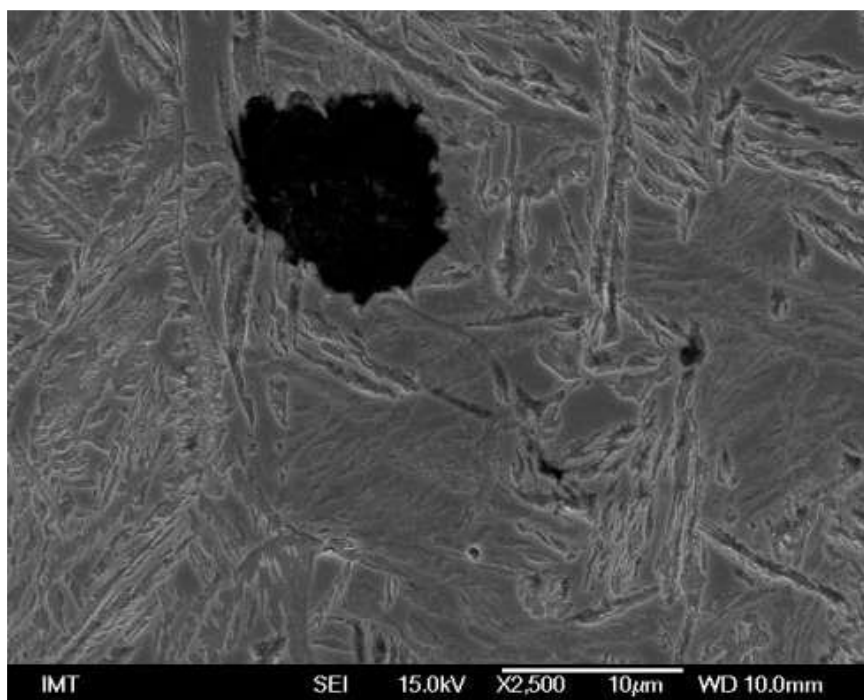
Slika 129: Površina uzorka (2000X)

Na slici 129, u području do dubine od 10 μm opaža se α martenzit nastao uslijed kugličarenja.

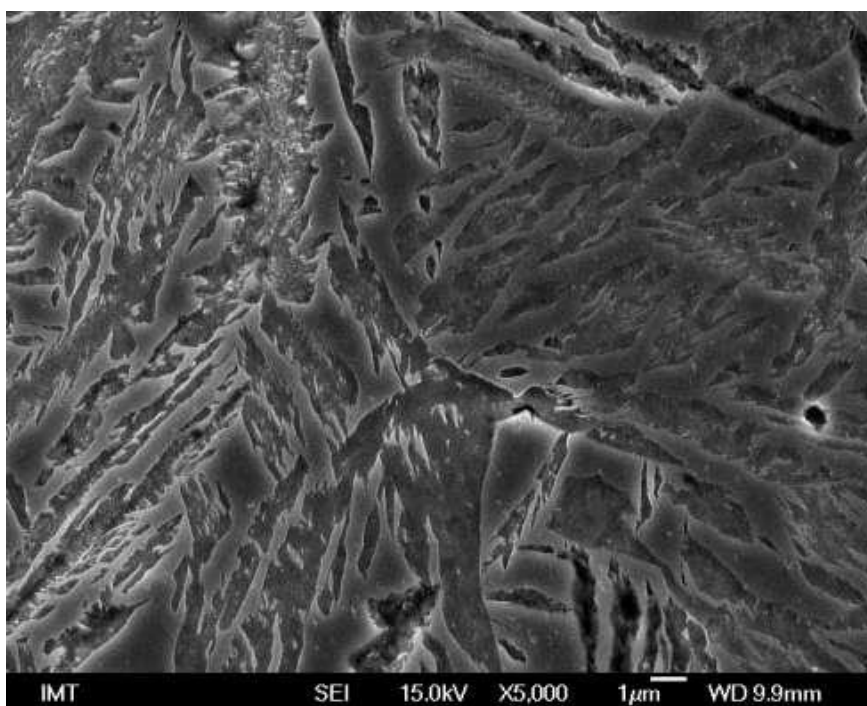


Slika 130: Površina uzorka (3000X)

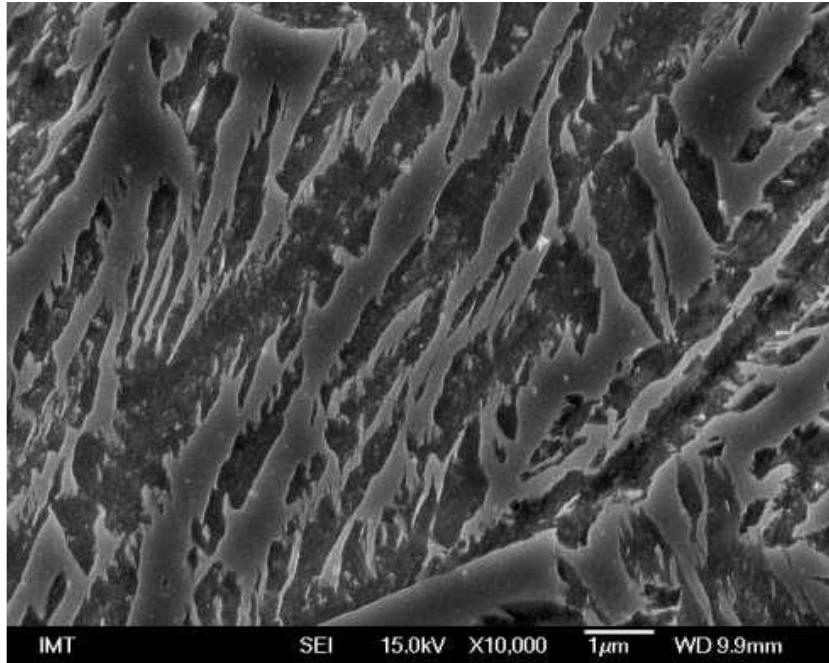
Uzorak ADI 240 K - sredina uzorka



Slika 131: Sredina zuba (2500X)



Slika 132: Sredina zuba (5000X)

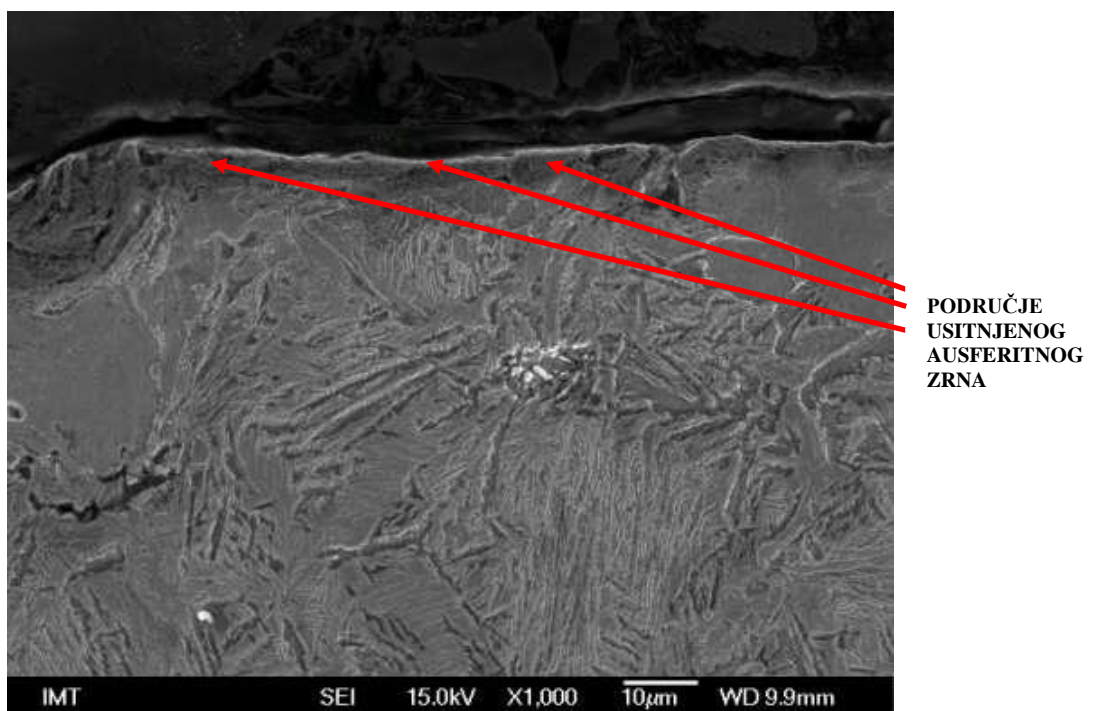


Slika 133: Sredina zuba (10000X)

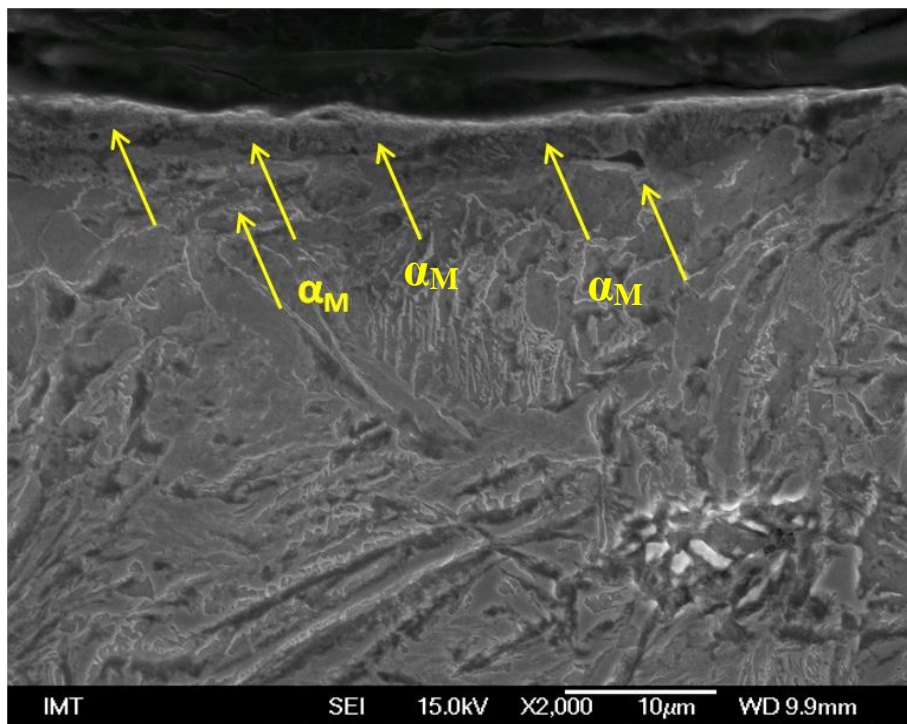
Na slikama 131, 132 i 133 prepoznaje se ausferitna struktura tipična za područje izotermičke pretvorbe u području nižih temperatura tj. „donjeg“ bainita.

Austenitna zrna (visokouglični stabilizirani austenit) su izbočena, a bainitni ferit je u reljefu (udubine).

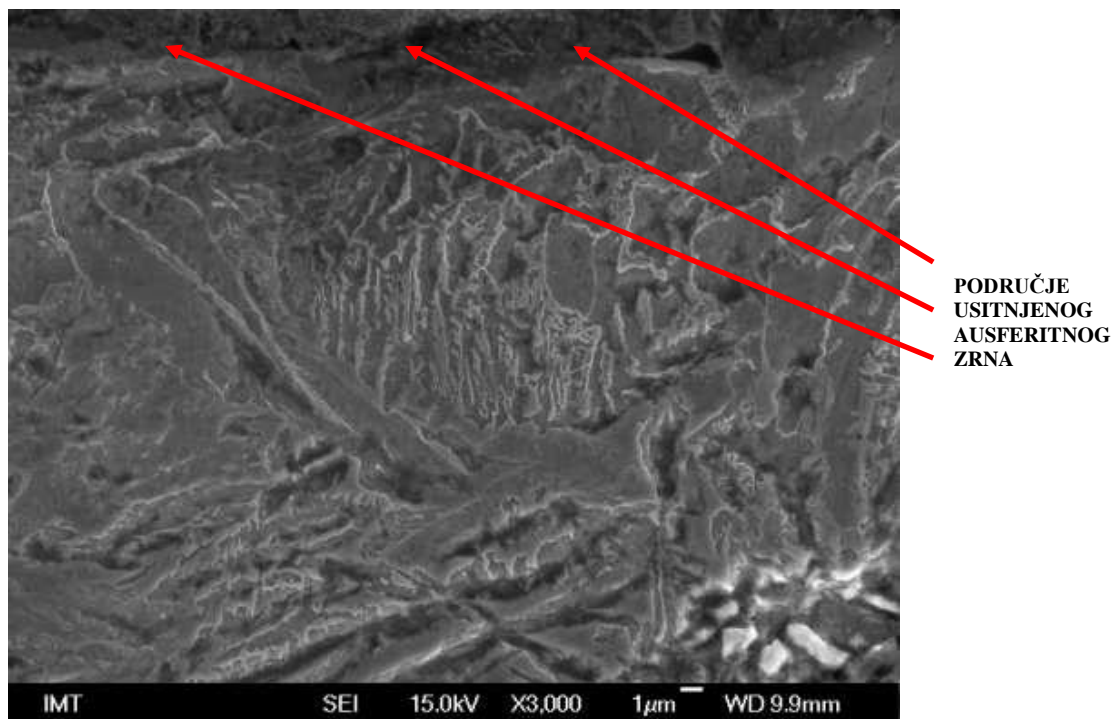
Uzorak ADI 240 K - Površina uzorka



Slika 134: Površina zuba (1000X)



Slika 135: Površina zuba (2000X)



Slika 136: Površina zuba (3000X)

Na slikama 134, 135 i 136 površine uzorka koji je kugličaren, uz samu površinu do dubine cca 10 μm vidljivo je usitnjenje zrna i tečenje materijala uslijed pritiska kuglica. U području do dubine od cca 10 μm opaža se martenzit nastao uslijed kugličarenja, slika 135.

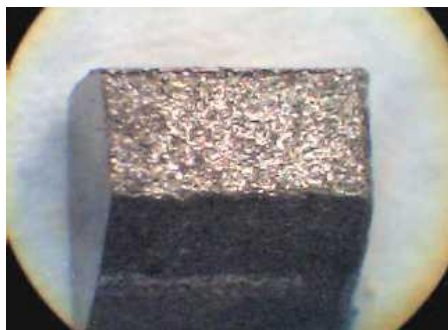
3.4.6.3 XRD analiza

S ciljem određivanja mikrostrukturnih promjena nastalih uslijed kugličarenja rendgenskom difrakcijom ispitani su uzorci ADI 380, ADI 380 K i ADI 240, ADI 240 K.

Informacije iz rendgenograma dobivaju se iz širine difrakcijskih maksimuma, difrakcijskih kutova i njihove visine. Na oblik difrakcijskih maksimuma utječu: unutarne napetosti, defekti u mikrostrukтури, nehomogena razdioba dislokacija u mikrostrukтури, orijentacija kristalnih zrna, itd. Iz difrakcijskih spektara moguće je odrediti distorziju kristalne rešetke, orijentaciju kristalnih zrna, veličinu kristalnih zrna, veličinu mikro deformacije i teksturu [50].

Za snimanje rendgenske difrakcije korišten je difraktometar „Philips PW 1830“, za difrakcijsku analizu praha u laboratoriju Zavoda za opću i analognu kemiju PMF-a u Zagrebu. Snimanje je provedeno u theta-2theta fokusirajućoj geometriji monokromatiziranim Cu zračenjem. Izvor zračenja je Cu anoda, s nazivnom snagom 1.6 kW (napon/struja: 40kV/40mA); odabran je linijski fokus: 0.1x10mm²; korišten je grafitni monokromator (pred detektorskom pukotinom). Detektor je pozicijski osjetljivi brojač koji mjeri intenzitet difraktiranog zračenja u ovisnosti o difrakcijskom kutu.

Na slici 137 prikazana su dva ADI uzorka, kugličareni (a) i nekugličareni (b).



a) kugličareni;



b) nekugličareni

Slika 137: Uzorci pripremljeni za snimanje difraktograma

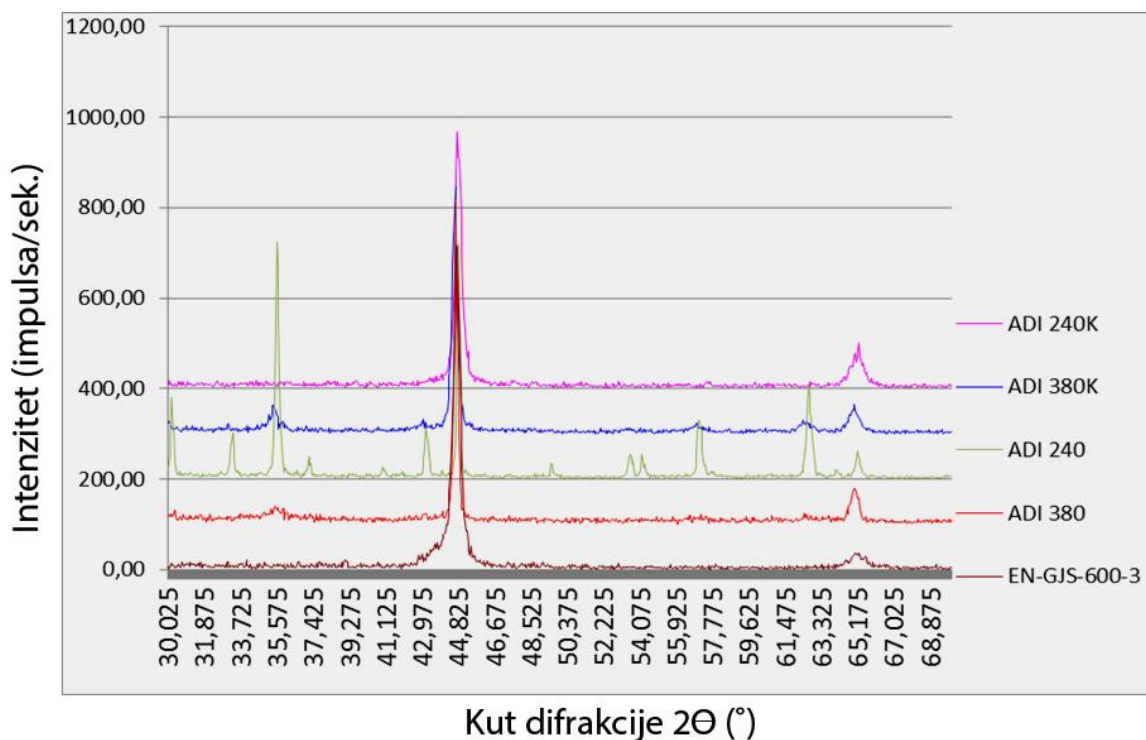
Snimanje difraktograma urađeno je na površini uzoraka.

Procedura snimanja programirana je tako da su za svaki od pet uzoraka, snimljena po dva difraktograma, i to:

- **pregledni difraktogram** - u intervalu $2\Theta = [30^\circ - 70^\circ]$, brzinom $4^\circ/\text{min}$, s ciljem ustanovljavanja prisutnosti i identifikacije prisutnih faza; (slika 138);
- **detaljni difraktogram** - u intervalu $2\Theta = [42.0^\circ - 45.5^\circ]$, brzinom $0.5^\circ/\text{min}$, s ciljem dobivanja podataka za kvantitativni izračun frakcija faza: ferita, austenita, i martenzita ($\alpha\text{-Fe}$, $\gamma\text{-Fe}$, $\alpha'\text{-Fe}$); (slika 139).

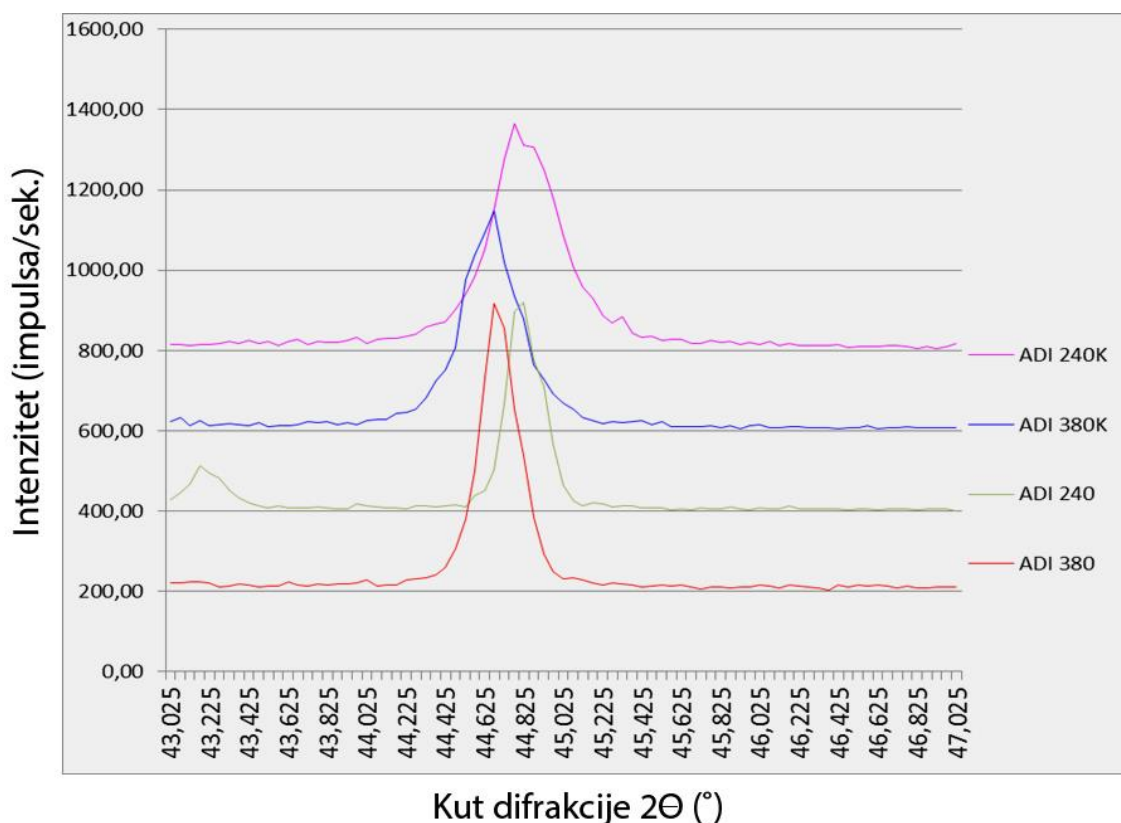
Po snimanju difraktograma provedeno je prepoznavanje faza. Prepoznavanje faznih frakcija temelji se na analizi intenziteta najjačih difrakcijskih linija karakterističnih za pojedine faze [51].

Rezultat rendgenske difrakcije su snimljeni pregledni i detaljni difraktogram. Na preglednom difraktogramu prikazani su snimci krivulja svih pet uzoraka, uključivo i EN-GJS-600-3, slika 138.



Slika 138: Pregledni difraktogram svih pet uzoraka (ADI + EN-GJS-600-3)

Detaljni difraktogram donosi snimke vezane za ADI uzorke, slika 139.



Slika 139: Detaljni difraktogram ADI uzoraka (380, 380K, 240, 240K)

Određena je prisutnost slijedećih faza:

- ferit- α -Fe željezni ljev/čelik ima BCC kristalnu rešetku s parametrom $a(\alpha\text{-Fe}) = 0,285$ nm, pa se najjača difrakcijska linija 110α opaža pod kutom $2\Theta\alpha = 44,80^\circ$;
- austenit- γ -Fe željezni ljev/čelik; ima FCC kristalnu rešetku s parametrom $a(\gamma\text{-Fe}) = 0,345\text{-}0,365$ nm, pa se njena najjača difrakcijska linija 111γ opaža pod kutom $2\Theta\gamma \approx 42,5\text{-}45^\circ$, ovisno o količini uključenog ugljika;
- martenzit- α' -Fe željezni ljev/čelik: $\text{Fe}_{2-x}\text{C}_x$; ima BCT kristalnu rešetku s parametrima koji znatnije variraju ovisno o udjelu uključenog ugljika $a(\alpha'\text{-Fe}) = 0,285$ nm, $c(\alpha'\text{-Fe}) = 0,293\text{-}0,305$ nm, pa se njene najjače difrakcijske linije $101\alpha'$ i $110\alpha'$ opažaju pod difrakcijskim kutovima $2\Theta\alpha \approx 43,5\text{-}45^\circ$.

Izdvojeni difraktogrami zupčanika 380, 380K i 240, 240K prikazani su u poglavlju „Analiza rezultata i diskusija“.

3.5. DRUGI CIKLUS ISPITIVANJA SVOJSTAVA IZOTERMIČKI POBOLJŠANOG NODULARNOG LIJEVA

U drugom ciklusu ispitivanja naglasak je stavljen na ispitivanje otpornosti na abrazijsko i erozijsko trošenje. Izotermičko poboljšavanje uzoraka provedeno je u drugom laboratoriju i u drugoj kupki. Ispitivanjem na abraziju i eroziju pokušalo se utvrditi kako drugačiji/promjenljivi parametri utječu na otpornost trošenju.

3.5.1. Izrada uzoraka za ispitivanje na trošenje

Za prošireno ispitivanje utjecaja različitih medija na trošenje ADI-a, napravljeno je novih 12 uzoraka za ispitivanje na abraziju i 28 uzoraka za ispitivanje na eroziju.

Dimenzije uzoraka:

- za ispitivanje na abrazijsko trošenje: 13x22x73 mm
- za ispitivanje na erozijsko trošenje: 16,5x16,5x16,5 mm

Svi uzorci označeni su kombinacijom brojeva, kako je prikazano u tablici 30.

Tablica 30: Način označavanja uzoraka za prošireno ispitivanje

OZNAKA	INTENZITET KUGLIČARENJA	VRSTA ISPITIVANJA
1/7, 2/7, 3/7, 4/7, 5/7, 6/7, 7/7	„1,19 A“	erozija
1/7, 2/7, 3/7, 4/7		abrazija
1/6, 2/6, 3/6, 4/5/6, 6/6, 7/6	„1,04 A“	erozija
1/6, 2/6, 3/6, 4/6		abrazija
1/5, 2/5, 3/5, 4/5, 5/5, 6/5, 7/5	„0,94 A“	erozija
1/5, 2/5, 3/5, 4/5		abrazija
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	nekugličareno	erozija

3.5.2. Izotermičko poboljšavanje

U drugom ciklusu izotermičkog poboljšavanja, poboljšani su uzorci za ispitivanje na trošenje abrazijom i erozijom s više različitih medija.

Izotermička obrada je napravljena u Laboratoriju za toplinsku obradu Zavoda za proizvodno strojarstvo, Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu, slika 140.



Slika 140: Kada s kupkom, uzorci nakon ADI postupka, peć

Uzorci (28 kom. za ispitivanje na eroziju i 12 kom. za ispitivanje na abraziju) su posloženi u košaru koja je stavljena u peć. Prije unosa uzoraka u peć, temperatura peći je bila 900°C. Po unosu košarice s uzorcima u peć, temperatura peći je pala na 780°C. Pričekalo se 20 min. da temperatura peći ponovo naraste na 900°C i od tad se mjerilo vrijeme od jednog sata.

Nakon što su uzorci proveli jedan sat u peći na temperaturi od 900°C izvađeni su i uronjeni u solnu kupku AS 140, čija je temperatura bila 240°C. Solna kupka AS 140 ima širok raspon radne temperature (160 °C - 550 °C), brzo provodi toplinu i nije zapaljiva.

Nakon uranjanja košarice s uzorcima u solnu kupku, temperatura iste je porasla za 50-ak°C. Uzorci su zadržani u kupki jedan sat.

Nakon jednog sata provedenog u kupki, košarica s uzorcima je izvađena i hlađenje je nastavljeno na zraku do sobne temperature, slika 141.



Slika 141: Košarica s uzorcima nakon vađenja iz solne kupke

Kad su se ohladili na sobnu temperaturu, uzorci su stavljeni u kantu s vodom kako bi se s njih otopila zaostala sol.

3.5.3. Kugličarenje

U drugom ciklusu ispitivanja, kugličareni su uzorci za ispitivanje na trošenje abrazijom i erozijom, prethodno izotermički poboljšani.

Nakon provedenog umjeravanja uređaja za kugličarenje i određivanja Almen intenziteta "1,32 A", "1,11 A" i "0,99 A" pri tlakovima 8 bar, 6,5 bar i 5 bar u prvom ciklusu ispitivanja, za prošireno ispitivanje utvrđen je radni tlak od 7 bar, kao najveći tlak pri kojem će biti kugličareni uzorci za ispitivanje trošenja na abraziju i eroziju. Pri tlaku od 8 bar utrošak zraka i medija za kugličarenje znatno je veći od onog pri 7 bar, što je tehnički zahtjevnije.

Prilikom kugličarenja tlak na ulazu u napravu za kugličarenje, padne za određeni iznos, što ovisi o kapacitetu kompresora i pripadajućeg mu spremnika. U drugom ciklusu ispitivanja to je bio ograničavajući faktor, jer je kapacitet kompresora za napajanje naprave bio manji od onog kod ispitivanja u prvom ciklusu.

Da bi se postigao tlak od 7 bar (kontinuirani - radni tlak), tlak na ulazu u uređaj trebao je biti min. 7,6 bar (slika 142).



Slika 142: Manometar na ulazu u napravu za kugličarenje

Kod ulaznog tlaka od 6 bar, pri kugličarenju ostvaren je pad od 0,4 bar, što znači da je kontinuirani radni tlak bio 5,6 bar. Za ulazni tlak od 5 bar, pad tlaka je bio 0,3 bar, odnosno ostvaren je radni tlak od 4,7 bar.

Na temelju podataka iz laboratorijskog umjeravanja uređaja za kugličarenje, odnosno određivanja intenziteta kugličarenja iz prvog ciklusa ispitivanja, u svrhu određivanja novih intenziteta kugličarenja, napravljena je statističkom metodom regresijska analiza. Cilj te analize bio je pronaći aritmetičko-matematički oblik veze između jedne ovisne (traženi intenzitet) i jedne neovisne varijable (tlak, bar). Tom analizom određeni su za tlakove 7, 5,6 i 4,7 bar, novi intenziteti kugličarenja, i to prema dobivenoj formuli iz statističkog programa SPSS:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X \quad (3.2)$$

y – zavisna varijabla, u ovom slučaju traženi intenzitet

β_0 – konstantni član

β_1 – regresijski koeficijent, prikazuje promjenu zavisne varijable kada nezavisna poraste za jednu jedinicu

X – nezavisna varijabla, u ovom slučaju – tlak (bar)

Prema gornjoj formuli i podacima iz preliminarnog umjeravanja, izračunat je intenzitet kugličarenja za nove tlakove, dok je vrijeme/trajanje kugličarenja ostalo isto, 60 sekundi.

$$\text{Intenzitet} = 0,425 + 0,11 \times \text{bar} \quad (3.3)$$

Slijedom prethodno navedenom proizašli su sljedeći rezultati:

Tlak	Vrijeme	Almen intenzitet
7 bar	60 s	"1,19 A"
5,6 bar	60 s	"1,04 A"
4,7 bar	60 s	"0,94 A"

3.5.4. Ispitivanje površinske tvrdoće kugličarenih uzoraka

Obzirom da su uzorci za prošireno ispitivanje otpornosti na trošenje abrazijom i erozijom izotermički poboljšani u drugom ciklusu toplinske obrade, odnosno u drugoj solnoj kupki, Rockwell metodom ispitana je tvrdoća ADI 240 (nekugličareno – kugličareno), na tri uzorka. Ispitivanje je provedeno u laboratoriju Zavoda za strojarску tehnologiju Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu. Ispitana je, Rockwell postupkom, tvrdoća na dva uzorka za eroziju i dvostrano na jednom uzorku za trošenje na abraziju, slika 143.



Slika 143: Uzorci na kojima je ispitana tvrdoća

Mjerenje tvrdoće je obavljeno na tvrdomjeru Wolpert, slika 144.



Slika 144: Tvrdomjer Wolpert

Utvrđena je srednja vrijednost tvrdoće nekugličarenih uzoraka - 35,2 HRC, tablica 31.

Tablica 31: Površinska tvrdoća nekugličarenih uzoraka za ispitivanje otpornosti na trošenje ADI 240

	Uzorak za ispitivanje na abrazijsko trošenje	Uzorak za ispitivanje na erozijsko trošenje		
Uzorak br.	2/7	6/7	3/5	\bar{x}
Tvrdoća, \bar{x} (HRC)	34,1	35,4	36,1	35,2

Nakon kugličarenja uzoraka ADI 240 s dva različita intenziteta ("1,19 A"; "0,94 A") na istim uzorcima ponovo je izmjerena površinska tvrdoća. Srednje vrijednosti prikazane su u tablici 32.

Tablica 32: Srednje vrijednosti površinske tvrdoće kugličarenih uzoraka ADI 240

	Uzorak za ispitivanje na abrazijsko trošenje	Uzorak za ispitivanje na erozijsko trošenje	
Uzorak br.	2/7	6/7	3/5
Intenzitet (tlak)	"1,19 A"	"1,19 A"	"0,94 A"
Tvrdoća, \bar{x} (HRC)	39,6	38,3	37,8

Prikaz svih izmjera tvrdoće ADI 240 i ADI 240 K dat je u prilogu br. 15.

3.5.5. Mikrotvrdoća kugličarenog sloja

U proširenom istraživanju, mjerenje mikro tvrdoće je provedeno na uzorcima za abraziju i eroziju, izotermički poboljšanim na 240°C, u drugom ciklusu toplinske obrade.

Mjerenje je obavljeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje sveučilišta u Zagrebu, na mikro tvrdomjeru PMT-2, slika 145. Korištena je metoda mjerenja po Vickersu HV0,05 (opterećenje 50 g).



Slika 145: Mikro tvrdomjer PMT-2

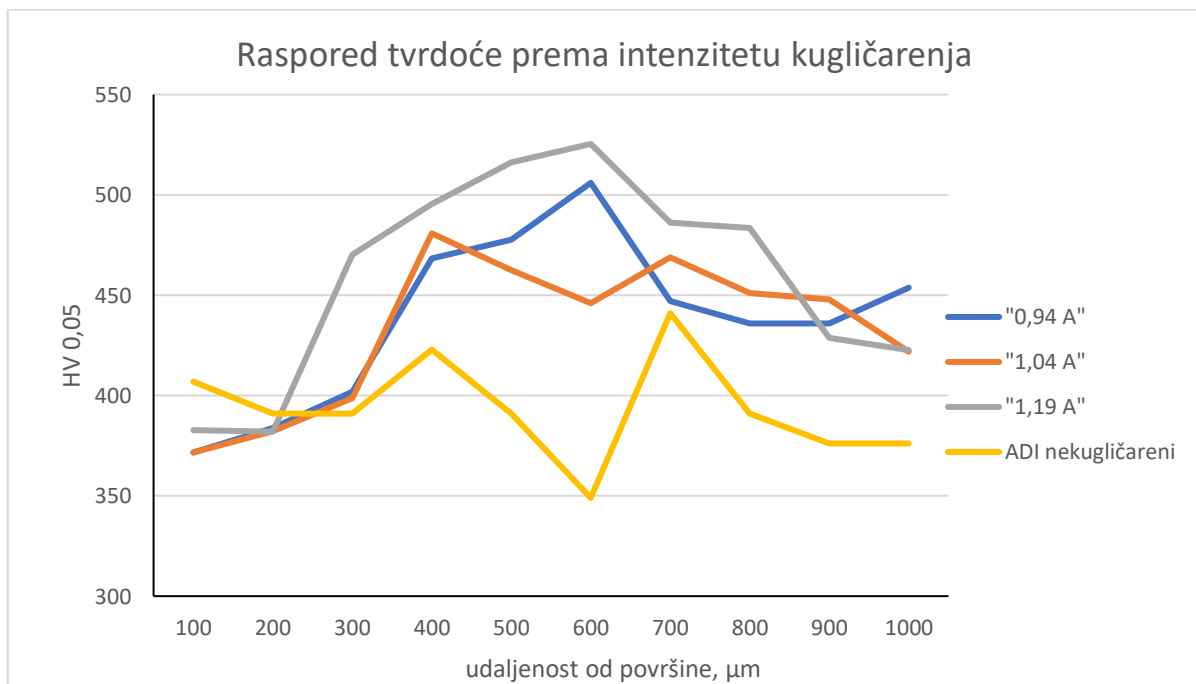
Mjerenje mikrotvrdoće ADI 240 učinjeno je na uzorcima kugličarenim s tri različita intenziteta. Radi usporedbe, učinjeno je i mjerenje na jednom nekugličarenom uzorku (po jedno mjerenje svakih 100 μm). Rezultati se vide u tablici 33.

Tablica 33: Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku kugličarenog i nekugličarenog ADI 240

Udaljenost od površine [μm]	„0,94 A“ HV 0,05	„1,04A“ HV 0,05	„1,19 A“ HV 0,05	ADI - nekugličareni
100	372	372	383	407
200	384	382	382	391
300	402	399	470	391
400	468	481	495	423
500	478	462	516	391
600	506	446	525	349
700	447	469	486	441
800	436	451	483	391
900	436	448	429	376
1000	454	422	423	376

Prikaz svih izmjera dat je u prilogu 16.

Slika 146 daje dijagramski prikaz rezultata iz tablice 10.



Slika 146: Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku uzoraka ADI 240 KI ADI 240

3.5.6. Otpornost na abrazijsko trošenje ADI 240 K i ADI 240

S ciljem utvrđivanja utjecaja različitih abraziva na trošenje ADI 240 kugličarenog različitim intenzitetom i nekugličarenog, provedena su opširnija ispitivanja.

Kugličareni uzorci nisu mehanički obrađeni nakon toplinske obrade. Njihova površina je ostala onakva kakva je bila nakon vađenja iz solne kupke i pranja vodom.

U svrhu abradiranja površine uzoraka korišteni su sljedeći mediji:

kvarcni pijesak SiO₂ granulacije 0,25-0,50 mm - SiO₂ - veliki

kvarcni pijesak SiO₂ granulacije 0,15-0,25 mm - SiO₂ - mali

aluminijev oksid Al₂O₃ granulacije 0,063-0,2 mm - Al₂O₃

Svi rezultati gubitka mase prikazani u nastavku predstavljaju srednje vrijednosti tri mjerenja provedena pri jednakim uvjetima.

3.5.6.1 Abrazija ADI 240 K --- SiO₂ - veliki

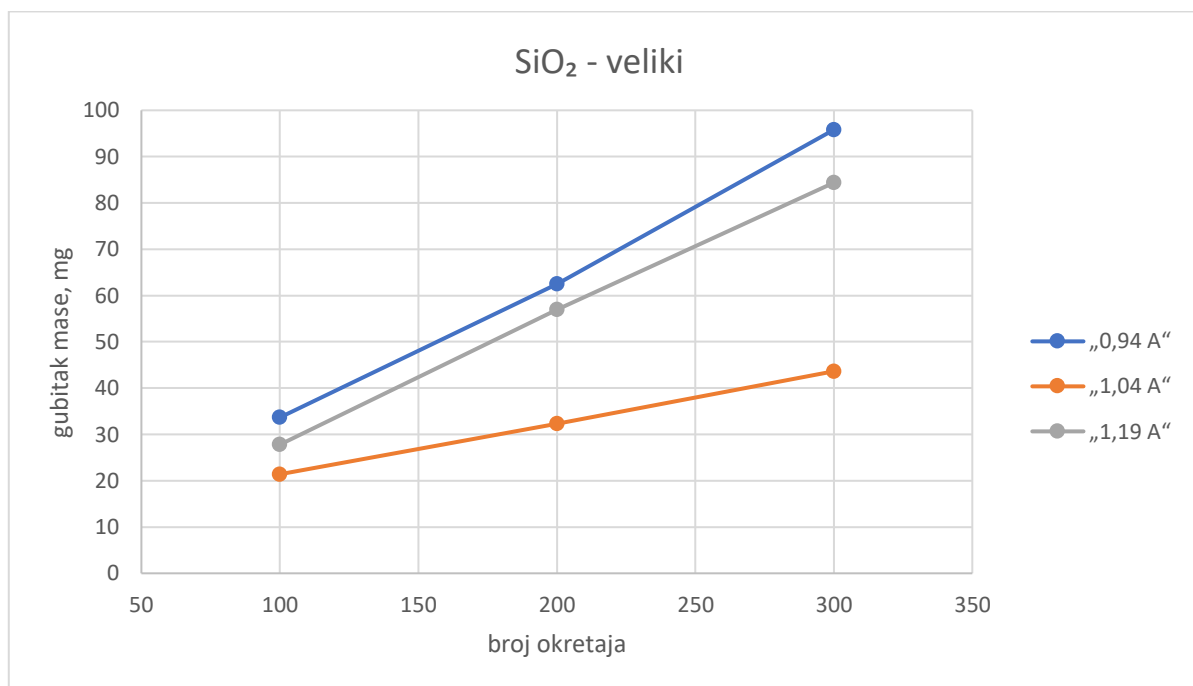
Tablica 34 daje prikaz gubitka mase uzorka ADI 240 kugličarenih različitim intenzitetom, uslijed abrazivnog djelovanja SiO₂ – veliki. Masa uzorka izmjerena je nakon svakih 100 okretaja, do 300 okretaja gumenog kotača.

Tablica 34: Gubitak mase ADI 240 K uslijed abrazije abrazivom oznake SiO₂ - veliki

SiO ₂ – veliki, gubitak mase u mg			
Broj okretaja	„0,94 A“	„1,04 A“	„1,19 A“
100	33,6667	21,4000	27,8000
200	62,4667	32,3333	57,0000
300	95,8000	43,6333	84,3667

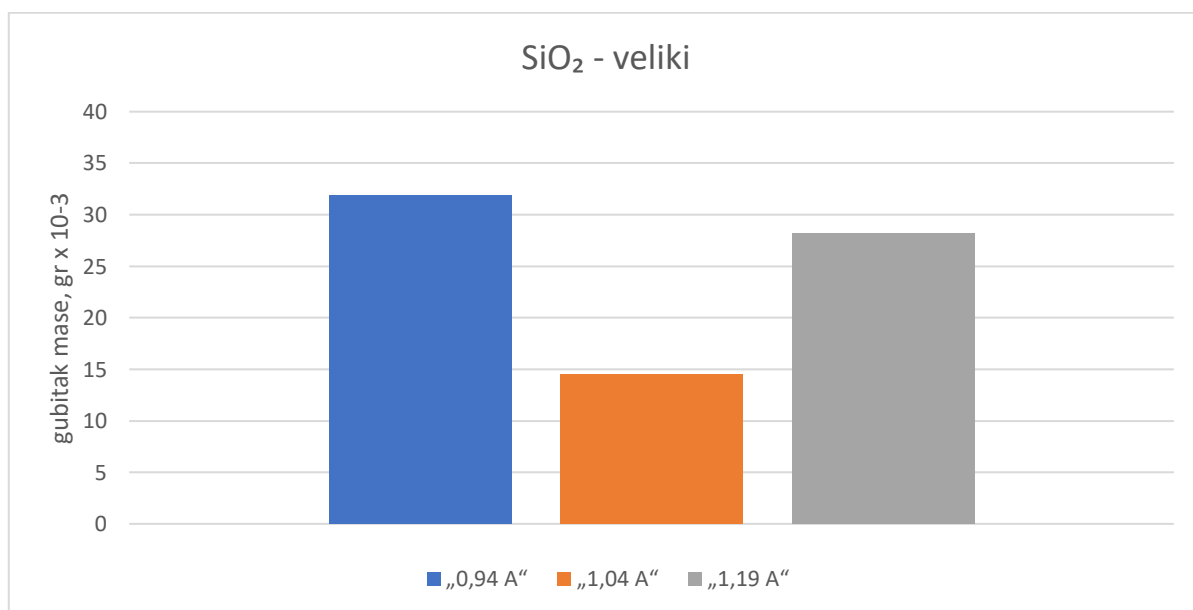
Rezultati svih izmjera prikazani su u prilogu 17.

Slika 147 prikazuje kumulativni gubitak mase ADI 240 K nakon svakih 100 okretaja.



Slika 147: Kumulativni gubitak mase ADI 240 K uslijed abrazije abrazivom oznake SiO_2 – veliki

Na slici 148 vidi se grafički prikaz prosječnog gubitka mase ADI 240 K za sva tri ciklusa od 100 okretaja.



Slika 148: Prosjek gubitka mase ADI 240 K za sva tri ciklusa abrazije abrazivom oznake SiO_2 - veliki

3.5.6.2 Abrazija ADI 240 K – SiO₂ - mali

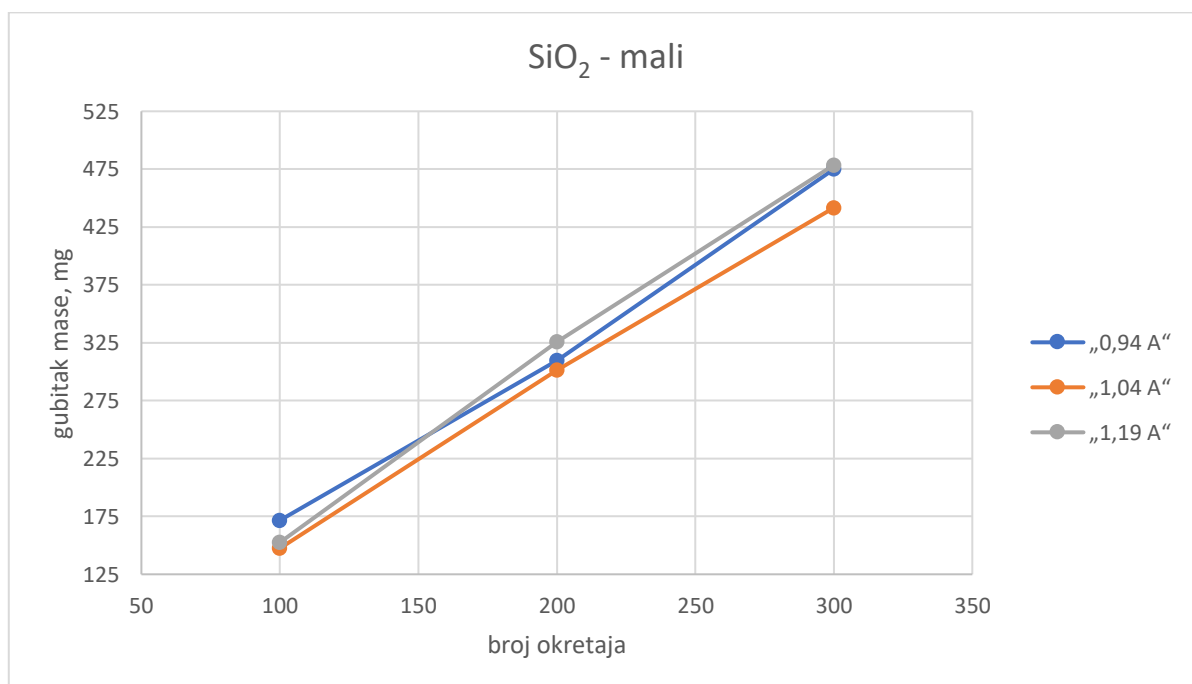
Tablica 35 daje prikaz gubitka mase uzoraka ADI 240 kugličarenih različitim intenzitetom, zbog abrazivnog djelovanja SiO₂ – mali.

Tablica 35: Gubitak mase ADI 240 K uslijed abrazije abrazivom oznake SiO₂ - mali

SiO ₂ – mali, gubitak mase u mg			
Broj okretaja	„0,94 A“	„1,04 A“	„1,19 A“
100	171,6000	147,4667	152,5000
200	309,6667	301,3333	325,9333
300	475,0000	441,6500	478,5333

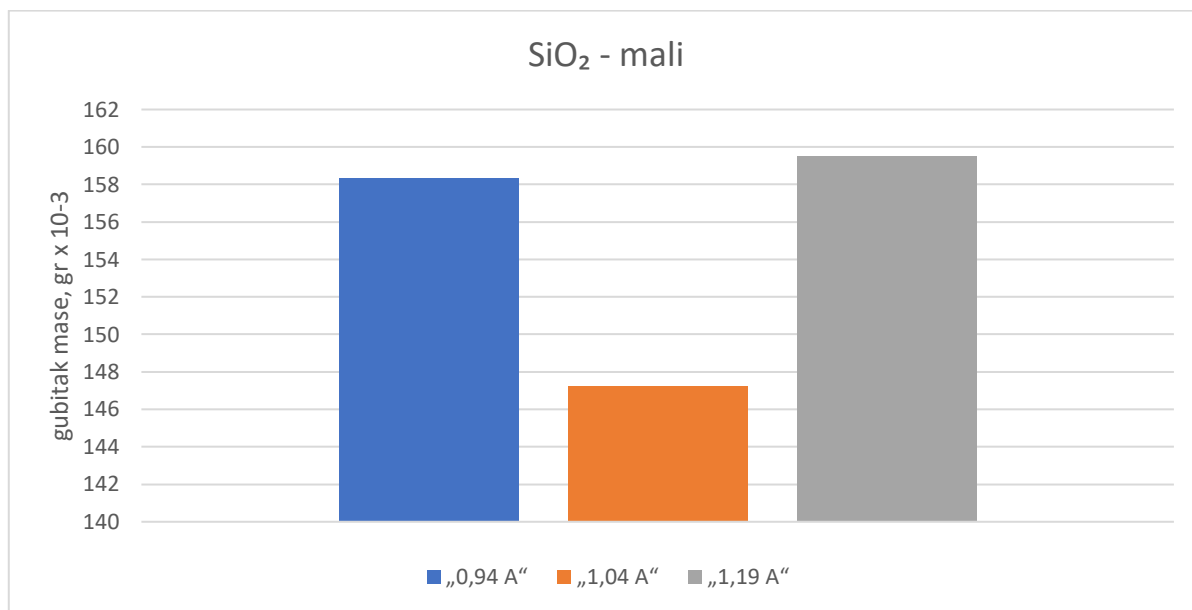
Rezultati svih ispitivanja dati su u prilogu 18.

Slika 149 prikazuje kumulativni gubitak mase ADI 240 K nakon 3 x 100 okretaja.



Slika 149: Kumulativni gubitak mase ADI 240 K uslijed abrazije abrazivom oznake SiO₂ – mali

Slika 150 daje grafički prikaz prosječnog gubitka mase ADI 240 K za sva tri ciklusa od 100 okretaja.



Slika 150: Prosjek gubitka mase ADI 240 K za sva tri ciklusa abrazije abrazivom oznake SiO₂ - mali

3.5.6.3 Abrazija ADI 240 K - Al₂O₃

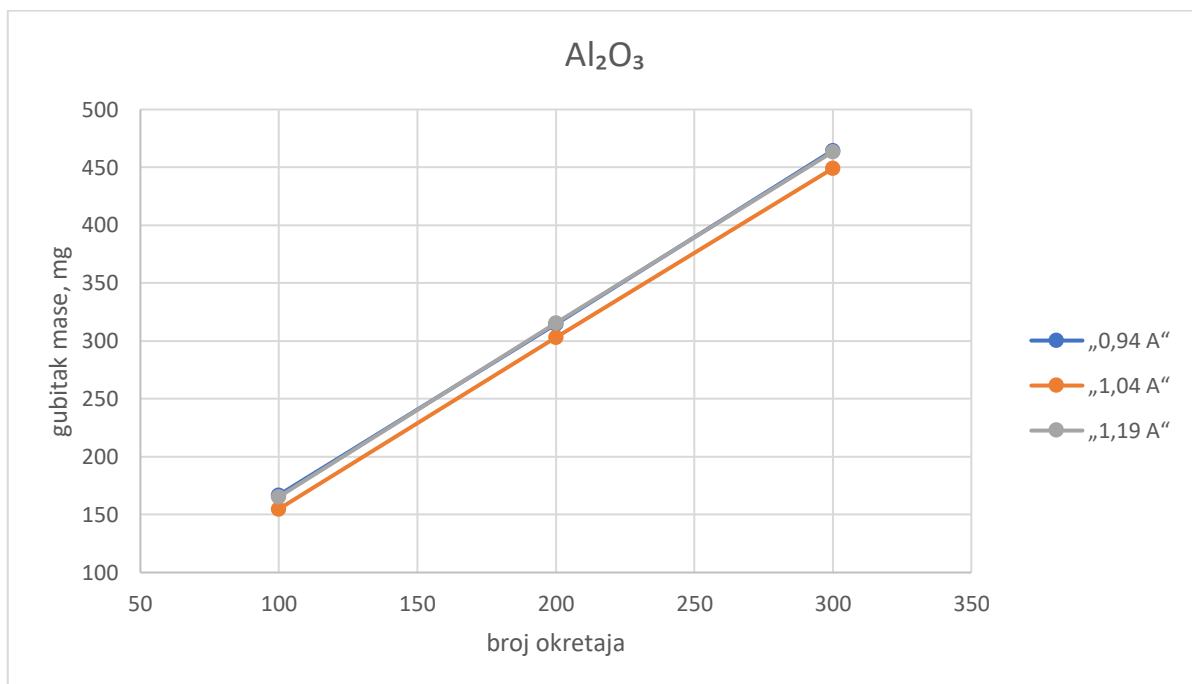
Tablica 36 daje prikaz gubitka mase uzorka ADI 240 kugličarenih različitim intenzitetom, zbog abrazivnog djelovanja Al₂O₃.

Tablica 36: Gubitak mase ADI 240 K uslijed abrazije abrazivom oznake Al₂O₃

Al ₂ O ₃ , gubitak mase u mg			
Broj okretaja	„0,94 A“	„1,04 A“	„1,19 A“
100	167,0000	154,9000	165,3667
200	314,7667	303,0667	315,7333
300	464,6667	449,1333	463,4667

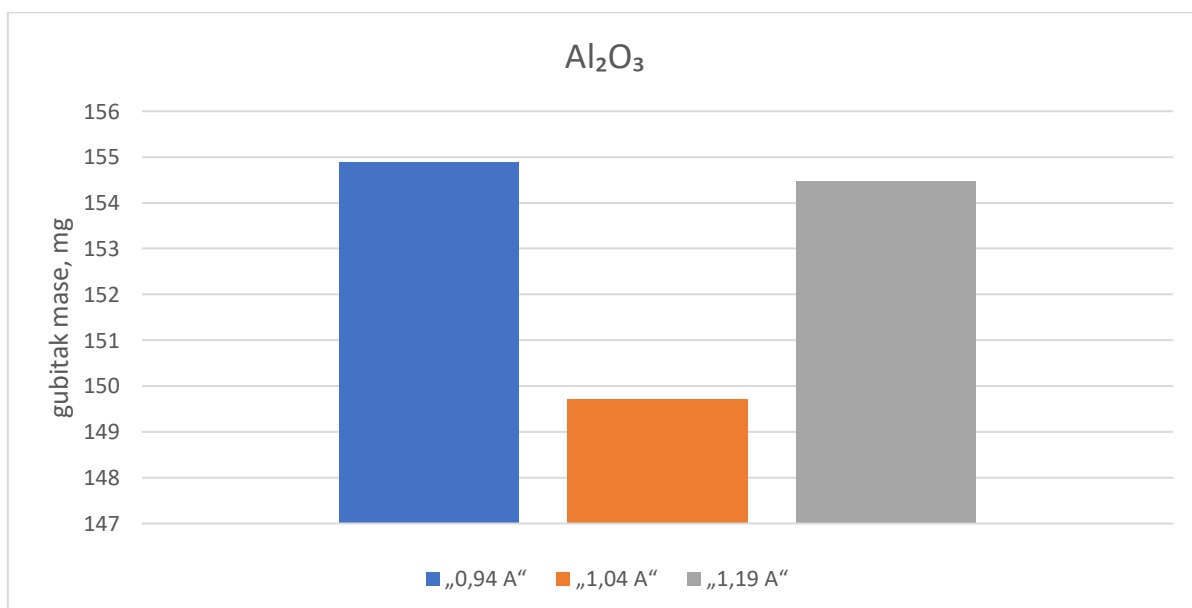
Rezultati svih ispitivanja navedeni su u prilogu 19.

Slika 151 prikazuje dijagram kumulativnog gubitka mase ADI 240 K nakon svakih 100 okretaja.



Slika 151: Kumulativni gubitak mase ADI 240 K uslijed abrazije abrazivom oznake Al_2O_3

Slika 152 daje grafički prikaz prosječnog gubitka mase ADI 240 K za sva tri ciklusa.



Slika 152: Prosječan gubitak mase ADI 240 K za sva tri ciklusa abrazije abrazivom oznake Al_2O_3

3.5.6.4 Abrazija različitim abrazivima nekugličarenih, površinski neobrađenih uzoraka ADI 240

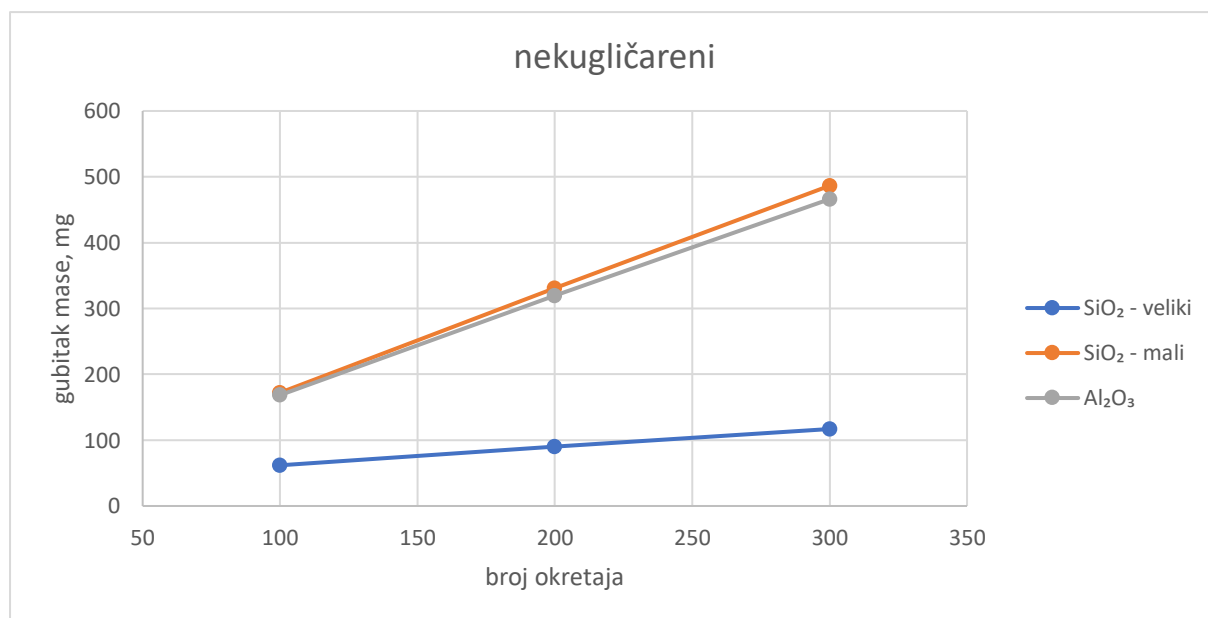
Tablica 37 daje prikaz gubitka mase nekugličarenih, površinski neobrađenih uzoraka ADI 240, uslijed abrazivnog djelovanja različitih abraziva. Nakon izotermičkog poboljšavanja površina ovih uzoraka nije mehanički obrađena. Mjerenje je rađeno svakih 100 okretaja, do konačnog broja od 300 okretaja gumenog kotača.

Tablica 37: Gubitak mase površinski neobrađenih uzoraka ADI 240 uslijed abrazije različitim abrazivima

nekugličareni, gubitak mase u mg			
Broj okretaja	SiO ₂ - veliki	SiO ₂ - mali	Al ₂ O ₃
100	61,8333	172,1333	168,4333
200	90,2333	330,4333	319,2667
300	116,9333	486,5000	466,1667

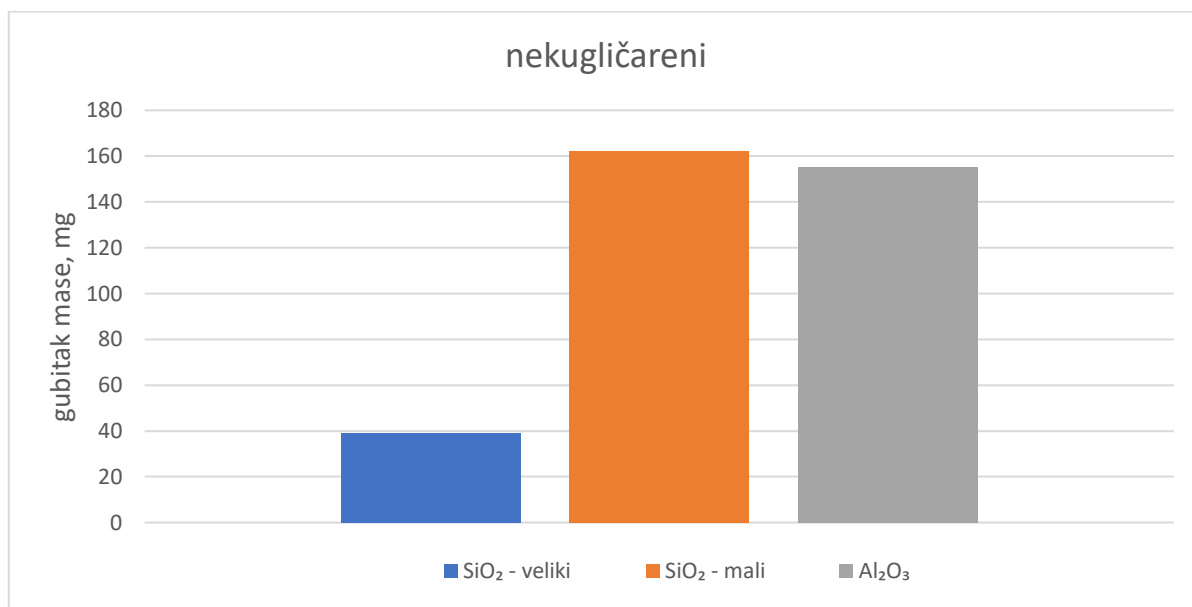
Rezultati svih ispitivanja navedeni su u prilogu 20.

Slika 153 prikazuje dijagram kumulativnog gubitka mase mehanički neobrađenih uzoraka ADI 240, za svaki abraziv za svakih 100 okretaja.



Slika 153: Kumulativni gubitak mase nekugličarenog ADI 240, mehanički neobrađenog

Slika 154 prikazuje prosječan gubitak mase ADI 240 za sva tri ciklusa (100, 200 i 300 okretaja).



Slika 154: Prosjek gubitka mase ADI 240 za sva tri ciklusa abrazije različitim abrazivima

3.5.6.5 Abrazija različitim abrazivima nekugličarenih, površinski obrađenih uzoraka ADI 240

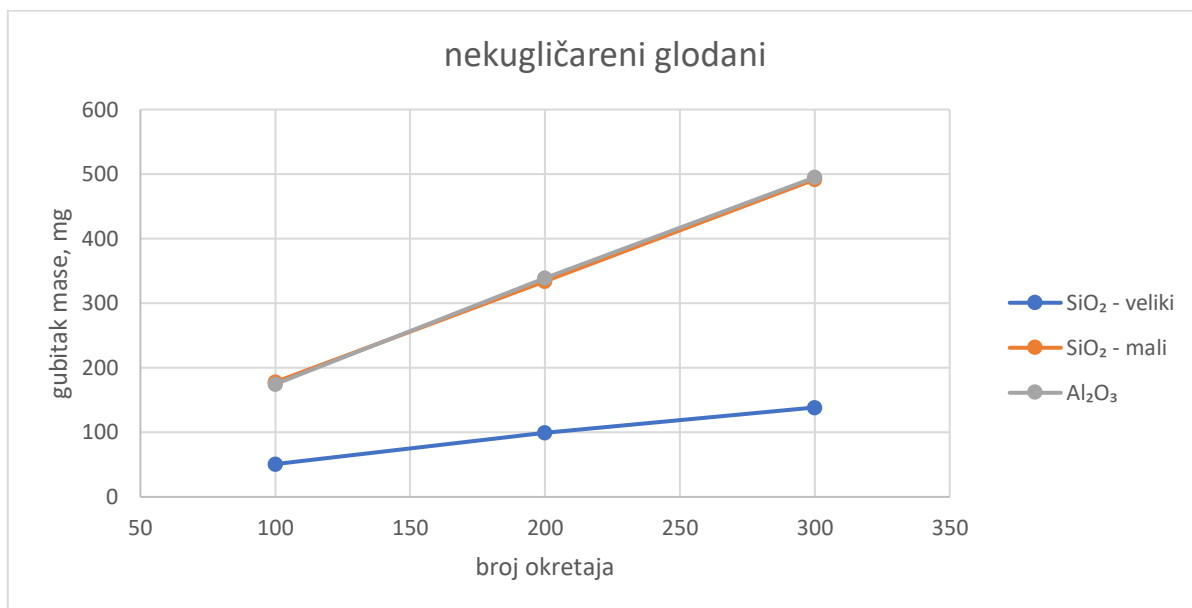
Tablica 38 daje prikaz gubitka mase nekugličarenih, površinskim glodanjem obrađenih uzoraka ADI 240, uslijed abrazivnog djelovanja različitih abraziva. Nakon izotermičkog poboljšavanja površina ovih uzoraka je mehanički obrađena.

Tablica 38: Gubitak mase mehanički obrađenog ADI 240 uslijed abrazije različitim abrazivima

nekugličareni glodani, gubitak mase u mg			
Broj okretaja	SiO ₂ - veliki	SiO ₂ - mali	Al ₂ O ₃
100	50,8667	177,9667	174,6667
200	99,2667	333,9000	338,8667
300	138,5333	491,6667	494,8667

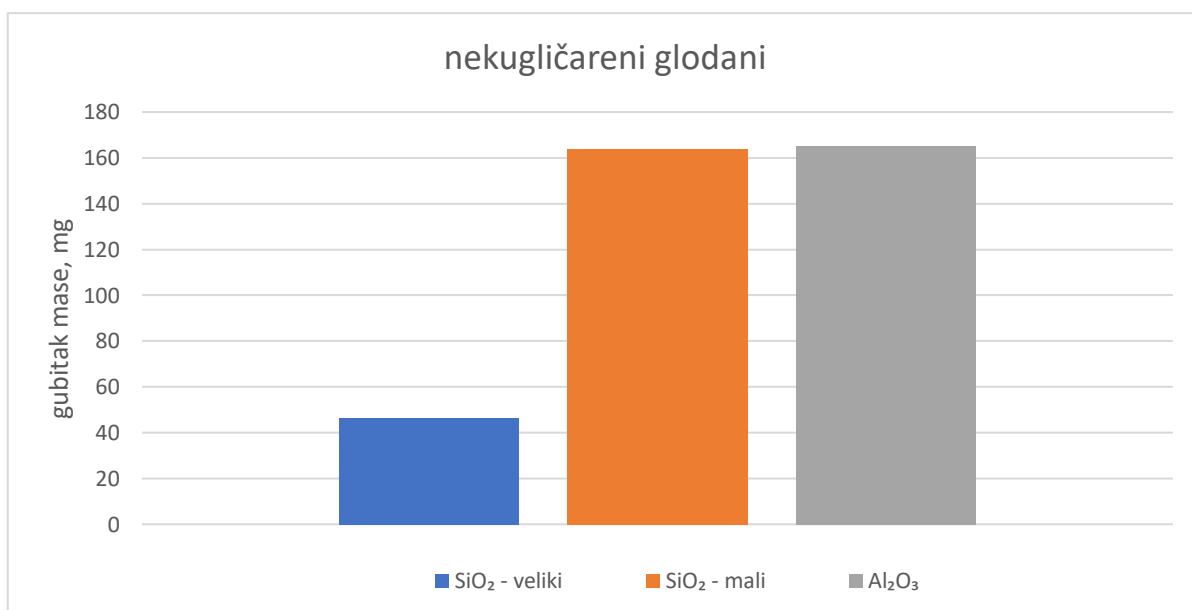
Rezultati svih ispitivanja navedeni su u prilogu 21.

Slika 155 prikazuje dijagram kumulativnog gubitka mase mehanički obrađenih uzoraka ADI 240, za svaki abraziv za svakih 100 okretaja.



Slika 155: Kumulativni gubitak mase nekugličarenog ADI 240, mehanički obrađenog

Slika 156 prikazuje prosječan gubitak mase ADI 240 za sva tri ciklusa (100, 200 i 300 okretaja)



Slika 156: Prosječan gubitak mase ADI 240, za tri ciklusa abrazije različitim abrazivima

Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje nekugličarenih uzoraka nisu u potpunosti usporedivi s kugličarenim uzorcima te zbog toga nisu prikazani u istim dijagramima.

Nekugličareni, površinski neobrađeni uzorci na površini sadrže okside koji utječu na rezultate ispitivanja. S druge strane nekugličareni uzorci koji su naknadno obrađeni glodanjem, imaju manju hrapavost ($R_a = 4 \text{ mm}$) od kugličarenih uzoraka ($R_a = 6,0 - 6,5 \text{ mm}$).

U svim ispitivanim slučajevima, otpornost na abrazijsko trošenje kugličarenih uzoraka je veća nego nekugličarenih uzoraka (ovisno o broju okretaja od 18 % do 69 % za uzorke abradirane sa SiO_2 -veliki, 1 % do 17 % za SiO_2 – mali te 1 % do 11 % za Al_2O_3).

3.5.6.6 Abrazija različitim abrazivima, različitim intenzitetom kugličarenih uzoraka ADI 240

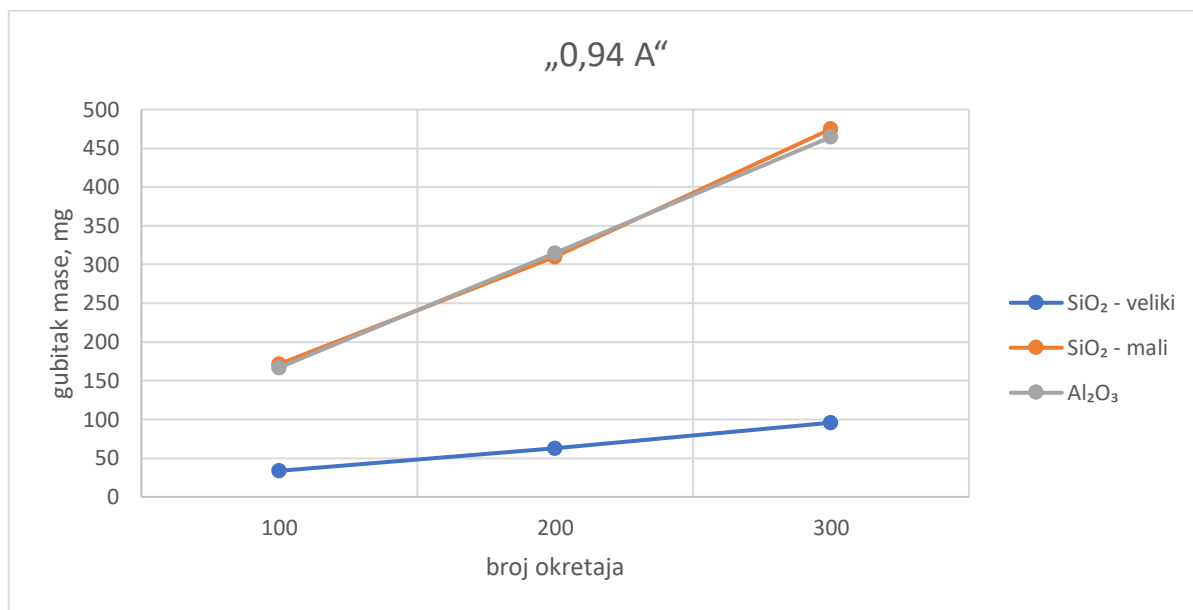
U nastavku je dat prikaz gubitaka mase uzoraka ADI 240 kugličarenih različitim intenzitetima, uslijed abrazijskog djelovanja više abraziva, tablica 39. Mjerenje je rađeno svakih 100 okretaja, do konačnog broja od 300 okretaja gumenog kotača.

Tablica 39: Gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“) uslijed abrazije različitim abrazivima

Intenzitet „0,94 A“, gubitak mase u mg			
Broj okretaja	SiO_2 - veliki	SiO_2 - mali	Al_2O_3
100	33,6667	171,6000	167,0000
200	62,4667	309,6667	314,7667
300	95,8000	475,0000	464,6667

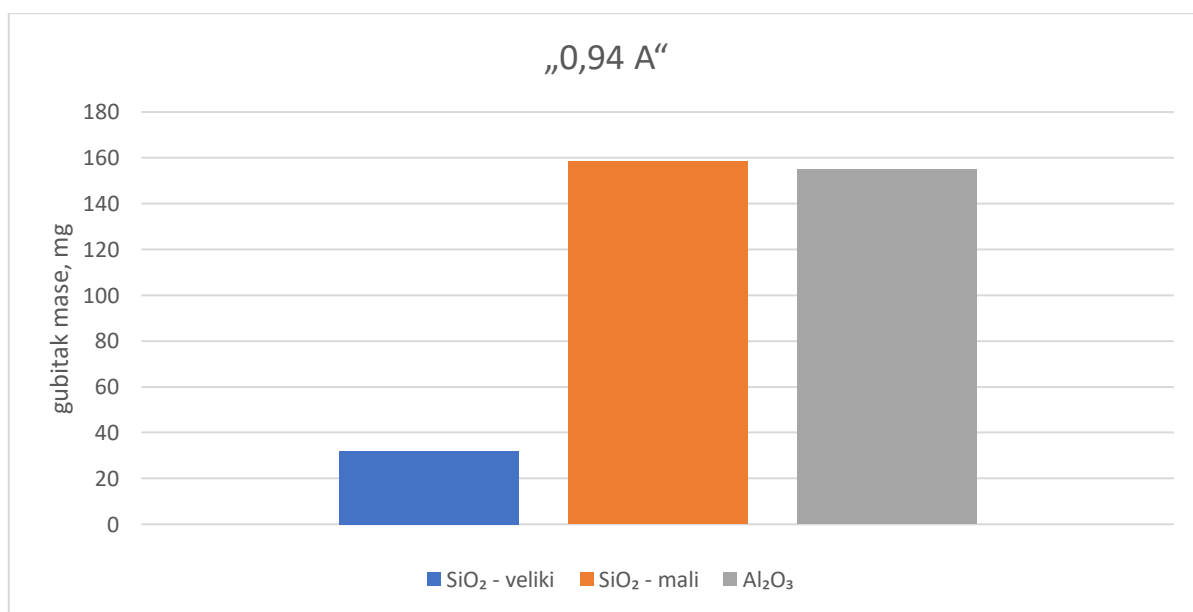
Rezultati svih izmjera navedeni su u prilogu 17,18,19.

Slika 157 prikazuje dijagram kumulativnog gubitka mase ADI 240 kugličarenog intenzitetom „0,94 A“, uslijed abrazije različitim abrazivima



Slika 157: Kumulativni gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“), uslijed abrazije različitim abrazivima

Slika 158 grafički prikazuje prosječan gubitak mase ADI 240 kugličarenog intenzitetom „0,94 A“, uslijed trošenja različitim abrazivima, za sva tri ciklusa abrazije.



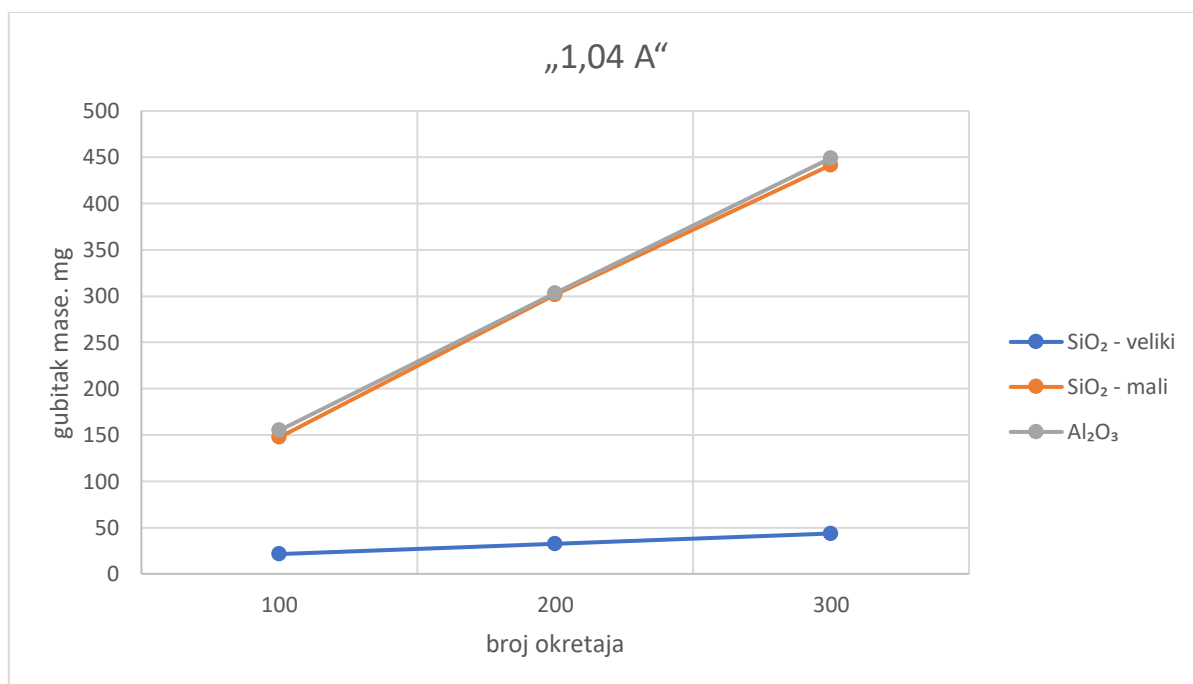
Slika 158: Prosječan gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“), za tri ciklusa abrazije različitim abrazivima

Tablica 40: Gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“) uslijed abrazije različitim abrazivima

Intenzitet „1,04 A“, gubitak mase u mg			
Broj okretaja	SiO ₂ - veliki	SiO ₂ - mali	Al ₂ O ₃
100	21,4000	147,4667	154,9000
200	32,3333	301,3333	303,0667
300	43,6333	44,6500	449,1333

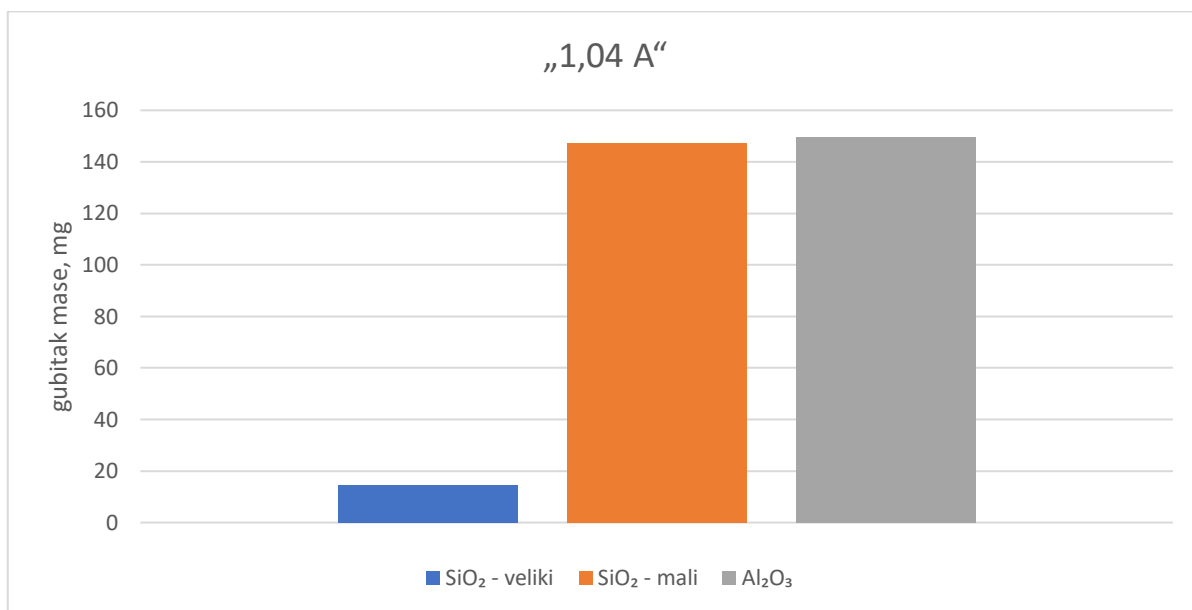
Rezultati svih izmjera navedeni su u prilogu 17,18,19.

Slika 159 prikazuje dijagram kumulativnog gubitka mase ADI 240 kugličarenih intenzitetom „1,04 A“, uslijed abrazije različitim abrazivima.



Slika 159: Kumulativni gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“), uslijed abrazije različitim abrazivima

Slika 160 grafički prikazuje prosječan gubitak mase ADI 240 kugličarenog intenzitetom „1,04 A“, uslijed trošenja različitim abrazivima, za sva tri ciklusa abrazije.



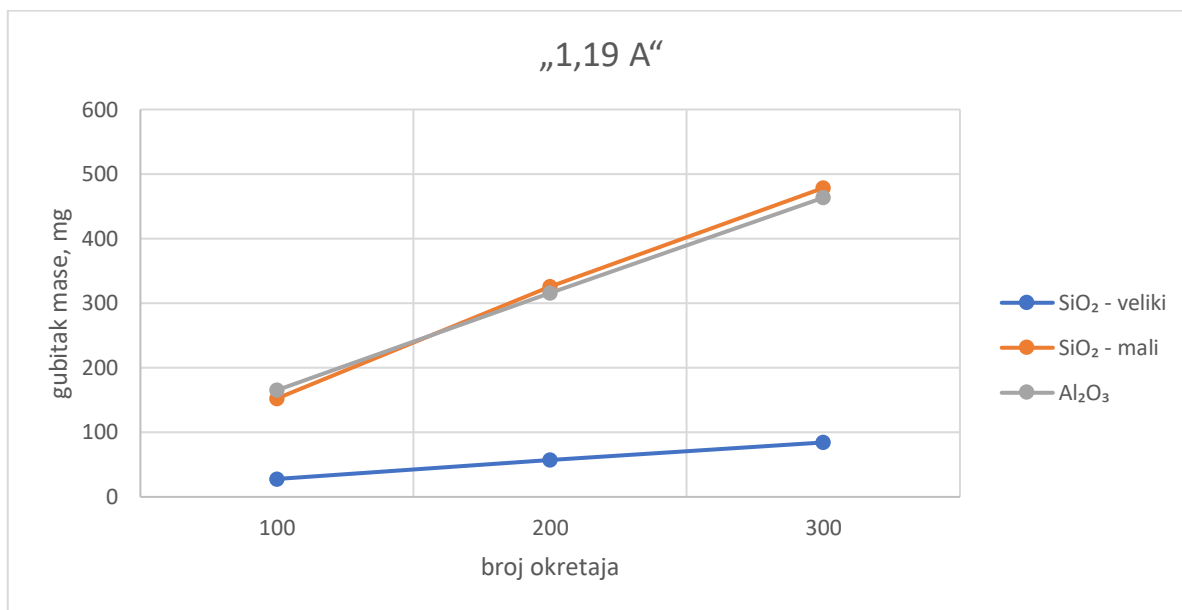
Slika 160: Prosječan gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“), za tri ciklusa abrazije različitim abrazivima

Tablica 41: Gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“) uslijed abrazije različitim abrazivima

Intenzitet „1,19 A“, gubitak mase u mg			
Broj okretaja	SiO ₂ - veliki	SiO ₂ - mali	Al ₂ O ₃
100	27,8000	152,5000	165,3667
200	57,0000	325,9333	315,7333
300	84,3667	478,5333	463,4667

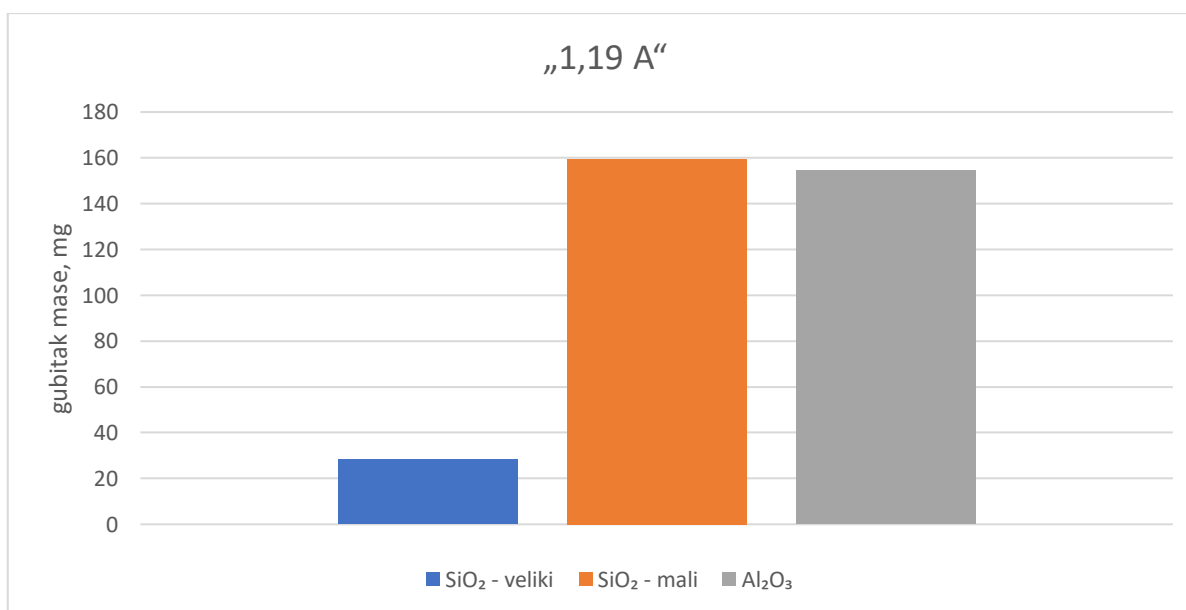
Rezultati svih izmjera navedeni su u prilogu 17,18,19.

Slika 161 prikazuje dijagram kumulativnog gubitka mase ADI 240 kugličarenog intenzitetom „1,19 A“, uslijed abrazije različitim abrazivima.



Slika 161: Kumulativni gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“), uslijed abrazije različitim abrazivima

Slika 162 grafički prikazuje prosječan gubitak mase ADI 240 kugličarenog intenzitetom „1,19 A“, uslijed trošenja različitim abrazivima, za sva tri ciklusa abrazije.



Slika 162: Prosječan gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“), za tri ciklusa abrazije različitim abrazivima

3.5.7. Otpornost na erozijsko trošenje ADI 240 K i ADI 240

Na uređaju za erozijsko trošenje prikazanom na slici 50, ispitani su uzorci ADI 240 u drugom ciklusu ispitivanja. Pri tome se osim utjecaja vrste eroziva na trošenje nastojalo definirati i utjecaj kuta udara eroziva. Parametri ispitivanja su izmijenjeni u odnosu na prvi ciklus ispitivanja:

- 3 intenziteta kugličarenja : „0,94 A“, „1,04 A“, „1,19 A“,
- 3 eroziva: SiO₂, Al₂O₃, čelične kuglice,
- 3 kuta udara (30°, 60° i 90°),
- trajanje ispitivanja 7 minuta,
- 3 ponavljanja (3 ciklusa).

U nastavku su prikazane dimenzije korištenog eroziva:

- kvarcni pijesak SiO₂ granulacije 0,25-0,50 mm (SiO₂-veliki),
- aluminijev oksid Al₂O₃ granulacije 0,063-0,2 mm ,
- čelične kuglice promjera 0,7 mm.

Svi rezultati gubitka mase prikazani u nastavku, predstavljaju srednje vrijednosti tri mjerenja provedena pri istim uvjetima.

Budući da se kod ovog ispitivanja zbog dugog trajanja i različitog promjera/mase eroziva značajno razlikuje ukupna masa čestica eroziva koja udari u uzorak tijekom ispitivanja (protok SiO₂ = 1335 g u 7 minuta, protok Al₂O₃ = 2153 g u 7 minuta, protok čeličnih kuglica = 2703 g u 7 minuta), gubitak mase uzorka izražen je u µg/g eroziva.

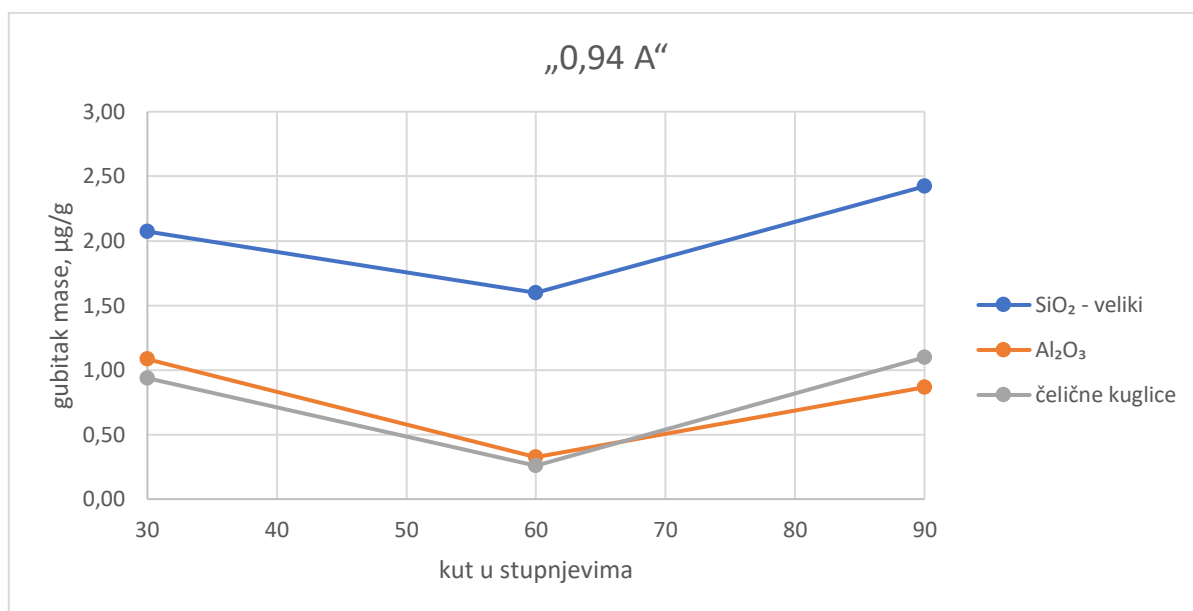
3.5.7.1 ADI 240 kugličaren intenzitetom „0,94 A“, erodiran različitim erozivima i kutovima erodiranja

Tablica 42: Prosječan gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“) nakon erodiranja različitim erozivima i kutovima

Intenzitet „0,94 A“, gubitak mase u µg/g			
Kut erodiranja	SiO ₂	Al ₂ O ₃	čelične kuglice
30	2,0724	1,0838	0,9372
60	1,5980	0,3251	0,2580
90	2,4210	0,8670	1,0975

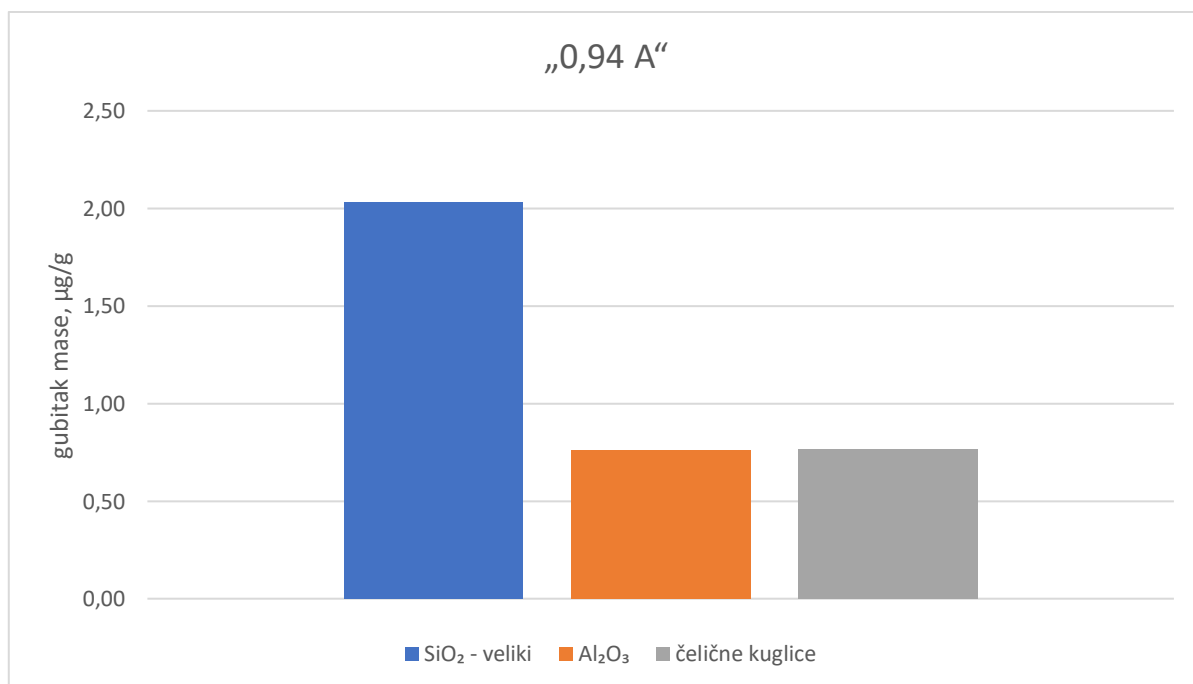
Rezultati svih izmjera navedeni su u prilogu 22, 23, 24.

Slika 163 daje dijagramski prikaz gubitka mase ADI 240 K („0,94 A“), po ciklusu erodiranja različitim erozivima i različitim kutovima erodiranja.



Slika 163: Gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“), uslijed erodiranja različitim erozivima i pod različitim kutovima

Slika 164 grafički prikazuje prosječan gubitak mase ADI 240 kugličarenog intenzitetom „0,94 A“, uslijed trošenja različitim erozivima.



Slika 164: Prosječan gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“) za različite erozive

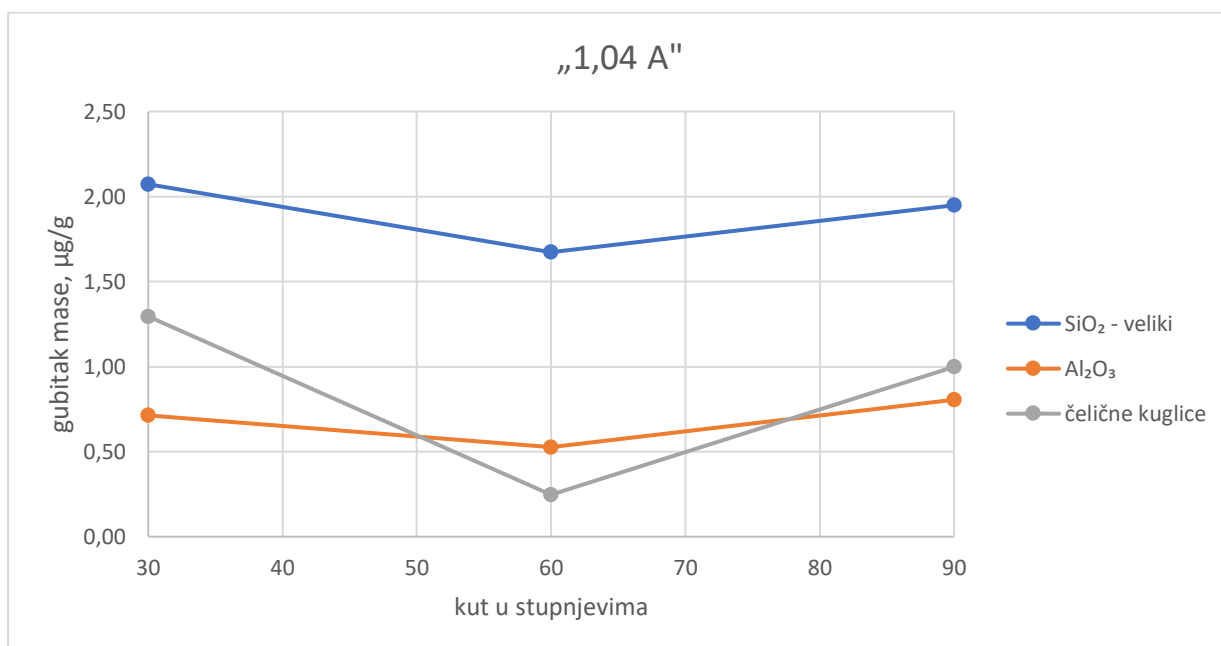
3.5.7.2 ADI 240 kugličaren intenzitetom „1,04 A“, erodiran različitim erozivima i kutovima erodiranja

Tablica 43: Gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“) nakon erodiranja različitim erozivima i kutovima erodiranja.

Intenzitet „1,04 A“, gubitak mase u $\mu\text{g/g}$			
Kut erodiranja	SiO_2	Al_2O_3	čelične kuglice
30	2,0724	0,7122	1,2949
60	1,6729	0,5264	0,2466
90	1,9476	0,8051	0,9989

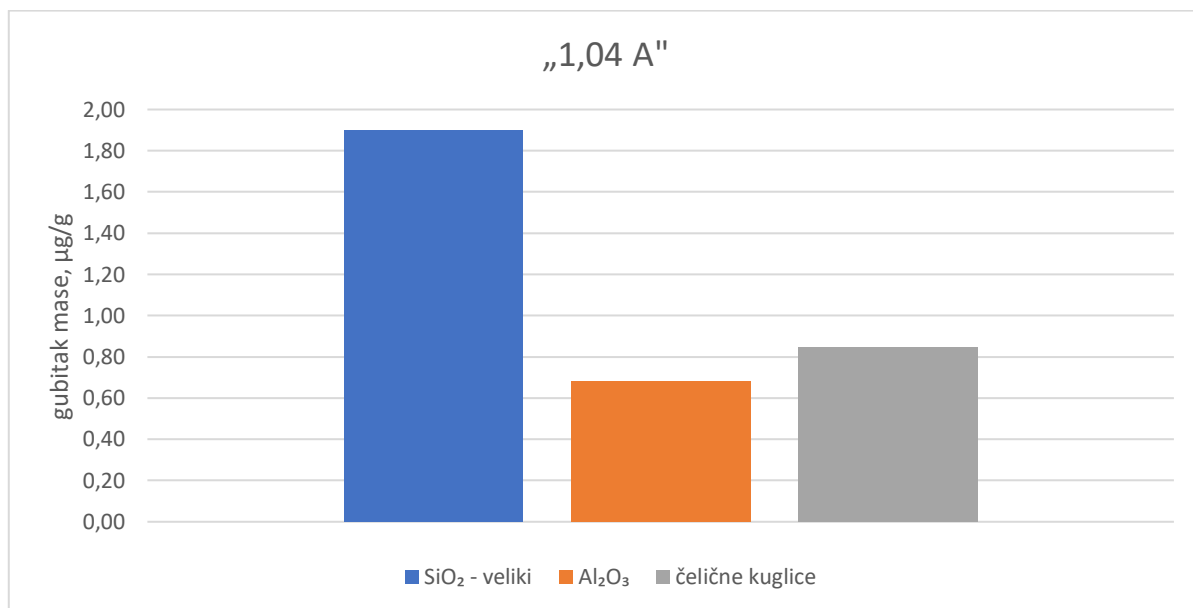
Rezultati svih izmjera navedeni su u prilogu 22, 23, 24.

Slika 165 daje dijagramski prikaz gubitka mase ADI 240 K („1,04 A“), po kutu erodiranja različitim erozivima.



Slika 165: Gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“), uslijed erodiranja različitim erozivima i različitim kutovima

Slika 166, grafički prikazuje prosječan gubitak mase ADI 240 kugličarenog intenzitetom „1,04 A“, uslijed trošenja različitim erozivima.



Slika 166: Prosječan gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“), za različite erozive

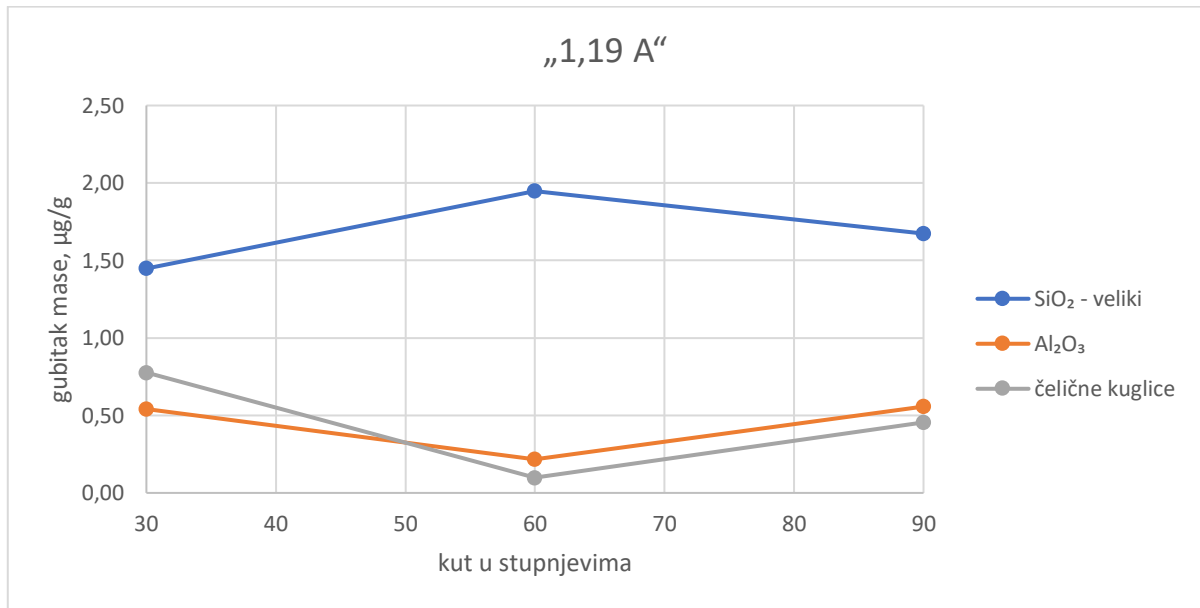
3.5.7.3 ADI 240 kugličaren intenzitetom „1,19 A“, erodiran različitim erozivima i kutovima erodiranja

Tablica 44: Gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“) nakon erodiranja različitim erozivima i kutovima erodiranja.

Intenzitet „1,19 A“, gubitak mase u µg/g			
Kut erodiranja	SiO ₂	Al ₂ O ₃	čelične kuglice
30	1,4482	0,5419	0,7769
60	1,9476	0,2167	0,0986
90	1,6729	0,5574	0,4563

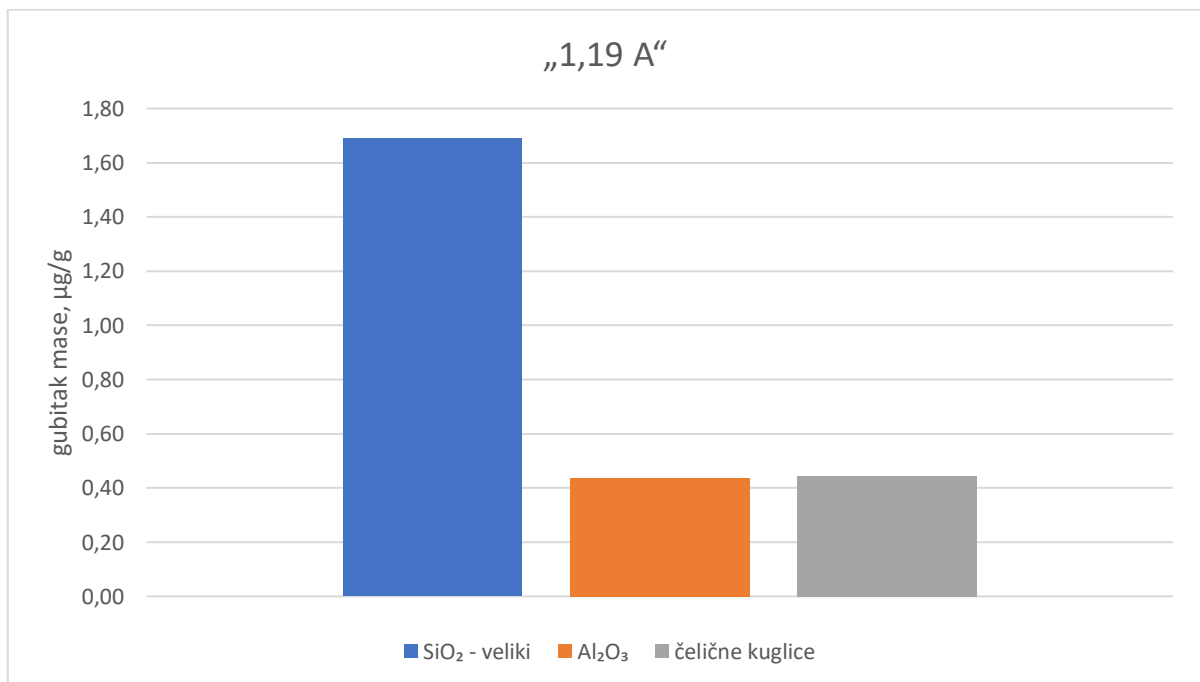
Rezultati svih izmjera navedeni su u prilogu 22, 23, 24.

Slika 167 daje dijagramski prikaz gubitka mase ADI 240 K („1,19 A“), po ciklusu erodiranja različitim erozivima i različitim kutovima erodiranja.



Slika 167: Gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“), uslijed erodiranja različitim erozivima i različitim kutovima

Slika 168, grafički prikazuje prosječan gubitak mase ADI 240 kugličarenog intenzitetom „1,19 A“, uslijed trošenja različitim erozivima.



Slika 168: Prosječni gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“), za različite erozive

3.5.7.4 ADI 240 kugličaren različitim intenzitetom, erodiran erozivom oznake

SiO₂ -veliki, pod promjenjivim kutom

U nastavku su prikazani rezultati ispitivanja utjecaja različitih eroziva na trošenje ADI 240 materijala, u odnosu na intenzitet kugličarenja i kut udara eroziva.

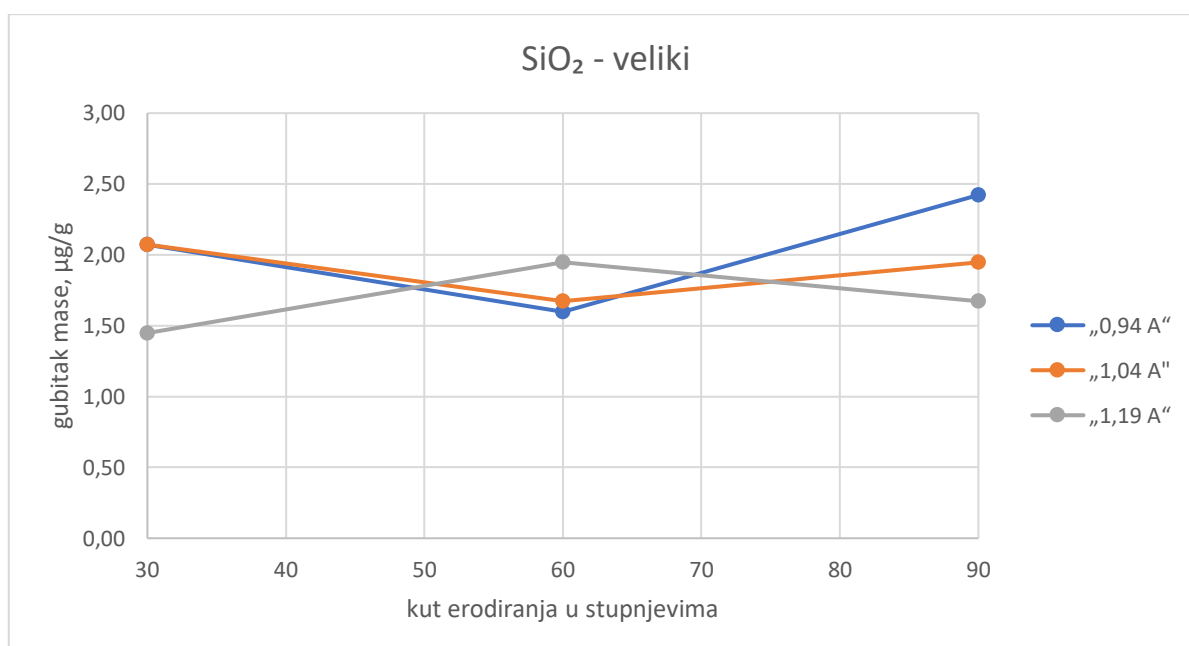
Mjerenje gubitka mase uzoraka je rađeno nakon svakog ciklusa erodiranja u trajanju od 7 minuta s ponavljanjem postupka 3 puta.

Tablica 45: Rezultati ispitivanja ADI 240 K na eroziju erozivom oznake SiO₂ – veliki

SiO ₂ , gubitak mase u µg/g			
Kut erodiranja	„0,94A“	„1,04 A“	„1,19 A“
30	2,0724	2,0724	1,4482
60	1,5980	1,6729	1,9476
90	2,4210	1,9475	1,6729

Prikaz svih izmjera dat je u prilogu br.22.

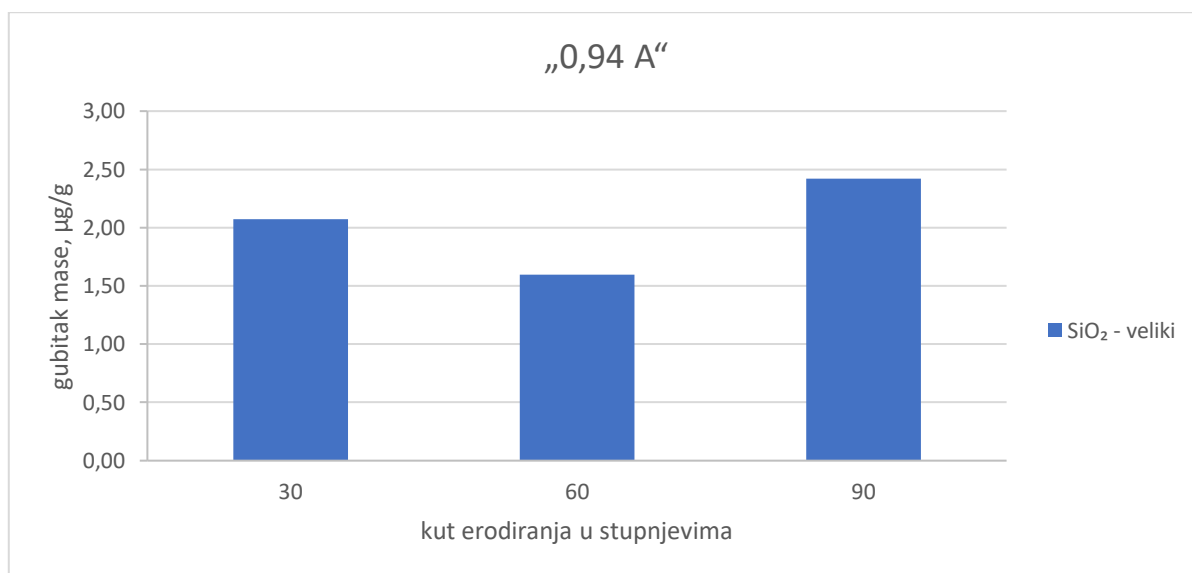
Slika 169 daje dijagramski prikaz gubitka mase ADI 240 nakon erodiranja, za različite intenzitete kugličarenja i kutove erodiranja erozivom oznake SiO₂ – veliki.



Slika 169: Gubitak mase ADI 240 K po kutu erodiranja erozivom oznake SiO₂ – veliki

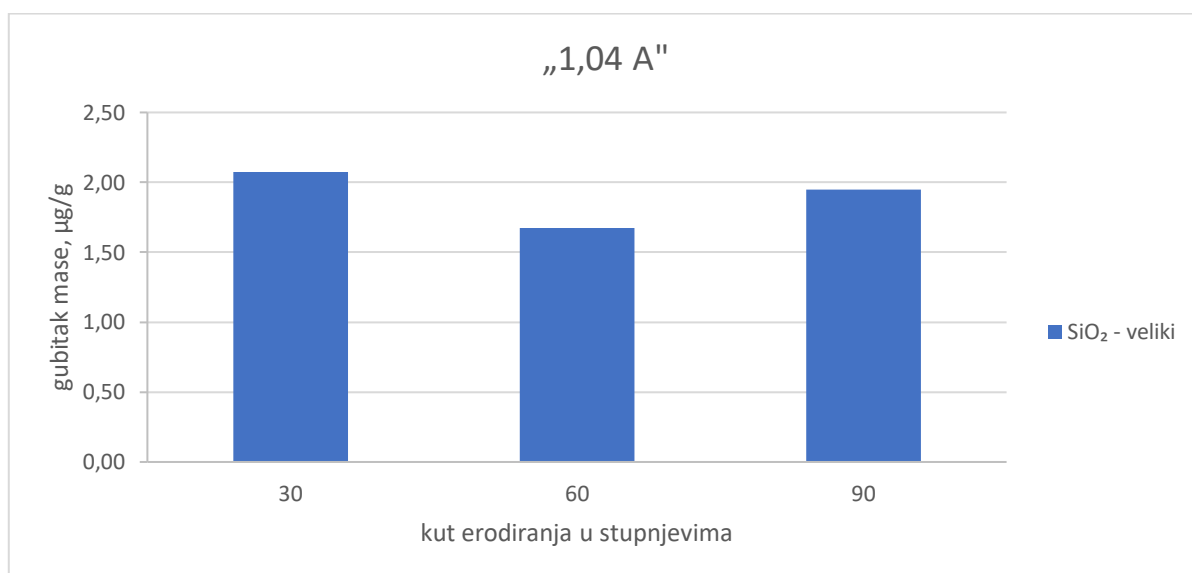
U nastavku je dat grafički prikaz utjecaja intenziteta kugličarenja i kuta erodiranja na trošenje ADI 240 K materijala, u kontaktu s različitim erozivima.

Slika 170 daje grafički prikaz utjecaja kuta erodiranja na trošenje ADI 240 kugličarenog intenzitetom „0,94 A“, uslijed erodiranja erozivom oznake SiO₂ – veliki.



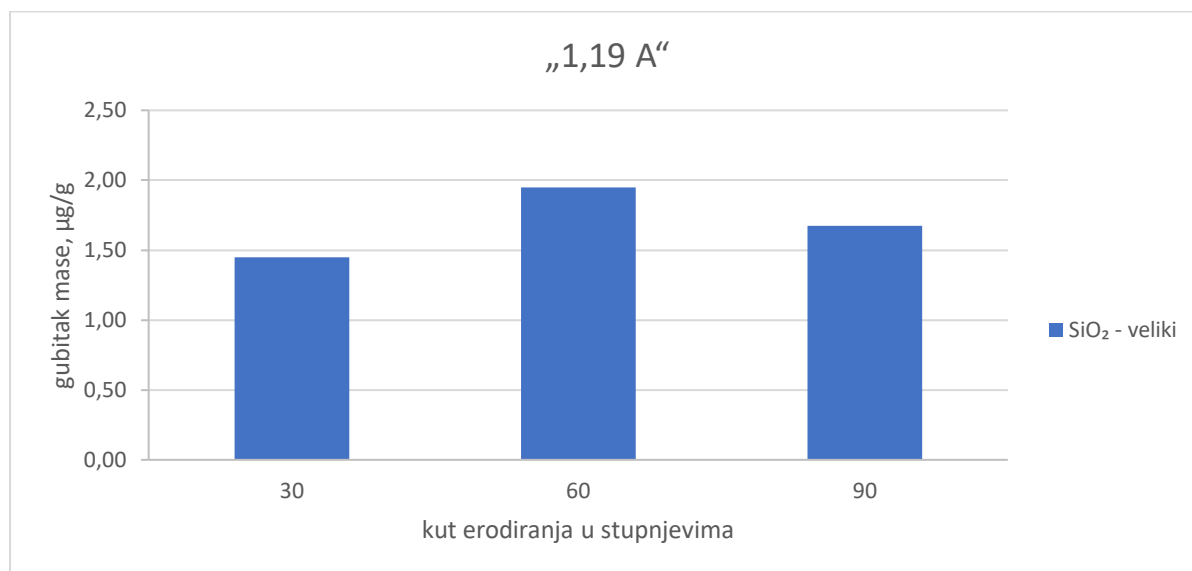
Slika 170: Gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“) erodiranog erozivom oznake SiO₂ - veliki, po kutu erodiranja

Slika 171 daje grafički prikaz utjecaja kuta erodiranja na trošenje ADI 240 kugličarenog intenzitetom „1,04 A“, uslijed erodiranja erozivom oznake SiO₂ – veliki.



Slika 171: Gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“) erodiranog erozivom oznake SiO₂ – veliki, po kutu erodiranja

Slika 172 grafički prikazuje utjecaj kuta erodiranja na trošenje ADI 240 kugličarenog intenzitetom „1,19 A“, uslijed erodiranja erozivom oznake SiO₂ – veliki.



Slika 172: Gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“) erodiranog erozivom oznake SiO₂ - veliki, po kutu erodiranja

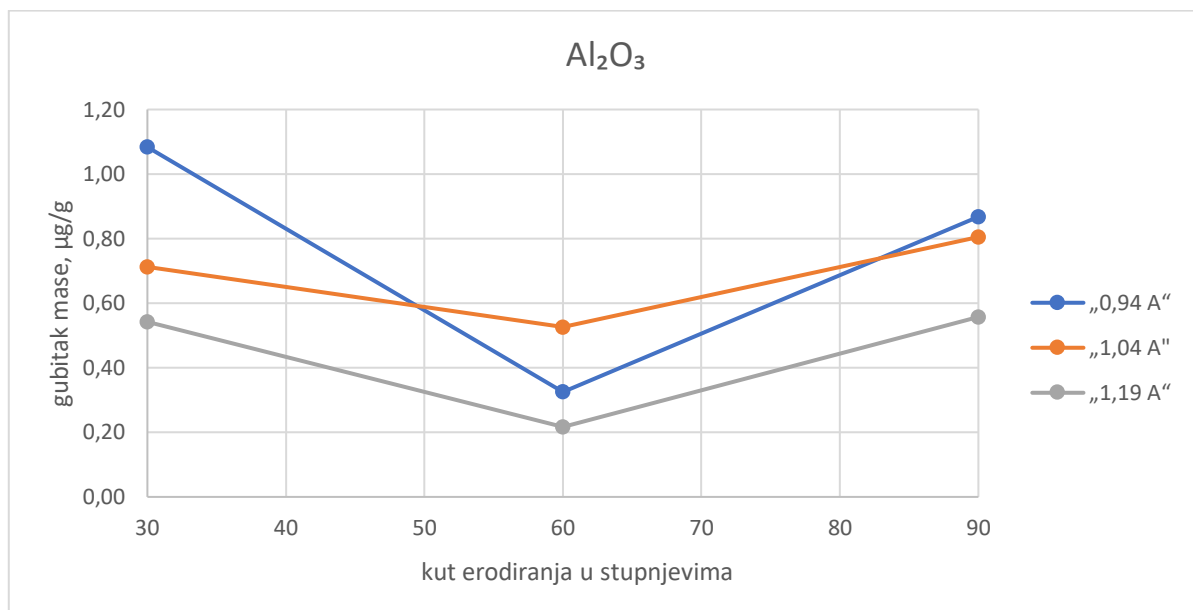
3.5.7.5 ADI 240 kugličaren različitim intenzitetom, erodiran erozivom oznake Al₂O₃ pod promjenjivim kutom

Tablica 46: Rezultati ispitivanja ADI 240 K na eroziju erozivom oznake Al₂O₃

Al ₂ O ₃ , gubitak mase u µg/g			
Kut erodiranja	„0,94 A“	„1,04 A“	„1,19 A“
30	1,0837	0,7122	0,5419
60	0,3251	0,5264	0,2167
90	0,8670	0,8051	0,5574

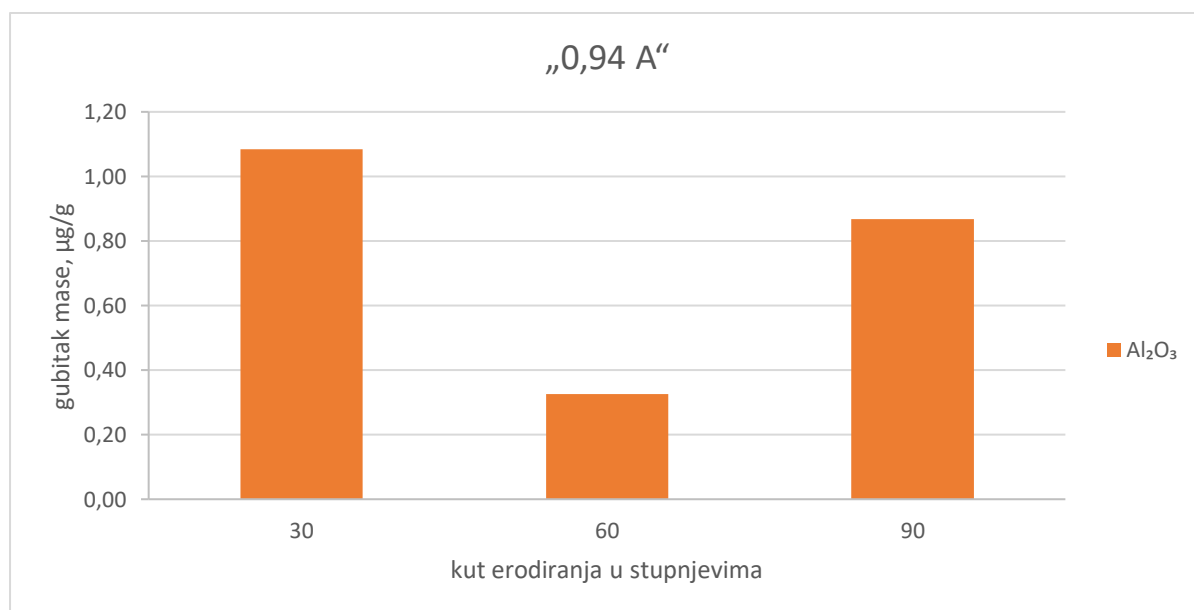
Prikaz svih izmjera dat je u prilogu 23.

Slika 173 daje dijagramski prikaz gubitka mase ADI 240 K nakon erodiranja, za različite intenzitete kugličarenja i kutove erodiranja erozivom oznake Al_2O_3 .



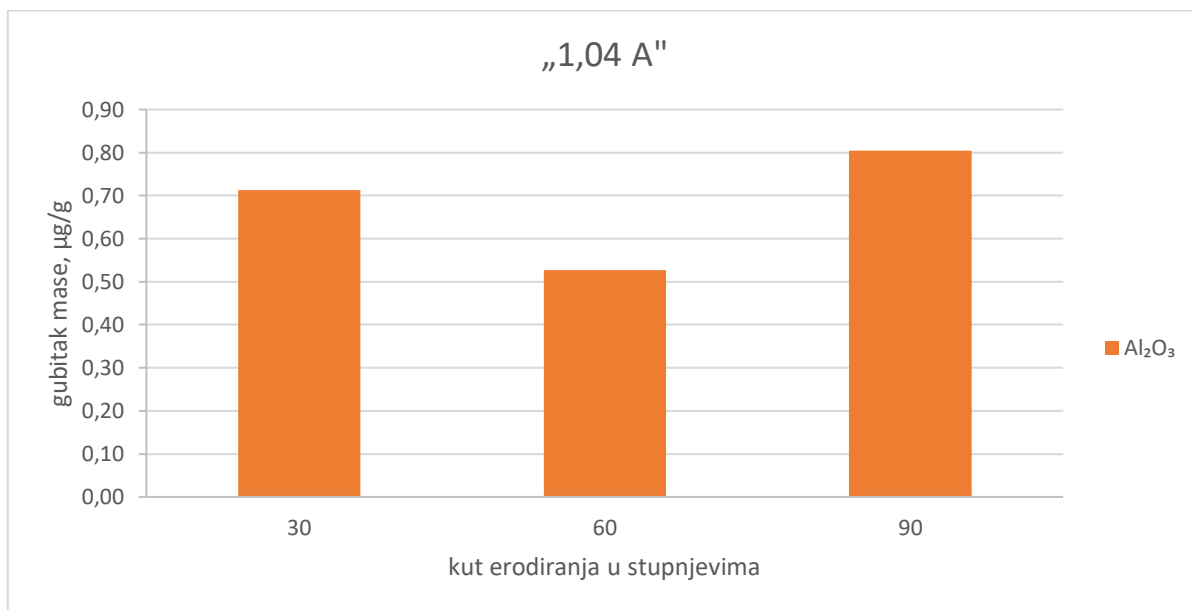
Slika 173: Gubitak mase ADI 240 K po kutu erodiranja erozivom oznake Al_2O_3 , za različite intenzitete kugličarenja

Slika 174 daje grafički prikaz utjecaja kuta erodiranja na trošenje ADI 240 kugličarenog intenzitetom „0,94 A“, uslijed erodiranja erozivom oznake Al_2O_3 .



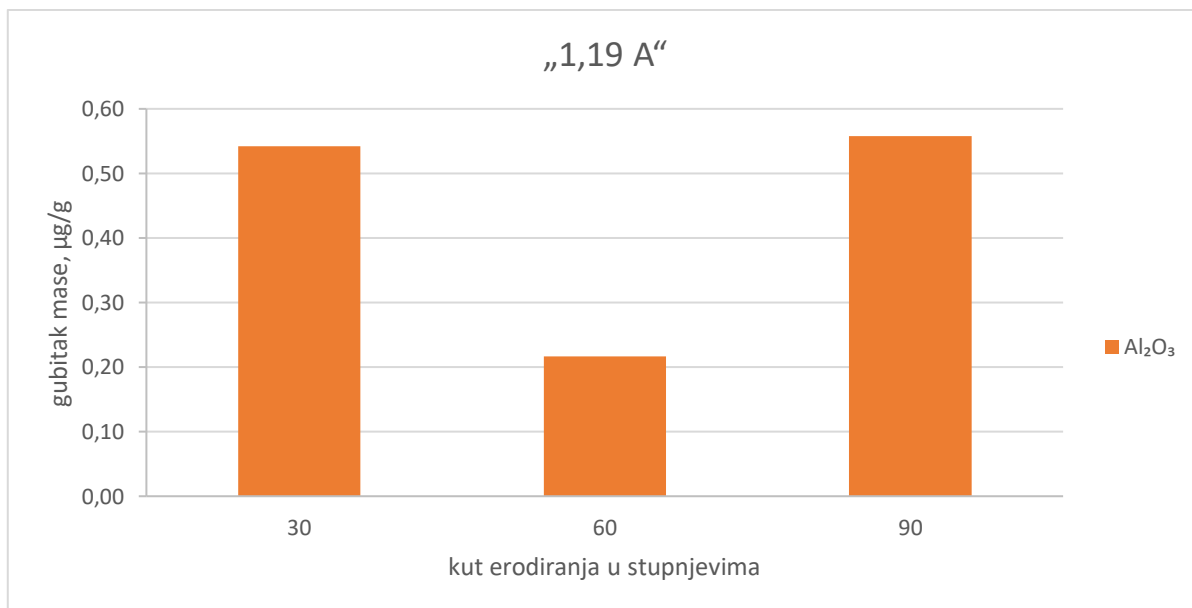
Slika 174: Gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“) erodiranog erozivom oznake Al_2O_3 , po kutu erodiranja

Slika 175 daje grafički prikaz utjecaja kuta erodiranja na trošenje ADI 240 kugličarenog intenzitetom „1,04 A“, uslijed erodiranja erozivom oznake Al_2O_3 .



Slika 175: Gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“) erodiranog erozivom oznake Al_2O_3 , po kutu erodiranja

Slika 176 grafički prikazuje utjecaj kuta erodiranja na trošenje ADI 240 kugličarenog intenzitetom „1,19 A“, uslijed erodiranja erozivom oznake Al_2O_3 .



Slika 176: Gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“) erodiranog erozivom oznake Al_2O_3 , po kutu erodiranja

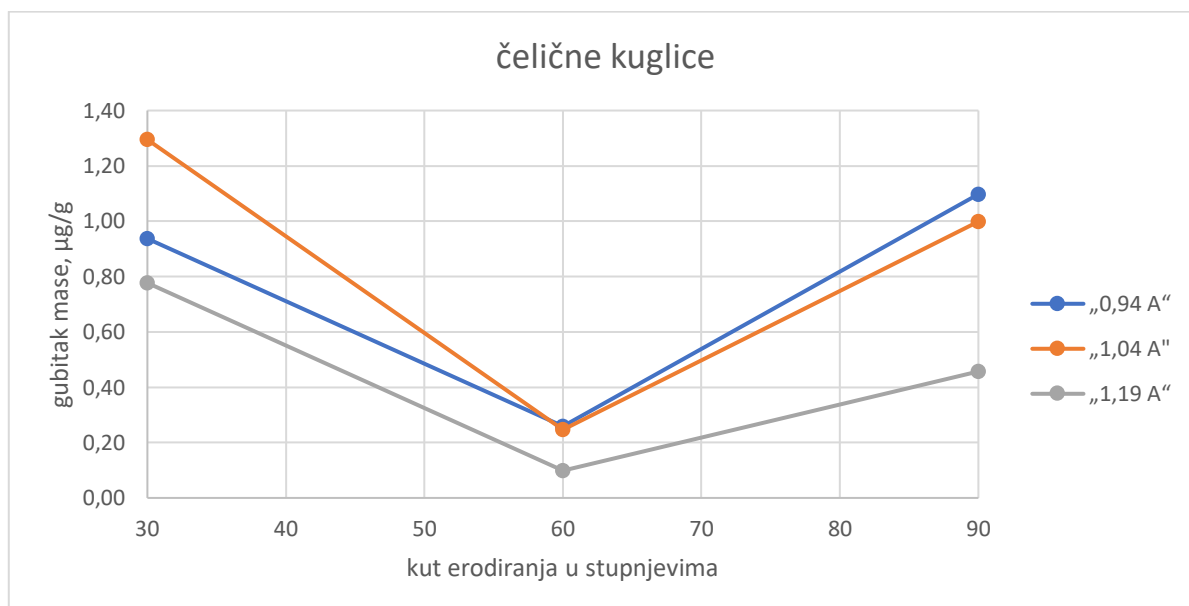
3.5.7.6 ADI 240 kugličaren različitim intenzitetom, erodiran čeličnim kuglicama pod promjenjivim kutom

Tablica 47: Rezultati ispitivanja ADI 240 K na eroziju čeličnim kuglicama

čelične kuglice, gubitak mase u $\mu\text{g/g}$			
Kut erodiranja	„0,94A“	„1,04 A“	„1,19 A“
30	0,9372	1,2948	0,7769
60	0,2580	0,2466	0,0986
90	1,0975	0,9989	0,4563

Prikaz svih izmjera dat je u prilogu 24.

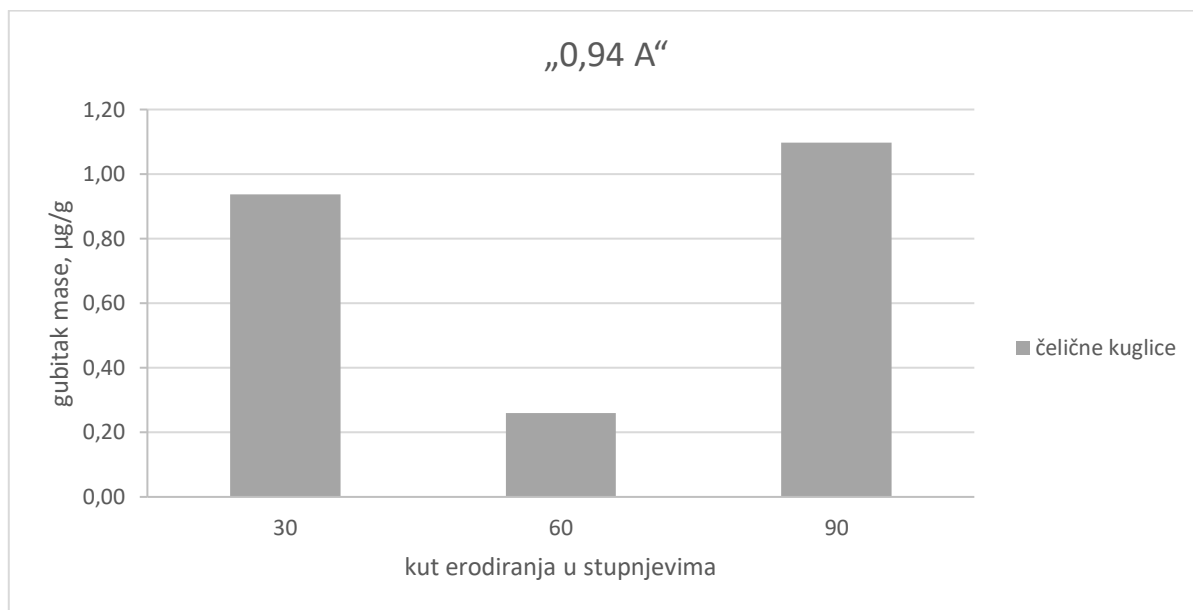
Slika 177 daje dijagramski prikaz gubitka mase ADI 240 K po kutu erodiranja za različite intenzitete kugličarenja.



Slika 177: Gubitak mase ADI 240 K po kutu erodiranja čeličnim kuglicama

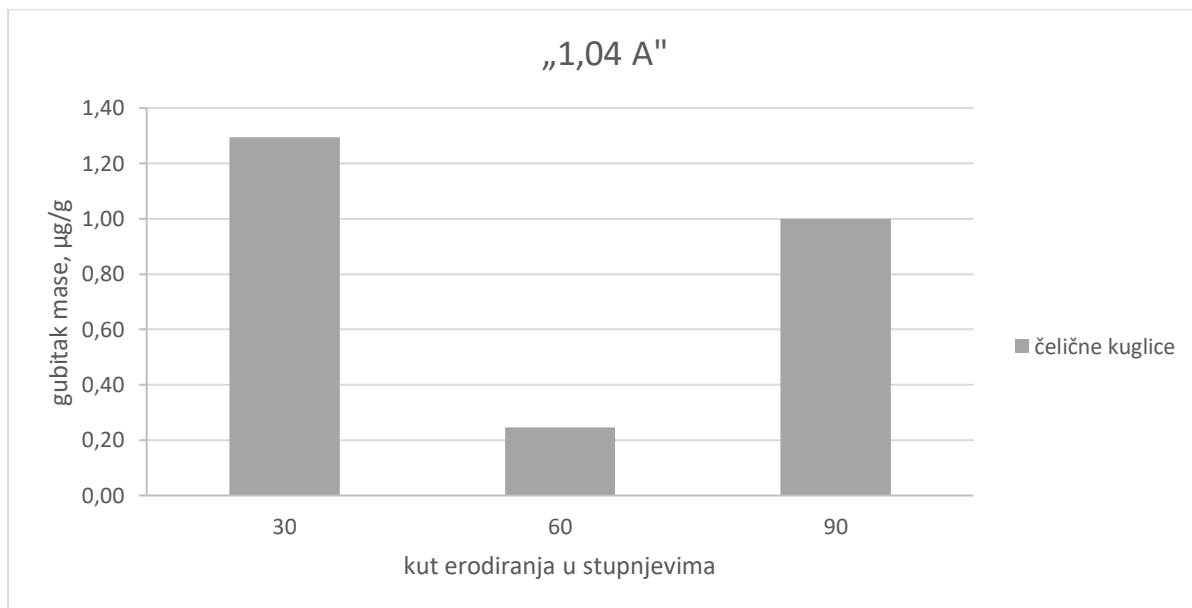
U nastavku je dat grafički prikaz utjecaja intenziteta kugličarenja i kuta erodiranja na trošenje ADI 240 materijala, čeličnim kuglicama.

Slika 178 grafički prikazuje utjecaja kuta erodiranja na trošenje ADI 240 kugličarenog intenzitetom „0,94 A“, uslijed erodiranja čeličnim kuglicama.



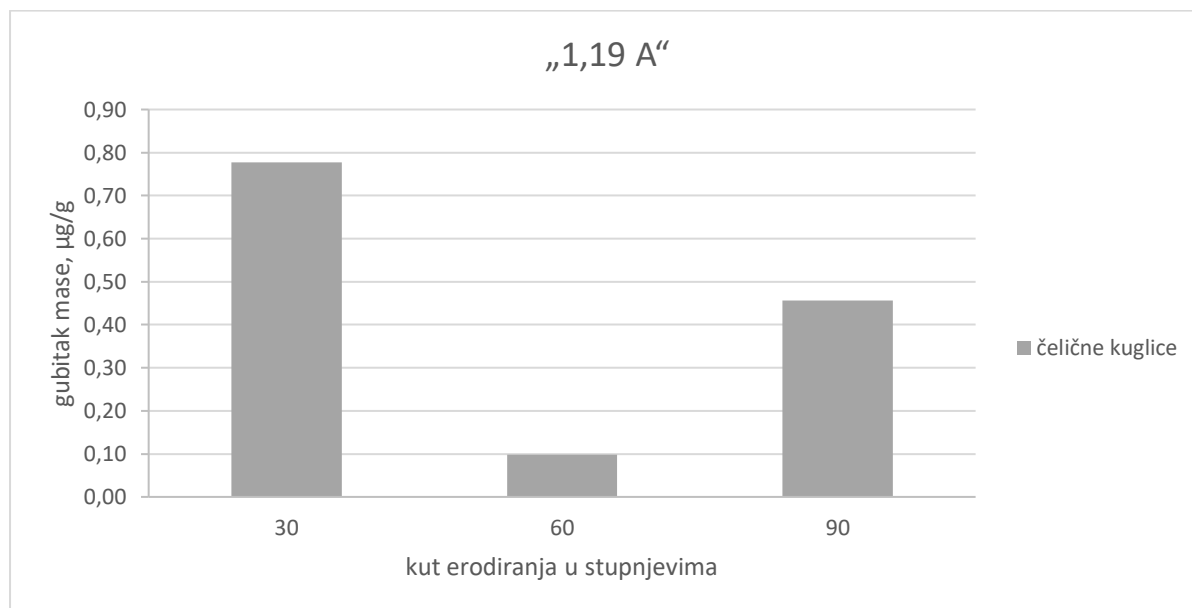
Slika 178: Gubitak mase ADI 240 K („0,94 A“) erodiranog čeličnim kuglicama, po kutu erodiranja

Na slici 179 grafički je prikazan utjecaja kuta erodiranja na trošenje ADI 240 kugličarenog intenzitetom „1,04 A“, uslijed erodiranja čeličnim kuglicama.



Slika 179: Gubitak mase ADI 240 K („1,04 A“) erodiranog čeličnim kuglicama, po kutu erodiranja

Slika 180 grafički prikazuje utjecaja kuta erodiranja na trošenje ADI 240 kugličarenog intenzitetom „1,19 A“, uslijed erodiranja čeličnim kuglicama.



Slika 180: Gubitak mase ADI 240 K („1,19 A“) erodiranog čeličnim kuglicama, po kutu erodiranja

3.5.7.7 ADI 240 nekugličaren, erodiran pod promjenjivim kutom, različitim erozivima

Osim kugličarenog ADI 240, na eroziju je ispitan i nekugličareni. Dio uzoraka je ostao u stanju u kakvom je bio nakon izotermičkog poboljšavanja, a dio uzoraka je strojno obrađen glodanjem. Uzorci su ispitani na trošenje različitim erozivima i kutovima udara eroziva.

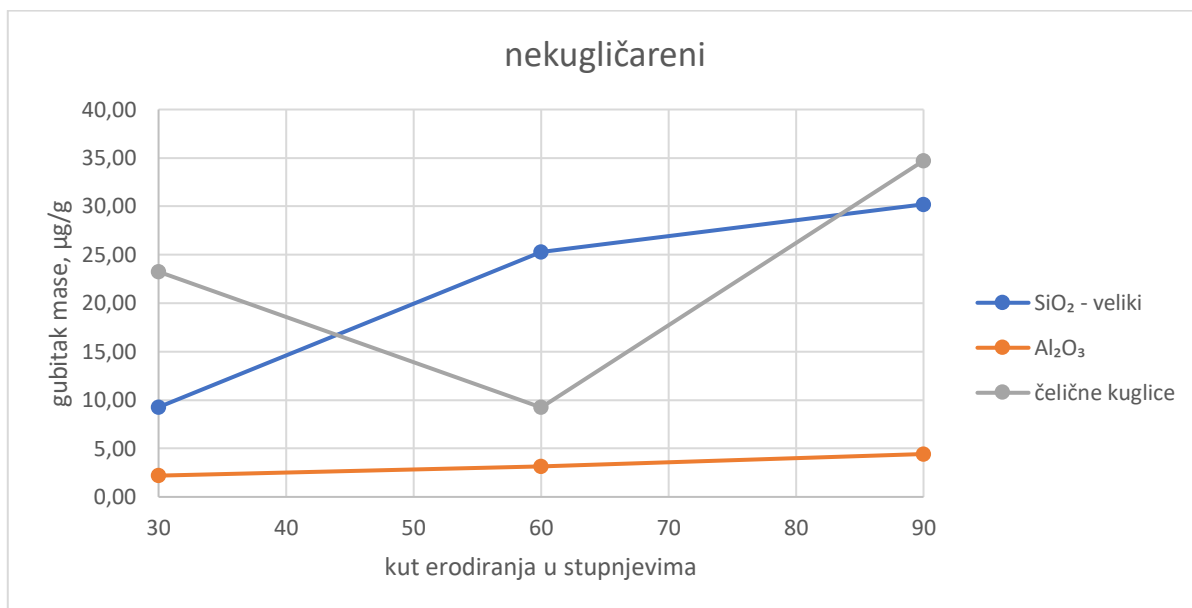
ADI 240 nekugličareni, strojno neobrađeni uzorci

Tablica 48: Gubitak mase po kutu erodiranja različitim erozivima, uzoraka nekugličarenog, strojno neobrađenog ADI 240

nekugličareni, gubitak mase u µg/g			
Kut erodiranja	SiO ₂	Al ₂ O ₃	čelične kuglice
30	9,2634	2,1985	23,2704
60	25,2934	3,1584	9,2366
90	30,2122	4,4279	34,7145

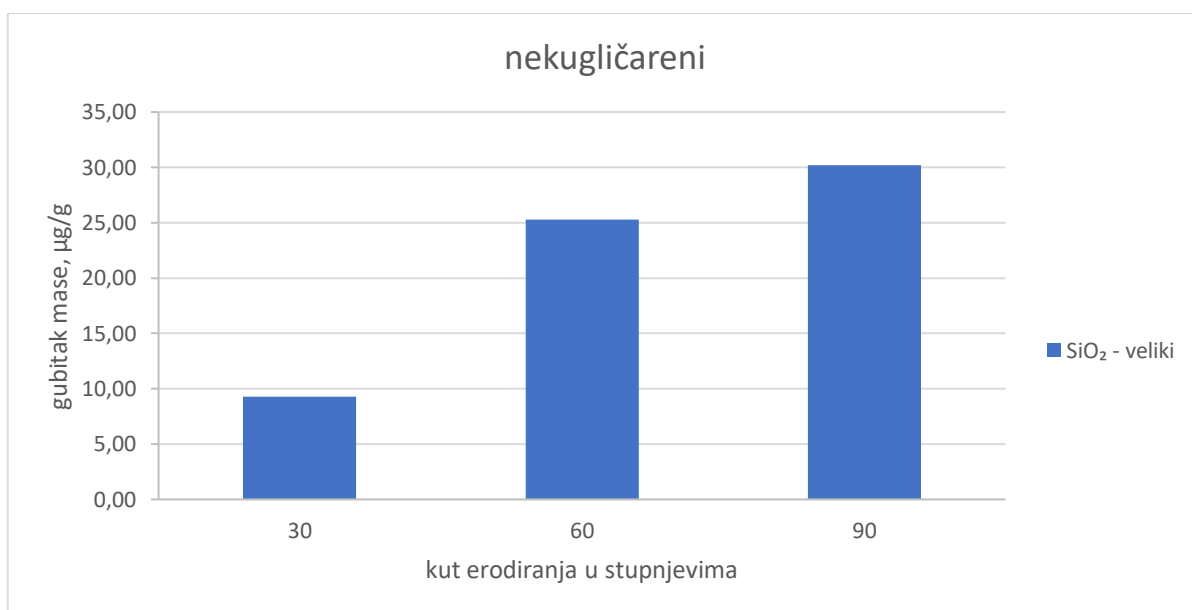
Prikaz svih izmjera dat je u prilogu 25.

Slika 181 dijagramski prikazuje gubitak mase ADI 240, nakon erodiranja različitim erozivima i kutovima erodiranja.



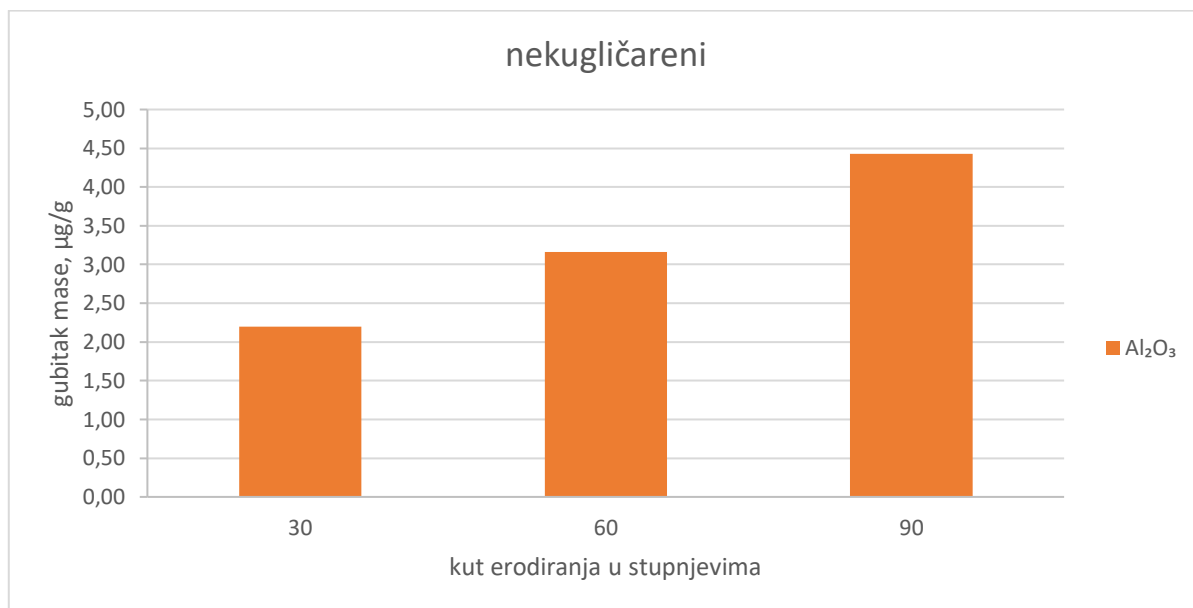
Slika 181: Gubitak mase nekugličarenog, neobrađenog ADI 240 po kutu erodiranja različitim erozivima

Slika 182 daje grafički prikaz utjecaja kuta erodiranja na trošenje nekugličarenog, površinski neobrađenog ADI materijala, uslijed erodiranja erozivom oznake SiO₂ – veliki.



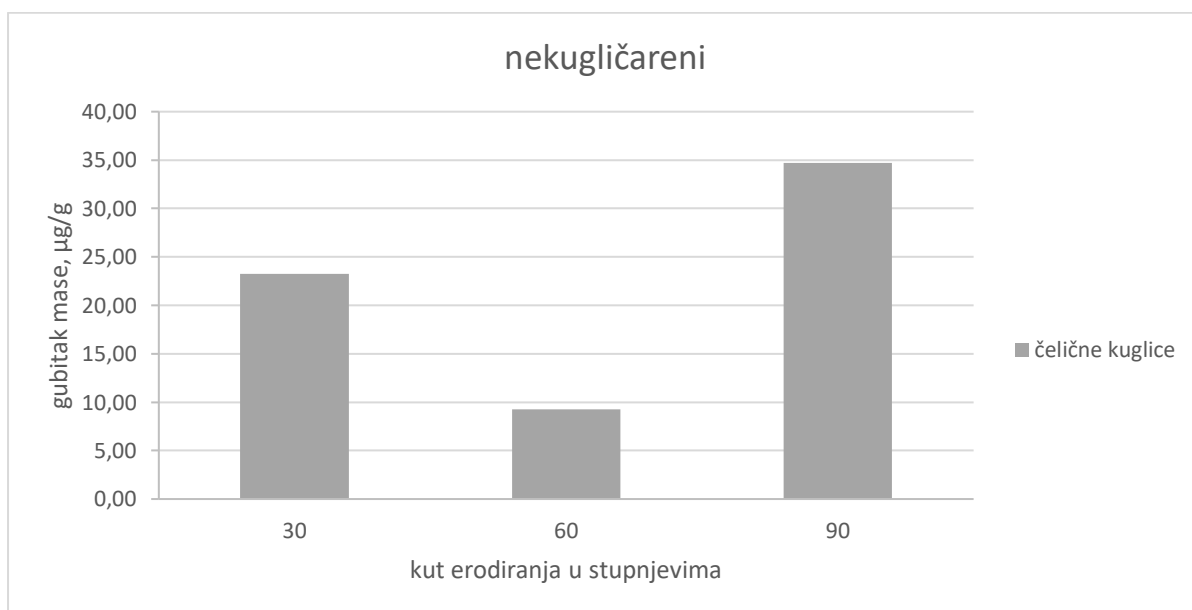
Slika 182: Gubitak mase po kutu erodiranja, nekugličarenog, neobrađenog ADI 240, uslijed erodiranja erozivom oznake SiO₂ - veliki

Na slici 183 je grafički prikaz utjecaja kuta erodiranja na trošenje nekugličarenog, površinski neobrađenog ADI 240, uslijed erodiranja erozivom oznake Al_2O_3 .



Slika 183: Gubitak mase po kutu erodiranja, nekugličarenog, neobrađenog ADI 240, uslijed erodiranja erozivom oznake Al_2O_3

Slika 184 daje grafički prikaz utjecaja kuta erodiranja na trošenje nekugličarenog, površinski neobrađenog ADI 240, uslijed erodiranja čeličnim kuglicama.



Slika 184: Gubitak mase po kutu erodiranja, nekugličarenog, neobrađenog ADI 240, uslijed erodiranja čeličnim kuglicama

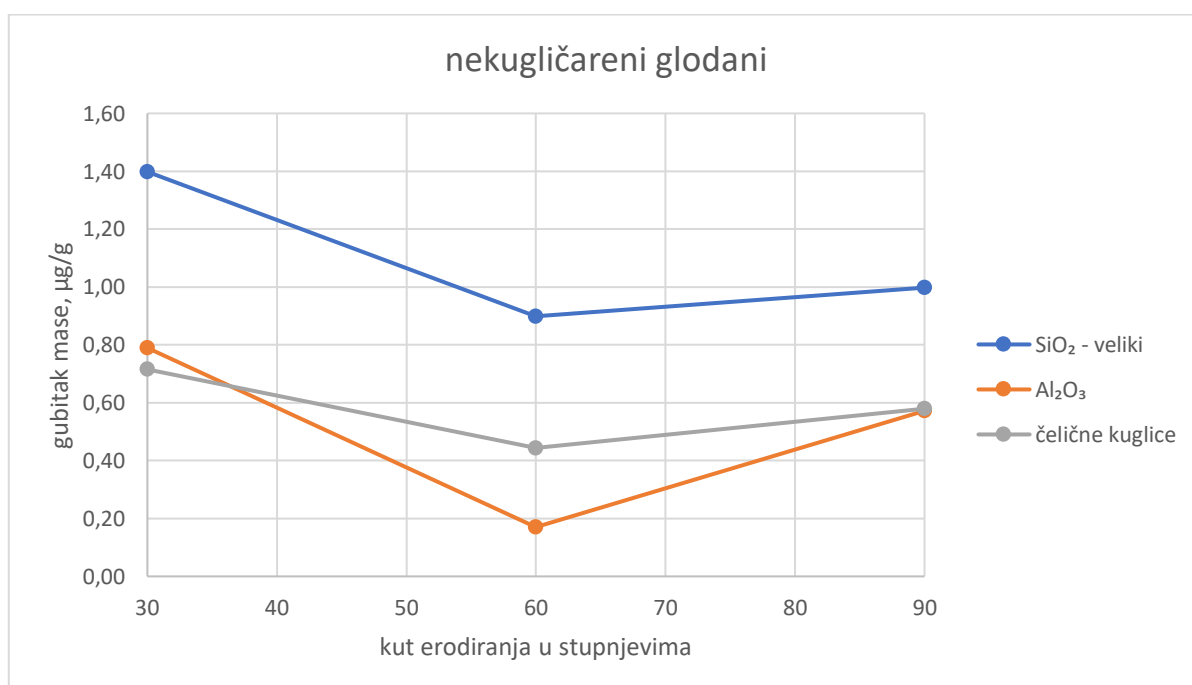
ADI 240 nekugličareni, strojno obrađeni uzorci

Tablica 49: Gubitak mase uzoraka strojno obrađenog ADI 240, nakon erodiranja različitim erozivima i kutovima erodiranja

nekugličareni glodani, gubitak mase u $\mu\text{g/g}$			
Kut erodiranja	SiO_2	Al_2O_3	čelične kuglice
30	1,3982	0,7896	0,7152
60	0,8989	0,1703	0,4439
90	0,9988	0,5728	0,5796

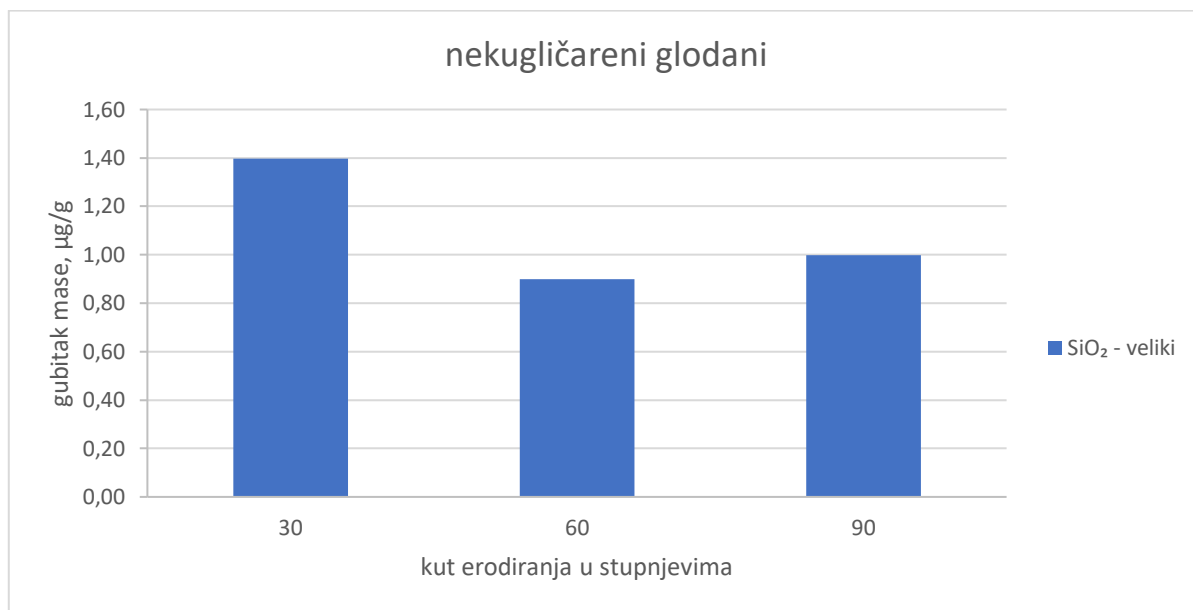
Prikaz svih izmjera dat je u prilogu 26.

Slika 185 daje dijagramski prikaz gubitka mase po kutu erodiranja različitim erozivima, nekugličarenog, površinski obrađenog ADI 240.



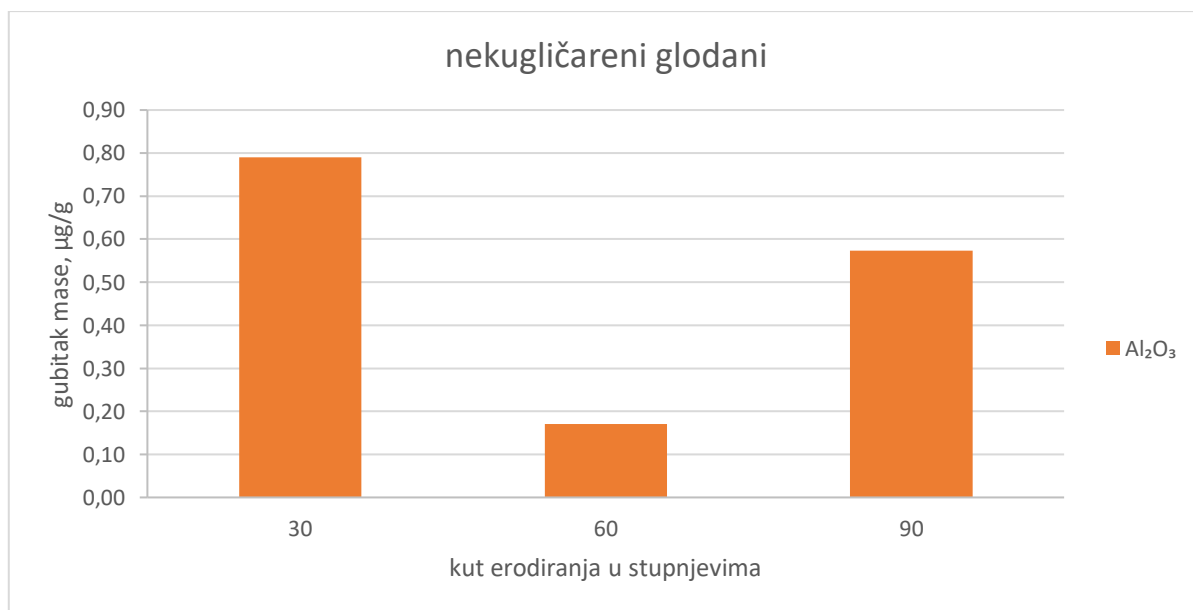
Slika 185: Gubitak mase po kutu erodiranja strojno obrađenih uzoraka ADI 240

Na slici 186 je grafički prikaz utjecaja kuta erodiranja na trošenje nekugličarenog, površinski obrađenog ADI 240, uslijed erodiranja erozivom oznake SiO₂ – veliki.



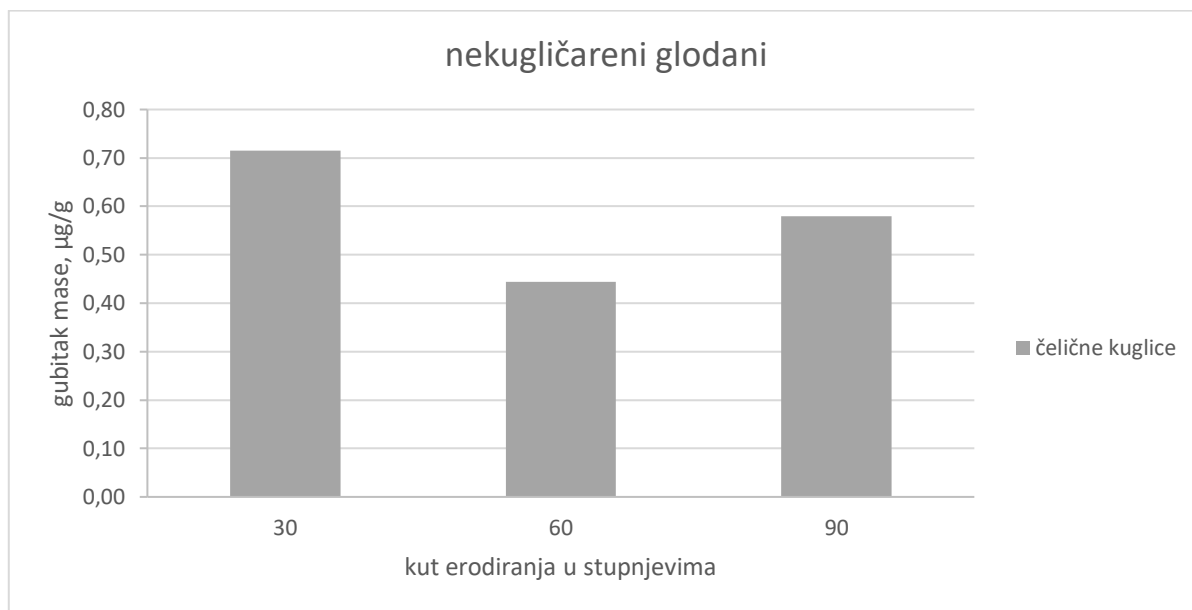
Slika 186: Gubitak mase po kutu erodiranja nekugličarenog, glodanog ADI 240, uslijed erodiranja erozivom oznake SiO₂ - veliki

Slika 187 daje grafički prikaz utjecaja kuta erodiranja na trošenje nekugličarenog, površinski obrađenog ADI 240, uslijed erodiranja erozivom oznake Al₂O₃.



Slika 187: Gubitak mase po kutu erodiranja nekugličarenog, glodanog ADI 240, uslijed erodiranja erozivom oznake Al₂O₃

Slika 188 daje grafički prikaz utjecaja kuta erodiranja na trošenje nekugličarenog, površinski obrađenog ADI 240, uslijed erodiranja čeličnim kuglicama.



Slika 188: Gubitak mase po kutu erodiranja nekugličarenog, glodanog ADI 240, uslijed erodiranja čeličnim kuglicama

Rezultati ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje nekugličarenih uzoraka nisu u potpunosti usporedivi s kugličarenim uzorcima te zbog toga nisu prikazani u istim dijagramima. Nekugličareni, površinski neobrađeni uzorci na površini sadrže okside koji utječu na rezultate ispitivanja. S druge strane nekugličareni uzorci koji su naknadno obrađeni glodanjem, imaju manju hrapavost ($R_a = 4 \text{ mm}$) od kugličarenih uzoraka ($R_a = 6,0 - 6,5 \text{ mm}$).

Zbog prethodno navedenih razloga te manjeg intenziteta trošenja, za razliku od rezultata ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje, rezultati ispitivanja otpornost na erozijsko trošenje nisu kod svih kugličarenih uzoraka pokazali bolju otpornost u odnosu na nekugličarene.

4. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA

Kako bi se ustanovio utjecaj kugličarenja na mehanička svojstva i otpornost trošenju izotermički poboljšanog nodularnog lijeva, što je bio cilj rada, ispitan je niz uzoraka.

U ovom poglavlju analizirani su dobiveni rezultati laboratorijskih ispitivanja te diskutiran utjecaj mikrostrukturnih promjena nastalih izotermičkim poboljšavanjem i naknadnim kugličarenjem na mehanička svojstva i otpornost trošenju ADI materijala.

Postupak lijevanja i kemijski sastav EN-GJS-600-3

Postupci i metode osiguravanja kvalitete lijeva (strukture, mehaničkih svojstava) nisu istovjetni za sve ljevaonice te značajno ovise o uvjetima i sirovinama kojima pojedina ljevaonica raspolaže. Za potrebe ovog istraživanja izliveni su odljevci kvalitete EN-GJS-600-3, Tondish cover postupkom.

Kemijskom analizom, utvrđen je sastav šarže izlivenih odljevaka nodularnog lijeva. Dobiveni rezultati pokazuju da je kemijski sastav lijeva u skladu s predviđenim kemijskim sastavom za tu vrstu i kvalitetu lijeva [20].

Analiza mikrostrukture (svjetlosna i FE SEM) EN-GJS-600-3

Metalografskom analizom uzoraka nodularnog lijeva EN-GJS-600-3 utvrđena je perlitno-feritna struktura matrice karakteristična za tu vrstu lijeva. U strukturi prevladava perlit, a ostatak čine ferit i nodule grafita. Nodule su velikim dijelom pravilne, a oko njih je raspoređen ferit. Pri hlađenju i skrućivanju nodularnog lijeva s povećanim udjelom perlita, u ranoj fazi eutektoidne pretvorbe, znatna količina perlita razvija se na granicama austenitnih zrna, nakon čega stvaranje perlita dominira eutektoidnom pretvorbom. U kasnijoj fazi eutektoidne reakcije perlit se stvara na granicama ferit/austenit. Brzina rasta perlita je znatno veća od brzine rasta ferita, pa nakon početka stvaranja perlita nastaje malo ferita.

Povećani udio perlita u mikrostrukтури objašnjava se produljenjem putova difuzije pri hlađenju nodularnog lijeva nakon skrućivanja. Naime, što su duži putovi difuzije, austenit nastao tijekom eutektičke reakcije će se sporije osiromašiti na ugljiku koji bi inače difundirao u susjedne nodule. Drugim riječima, što je manji broj eutektičkih kristala ili kolonija to će za date toplinske uvjete u kalupu, odnosno odljevku, prije nastati prevladavajuća perlitna faza [52]. Postupkom cijepljenja reguliran je broj eutektičkih kristala, a time udio perlita i ferita s uključenim nodulama ravnomjerno raspoređenima u strukturi.

Svjetlosna i FESEM analiza potvrdile su ispravnost postupka lijevanja odljevaka EN-GJS-600-3.

Mehanička svojstva nodularnog lijeva EN-GJS-600-3

Vlačna čvrstoća

Srednja vrijednost statičkog vlačnog ispitivanja na tri uzorka, pokazala je da je ljev EN-GJS-600-3 napravljen u skladu s vrijednostima propisanim normom HRN EN 1563:1997.

Tvrdoća

Prosječna izmjerena vrijednost tvrdoće nodularnog lijeva EN-GJS-600-3 je 207 HB, što je u skladu s normom HRN EN 1563:1997. Veliki utjecaj na tvrdoću ima odnos udjela perlit – ferit. Perlit sa svojom lamelarnom strukturom cementita u feritu povećava tvrdoću metalne matrice. Uzrok relativno male tvrdoće nodularnog lijeva EN-GJS-600-3 je udio meke faze čistog ferita koji s grafitnim nodulama čini gotovo 40% ukupne strukture [13].

Udarni rad loma EN-GJS-600-3

Izmjerena prosječna vrijednost udarnog rada loma nodularnog lijeva EN-GJS-600-3 iznosi 3J uz minimalno rasipanje rezultata. Ujednačenost veličine izmjerenog udarnog rada loma ukazuje na homogenost strukture, bez segregacija. Korištenje normom HRN EN 1563:1997 propisanih epruveta s V utorom za ispitivanje udarnog rada loma pokazalo se neprikladnim za krhki materijal kao što je EN-GJS-600-3. Za istraživanja NL-a, kvalitete EN-GJS-500-7 i veće, prikladnija je epruveta bez utora. Takvu epruvetu preporuča norma EN 1564:2011.

PRVI CIKLUS ISPITIVANJA

Izotermička pretvorba EN-GJS-600-3 u ADI

Temperature izotermičkog poboljšavanja, 380 °C i 240 °C, odabrane su prema literaturi [21, 22]. U oba slučaja, na temperaturi austenitizacije od 900 °C uzorci su zadržani 1h nakon čega su ohlađeni u solnoj kupki AB1 na 380°C, odnosno 240 °C, gdje su zadržani također 1h. Potom su ostavljeni da se hlade na zraku do sobne temperature.

Cilj je bio odabranim temperaturama i vremenom držanja na temperaturi austenitizacije i izotermičke pretvorbe postići veću tvrdoću i udarni rad loma EN-GJS-600-3. Gore spomenutim temperaturama postignuta je potpuna austenitizacija kod zagrijavanja, a hlađenjem u solnoj kupki i kasnije na zraku izbjegnuto je nastajanje perlita i karbida.

Laboratorijska ispitivanja mehaničkih svojstava i mikrostrukture potvrdila su ispravnost provedenog postupka izotermičkog poboljšavanja, obzirom da su tvrdoća i udarni rad loma značajno povećani bez nastanka perlita i karbida.

Analiza mikrostrukture (svjetlosna i FE SEM) ADI materijala

ADI 380

Metalografskom analizom izotermički poboljšanog nodularnog lijeva pri 380 °C (ADI 380) utvrđena je promjena strukture matrice iz perlitno – feritne u ausferitnu strukturu. Ausferitna struktura ADI 380-ja sastoji se od: bainitnog ferita paperjastog oblika karakterističnog za područje tzv. „gornjeg“ bainita, visokougličnog stabiliziranog austenita te nodula grafita. Brzina hlađenja austenita koja je uvjetovala nastanak bainitnog ferita bila je veća od brzine hlađenja pri kojoj nastaje perlit, a manja od one pri kojoj nastaje martenzit. Stoga nije uočen nastanak perlita i karbida, što potvrđuje da je toplinska obrada izotermičkim poboljšavanjem pravilno izvedena.

ADI 240

Uzorci EN-GJS-600-3 izotermički poboljšani pri 240 °C imaju veće pothlađivanje austenita uz manju brzinu difuzije ugljika što rezultira također ausferitnom strukturom, ali drugačijeg oblika bainitnog ferita.

Bainitni ferit je karakterističnog izgleda „donjeg“ bainita - igličastog oblika, a ostatak strukture čine visokouglični stabilizirani austenit i nodule grafita.

Pri nižoj temperaturi izotermičke pretvorbe, brzina nastanka feritnih iglica je veća u usporedbi s brzinom difuzije ugljika. Visoki postotak ugljika je zarobljen na granicama rastućih feritnih iglica, što rezultira deformiranjem kristalne strukture.

U strukturi nisu uočeni perlit i karbidi, što je potvrda dobro izvedene izotermičke pretvorbe.

Mehanička svojstva ADI-a

Tvrdoća

Promjena mikrostrukture nastala izotermičkom pretvorbom na 380 °C prouzročila je promjenu tvrdoće. Razlog tome je pojava bainitnog ferita u austenitu [22].

Tvrdoća uzoraka ADI 380 je u skladu s normom EN 1564:2011.

Obzirom da se radi o bainitnom feritu paperjastog oblika - „gornjem“ bainitu, tvrdoća ove željezne matrice je manja od one izotermički poboljšane pri nižoj temperaturi.

Uzorci ADI 240 imaju najveću tvrdoću od svih mjerenih uzoraka za ispitivanje udarnog rada loma. Razlog visokoj tvrdoći je mikrostruktura sitnijeg ausferita s bainitnim feritom karakterističnog igličastog izgleda [22]. Tvrdoća uzoraka ADI 240 je u skladu s normom EN 1564:2011.

U ovom ispitivanju prosječna vrijednost tvrdoće uzoraka ADI 380 je 30 %, a tvrdoća uzoraka ADI 240 106 % veća od tvrdoće uzoraka nodularnog lijeva EN-GJS-600-3 u lijevanom stanju. Kod dva različita stanja uzoraka izotermički poboljšanog nodularnog lijeva razlika u tvrdoći uzrokovana je razlikom u veličini ausferitnih zrna te obliku bainitnog ferita [22].

Udarni rad loma

Postupkom izotermičke pretvorbe za obje temperature značajno su porasle vrijednosti udarnog rada loma, s time da je kod uzoraka ADI 380 udarni rad loma znatno veći nego kod ADI 240. Razlog tome je razlika u obliku bainitnog ferita, što je potvrdila svjetlosna i FE SEM analiza. Udarni rad loma kod ova dva ADI materijala obrnuto je proporcionalan njihovoj tvrdoći. Ono što se uočava kod izmjerenih vrijednosti su po dva ekstrema koji se pojavljuju kod ADI-a, čiji su iznosi znatno veći od (prosjeka) ostalih rezultata. Ekstremi ukazuju na grešku u strukturi u vidu moguće lokalne nakupine žilavije austenitne faze ili prisutnost žilave uključine.

Kugličarenje ADI 240

Izotermičkim poboljšavanjem kod uzoraka ADI 240 ostvaren je znatno veći porast tvrdoće u odnosu na uzorke ADI 380 te su uzorci tog stanja odabrani za daljnja ispitivanja otpornosti na trošenje. U prvom ciklusu ispitivanja, postupku kugličarenja podvrgnuti su uzorci ADI 240. Uzorci su kugličareni s tri različita intenziteta „1.32 A“, „1,11 A“ i „0,99 A“, pri tlakovima 8, 6,5 i 5 bar. Najekonomičnijim se pokazao intenzitet „1,11 A“ pri 6,5 bar. Kod tog intenziteta ostvaren je najpovoljniji odnos prekrivanja, zasićenja i površinske deformacije obzirom na količinu utrošenog medija za kugličarenje i komprimiranog zraka. Jačim intenzitetom ostvarene su veće površinske deformacije čime se osigurava veća tvrdoća, ali je potrošnja medija za kugličarenje i komprimiranog zraka nesrazmjerno porasla.

Dakle, uzimajući u obzir sve faktore vezane za postupak kugličarenja, optimalni efekt postignut je kugličarenjem pri tlaku od 6,5 bar.

Zbog toga su zupčanici ADI 380 i ADI 240 kugličareni intenzitetom „1,11 A“ (6,5 bar).

Površinska tvrdoća ADI 240 K

Mjerenjem tvrdoće Brinellovom metodom na uzorcima za ispitivanje otpornosti na trošenje ADI 240 i ADI 240 K ustanovljen je porast tvrdoće kod kugličarenih uzoraka.

Kod najvećeg intenziteta kugličarenja („1.32 A“) zabilježen je prosječan porast tvrdoće od 6 % u odnosu na nekugličareni osnovni materijal.

U tankom površinskom sloju došlo je do unosa deformacija, usitnjavanja zrna, a time i povećanja tvrdoće, što je u skladu s literaturom [29].

Utvrđeno je da porast tvrdoće ovisi o intenzitetu kugličarenja.

Povećanjem površinske deformacije proširuje se zona utjecaja kugličarenja, a time i tvrdoća.

Obzirom da se radi o tankom sloju utjecaja kugličarenja, na izmjerenu tvrdoću utječe i tvrdoća podpovršinskog materijala na koju se površinski sloj oslanja.

Osim prethodno navedenog, povećanju tvrdoće pridonijela je i pojava martenzita što je utvrđeno mikroskopskom i XRD analizom.

Otpornost na trošenje ADI – ADI K

Abrazijsko trošenje

Za pretpostaviti je da se kod svih ispitanih uzoraka najveći gubitak mase, pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje, javlja u prvoj fazi ispitivanja (prvim okretajima kotača). Razlog tome je početna površinska hrapavost. U toj fazi dolazi do zaglađivanja površine (skidanja neravnina) uslijed kontakta uzorka s gumenim kotačem i abrazivom.

U drugoj fazi dodirna površina je veća zbog nestanka neravnina čime je specifični tlak po jedinici površine smanjen, što rezultira smanjenim gubitkom mase.

U prikazu prosječnih gubitaka mase po ciklusu, slika 97, može se uočiti da je ukupni najveći gubitak kod nekugličarenog uzorka, što je rezultat najvećeg trošenja. U postocima, prosječan gubitak mase po ciklusu kod nekugličarenog uzorka je 18 % veći od prosječnog gubitka svih kugličarenih uzoraka. Najmanji gubitak mase ostvaren je kod uzorka kugličarenih s najvećim intenzitetom. To se može objasniti najvećom površinskom tvrdoćom ostvarenom najvećim intenzitetom kugličarenja. Iz rezultata dobivenih ispitivanjem može se zaključiti da postupak kugličarenja predstavlja mehanizam površinskog otvrdnuća koji povoljno utječe na povećanje otpornosti ADI materijala na trošenje abrazijom.

Erozijsko trošenje ADI - ADI K

Erodiranje kvarcnim pijeskom (SiO₂ - veliki)

Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje kvarcnim pijeskom pokazuje da je otpornost na trošenje nekugličarenih uzoraka ADI-a bolja od kugličarenih ADI K materijala, za iste primijenjene uvjete.

Iz dijagrama na slici 102 vidi se da je u prvom ciklusu ispitivanja kod svih uzoraka došlo do podjednakog gubitka mase.

U drugom ciklusu erodiranja nekugličarenih uzoraka ADI 240 nema gubitka mase, dok kod kugličarenih uzoraka to nije slučaj. Uzrok tome može biti veća tvrdoća površine kod kugličarenih uzoraka.

Mekši materijal ima bolju sposobnost tečenja, u odnosu na tvrđi i krhkiji. Tečenjem se dijelovi (nekugličarenog) materijala pomiču ali bez odlamanja, dok kod tvrdog materijala to nije slučaj već gubitak mikro čestica započinje znatno ranije.

Trajanjem procesa erodiranja, površina nekugličarenog uzorka, uslijed udara čestica pijeska postepeno otvrdnjava te postaje tvrđa i krhkija pa poprima karakteristike površine kugličarenih uzoraka, nakon čega započinje ubrzano trošenje uslijed umora površine.

Na temelju prosječnih gubitaka mase po ciklusu ispitivanja, slika 103, može se zapaziti da najmanji ukupni gubitak mase nakon pet ciklusa ispitivanja imaju nekugličareni uzorci, dok najveći gubitak mase pokazuju uzorci kugličareni intenzitetom „1,11 A“.

Iz prethodno navedenog proizlazi da kugličarenje nema značajniji utjecaj na otpornost eroziji pijeskom.

Erodiranje čeličnim kuglicama

Kod ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje čeličnim kuglicama utvrđeno je da većina uzoraka ima mali gubitak mase nakon prvog ciklusa, slika 105. To se može objasniti dimenzijom i oblikom kuglica te stanjem hrapavosti površine. U prvom ciklusu dolazi do izravnavanja površinskih neravnina. Površinske nepravilnosti se zaglađuju tj. gnječe, pri čemu gotovo i nema skidanja čestica i gubitka materijala.

Porast trošenja se javlja u drugom ciklusu, kada dolazi do prvih znakova umora, što rezultira gubitkom mase. Najveću ujednačenost gubitka mase po ciklusu trošenja pokazuju uzorci kugličareni intenzitetom „0,99 A“, dok najmanji ukupan gubitak mase, nakon pet ciklusa, imaju uzorci kugličareni intenzitetom „1,11 A“.

U usporedbi s erozijom pijeskom, uzorci erodirani kuglicama pokazuju manji ukupni gubitak mase, što znači da ovaj mehanizam trošenja ima manje štetan utjecaj na ispitivani materijal.

Uzrok tome se može potražiti u dimenzijskoj i geometrijskoj različitosti eroziva. Naime, pijesak ima nepravilniju formu s oštrijim bridovima u odnosu na čelične kuglice čija je površina znatno veća i pravilnija. Oštri i nepravilni bridovi na zrcima pijeska lakše zadiru u erodirani materijal i odlamaju njegove mikroskopski male dijelove.

FZG postupak ispitivanja

Rezultati pogonskog ispitivanja trošenja zupčanika FZG postupkom pokazali su znatno veću trajnost izotermički poboljšanih zupčanika u odnosu na zupčanik od nodularnog lijeva.

Zupčanici od ADI-a izdržali su znatno veći broj ciklusa do potpunog istrošenja površine zubi u odnosu na NL (EN-GJS-600-3) zupčanik.

Najveću trajnost pokazao je zupčanik ADI 240. Njime je prenesen rad 3,2 puta veći od rada prenesenog NL zupčanikom, slika 110.

Kod uzoraka ADI 380 i ADI 380 K vidi se jasna razlika u otpornosti na trošenje zbog učinka kugličarenja. Postupkom kugličarenja otvrdnut je površinski sloj zubi usitnjavanjem kristalnih zrna i stvaranjem martenzita. To je rezultiralo znatno većom otpornošću na trošenje, a time i mogućnošću ostvarenja većeg broja ciklusa do istrošenja. Objašnjenje leži u činjenici da do najvećeg smičnog naprezanja dolazi kod koncentriranog dodira (tzv. Hertzovo naprezanje) [36] u podpovršinskom sloju, gdje nastaju inicijalne pukotine.

Kod uzorka ADI 380 širenje pukotine prema površini je nesmetano, što dovodi do ranijeg odlamanja dijelova površinskog sloja.

Kod uzorka ADI 380 K širenje pukotine prema površini je usporeno zbog tankog površinskog sloja kugličarenjem usitnjenih kristalnih zrna i njihovog velikog broja granica te unesenih tlačnih naprezanja.

Ispitivanje je pokazalo manju trajnost zupčanika ADI 240 K u odnosu na zupčanik ADI 380 K. Uzrok tome je također razlika u veličini kristalnog zrna i žilavosti u podpovršinskom sloju, gdje pukotine nastaju.

Analiza ADI i ADI K zupčanika, nakon FZG testa

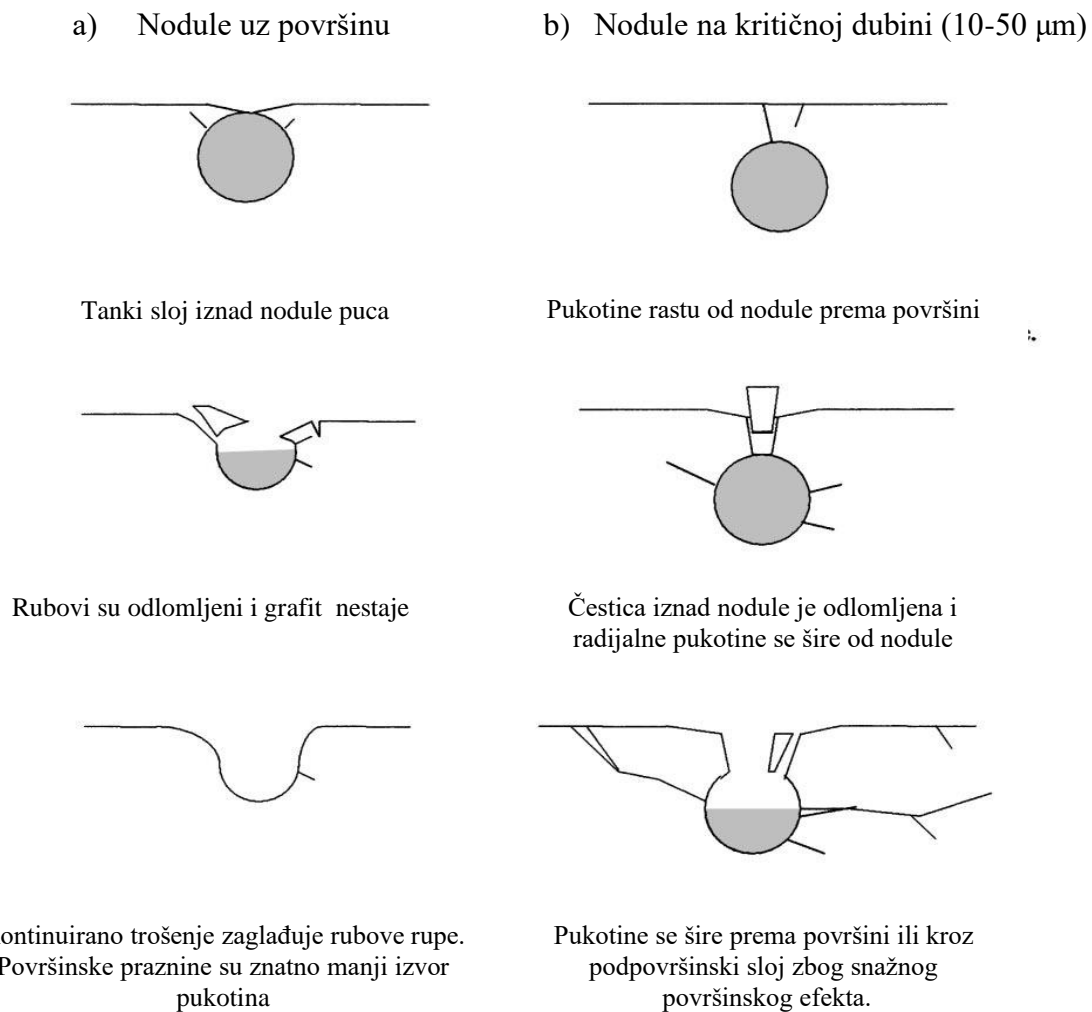
Tijekom postupka ispitivanja, površinska hrapavost zubi je nestala i došlo je do klizanja koje ima važan utjecaj na daljnje ponašanje i izgled površine. To upućuje na sposobnost materijala da se prilagodi lokalnim plastičnim deformacijama, pridonese promjeni površine omogućavajući bolji kontakt i tiši rad ispitnih uzoraka.

Na slici 113 uočavaju se praznine ili djelomično prazna mjesta gdje je bio grafit. Destrukcija kontaktne površine očitovala se u nastanku rupičanja (pitinga) i odvajanju površinskog sloja. Napuštanje grafita iz rupica započelo je tijekom strojne obrade površine zubi (rezanjem površinskih nodula), a nastavilo se u postupku ispitivanja, gnječenjem uslijed pritiska na površinu, utjecaja maziva i klizanja [53]. To je pojava koja je rezultirala rupičastim izgledom radne površine ADI-a uz obogaćivanje sredstva za podmazivanje ugljikom u kojem su ispitni uzorci bili uronjeni. Brzina promjena i nastanak rupica ovisio je o radnim uvjetima. Visoki

stupanj klizanja uzrokuje njihovo povećanje, ali ih može i popuniti drugim materijalom s površine kao i prikriti male pukotine nastale uslijed umora.

Pažljivom analizom površine može se uočiti da se veliki broj karakterističnih malih pukotina prostire duž svih radnih površina. Pukotine nastaju u radijalnom smjeru, a ispod tih pukotina su grafitne nodule, što vodi zaključku da je veliko opterećenje uzrokovalo pucanje površine u niže otpornim zonama. Dakle, nodule djeluju kao koncentratori naprezanja i pridonose iniciranju pukotina već kod graničnog opterećenja [54]. To je mehanizam umora nodularnog lijeva dugotrajnim opterećenjem, ako nema drugih prisutnih oštećenja u matrici.

Ovisno o dubini na kojoj se nodule nalaze pod površinom i uvjetima lokalnog naprezanja, pojavljuju se najmanje dva različita tipa nastanka i razvoja pukotina. Shematski su prikazani na slici 189.



Slika 189: Shematski prikaz nastanka i razvoja pukotina u području nodula grafita [54]

Uvjeti za prikazane modele širenja pukotina ovise o veličini grafitnih nodula, stanju materijala, opterećenju površine, veličini/nivou klizanja, hrapavosti površine i o dubini na kojoj se nodule nalaze.

Prisutnost plitkih, površinskih nodula implicira rano nastajanje pukotina na površini, uzrokovanih povećanim pritiskom. Ta vrsta površinskih pukotina nema značajnih posljedica za površinu materijala, jer ne uzrokuju odlamanje dijelova površinskog sloja.

Postojanje nodula ispod površine osnovni je uzrok nastanka umora površine kad se dosegne granični odnos između dubine i lokalnog naprezanja.

Širenje pukotina od nodule prema površini omogućava penetraciju mazivog ulja u šupljinu oko nodule i uzrokuje potpuno otvaranje. Taj efekt je snažniji i utjecajniji od skidanja površinskog sloja kontinuiranim trošenjem [54].

Osim nodula, na umor površine utječu i greške nastale pri lijevanju, pukotine, šupljine i sl., koje također predstavljaju koncentratore naprezanja i inicijalna mjesta nastanka pukotina. Spajanje pukotina i njihovo širenje prema površini, također dovodi do odvajanja čestica s površine.

Mikrotvrdoća

Na svim zupčanicima obavljeno je mjerenje mikrotvrdoće u površinskom sloju do dubine 600 μm .

Iz dobivenih rezultata mjerenja proizlaze dvije kvantitativno različite skupine krivulja raspodijele tvrdoće po poprečnom presjeku. Kod uzorka u sirovom (lijevanom) stanju te kod izotermički poboljšanih uzoraka, bez obzira na temperaturu izotermičkog poboljšavanja (380 °C ili 240 °C), uočljivo je sniženje tvrdoće uz rub uzoraka. Taj pad tvrdoće uz sami rub uzoraka prostire se do dubine oko 60 μm .

Dok bi uzrok malom sniženju tvrdoće (15 HV 0,025) kod uzorka u lijevanom stanju (EN-GJS-600-3) moglo biti razugličenje koje je nastalo tijekom lijevanja, kod preostala dva uzorka koji su izotermički poboljšani (prisutno veće sniženje tvrdoće uz rub) uz spomenuto razugličenje u lijevanom stanju, moglo je doći do razugličenja i tijekom austenitizacije ovih uzoraka na temperaturi 900 °C kao i pri postupku izotermičkog poboljšavanja.

Nasuprot tome, kod kugličarenih uzoraka nakon izotermičkog poboljšavanja za višu temperaturu izotermičke pretvorbe, krivulja tvrdoće je praktički nepromijenjenog tijeka do površine, dok za nižu temperaturu izotermičke pretvorbe ona raste približavajući se površini, slika 116.

Činjenica je da je kod tih uzoraka polazno stanje bilo s nešto sniženom tvrdoćom uz površinu, a da je nakon kugličarenja tvrdoća u odnosu na polaznu porasla, nedvojbeno ukazuje da je tijekom kugličarenja došlo do otvrdnuća u rubnom sloju i to za približno jednaki iznos (oko 50 HV 0,025) i kod uzorka izotermički poboljšanog pri nižim (ADI 240 K) i onoga pri višim temperaturama izotermičke pretvorbe (ADI 380 K).

Uzrok površinskog otvrdnjavanja je usitnjenje kristalnih zrna na površini te pretvorba austenita u martenzit, što je potvrđeno nalazima svjetlosne i FE SEM mikroskopije te XRD analizom.

Analiza mikrostrukture (svjetlosna i FE SEM), kugličareno - nekugličareno

Zupčanicima ADI 380 i 380K

Analiza mikrostrukture zupčanika pokazala je da se struktura zupčanika ADI 380 sastoji od bainitnog ferita paperjastog oblika karakterističnog za područje „gornjeg“ bainita, visoko ugljičnog stabiliziranog austenita te nodula grafita. Ausferitna struktura zupčanika ADI 380 na površini zuba jednaka je strukturi u sredini zuba.

Kod zupčanika ADI 380 K analizom je uočena promjena mikrostrukture do koje je došlo uslijed kugličarenja. Na slikama mikrostrukture boka/površine zuba zupčanika ADI 380 K, vidljiva je razlika u odnosu na mikrostrukturu u sredini zuba. Uočeno je da je na površini zuba uslijed kugličarenja došlo do usitnjenja ausferitnih zrna i do pojave martenzita.

Zupčanicima ADI 240 i 240K

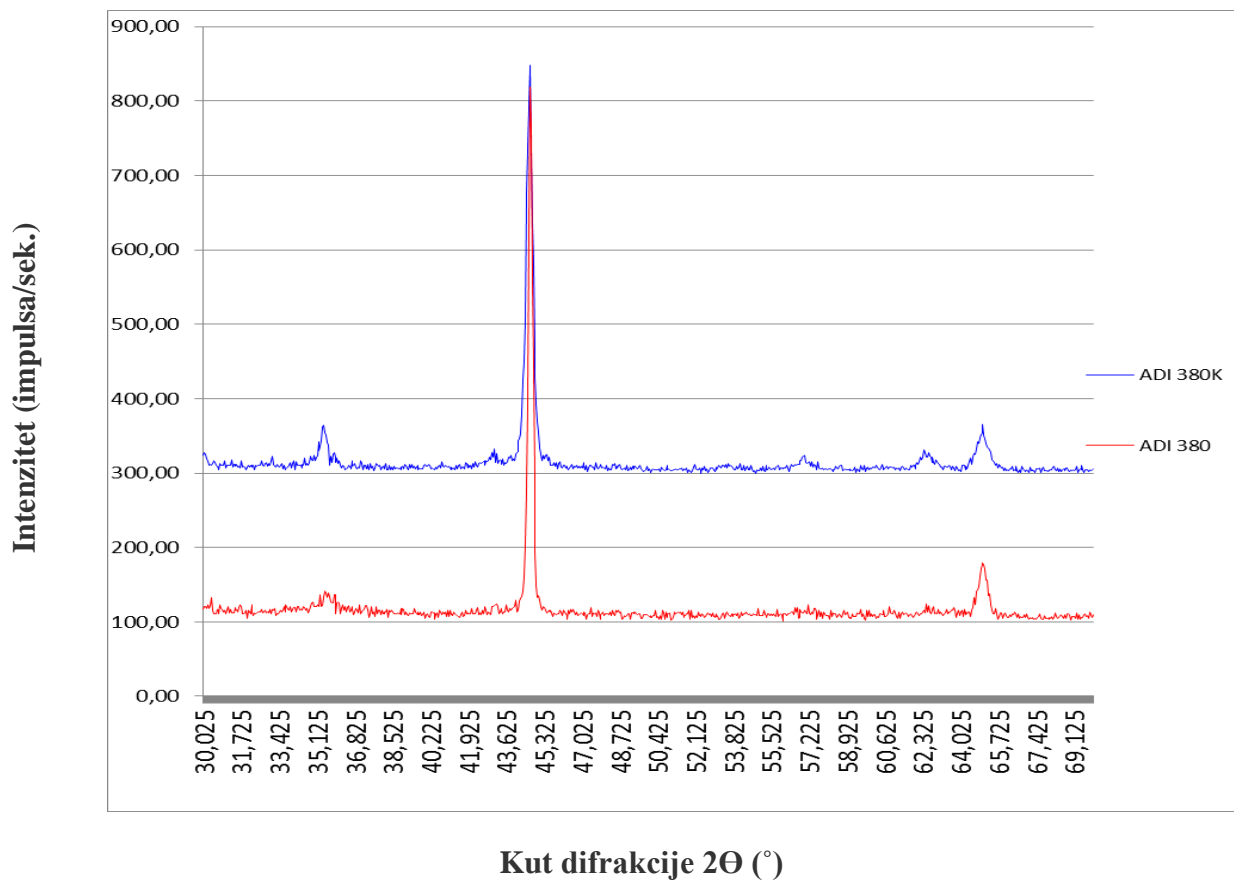
Analiza mikrostrukture zupčanika ADI 240 i 240 K pokazala je sličnosti s mikrostrukturom zupčanika ADI 380 i ADI 380 K.

Na površini boka zuba ADI 240 K osim karakteristične željezne matrice „donjeg“ bainita - igličastog oblika, s visokougljičnim stabiliziranim austenitom i nodulama grafita, uočen je također martenzit uz sitnija ausferitna zrna.

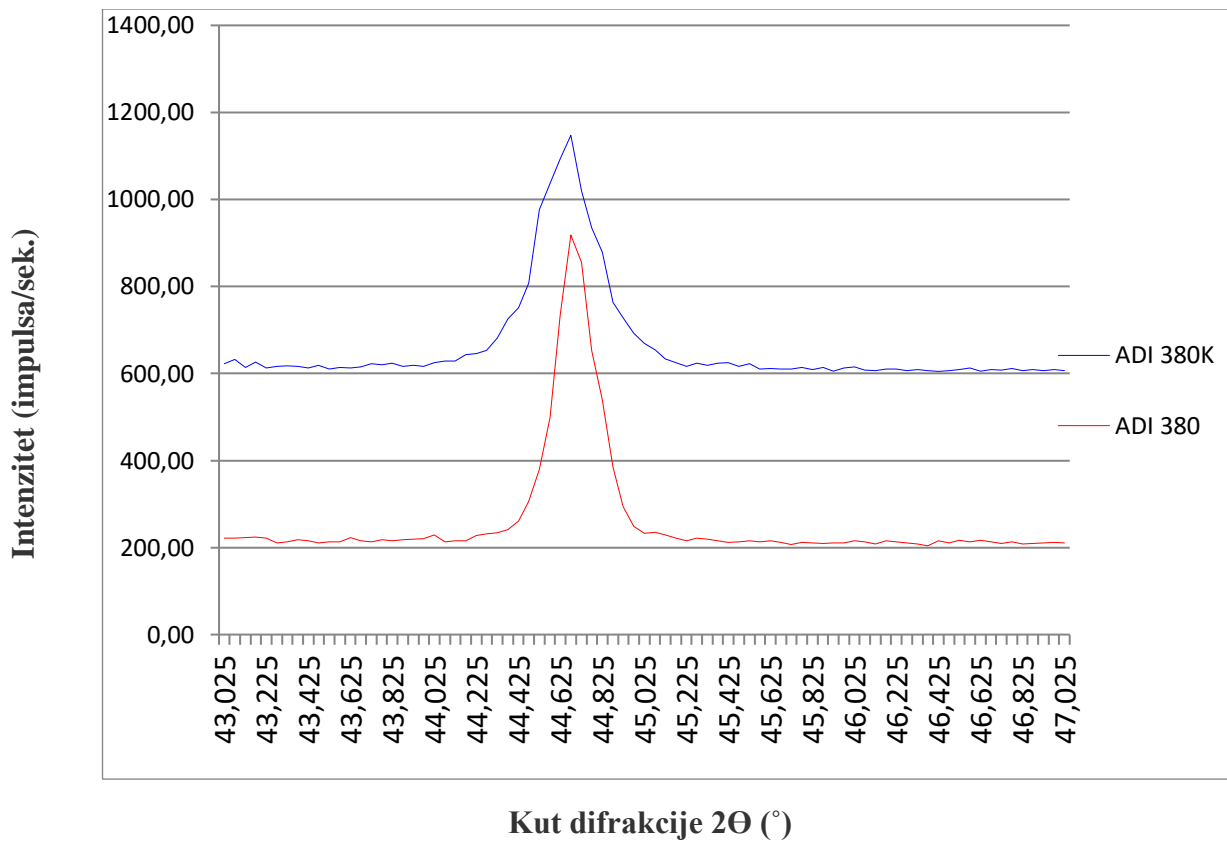
Analize svjetlosnim i FE SEM mikroskopom potvrdile su pretpostavke o promjeni mikrostrukture u površinskom sloju ADI 240 nastale uslijed kugličarenja.

Rendgenska difrakcija (XRD analiza)

Zupčanci ADI 380 i 380K



Slika 190: Pregledni difraktogram uzoraka ADI 380 i ADI 380 K



Slika 191: Detaljni difraktogram uzoraka ADI 380 i ADI 380K

Iz difraktograma na slici 191, za uzorke izotermički poboljšane na temperaturi 380 °C može se na temelju tumačenja difrakcije zaključiti sljedeće: mikrostruktura izotermički poboljšanog nodularnog lijeva na 380 °C sastoji se od ferita i austenita, nema prisutne karbidne faze što je u skladu s provedenom toplinskom obradom.

Vidljiva je razlika u visini difrakcijskih maksimuma koja je za nekugličareno stanje jednu trećinu veća nego kod kugličarenog stanja što ukazuje na teksturu tj. na središnost mikrostrukture.

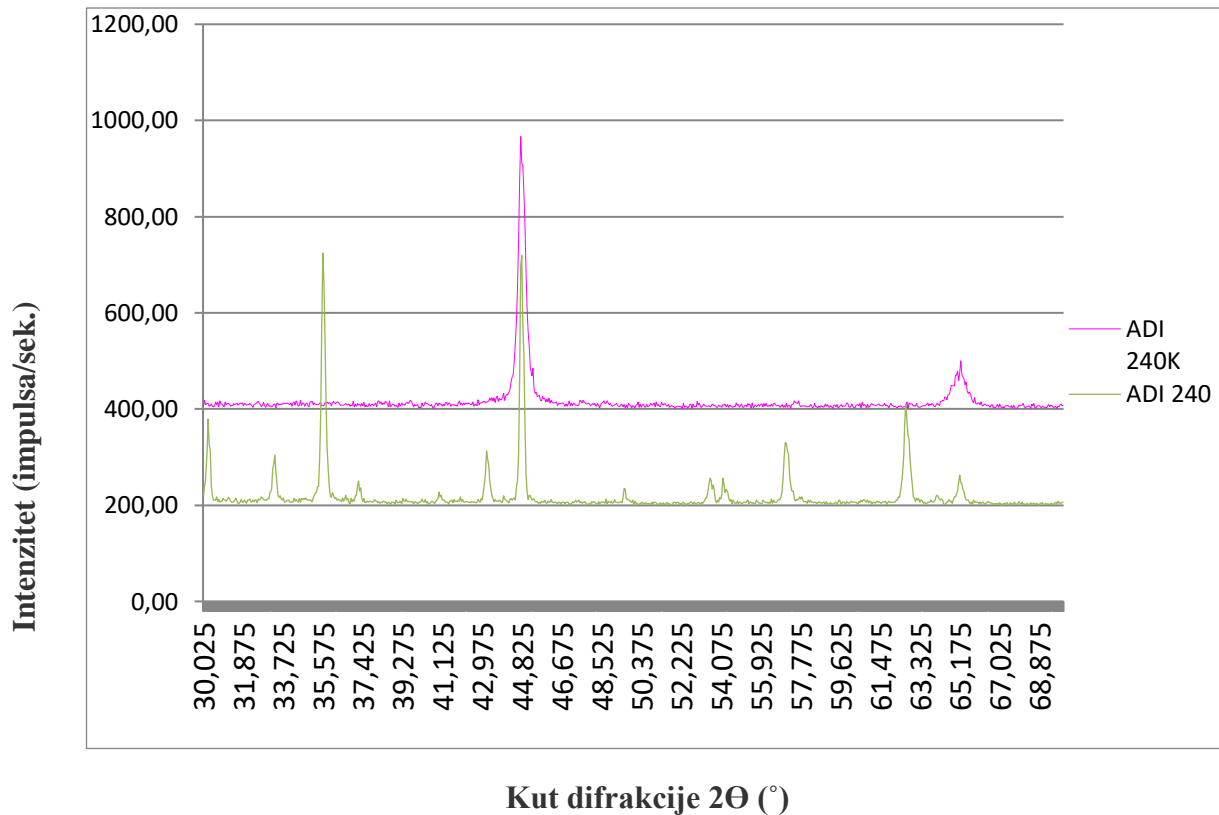
Razlika u visini najznačajnijeg difrakcijskog maksimuma, koji se odnosi na feritnu fazu (110) ukazuje na povećanje nesređenosti kristalnih rešetki uslijed gibanja dislokacija uzrokovanog kugličarenjem.

Veća širina na polovici visine difrakcijskog maksimuma kugličarenog uzorka upućuje na znatno sitnije zrno nego što je kod nekugličarenog uzorka.

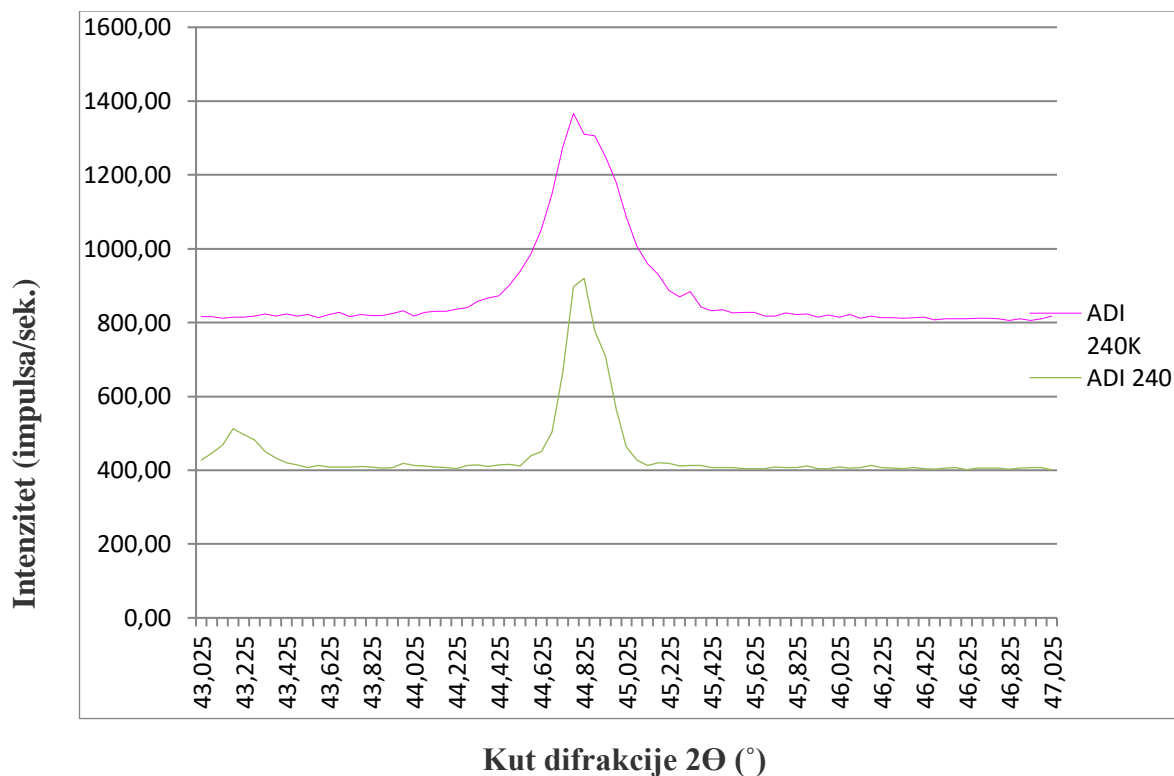
Izbočenje s lijeve strane kod kugličarenog uzorka potvrđuje prisutnost martenzita u mikrostrukтури koji je nastao uslijed kugličarenja. Izbočina nije prisutna na difraktogramu nekugličarenog uzorka.

Prema provedenoj toplinskoj obradi i TTT dijagramu izotermičkog poboljšavanja ispitivanog nodularnog lijeva nije moglo doći do nastanka martenzitne faze toplinskom obradom [55].

Zupčanici ADI 240 i ADI 240K



Slika 192: Pregledni difraktogram uzoraka ADI 240 i ADI 240K



Slika 193: Detaljni difraktogram uzoraka ADI 240 i ADI 240 K

Provedena XRD analiza na uzorcima izotermički poboljšanim na temperaturi 240 °C, slika 193, pokazuje prisutnost austenita i ferita bez karbidne faze. Manji pikovi na difraktogramu ADI 240 potječu od nečistoća. Da pikovi potječu od karbida, bili bi prisutni i u uzorku ADI 240 K, obzirom da su zajedno prošli toplinsku obradu.

Difrakcijski maksimum visinom i oblikom ukazuje na usitnjenje kristalnog zrna kod kugličarenog uzorka. Širina na polovici visine je znatno veća što upućuje na veću prisutnost BCC faze, a moguće i BCT faze obzirom da se preklapaju difrakcijski maksimumi. To bi moglo ukazivati na prisutnost martenzita obzirom da nije vidljiva nepravilnost na lijevoj strani difrakcijskog maksimuma koji se odnosi na ferit (110).

DRUGI CIKLUS ISPITIVANJA

Izotermičko poboljšavanje - ADI 240

Temperature izotermičkog poboljšavanja bila je 240 °C. Na temperaturi austenitizacije od 900 °C uzorci su zadržani 1h nakon čega su ohlađeni u solnoj kupki AS 140 na 240°C, gdje su zadržani 1h. Potom su ostavljeni da se hlade na zraku do sobne temperature, nakon čega su stavljeni u kantu s vodom kako bi se sa njih otopila zaostala sol.

Prethodno spomenutim temperaturama izotermičke pretvorbe postignuta je potpuna austenitizacija kod zagrijavanja, a hlađenjem u solnoj kupki i kasnije na zraku izbjegnuto je nastajanje perlita i karbida.

Laboratorijska ispitivanja mikrostrukture potvrdila su ispravnost provedenog postupka izotermičkog poboljšavanja.

Kugličarenje ADI 240

U drugom ciklusu ispitivanja ADI-a, postupku kugličarenja podvrgnuti su uzorci ADI 240, uzorci za ispitivanje na trošenje. Uzorci su kugličareni s tri različita intenziteta „1,19 A“, „1,03 A“ i „0,93 A“.

Kao u prvom ciklusu ispitivanja, većim intenzitetom ostvarene su veće površinske deformacije, a potrošnja medija za kugličarenje i komprimiranog zraka bila je znatno veća.

Površinska tvrdoća uzoraka ADI 240

Uzorci za prošireno ispitivanje otpornosti na trošenje abrazijom i erozijom, izotermički su poboljšani u drugom ciklusu toplinske obrade i to u drugoj solnoj kupki (AS 140). Razlika tvrdoće uzoraka izotermički poboljšanih u prvom u odnosu na one poboljšane u drugom ciklusu izotermičke pretvorbe nastala je zbog razlike u solnoj kupki. Solna kupka AB 1, korištena u prvom ciklusu izotermičke pretvorbe, u sebi sadrži elemente koji kemijski reagiraju s osnovnim materijalom i dodatno otvrdnjuju površinu. Solna kupka AS 140 je neutralna i nema kemijske reakcije s osnovnim materijalom.

Radi utvrđivanja učinka kugličarenja nakon drugog ciklusa izotermičke pretvorbe, ispitana je površinska tvrdoća ADI 240 (nekugličareno – kugličareno), na tri uzorka.

Na svim uzorcima je došlo do povećanja tvrdoće nakon kugličarenja, bez obzira na intenzitet kugličarenja. Dobiveni rezultati još jednom potvrđuju da je površinska tvrdoća više porasla kod uzoraka kugličarenih većim intenzitetom.

Mikrotvrdoća kugličarenog sloja ADI 240

Iz dobivenih rezultata mjerenja proizlaze dvije kvantitativno različite skupine krivulja raspodijele tvrdoće po poprečnom presjeku. Kod nekugličarenog izotermički poboljšanog uzoraka uočljivo je sniženje tvrdoće uz rub uzoraka. Taj pad tvrdoće uz sami rub uzoraka prostire se do dubine 200 μm , slika 146.

Uzrok malom padu tvrdoće (16 HV 0,05) kod nekugličarenog uzorka moglo bi biti razugličenje koje je nastalo tijekom izotermičkog poboljšavanja. Prema dubljim slojevima uzorka (600 – 700 μm) tvrdoća varira do ± 46 HV 0,05 u odnosu na prosječnu. Obzirom da je napravljeno samo jedno mjerenje (u svrhu usporedbe sa kugličarenim uzorcima), za pretpostaviti je, na temelju tog mjerenja, da je mikro tvrdoća nekugličarenog uzorka ujednačena u dubini iznad 200 μm .

Kod izotermički poboljšanih i kugličarenih uzoraka, nema pada tvrdoće uz rub, a tvrdoća je nešto niža nego kod nekugličarenog uzorka. Svi kugličareni uzorci pokazuju povećanje mikro tvrdoće od površine pa do dubine 600 μm , slika 146.

Uzrok tome je kugličarenjem skinut razugličeni sloj, usitnjenje kristalnih zrna te pretvorba austenita u martenzit, što je potvrđeno nalazima svjetlosne i FE SEM mikroskopije kao i XRD analizom.

Otpornost na abrazijsko trošenje ADI 240 K i ADI 240

Abrazija ADI 240 K - SiO₂ – veliki

Najveći ukupan gubitak mase, nakon tri ciklusa ispitivanja, ostvaren je kod uzoraka kugličarenih najmanjom intenzitetom. Također, i najveći prosječan gubitak mase je bio kod istih uzoraka, slika 147 i 148.

S druge strane najveći intenzitet kugličarenja nije ostvario i najveću otpornost na abrazijsko trošenje jer je najbolje rezultate dalo kugličarenje sa srednjim intenzitetom „1,04 A“.

Najmanje odstupanje gubitka mase po ciklusu ostvareno je kod uzoraka kugličarenih s „1,04 A“. Ujedno, kod istih uzoraka u prvom ciklusu ukupan gubitak mase je bio najmanji.

ZAKLJUČAK: Iz dobivenih rezultata ispitivanja da se zaključiti, da intenzitet kugličarenja ima učinak na abrazijsko trošenje abrazivom oznake SiO₂ – veliki, ali za preciznije određenje njegovog učinka, potreban je veći broj pokusa.

Abrazija ADI 240 K - SiO₂ – mali

Iz dobivenih rezultata, vidi se minimalna razlika u gubitku mase po ciklusu ispitivanja kod svih uzoraka, za sva tri ciklusa, bez obzira na intenzitet kugličarenja, slika 149.

Najveći ukupan gubitak mase ostvaren je kod uzoraka kugličarenih najvećim intenzitetom.

ZAKLJUČAK: Intenzitet kugličarenja ima značajan utjecaj na trošenje abrazivom oznake SiO₂ – mali.

Abrazija ADI 240 K - Al₂O₃

Slično kao u slučaju abrazije abrazivom oznake SiO₂ – mali, razlika u gubitku mase po ciklusu ispitivanja kod svih uzoraka (u sva tri ciklusa) je minimalna, bez obzira na intenzitet kugličarenja, slika 151.

Najveći prosječan gubitak mase za sva tri ciklusa, ostvaren je kod uzoraka kugličarenih najmanjim intenzitetom, slika 152. Ipak, razlika nije značajna u odnosu na gubitak mase kod uzoraka kugličarenih većim intenzitetima.

Zaključak bi bio, da intenzitet kugličarenja nema značajan utjecaj na trošenje abrazivom oznake Al₂O₃.

ZAKLJUČAK: Obzirom na vrstu i veličinu abraziva: SiO₂ – veliki (0,25-0,50 mm); SiO₂ – mali (0,15-0,25 mm); Al₂O₃ (0,063-0,2 mm) može se zaključiti da na intenzitet trošenja ADI 240 K materijala veći utjecaj ima granulacija abraziva, od samog kemijskog sastava (vrste) abraziva.

Abrazija različitim abrazivima nekugličarenih, površinski neobrađenih uzoraka ADI 240

Najmanji gubitak mase nekugličarenih, površinski neobrađenih uzoraka ADI 240, ostvaren je uslijed abrazivnog djelovanja SiO₂ – veliki, slika 153.

Najveći prosječan gubitak mase za sva tri ciklusa, ostvaren je abrazivom oznake SiO₂ – mali, ali gotovo identičan kao abrazivom oznake Al₂O₃, slika 154.

Abrazivi male granulacije, a različitog kemijskog sastava, imali su gotovo identičan učinak.

Za pretpostaviti je, da obzirom na znatno veću granulaciju SiO₂ – veliki ima manje prekrivanje površine na mjestu kontakta gumeni kotač – uzorak i zbog toga je ostvaren manji gubitak mase uzorka. Odnosno manja je površina u kontaktu s abrazivom, zbog čega dolazi do manjeg gubitka mase.

Abrazija različitim abrazivima nekugličarenih, površinski obrađenih uzoraka ADI 240

Slično kao u slučaju površinski neobrađenih uzoraka, najmanji gubitak mase nekugličarenih, površinski obrađenih uzoraka ADI 240, ostvaren je uslijed abrazivnog djelovanja SiO₂ – veliki,

slika 155.

Abrazivi manje granulacije, iako su različitog kemijskog sastava imali su puno veći, gotovo identičan učinak. I u ovom slučaju, veća granulacija je imala slabiji učinak na gubitak mase uzorka.

Abrazija različitim abrazivima, različitim intenzitetom kugličarenih uzoraka ADI 240

Intenzitet „0,94 A“

Abrazijom uzoraka kugličarenih intenzitetom „0,94 A“, najmanji gubitak mase uzoraka ADI 240 K, ostvaren je uslijed abrazivnog djelovanja SiO₂ – veliki, slika 157.

Može se zaključiti, da je i u ovom slučaju granulacija imala presudnu ulogu bez obzira na kemijski sastav abraziva. Prethodnu tvrdnju potvrđuje gotovo identičan gubitak mase uzoraka abradiranih s SiO₂ - mali i Al₂O₃, koji su gotovo iste granulacije, ali znatno manje u odnosu na SiO₂ – veliki.

Intenzitet „1,04 A

Abrazijom uzoraka kugličarenih intenzitetom „1,04 A“, najmanji gubitak mase uzoraka ADI 240 K, ostvaren je uslijed abrazivnog djelovanja SiO₂ – veliki, slika 159.

Gotovo ista situacija je kao u slučaju abrazije uzoraka kugličarenih intenzitetom „0,94 A“.

Intenzitet „1,19 A“

Slično, kao u dva prethodna slučaja, abrazija uzoraka kugličarenih intenzitetom „1,19 A“, ima najmanji gubitak mase uzoraka, ostvaren uslijed abrazivnog djelovanja SiO₂ – veliki, slika 161.

ZAKLJUČAK: Intenzitet kugličarenja nema utjecaj na abrazivsko djelovanje različitim abrazivima. Granulacija abraziva ima značajniji utjecaj od kemijskog sastava (vrste) abraziva.

Otpornost na erozijsko trošenje ADI 240K

Zbog različite granulacije eroziva i specifične mase, značajno se razlikuje ukupna masa čestica koje su udarile o uzorak tijekom ispitivanja. Zbog toga je gubitak mase uzorka promatran u jedinicama $\mu\text{g/g}$ eroziva.

ADI 240 K kugličaren intenzitetom „0,94 A“, erodiran različitim erozivima i kutovima erodiranja

Iz dijagrama na slici 163, vidi se da je najmanji gubitak mase kod svih uzoraka ostvaren pri kutu 60° . To bi značilo da je kut 60° najpovoljniji u smislu udara eroziva i otpornosti uzoraka na trošenje. Kod ostala dva kuta erodiranja (30° , 90°) trošenje je izraženije, slika 163. Najveći ukupan gubitak mase uzorka po gramu eroziva ostvaren je kod erodiranja s SiO_2 – veliki.

Za pretpostaviti je, da su veličina zrna, njihova masa te oštri bridovi razlog najvećem ostvarenom gubitku mase uzorka.

Druga dva eroziva (Al_2O_3 i čelične kuglice), ostvarila su gotovo identičan ukupan i prosječan gubitak mase. Al_2O_3 zbog male mase, a čelične kuglice zbog glatke i zaobljene površine.

ADI 240 K kugličaren intenzitetom „1,04 A“, erodiran različitim erozivima i kutovima erodiranja

Kao kod ADI 240 K kugličarenog intenzitetom „0,94 A“, i u ovom slučaju najmanji gubitak mase, kod svih uzoraka ostvaren je pri kutu 60° , slika 165.

Znatno veći gubitak mase, ostvaren je erodiranjem erozivom oznake SiO_2 – veliki, i to za sva tri kuta. Pretpostavka je, da je uzrok isti kao u prethodnom slučaju - veličina zrna, njihova masa te oštri bridovi.

Za razliku od uzoraka ADI 240 K kugličarenog intenzitetom „0,94 A“, u ovom slučaju prosječan gubitak za sva tri kuta razlikuje se kod erodiranja s Al_2O_3 u odnosu na erodiranje čeličnim kuglicama. Nešto veći gubitak ostvaren je u slučaju čeličnih kuglica, slika 166.

ADI 240 K kugličaren intenzitetom „1,19 A“, erodiran različitim erozivima i kutovima erodiranja

U slučaju erodiranja ADI 240 K kugličaren intenzitetom „1,19 A“, najveći gubitak mase ostvaren je erodiranjem s SiO_2 – veliki, za sva tri kuta.

Za primijetiti je na dijagramskom prikazu, slika 167, da se u slučaju SiO_2 – veliki prvi put javlja veći gubitak mase pri kutu 60° , u odnosu na ostala dva kuta (30° , 90°).

Druga dva eroziva, kao u prethodnim slučajevima, najmanji gubitak su ostvarili pri kutu 60° . Njihov prosječan gubitak, za sva tri kuta, gotovo je identičan, slika 168.

ZAKLJUČAK: veći utjecaj na trošenje ima granulacija/masa abraziva, od samog kuta erodiranja i kemijskog sastava (vrste) eroziva.

ADI 240 K kugličaren različitim intenzitetom, erodiran sa SiO_2 -veliki, pod promjenjivim kutom

Na dijagramu slika 169, dat je prikaz gubitka mase ADI 240 K nakon erodiranja s SiO_2 -veliki, za različite intenzitete kugličarenja i kutove erodiranja. Uzorci kugličareni najvećim intenzitetom najveći gubitak mase pokazuju pri kutu 60° , za razliku od onih kugličarenih s manjim intenzitetom. Gubitak mase za sva tri intenziteta i kuta relativno je ujednačen.

ZAKLJUČAK: Intenzitet kugličarenja i kut erodiranja nemaju značajniji utjecaj kod erodiranja erozivom oznake SiO_2 - veliki.

ADI 240 K kugličaren različitim intenzitetom, erodiran sa Al_2O_3 , pod promjenjivim kutom

Kod sva tri intenziteta kugličarenja, u slučaju erodiranja s Al_2O_3 , najmanje trošenje je ostvareno pri kutu od 60° . Iz slike 173, vidi se da je najveće trošenje nastalo kod uzoraka kugličarenih najmanjim intenzitetom i to pri najmanjem kutu, 30° .

Najmanje trošenje je ostvareno kod uzoraka kugličarenih najvećim intenzitetom i to za sva tri kuta, slika 176.

ZAKLJUČAK: Intenzitet kugličarenja ima utjecaj na eroziju erozivom oznake Al_2O_3 .

ADI 240 kugličaren različitim intenzitetom, erodiran čeličnim kuglicama, pod promjenjivim kutom

I u slučaju erodiranja čeličnim kuglicama najmanje trošenje je ostvareno pri kutu od 60° , za sva tri intenziteta kugličarenja, slika 177.

Kod uzoraka kugličarenih najvećim intenzitetom ostvaren je najmanji gubitak mase uzoraka, za sva tri kuta, slika 178, 179 i 180.

ZAKLJUČAK: Intenzitet kugličarenja ima utjecaj na eroziju čeličnim kuglicama.

ADI 240 nekugličaren, erodiran pod promjenjivim kutom, različitim erozivima

ADI 240 nekugličareni, strojno neobrađeni uzorci

SiO₂ - veliki, najmanji gubitak ostvaruje pod kutom od 30°. Iz toga proizlazi da povećanjem kuta erodiranja raste i gubitak mase materijala kod erodiranja erozivom oznake SiO₂ - veliki. Najmanji gubitak mase, ADI 240 nekugličareni, strojno neobrađeni uzorci pokazali su kod erodiranja erozivom oznake Al₂O₃, za sva tri kuta erodiranja. Za sva tri kuta, gubitak mase bio je minimalno povećan, što upućuje na to da kut erodiranja nema značajan utjecaj kod erodiranja nekugličarenog ADI 240 erozivom oznake Al₂O₃.

Za razliku od prethodna dva eroziva, kod erodiranja čeličnim kuglicama, najmanji gubitak mase je ostvaren erodiranjem pod kutom od 60 °.

ADI 240 nekugličareni, strojno obrađeni uzorci

Najveći gubitak mase po kutu, kod erodiranja strojno obrađenih uzoraka ADI 240 nekugličarenog, ostvaren je erozivom oznake SiO₂ - veliki. I u ovom slučaju najmanji gubitak mase, za sva tri eroziva, ostvaren je pri kutu od 60 °, slika 185.

SiO₂ - veliki ima masu veću od Al₂O₃, a bridove oštrije i tvrđe od čeličnih kuglica, zbog toga je s njime ostvaren najveći gubitak mase za sva tri kuta.

Čelične kuglice imaju relativno veliku granulaciju i masu. Obzirom na zaglađenu površinu, one više ostvaruju efekt kugličarenja površine nego erodiranja.

Statistička analiza rezultata drugog ciklusa triboloških ispitivanja i mikrotvrdoće

Abrazijsko trošenje

Tablica 50 prikazuje ukupan broj urađenih pokusa (9), od čega za svaki intenzitet po tri ponavljanja.

Tablica 50: Ukupan broj pokusa

Intenzitet kugličarenja	N - broj ponavljanja pokusa
„0,94 A“	3
„1,04 A“	3
„1,19 A“	3

U tablici 51 prikazani su rezultati statističke analize za abrazijsko trošenje.

Tablica 51: Rezultati statističke analize abrazijskog trošenja s tri različita abraziva

Abraziv	p za intenzitet kugličarenja
SiO ₂ - veliki	0,061
SiO ₂ - mali	0,000
Al ₂ O ₃	0,266

Kako je vidljivo iz tablice 51, varijanca promjenjivog faktora A (intenzitet kugličarenja) nije statistički značajna, odnosno intenzitet kugličarenja statistički značajno ne utječe na gubitak mase ispitivanog uzorka (trošenje) kada se radi o abrazivu oznake SiO₂ - veliki, uz signifikantnost od 5%. Kada se signifikantnost poveća na 10% tada se može zaključiti da intenzitet kugličarenja statistički značajno utječe na promjenu mase ispitivanog uzorka.

U slučaju kada se radi o abrazivu SiO₂ - mali varijanca promjenjivog faktora A (intenzitet kugličarenja) statistički je značajna, odnosno može se reći da intenzitet kugličarenja statistički značajno utječe na promjenu mase ispitivanog uzorka (trošenje), uz signifikantnost od 5 %.

Kada se govori o abrazivu Al₂O₃ može se zaključiti da je varijanca promjenjivog faktora A (intenzitet kugličarenja) nije statistički značajna, odnosno da intenzitet kugličarenja statistički značajno ne utječe na promjenu mase ispitivanog uzorka (trošenje), uz signifikantnost od 5%.

Regresijskom analizom napravljena je matematička formula utjecaja intenziteta kugličarenja na gubitak mase pri abraziji abrazivom SiO₂ – mali.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X$$

y –zavisna varijabla, u ovom slučaju gubitak mase

β_0 – konstantni član

β_1 - regresijski koeficijent, prikazuje promjenu zavisne varijable kada nezavisna poraste za jednu jedinicu

X – nezavisna varijabla, u ovom slučaju intenzitet kugličarenja

Dobiveni rezultat je:

$$\text{Gubitak mase} = 432,202 + 31,596 \times \text{intenzitet}$$

No, daljnjom analizom može se zaključiti kako je parametar β_0 (konstantni član) statistički značajan ($p = 0,000$), dok β_1 (intenzitet) nije statistički značajan ($p = 0,613$). Razlog tome što matematička formula nije statistički značajna može se naći u tablici broj 148 gdje je vidljivo kako prosječan gubitak mase nema linearnu promjenu budući da je najmanji gubitak mase pri srednjem analiziranom intenzitetu iznosa „1,04 A“.

Erozijsko trošenje

Tablica 52 prikazuje ukupan broj urađenih testova na erozijsko trošenje i s kojim parametrima. Kao što je vidljivo, napravljeno je po 9 ponavljanja za svaki od tri promatrana kuta te 9 ponavljanja za svaki od tri promatrana intenziteta kugličarenja.

Tablica 52: Ukupan broj ispitivanja na eroziju s tri različita eroziva, za različite intenzitete kugličarenja i različite kutove erodiranja

Intenzitet kugličarenja	N - broj ponavljanja pokusa
„0,94 A“	9
„1,04 A“	9
„1,19 A“	9
Kut erodiranja	N - broj ponavljanja pokusa
30	9
60	9
90	9

Da bi se napravila statistička analiza potrebno je postaviti statističku nultu hipotezu. Nulta hipoteza H_0 pretpostavlja da je varijanca promjenjivog faktora A jednaka nuli, odnosno da djelovanje faktora A na slučajnu varijablu X nije statistički značajno. Alternativna hipoteza H_1 tvrdi suprotno. Vrijednost „p“ označava vjerojatnost da opažena razlika postoji uz pretpostavku da je nulta hipoteza točna.

U tablici 53 prikazani su rezultati statističke analize za erozijsko trošenje.

Tablica 53: Rezultati statističke analize erozijskog trošenja s tri različita eroziva, za različite intenzitete kugličarenja i različite kutove erodiranja

Eroziv	p za kut erodiranja	p za intenzitet kugličarenja	p za kut erodiranja x intenzitet kugličarenja
SiO ₂	0,426	0,273	0,189
Al ₂ O ₃	0,000	0,013	0,250
čelične kuglice	0,001	0,013	0,324

Iz tablice 53 vidljivo je kako ni varijanca promjenjivog faktora A (kut erodiranja) ni varijanca promjenjivog faktora B (intenzitet kugličarenja) nisu statistički značajne, odnosno kut erodiranja i intenzitet kugličarenja statistički značajno NE utječu na promjenu mase ispitivanog uzorka (trošenje) kada se radi o erozivu SiO₂ - veliki, uz signifikantnost od 5 %.

Također, iz tablice 53 vidi se da ne postoji statistički značajan utjecaj između kuta erodiranja i intenziteta kugličarenja, pri signifikantnosti od 5 %.

Odnosno, kut erodiranja i intenzitet kugličarenja nemaju međusoban utjecaj pri signifikantnosti 5 %.

Nadalje, vidljivo je kako su varijanca promjenjivog faktora A (kut erodiranja) i varijanca promjenjivog faktora B (intenzitet kugličarenja) statistički značajne, odnosno kut erodiranja i intenzitet kugličarenja statistički značajno utječu na promjenu mase ispitivanog uzorka (trošenje) kada je eroziv Al₂O₃, uz signifikantnost od 5%. Također, vidljivo je da ne postoji statistički značajan utjecaj između kuta erodiranja i intenziteta kugličarenja, pri signifikantnosti 5%.

Ista statistička analiza napravljena je i kada su eroziv čelične kuglice, tako da se može zaključiti da su varijanca promjenjivog faktora A (kut erodiranja) i promjenjivog faktora B (intenzitet kugličarenja) statistički značajne, odnosno kut erodiranja i intenzitet kugličarenja statistički značajno utječu na promjenu mase ispitivanog uzorka (trošenje) kada je eroziv čelične kuglice,

uz signifikantnost od 5%. Također, ne postoji statistički značajan utjecaj između kuta erodiranja i intenziteta kugličarenja, pri signifikantnosti od 5%.

Unatoč tome što se dokazao statistički značajan utjecaj kod dva eroziva, kao i da kod jednog ne postoji, s ovim rezultatima treba biti oprezan i daje se preporuka za daljnje radove tako da se za predmetne erozive naprave dodatne analize, odnosno potreban je veći broj pokusa da bismo mogli doći do sigurnijih zaključaka.

Regresijskom analizom napravljena je matematička formula utjecaja intenziteta na gubitak mase pri eroziji kod Al_2O_3 za sve kutove kugličarenja.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X$$

Dobiveni rezultat je:

Gubitak mase za $Al_2O_3 = 2,007 - 1,306 \times$ intenzitet

Dobiveni rezultat je statistički značajan (za konstantni član $p = 0,002$, za intenzitet $p = 0,024$), tako da se može reći da povećanje intenziteta za 1 Almen smanjuje gubitak mase za 1,306.

Regresijskom analizom se može prikazati i utjecaj intenziteta na gubitak mase prema kutu kugličarenja.

Za Al_2O_3 pri 30 stupnjeva:

Gubitak mase za čelične kuglice = $2,984 - 2,086 \times$ intenzitet

Parametar β_0 je statistički značajan ($p = 0,012$), parametar β_1 je statistički značajan ($p=0,040$).

Za Al_2O_3 pri 60 stupnjeva:

Gubitak mase za čelične kuglice = $0,950 - 0,562 \times$ intenzitet

Parametar β_0 nije statistički značajan ($p = 0,204$), parametar β_1 nije statistički značajan ($p = 0,408$).

Za Al_2O_3 pri 90 stupnjeva:

Gubitak mase za čelične kuglice = $2,086 - 1,271 \times$ intenzitet

Parametar β_0 je statistički značajan ($p = 0,016$), parametar β_1 nije statistički značajan ($p = 0,082$).

Regresijskom analizom napravljena je matematička formula utjecaja intenziteta na gubitak mase pri eroziji kod čeličnih kuglica za sve kutove kugličarenja.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X$$

y – zavisna varijabla, u ovom slučaju gubitak mase

β_0 – konstantni član

β_1 - regresijski koeficijent, prikazuje promjenu zavisne varijable kada nezavisna poraste za jednu jedinicu

X – nezavisna varijabla, u ovom slučaju - intenzitet

Dobiveni rezultat je:

Gubitak mase za čelične kuglice = $2,157 - 1,393 \times$ intenzitet

No, daljnjom analizom može se donijeti zaključak kako parametar β_1 (intenzitet) nije statistički značajan ($p=0,116$).

Regresijskom analizom se može prikazati i utjecaj intenziteta na gubitak mase prema kutu kugličarenja.

Za čelične kuglice pri 30 stupnjeva:

Gubitak mase za čelične kuglice = $1,915 - 0,863 \times$ intenzitet

Parametar β_0 nije statistički značajan ($p = 0,190$), parametar β_1 nije statistički značajan ($p = 0,510$).

Za čelične kuglice pri 60 stupnjeva:

Gubitak mase za čelične kuglice = $0,908 - 0,669 \times$ intenzitet

Parametar β_0 je statistički značajan ($p = 0,039$), parametar β_1 nije statistički značajan ($p = 0,088$).

Za čelične kuglice pri 90 stupnjeva:

Gubitak mase za čelične kuglice = $3,649 - 2,648 \times$ intenzitet

Parametar β_0 je statistički značajan ($p = 0,010$), parametar β_1 je statistički značajan ($p = 0,030$).

Mikrotvrdoća

Tablica 54 prikazuje broj urađenih pokusa i s kojim parametrima. Urađeno je po 50 ponavljanja za sva tri intenziteta te po 15 ponavljanja za svaku udaljenost od površine, s odmakom po 100 μm od površine.

Tablica 54: Broj ponavljanja pokusa za svaku udaljenost od površine

Intenzitet	N – broj ponavljanja pokusa
„0,94 A“	50
„1,04 A“	50
„1,19 A“	50
Udaljenost od površine, μm	N – broj ponavljanja pokusa
100	15
200	15
300	15
400	15
500	15
600	15
700	15
800	15
900	15
1000	15

U tablici 55 prikazani su rezultati statističke analize mikrotvrdoće.

Tablica 55: Rezultati statističke analize mikrotvrdoće, za različite udaljenost od površine i intenzitete kugličarenja

	p za udaljenost od površine	p za intenzitet kugličarenja	p za udaljenost od površine x intenzitet kugličarenja
ADI	0.000	0.001	0.092

Iz tablice 55 vidljivo je kako su i varijanca promjenjivog faktora A (udaljenost od površine) i varijanca promjenjivog faktora B (intenzitet kugličarenja) statistički značajne, odnosno udaljenost od površine i intenzitet kugličarenja statistički značajno utječu na promjenu tvrdoće ispitivanog uzorka, uz signifikantnost od 5%.

Također, iz tablice 55 vidi se da ne postoji statistički značajan utjecaj između udaljenosti od površine i intenziteta kugličarenja, pri signifikantnosti od 5%. Odnosno, udaljenost od površine utječe na tvrdoću i intenzitet utječe na tvrdoću, ali ne postoji međusobni utjecaj između udaljenosti od površine i intenziteta kugličarenja, pri signifikantnosti od 5%.

Optimalni parametri kugličarenja površine izotermički poboljšanoga nodularnog lijeva EN-GJS-600-3 u ovisnosti o mehanizmu trošenja i vrsti abraziva

Kod svih analiziranih slučajeva utvrđeno je da najbolja otpornost na trošenje nije postignuta kod najvećeg intenziteta kugličarenja. U tablici 56 i 57 prikazani su optimalni intenziteti trošenja u ovisnosti o mehanizmu trošenja (abrazija ili erozija), vrsti abraziva (eroziva) i kutu upada eroziva.

Abrazija

Tablica 56 - Optimalni intenzitet kugličarenja pri abrazijskom trošenju različitim abrazivima

Vrsta abraziva	SiO ₂ - veliki	SiO ₂ - mali	Al ₂ O ₃
Optimalni intenzitet	„1,04 A“	„1,04 A“	„1,04 A“

Erozija

Tablica 57 - Optimalni intenzitet kugličarenja pri erozijskom trošenju različitim erozivima i kutovima upada čestica

Kutu pada eroziva	SiO ₂ - veliki	Al ₂ O ₃	Čelične kuglice
30 °	„1,19 A“	„1,19 A“	„1,19 A“
60 °	„0,94 A“	„1,19 A“	„1,19 A“
90 °	„1,19 A“	„1,19 A“	„1,19 A“

5. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i analize utjecaja izotermičke pretvorbe i kugličarenja na svojstva ADI materijala s ciljem primjene kod visoko opterećenih elemenata zaključuje se sljedeće:

- Izotermičkim poboljšavanjem perlitno-feritne strukture matrice nodularnog lijeva EN-GJS-600-3 nastala je nova ausferitna struktura što je dovelo do poboljšanja mehaničkih svojstva. Izotermičkim poboljšavanjem na višoj temperaturi pretvorbe (380 °C), postignuta je struktura bainitnog ferita paperjastog oblika karakterističnog za područje tzv. „gornjeg“ bainita s visokougličnim austenitom i nodulama grafita. Nižom temperaturom izotermičkog poboljšavanja (240 °C) ostvarena je ausferitna struktura „donjeg“ bainita-igličastog oblika, s visokougličnim austenitom i nodulama grafita. Tvrdoća postignuta na uzorcima izotermički poboljšanim na nižoj temperaturi znatno je veća od one na višoj temperaturi pretvorbe, ali je udarni rad loma manji.

- Posljedica kugličarenja ADI-a je povećanje površinske tvrdoće proporcionalno intenzitetu kugličarenja. Povećanje tvrdoće uzrokovano je usitnjenjem ausferitnih zrna i pojavom martenzita.

Povećanje intenziteta, uvjetovano je povećanjem tlaka zraka i većom potrošnjom sredstva za kugličarenje.

Kugličareni izotermički poboljšani NL pokazuje znatno bolju otpornost na abrazijsko trošenje od nekugličarenog.

- Ispitivanje trošenja pogonskom FZG metodom na zupčanicima pokazalo je da bolju otpornost na trošenje površine ima ADI materijal u odnosu na nodularni lijev.

Kod zupčanika izotermički poboljšanog na višoj temperaturi kugličarenjem je postignuto znatno povećanje otpornosti na površinsko trošenje u uvjetima cikličkog promjenjivog naprezanja.

Površinski sloj nastao kugličarenjem usporio je širenje pukotina prema površini, nastalih u podpovršinskom sloju, što je usporilo odvajanje površinskih čestica.

Bolju otpornost na trošenje površine, opterećene promjenljivim cikličkim naprezanjem ima ADI kugličareni materijal poboljšan na višoj temperaturi izotermičke pretvorbe.

- Analizom površine zubi zupčanika, uočeno je da su nastala oštećenja rupičastog oblika-pitting, karakteristična za umor površine. To su mjesta u podpovršinskom sloju na kojima su bile nodule grafita. U kontaktu s čeličnim, znatno tvrđim zupčanicom, površinske nodule

su istisnute, a iznad onih u površinskom sloju došlo je do odvajanja dijelova/čestica osnovnog materijala. Na njihovim pozicijama su ostale šupljine, koje su bile mjesta nastanka pukotina. Širenjem pukotina i dolaskom do površine došlo je do odlamanja dijelova površinskog sloja. Iz prethodnog se zaključuje da su nodule u biti slabe točke ADI materijala u slučaju velikog površinskog opterećenja. Obzirom na malu tvrdoću grafita, nodule smanjuju efektivnu nosivu površinu, čime direktno, negativno utječu na vijek trajanja strojnog elementa.

- Kod kugličarenih uzoraka, mikrotvrdoća raste od površine prema sredini uzorka. Rast ide do dubine 600 μm , nakon čega slijedi postupan pad.

Razlog tome su kugličarenjem unesene deformacije, usitnjena površinska kristalna zrna i nastanak martenzita.

Time je potvrđen pozitivan utjecaj kugličarenja na povećanje površinske tvrdoće ADI materijala.

- Iz analize dobivenih rezultata ispitivanja na abrazijsko trošenje u drugom ciklusu ispitivanja, da se zaključiti da kugličarenje i njegov intenzitet ima pozitivan učinak na abrazijsko trošenje abrazivom oznake SiO_2 – veliki.

Intenzitet kugličarenja nema značajan utjecaj na trošenje abrazivom SiO_2 – mali kao i abrazivom oznake Al_2O_3 .

Obzirom na vrstu, masu (veličinu) i oblik abraziva: SiO_2 – veliki (0,25-0,50 mm);

SiO_2 – mali (0,15-0,25 mm); Al_2O_3 (0,063-0,2 mm) vidi se, da na intenzitet trošenja ADI 240 K materijala veći utjecaj ima granulacija abraziva, od samog kemijskog sastava (vrste). Intenzitet kugličarenja pozitivno utječe na smanjenje abrazijskog trošenja kod abraziva veće granulacije. Kod abraziva manje granulacije to nije slučaj.

- U slučaju erozijskog trošenja, intenzitet kugličarenja nema značajniji utjecaj na tribološka svojstva ADI materijala, ako se erozija odvija pod istim parametrima (tip eroziva, kut udara). Međutim, primjećuje se razlika u trošenju obzirom na eroziv. Kod erozije erozivom oznake SiO_2 – veliki, trošenje je znatno veće u odnosu na eroziju erozivom oznake Al_2O_3 ili čeličnim kuglicama. Razlog tome su oblik i masa eroziva.

Kod svih eroziva, najmanje trošenje se pokazalo pri kutu 60° , što ukazuje na to da kut udara utječe na učinak erodiranja ADI i ADI K materijala.

U radu je potvrđena hipoteza da je povećanjem intenziteta kugličarenja moguće povećavati otpornost na abrazijsko trošenje, ali samo do određenog intenziteta („1,04 A“),

a daljnjim povećanjem intenziteta se ta otpornost ponovno smanjuje. To povećanje je statistički značajno samo za abrazijsko trošenje abrazivom SiO₂ granulacije 0,25-0,50 mm.

Što se tiče otpornosti na erozijsko trošenje, od 9 mogućih kombinacija variranja kuta trošenja odnosno vrste eroziva, u 8 kombinacija je najveća otpornost na trošenje uzoraka kugličarenih s najvećim intenzitetom (iznimka je erozijsko trošenje erozivom SiO₂ granulacije 0,25-0,50 mm). Pri tome je utjecaj intenziteta kugličarenja na erozijsko trošenje erozivom Al₂O₃ i čeličnim kuglicama statistički značajan.

Obavljena istraživanja su potvrdila postavljenu hipotezu o pozitivnom učinku kugličarenja na izotermički poboljšani nodularni lijev čime se ostvaruje bolja otpornost na trošenje. To daje značajan doprinos u razumijevanju i primjeni postojećih tehnologija u obradi istog. Doprinos istraživanja je višestruk: istražen je utjecaj kugličarenja i njegova primjena u obradi ADI-a te utjecaj pojedinih tehnoloških parametara na promjene u mikrostrukтури, a time i na svojstva površine izotermički poboljšanog lijeva.

Utvrđeno je da pukotine sporije nastaju u podpovršinskom sloju žilavijeg materijala, što ukazuje na veću otpornost promjenljivom cikličkom naprezanju površine ADI-a izotermički poboljšanog pri višoj temperaturi izotermičke pretvorbe.

Korištenim metodama ispitivanja potvrđeno je da kugličarenje dovodi do fazne pretvorbe i usitnjavanja površinskih kristalnih zrna ausferita što znatno usporava širenje pukotina nastalih u podpovršinskom sloju.

Također, utvrđeno je kako različite čestice svojom masom, oblikom (veličinom), sastavom i kutom udara utječu na trošenje ADI i ADI-K materijala.

To omogućuje pravilan izbor parametara kugličarenja s obzirom na proces trošenja, vrstu čestica trošenja i prevladavajući mehanizam trošenja dijelova izloženih abrazijskom i erozijskom trošenju, te zupčanika i slično opterećenih strojnih elemenata.

Doprinos ovog istraživanja je u novoj kombinaciji svojstava ADI materijala tretiranog postupkom kugličarenja s mogućnošću primjene kod visoko opterećenih dijelova ili proizvoda. Time je dobivena metalna matrica koja je lakša od čelika, jeftinija za proizvodnju, lakša za obradu te s dobrim mehaničkim svojstvima.

Daljnja istraživanja s ciljem širenja primjene ADI materijala za izradu visoko opterećenih elemenata, trebala bi biti usmjerena na razvoj metoda i postupaka zaštite površinskog sloja izloženog promjenljivom opterećenju, kojima bi se eliminirao negativan utjecaj nodula kao slabih mjesta u tom materijalu.

6. LITERATURA

- [1] T. Filetin, Pregled razvoja i primjene suvremenih materijala, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, lipanj 2000.
- [2] Z.Bonačić-Mandinić, I.Budić, Osnove tehnologije kalupljenja I. dio, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod 2001.
- [3] Ljevački priručnik, Savez ljevača Hrvatske, Zagreb, prosinac 1984., 234-284
- [4] R. Deželić, Materijali I, Sveučilište u Splitu, FESB, Split, 2005., 102-103,16
- [5] SORELMETAL, A Design Engineer's Digest of Ductile Iron, QIT – Fer et Titane Inc, 7th Edition, Montreal, Canada 1983., p 6
- [6] M. Gagné, The Sorelmetal Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron & Titanium, Montreal, Kanada, 2004.
- [7] I.Budić, Posebni ljevački postupci II.dio, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod 2009.,23
- [8] F,Unkić, Z.Glavaš, Osnove lijevanja metala, Metalurški fakultet u Sisku, 2009.,33
- [9] M.Galić, Proizvodnja metalnih odljevaka, Hrvatsko udruženje za ljevarstvo, Zagreb 2008., 289
- [10] H.Roedter, M.Gagne: Ductile Iron for Section Wind Mill Castings, Rio Tinto Iron & Titanium Inc., Montreal, Kanada, 2003., 3-44
- [11] S.I.Karsay SORELMETAL, , Ductile Iron I Production, QIT – Fer et Titane Inc Canada 1992., 37-39, 42
- [12] I. Kerekeš, Osnovi livarstva, Viša tehnička škola u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija,1997., 37-39
- [13] SORELMETAL, Ductile iron dana for Design Engineers, Section III,IV – Austempering ductile iron, RIO TINTO IRON & TITANIUM INC, Canada, 1990. 3-44,47,48,4-3
- [14] Rijetke zemlje, <http://www.datoteka.com/medicinski-leksikon/Z/Zemlje-rijetke.html> (08.11.2017.)
- [15] Nodular iron, <http://www.metallography.com/technotes/iron/nodular.htm> (10.12.2017.)
- [16] I. C. H. Hughes, Ductile Iron, Metals handbook, Ninth edition, Vol. 15, Casting, ASM International, Metals Park, Ohio, SAD, 1988.
- [17] HRN EN ISO 945 : 2002 – Hrvatska norma: Željezni lijev – Označavanje mikrostrukture grafita.

- [18] F.Unkić, Z.Glavaš, Utjecaj broja nodula na žilavost feritnog nodularnog lijeva, *Strojarstvo* 50 (4), 2008. 231-238
- [19] HRN EN 1563 : 1997 – Hrvatska norma: Ljevarstvo - Nodularni ljevovi
- [20] T. Filetin, F. Kovačičk, J. Indof, Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002., 142,
- [21] F. Cajner, D. Landek, Svojstva i primjena izotermički poboljšanog nodularnog lijeva, *Ljevarstvo* 46 (2004), ožujak 2004. 1, 3-9,
- [22] B. Liščić, I. Katavić, Izotermički poboljšani žilavi ljev i njegova primjena za visoko opterećene elemente, *Ljevarstvo* 32 (1985), prosinac 1985., 3, 51-68
- [23] EN 1564 : 2011 – Founding – Ausferritic spheroidal graphite cast irons
- [24] B. Kovacs, Heat Treating of Austempered Ductile Iron, AFC Technical Center, Michigan, 1990.
- [25] J.F.Janowak, R.B.Gundlach, Approaching austempered ductile iron properties by controlled cooling in the foundry, *Journal of Heat Treating*, Vol.4, 25-31, 1985.
- [26] L.C.Chang, J.C.Hsui, L.H.Chen, T.S.Lui, Effects of heat treatment on the erosion behavior of austempered ductile iron, *Wear* 260, 783-793, 2006.
- [27] Mikrostruktura ADI, University of Cambridge,
<http://www.doitpoms.ac.uk/miclib/micrograph/large/000784.jpg> (and 000785)
- [28] E.R. de los Rios, A.Wallay, M.T.Milan, G.Hammersley, Fatigue crack initiation and propagation on shot-peened surfaces in A316 stainless steel, Department of Mechanical and Process Engineering, The University of Sheffield, Sheffield, *Int.J.Fatigue* Vol17, N^o 7, 1995.
- [29] J. C. Straub, Shot Peening-Theory, 1962.
<http://www.shotpeener.com/library/pdf/1962005.pdf> (15.01.2018.)
- [30] R. Markovina, Istraživanje utjecaja plastičnog deformiranja površinskih slojeva elemenata na njihova nosiva svojstva, Doktorska disertacija, Strojarski fakultet, Mostar, 1991.
- [31] J. Champaigne, Shot Peening Overview, Electronics Inc, USA, Siječanj 2001.
<http://www.shotpeener.com/learning/spo.pdf> (12.02.2018.)
- [32] Shot peening, ASM Handbook, Vol. 5, Surface Engineering, 1994.
- [33] Metal Improvement Company.Inc., Effect of heat, Shot peening applications, 7th Edition, New Jersey, p5

- [34] Nesavršenost (nepravilnosti) u kristalima,
[www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zm/pdf/nastava/tehnologija_materijala/skripta/skripta-lekcija_3\(tmtr\).pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zm/pdf/nastava/tehnologija_materijala/skripta/skripta-lekcija_3(tmtr).pdf) (12.10.2017.)
- [35] A.L. Roitburd, G.V. Kurdjumov, Phase transformation in solid, Mater. Sci. & Eng. 39, 1979, 41
- [36] A. Polishetty, Machinability and microstructural studies on phase transformations in Austempered Ductile Iron, Auckland University of Technology, 2011.
- [37] A.Cristina, A.Manuel, Mecanismos de deformacion en aceros inoxidables metaestables, Universitat Politecnica de Catalunya, 2011.,
- [38] D. Krumes, Toplinska obrada, Slavonski Brod 2000, 46-47
- [39] N.Solomon, I.Solomon, Deformation induced martensite in AISI 316 stainless steel, Revista de metalurgija, 46 (2), 121-128, 2010.
- [40] A.L.Roytburd, Principal Concepts of Martensitic Theory, Journal de physique, Volume 5, 21-29, decembre 1995.
- [41] V. Ivušić, Tribologija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.,
- [42] YU ISSN 0350 – 350x, Određivanje stupnja štetnog opterećenja mazivog ulja na FZG ispitnom stroju, JUGOMA- Sekcija za standardizaciju, GOMABN 25(1-2) 71-82 , 1986.
- [43] A.Tonjec, Metode pripreme i karakterizacija materijala, PMF Zagreb, Zagreb 2011.
- [44] Digitalni snimak rentgenskog difraktograma,
<http://epswww.unm.edu/xrd/xrd-course-info.htm> (08.06.2018.)
- [45] Z.Veljačić; Z.Schauperl, Utjecaj temperature izotermičkog poboljšavanja na svojstva nodularnog lijeva, *MATRIB 2008.*, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb 2008., str. 389-396
- [46] M. Ilić, Karakterizacija izotermički poboljšanog nodularnog lijeva, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2009.
- [47] D. Kirk, Generation of Air-Blast Shot Velocity, The Shot Peener, Volume 21, 24-30, Winter 2007.
- [48] Abrasiv Muta: Okrugli visokouglični termički obrađeni granulat (S): Muta, Slovenia,
http://www.abrasivmuta.si/cro_2.htm (02.09.2018.)
- [49] H. Weissenbacher, Ispitivanje svojstava izotermički poboljšanih i kugličarenih zupčanika, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2009.

- [50] D. M. Mattox: Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing, Noyes Publications, Wastwood, 1998.
- [51] R.W. Cheary, Y.M. Sorrell, Quantitative phase analysis by X-ray diffraction of martensite and austenite in strongly oriented ortodontic stainless steel wires, Journal of Materials Science 35 (2000) 1105
- [52] Z. Glavaš, K. Terzić, F. Unkić, Utjecaj mikrostrukture na udarnu žilavost nodularnog lijeva, Metalurški fakultet Sisak, Sisak, 2006.
- [53] L.Magalhaes, J.Seabra, Artificial indentation for the study of contact fatigue of austempered ductile iron (ADI) discs, Wear 258 (1755-1763), Portugal, 2005.
- [54] L.Magalhaes, J.Seabra, C.Sa, Experimental observation of contact fatigue crack mechanisms for austempered ductile iron(ADI) discs, Wear 246 (134-148), Portugal, 2000.
- [55] C. Bixler, K. Hayrynen, J. Keough, Locally Austempered Ductile Iron (LADI), Applied Process, Inc. – Technologies Division, 2010.

PRILOZI

PRILOG 1.

TVRDOĆA EN-GJS-600-3 (UZORCI ZA ISPITIVANJE UDARNOG RADA LOMA)

		Uzorak br.					
		1	2	3	4	5	6
Tvrdoća (HB)		218	206	214	214	197	203
		199	215	201	200	214	198
		205	197	211	212	204	216
	\bar{X}	207	206	209	209	205	206

\bar{X} – srednja vrijednost tvrdoće uzorka

PRILOG 2.**POVRŠINSKA TVRDOĆA ADI 380 I ADI 240
(UZORCI ZA ISPITIVANJE UDARNOG RADA LOMA)****ADI 380**

		Uzorak br.							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Tvrdoća (HB)		274	266	269	278	275	278	274	263
		266	262	261	264	260	275	262	273
		277	273	273	270	271	262	266	277
	\bar{X}	272	267	268	271	269	272	267	271

ADI 240

		Uzorak br.							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Tvrdoća (HB)		416	431	431	429	433	419	426	426
		428	419	418	420	428	425	420	422
		424	426	434	427	425	428	429	432
	\bar{X}	423	425	428	426	429	424	425	427

\bar{X} – srednja vrijednost tvrdoće uzorka

PRILOG 3.**POVRŠINSKA TVRDOĆA ADI 240 (UZORCI ZA ISPITIVANJE NA TROŠENJE)**

		Uzorci za abraziju br.				Uzorci za eroziju br.			
		1	2	3	4	5	6	7	8
Tvrdoća (HB)		418	429	413	424	424	415	425	423
		416	418	409	418	411	421	408	415
		424	425	421	422	419	425	413	429
	\bar{X}	419	423	415	420	418	420	415	422

\bar{X} – srednja vrijednost tvrdoće uzorka

PRILOG 4.

TVRDOĆA ALMEN TRAKE TIP A2

Tvrdoća (HB)		Uzorak br. 1		Uzorak br. 2	
		strana a	strana b	strana a	strana b
		453	447	445	447
		450	452	450	451
		445	448	451	448
\bar{X}		449	449	449	449

\bar{X} – srednja vrijednost tvrdoće oba uzorka **449 HB = 46 HRC**

PRILOG 5.

**VISINE ALMEN LUKA S INTENZITETOM "1,32 A" OVISNO O VREMENU
IZLAGANJA MLAZU**

Vrijeme kugličarenja, mm	Visina Almen luka, mm				
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	\bar{X}
10	0,73	0,78	0,79	0,74	0,76
20	0,97	1,01	1,03	1,07	1,02
30	1,11	1,12	1,15	1,15	1,13
40	1,18	1,22	1,23	1,25	1,22
50	1,22	1,26	1,32	1,28	1,27
60	1,29	1,29	1,37	1,35	1,32
70	1,30	1,36	1,41	1,38	1,36
80	1,44	1,46	1,44	1,47	1,45

\bar{X} – srednja vrijednost Almen luka za vrijeme trajanja kugličarenja

PRILOG 6.

**VISINE ALMEN LUKA S INTENZITETOM "1,11 A" OVISNO O VREMENU
IZLAGANJA MLAZU**

Vrijeme kugličarenja, mm	Visina Almen luka, mm				
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	\bar{X}
10	0,65	0,66	0,63	0,66	0,65
20	0,86	0,88	0,85	0,87	0,87
30	0,97	1,00	0,95	0,98	0,98
40	1,01	1,03	0,98	1,04	1,02
50	1,07	1,08	1,06	1,07	1,07
60	1,11	1,12	1,10	1,11	1,11
70	1,16	1,17	1,15	1,16	1,16
80	1,19	1,18	1,20	1,19	1,19

\bar{X} – srednja vrijednost Almen luka za vrijeme trajanja kugličarenja

PRILOG 7.

**VISINE ALMEN LUKA S[INTENZITETOM "0,99 A"
OVISNO O VREMENU IZLAGANJA MLAZU**

Vrijeme kugličarenja, mm	Visina Almen luka, mm				
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	\bar{X}
10	0,46	0,54	0,54	0,50	0,51
20	0,68	0,73	0,81	0,74	0,74
30	0,79	0,84	0,91	0,84	0,85
40	0,86	0,93	0,94	0,90	0,91
50	0,92	0,97	1,04	0,95	0,97
60	0,94	1,01	1,05	0,97	0,99
70	0,97	1,04	1,07	1,02	1,02
80	1,01	1,05	1,10	1,04	1,05

\bar{X} – srednja vrijednost Almen luka za vrijeme trajanja kugličarenja

PRILOG 8.**POVRŠINSKA TVRDOĆA ADI 240 K (UZORCI ZA ISPITIVANJE NA TROŠENJE)**

Uzorak		"1,32 A"			"1,11 A"			"0,99 A"		
		AA	AB	AC	BA	BB	BC	CA	CB	CC
Tvrdoća (HB)		451	448	444	445	422	433	428	424	418
		440	425	438	438	443	429	417	432	426
		448	445	449	433	437	444	422	426	416
	\bar{X}	446	439	444	439	434	435	422	427	420

\bar{X} – srednja vrijednost tvrdoće uzorka

PRILOG 9.**REZULTATI FZG ISPITIVANJA ZUPČANIK A [49]
(gubitak mase i temperatura ulja po stupnju ispitivanja)**

		STUPANJ ISPITIVANJA , BROJ								
UZORAK	POČET. MASA, mg	1	2	3	4	5	6	7	8	9
EN-GJS-600-3	1149,308	35 mg 90 ⁰ C	0 mg	7 mg		63 mg 95 ⁰ C	70 mg 100 ⁰			
ADI 380	1137,782	36 mg 90 ⁰ C					84 mg 100 ⁰ C	67 mg 100 ⁰ C	110mg 110 ⁰ C	
ADI 380K	1140,884	30 mg 90 ⁰ C				86 mg 97 ⁰ C	100 ⁰ C	53 mg 110 ⁰ C	112 ⁰ C	240mg 125 ⁰ C
ADI 240	1149,941	55 mg 90 ⁰ C				86 mg 95 ⁰ C	95 ⁰ C	18 mg 110 ⁰ C	110 ⁰ C	165mg 135 ⁰ C
ADI 240K	1143,630	33 mg 90 ⁰ C				19 mg 95 ⁰ C	30 mg 100 ⁰ C	34 mg 110 ⁰ C	60 mg 110 ⁰ C	

PRILOG 10.

TVRDOĆA PO POPREČNOM PRESJEKU ZUBA ZUPČANIKI EN-GJS-600-3

Redni br. mjer- enja	UDALJENOST OD POVRŠINE , μm									
	30		60		150		300		600	
	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025
1	13,5	254,33	13	274,11	13,75	245,03	13,75	245,03	13,5	254,19
2	14,25	228,27	13,5	254,19	14	236,35	13,5	254,19	16	180,96
3	14,5	220,46	13,5	254,19	14,25	228,13	13,75	245,03	14	236,35
4	15,25	199,31	14,5	220,33	14	236,35	14	236,35	14,5	220,33
5	16	181,06	13,75	245,03	14,25	228,13	13	274,11	14	236,35
6	15,25	199,31	15	205,89	15,5	192,82	13,5	254,19	13,75	245,03
7	14,75	213,05	15,25	199,19	13,75	245,03	15,25	199,19	13,75	245,03
8	14,25	228,27	14,75	212,93	14,5	220,33	15,75	186,75	13,75	245,03
9	14,5	220,46	14,5	220,33	14,25	228,13	13,5	254,19	14	236,35
10	13,75	245,17	14	236,35	14,25	228,13	13,25	263,87	15	205,89
11	13,75	245,17	14,5	220,33	14	236,35	13,75	245,03	13,75	245,03
12	14,5	220,46	15	205,89	14	236,35	14,25	228,13	13,5	254,19
13	14,25	228,27	14,25	228,13	13	274,11	15,25	199,19	13,75	245,03
14	15,5	192,93	13	274,11	13,5	254,19	14,75	212,93	14,25	228,13
15	14	236,49	13,5	254,19	13,5	254,19	14,5	220,33	12,5	296,48
\bar{X}	14,5	220,8	14,1	233,7	14	236,3	14,06	234,6	13,95	238,3

\bar{X} – srednja vrijednost dijagonale otiska, mikrotvrdoća uzorka

PRILOG 11.

TVRDOĆA PO POPREČNOM PRESJEKU ZUBA ZUPČANIKA ADI 380

Redni br. mjer- enja	UDALJENOST OD POVRŠINE , μm									
	30		60		150		300		600	
	Dijagonal μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025
1	16	181,06	14	236,49	14,25	228,27	12,25	308,89	12,75	285,13
2	16	181,06	14	236,49	13,25	264,02	12,75	285,13	12,75	285,13
3	16	181,06	13,75	245,17	13	274,27	13	274,27	13,25	264,02
4	15,5	192,93	13,75	245,17	13,25	264,02	15,5	192,93	12,75	285,13
5	14,5	220,46	13,75	245,17	13	274,27	13	274,27	12,75	285,13
6	15,5	192,93	13,5	254,33	13,25	264,02	13,75	245,17	13	274,27
7	14,5	220,46	13,5	254,33	13,25	264,02	13,75	245,17	14,25	228,27
8	14	236,49	14	236,49	13,5	254,33	14	236,49	12,75	285,13
9	15,5	192,93	13,5	254,33	13,5	254,33	12,5	296,65	13	274,27
10	15,75	186,86	13,5	254,33	13,75	245,17	13	274,27	13,25	264,02
11	15,25	199,31	13,75	245,17	13,75	245,17	13,25	264,02	15	206,01
12	15,5	192,93	13,75	245,17	13,75	245,17	15	206,01	13,5	254,33
13	15,25	199,31	13,25	264,02	12,75	285,13	13,5	254,33	13,25	264,02
14	15,5	192,93	15,75	186,86	13,5	254,33	12,5	296,65	13,25	264,02
15	14,5	220,46	13,75	245,17	13,75	245,17	12,5	296,65	15,25	199,31
\bar{X}	15,23	199,4	13,8	243,3	13,42	257,5	13,25	263,4	13,3	261,3

\bar{X} – srednja vrijednost dijagonale otiska, mikrotvrdoća uzorka

PRILOG 12.

TVRDOĆA PO POPREČNOM PRESJEKU ZUBA ZUPČANIK A DI 380 K

Redni br. mjer- enja	UDALJENOST OD POVRŠINE , μm									
	30		60		150		300		600	
	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025
1	13	274,27	13,5	254,33	13,25	264,02	13,5	254,33	14	236,49
2	13,75	245,17	14	236,49	13,25	264,02	13,25	264,02	14,25	228,27
3	14	236,49	13,75	245,17	13,5	254,33	13,75	245,17	14,25	228,27
4	13,75	245,17	14,5	220,46	13,5	254,33	13,25	264,02	14	236,49
5	14,25	228,27	14,25	228,27	14,75	213,05	13,75	245,17	13,75	245,17
6	12,75	285,13	14,25	228,27	14,5	220,46	13,5	254,33	13,5	254,33
7	13,5	254,33	14	236,49	14,25	228,27	13	274,27	13	274,27
8	14,25	228,27	13,5	254,33	13,75	245,17	13,5	254,33	12,75	285,13
9	13,5	254,33	13,25	264,02	14	236,49	13,25	264,02	12,75	285,13
10	14,5	220,46	13,75	245,17	14,25	228,27	13	274,27	12,75	285,13
11	13,75	245,17	14,5	220,46	13	274,27	14	236,49	12,75	285,13
12	14,25	228,27	13,75	245,17	13,25	264,02	13,75	245,17	13	274,27
13	12,75	285,13	13,25	264,02	14	236,49	14	236,49	13,75	245,17
14	13,25	264,02	14	236,49	12,75	285,13	14	236,49	13,75	245,17
15	13	274,27	13	274,27	13	274,27	14	236,49	13,75	245,17
\bar{X}	13,58	251,2	13,79	243,6	13,62	249,5	13,55	252,3	13,43	256,9

\bar{X} – srednja vrijednost dijagonale otiska, mikrotvrdoća uzorka

PRILOG 13.

TVRDOĆA PO POPREČNOM PRESJEKU ZUBA ZUPČANIKA ADI 240

Redni br. mjer- enja	UDALJENOST OD POVRŠINE , μm									
	30		60		150		300		600	
	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025
1	13	274,27	13	274,27	13	274,27	12,25	308,89	12	321,89
2	13	274,27	12,5	296,65	13,25	264,02	12,5	296,65	12,5	296,65
3	13	274,27	12,5	296,65	12,5	296,65	12,5	296,65	11,5	350,49
4	13,25	264,02	13,25	264,02	12,5	296,65	12,5	296,65	12	321,89
5	13,5	254,33	12,5	296,65	12,5	296,65	12,5	296,65	12,75	285,13
6	13,25	264,02	12,5	296,65	12,5	296,65	12	321,89	12,25	308,89
7	13,25	264,02	12,5	296,65	12,5	296,65	12	321,89	12,25	308,89
8	13,25	264,02	12,25	308,89	13,75	245,17	11,75	335,73	12,5	296,65
9	12,75	285,13	12,25	308,89	12,5	296,65	14	236,49	12	321,89
10	12,75	285,13	12,25	308,89	12,75	285,13	12,75	285,13	14,5	220,46
11	12,75	285,13	12,75	285,13	12,5	296,65	12,75	285,13	13,75	245,17
12	12,5	296,65	12,25	308,89	12,5	296,65	12,25	308,89	13	274,27
13	12,75	285,13	12,5	296,65	12,75	285,13	12,75	285,13	12,5	296,65
14	13	274,27	12,75	285,13	12,75	285,13	13	274,27	13	274,27
15	12,75	285,13	12,5	296,65	12,5	296,65	12,5	296,65	12	321,89
\bar{X}	12,98	275,3	12,54	294,7	12,69	287,3	12,5	296,4	12,51	296,3

\bar{X} – srednja vrijednost dijagonale otiska, mikrotvrdoća uzorka

PRILOG 14.

TVRDOĆA PO POPREČNOM PRESJEKU ZUBA ZUPČANIKA ADI 240 K

Redni br. mjer- enja	UDALJENOST OD POVRŠINE, μm									
	30		60		150		300		600	
	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025	Dijagonala μm	HV0,025
1	11,25	366,24	12,25	308,89	12	321,89	13,25	264,02	12	321,89
2	11,25	366,24	12,25	308,89	13	274,27	12,75	285,13	12,5	296,65
3	11,75	335,73	12	321,89	13,25	264,02	12,75	285,13	12,25	308,89
4	12	321,89	12,75	285,13	12,5	296,65	12,75	285,13	12,5	296,65
5	12	321,89	13,25	264,02	12,5	296,65	12,75	285,13	12,25	308,89
6	12	321,89	12	321,89	12,5	296,65	12,5	296,65	12,5	296,65
7	11,75	335,73	12	321,89	12,75	285,13	12	321,89	12	321,89
8	11,75	335,73	12,25	308,89	12	321,89	12,75	285,13	12,25	308,89
9	11,75	335,73	11,25	366,24	12,5	296,65	12,75	285,13	12,75	285,13
10	12	321,89	12,5	296,65	12	321,89	12,75	285,13	12,75	285,13
11	12,75	285,13	13	274,27	11,75	335,73	12	321,89	13	274,27
12	12,5	296,65	12,75	285,13	12,25	308,89	12,25	308,89	13,25	264,02
13	12	321,89	12	321,89	12	321,89	12,75	285,13	13,25	264,02
14	11,75	335,73	12,75	285,13	11,5	350,49	12,5	296,65	13,25	264,02
15	11,75	335,73	12	321,89	11,75	335,73	12,5	296,65	13,25	264,02
\bar{X}	11,86	329,2	12,31	306,2	12,25	308,6	12,59	292,5	12,63	290,7

\bar{X} – srednja vrijednost dijagonale otiska, mikrotvrdoća

PRILOG 15.**POVRŠINSKA TVRDOĆA (HRC)****ADI 240**

Uzorak	Redni broj mjerenja															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	\bar{X}
2/7	31	31	40	34	40	39,5	40	26	32,5	32	33	37	34,5	31	30	34,1
6/7	34	35	39	34	36	31	38	40	35	32	35	37	34	33	38	35,4
3/5	27	29	34	41	36	31	38,5	40	37	41,5	33	45	34	38	36	36,1

ADI 240 K

Uzorak	Redni broj mjerenja															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	\bar{X}
2/7	39	41	40	40,5	41,5	38	42	37	37	39	40,5	40	38	41	39	39,6
6/7	41,5	40	39	39	38	36	37	39	37	38	39	41	37	37	36	38,3
3/5	36	40,5	41	30	40	34,5	32	38	38	43	40,5	39	39	38	37	37,8

\bar{X} – srednja vrijednost izmjerene tvrdoće

PRILOG 16.**MIKROTVRDOĆA UZORAKA KUGLIČARENIH RAZLIČITIM INTENZITETOM
I NEKUGLIČARENIH UZORAKA**

Udaljenost od površine, mikrometri	Kugličareni intenzitetom „0,94 A“					
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	Uzorak 5	\bar{X}
100	349	349	362	391	407	372
200	349	423	362	362	423	384
300	349	407	423	407	423	402
400	441	460	501	460	480	468
500	423	460	524	480	501	478
600	524	480	524	501	501	506
700	407	441	524	441	423	447
800	407	501	407	441	423	436
900	407	501	441	423	407	436
1000	407	480	480	460	441	454

Udaljenost od površine, mikrometri	Kugličareni intenzitetom „1,04 A“					
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	Uzorak 5	\bar{X}
100	362	349	349	407	391	372
200	391	362	391	391	376	382
300	376	349	423	423	423	399
400	460	460	524	480	480	481
500	423	501	407	501	480	462
600	423	460	407	480	460	446
700	549	407	423	524	441	469
800	501	423	480	460	391	451
900	524	407	407	460	441	448
1000	480	407	376	423	423	422

Kugličareni intenzitetom „1,19 A“						
Udaljenost od površine, mikrometri	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	Uzorak 5	\bar{X}
100	391	349	376	407	391	383
200	376	376	376	391	391	382
300	524	407	480	480	460	470
400	575	441	480	501	480	495
500	501	480	575	524	501	516
600	524	480	575	524	524	525
700	441	460	549	501	480	486
800	549	407	501	480	480	483
900	460	407	376	460	441	429
1000	376	376	460	460	441	423

Udaljenost od površine, μm	ADI sredina uzorka koja nije kugličarena
100	407
200	391
300	391
400	423
500	391
600	349
700	441
800	391
900	376
1000	376
\bar{X}	393,6

PRILOG 17.

**GUBITAK MASE ADI 240 K USLIJED
ABRAZIJSKOG TROŠENJA ABRAZIVOM OZNAKE SiO₂ - veliki**

Gubitak mase, mg

Kugličareni intenzitetom „0,94 A“				
Broj okretaja	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
100	31,6000	37,9000	31,5000	33,6666
200	54,3000	71,6000	61,5000	62,4666
300	74,8000	121,1000	91,5000	95,8000

Kugličareni intenzitetom „1,04 A“				
Broj okretaja	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
100	26,1000	18,3000	19,8000	21,4000
200	50,0000	32,1000	14,9000	32,3333
300	71,6000	45,1000	14,2000	43,6333

Kugličareni intenzitetom „1,19 A“				
Broj okretaja	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
100	23,7000	30,0000	29,7000	27,8000
200	51,5000	62,7000	56,8000	57,0000
300	74,2000	91,8000	87,1000	84,3666

PRILOG 18.

**GUBITAK MASE ADI 240 K USLIJED
ABRAZIJSKOG TROŠENJA ABRAZIVOM OZNAKE – SiO₂ mali**

Gubitak mase, mg

Kugličareni intenzitetom „0,94 A“				
Broj okretaja	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
100	171,0000	169,3000	174,5000	171,6000
200	309,3000	313,5000	306,2000	309,6666
300	472,6000	483,4000	469,0000	475,0000

Kugličareni intenzitetom „1,04 A“				
Broj okretaja	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
100	146,8000	151,2000	144,4000	147,4666
200	300,4000	307,2000	296,4000	301,3333
300	442,2000	446,4000	441,1000	441,6500

Kugličareni intenzitetom „1,19 A“				
Broj okretaja	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
100	153,0000	154,2000	150,3000	152,5000
200	325,0000	333,1000	319,7000	325,9333
300	477,1000	484,9000	473,6000	478,5333

PRILOG 19.

**GUBITAK MASE ADI 240 K USLIJED
ABRAZIJSKOG TROŠENJA ABRAZIVOM OZNAKE – Al₂O₃**

Gubitak mase, mg

Kugličareni intenzitetom „0,94 A“				
Broj okretaja	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
100	173,6000	165,4000	162,0000	167,0000
200	327,2000	310,1000	307,0000	314,7666
300	468,7000	464,2000	461,1000	464,6666

Kugličareni intenzitetom „1,04 A“				
Broj okretaja	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
100	157,6000	142,2000	164,9000	154,9000
200	312,3000	285,6000	311,3000	303,0666
300	457,1000	427,0000	463,3000	449,1333

Kugličareni intenzitetom „1,19 A“				
Broj okretaja	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
100	164,2000	167,5000	164,4000	165,3666
200	315,7000	315,6000	315,9000	315,7333
300	460,3000	467,1000	463,0000	463,4666

PRILOG 20.**Abrazija neobrađenog ADI 240 abrazivom oznake SiO₂ – veliki**

Gubitak mase, mg

Broj okretaja	Nekugličareni			
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
100	44,2000	56,9000	84,4000	61,8333
200	68,7000	86,4000	115,6000	90,2333
300	90,8000	110,5000	149,5000	116,9333

Abrazija ADI 240 abrazivom oznake SiO₂ – mali

Broj okretaja	Nekugličareni			
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
100	168,4000	174,5000	173,5000	172,1333
200	325,3000	334,4000	331,6000	330,4333
300	486,7000	482,0000	490,8000	486,5000

Abrazija ADI 240 abrazivom oznake Al₂O₃

Broj okretaja	Nekugličareni			
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
100	173,6000	164,2000	167,5000	168,4333
200	326,5000	315,7000	315,6000	319,2666
300	471,1000	460,3000	467,1000	466,1666

PRILOG 21.**Abrazija obrađenog ADI 240 abrazivom oznake SiO₂ – veliki**

Gubitak mase, mg

Broj okretaja	Nekugličareni glodani			
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
100	54,5000	47,5000	50,6000	50,8666
200	99,0000	99,4000	99,4000	99,2666
300	135,0000	142,9000	137,7000	138,5333

Abrazija obrađenog ADI 240 abrazivom oznake SiO₂ – mali

Broj okretaja	Nekugličareni glodani			
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
100	172,4000	180,3000	181,2000	177,9666
200	333,6000	340,2000	327,9000	333,9000
300	489,5000	493,4000	492,1000	491,6666

Abrazija obrađenog ADI 240 abrazivom oznake Al₂O₃

Broj okretaja	Nekugličareni glodani			
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
100	175,2000	174,2000	174,6000	174,6666
200	342,3000	334,8000	339,5000	338,8666
300	502,9000	486,8000	494,9000	494,8666

PRILOG 22

**GUBITAK MASE ADI 240 K USLIJED
ERODIRANJA EROZIVOM OZNAKE SiO₂ – veliki**

Gubitak mase, $\mu\text{m/g}$

Kugličareni intenzitetom „0,94 A“				
Kut [°]	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
30	2,4719	1,5730	2,1722	2,0724
60	1,8726	1,8726	1,0486	1,5980
90	2,8464	2,1722	2,2471	2,4219

Kugličareni intenzitetom „1,04 A“				
Kut [°]	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
30	2,3220	1,4981	2,3970	2,0724
60	1,7977	1,6479	1,5730	1,6729
90	2,3220	2,2471	1,2734	1,9475

Kugličareni intenzitetom „1,19 A“				
Kut [°]	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
30	1,9475	1,0486	1,3483	1,4481
60	2,0973	1,4981	2,2471	1,9475
90	1,6479	2,0973	1,2734	1,6729

PRILOG 23.**GUBITAK MASE ADI 240 K USLIJED
ERODIRANJA EROZIVOM OZNAKE Al₂O₃**Gubitak mase, $\mu\text{m/g}$

Kugličareni intenzitetom „0,94 A“				
Kut [°]	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
30	1,1611	1,1611	0,9289	1,0837
60	0,4644	0,2322	0,2786	0,3251
90	0,8360	0,8824	0,8824	0,8670

Kugličareni intenzitetom „1,04 A“				
Kut [°]	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
30	0,6038	0,3715	1,1611	0,7121
60	0,5109	0,6967	0,3715	0,5263
90	1,0682	0,9289	0,4180	0,8050

Kugličareni intenzitetom „1,19 A“				
Kut [°]	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
30	0,6038	0,3715	0,6502	0,5418
60	0,1857	0,0464	0,4180	0,2167
90	0,6502	0,4644	0,5573	0,5573

PRILOG 24.

**GUBITAK MASE ADI 240 K USLIJED
ERODIRANJA ČELIČNIM KUGLICAMA**

Gubitak mase, $\mu\text{m/g}$

Kugličareni intenzitetom „0,94 A“				
Kut [°]	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
30	1,3688	0,7769	0,6659	0,9372
60	0,2589	0,1849	0,3329	0,2589
90	1,2208	1,5538	0,5179	1,0975

Kugličareni intenzitetom „1,04 A“				
Kut [°]	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
30	1,3318	0,9248	1,6278	1,2948
60	0,3699	0,2959	0,0739	0,2466
90	0,9618	1,0358	0,9988	0,9988

Kugličareni intenzitetom „1,19 A“				
Kut [°]	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
30	0,7029	1,0728	0,5549	0,7769
60	0,1849	0,0369	0,0739	0,0986
90	0,5549	0,3699	0,4439	0,4562

PRILOG 25.**GUBITAK MASE PO KUTU ERODIRANJA RAZLIČITIM EROZIVIMA,
UZORAKA NEKUGLIČARENOG, STROJNO NE OBRADENOG ADI 240****Eroziv oznake SiO₂ - veliki**

Kut [°]	Nekugličareni - µg/g			
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
30	8,4644	9,5880	9,7378	9,2634
60	23,5206	28,2397	24,1198	25,2933
90	25,3932	36,9288	28,3146	30,2122

Eroziv oznake Al₂O₃

Kut [°]	Nekugličareni - µg/g			
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
30	3,1583	2,3223	1,1147	2,1984
60	2,6474	3,8086	3,0190	3,1583
90	5,1555	3,7157	4,4124	4,4279

Čelične kuglice

Kut [°]	Nekugličareni- µg/g			
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
30	18,0910	16,3152	35,4051	23,2704
60	8,8420	8,8420	10,0259	9,2366
90	26,0451	45,2460	32,8523	34,7145

PRILOG 26.**GUBITAK MASE PO KUTU ERODIRANJA RAZLIČITIM EROZIVIMA,
UZORAKA NEKUGLIČARENOM, STROJNO OBRADENOM ADI 240****Eroziv oznake SiO₂ - veliki**

Nekugličareni glodani - µg/g				
Kut [°]	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
30	2,0224	1,1985	0,9737	1,3982
60	0,8239	0,8988	0,9737	0,8988
90	0,8239	1,1985	0,9737	0,9987

Eroziv oznake Al₂O₃

Nekugličareni glodani - µg/g				
Kut [°]	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
30	0,8360	0,7895	0,7431	0,7895
60	0,1857	0,0928	0,2322	0,1703
90	0,7895	0,7431	0,1857	0,5728

Čelične kuglice

Nekugličareni glodani - µg/g				
Kut [°]	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	\bar{X}
30	0,7769	0,3699	0,9988	0,7152
60	0,3699	0,6289	0,3329	0,4439
90	1,1838	0,2959	0,2589	0,5796

Životopis autora

Zoran Veljačić je rođen 10. prosinca 1961. godine u Splitu, gdje je završio osnovnu i srednju tehničku školu.

Nakon odsluženja vojnog roka 1981. godine upisuje se na studij strojarstva Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu. Diplomirao je 1985. godine stekavši zvanje inženjera strojarstva.

Studij nastavlja upisom na Pomorski fakultet u Splitu, gdje je 1998. godine diplomirao na smjeru Brodostrojarstvo.

Odmah potom, na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu, upisuje poslijediplomski studij – smjer konstrukcije. Nakon odslušanih predavanja i položenih ispita, 2002. godine, obranio je magistarski rad pod naslovom "Utjecaj toplinske obrade na zamornu čvrstoću legiranih čelika“.

Stručni ispit za inženjere strojarstva u graditeljstvu, položio je u Zagrebu 2000. godine.

Zaposlen je od 1986. godine u privredi. Do 2002. godine radio je u tvrtki "Autodijelovi", današnjem "AD – Plastik" Solin, čija je osnovna djelatnost razvoj i proizvodnja autodijelova. Radio je u službi razvoja, obavljajući poslove konstruiranja alata, naprava i uređaja. U istoj tvrtki jedan period vodio je alatnicu, a zatim mjernicu za precizna mjerenja.

Od 2002. do 2020. godine zaposlen je u "Brodosplit – brodogradilište d.o.o." gdje je radio na radnim mjestima:

- Pomoćnik voditelja novogradnje;
- Inspektor za garantne radove – garantni inženjer na novogradnji;
- Pomoćnik direktora pogona "Antikorozivna zaštita";
- Inspektor kvalitete za projekt;
- Direktor tvrtke Zaštita trupa od korozije d.o.o., koja je u sastavu brodogradilišta.

Danas je zaposlen u tvrtki Norinco International Ltd., podružnica Zagreb, na poslovima voditelja strojarskih radova na izgradnji vjetro parka.

Objavljeni radovi:

1. Z.Veljačić, Ž.Domazet

Utjecaj toplinske obradbe na dinamičku izdržljivost legiranih čelika // Strojarstvo : časopis za teoriju i praksu u strojarstvu. 45 (2003) , 4-6; 121-128 (prethodno priopćenje, znanstveni).

2. Z.Veljačić, Z.Schauperl

Utjecaj temperature izotermičkog poboljšavanja na svojstva nodularnog lijeva // Zbornik radova međunarodnog savjetovanja MATRIB 2008. / Grilec, Krešimir ; Marić, Gojko ; Jakovljević, Suzana (ur.). Zagreb : Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, 2008.

3. Z.Veljačić, K.Grilec

Increasing the wear resistance of marine diesel engines elements made of ductile iron // Naše more: znanstveni časopis za more i pomorstvo, br. 3/2021.