

Določanje vezalne energije pasti za vodik z visokotemperaturno vakuumsko ekstrakcijo

Determination of Binding Energy for Hydrogen with High Temperature Vacuum Extraction

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-01-17

L. Vehovar, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana
S. Ažman, ACRONI Jesenice

Mesečno delovanje vodika s prehodnimi kovinami in njihovimi karbidi je bilo raziskano s termično analizo, pri čemer je bil uporabljen plinski kromatograf kot detektor za vodik. Rezultati kažejo, da imajo karbidi Nb in Mo najmanjšo vezalno energijo. Takšno jeklo NIOMOL 490 K, ki je bilo legirano z Nb in Mo, je pokazalo najboljšo odpornost proti vodikovi krhkosti.

Ključne besede: vodikova krhkost, prehodni elementi, visokotemperaturna vakuumsko ekstrakcija, vezalna energija, sulfidno napetostno pokanje

The interaction of hydrogen with transition metals and their carbides was studied by thermal analysis using gas chromatograph as hydrogen detector. The trap binding energy was determined. Results show that the Nb or Mo carbides in microalloyed steels have the lowest trap binding energy. NIOMOL 490 K steel alloyed by Nb and Mo have shown the best resistance to hydrogen embrittlement.

Key words: hydrogen embrittlement, transition metals, high temperature vacuum extraction, binding energy, sulphide stress cracking

1. Uvod

To delo se navezuje na članek Vpliv prehodnih elementov na procese vodičenja mikrolegiranih jekel¹. Materiali za raziskave so bili isti kot v predhodnem delu.

Vezalno energijo pasti (E_{vp}), tj. med pastjo in vodikom, lahko izračunamo iz razmerja med temperaturo elektrokemično vodičenega vzorca in količino vodika, ki je bil ulovljen v pasteh. Sprememba vezanega deleža vodika s časom (dn/dt) v prisotnosti pasti je definirana z enačbo, ki sta jo eksperimentalno postavila Mc Nabb in Foster².

$$\frac{dn}{dt} = kC_L(1-n) - pn \quad (1)$$

- C_L koncentracija vodika = $C_0 \exp(-E_0/RT)$
- n delež vezanega vodika v pasteh
- k hitrost ujetja vodika v pasteh = $v_0 \exp(-E_s/RT)$
- C_0 konstanta
- p hitrost ločevanja vodika od pasti = $v_1 \exp\{-(E_s + E_{vp})/RT\}$
- E_0 energija trdne raztopine
- E_s energija sedla
- v_0, v_1 vibracijski frekvenci vodika v urejeni kristalni mreži ali na mestih, kjer je ujet
- T absolutna temperatura
- R plinska konstanta

Kadar je doseženo ravnotežno stanje med vodičenjem vzorca pri določeni temperaturi, so pasti trajno zasedene ($dn/dt = 0$). Preurejena enačba (2) je:

$$n = \frac{k}{p} C_0 \exp\left(-\frac{E_0}{RT}\right) \quad (2)$$

Če predpostavimo, da sta si frekvenci nihanja (v_0, v_1) enaki, potem dobi enačba (2) drugačno obliko:

$$n = C_0 \exp\left(-\frac{E_{vp} - E_0}{RT}\right) \quad (3)$$

oz.

$$n = \frac{C_x}{N_x} \quad (4)$$

pri čemer je:

C_x = koncentracija ulovljenega vodika

N_x = gostota pasti

Kombinacija enačb (3) in (4) daje:

$$C_x = N_x C_0 \exp\left(-\frac{E_{vp} - E_0}{RT}\right) \quad (5)$$

pri tem pa je:

T_H = temperatura vodičenja vzorca

Če logaritmiramo levo in desno stran enačbe (5), dobimo:

$$\ln C_x = \ln N_x C_0 + \frac{E_{vp} - E_0}{RT_H}$$

Iz tega sledi, da nagnjenost premice, ki pomeni odvisnost $\ln(C_x)$ proti $(1/T_H)$, določuje velikost E_{vp} .

¹ Prof. dr. Leopold Vehovar,
Inštitut za kovinske materiale in tehnologije,
Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija

2. Raziskave

2.1 Vodičenje vzorcev

Vodičenje vzorcev (valjčkov s premerom 8 mm in višino 15 mm) je bilo izpeljano tako, da je bila omogočena zasedba perifernih in preostalih pasti, prisotnih po celotnem volumnu. To pa je možno takrat, kadar je izbran ustrezen elektrolit, pravilni pogoji elektrokemične katodne polarizacije in ustrezen čas.

Elektrolit je bila raztopina 1N H_2SO_4 + 10 mg As_2O_3 /l, proces vodičenja pa je potekal s transportom ionov H^+ iz elektrolita na katodno površino, kjer se je tvoril H_{ad} , ta pa je lahko na energijsko najbolj ugodnih mestih migriral v kovino:



Za nadaljnji stacionarni potek vodičenja je potrebno, da so katodne površine zasedene z H_{ad} in da je omogočena stalna difuzija H-atomov v notranjost kovine. Toda proces (7) lahko poteka tudi v smeri tvorbe molekulskega vodika (H_2), s čimer pa je efekt katodne polarizacije izrazito zmanjšan. V tem primeru je reakcija t.i. katalitične rekombinacije (mehanizem Volmer-Tafel) naslednja:



Vendar je ta proces tvorbe H_2 možen tudi z elektrokemično desorpcijo (mehanizem Volmer-Heyrowsky):



Če hočemo dovolj učinkovito vodičiti, sta procesa (8) in (9) nezaželena, vendar ju je nemogoče povsem izločiti, zato se delno tvori tudi atomski vodik. Po teoriji "zadrževanja razelektrenja H^+ iona" se predpostavlja, da je najpočasnejša stopnja pri katodnem izločanju molekulskega vodika reakcija (7), to pomeni, da je vendar dana možnost bolj ali manj učinkovitega vodičenja, kinetiko tega procesa pa dejansko določa zastajanje H_{ad} na elektrodni površini. Takšno zastajanje atomov vodika povzroča t.i. katodno prenapetost oz. prenapetost izločanja vodika. Za vodičenje kovin s katodno polarizacijo in pri procesu korozije je torej značilna katodna prenapetost. Čim večja je, tem večja je stopnja vodičenja.

Prenapetost izločanja vodika je odvisna od vrste kovine (od t.i. notranjih metalurških faktorjev: kemične sestave, mikrostrukture, nečistoč, stopnje hladne predelave) in elektrolita. Različni dodatki v elektrolitu lahko bistveno vplivajo na kinetiko razvoja vodika in na njegov vstop v kristalno mrežo, zato je bil v tem raziskovalnem delu uporabljen As_2O_3 , ki deluje kot "katodni strup". Že majhen dodatek As_2O_3 znatno povečuje adsorpcijo in absorpcijo H-atomov. Mnogi argumenti dokazujejo pomen ter vpliv strupov na znižanje vezalne sile med kovino in vodikom zaradi pospeševanja absorpcije vodika v kristalno mrežo. Prisotnost strupov - torej molekul z veliko adsorpcijsko sposobnostjo na površini kovine - lahko poruši vezi med atomi kovine s tem, da znižuje kohezivsko silo. Zaradi tega nastala pregrupacija atomov omo-

goča vdor atomov vodika (H_{ad}) v notranjost kovine. Pospeševalci vodičenja eliminirajo različne bariere in s tem znižujejo aktivacijsko energijo za različne stopnje migracije vodika v notranjost materiala. To so bili razlogi za dodatek As_2O_3 v kislno raztopino 1N H_2SO_4 .

Katodna polarizacija vzorcev za raziskave je bila izvedena z gostoto katodnega toka 3,0 mA/cm². Čas polarizacije je trajal 3 ure, kar je bilo dovolj, da je v kovini intersticijsko raztopljen atomski vodik zasedel številne pasti. Iz raztopine je bil kisik odstranjen s 30 min. preprihovanjem z N_2 .

Vodičenje je bilo izvajano pri treh temperaturah elektrolita: 20, 40 in 80 °C. Takoj po tem so bili vzorci stabilizirani v tekočem dušiku (30 sekund), kajti vodičenje pri treh različnih temperaturah lahko povzroči različno izhajanje vodika iz kovine po katodni polarizaciji. Zaradi tega so bili vzorci hipoma ohlajeni v tekočem dušiku (30 sekund), zatem pa odstajani 24 ur pri sobni temperaturi. Med celodnevним odstajanjem je iz kovine difundiral v pasti nevezan vodik.

S takšno pripravo vzorcev je bila omogočena raziskava vpliva različnih pasti v jeklih, binarnih Fe-Me- in ternarnih Fe-Me-C- sistemih, torej v kristalni mreži intersticijsko raztopljenih atomov vodika, ki niso difundirali navzven, temveč so se vezali v pasti. Z visokotemperaturno vakuumsko ekstrakcijo je bila ugotovljena količina vezanega vodika, njen delež pa je bil odvisen od narave pasti, tj. od energije interakcije z vodikom.

2.2 Določanje vezalne energije pasti z visokotemperaturno vakuumsko ekstrakcijo

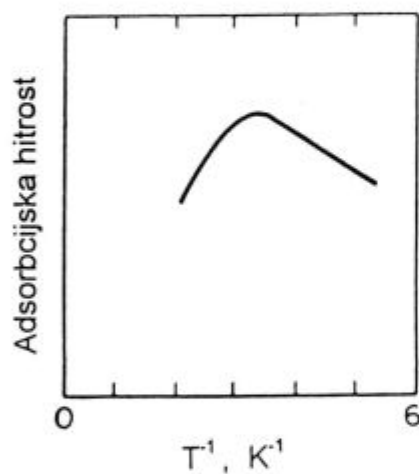
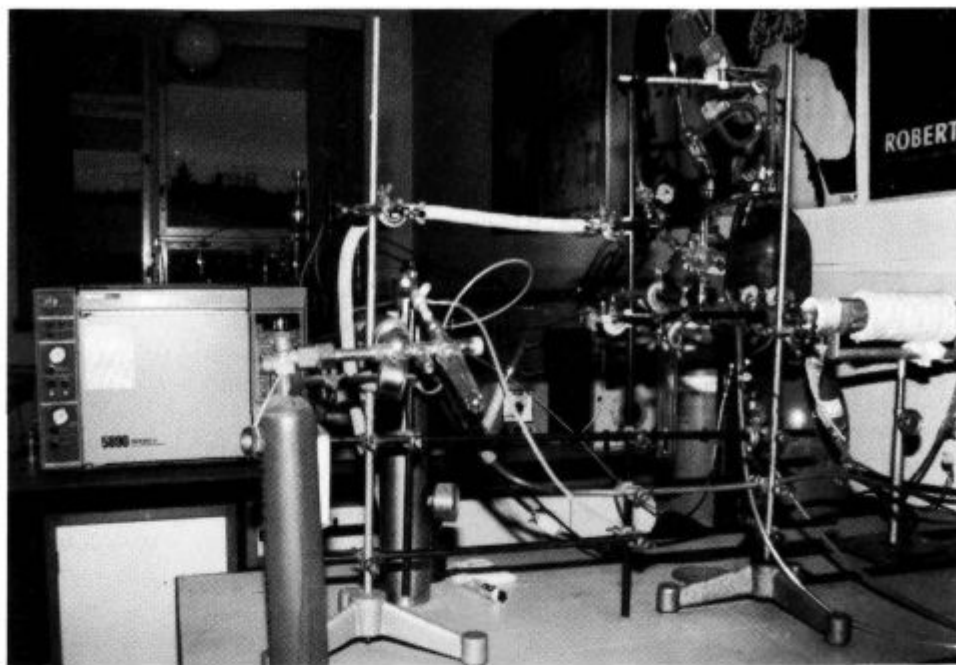
Sklop aparatov za določanje E_{vp} na osnovi količine vezanega vodika v različnih pasteh, je prikazan na **sliki 1**. Sestavljen je iz treh bistvenih delov:

- iz temperaturno regulirane peči s kremenovo cevjo za vstavljanje vzorcev
- iz črpalke za zbiranje molekulskega vodika, ki je bil z visokotemperaturno vakuumsko ekstrakcijo in nosilnim plinom analiziran s plinskim kromatografom
- in iz plinskega kromatografa Hewlett Packard 5890, Series II.

Ekstrakcija atomskega vodika je bila izvedena pri konstantni temperaturi 960 °C, s plinskim kromatografom pa je bil določen delež molekulskega vodika, ki nastaja na površini vzorcev z izhajanjem H-atomov. Vendar pa so pri teh meritvah količine vodika nastanejo odstopanja, ki so povezana s procesi elektrokemičnega vodičenja vzorcev. Pričakovano je, da absorpcija atomskega vodika v kovino raste s temperaturo vodičenja, toda rezultati v tabeli 1 potrjujejo, da se kinetika elektrokemičnih procesov v večini primerov bistveno spremeni okoli temperature 80 °C (353 K), pri kateri je količina ekstrahirane vodika nižja kot pri 40 °C. To je v nasprotju s teorijo difuzijskih procesov, ki trdi, da difuzivnost narašča s temperaturo. Pri difuziji H-atomov v kovino so pri višjih temperaturah tudi več ali manj pre-

Slika 1: Sklop aparatur za določanje vodika z visokotemperaturno vakuumsko ekstrakcijo

Fig. 1: High temperature vacuum extraction equipment for determining of hydrogen



Slika 2: Hitrost kemisorpcije kot funkcija temperature

Fig. 2: The rate of chemisorption as a function of temperature

magane nekatere energijske prepreke, to pa omogoča lažje preskakovanje vodika v kristalni mreži. Ali se pri višji temperaturi zmanjša aktivnost H^+ -ionov na elektrodni površini (to je najmanj verjetno!), ali pa sta reakciji (8) in (9) dominantni, to je še nejasno, posledica tega pa je tvorba plinastega molekulskega vodika in ne pretežno H_{ad} . Obstajajo indikacije, da pri danem toku katodne polarizacije pada lokalna ravnotežna koncentracija vodika, če istočasno narašča temperatura elektrolita. To je povezano s procesi kemisorpcije (slika 2) - torej neposredno z adsorpcijsko hitrostjo². Posledica tega je majhna katodna prenapetost in manjša zasedenost elektrodni površin s H_{ad} , ki je osnova za vodičenje kovine. Proces kemisorpcije in katodna prenapetost so odvisni tudi od mikrostrukture in narave pasti, zato verjetno ni slučaj, da imamo primere, ki odstopajo od omenjenih predpostavk.

Iz količine ekstrahirane vodika (C_x) je bila na osnovi zakonitosti iz enačbe (5) oziroma odvisnosti $\ln(C_x)$ proti $(1/T_H)$ ter metode najmanjših kvadratov izračunana $E_{v,p}$. Rezultati raziskav so prikazani v tabeli 1 in grafično na sliki 3.

2.3 Diskusija o rezultatih visokotemperaturne vakuumске ekstrakcije

Rezultati visokotemperaturne vakuumске ekstrakcije elektrokemično vodičenih vzorcev se dobro ujemajo z rezultati za $E_{v,p}$, ki so bili izračunani iz difuzijskih konstant, s katerimi so bile tudi potrjene teze o delovanju karbidov prehodnih elementov v feritni mikrostrukturi, pa tudi substitucijsko raztopljenih atomov teh legirnih elementov¹.

V-karbidi so močne irreverzibilne pasti, vezalna energija teh pa izrazito presega energije, ki jih imajo preostali karbidi. Med temi je past Nb-karbida še najmanj atraktivna. Ravno to pa daje prednost niobiju kot legirnemu elementu v mikrolegiranih jeklih, skupaj z molibdenom ali celo titanom.

Prebitki prehodnih elementov, ki niso vezani v karbid, so izrazito škodljivi, čeprav je substitucijsko raztopljen vanadij le malo škodljiv, pa vendar z naraščanjem deleža tega elementa (npr. Fe-V 0,7 %) raste vrednost $E_{v,p}$. Podobno se vede titan pa tudi molibden in še posebej niobij.

Dodatek niklja je bil že prepovedan v jeklih za petrokemijo, njegov škodljiv vpliv pa je dokazan tudi v tem delu (zlitina Fe-Nb-C-Ni v tabeli 1).

Navadno maloogljčno konstrukcijsko jeklo Č.0562 je izrazito podvrženo vodikovi krhkosti, podobno NIOVAL 47. Odlično se obnese mikrolegirano konstrukcijsko jeklo NIOMOL 490 K, ki je bilo na osnovi teh

Tabela 1: Rezultati visokotemperaturne vakuumske ekstrakcije in vrednosti za C_X in E_{vp} **Table 1:** Results of high temperature vacuum extraction and the values for C_X and E_{vp}

Material	Količina vezanega H(C _X , ppm, mol H/cm ³)						E _{vP} (kJ/mol)
	298 K		313 K		353 K		
	ppm	mol H/cm ³	ppm	mol H/cm ³	ppm	mol H/cm ³	
α-Fe	0,26	1,72×10 ⁻⁷	0,38	2,52×10 ⁻⁷	0,42	2,79×10 ⁻⁷	-
Fe-Nb-C	0,31	2,06×10 ⁻⁷	1,15	7,63×10 ⁻⁷	0,44	2,92×10 ⁻⁷	2,28
Fe-V-C	1,71	11,3×10 ⁻⁷	5,33	35,3×10 ⁻⁷	5,56	36,9×10 ⁻⁷	16,43
Fe-Ti-C	0,86	5,7×10 ⁻⁷	2,75	18,2×10 ⁻⁷	2,01	13,3×10 ⁻⁷	10,21
Fe-Mo-C	0,79	5,24×10 ⁻⁷	2,91	19,3×10 ⁻⁷	1,45	9,62×10 ⁻⁷	6,20
Fe-Nb	0,66	4,38×10 ⁻⁷	0,97	6,43×10 ⁻⁷	-	-	18,51
Fe-V	1,06	7,03×10 ⁻⁷	-	-	1,27	8,42×10 ⁻⁷	7,52
Fe-Ti	0,99	6,56×10 ⁻⁷	3,82	25,3×10 ⁻⁷	2,63	17,4×10 ⁻⁷	11,72
Fe-Mo	0,90	5,97×10 ⁻⁷	0,75	4,97×10 ⁻⁷	1,79	11,9×10 ⁻⁷	10,88
Fe-Nb-C-Ni	1,37	9,08×10 ⁻⁷	3,43	22,7×10 ⁻⁷	4,33	28,7×10 ⁻⁷	15,87
Fe-Nb 1 %	1,51	10,0×10 ⁻⁷	2,36	15,6×10 ⁻⁷	4,44	29,0×10 ⁻⁷	15,36
Fe-V 0.7 %	1,91	12,7×10 ⁻⁷	2,42	16,0×10 ⁻⁷	-	-	9,02
Fe-Ti 1 %	1,04	6,90×10 ⁻⁷	1,68	11,1×10 ⁻⁷	-	-	18,28
Fe-Mo 1.2 %	0,34	2,25×10 ⁻⁷	1,04	6,90×10 ⁻⁷	0,79	5,24×10 ⁻⁷	10,22
Č.0562	1,0	6,63×10 ⁻⁷	4,13	27,4×10 ⁻⁷	4,83	32,0×10 ⁻⁷	20,65
NIOVAL 47	2,16	14,3×10 ⁻⁷	2,62	17,3×10 ⁻⁷	6,13	40,6×10 ⁻⁷	15,42
NIOMOL 490 K	0,78	5,17×10 ⁻⁷	0,78	5,17×10 ⁻⁷	1,3	8,62×10 ⁻⁷	7,77

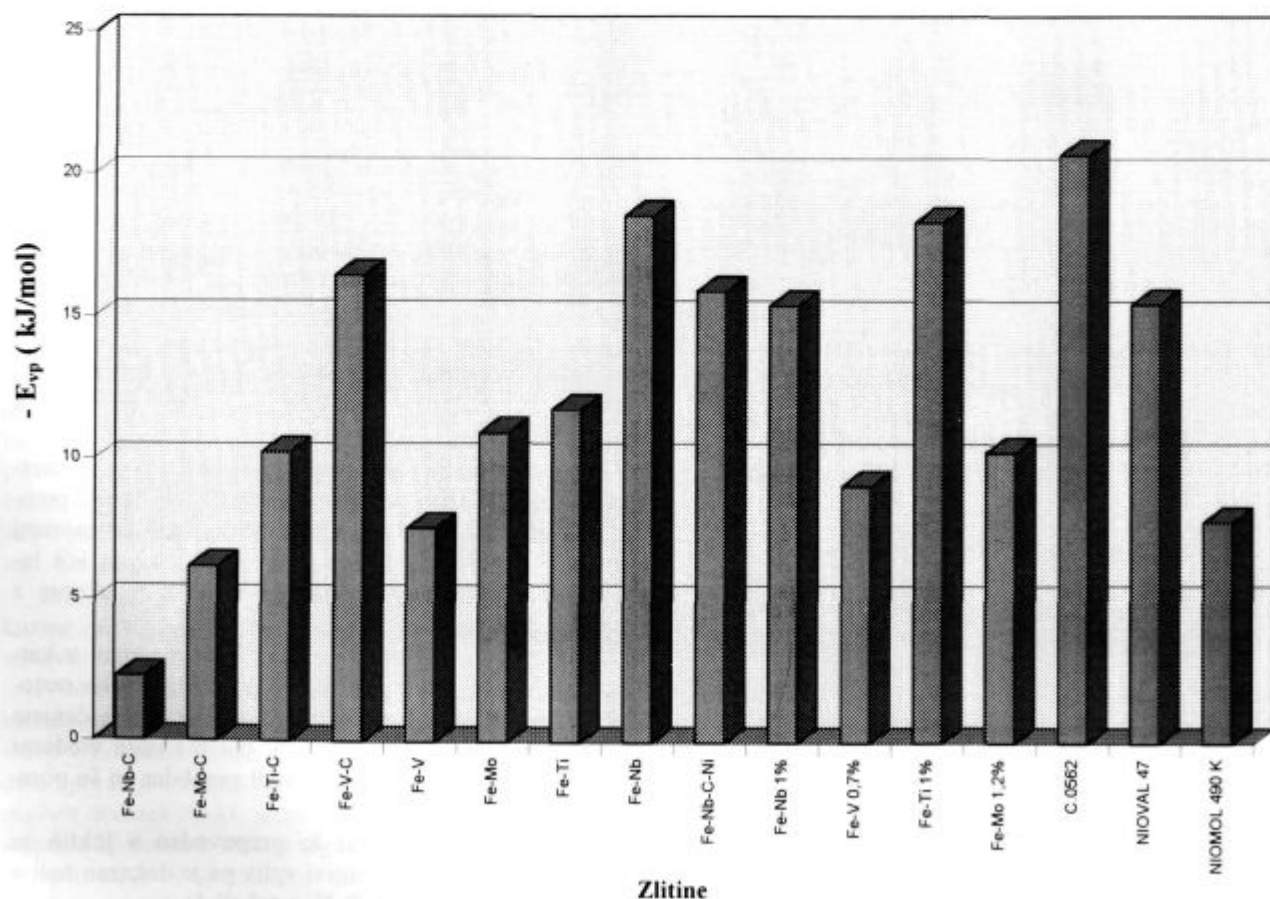
**Slika 3:** Vezalne energije zlitin Fe-Me-C, Fe-Me, Fe-Me-C-Ni in jekel vrste Č.0562, NIOVAL 47 ter NIOMOL 490 K. Vzorci so bili vodičeni s katodno polarizacijo, vezani vodik pa določen z visokotemperaturno vakuumsko ekstrakcijo**Fig. 3:** Binding energies for Fe-Me-C, Fe-Me, Fe-Me-C-Ni alloys and Č.0562, NIOVAL 47 and NIOMOL 490 K type of steels. Samples were charged with cathodic polarization and trapped hydrogen determined by high temperature vacuum extraction

Tabela 2: Kemična sestava preiskovanih jekel
Table 2: Chemical composition of investigated steels

Jeklo	Kemična sestava v mas. %												
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Sn	Nb	Al-t
NIOMOL 490 K	0,08	0,34	0,36	0,011	0,004	0,54	0,17	0,35	0,27	<0,01	0,017	0,03	0,04
NIOVAL 47	0,17	0,41	1,48	0,012	0,002	0,12	0,09	0,21	0,02	0,07	0,007	0,045	0,061
Č.0562	0,16	0,37	1,21	0,01	0,005	0,15	0,11	0,17	0,04	<0,01	0,026	0,003	0,037

rezultatov na novo zasnovano v koncernu SŽ-ACRONI Jesenice (legiran z Nb in Mo).

2.4 Raziskave odpornosti NIOMOLA 490 K proti vodikovi krhkosti

Na osnovi rezultatov članka¹, ki so vezani na različne energijske nivoje vodika v binarnih in ternarnih zlitinah ter na osnovi vezalne energije pasti, je bilo izdelano mikrolegirano konstrukcijsko jeklo NIOMOL 490 K z dodatkom dveh prehodnih elementov, tj. niobija in molibdena. V kombinaciji s tem jeklom so bile narejene raziskave še na mikrolegiranem jeklu NIOVAL 47, ki je legirano z vanadijem in manganom (to jeklo se je zelo slabo obneslo v petrokemiji) ter na navadnem konstrukcijskem maloogljiknem jeklu Č.0562, ki se pogosto uporablja za rezervoarje v petrokemiji.

Kemična sestava vseh treh jekel je prikazana v **tabeli 2**, mehanske lastnosti pa v **tabeli 3**.

Tabela 3: Mehanske lastnosti preiskovanih jekel
Table 3: Mechanical properties of investigated steels

Jeklo	Napetost tečenja (N/mm ²)	Trdnost (N/mm ²)	Razteznost A ₅₀ (%)	Kontrakcija Z (%)
NIOMOL 490 K	516	587	26	79
NIOVAL 47	456	581	26	76
Č.0562	379	525	31	78

Raziskana je bila tudi mikrostruktura vseh treh jekel, kar je potrebno zato, ker je odpornost proti krhkemu pokanju zaradi delovanja vodika odvisna tudi od mikrostrukture in še posebej od številnih pasti, na katere se ujame absorbirani atomski vodik.

Ugotovili smo, da ima NIOMOL 490 K drobnazrnatno feritno-bainitno mikrostrukturo, v kateri so NbC_x in MoC_x - karbidi ter manjši oksidni vključki.

Za NIOVAL 47 je značilna drobnazrnatna feritno-perlitna trakasta mikrostruktura s številnimi oksidnimi in sulfidnimi vključki ter VC_x - karbidi. V pozitivnih izcejah tj. trakovih, kjer je več mangana in ogljika, zasledimo martenzitna in bainitna gnezda, katerih vpliv na procese vodičenja je bil kasneje jasno opredeljen.

Mikrostruktura konstrukcijskega jekla Č.0562 je feritno-perlitna. Prisotna je trakavost z martenzitnimi gnezdi in oksidnimi ter mestoma precej izrazitimi sulfidnimi vključki.

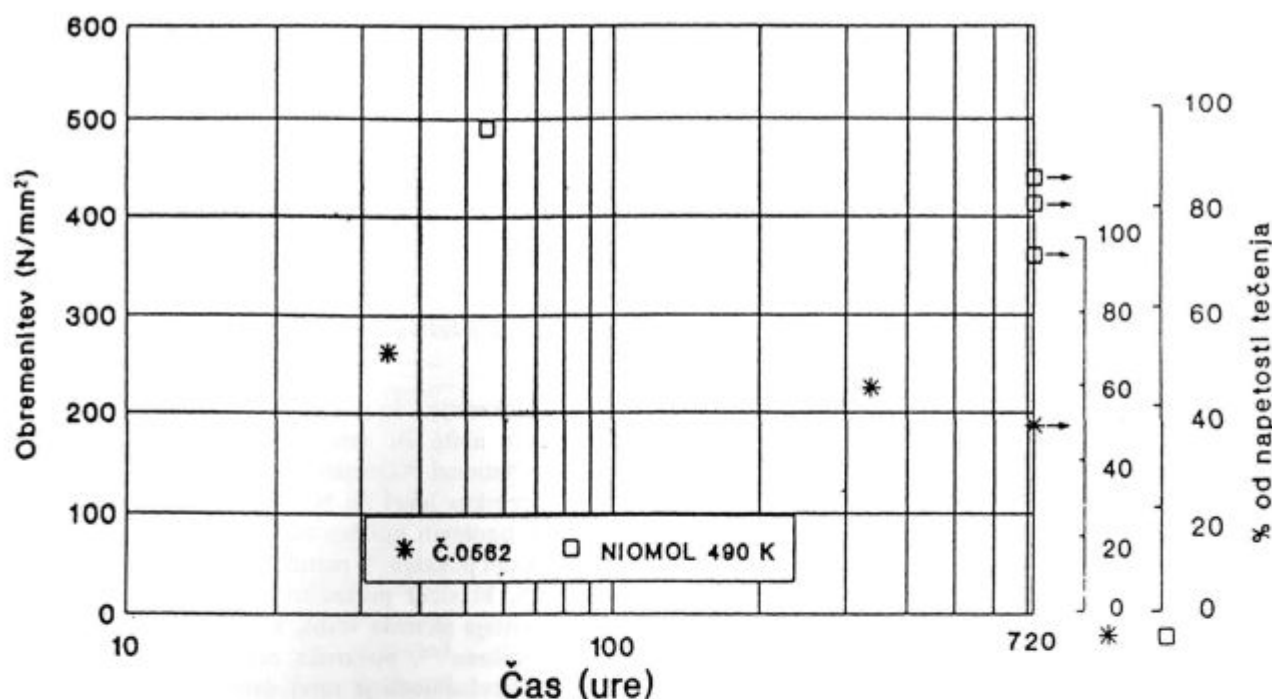
2.4.1 Preskus jekel proti vodikovi krhkosti po NACE TM-01-77

Za petrokemijo - še posebej za skladiščenje in transport surove nafte ali zemeljskega plina - predpisuje ameriška National Association of Corrosion Engineers (NACE) preskus jekel po NACE-standardu TM-01-77, ko se želi ugotoviti njihovo odpornost proti sulfidnemu napetostnemu pokanju. V petrokemiji prevladuje komponenta H₂S, ki sicer potencira korozijo, toda pri tem procesu nastaja atomski vodik, ki vstopa v jeklo, in kot je bilo opisano^{3,4,5}, povzroča zelo nevarno vodikovo krhkost. Prevladujoče je torej delovanje vodika in ne korozija, zato je preskus v NACE-raztopini (vodna raztopina 5 % NaCl, 0,5 % CH₃COOH-očetna kislina, nasičena s H₂S) prirejen tako, da se na različne napetosti obremenjeni preizkušanci dejansko preskušajo na odpornost proti vodikovi krhkosti. Tako obremenjeni in v NACE-raztopini izpostavljeni vzorci morajo vzdržati 720 ur.

Za te, zelo zahtevne raziskave je bil urejen poseben laboratorij, ki omogoča varno delo s strupenim H₂S. Obremenjevanje vzorcev je bilo omogočeno na nateznem stroju, ki je bil posebej izdelan za takšne razmere. V specialni dvoplaščni korozijski celici, v kateri je natezni preskušane izpostavljen koroziji in mehansko obremenjen, je bilo mogoče konstantno prepričevanje preskusne raztopine (v začetni fazi z N₂, kasneje pa s H₂S), stalno merjenje napetosti v materialu, opazovanje elektrodnih površin in merjenje časa do preloma.

Številne preiskave po NACE TM-01-77 so pokazale, da je odpornost NIOMOLA 490 K občutno višja, kot jo kaže dosedaj najbolj pogosto uporabljeno konstrukcijsko jeklo Č.0562 (**slika 4**). Pri NIOMOLU 490 K je meja vzdržljivosti 720 ur dosežena pri napetosti 439 N/mm², kar je 85 % od R_e, pri Č.0562 pa je bila dosežena mejna vzdržljivost 720 ur pri mnogo nižji obremenitvi, tj. 187,5 N/mm², kar je le 50 % od R_e. Dodatno preskušanje NIOVALA 47 je pokazalo, da je ta mejna vrednost celo samo 40 % od R_e, kar je zelo malo in povsem v soglasju s slabim vedenjem tega drobnazrnatnega jekla v medijih, ki omogočajo njegovo vodičenje.

V pogledu odpornosti proti sulfidnemu napetostnemu pokanju smo NIOMOL 490 K primerjali še z avstrijskim drobnazrnatim jeklom X60. Slednje je bilo raziskano v okviru krožnih raziskav petih mednarodnih korozijskih laboratorijev, v katera je bil vključen tudi laboratorij Inštituta za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana. Jeklo X60 z bainitno mikrostrukturo ima napetost



Slika 4: Odpornost NIOMOLA 490 K in jekla Č.0562 proti sulfidnemu napetostnemu pokanju po NACE TM-01-77

Fig. 4: The resistance of NIOMOL 490 K and Č.0562 steels against sulphide stress-cracking, treated by NACE standard TM-01-77

tečenja 452 N/mm² in trdnost 525 N/mm². Mejna obremenitev, pri kateri se doseže 720 ur, pa je bila v odvisnosti od preizkuševalnega laboratorija od 60 do 82 % od R_e , kar je nižje kot pri domačem NIOMOLU 490 K.

3. Sklepi

Iz raziskave je možno skleniti naslednje:

Karbidi Nb in Mo so v železu najslabša past, saj je vezalna energija najmanjša, s tem pa tudi količina vezanega vodika v kovini. Najmočnejša past so vanadijevi karbidi.

Ni povečuje količino vezanega vodika, ravno tako pa prebitek v karbide nevezanega Nb ali Mo.

Na osnovi vezalne energije izdelano konstrukcijsko jeklo NIOMOL 490 K (mikrolegirano z Nb in Mo), kaže najboljšo odpornost proti vodikovi krhkosti. S tem jeklom primerjani jekli Č.0562 in NIOVAL 47 sta zelo neodporni na delovanje absorbiranega vodika.

4. Literatura

- ¹ L. Vehovar, S. Ažman: Kovine zlitine tehnologije, 32, 1998, str. 305
- ² J.P. Hirth: Metal. Trans., 11A, 1980, June, 878
- ³ M. Kowaka, S. Nagata: Corrosion, 24, 1968, 427
- ⁴ M. Kowaka, S. Nagata: Corrosion, 32, 1976, 395
- ⁵ A. Brown, J.I. Harrison: Group Committee T-1, CO₂ Corrosion in Oil and Gas Production, 1984, 232-241