

9 % nikljevo jeklo za nizke temperature

Rezervoarji in cisterne, namenjeni shranjevanju in prevozu utekočinjenega zemeljskega plina, so večinoma izdelani iz nizkoogljivega 9 odstotnega nikljevega jekla. Prikazan je razvoj tega jekla in strukturne posebnosti, ki nastajajo med termično obdelavo, s katero šele pridobimo jeklu njegove prednostne mehanske lastnosti, zlasti odlično žilavost tja do temperature tekočega dušika. Jeklo je tudi dobro varivo, kar omogoča gradnjo velikih objektov. Pokažejo pa se tudi ekonomske prednosti uporabe 9 % nikljevega jekla za konstrukcije, ki so izpostavljene zelo nizkim temperaturam.

1. Del.: RAZVOJ IN TERMIČNA OBDELAVA 9 % Ni JEKLA

Uvod

Ko so pred približno dvanajstimi leti odkrili v Sahari velike rezerve zemeljskega plina, so se francoski strokovnjaki takoj lotili projekta za transport tega naravnega bogastva v Francijo. V Franciji sami imajo sicer na jugozahodnem delu ob Biskajskem zalivu lasten izvir zemeljskega plina in precej razširjeno omrežje plinovodov, vendar predvidene rezerve ne dovoljujejo večje ekspanzije v potrošnji. S saharskim plinom pa bi bilo možno kriti celo evropske potrebe.

Za transport plina iz Alžira v Evropo sta bili izdelani najprej dve varianti direktnih prekmorskih plinovodov. Po prvi bi ga bilo treba položiti po dnu Sredozemskega morja iz Alžira do francoske južne obale, po drugi pa podvodni del le preko Gibraltarske ožine, vendar bi zato suhozemski plinovod potekal dodatno prek Maroka in Španije. Izdelava podvodnih plinovodov odpira večje tehnične probleme, po drugi varianti pa so nastale tudi politične težave, zato ni bilo pričakovati kmalu uresničitve. Variantama se je pridružil zaradi tega še tretji projekt, sprva zamišljen bolj kot začasna rešitev, ki bi omogočila izkoriščanje saharskega plina pred realizacijo direktnega plinovoda. Zemeljski plin naj bi v alžirskem pristanišču utekočinili in ga prepeljavali v takem stanju s posebnimi ladjami — cisternami v evropska pristanišča. Odtod naprej pa bi plin spet normalno oddajali potrošnikom po plinovodih. Za takšno rešitev so se začele zanimati poleg Francije tudi druge države, zlasti Anglija, in v ti dve deželi že nekaj let prihaja saharski plin utekočinjen v alžirskem pristanišču Arzew.

Tudi naše gospodarstvo se zanima za rabo saharskega zemeljskega plina. Nekatera naša prista-

nišča se živahno potegujejo, da bi postala izkravalne luke za transportni utekočinjeni plin, ki bi ga nato pošiljala v notranjost dežele in druge srednjeevropske države v našem zaledju.

Po kopnem je najenostavneje in najekonomičneje transportirati pline na velike daljave po plinovodih, zato v zadnjem času omenjajo pri nas in v sosednjih deželah kot resno konkurenco alžirskemu plinu iz Ukrajine. Zahodnoevropskim državam pa postaja dostopnejši novo odkriti plin nahajališč v Holandiji.

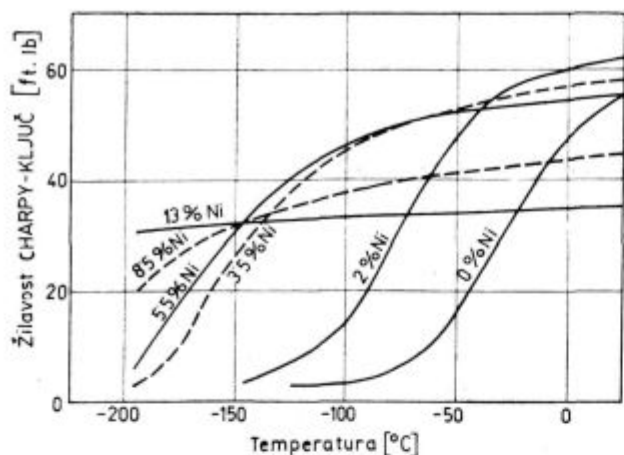
Čeprav je zaenkrat možno prevažati alžirski plin v Evropo le v tekočem stanju, je na evropski celini še vedno konkurenčen. Medtem se je namreč strokovnjakom posrečilo dokazati, da niso pretirano velike investicije za objekte, kot so suhozemski rezervoarji in cisterne na ladjah tankerjih.

Shranjevanje in transport utekočinjenega zemeljskega plina sta bistveno drugačna kot pri drugih gorilnih plinih. Ti imajo kritično točko večinoma nad navadno temperaturo, zato jih lahko obdržimo v tekočem stanju pri tej temperaturi pod visokim pritiskom v primernih tlačnih posodah.

Za zemeljski plin s kritično temperaturo neka-ko pri -80°C pa pride v poštev le shranjevanje v utekočinjenem stanju pod atmosferskim pritiskom, pri tem so pa posode ohlajene kar na -160°C . Pri tej temperaturi le še malo kovinskih materialov žilavih. Vendar imajo austenitna jekla, baker in aluminijske zlitine, ki se največkrat uporabljajo v ta namen, sorazmerno nizke vrednosti meje plastičnosti in trdnosti ali elastičnega modula, kar omejuje njihovo uporabo. Posrečilo se je najti ustrežnejši konstrukcijski material, ki ga je mogoče uporabiti za gradnjo tako velikih objektov za transport in shranjevanje utekočinjenega zemeljskega plina, kakršni so potrebni za nemoteno oskrbo gospodarsko razvitih evropskih dežel s plinom. To je devet odstotno nikljevo jeklo (9 % Ni jeklo).

Razvoj nikljevih jekel za nizke temperature

Z razvojem nikljevih jekel za nizke temperature so se ukvarjali predvsem v ZDA. Za konstrukcije do temperature -100°C so do konca vojne uspešno uporabljali nizkoogljive 3,5 % nikljevo jeklo v poboljšanem stanju¹. Po vojni so pa začeli razvijati jekla s še večjim odstotkom niklja, ki ostanejo žilava pri še nižjih temperaturah. Slika 1 nam kaže temperaturne krivulje žilavosti (prekkušanci z zarezo »ključ« po Charpyju) za jekla z različno vsebnostjo niklja. Rastoči dodatek niklja v jeklu očitno močno potiska njegovo pre-



Slika 1

Temperaturna zavisnost žilavosti za jekla z različno vsebnostjo niklja (žilavostni preizkušanci z zarezo »ključ« po Charpy-ju) (2)

hodno temperaturo žilavosti proti čedalje nižjim temperaturam². Jeklo prehaja hkrati zelo postopoma in v vedno širšem temperaturnem intervalu v krhko stanje. Že jeklo z 9% niklja pa ostane pri temperaturi tekočega dušika popolnoma žilavo. Vrednosti so tako ugodne, da s povečanjem vsebnosti niklja na 11 ali 13% praktično ne dosežemo takšnih bistvenih izboljšanj, ki bi opravičevala višjo ceno tako legiranega jekla. Jeklo z 9% niklja in 0,1% C je novi material za konstrukcije, izpostavljene temperaturam tja do temperature tekočega dušika.

Vendar poraba novega jekla ni bila posebno velika. Vzrok je bil tale: l. 1944 je v Clevelandu eksplodiral s krhkim lomom rezervoar, napolnjen z utekočinjenim gorilnim plinom. Za posledicami eksplozije in požara, ki je nastal neposredno za tem, je izgubilo življenje 128 ljudi. Ugotovili so, da rezervoar iz 3,5 nikljevega jekla po varjenju ni bil napetostno žarjen, kar naj bi bil eden izmed vzrokov krhkega porušanja konstrukcije pri nizki temperaturi. Od tedaj zahtevajo ameriški predpisi obvezno napetostno žarjenje vseh varjenih posod za utekočinjene pline. Zaradi tega se je omejila možnost izdelave objektov večjih dimenzij.

Za tako majhne rezervoarje uporaba 9% nikljevega jekla v primerjavi z zlitinami Al₁ ne kaže ne ekonomskih ne tehničnih prednosti.

Ko so francoski strokovnjaki proučili za realizacijo projekta prevoza utekočinjenega saharškega zemeljskega plina možnost uporabe 9% Ni jekla za gradnjo večjih kopenskih rezervoarjev in cistern na ladjah³, so ugotovili, da lahko brez škode opustijo napetostno žarjenje varjenih konstrukcij iz 9% Ni jekla. Sicer pa francoska zakonodaja niti ne predpisuje obveznega napetostnega žarjenja konstrukcij za shranjevanje utekočinjenih plinov. Tako je v letu 1960 v Nantesu zgrajen rezervoar za 500 m³ utekočinjenega saharškega zemeljskega

plina prvi zvarjeni rezervoar iz 9% Ni jekla, na katerem ni bilo izvedeno napetostno žarjenje; enako je s cisternami na prvem tankerju za prevoz plina »Beauvais«. Konstrukciji sta odlično prestali preskušnjo.

Omeniti je treba, da je tudi začetna ohladitev na nizko delovno temperaturo eden od problemov tovrstnih konstrukcij. Zaradi krčenja pri ohlajevanju lahko nastanejo v materialu napetosti, ki utegnejo biti celo večje kot je vrednost meje plastičnosti. V takem primeru nastanejo v konstrukciji trajne deformacije. Ker ima 9% Ni jeklo normalen temperaturni raztezni koeficient in visoko mejo plastičnosti, pa se tega ni bati.

L. 1960 so v ZDA zainteresirana podjetja izvedla vzporedno obširno akcijo, da bi pokazala z utemeljevanjem, da se v primeru uporabe 9% Ni jekla za posode za shranjevanje utekočinjenih plinov res lahko opusti napetostno žarjenje po varjenju⁴. S tem namenom so izdelali več posod iz 9% Ni jekla. Nekatere so po varjenju napetostno žarili, drugih pa ne. Posode so napolnili s tekočim dušikom (−196° C in izpostavili udarcu padajoče mase ali pa so jih tesno zaprli, da se je s postopnim izparevanjem plina večal notranji pritisk do porušitve. Ta serija poskusov imenovana »Operacija CRYOGENICS«, je pokazala, da so tako napetostno žarjene kot nežarjene posode dobro prestale udarce in so se porušile pri praktično enakem notranjem pritisku. Pri analizi zunanega videza preloma pa so odkrili, da je bil prelom pri nežarjenih posodah povsem žilav, medtem ko je bil prelom pri napetostno žarjenih celo že delno kristaliničen. Rezultati »Operacije CRYOGENICS« so omogočili, da so se ameriški predpisi za gradnjo posod za shranjevanje in prevoz utekočinjenih plinov izjemoma spremenili in v primeru uporabe 9% Ni jekla ni več predpisano napetostno žarjenje konstrukcij.

Število večjih konstrukcij iz 9% Ni jekla se je v zadnjih letih zelo povečalo. Naj omenimo, da ima novi francoski tanker za prevoz metana »Jules Verne« 6 cistern po 4000 m³. V alžirskem pristanišču Arzew pa so izdelani kopenski rezervoarji s prostornino 11000 m³. (Slika 2). Številne podatke o teh realizacijah dobimo v strokovni, zlasti varilski literaturi (5—8).

Termična obdelava 9% Ni jekla

Razlage, zakaj lahko obdrži 9% Ni jeklo z nizkim ogljikom odlično žilavost do tako nizkih temperatur, se še ne ujemajo. Postopek termične obdelave, s katerim dobi jeklo svoje prednostne karakteristike, je pa dognan in se dopolnjuje le z malenkostnimi spremembami.

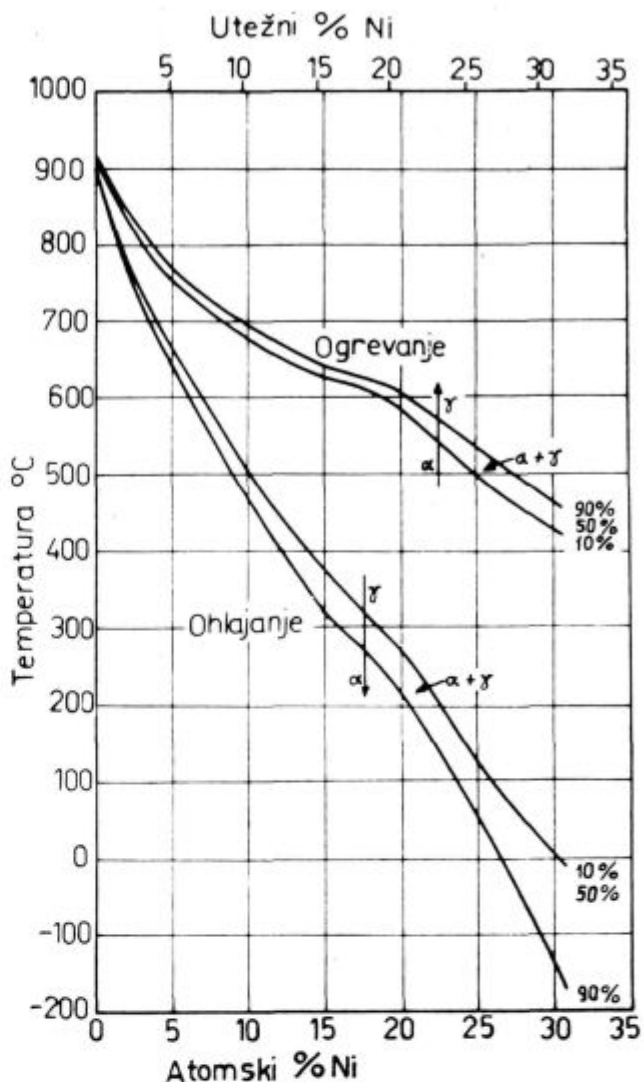
V sistemu Fe-Ni razširja nikelj območje γ tako, da so zlitine z nad 30% niklja že brez premene do navadne temperature.



Slika 2

Francoski tanker za prevoz utekočinjenega zemeljskega plina »Jules Verne«

Premenske točke pri ohlajanju in segrevanju pa so podvržene izredno močni histerizi, kar se pokaže tudi na realnem diagramu sistema Fe-Ni po Hansenu (slika 3). Posebnost preme $\gamma \rightarrow \alpha$ je, da se vrši v popolni odsotnosti difuzijskih procesov in da je pri zlitinah z nad 4 % Ni po mehanizmu podobna martenzitni transformaciji. Zato imenujemo to strukturo nikljev martenzit in jo označujemo kot α_2 ferit. Kolikor soglašajo avtorji o mehanizmu transformacije pri ohlajanju ($\gamma \rightarrow \alpha_2$) toliko si nasprotujejo v razlagi mehanizma preme pri ogrevanju ($\alpha_2 \rightarrow \gamma$). Nekateri menijo, da nastopi v območju $\alpha + \gamma$ razmešanje v fazi z različno vsebnostjo niklja, drugi pa trdijo, da je difuzija prepočasna in je premena brez koncentracijskih razlik. V primeru kontinuirnega ogrevanja prek dvofaznega področja je verjetnejše mnenje slednjih, ki ga ponazarja tudi Hansenov fazni diagram. Pri daljšem zadrževanju v dvofaznem področju pa res lahko nastane razmešanje. To nam potrjujejo nekatere metalografske študije⁹, čeprav v sistemu Fe-Ni resničnega ravnotežja ni mogoče vzpostaviti. (Slika 4 a in b)



Slika 3

Realni fazni diagram sistema Fe-Ni po Hansenu
Razmešanje faz Fe-Ni zlitin po žarjenju v dvofaznem območju (9)

Navzočnost ogljika spremeni sistem Fe-Ni. Imamo tudi trifazno področje ($\alpha + \gamma + C$). Pri hitrem ohlajanju iz austenitnega področja pa do-

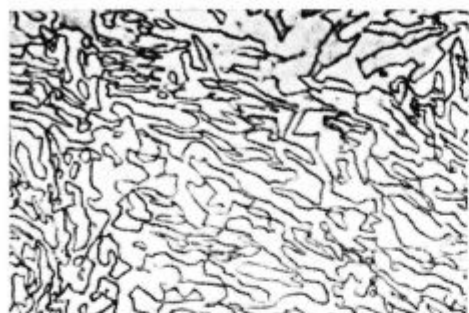


Slika 4

a) Fe-Ni zlitine s 4,9 % Ni, žarjenja 1^b pri 740° C, 500:1

bimo tudi pravi martenzit. Vpliv ogljika nam najlepše ilustrira primerjava dveh TTT diagramov za kontinuirno ohlajanje za 9% Ni jeklo in sicer prvega z 0,025% C in drugega z 0,095% C (slika 5)¹⁰. Premenske točke, ki jih dobimo pri počasnem ohlajanju prvega jekla, lahko vskladimo s faznim

0,095% C pa nastane že pri ohlajanju na zraku skoraj popolna premena v martenzit. Pokaže se, da je 9% nikljevo jeklo z nad 0,04% C v tanjših profilih kaljivo že na zraku.



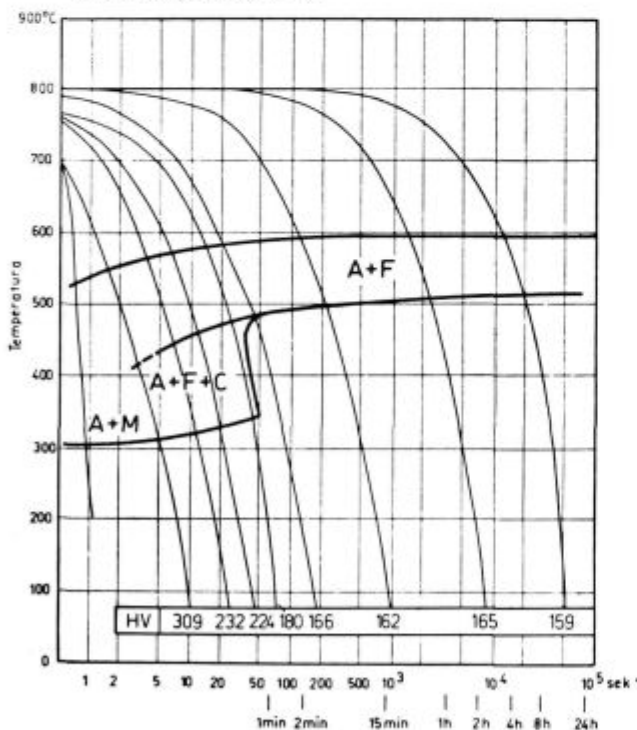
b) Fe + Ni zlitina z 9% Ni, dolgotrajno žarjena pri 650°C, 1500:1

diagramom Fe-Ni na sliki 3. Le pri zelo hitrem ohlajanju dobimo bainit in pravi martenzit, kar se odraža tudi v povečanju trdote. Pri jeklu z

Jeklo Z 03 N9

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu %	Al metal %	N ₂ %	%
0,025	0,14				8,03						

Austenizacija: 800°C - 1/2^h



Slika 5

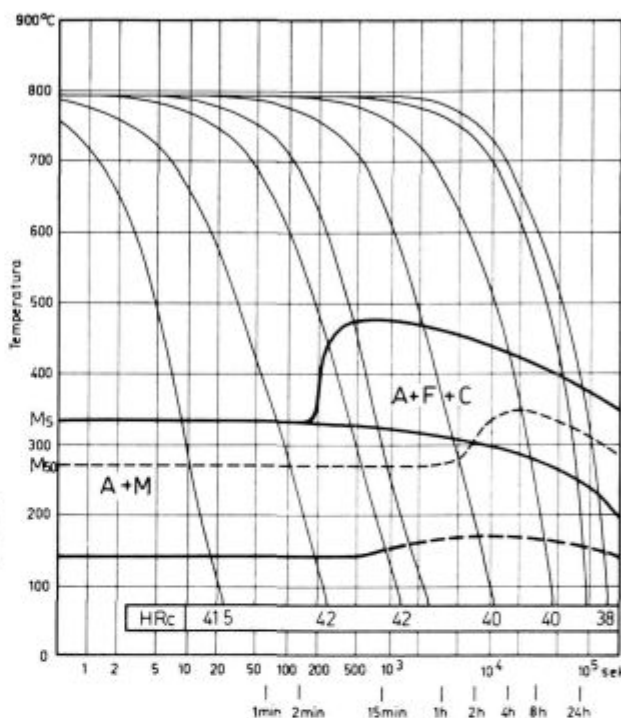
TTT diagram za kontinuirno ohlajanje v 9% nikljevem jeklu

a) z 0,025% C

Jeklo Z 10 N9

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu %	Al metal %	N ₂ %	%
0,095	0,51				9,0						

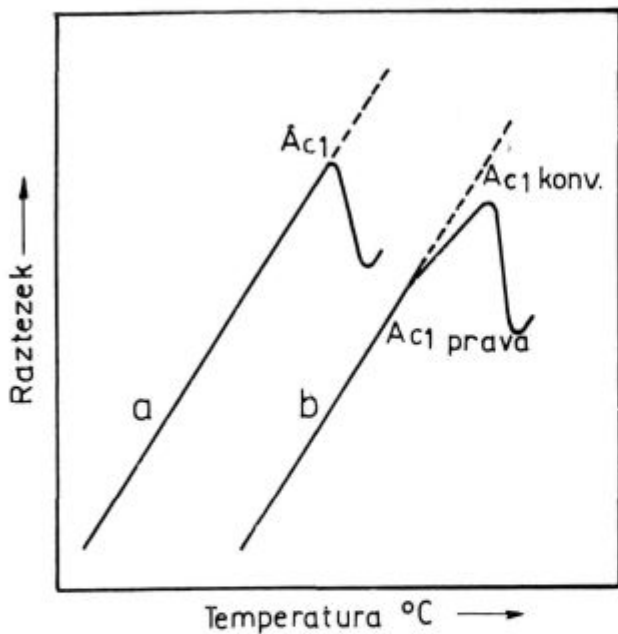
Austenizacija: 790°C - 1/2^h



b) z 0,095% C

Zato dovoljujejo predpisi za termično obdelavo 9% nikljevega jekla poleg kaljenja v vodi in olju tudi normalizacijo, vendar dvakratno. Pri prvi austenitizaciji 1^h na 900^o naj bi se austenit homogeniziral, z drugo normalizacijo 790 1/2 h/zrak pa dobimo drobno zrno, ki je izredno pomembno za mehanske lastnosti, zlasti za žilavost jekla pri nizkih temperaturah. Postopek dvakratne normalizacije je ugoden za termično obdelavo pločevin. Pri debelejših profilih pa ohlajanje na zraku ne da popolne martenzitne strukture in je hitrejšo ohlajanje nenadomestljivo.

Po kaljenju oz. normalizaciji popuščamo jeklo nekaj ur med 540—580^o C. Prav po tem postopku pridobimo 9% nikljevega jeklu izredno ugodne lastnosti pri nizkih temperaturah. Brophy in Miller¹¹ sta prva opazila, da prične pri jeklu z 9% Ni nastajati v strukturi austenit že pod točko Ac₁, ki se ugotovi na konvencionalni način, npr. dilatometrično, (slika 6).



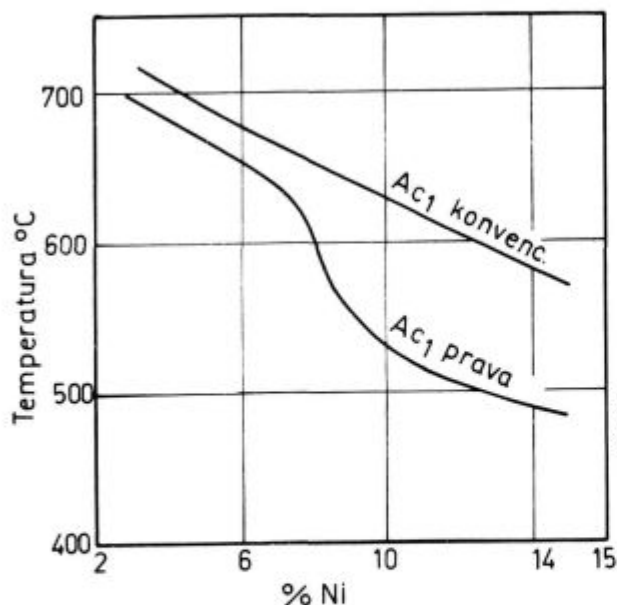
Slika 6

Dilatometrijske krivulje pri ogrevanju

- a) navadnega jekla
- b) 9% nikljevega jekla

Austenit v strukturi se pokaže v obliki prav majhnih otočkov in ga je možno opazovati le z elektronskim mikroskopom.

Temperaturna razlika med konvencionalno določeno točko Ac_1 in temperaturo, pri kateri se tvori prvi austenit — imenovala sta jo »pravo točko Ac_1 « — je za jeklo do 5% minimalno, pač pa naraste pri jeklih z nad 7% Ni (slika 7). Najpomembnejša je njuna ugotovitev, da je prisotnost austenita, ki ga dobimo s popuščanjem v območju

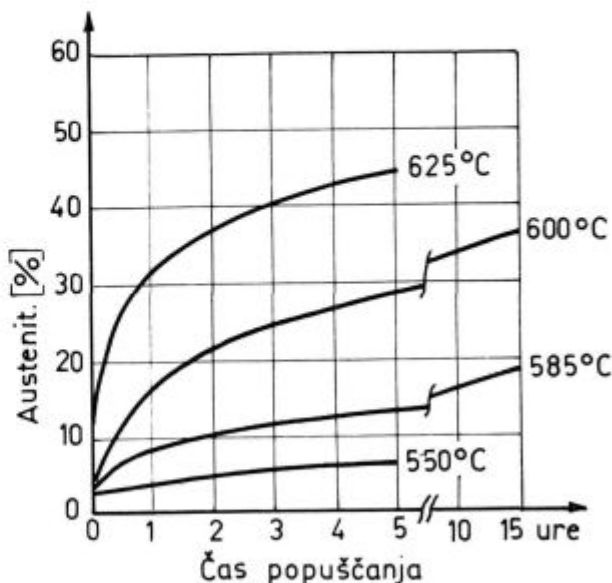


Slika 7

Razlike med konvencionalno in pravo Ac_1 temperaturo v odvisnosti od % niklja v jeklu (11)

med »pravo« in »konvencionalno« točko Ac_1 , bistvenega pomena za ugodne lastnosti in uporabnost 9% Ni jekla pri nizkih temperaturah.

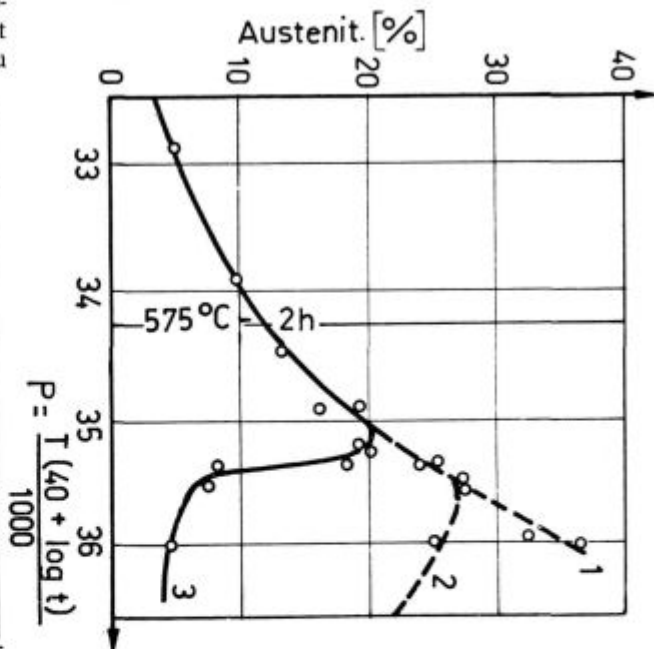
Količina med popuščanjem nastalega austenita je odvisna od temperature popuščanja in hkrati od časa popuščanja (slika 8).



Slika 8

Nastajanje austenita v odvisnosti od časa in temperature popuščanja (3)

Bastien in sodelavci³ označujejo kinetiko nastajanja austenita s parametrom P, ki zajema oba faktorja, temperaturo in čas popuščanja v obliki



Slika 9

Odnos med količino austenita in parametrom P (3)
 krivulja 1 — austenit nastal med popuščanjem
 2 — stabilen po ohlaiditvi na navad. temperaturo
 3 — stabilen po ohlaiditvi v tekočem dušiku

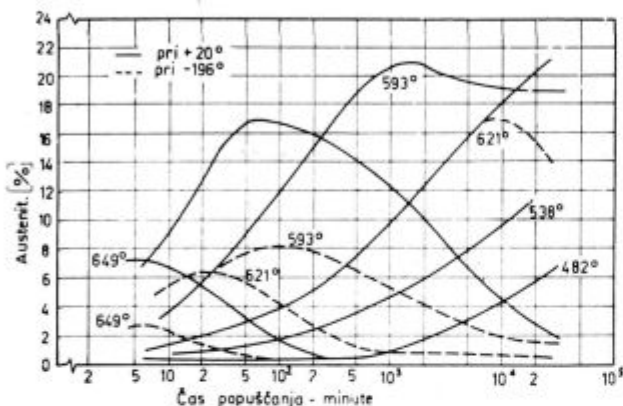
logaritemske formule, kakršno sta uvedla Hollomon in Jaffe za odvisnost trdote od temperature in časa popuščanja. V formuli:

$$P = T (\log t + C)$$

pomeni T temperaturo popuščanja v °K, t čas popuščanja in C konstanto, za katero so avtorji dognali vrednost 40.

Odnos med parametrom P in količino avstenita, pa ni linearen (slika 9). Po njihovih rezultatih izgublja avstenit stabilnost nad določeno vrednostjo parametra P.

Se obširneje so raziskali oblikovanje avstenita Marschall, Hehemann in Troiano¹². Krivulje na sliki 10 kažejo količine stabilnega avstenita pri

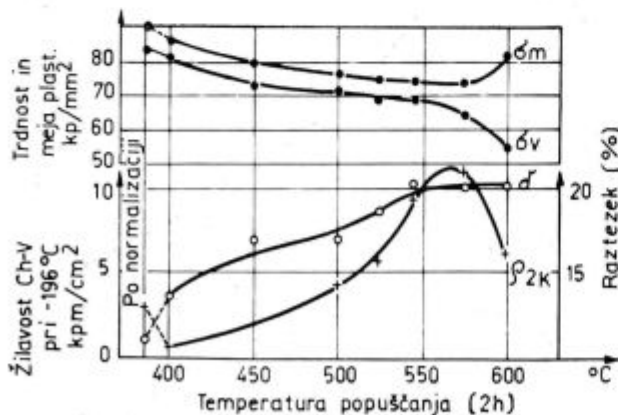


Slika 10

Količina avstenita stabilnega pri navadni temperaturi (polne črte) in temperaturi tekočega dušika (črtkane črte) v odvisnosti od temperature in časa popuščanja (12)

navadni temperaturi in po ohladitvi v tekočem dušiku v odvisnosti od temperature in časa popuščanja. Iz njih se vidi, da avstenit, ki nastaja pri višjih temperaturah popuščanja, ni več stabilen.

Na sliki 11 kažemo odvisnost mehanskih lastnosti 9% nikljevega jekla od temperature popuščanja. Diagram je izdelal Bastien s sodelavci³ za jeklo, ki je bilo po austenitizaciji ohlajeno v



Slika 11

Mehanske vrednosti 9% nikljevega jekla v odvisnosti od temperature popuščanja (2 uri) (3)

zračnem pišu in popuščeno 2 uri pri navedenih temperaturah. Do temperature popuščanja 580° C padata natezna trdnost in meja plastičnosti, dalje pa se trdnost povečuje. Zarezna žilavost Ch — V pri temperaturi —196° C doseže maksimum vrednosti pri popuščanju v intervalu med 550 in 580° C.

Mehanske vrednosti so odvisne od navzočnosti avstenita v strukturi in od njegove stabilnosti. Praktično prične nastajati v 9% nikljevem jeklu avstenit pri temperaturah popuščanja nad 500° C. Pri temperaturi 580° C dobimo že 15—20% avstenita, ki ostane ves stabilen pri ohlajanju do temperature tekočega dušika. Pri višjih temperaturah popuščanja nastali avstenit pa ni več tako stabilen in se pri ohlajanju pretvori v martenzit. Tako dobimo maksimum vrednosti žilavosti pri popuščanju v območju, kjer nastane največ stabilnega avstenita. Trdnost in meja plastičnosti pa se zaradi navzočnosti te mehkejše faze zmanjšujeta. Če pa se avstenit delno ali v celoti spremeni v martenzit, kar se zgodi pri vseh popuščanjih nad 580° C, se žilavost spet poslabša, povečata se pa natezna trdnost in trdota.

Marschall je s sodelavci¹² skušal ugotoviti medsebojno odvisnost žilavosti od količine avstenita. Vendar direktnega odnosa ni mogel vzpostaviti.

Po mnenju istih avtorjev ohrani jeklo tako veliko žilavost pri nizkih temperaturah zato, ker se zberejo ves ogljik in druge nečistoče v avstenitu in se tako feritna osnova očisti intersticijsko raztopljenih atomov.

Pri fraktografskih študijah IRSIDA¹⁰ se je pokazalo, da avstenitni otočki na mešanih prelomih žilavostnih preizkušancev ne ovirajo transkristalnega preloma kristalnih zrn. Zato na podlagi ocene vrednosti žilavosti zlitin Fe-Ni z malo ogljika in z rastočo vsebnostjo niklja do 9%, sklepajo avtorji, da je za žilavost pri nizkih temperaturah primarnega pomena navzočnost niklja v feritni matici.

Varjenje 9% Ni jekla

Sestava in čistoča sta pomembna faktorja, ki zagotavljata 9% Ni jeklu dobro metalurško varivost. Zaradi nizkega odstotka ogljika — po ameriških predpisih C < 0,13%, po francoskih priporočilih C < 0,11% — ni pričakovati v prehodni coni visokih trdnostnih konic z neugodnimi posledicami. Zato ni potrebno predgretje. Tudi občutljivost za nastajanja podvarkovnih razpok ni velika. Ta se seveda še zmanjša v primerih, ko uporabljamo dodajalni material, ki daje avstenitno strukturo zvara.

Čeprav bi 9% Ni jeklo lahko varili z normalnimi postopki in z normalnimi elektrodami, nastajajo vendar pri izbiri dodajalnega materiala problemi, ki še niso povsem rešeni. Zaenkrat se namreč še ni posrečilo dobiti dodajalni material, ki bi imel v vsakem pogledu enake lastnosti kot

osnovni material. Karakteristika 9% Ni jekla je odlična žilavost pri -196°C , tega pa v zvaru ne moremo doseči z nobeno normalno elektrodo, ki daje feritne zware. Po drugi strani pa ima jeklo povečano trdnost in mejo plastičnosti, temu je težko ustreči pri uporabi avstenitnih elektrod.

Raziskave, ki bi bile primerne za rešitev tega problema, so bile dokaj redke. V ZDA namreč skoraj že od vsega začetka z uspehom uporabljajo za varjenje 9% Ni jekla elektrode tipa Inconel. Za normalno obločno varjenje je v rabi elektroda Inco-Weld A, za druge vrste varjenja pa so manjše modifikacije v sestavi dodajalnega materiala.^{13, 14}

Inco-Weld A je oplasčena elektroda, namenjena zlasti za varjenje Ni-Cr zlitin z drugimi avstenitnimi jekli. V plašču vsebuje malo vodika, zato je uporabna za varjenje jekel z izrazito različnimi sestavami. Približna sestava elektrode je max. 0,15, Mn 2,5%, Cr 15%, Fe 8%, Mo 0,5–2,0%, Al 1,0–3,0%, ostalo Ni 70%. Stevilni poskusi potrjujejo dobre lastnosti, katere dosežemo v zvarjenih spojih 9% Ni jekla uporabo te elektrode. Predvsem velja to za žilavost pri -196°C . Tudi trdnost se približuje vrednostim osnovnega materiala, medtem ko je meja plastičnosti precej nižja.

Tabela I — Mehanske vrednosti in razpokljivost elektrod, primernih za varjenje 9% Ni jekla

Vrsta elektrode		Mehanske vrednosti				Žilavost kpm/cm ² pri -196°C		Nagnjen k razpoki
		σ_r kp/mm ²	σ_m kp/mm ²	δ %	τ %	r^d	r^{2k}	
15 Cr/70 Ni	Zlitine tipa	42–47	67–72	30–34	30–40	7	9–12	znatna
15 Cr/60 Ni	Inconel	36	56	20	34	7,6	10	znatna
25 Cr/20 Ni	Nizek C normalen Mn	37	59	37	35	—	5,1	znatna
	Nizek C visok Mn	45	58	30	—	5,2	—	znatna
	Nizek C + Mo	40	63	26	32	—	0,5–3	znatna
17 Cr/40 Ni	Nizek C normalen Mn	36–45	43–61	14–21	14	—	6,5–7,7	znatna
	Nizek C visok Mn	34	50	35	43	6,5	51	—
18 Cr/10 Ni/2 Mo	10–20% ferita	57	73	30	43	3,7	2,0	razpok brez razpok
	5% ferita Mn 2%	40–51	58–62	23–36	28–54	4,6	3,7–4,7	brez razpok
	5% ferita Mn 2%	46–49	62–64	35	50	5,0–5,6	3,9–4,6	brez razpok

Omenili smo že, da so mogli izdelovati v ZDA zaradi ameriških predpisov o obveznem napetostnem žarjenju varjenih posod samo konstrukcije manjših dimenzij. Zaradi tega tudi pomanjkljivosti omenjene elektrode niso prišle prav do izraza. Uporaba elektrod Inco-Weld A zahteva namreč kontrolo termičnega režima varjenja, da bi se preprečile razpoke v zvaru. Pri manjših konstrukcijah pa je možno uporabiti tehnološke postopke varjenja in ukrepe, ki zahtevajo delavniško delo in skrbnost, medtem ko so takšni načini dela težje izvedljivi pri varjenju večjih objektov neposredno na gradbišču. Pri manjših dimenzijah konstrukcij tudi cena uporabljenih elektrod ne pride toliko do izraza, kakor postane pomembnejša pri velikih zvarjenih konstrukcijah, izdelanih iz 9% Ni jekla,

pri katerih je poraba elektrod velika. Elektrode Inconel so zaradi visoke vsebnosti Ni občutno dražje od drugih.

Za manj obremenjene dele so preskušali tudi austenitni elektrodi tipa 25 Cr/20 Ni in 17 Cr/40 Ni. Obe imata zelo nizko mejo plastičnosti, obenem pa visok temperaturni razteznostni koeficient, kar je neugodno za njihovo uporabnost. Kot vse austenitne elektrode so občutljive tudi za razpoke v zvaru. Bastien je s sodelavci¹⁵ razvil dodajalni material austenitnega tipa 18 Cr/8 Ni z dodatkom 2% Mo. Ta prispeva zvaru navzočnost cca 10% ferita delta, kar zmanjšuje občutljivost za razpoke v zvaru. Meja plastičnosti pa je še vedno nizka kot je razvidno iz tabele I. Elektroda Niloid 1, o

kateri poroča A. B. Fildhouse¹⁵ ima elektrodno žico iz čistega Ni, v oplaščenju pa poleg Ni še 13% Cr in nekaj Mn, Mo in Nb.

Začetni poskusi, da bi varili 9% Ni jeklo z dodajalnim materialom, ki bi imel približno enako sestavo kot osnovni material, niso bili zadovoljivi. Šele Witherell in Peck¹⁶ poročata v novejšem času o prvih uspehih. Z dodajalnim materialom z 12,5% Ni sta pri varjenju v zaščitni atmosferi dosegla zware brez razpok, ki pa imajo tudi odlično žilavost pri -196°C . Ugotovila sta, da elektrodna žica ne sme vsebovati Si, pač pa mora biti skrbno dezoksidirana z Al. V tem primeru tudi nečistoče, predvsem žveplo, ki pride v zvar iz raztaljene cone zvara, ni škodljivo glede na razpokljivost. Mehanske lastnosti in žilavost zvara pri -196°C so zelo dobre. Pri obločnem varjenju pa takšne elektrode niso dale zadovoljivih rezultatov. Težko je namreč preprečiti, da bi bilo več silicija in kisika v zvaru. Vse kaže, da vpliva dodatek titana v dodajalnem materialu ugodno na zmanjšanje občutljivosti za razpokljivost in povečuje hkrati žilavost. Problem primernega dodajalnega materiala za varjenje 9% Ni jekla ostaja vsekakor še vedno aktualen, ker ni pomembna samo cena elektrod, ampak tudi enostavnost varilnega postopka, katerega omogoči ta ali ona izbrana elektroda.

Pri primerjalni analizi ekonomičnosti uporabe 9% Ni jekla ali drugih kovinskih materialov za konstrukcije, namenjene shranjevanju in transportiranju utekočinjenih plinov moramo upoštevati številne faktorje. Če menimo, da imajo tako 9% Ni jeklo kot austenitna jekla, aluminijeve in bakrove zlitine pri nizkih temperaturah zadovoljivo žilavost, se primerjava lahko izvrši na podlagi drugih mehanskih in tehnoloških lastnosti.

Iz tabele II je razvidno, da prekaša 9% Ni jeklo druge materiale po trdnosti in meji plastičnosti ter po elastičnem modulu. Na podlagi podatkov, ki jih navaja Lejay⁵ pokaže račun faktorja vrednosti (f) po formuli:

$$f = \frac{\text{cena} \times \text{spec. teža}}{\text{trdnost}}$$

najugodnejše razmerje za 9% Ni jeklo ($f = 0,42$). Zelo blizu pa mu je tudi aluminijeva zlitina Al + 5% Mg ($f = 0,50$). Če pa vzamemo kot kvalitetni kriterij mejo plastičnosti ali modul elastičnosti, je pa razmerje faktorjev 1:2 v korist 9% Ni jekla. Vendar pri vsem nismo upoštevali, da je modul elastičnosti izredno pomemben faktor za stabilnost konstrukcij in je zaradi tega mogoče graditi iz 9% Ni jekla vitkejše konstrukcije, kar pomeni ponoven prihranek materiala in s tem še dodatne ekonomske prednosti pri uporabi tega jekla v konstrukcijah. Težje hladno oblikovanje 9% Ni jekla pa je njegova resna pomanjkljivost;

za kompliciraneje oblike je treba uporabiti le vroče oblikovanje. Zato ima 9% Ni jeklo prednost le pri gradnji velikih konstrukcij enostavnih oblik. Omenili smo že, da ima 9% Ni jeklo tudi zadovoljivo nizek temperaturni razteznostni koeficient zaradi visoke meje plastičnosti, hkrati se ni bati, da bi nastale trajne deformacije pri termičnem šoku, kot ponavadi imenujemo ohladitev celotne konstrukcije na nizko delovno temperaturo.

Tabela II — Mehanske vrednosti različnih kovinskih materialov, primernih za konstrukcije pri nizkih temperaturah.

Material	Modul elastičn. E ; kp/mm ²	σ_v kp/mm ²	σ_n kp/mm ²	Napetosti pri ohladitvi na -160°C
jeklo 9% Ni	20.000	50	65	30
jeklo 18/8	19.600	22	50	50
Al + 5% Mg zlitina	6.600	13	25	25
baker-aluminij	11.000		40	21

Za manjše konstrukcije kompliciranejših oblik po dosedanjih mnenjih ni bistvenih ekonomskih razlik glede izbire materialov. Uporaba jekla 9% Ni za gradnjo večjih konstrukcijskih objektov za transport in shranjevanje utekočinjenih plinov pa je nesporno ekonomsko ugodnejša.

Literatura

- ARMSTRONG T. N. in A. P. GAGNEBIN
»Impact Properties of some low Alloy Nickel Steel at Temperatures down to -200°C «
Transactions ASM, 28, (1940)
- ARMSTRONG T. N. in G. R. BROPHY
»Some properties of low carbon 8 1/2 per cent nickel steel«
National Conference on Petroleum Mechanical Engineering ASME, Houston, Texas, 5—8 okt. 1947
- BASTIEN P., C. ROQUES, J. DOLLET, H. RAPPENNE in J. PITAUD
»L'acier à 9% de nickel pour le stockage du gaz naturel Liquéfié«
Revue de Métallurgie, 1963, str. 59—90
- »Operation CRYOGENICS«
Revue du nickel (1961), str. 72—79
- LEJAY H.
»L'acier à 9% de nickel et le probleme du stockage des gaz liquéfiés«
Métallurgie, 94 (1962), str. 1007—1017

6. PITAUD J.
 »Possibilités d'emploi de l'acier à 9 % de nickel pour la réalisation de réservoirs soudés destinés au stockage et au transport des gaz liquéfiés«.
 Chaudronnerie-Tolerie (1962), str. 11—19
7. HERBIET H.
 »Propriétés de l'acier à 9 % de nickel au cours de sa mise en oeuvre«.
 Revue de la Soudure (belge) 19 (1963), str. 17—23
8. »L'acier à 9 % de nickel pour basses températures«
 Revue du nickel, 29 (1963), str. 105—109
9. ALLEN N. P. in C. C. EARLY
 »The Transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ and $\gamma \rightarrow \alpha$ in Iron Rich Binary Iron - Nickel Alloys«
 Journal of the Iron and Steel Institute, 166 (1950), str. 281—288
10. KRÖN M., A. CONSTANT, A. CLERC, J. PLATEAU, G. HENRY, M. ROBERT in C. CRUSARD
 »Contributions à l'étude du mode d'action du nickel (jusqu'à 9 %) sur les propriétés mécaniques des aciers à basse température«
 Mémoires Scientifiques de la Revue de Métallurgie 58 (1961), str. 901—914
11. BROPHY G. R. in A. J. MILLER
 »The Metallography and Heat Treatment of 8 to 10 per cent Nickel Steel«
 Transaction ASM (1949), str. 1185—1203
12. MARSCHALL C. W., R. F. HEHEMANN in A. R. TROIANO
 »The characteristics of 9 % Nickel low Carbon Steel«
 Transaction of the ASM 55 (1962), str. 135—148
13. ARMSTRONG T. N., J. H. GROSS in R. E. BRIEN
 »Properties Affecting Suitability of 9 per cent Nickel Steel for low-Temperature Service«
 Welding Journal Research Supplement, (1959), str. 57s—70s
14. »Etude du soudage de l'acier à 9 % nickel au moyen d'électrodes au de fil du type Inconel«
 Revue du nickel, 28 (1962), str. 131—147
15. FILDHOUSE A. B.
 »Niloïd 1: a New Electrode for Welding 9 % Nickel Steel«,
 Welding and Metal Fabrication 32 (1964), str. 149—160
16. WITHERELL C. E. in J. V. PECH
 »Progress in Welding 9 % Nickel Steel«
 Welding Research Supplement, 43 (1964), str. 4735—4800.

ZUSAMMENFASSUNG

I. Teil.

Reservoirs und Zisternen, die zur Lagerung und Transport von flüssigem Erdgas bestimmt sind, werden jetzt grösstenteils aus niedriggekohltem 9%igen Nickelstahl erzeugt. Es ist die Entwicklung dieses Stahls dargestellt. Seine besonderen mechanischen Eigenschaften gewinnt der 9%ige Nickelstahl erst durch die richtige thermische Behandlung. Nach Härtung oder zweifacher Normalisierung lassen wir den Stahl an im Temperaturbereich, der eigentlich tiefer liegt als die Temperatur des Punktes AC₁, die durch konventionelle Methoden bestimmt ist, jedoch bekommen wir in der Struktur die teilweise Umwandlung in Austenit schon während der Dauer des Anlassens. Die Anwesenheit des Austenits in der Struktur ist wichtig,

damit der Stahl bis zur Temperatur des flüssigen Stickstoffes zäh bleibt, jedoch sind die Auslegungen über den tatsächlichen Einfluss von Austenit auf die mechanischen Eigenschaften des Stahls noch nicht einheitlich.

Neben der vorzüglichen Kerbzähigkeit bei niedrigen Temperaturen hat der 9%ige Nickelstahl entsprechende hohe Werte der Plastizität und der Festigkeit. Da sich der Stahl auch gut schweissen lässt, wengleich noch nicht alle Probleme des Zugabematerials gelöst sind, ermöglichen diese Tatsachen den Bau grosser Objekte. Eben bei diesen Bauten zeigen sich die Vorteile der Verwendung von 9%igem Nickelstahl gegenüber anderen Materialien, die zwar auch für Konstruktionen, welche niedrigen Temperaturen ausgesetzt sind, verwendet werden.

SUMMARY

Part I.

Reservoirs and tanks for storing and transportation of liquified gas are now in most cases made out of low carbon 9 % Ni Steel. The development of this steel is shown. Its special mechanical properties the 9 % Ni steel gets only after proper heat treatment. After quenching or double normalizing steel is tempered in temperature area which is lower than temperature point Acl determined by conventional methods. During the period when steel is being tempered the partial change to austenit is being observed. Presence of austenit in a structure is important since steel

remains to have good impact strength down to the temperatures of liquefied nitrogen. Nevertheless the explanations about real influence of austenit on mechanical properties are not yet uniform.

Besides excellent impact strength at low temperatures 9 % Ni steel has comparably high values for yield strength and fracture strength. Since steel can be welded well, inspite of unsolved problems of added material, described facts make it possible to build big objects. Advantages of 9 % Ni steel comparatively to other materials which are also used for constructions disposed to low temperatures are especially shown at such erections.