

Određivanje maksimalne rastvorljivosti vodonika u leguri aluminijuma sa 7,77 tež% silicijuma i 3,48 tež% bakra

ALEKSANDAR M. MITRAŠINOVIĆ, Institut tehničkih nauka SANU, Beograd

ORCID: 0000-0002-1021-4622

JASMINA V. NEŠKOVIĆ, Rudarski institut, Beograd

ORCID: 0000-0002-1798-1656

TEODORA M. ĐURĐEVIĆ, Rudarski institut, Beograd

NEBOJŠA J. LABUS, Institut tehničkih nauka SANU, Beograd

ORCID: 0000-0003-1557-0711

ZORAN D. ODANOVIĆ, Institut IMS, Beograd

ORCID: 0000-0002-3486-5032

Originalni naučni rad

UDC: 669.715.017.16

DOI: 10.5937/tehnika2601009M

Kvalitet proizvoda izlivenih od legure aluminijuma direktno je povezan sa količinom rastvorenog vodonika u rastopljenoj leguri. Trenutne tehnike merenja su nepouzidane, dugotrajne, i zahtevaju intenzivan rad. Zbog svojih odličnih mehaničkih svojstava i dobre livkosti ova legura se često koristi u automobilske, vazduhoplovne, i odnedavno u industriji za 3D štampanje metalnih delova. Međutim to je legura koja u tečnom stanju lako apsorbira vodonik, što može dovesti do pojave poroznosti u konačnom proizvodu. Dobijeni eksperimentalni rezultati pokazuju da je nivo poroznosti u očvrslim uzorcima direktno povezan sa početnim sadržajem vodonika u tečnoj leguri. Ključni rezultat ovoga rada je izvedena konkavna eksponencijalna funkcija za procenu maksimalne rastvorljivosti vodonika u tečnoj leguri aluminijuma pri industrijskim uslovima. Izračunata vrednost maksimalne rastvorljivosti vodonika je 0,236 ml H_2 /100 g za leguru koja je držana na 790°C na atmosferskom pritisku dok je vrednost maksimalne poroznosti 2,26 %. Ova matematička korelacija, zasnovana na eksperimentalnim podacima, omogućava korektivne mere u realnom vremenu tokom procesa livenja, što dovodi do visokokvalitetnih proizvoda sa smanjenom poroznošću. Rezultati ove studije su namenjeni proizvođačima metalnih delova, posebno u kontekstu Industrije 4.0, gde su napredno matematičko modelovanje i pametne tehnike proizvodnje ključne za poboljšanje efikasnosti proizvodnje i kvaliteta proizvoda.

Ključne reči: vodonik, legura aluminijuma, rastvorljivost, matematičko modelovanje

1. UVOD

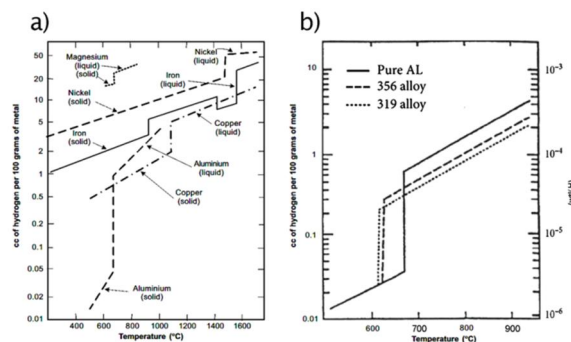
Iako je količina rastvorenog vodonika u rastopljenim legurama direktno povezana sa kvalitetom proizvedenih delova [1, 2], merenja se obično sprovode metodom uzorkovanja što je diskontinuirani, dugotrajni, i radno intenzivan proces [3, 4]. Posedovanjem alata za kontinuiranu karakterizaciju materijala na proizvodnoj liniji, moguće je uneti korektivne mere bez prekida procesa kako bi se sprečili zastoji, nepotreban otpad i konačno obezbedili visokokvalitetni proizvodi [5, 6].

Adresa autora: Aleksandar Mitrašinović, Institut tehničkih nauka SANU, Beograd, Kneza Mihaila 35

e-mail: aleksandar.mitrašinović@itn.sanu.ac.rs

Rad primljen: 27.01.2026.

Rad prihvaćen: 06.02.2026.



Slika 1 – Rastvorljivost vodonika u metalima [11] (a) i rastvorljivost vodonika u čistom aluminijumu i livčkim Al-Si (356 alloy) i Al-Si-Cu (319 alloy) legurama [12] (b)

Za razliku od drugih metala, kod aluminijuma je značajna razlika u rastvorljivosti vodonika u tečnom i čvrstom stanju [7, 8] (slika 1a). Ove razlike, usled

nedostatka vremena da se uspostave ravnotežne koncentracije rastvorenih gasova, imaju značajan uticaj na mehanička svojstva proizvedenih delova. Vodonik je jedini gas koji je značajno rastvorljiv u aluminijumu i njegovim legurama, gde dalje dodavanje legirajućih elemenata u aluminijum smanjuje rastvorljivost vodonika [9, 10] (slika 1b).

Koncentracija rastvorenog vodonika u tečnoj leguri aluminijuma je u korelaciji sa nivoima poroznosti u čvrstoj strukturi. Štraube-Pfajferova tehnika je jedna od najšire prihvaćenih industrijskih metoda za kvalitativnu procenu nivoa poroznosti u proizvedenim delovima [13, 14]. Kod ove tehnike, uzorak tečnog aluminijuma se sipa u vakum komoru i ostavi da očvrstne pod niskim pritiskom. Procena veličine i broja šupljina na površini poprečnog preseka uzoraka omogućava kvalitativnu procenu makroporoznosti.

Iako je merenje količine rastvorenog vodonika u legurama aluminijuma predmet velikog interesovanja već više od jednog veka, i dalje ne postoji pouzdana kvantitativna tehnika za merenje količine vodonika u tečnim legurama aluminijuma u industrijskim uslovima [15, 16].

Sprečavanje pojave poroznosti je najveći izazov u proizvodnji visokokvalitetnih aluminijumskih delova tako da bi poznavanje maksimalne rastvorljivosti vodonika u industrijskim legurama aluminijuma bilo od velikog značaja. U ovom istraživanju, legura aluminijuma, koja se tradicionalno koristi u automobilskoj industriji, a od nedavno i za 3D štampu metalnih delova, formirana je sa različitim koncentracijama rastvorenog vodonika. Nakon očvršćavanja, početni sadržaj rastvorenog vodonika u tečnoj leguri je povezan sa nivoom poroznosti u očvrslim uzorcima. Zatim je korišćen skup regresionih analiza za procenu eksperimentalnih rezultata i razvoj matematičkog modela za predviđanje maksimalne rastvorljivosti vodonika na osnovu relevantnih ulaznih parametara procesa.

2. MATERIJALI I METODE

U eksperimentima su korišćeni ingoti sekundarnih legura aluminijuma koje fabrika aluminijuma Vindzor u Kanadi koristi za proizvodnju blokova motora Cosworth procesom [17]. U tabeli 1 je prikazan hemijski sastav legure korišćene u ovom istraživanju, određen analizom optičke emisije spektroskopije.

Tabela 1. Hemijski sastav (tež. %) legure aluminijuma korišćene u eksperimentima

Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Ti	Ni	Al
7,77	3,48	0,42	0,17	0,25	0,18	0,12	0,04	Ostalo

Određivanje nivoa poroznosti u uzorcima očvrstnutim sa različitim koncentracijama vodonika vrši se posmatranjem uzdužnog poprečnog preseka uzoraka i

sprovođenjem analize slike na njemu. Zatim su rezultati analize slike korišćeni za kreiranje matematičke formulacije koja najbolje korelira efekat rastvorenog vodonika i poroznost.

2.1. Postupak pripreme uzorka

Eksperimentalni postupak, prikazan na slici 2, počeo je rezanjem i čišćenjem ingota, a zatim su ti komadi ingota ubačeni u elektrootpornu peć. Nakon topljenja, tečna legura je održavana na temperaturi od 790°C u peći.



Slika 2 – Korišćeni uređaji i redosled eksperimentalnih koraka

U tečnu leguru je uvedena atomizovana vodena para kao izvor vodonika. AISCAN uređajem je merena koncentracija rastvorenog vodonika. AISCAN analizator vodonika je prenosni, automatski i izdržljiv uređaj napravljen za brzo i tačno merenje rastvorenog vodonika u tečnom aluminijumu. On omogućava visoku kvalitetnu metaluršku kontrolu u okruženju livnice koristeći metod recirkulacije u zatvorenoj petlji omogućavajući rezultate u roku od 10 minuta ili manje sa opsegom merenja od nula do 9,99 ml vodonika u 100 g tečnog metala.

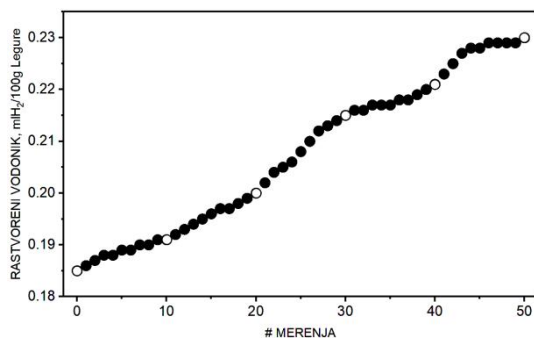
Odmah nakon određivanja koncentracije rastvorenog vodonika, 200 g tečne legure je sipano u čašu od nerđajućeg čelika i ostavljeno da se ohladi do sobne temperature. Zatim je Foseco uređaj za degazaciju korišćen za smanjenje nivoa vodonika u elektrootornoj peći i ceo postupak je ponovljen. FOSECO FDU je automatizovani rotirajući degazirajući sistem napravljen da ukloni rastvoreni vodonik iz rastopa aluminijuma poboljšavajući kvalitet tečnog metala. Koristeći specijalizovani rotor da ubrizga inertan gas (azot ili argon) sistem stvara sitne mehuriće koji se raspo- ređuju kroz rastop bez površinskih turbulencija.

Površinski procenat poroznosti je određen korišćenjem besplatnog softvera ImageJ.

3. REZULTATI

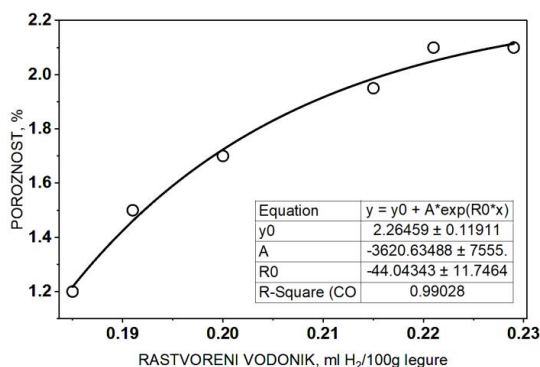
U rasponu koncentracija od 0,18 do 0,23 ml H₂/100 g legure urađeno je 50 merenja koncentracije vodonika što je broj merenja koji obezbeđuje dovoljno podataka za dalje matematičko modelovanje. Slika 3

prikazuje izmerene koncentracije vodonika u tečnoj leguri. Svaki deseti uzorak je selektovan za dalju analizu poroznosti metodom analize slike. Pri nižim koncentracijama rastvorenog vodonika, odnos povećanja koncentracije rastvorenog vodonika u tečnoj leguri i poroznosti u očvrslom uzorku ima linearno povećanje. Međutim, pri višim koncentracijama rastvorenog vodonika u tečnoj leguri, bez obzira na to koliko se atomizovane vodene pare doda u tečnu leguru, količina rastvorenog vodonika ostaje ista.



Slika 3 – Pregledni dijagram izmerenih koncentracija vodonika rastvorenog u tečnoj leguri aluminijuma

Slika 4 prikazuje podatke o nivou poroznosti koji odgovaraju uzorcima sa različitim nivoima rastvorenog vodonika u tečnoj leguri. S obzirom da su uzorci očvršćavali pod istim pritiskom, više vrednosti rastvorenog vodonika u tečnoj leguri su rezultirale višim vrednostima poroznosti u očvrslim uzorcima.



Slika 4 – Fitovanje eksperimentalnih rezultata u konkavnu eksponencijalnu funkciju

Bez obzira na mehanizam formiranja pora i veliki broj objavljenih rezultata u vezi sa maksimalnim vrednostima rastvorljivosti vodonika, postoji konsenzus da međuzavisnost koncentracije vodonika i nivoa poroznosti nije linearan [18].

Postojanje ograničenja u okviru fizičkih procesa kretanja tečnosti, uključujući i prelazak jedne ili više komponenti iz jedne faze u drugu, čini linearne jednačine nedelotvornim što otežava analizu podataka i proces automatizacije. Stoga, mora se razviti mate-

matički model primenljiv na širi opseg koncentracije rastvorenog vodonika, koji obuhvata i zonu rasta poroznosti i zonu zasićenja, koji pri tom pruža zadovoljavajuće kvantitativne rezultate fitovanja.

Fitovanjem vrednosti izmerene količine rastvorenog vodonika i korespondirajućih vrednosti određene poroznosti, najviša vrednost koeficijenta regresije je nađena za konkavnu eksponencijalnu funkciju koja ima sledeći oblik:

$$\Pi = \Pi_{max} + I_H \cdot \exp(r \cdot H) \quad (1)$$

gde Π izražava vrednost poroznosti (%) za korespondirajuću količinu rastvorenog vodonika H (ml H_2 /100 legure), dok je Π_{max} maksimalna poroznost u %. I_H i r su konstante preseka i rasta funkcije.

Izvođenjem prvog izvoda poroznosti po promeni koncentracije rastvorenog vodonika pokazuje da kriva ima monotoni rast do vrednosti poroznosti od 2,26%, kada vrednosti promene prvog izvoda postaju bliske nuli. To ukazuje da je 0,236 ml H_2 /100g legure maksimalna koncentracija rastvorenog vodonika koja se može očekivati ako bi legura bila izložena visokoj količini vlage ili drugog izvora vodonika.

4. KORELACIJA IZMEĐU FIZIČKIH SVOJSTAVA I MATEMATIČKOG MODELOVANJA

Na temperaturi topljenja, aluminijum, glavni sastojak legure aluminijuma sa 7,77 tež% silicijuma i 3,48 tež% bakra, ima gustine od 2,37 g/cm³ i 2,55 g/cm³ za tečno i čvrsto stanje, respektivno. S obzirom na molarnu entalpiju topljenja od 10,7 kJ/mol i molarnu težinu od 27,98 g/mol, eventualni uticaj promene ambijentalnog pritiska na karakteristične temperature faznih transformacija u legurama aluminijuma je zanemarljiv.

Međutim, smanjenje ili povećanje ambijentalnog pritiska utiče na adsorpciju i rastvaranje gasova, što dodatno utiče na prenos toplote i mase, parcijalne pritiske i aktivitet legirajućih i elemenata u tragovima u tečnoj leguri i raspodelu elemenata između različitih mikrokomponekata [19]. Kao rezultat toga, legure očvrsnute pod značajno različitim pritiscima bi imale različite mikrostrukture i mehanička svojstva [20, 21].

Kritični fenomeni koji doprinose formiranju i širenju mehura vodonika su: visoka rastvorljivost vodonika u tečnom aluminijumu, značajna razlika u rastvorljivosti vodonika u tečnoj i čvrstoj leguri i relativno kratko vreme očvršćavanja u praktičnim uslovima primene, što sve rezultira zarobljavanjem vodonika unutar očvrsnute strukture zbog nedostatka vremena za rastvaranje i isparavanje [22].

Mehuri vodonika se formiraju i rastu brže tokom očvršćavanja tečnih metala pod smanjenim pritiskom

nego pod atmosferskim pritiskom [23], što dovodi do formiranja mehura na nižem nivou sadržaja rastvorenog vodonika. Ako je tečni metal pod smanjenim pritiskom, parcijalni pritisak vodonika se smanjuje, što dovodi do smanjene rastvorljivosti vodonika u tečnosti. Kada bi svi mehuri vodonika ostali u metalu tokom očvršćavanja, rezultirali bi većim nivoom poroznosti. Dakle, što je niži pritisak, veći je raspon vrednosti dobijenih za kvantifikaciju korelacije između rastvorenog vodonika i nivoa poroznosti, što posledično pruža tačnije rezultate [18].

Ovo bi omogućilo uspostavljanje nove metode visoke osetljivosti za određivanje poroznosti i sadržaja vodonika u proizvodima od aluminijuma u industrijskim uslovima [24].

5. PRIMENA U INDUSTRIJI

Vrsta livačkih posuda, segregacija materijala, viskoznost i fluidnost u tečnom stanju, utiču na formiranje poroznosti u legurama aluminijuma. Kako mnogi parametri mogu uticati na poroznost, stvarni rezultati se često značajno razlikuju od teorijskih predviđanja. U tom smislu, matematičko modelovanje može se koristiti za procenu pouzdanosti finalnih proizvoda i kao osnova za praćenje toka procesa očvršćavanja.

Takođe, dalje usvajanje algoritama i modela sposobnih za nezavisne promene parametara omogućava kontrolu procesa veštačkom inteligencijom. Kao što je prikazano na slici 4, korišćenje konkavne eksponencijalne funkcije prilagođene eksperimentalnim rezultatima daje predviđanja maksimalne rastvorljivosti vodonika u tečnoj leguri aluminijuma, a takođe pruža i predviđanje očekivane poroznosti u očvršnutim delovima.

Kako sektor livenja metala napreduje sa tehnikama proizvodnje u okviru Industrije 4.0, napredak u matematičkom modelovanju i upravljanju podacima biće ključan za razvoj nauke o materijalima. To je nepohodno za proširenje mogućnosti proizvodnje različitih komponenti dobijenih očvršćavanjem iz tečnog stanja, uz istovremeno rešenje izazova vezanog za simultano povećanje obima proizvodnje uz uniformni kvalitet proizvedenih delova. Ključ za efikasno unapređenje kontrole procesa livenja ne leži samo u proizvodnom okruženju, već i u sveobuhvatnom okviru koji uključuje različite elemente pametne proizvodnje [25, 26].

6. ZAKLJUČAK

U ovom istraživanju je određena maksimalna količina rastvorenog vodonika u tečnoj leguri aluminijuma sa 7,77 tež% silicijuma i 3,48 tež% bakra na temperaturi od 760°C i atmosferskom pritisku. Eksperimentalni rezultati su pokazali da eksponencijalna kriva najbliže korelira sa fizičkim svojstvima legure i

primenjenim procesima. Shodno tome, eksponencijalna kriva pruža mogućnost za najtačniju procenu poroznosti u očvršnutim uzorcima na osnovu poznate koncentracije rastvorenog vodonika u tečnoj leguri kao ulaznog podatka.

Konkretno, utvrđena maksimalna koncentracija rastvorenog vodonika je 0,236 ml H₂/100 g legure za očvršćavanje na atmosferskom pritisku. Predstavljene matematičke korelacije, zasnovane na eksperimentalnim podacima, omogućavaju korektivne mere koje se mogu primeniti u realnom vremenu tokom procesa livenja.

7. ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržalo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, u okviru granta 451-03-33/2026-03/200175.

LITERATURA

- [1] H. Liu, M. Bouchard, L. Zhang. An Experimental Study of Hydrogen Solubility in Liquid Aluminium, *Journal of Materials Science*, vol. 30, pp. 4309–4315, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00361510>
- [2] Y. Zhang, C. Xue, J. Wang, X. Yang, Q. Li, S. Wang, H. Su, H. Li, Y. Miao, R. Dou. Quantifying the Effects of Hydrogen Concentration and Cooling Rates on Porosity Formation in Al-Li Alloys, *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 26, pp. 1938-1954, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.017>, 2023.
- [3] A. Campari, F. Ustolin, A. Alvaro, N. Paltrinieri. A Review on Hydrogen Embrittlement and Risk-Based Inspection of Hydrogen Technologies, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no.90, pp. 35316-35346, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.293>, 2023.
- [4] H. Liu, M. Bouchard, L. Zhang. An experimental study of hydrogen solubility in liquid aluminium. *Journal of Materials Science* vol. 30, pp. 4309-4315, 1995.
- [5] L. Ziqing, N. Ren, X. Xu, J. Li, C. Panwisawas, M. Xia, H. Dong, E. Tsang, J. Li. Real-Time Prediction and Adaptive Adjustment of Continuous Casting Based on Deep Learning, *Commun Eng*, vol. 2, no. 34, <https://doi.org/10.1038/s44172-023-00084-1>, 2023.
- [6] Z. Xu, L. Jia, Z. He, X. Guo, Q. Tian. A review of preparing high-purity metals by vacuum distillation, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 34, no. 5, pp. 1634-1654, [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(24\)66496-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(24)66496-4), 2024
- [7] T. Tanabe. Hydrogen Diffusion, Permeation and Solution of Metals and Alloys. In: *Kinetics of Hydrogen in Metals*. Springer Series in Materials Science, vol

357. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-95-1287-4_7, 2026.
- [8] A. Osman, N. A. Alsaleh, M. Ahmadein, M. A. El-Sayed. Quantitative evaluation of mechanical characteristics of Al-Si cast alloys: A parametric study, *China Foundry*, published on 28 January 2026, <https://doi.org/10.1007/s41230-026-5159-5>, 2026.
- [9] S. Jiang, Y. Xu, R. Wang, et al. Structurally complex phase engineering enables hydrogen-tolerant Al alloys, *Nature* vol. 641, pp. 358–364, <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08879-2>, 2025
- [10] N. Cui, T. Zhao, Z. Wang, Y. Zhao, Y. Chao, H. Lin, D. Li, J. Zhao. Porosity evolution mechanisms, influencing factors, and ultrasonic-assisted regulation in joining high Mg-content aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 336, pp. 118706, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118706>, 2025.
- [11] J. Campbell. Castings. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd., 335 pages, 1991.
- [12] M. Tiryakioğlu. Solubility of hydrogen in liquid aluminium: reanalysis of available data, *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 32, no. 5–6, pp. 315–318, <https://doi.org/10.1080/13640461-2020-1718337>, 2019.
- [13] L. Socha, T. Prášil, K. Gryc, J. Svizelova, M. Sater-nus, T. Merder, J. Pieprzyc, P. Nuska. Assessment of refining efficiency during the refining cycle in a foundry degassing unit in industrial conditions, *Scientific Reports*, vol. 14, article number 1415, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51914-x>, 2024.
- [14] J. Jia, Y. Niu, J. Wan, Y. Li, L. Yang, Z. Zhang, W. Wang, H. Liu, Y. Chen. Review on approaches to evaluating the quality of molten aluminum alloys. *The 17th Asian Foundry Congress*, part 2, pp. 336–351.
- [15] A. Juarez-Hernandez, G. Trapaga-Martinez, J. L. Camacho-Martinez, C. Gonzalez-Rivera, I. Lopez Juarez. Alternative System to Measure Hydrogen Content in Molten Aluminium Using an Electro-chemical Sensor, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, vol. 27, pp. 1037–1042, 2020.
- [16] D. P. Lapham, C. Schwandt, M. P. Hills, R. V. Kumar, D. J. Fray. The Detection of Hydrogen in Molten Aluminium, *Ionics*, vol. 8, pp. 391–401, 2002. <https://doi.org/10.1007/BF02376052>
- [17] D. Yousif. Integrated Assessment and Improvement of the Quality Assurance System for the Cosworth Casting Process, Master Thesis, University of Windsor, 2007.
- [18] A. Mitrašinović, Z. Odanović, F.C. Robles Hernández. Effect of dissolved hydrogen on characteristic transformation temperatures in Al8Si3Cu alloy, *Vacuum*, vol. 241, pp. 114615, <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114615>, 2025.
- [19] A. M. Mitrašinović, Z. Odanović. Thermodynamic and kinetics investigation of elemental evaporation from molten Al7Si4Cu alloy, *Thermochimica Acta*, vol. 695, pp. 178816, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2020.178816>
- [20] A. Nourian-Avval, A. Fatemi. Fatigue Life Prediction of Cast Aluminum Alloy Based on Porosity Characteristics, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 109, pp. 102774, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102774>, 2020.
- [21] A. M. Mitrašinović, J. Nešković, S. Polavder, S. Petković, Ž. Praštalo, N. Labus, M. Radosavljević. Modeling of Impurities Evaporation Reaction Order in Aluminum Alloys by the Parametric Fitting of the Logistic Function, *Materials*, vol. 17, pp. 728, <https://doi.org/10.3390/ma17030728>, 2024.
- [22] R. F. Jaime, H. Puga, M. Prokic, C. Soderhjelm, D. Apelian. Fundamentals of Ultrasonic Treatment of Aluminum Alloys, *Inter Metalcast*, vol. 18, pp. 27–83–2807, <https://doi.org/10.1007/s40962023012-53-w>, 2024.
- [23] M. Elsayed, T. E. M. Staab, J. Čížek, R. Krause-Rehberg. Monovacancy-Hydrogen Interaction in Pure Aluminum: Experimental and Ab-Initio Theoretical Positron Annihilation Study. *Acta Materialia*, vol. 248, pp. 118770, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.118770>, 2023.
- [24] A. M. Mitrašinović, R. D'Souza. Hydrogen Effervescence from Aluminum Alloy Melts, *JOM*, vol. 64, pp. 1448–1452, <https://doi.org/10.1007/s11837012-0472-4>, 2012.
- [25] A. Mitrašinović, T. Đurđević, J. Nešković, M. Radosavljević. Temperature Monitoring in Metal Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0, *Technologies*, vol. 13, no. 8, pp. 317, <https://doi.org/10.3390/technologies13080317>, 2025.
- [26] Z. Lin, C. Yang. Artificial Intelligence Design of Sustainable Aluminum Alloys: A Review. *Computers, Materials & Continua*, vol. 86, no. 2, pp. 1–33, 2025.

SUMMARY

DETERMINATION OF THE MAXIMUM SOLUBILITY OF HYDROGEN IN AN ALUMINUM ALLOY WITH 7.77 WT% SILICON AND 3.48 WT% COPPER

The quality of cast aluminum alloy products is directly related to the amount of dissolved hydrogen in the molten alloy. Current measurement techniques are unreliable, time-consuming, and labor-intensive. An aluminum alloy with 7.77 wt% silicon and 3.48 wt% copper, which readily absorbs hydrogen in the liquid state, is widely used in the automotive, aerospace, and, more recently, 3D printing industries for metal parts. Experimental results show that the porosity level in the hardened samples is directly related to the initial hydrogen content of the liquid alloy. The key result of this work is the derived exponential function for estimating the maximum solubility of hydrogen in liquid aluminum alloy under industrial conditions. The calculated value of the maximum solubility of hydrogen is 0.236 ml H₂/100 g alloy for the alloy that was kept at 790 °C at atmospheric pressure, while the value of the maximum porosity is 2.26 %. This mathematical correlation, based on experimental data, enables real-time corrective measures during casting, resulting in high-quality products with reduced porosity. The results of this study are intended for manufacturers of metal parts, especially in the context of Industry 4.0, where advanced mathematical modeling and smart manufacturing techniques are key to improving production efficiency and product quality.

Key Words: *Hydrogen, aluminum alloy, solubility, mathematical modeling*