

Tomislav Pokupčić

ISSN 0350-350X

GOMABN 51, 1, 47-62

Stručni rad / Professional paper

ISPITIVANJE CJEVOVODA VODIKA U RAFINERIJI NAFTE SISAK

Sažetak

U radu je opisana primjena ispitivanja radi procjene upotrebljivosti starog cjevovoda vodika u rafineriji nafte Sisak koji se nakon dužeg razdoblja mirovanja stavlja u rad. Cjevovod je izgrađen i pušten u rad 1980. godine i kontinuirano se upotrebljavao do 1989. U navedenom razdoblju cjevovod se upotrebljavao za transport plinovitog vodika s postrojenja katalitičkog reformiranja KP-5 na ono za proizvodnju aromatskih ugljikovodika (benzena, o-ksilena i p-ksilena) KP-7. Osim prethodno navedenog razdoblja rada, cjevovod je stavljen u šestomjesečni rad s istom zadaćom tijekom 1996. godine. Nakon toga cjevovod vodika nije se do danas upotrebljavao za transport niti jedne vrste medija. Krajem 2010. cjevovod se ponovno stavlja u rad s istim zadatkom dobave plinovitog vodika kao sirovine za proizvodni proces izomerizacije na postrojenju KP-7.

Zbog ponovne upotrebe i određivanja utjecaja vodika na mehanička svojstva materijala provedena su mehanička i tehnološka ispitivanja cjevovoda te je ispitana mikrostruktura materijala cjevovoda. Tlačnim ispitivanjem cjevovoda provedenim prema normi ASME B. 31.3 ispitano je stanje cjevovoda vodika na mogućnost propuštanja plinovitog medija koji će se transportirati kroz cjevovod. Metalografskim ispitivanjima ispitana je mikrostruktura materijala cjevovoda, prvenstveno na utjecaj vodika, a osim toga i na utjecaje erozije i korozije koji također mogu dovesti do oštećenja cjevovoda. Charpyevom metodom ispitana je žilavost koja pokazuje kolika je otpornost materijala cjevovoda na krhki lom. Metodom po Vickersu ispitana je tvrdoća koja pokazuje otpornost materijala na unutrašnje naprezanje i plastičnu deformaciju koja se može pojaviti kod djelovanja vanjskog opterećenja na materijal cjevovoda.

Cilj ispitivanja bio je utvrditi postojeće stanje mehaničkih i tehnoloških svojstva materijala cjevovoda u svrhu njegove ponovne pouzdane i kvalitetne upotrebe.

Ključne riječi: cjevovod, čelik, vodik, ispitivanja, metalografija, žilavost, tvrdoća, vodikova krhkost, sastav, struktura

Tomislav Pokupčić

HYDROGEN PIPELINE TESTING IN SISAK OIL REFINERY

Abstract

The paper describes the application of testing processes aimed at estimating the usability of an old hydrogen pipeline in Sisak Oil Refinery, given that the pipeline is being put into service after a substantial period of inactivity. The pipeline was constructed and became operational in 1980, and it was in continuous use until 1989. In this period, the pipeline was used for the transportation of gaseous hydrogen from the catalytic reforming plant KP-5 to the plant KP-7 for the production of aromatic hydrocarbons (benzene, o-xylene, p-xylene). In addition to this operational period, the pipeline was also used for the same purpose in the course of 1996, for a six-month period. After that, the hydrogen pipeline was not used for transportation of any medium until the current times. Towards the end of 2010, the pipeline was again put into service, with the same task of delivering gaseous hydrogen as a raw material for the isomerization production process at the KP-7 plant.

Due to renewed use of the pipeline, and in order to determine the impact of hydrogen on mechanical properties of the material, mechanical and technological pipeline testing was undertaken, and microstructure of the pipeline material was also tested. Pressure testing of the pipeline was undertaken, conducted according to the norm ASME B. 31.3, in order to test the condition of the hydrogen pipeline, in terms of possible leakage of gaseous medium intended for transport through the pipeline. Metallographic testing was conducted in order to check the microstructure of pipeline material, primarily in terms of the impact of hydrogen. In addition, erosion and corrosion impacts were also analyzed, given the fact that such impacts may also result in pipeline damage. The Charpy method was applied to test toughness, showing the resistance of the pipeline material to brittle fracture. The Vickers method was used to test hardness, showing the resistance of material to internal stress and plastic deformation, which may appear in case of external load on the pipeline material.

The goal of the testing process was to determine the current condition of mechanical and technological properties of pipeline material, with the aim of renewed use of the pipeline in a reliable and quality manner.

Key words: pipeline, steel, hydrogen, testing, metallography, ductility, hardness, hydrogen brittleness, composition, structure

1. Uvod

Krkhkost materijala koja je uzrokovana djelovanjem vodika, smjesa s vodikom i vodikovih spojeva (ugljkovodici, halogenovodici i drugi) značajan je čimbenik kod upotrebe, proizvodnje, transporta i skladištenja vodika, vodikovih smjesa i spojeva u rafineriji nafte. Vodik, vodikova smjesa i vodikovi spojevi djelovanjem na materijale uzrokuju hladnu krhkost i vodikovu krhkost [1].

Hladna krhkost je uzrokovana djelovanjem vodika, vodikovih smjesa i vodikovih spojeva u kapljevitoj fazi kod veoma niskih temperatura na materijale uz uvjet da je radna temperatura ispod prijelazne temperature materijala za nastanak krhkog loma. Navedeno djelovanje pojavljuje se kod materijala rafinerijske opreme koji se koriste za skladištenje tekućeg vodika pri veoma niskim temperaturama.

Vodikova krhkost je uzrokovana djelovanjem vodika, vodikovih smjesa i vodikovih spojeva u plinovitoj fazi, a nastaje kao posljedica difuzije vodika u unutrašnjost materijala i nesavršenosti mikrostrukture materijala koja se plastično deformira radi nastanka velikih unutrašnjih naprezanja. Ona su posljedica visokih tlakova koji nastaju rekombinacijom atomarnog vodika u molekularni vodik.

Hladna i vodikova krhkost imaju za posljedicu smanjenje mehaničkih svojstava (tvrdoće, vlačne čvrstoće, tlačne čvrstoće, žilavosti i dr.) i oštećenja (deformacije, poroznosti, umora, loma i dr.) materijala.

U ovom radu, medij koji se transportira cjevovodom nalazi se u plinovitoj fazi, a njegovo djelovanje na materijal cjevovoda može rezultirati samo pojavom vodikove krhkosti.

2. Eksperimentalni dio

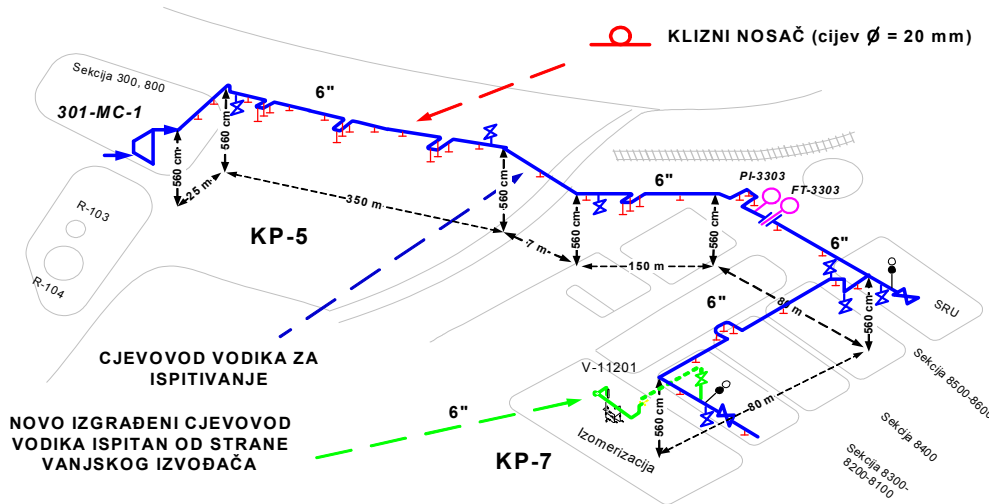
2.1. Opis cjevovoda vodika

Projektnu dokumentaciju cjevovoda vodika izradila je engleska tvrtka FOSTER WHEELER na temelju procesne dokumentacije tvrtke UOP iz SAD-a. Izvođač projekta izgradnje cjevovoda bila je tvrtka Đuro Đaković iz Slavenskog Broda, a materijal za izgradnju ili čelične cijevi osigurala je Željezara Sisak.

Cjevovod vodika kao i svi ostali cjevovodi za aromatsko postrojenje projektirani su prema propisima ASTM (American Society for Testing and Materials). Ovi propisi uključuju rafinerijska i petrokemijska postrojenja u mnogim zemljama svijeta, a potrebni su kod projektiranja, izrade, kontrole i ispitivanja cjevovoda.

Slika 1 prikazuje shemu kompletnog cjevovoda vodika kroz Rafineriju nafte Sisak. Cjevovod vodika povezuje postrojenja katalitičkog reformiranja (KP-5) i izomerizacije (KP-7). Također, na slici 1 prikazan je i novoizgrađeni cjevovod vodika koji se nadovezuje na postojeći. Iz slike 1 vidimo na postojećem cjevovodu s gornje i donje strane ugrađene ventile. Ventili na donjoj strani cjevovoda nazivaju se drenaže i koriste se za uklanjanje kapljevito medija iz cjevovoda. Ventili na gornjoj strani cjevovoda nazivaju se odušci i upotrebljavaju se za uklanjanje plinovitog medija iz cjevovoda.

Cjevovod ima na sebi ugrađen mjerni instrument oznake FI-3303 koji mjeri količinu medija koji se transportira kroz cjevovod u granicama 0-5000 Nm³/h. Također, cjevovod na sebi ima ugrađen mjerni instrument pod oznakom PI-3303 koji konstantno mjeri tlak (od 0 do 50 bara) medija u cjevovodu.



Slika 1: Cjevovod vodika u RNS

Slika 2 prikazuje centrifugalni kompresor 301-MC-1 koji je spojen na cjevovod i ima zadaću transporta plinovitog medija kroz cjevovod.



Slika 2. Centrifugalni kompresor vodika 301-MC-1

U tablici 1 dane su projektne i radne karakteristike kompresora 301-MC-1, a koji određuje radne uvjete plinovitog medija koji se transportira cjevovodom. Hlađenje, podmazivanje i brtvljenje kompresora u radu odrađuje ulje koje preko centrifugalne pumpe cirkulira iz zasebnog spremnika ulja. Ulju se konstantno mjeri tlak. Također se mjeri tlak medija na ulazu i tlak medija na izlazu iz kompresora. Sigurnosni uređaj automatski zaustavlja kompresor u slučaju pojave prekoračenja vibracija u radu. Osim vibracija, kompresor je zaštićen i od prekoračenja temperature medija. Na ove načine riješena je zaštita kompresora 301-MC-1 i cjevovoda od moguće pojave oštećenja u radu.

Cjevovod je protiv vibracija zaštićen oprugama koje se nalaze na početku cjevovoda ili na samom izlazu iz kompresora. Opruge imaju zadatak primanja vibracija koje nastaju u radu kompresora i sprečavanja pojave vibracija na cjevovodu.

Tablica 1: Karakteristike kompresora 301-MC-1 [2]

Veličina	Vrijednost
Proizvođač	Pignone
Tip	BCL454
Serijski broj	9321
Projektni tlak, bar	68,5
Projektna temperatura, °C	150
Snaga	810 kW
Normalni kapacitet	4 240 Nm ³ /h
Normalna brzina, okr. min ⁻¹	8 950
Prva kritična brzina, okr. min ⁻¹	4 150
Tlak ulaza, bar	23
Tlak izlaza, bar	34,5
Temperatura ulaza medija, °C	20
Temperatura izlaza medija, °C	70-75

Kompresor vodika 301-MC-1 je preko osovine spojen na elektromotor oznake MC-1. Elektromotor služi kao pogonski stroj kompresora, a njegove karakteristike dane su u tablici 2.

Tablica 2: Karakteristike elektromotora [2]

Veličina	Vrijednost
Proizvođač	Siemens
Struja, A	405
Napon, V	6 000
Snaga, kW	3 600
cos φ	0,88
Brzina vrtnje, okr. min ⁻¹	1 491

Slika 3 prikazuje postojeći cjevovod vodika i njegov novoizgrađeni nastavak prema aromatskom postrojenju KP-7. Postojeći cjevovod, na kojem je potrebno provesti ispitivanja, obilježen je žutim premazom sa crvenim prstenom. Također, na postojećem cjevovodu nalazi se armatura koja je stavljena u zatvoreni položaj, a služi za odvajanje aromatskog postrojenja od postrojenja izomerizacije.



Slika 3: Slika cjevovoda vodika

Novoizgrađeni cjevovod sadrži armaturu koja ima funkciju odvajanja novoizgrađenog od postojećeg cjevovoda. Također, na postojećem cjevovodu nalazi se natpisna pločica koja označava medij (vodik) koji se transportira kroz cjevovod.

ARMATURA ZA ODVAJANJE



Slika 4: Slika spoja postojećeg i novoizgrađenog cjevovoda

Cjevovod je smješten nadzemno na cijevnom mostu ili nosaču cjevovoda. Visina na kojoj se nalazi cjevovod iznosi 560 cm. Cijevi su elektrolučno poprečno zavarivane i izvedene su bešavno. Cjevovod nije izoliran i izložen je promjeni temperature, vlage, vjetra i ostalim vanjskim utjecajima iz atmosfere. Cjevovod je konstrukcijski izveden s pomičnim osloncima ili kliznim nosačima koji imaju zadatak pomaka ili dilatacije cjevovoda zbog vanjske promjene temperature u atmosferi. Cjevovod je zaštićen od utjecaja vjetra na način da je smješten u donjem dijelu i u sredini cijevnoga mosta.

2.1.1. Karakteristike cjevovoda i medija

a) Karakteristike i kemijski sastav čelika cjevovoda

U katalogu mehaničkih svojstava [3] za cjevovod navedena je oznaka standarda za čelik A106 Gr. B po ASTM normi, a po bivšoj JUS normi oznaka za čelik je Č.1215. Tablica 3 daje usporedne oznake normi za istu vrstu čelika od kojeg je izgrađen cjevovod vodika.

Tablica 3: Usporedni standardi čelika cjevovoda [3]

Standard	ISO	DIN	ASTM	British	Japan / Koreja, JIS/KS
Broj	2604/2	17175	A106	3602	STPT 410/ SPHT 42
Gradacija	TS9H	St45.8	Gr B	HFS410	G3456/D3570
Tip, Broj	C	1.0405	C	410	30/16

Tablica 4 prikazuje kemijski sastav čelika. Po kemijskom sastavu čelik spada u skupinu ugljičnih i nisko legiranih čelika [4]. Nizak sadržaj ugljika povisuje čeliku tvrdoću, vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja, a smanjuje žilavost i zavarljivost.

Tablica 4. Kemijski sastav čelika A106 Gr B [5]

Komponenta	% maseni
Ugljik	0,30 maks
Mangan	0,29-1,06
Fosfor	0,035 maks
Sumpor	0,035 maks
Silicij	0,10 min
Krom	0,40 maks
Bakar	0,40 maks
Molibden	0,15 maks
Nikal	0,40 maks
Vanadij	0,08 maks

Zbog povećanja čvrstoće, otpornosti prema trošenju i granice razvlačenja kod ove vrste čelika treba biti zadovoljen uvjet da je udio silicija min. 0,1 %. Također čelik A106.Gr B ima zadane vrijednosti štetnih elemenata mangana, fosfora i sumpora. Povišeni udio mangana čeliku povisuje prokaljivost i otpornost od zakaljivanja kod zavarivanja [4]. Tablica 5 daje vrijednosti mehaničkih karakteristika (gustoće, modula elastičnosti, tvrdoće, žilavosti, vlačne i tlačne čvrstoće, koeficijenta toplinskog širenja, specifičnog toplinskog kapaciteta i izduženja) čelika A106 Gr. B.

Tablica 5: Mehaničke karakteristike čelika A106 Gr. B [5]

Veličina	Iznos
Gustoća, kg/m ³	7,872 x 10 ³
Modul elastičnosti, GPa	200
Tvrdoća, HV	174
Žilavost	295
Tlačna čvrstoća, MPa	415
Vlačna čvrstoća, MPa	240
Elogancija ili izduženje, %	21
Koeficijent toplinskog širenja, °C ⁻¹	11,7 x 10 ⁻⁶
Specifični toplinski kapacitet, J/kg K	486
Toplinska vodljivost, W/ m*K	48,7

U Tablici 6 dana je rafinerijska oznaka cjevovoda (za promjer cjevovoda od 6 inch ili 15,24 cm, 1 inch ili col = 2,54 cm). U tablici je naveden i podatak za ispitni ili maksimalni tlak cjevovoda. To je tlak pod kojim se cjevovodu ispituju mehanička svojstva. Ispitni tlak je tlak koji može izdržati cjevovod da ne dođe do njegova oštećenja [6], a koje može imati za posljedicu propuštanje medija u atmosferu. Također, dani su projektni tlak i projektna temperatura cjevovoda. Ove projektne vrijednosti tlaka i temperature su maksimalne vrijednosti koje se smiju pojaviti prilikom upotrebe cjevovoda.

Tablica 6: Ispitni i projektni uvjeti cjevovoda [6]

Oznaka cjevovoda	6"-H-0602-8-201-NI
Ispitni tlak, bar	73,3
Projektni tlak, bar	48,3
Projektna temperatura, °C	121

b) Karakteristike medija

Tablica 7 daje pogonske uvjete plinovitog medija koji se transportira kroz cjevovod u svakodnevnom radu. Navedeni su radna temperatura i radni tlak plinovitog medija pod kojima se odvija njegov transport u cjevovodu. Također su navedeni fizikalni podaci koji su bitni za transport medija kroz cjevovod. Maseni protok se odnosi na maksimalni protok plinovitog medija koji će transportirati cjevovodom.

Tablica 7: Radni ili pogonski uvjeti medija [7]

Temperatura, °C	38
Tlak, bar	37,2
Maseni protok, kg/h	1 100
Gustoća, kg/m ³	8,77
Molarna masa, kg/kmol	9,38
Dinamička viskoznost, mPas	0,011

Tablica 8 daje sastav plinovitog medija koji je zadao projektant, a mora biti ispunjen u proizvodnome procesu izomerizacije [7]. Plinoviti medij sastoji se od smjese plinova koju u najvećem volumnom postotku čini vodik, a zatim plinoviti ugljikovodici kao što su metan, etan, propan i butan. Za svaku pojedinu komponentu dan je projektni minimalni volumni postotak u smjesi.

Tablica 8: Projektne vrijednosti sastava medija [7]

Komponenta	% vol.
Vodik	65,0
Metan	18,3
Etan	7,3
Propan	3,1
Butan	0,9
Ukupni sumpor	$1,0 \times 10^{-4}$ maks
Ukupni dušik	$1,0 \times 10^{-4}$ maks
Ugljikov (II) oksid	$1,0 \times 10^{-4}$ maks
Ugljikov (II) oksid + Ugljikov (IV) oksid	$1,0 \times 10^{-3}$ maks
Klorovodik	$5,0 \times 10^{-4}$ maks

Za smjesu plinova projektant je također naveo maksimalne projektne vrijednosti volumnih postotaka štetnih komponenata koje smiju biti zastupljene u smjesi plinova (tablica 8, neugljikovodici). Ove navedene vrijednosti štetnih komponenata ili otrova u smjesi plinova koji će se transportirati cjevovodom mogu poslužiti i kao podatak za odabir čelika kod izrade novog cjevovoda.

U tablici 9 dani su kemijski sastav svake pojedine komponente smjese plinova koja nastaje kao produkt na postrojenju katalitičkog reforminga (KP-5) [8]. Iz kemijske analize sastava vidi se da smjesa plinova sadrži vodik, metan, etan i propan u većem udjelu od onih danim projektnim vrijednostima (tablica 8) za smjesu. Štetne komponente koje su zastupljene u smjesi plinova ispunjavaju tražene projektne vrijednosti volumnog sastava za proizvodni proces izomerizacije benzina.

Tablica 9: Kemijska analiza sastava medija [8]

Komponenta	% Volumni
Vodik	67,27
Metan	19,48
Etan	7,63
Propan	4,15
izo-butan	0,62
n-butan	0,53
izo-pentan	0,19
n-pentan	0,1
Kisik	0
Dušik	0
Ugljikov (II) oksid	0
Ugljikov (IV) oksid	0
Sumporovodik	0
Ukupno	100,0

2.2. Ispitivanje cjevovoda

Iz cjevovoda vodika izrezan je uzorak na kojemu su provedena ispitivanja žilavosti, tvrdoće i metalografska ispitivanja. Uzorak je izrezan u 12 ispitnih epruveta, a šest ispitnih epruveta podvrgnuto je žarenju. Žarenje je postupak toplinske obrade u kojoj se čelik izlaže visokim temperaturama u dužem vremenskom razdoblju, a nakon toga se sporo hladi. U ovom radu žarenje je provedeno zbog istjerivanja mogućeg zaostalog vodika iz unutrašnjosti uzorka cjevovoda. Šest ispitnih epruveta je žareno na temperaturi od 610 °C u vremenskom trajanju od 150 sati [9].

2.2.1. Tlačno ispitivanje

Tlačno ispitivanje provodi se radi provjere mogućnosti propuštanja medija zbog eventualnog oštećenja i ispitivanja mehaničkih karakteristika materijala cjevovoda. Provedeno je prema normi ASME B 31.3, a kao medij za tlačno ispitivanje cjevovoda korištena je voda [10]. Cjevovod je tijekom neupotrebe bio pod tlakom dušika, a prije početka tlačnog ispitivanja cjevovod je zatvoren. Zatvaranje je izvršeno da bi se odvojilo postojeći cjevovod kojeg je potrebno tlačno ispitati od novoizgrađenog cjevovoda. Završetkom zatvaranja postojećeg cjevovoda pristupilo se otvaranju odušaka cjevovoda zbog uklanjanja zaostalog zraka koji se može nalaziti u cjevovodu. Nakon otvaranja odušaka na cjevovodu pristupilo se punjenju cjevovoda vodom. Cjevovod je u cijelosti napunjen vodom u trenutku izlaska vode kroz njegove oduške, a samim tim je iz njega uklonjen sav zaostali zrak. Nakon uklanjanja zraka iz cjevovoda provedeno je zatvaranje odušaka na cjevovodu i njegovo vizualno pregledavanje na moguće propuštanje vode.

Tlačno ispitivanje provedeno je visoko tlačnom pumpom koja na sebi ima ugrađen manometar za mjerenje tlaka. Ovom visokotlačnom pumpom podignut je tlak vode u cjevovodu na iznos od 60 bara. Nakon podizanja tlaka vode cjevovod je zadržan 60 minuta pod navedenim tlakom vode. Nakon tlačnog ispitivanja vodom od 60 minuta, cjevovod je uspješno prošao tlačno ispitivanje jer nije došlo do pojave smanjenja ili pada tlaka ispod 60 bara i pojave propuštanja vode iz cjevovoda. Nakon završetka tlačnog ispitivanja preko drenažnih ventila voda je ispuštena iz cjevovoda. Radi uklanjanja zaostale vode i nečistoća cjevovod je propuhan servisnim zrakom tlaka 4 bara koji je doveden na oduške cjevovoda. Nakon propuhivanja cjevovod je stavljen pod tehnički dušik tlaka 8 bara.

2.2.2. Metalografsko ispitivanje

Metalografsko ispitivanje daje informacije o stanja mikrostrukture, to jest o veličini i vrsti mogućeg oštećenja uzorka [11]. Slika 5 prikazuje uzorak cjevovoda pripremljen za metalografsko ispitivanje i analizu na sljedeće načine:

- izrezivanje uzorka (uzimanje reprezentativnog uzorka iz cjevovoda),
- brušenje uzorka, radi dobivanja čiste i ravne površine,
- poliranje uzorka, radi uklanjanja nečistoća poslije brušenja,
- nagrivanje uzorka, radi što boljeg uočavanja mikrostrukture, a kao sredstvo korišten je NITAL (1 mL HNO_3 u 100 mL etilnog alkohola),
- ispiranje i sušenje površine uzorka.



Slika 5: Fotografija uzorka cjevovoda

Početni i žareni uzorci su nakon izvršene pripreme za metalografsku analizu ispitani mikroskopski. Mikroskopska ispitivanja omogućuju da se odredi tip mikrostrukture, udio pojedinih struktura, veličina zrna, orijentacija zrna, raspodjela i veličina uključaka. Također se mogu odrediti greške koje narušavaju homogenost mikrostrukture, a koje su nastale pri raznim tehnološkim procesima kao što su lijevanje, termička obrada, kovanje i drugi [11].

2.2.3. Ispitivanje žilavosti

Žilavost je svojstvo koje pokazuje kolika je otpornost materijala na krhki lom. U ovom slučaju žilavost je ispitana metodom udarne radnje loma s ciljem određivanja ponašanja materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Udarna žilavost se izražava kao utrošena energija (energija loma, $E = m g \Delta h$, gdje je m masa udarnog bata i Δh visinska razlika bata) za deformaciju i lom zarezane epruvete. Ispitivanje se provodi na uređaju koji se zove Charpyjev bat koji prenosi energiju udara na uzorak. Količina utrošene energije na lom uzorka prikazuje se na mjernom području od 0 do 300 J [12]. Dimenzije ispitanih uzoraka s karakterističnim U i V utorima definirane su normom DIN 3141.

2.2.4. Ispitivanje tvrdoće

Tvrdoća je mjerena metodom po Vickersu po kojoj je moguće mjeriti i najtvrdje materijale, a tvrdoća nije ovisna o primijenjenoj sili. Penetrator je istostrana četverostrana piramida s kutem od 136° . Ovim kutem moguće je dobiti vrijednosti tvrdoće koje nisu ovisne o primijenjenoj sili. Kod upotrebe male sile potrebno je uzorak fino izbrusiti i polirati kao i u metalografiji. Prednosti metode u odnosu na druge metode kojima se ispituje tvrdoća su [13]:

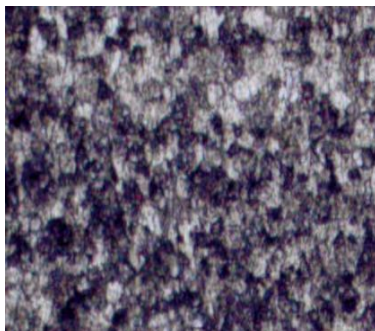
- tvrdća je neovisna o primijenjenoj sili,
- moguće je mjeriti tvrdoću najtvrdjih materijala,
- moguće je mjerenje tvrdoće tankih uzoraka te čak tvrdoće pojedinih zrna,
- otisak je vrlo malen pa ne oštećuje površinu i
- metoda je primjenjiva u znanstveno istraživačkom području materijala.

Tvrdoća se izračunava pomoću izraza: $HV = F \text{ (sila)} / S \text{ (površina)} = F \times 0,189 / d^2$, gdje je d srednja vrijednost promjera otiska [14]. U ovom ispitivanju tvrdoća uzorka mjerena je uređajem INSTRON TUCON 1000 B uz opterećenje od 1 kg ili HV1.

3. Rezultati i diskusija

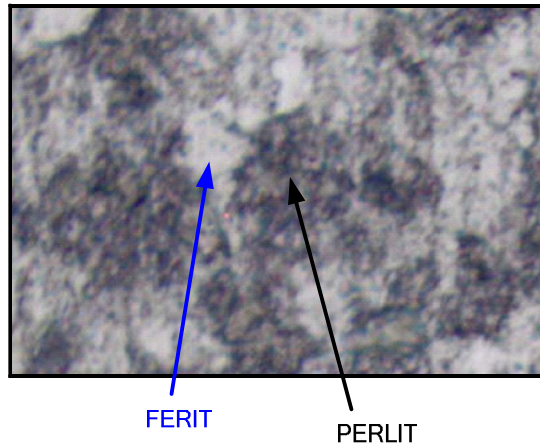
3.1. Metalografski rezultati

Slike 6 i 7 prikazuju polazne uzorke cjevovoda snimljene optičkim mikroskopom.



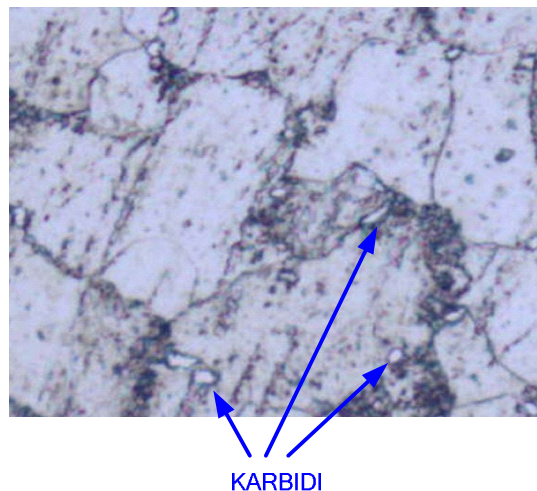
Slika 6. Mikrografija polaznog uzorka, uvećanje x50

Na slikama se vidi postojanost u mikrostrukturi feritne i perlitne faze. Na površini mikrostrukture uzorka nisu prisutne nečistoće, pukotine, mikro šupljine i lomovi.



Slika 7: Mikrografija polaznog uzorka, uvećanje x200

Slika 8 prikazuje žareni uzorak cjevovoda snimljen optičkim mikroskopom. Na slici se vidi bolji prikaz mikrostrukture nego kod polaznih uzorka cjevovoda, a na površini mikrostrukture nisu prisutne nečistoće, pukotine, mikro šupljine i lomovi. Također se vidi prisutnost karbida (sitna bijela zrnca) u uzorku cjevovoda, a to potvrđuje da se zaista radi o legiranom čeliku.



Slika 8. Žareni uzorak, uvećanje x200

3.2. Rezultati mjerenja tvrdoće

U tablici 11 dani su rezultati ispitivanja tvrdoće žarenih i polaznih uzoraka cjevovoda, a polazni uzorci imaju veće vrijednosti ispitivanih tvrdoća.

Tablica 11: Rezultati ispitivanja tvrdoće

Stanje	Tvrdoća HV	Srednja vrijednost HV	Srednja vrijednost HR	Srednja vrijednost HB
polazno	161, 165, 165, 161, 173	165,0	83,4	157,7
žareno	128, 133, 129, 123, 128	128,2	70,2	122,0

ASTM norma propisuje tvrdoću čelika A 106 Gr. B od 174. Polazni uzorci imaju srednju vrijednost izmjerenih tvrdoća od 157,7, a žareni uzorci imaju srednju vrijednost izmjerenih tvrdoća od 122. Usporedbom srednjih vrijednosti tvrdoća polaznih i žarenih uzoraka s ASTM normom vidi se da polazni uzorci imaju srednju vrijednost tvrdoće manju za 10 % od tvrdoće norme, a žareni uzorci imaju manju srednju vrijednost tvrdoće 30 % od tvrdoće propisane ASTM normom. Smanjenje tvrdoće žarenih uzoraka od 22,6 % u odnosu na polazne uzorke pokazuje da žareni uzorci imaju manju vlačnu čvrstoću i otpornost prema nastanku plastične deformacije od polaznih uzoraka. Također, tvrdoća polaznih uzoraka smanjena u odnosu na tvrdoću čelika A 106 Gr. B po ASTM normi pokazuje da polazni uzorci imaju smanjenu otpornost na plastičnu deformaciju koja se može pojaviti djelovanjem vanjskog opterećenja na cjevovod.

3.3. Rezultati mjerenja žilavosti

U tablici 12 dani su rezultati izmjerene žilavosti polaznih i žarenih uzoraka cjevovoda, a žareni uzorci imaju veće vrijednosti žilavosti od polaznih uzoraka.

Tablica 12: Rezultati ispitivanja žilavosti

uzorak	površina ($a_0 \times b_0$) / mm ²	ispitivanje udarcem / J	Srednja vrijednost žilavosti / J
polazni	10,03 x 10,15	183	172,5
	10,00 x 10,15	200	
	10,01 x 10,12	178	
	10,06 x 10,14	167	
	10,00 x 10,14	154	
	10,00 x 10,13	153	
žareni	10,04 x 9,92	243	289
	10,09 x 10,26	296	
	10,00 x 9,93	299	
	10,08 x 10,20	299	
	10,13 x 9,97	300	
	10,12 x 10,02	297	

ASTM normom propisuje se žilavost čelika A 106 Gr. B od 295 J. Žareni uzorci imaju srednju vrijednost izmjerenih žilavosti od 289 J, a polazni uzorci imaju srednju vrijednost izmjerenih žilavosti od 172,5 J. Usporedbom srednjih vrijednosti žilavosti polaznih i žarenih uzorka s ASTM normom vidi se da žareni uzorci imaju srednju vrijednost žilavosti manju 2 % od žilavosti norme, a polazni uzorci imaju srednju žilavosti manju 41,5% od žilavosti koja je propisana ASTM normom.

Smanjenje žilavosti polaznih uzoraka govori da je u određenoj mjeri vodik u unutrašnjosti mikrostrukture uzrokovao krhkost čelika A 106 Gr. B. Također, žilavost žarenih uzoraka koja je praktični identična sa žilavošću po ASTM normi govori da žareni uzorci čelika A 106 Gr. B imaju znatno veću otpornost na krhki lom.

4. Zaključak

Iz rezultata dobivenih metalografskim ispitivanjem, ispitivanjem žilavosti i mjerenjem tvrdoće uzoraka cjevovoda može se zaključiti:

- A. čelik A 106 Gr. B po kemijskom sastavu je srednje ugljičan i niskolegirani čelik, a prema mikrostrukтури čelik se sastoji od feritne i perlitne faze,
- B. čelik A 106 Gr. B u mikrostrukтури nema prisutnost pukotina, mikro šupljina i loma,
- C. čelik A 106 Gr. B u mikrostrukтури nema prisutnih grešaka koje nastaju u tehnološkom procesu proizvodnje, a koje bi narušavale homogenost njegove mikrostrukture,
- D. žareni uzorci cjevovoda imaju za 41,5 % veću srednju vrijednosti žilavosti od polaznih uzoraka cjevovoda,
- E. polazni uzorci cjevovoda imaju za 22,5 % veću srednju vrijednost tvrdoće od žarenih uzoraka cjevovoda,
- F. žareni uzorci cjevovoda imaju smanjenju srednju vrijednost žilavosti od 289 J u odnosu na žilavost od 330 J po normi ASTM E393-83,
- G. polazni uzorak cjevovoda ima smanjenju srednju vrijednost žilavosti od 172,5 J u odnosu na vrijednost žilavosti od 330 J propisanu normom ASTM E393-83,
- H. polazni uzorci cjevovoda imaju smanjenju srednju vrijednosti tvrdoće od 165 u odnosu na tvrdoću od 174 po normi ASTM,
- I. žareni uzorci cjevovoda imaju smanjenu srednju vrijednost tvrdoće od 128,2 u odnosu na tvrdoću od 174 po normi ASTM,
- J. polazni uzorci zbog snižene žilavosti imaju povećanu krhkost mikrostrukture, a koja ima za posljedicu smanjenu otpornost čelika A 106 Gr. B za nastanak krhkog loma,
- K. polazni uzorci cjevovoda zbog smanjene tvrdoće imaju za posljedicu smanjenje otpornosti čelika A 106 Gr. B na plastičnu deformaciju koja se može pojaviti kod djelovanja vanjskog opterećenja na cjevovod,

Prema navedenim zaključcima možemo utvrditi da postoji opravdana mogućnost upotrebe cjevovoda za transport plinovitog vodika zbog toga jer je cjevovod prošao tlačno ispitivanje i metalografsko ispitivanje kojim je dokazano da u mikrostrukтури materijala nema pojave pukotina, mikro šupljina i loma.

Međutim, smanjene vrijednosti rezultata ispitivanja žilavosti i tvrdoće opovrgavaju sigurnu upotrebu cjevovoda. Nadalje, uzorkovanje nije provedeno na više raznih mjesta na cjevovodu kako bi uzorak imao sva obilježja kompletnog cjevovoda. Zbog toga je za potpunu sigurnost upotrebe cjevovoda za transport plinovitog vodika potrebno provesti: metalografska ispitivanja, ispitivanja tvrdoće, ispitivanja žilavosti i ostala potrebna ispitivanja na reprezentativnim uzorcima cjevovoda.

Literatura / References

- [1] Safety of Hydrogen as an Energy Carrier: Material Considerations when working with Hydrogen, 2005.
- [2] INA d.d., Sektor Rafinerija nafte Sisak, Pogonske upute za KP-5, Sisak, 2010.
- [3] INA d.d., Sektor Rafinerija nafte Sisak, Foster Wheeler Mechanical Catalogue for Aromatics complex, Volume 1, Sisak, 1977.
- [4] Pavle Pavlović: Materijal čelik, SKTH, Kemija u industriji, Zagreb, 1990.
- [5] ASTM: Standard Specification for Carbon Steel pipe, 2000/2001.
- [6] INA d.d., Sektor Rafinerija nafte Sisak, Pogonske upute za KP-7, Sisak, 2008.
- [7] UOP: Penex Process Unit, Des Plaines, East Algonquin Road 25, Illinois, 2004.
- [8] INA d.d., Plan pregleda i testiranja proizvoda u sektoru RNS, Sisak, 2010.
- [9] M. Gojić: Metalurgija čelika, Metalurški fakultet u Sisku, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2005.
- [10] ASME: Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping Code Standard, B 31.3, 2007/08.
- [11] H. Šuman: Metalografija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1981.
- [12] M. Franz: Materijali 2, Zavod za materijale, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, 2005/2006.
- [13] S. Rešković: Ispitivanje materijala (skripta), Metalurški fakultet u Sisku, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2007/08.

Autor / Author

Tomislav Pokupčić, dipl. ing.
INA d.d., Sektor Rafinerija nafte Sisak
e-adresa/mail: tomlav.pokupcic@ina.hr

Primljeno / Received

3.5.2011.

Prihvaćeno / Accepted

19.10.2011.