

Zavarivanje i navarivanje visokolegiranih feritnih (F), martenzitnih (M) i austenitnih (A) čelika

Opće karakteristike krom čelika

Osnovni legirajući element kod ovih čelika je krom. Krom se koristi za čelike otporne na koroziju i za rad na visokim temperaturama, na primjer 500-1200 °C kada se traži čvrstoća, otpornost na puzanje i otpornost na oksidaciju pri povišenim temperaturama (feritni Cr čelici) ili visoka čvrstoća i antikorozivnost pri visokim temperaturama (martenzitni Cr čelici). Povećana čvrstoća pri visokim temperaturama postiže se sastavom strukturnih faza i raspršenim sitnim česticama karbida Cr, Mo, V i eventualno drugih elemenata.

Kod antikorozivnih čelika sadržaj Cr preko 12% daje materijalu pozitivni elektrokemijski potencijal, materijal postaje "plemenitiji", što ga čini otpornijim na djelovanje elektrolita, a istovremeno se stvara i površinski sloj Cr oksida, koji štiti materijal od korozivski aktivnog medija. Na taj način je visokolegirani Cr čelik otporan na kemijsku i elektrokemijsku koroziju kiselih medija.

Uz dobra mehanička i antikorozijska svojstva ovi čelici su slabo zavarljivi - skloni pukotinama i osjetljivi na toplinske operacije grijanja i hlađenja, koje uzrokuju povećanje krhkosti.

Struktura i svojstva

Krom je alfageni element, koji stabilizira i piri područje ferita, a smanjuje područje austenita. Pored Cr alfageni su i Mo, Si, V, Nb, Ti, Al i W.

Gamageni elementi Ni, Mn, C, N i Cu proširuju područje austenita, a smanjuju područje ferita. Strukturu zavarenog spoja može se odrediti pomoću Cr i Ni ekvivalenta iz dijagrama Schaefflera. Visoko legirani Cr čelici mogu biti martenzitnog (M), martenzitno-feritnog (M+F), martenzitno-feritno-austenitnog (M+F+A) i feritnog (F) tipa. Martenzitni čelici su samozakaljivi, pri zavarivanju i naknadnom, uobičajenom, hlađenju na zraku prelaze iz austenitne u potpuno martenzitnu strukturu, koju treba popustiti žarenjem. Feritni čelici se ne mogu kaliti.

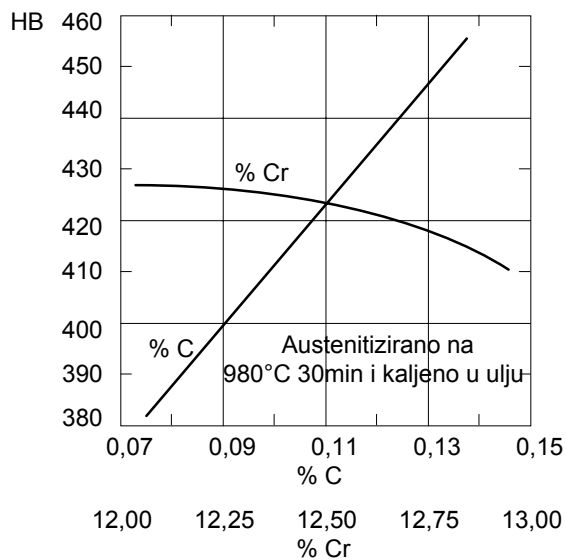
Cr čelici s $Cr > 15\%$ i $C < 0.1\%$ nemaju austenitnu fazu i feritna faza je prisutna od sobnih temperatura do tališta.

Izlučivanje Cr karbida. Krom ima veliki afinitet prema ugljiku, pa stvara na granici primarnih zrna neke od ovih karbida $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 , $(Fe, Cr)_{23}C_6$, $(Fe, Cr)_7C_3$, $(Fe, Cr)_3C$. Karbide u kojima atomi metala Fe i Cr mogu zamijeniti mjesta označava se također $(Me)_{23}C_6$, $(Me)_7C_3$, $(Me)_3C$. Karbidi kroma su stabilniji od karbida željeza. Težinski na mjestu $Cr_{23}C_6$ (atomska težina za Cr = 52, za C=12.011) sadržaj Cr se izračunava:

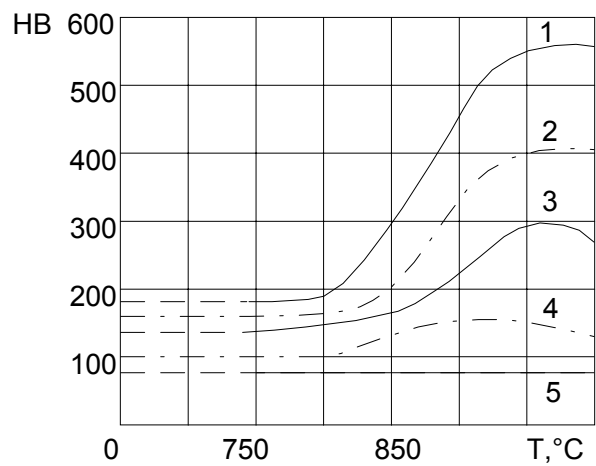
Error! $\cdot 100 = 94,3\%$ Cr, dok su okolna mjesta osiromašena na sadržaju Cr i imaju ga manje od 12%, koliko je minimalno potrebno za antikorozivnost.

Dok Cr povećava prokaljivost, C utječe na zakaljivost, (tvrdoću, čvrstoću i žilavost martenzita), a smanjuje antikorozivnost, Vanadij stvara karbid V_4C_3 i povećava prokaljivost. Početak pretvorbe austenita u martenzit je obično na $M_s = 280 - 350$ °C, a završetak na $M_f = 160-180$ °C. Temperaturu početka pretvorbe austenita u martenzit orijentaciono može se odrediti iz izraza:

$$M_s = 832 - 29 Cr - 39 Ni - 5 Cu - 56 Mo, ^\circ C$$



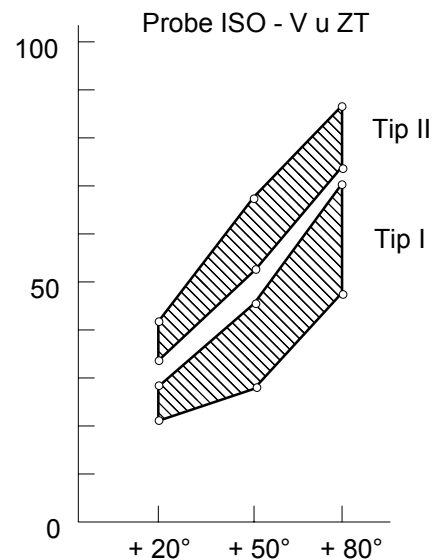
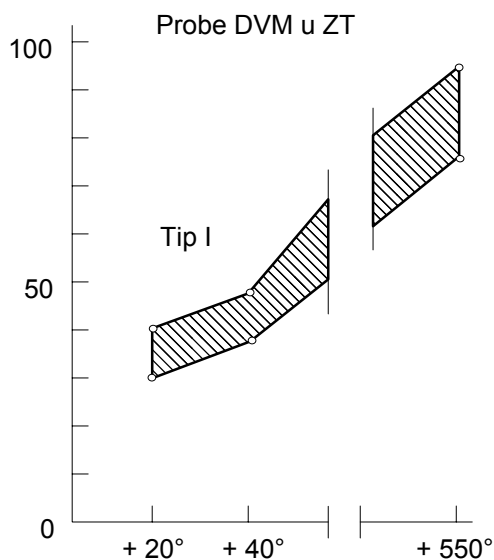
Utjecaj C na tvrdoću Cr čelika.



Zavisnost tvrdoće 12 Cr čelika o sadržaju C i o temperaturi s koje se vrši kaljenje.

- 1.) 12 Cr, 0.35 C 2.) 12 Cr, 0.12 C 3.) 12 Cr, 0.15 C
4.) 12 Cr, 0.10 C 5.) 12 Cr, 0.01 C

Svojstva Cr čelika ovise o kemijskom sastavu, režimima toplinske obrade kao i o temperaturi i vijeku eksploatacije. Krhkost 475 °C javlja se pri zagrijavanju čelika s 15-70% Cr na 400-540 °C, a naročito na 475 °C. Ako se čeliku doda Ti i Nb oslabit će pojava krhkosti kod 475 °C.

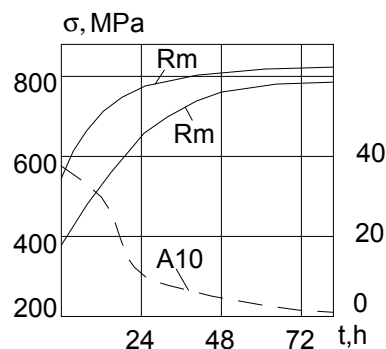
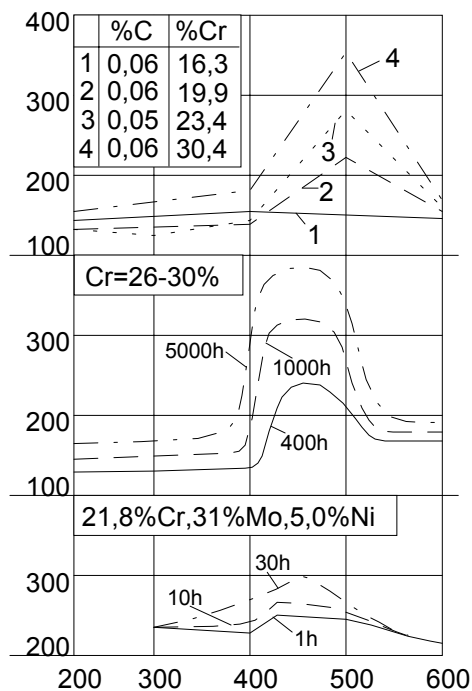


TEMPERATURA ISPITIVANJA (°C)

Ovisnost žilavosti o sadržaju ugljika u zavaru.

Tip čelika I: 12Cr 1Mo 0.3V 0.5W 0.20C

Tip čelika II: 12Cr 1Mo 0.3V 0.5W 0.15C



- a) Utjecaj kemijskog sadržaja i vremena držanja - starenja na temperaturama držanja - starenja na temperaturama oko 475 °C na tvrdoću odnosno krhkost Cr čelika.
- b) Utjecaj trajanja starenja pri 475 °C na mehanička svojstva čelika 27% Cr pri sobnoj temperaturi.

σ - Sigma faza je intermetalni spoj FeCr. Veoma je tvrd i krhak, a smanjuje i otpor puzanju. Veća vjerojatnost izlučivanja sigma faze je pri sadržaju Cr iznad 20%.

χ - Hi faza. Osim sigma faze krhkost zavarenog spoja može se povećati kod čelika s Mo (3.5%), ako se duže vremena zagrijava na višim temperaturama kad se može izlučivati intermetalni spoj Fe₃₆Cr₁₂Mo₁₀, koji se naziva "hi" faza.

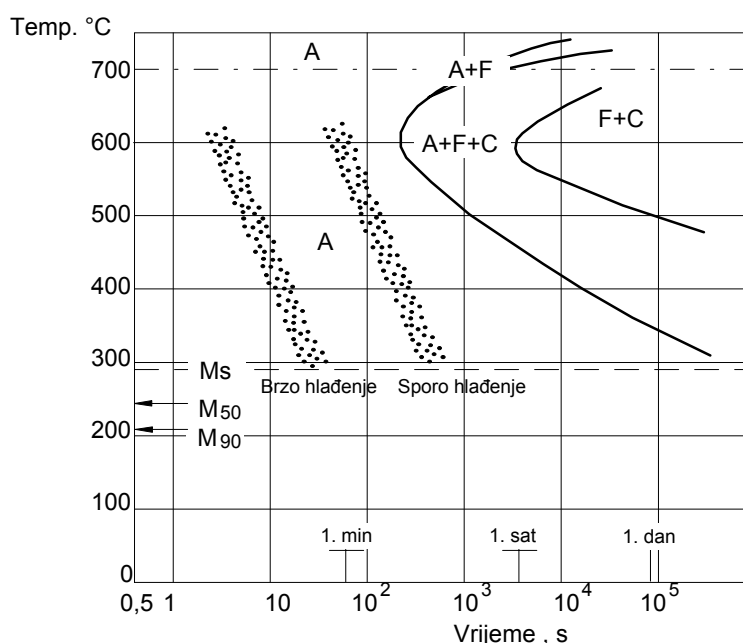
Pogrubljenje zrna se javlja pri većim toplinskim inputima i dugim zadržavanjem na visokim temperaturama, a posebno iznad 1150 °C. Pogrubljenje zrna je česta pojava za feritne čelike.

Visokolegirani martenzitni (M) Cr čelici

Visokolegirani martenzitni i martenzitno-feritni krom čelici sadrže 8 - 16%Cr, 0.06 - 1% C, te ostale elemente po potrebi (Mo, V, Ti, Al). Ovi čelici se mogu kaliti, jer imaju transformaciju $\gamma \leftrightarrow \alpha$, pa imaju pored antikoroziivnosti i poboljšanu čvrstoću kidanja, granicu razvlačenja i otpor puzanju pri povišenim temperaturama. Koriste se za visokooterećene dijelove, koji rade pri visokim temperaturama: turbinske lopatice, armature, kotlovske cijevi, komore i druge proizvode. Nisko i srednje legirani Cr i Cr Mo čelici imaju znatno slabija mehanička svojstva pri povišenim temperaturama u odnosu na visokolegirane Cr martenzitne i martenzitno-feritne čelike.

Martenzitni čelici kristaliziraju iz taline u delta ferit, a zatim pri hlađenju prelaze u austenit, koji daljnim hlađenjem prelazi u martenzit ili se pri veoma sporom hlađenju pretvara u ferit i karbide. Martenzitni čelici se obično koriste u poboljšanom stanju.

Martenzitno - feritni čelici. Ako se sadržaj kroma poveća na 17-18% uz C ispod 0.1% dobit će se kod zavarivanja feritno-austenitna struktura pri hlađenju, koja će nakon hlađenja postati feritno - martenzitna. To je nepovoljno jer se martenzit može prostirati po granicama zrna što smanjuje istezljivost u zavarenom stanju. Također, pri zavarivanju može doći do izlučivanja Cr karbida u ZUT. Toplinska obrada na 750-850 °C rastvorit će karbide, vratiti antikoroziivnost i istezljivost.



TTT dijagram za martenzitni čelik 12 Cr 0.15C (AISI 410)

Prikaz strukture i svojstava karakterističnih za 3 tipa čelika

Čelik 12 Cr 0.1C se često koristi za dijelove koji rade pri povišenim temperaturama.

5 Cr 1.3Mo 0.6V 0.4C je čelik za alate (kalupe) koji rade pri temperaturama iznad 500 °C (Utop Mo1 čelik iz Željezare Ravne).

12Cr 1Mo 0.3V 0.2C se koristi za cijevne sisteme u parnim kotlovima koji rade na visokim temperaturama do 550 °C.

Kemijski sastav i mehanička svojstva ova tri čelika su dana u tablicama 1 i 2.

Tablica 1 Kemijski sastav, %

Kemijski sastav, %									
Red. br.	Vrsta čelika	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Struktura
1.	410 (AISI)	< 0.15	1.00	1.00	11.5 13.5	--	--	--	M + F
2.	H11 Mod (AISI)	0.37 0.43	0.20 0.40	0.80 1.00	4.75 5.25	--	1.2 1.4	0.4 0.6	M
3.	X20CrMoV12.1 (DIN)	0.17 0.23	0.3 0.8	0.1 0.5	11.0 12.5	0.30 0.80	0.8 1.2	0.25 0.35	M+F

Tablica 2 Mehanička svojstva

Red. br.	Vrsta čelika	Odžareno stanje				Poboljšano stanje			
		Rm, MPa	Re, MPa	As, %	HB	Rm, MPa	Re, MPa	A5, %	HB
1.	410	500	250	30	155	840	730	22	241
2.	H11 Mod	< 830	--	--	< 250	1540	1320	13.1	440
3.	X20CrMoV12 1	--	--	--	--	800	500	17	250

Zavarivanje martenzitnih (M) čelika

Primjenjivi postupci zavarivanja

REL s elektrodama standardne izvedbe je uobičajeno.

TIG se koristi uz istosmjernu struju i minus pol na elektrodi. Postupak je vrlo prikladan za zavarivanje cijevi malih promjera, i za prolaz u korijenu kod bilo koje veličine cijevi, te za zavarivanje ploča. Unos dodatnog metala se preporučuje radi rizika stvaranja poroznosti i pukotina, ako bi se samo pretaljivalo OM. Unutrašnjost cijevi je potrebno ispuniti inertnim plinom kako bi se spriječilo stvaranje sloja željeznog oksida (cundera). Ako ne bismo osigurali zaštitnu atmosferu rastaljenog i usijanog materijala na korijenskoj strani, stvorene čestice oksida bi u eksploataciji strujale kroz cijevni sistem do turbinskih lopatica uzrokujući oštećenja.

MIG- koristi obrnuti polaritet istosmjerne struje, žica na + polu. Kao zaštitni plin koristi se argon ili helij. Mali dodaci kisika ili CO₂ dodaju se argonu ili smjesi argon - helij da povećaju stabilnost luka i da doprinesu boljoj kvaliteti zavara. Prijenos kapi u luku može biti u kratkim spojevima ili kontinuirano. Raspršeni luk ovisi o promjeru žice, debljini i stijenki, položaju zavarivanja, postotku miješanja i količini taljenja.

EP se također koristi za zavarivanje martenzitnih čelika. Visok postotak miješanja (30-50%) i izgaranja Cr i ostalih legiranih elemenata može se nadoknaditi dodatkom istih u prašak. Upotrebljava se i istosmjerna i izmjenična struja.

Dodatni materijali

Dva se osnovna tipa DM koriste kod zavarivanja martenzitnih čelika;

1. Približno istog kemijskog sastava kao i OM, da bismo dobili martenzitnu strukturu nakon zavarivanja.
2. Austenitni (AISI 300) tipovi ili Inconel metal sa sadržajem Cr i Ni za potreban omjer miješanja (kao rezultat spajanja s OM), odabranog da konačni depozit osigura prihvatljivu količinu austenita koji povećava žilavost i istezljivost zavara. Primjenom austenitnog DM smanjuje se količina difuzijskog vodika, a time je vjerojatnost pojave hladnih pukotina također smanjena.

ZT se ne zakaljuje i zadržava visoku žilavost. Elektrode ovog tipa se upotrebljavaju kada se ne vrši naknadna toplinska obrada. Unatoč svemu ZUT (2-3 mm) će se ipak zakaliti na zraku. Ali to može biti riješeno samopopuštanjem martenzitne strukture boravkom na visokoj radnoj temperaturi u eksploataciji.

Ako ipak koristimo DM istog kemijskog sastava kao i OM, ZT se može naknadno toplinski obrađivati. Također ZT ima isti koeficijent toplinske istezljivosti kao OM-a, što je u nekim slučajevima povoljnije (napr. kod navarivanja radnih površina izloženih naglim temperaturnim promjenama), jer neće uzrokovati termička naprezanja pri zagrijavanju i hlađenju.

Zaštita od oksidacije pri zavarivanju

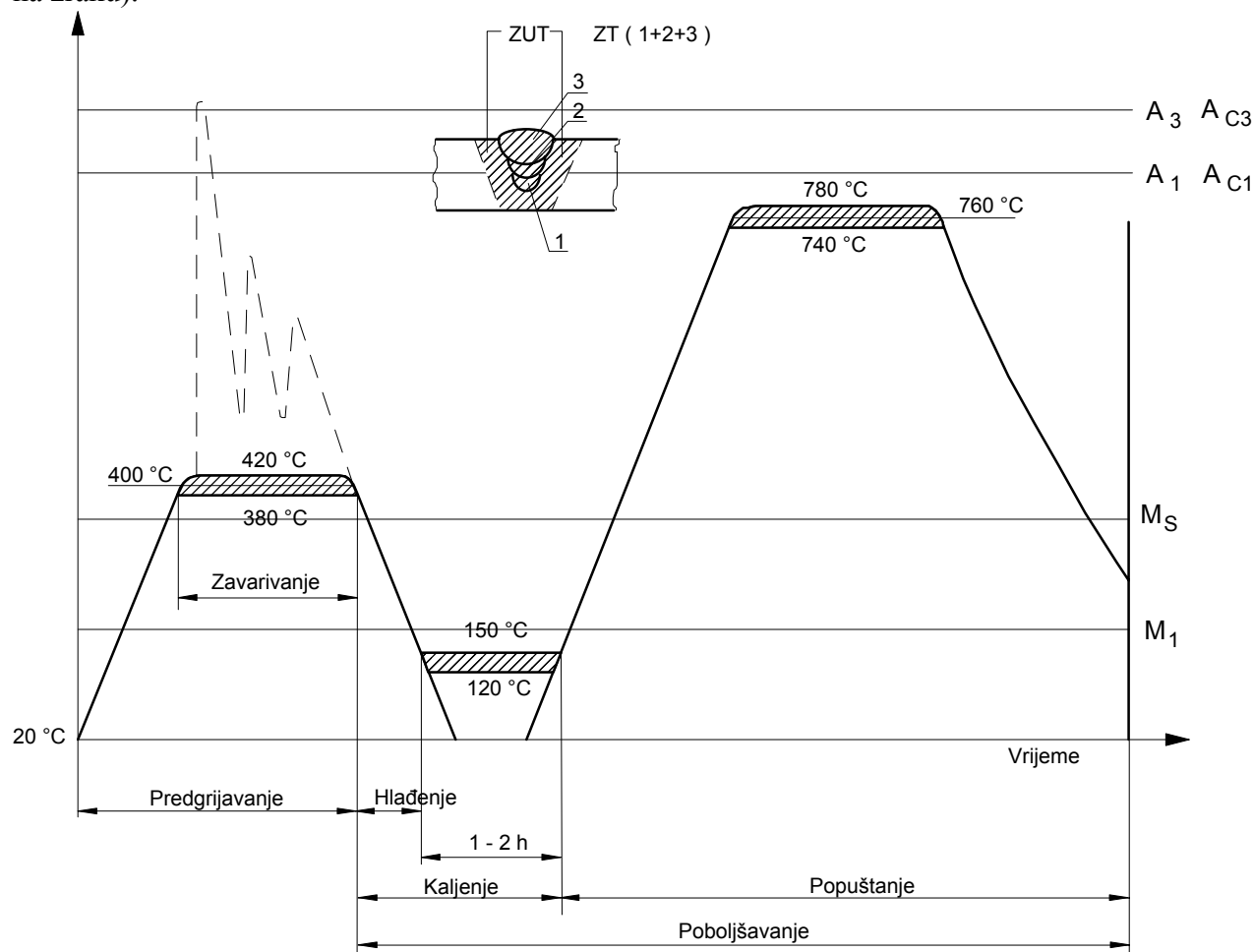
Cr oksid ima temperaturu taljenja, 1972 °C, pa je potrebno osigurati zaštitu kapi u luku i kupke kao i korijenske strane zavara. Također se koriste sredstva za odstranjivanje Cr oksida s površine. Fluoridi su najefikasniji dodaci u oblozi elektrode za odstranjivanje Cr oksida. Ostatke troske s fluoridima treba brižljivo odstraniti jer mogu djelovati korozijski na metal pri povišenim temperaturama, napr. pri naknadnoj toplinskoj obradi.

Predgrijavanje, temperatura između prolaza i dogrijavanje

Budući da su martenzitni i martenzitno - feritni čelici jako prokaljivi, to će i pri sporom hlađenju ZT i ZUT koje su bile austenitne, prijeći u martenzit. Iako predgrijavanje smanjuje brzinu hlađenja, ona će još uvijek biti dovoljna da se ZT i ZUT potpuno transformiraju u martenzit i pri usporenom hlađenju,

jer su ove zone samozakaljive na zraku. Dakle, predgrijavanje i temperatura između prolaza nemaju svrhu da izbjegnu martenzitu strukturu nakon završenog zavarivanja, već oni smanjuju nepovoljni učinak temperaturnih naprezanja pri stezanju, jer se smanjuje razlika temperature zavora i osnovnog materijala, a u izvjesnoj mjeri i granice razvlačenja, pa će i zaostale napetosti biti manje. Pri povećanoj temperaturi se povisuje istezljivost i žilavost, što djeluje povoljno. Također, viša temperatura predgrijavanja omogućava izlazak difuzijskog vodika iz zavora. Sve navedene pojave uzrokovane predgrijavanjem smanjuju vjerojatnost pojave hladnih pukotina.

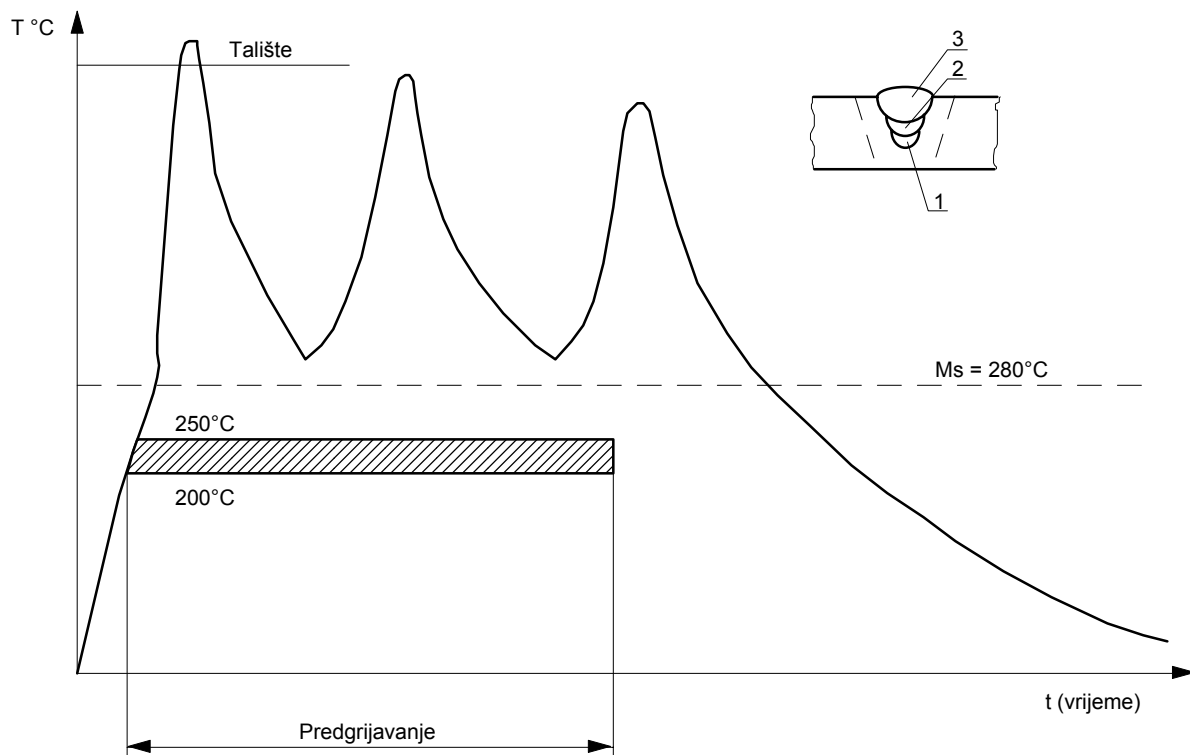
Temperatura predgrijavanja treba biti iznad M_S linije da bi spriječili mogućnost stvaranja martenzita u toku zavarivanja (naravno ponovo treba istaći svojstvo zakaljivosti martenzitnih materijala na zraku).



Ispravne toplinske operacije pri zavarivanju za martenzitne Cr čelike. Temperatura predgrijavanja treba biti iznad M_S temperature (napr. $M_S + 50^\circ\text{C}$). Nakon zavarivanja vrši se lagano hlađenje na temperaturu ispod M_f (napr. $M_f - 20^\circ\text{C}$), te zadržavanje na toj temperaturi 1 - 2 h da bi se sav zaostali austenit transformirao u martenzit, a zatim se izvodi popuštanje (ispod A_{C1}).

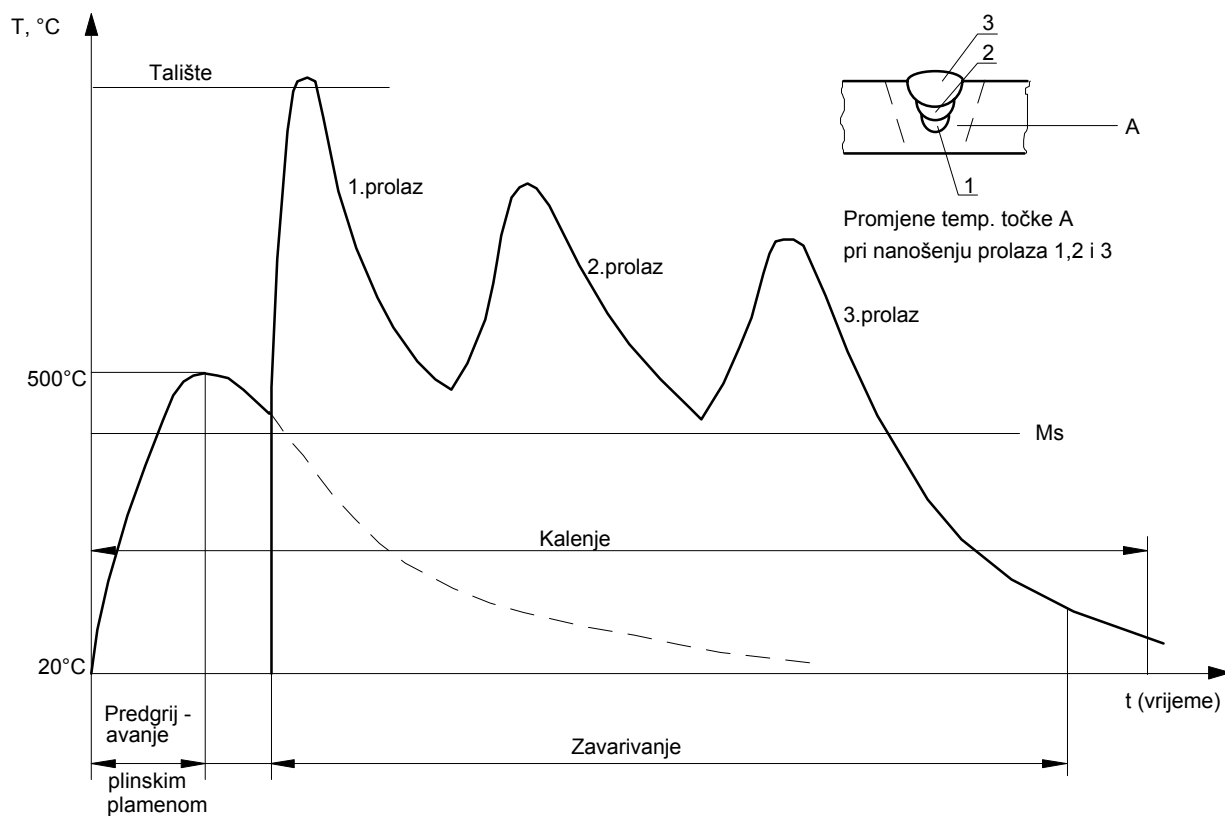
Ipak u slučajevima zavarivanja tanjih limova, manjih komada ili pri zavarivanju onim postupcima zavarivanja kojim se unosi velika količina topline (TIG zavarivanje napr.) nije potrebno predgrijavati iznad M_S linije zbog unosa topline u toku zavarivanja, koji automatski povećava temperaturu ZUT-a i ZT iznad M_S .

Temperatura predgrijavanja, općenito, treba da bude viša od M_S , a temperatura između prolaza ne bi trebala da bude viša od 420°C .

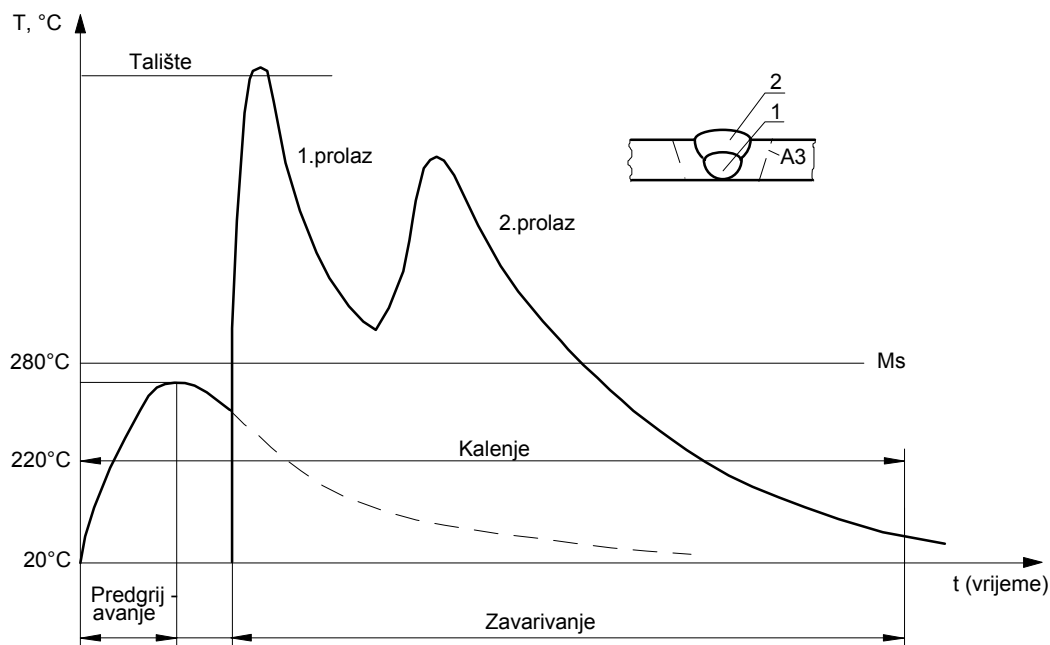


Zavarivanje uz stalno predgrijavanje ispod M_s za vrijeme zavarivanja zbog unosa topline u toku zavarivanja.

Međutim uspješno zavarivanje moguće je izvesti i na drugi način; predgrijati na oko 500°C , te isključiti uređaj za predgrijavanje. Zatim se polažu svi prolazi jedan za drugim, čime osiguravamo dovoljno unosenje topline zavarivanjem, kako temperatura za vrijeme zavarivanja ne bi pala ispod M_s linije. Ako se radi o velikim unosima topline ili tanjim dijelovima predgrijavanje se može izvoditi i na temperaturi nešto ispod M_s .



Zavarivanje s početnim predgrijavanjem iznad M_s



Zavarivanje s početnim predgrijavanjem ispod M_s

Dogrijavanje ima za cilj omogućavanje izlaska difuzijskog vodika i kod debljih i upetijih zavarenih spojeva smanjivanje temperaturnih naprezanja u odnosu na slučaj potpunog ohlađivanja. Vrijeme dogrijavanja treba birati ovisno o TTT dijagramu i predvidjeti da je u tom slučaju temperatura predgrijavanja, između prolaza i dogrijavanja, nešto iznad M_s , a ukupno vrijeme od hlađenja prvog prolaza do završetka zavarivanja i dogrijavanja mora završiti prije početka pretvorbe austenita u martenzit. U tom trenutku treba omogućiti hlađenje do ispod M_f (npr. za 20 °C ispod M_f u vremenu od 2 h) da bi se sav zaostali austenit pretvorio u martenzit, a zatim zagrijati lokalno zavar ili čitav predmet na temperaturu popuštanja martenzita i popuštanja zaostalih napetosti, ali ispod A_{c1} .

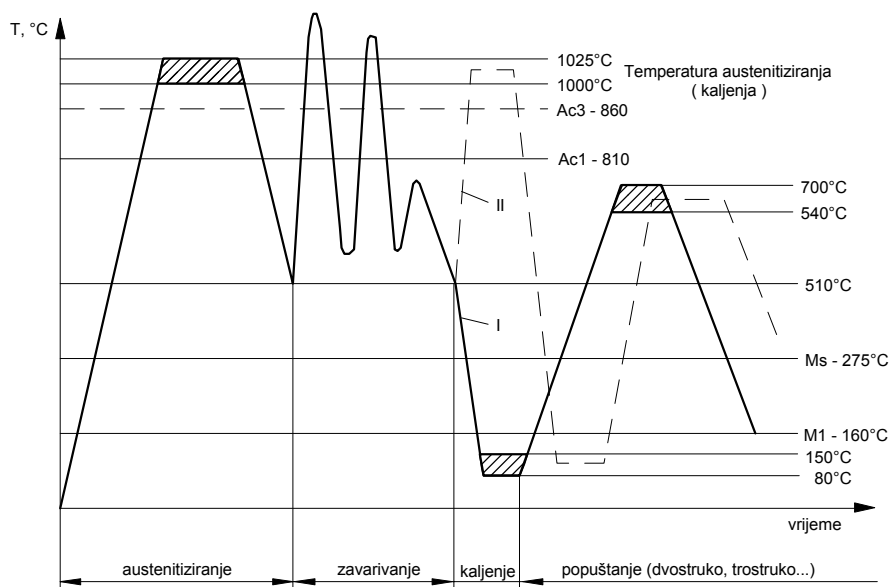
Ako je predmet tanji i manje upet, tada se može nakon dogrijavanja hladiti na sobnu temperaturu ili što je za jednostavnije slučajeve također moguće hladiti od austenitizacije do sobne temperature bez dogrijavanja. Direktno hlađenje na sobnu temperaturu je najekonomičnije, ali uz rizik pojave hladnih pukotina. Postoji još mogućnost, da se temperatura za bilo koji slučaj snizi na nešto ispod M_f , drži na toj temperaturi npr. 10 sati, a zatim se hladi do sobne temperature.

Svako hlađenje do ispod M_f ili do sobne temperature omogućava pretvorbu u martenzit, pa je poslije neophodno popuštanje martenzita. Podizanje temperature predgrijavanja iz austenitnog područja odmah na temperaturu popuštanja rezultiralo bi u nepovoljnoj grubozrnatoj strukturi F + C (ferit + karbid).

Zavarivanje 5Cr 1.3Mo 0.3V1 Si čelika (H11 Mod)

Sve do sada rečeno o martenzitnim čelicima vrijedi i za 5 Cr martenzitni čelik, koji može toplinskom obradom postići čvrstoće veće od 2000 MPa, pa se svrstava u ultračvrste čelike (nema točno određene granice čvrstoće, ali se obično ultračvrstim čelicima zovu oni koji imaju minimalnu granicu razvlačenja 1380 MPa (200 ksi). Uobičajeno se zavaruje REL ili TIG/MIG metodama. Predgrijavanje se vrši iznad $M_s = 275$ °C ali se preporuča 540 °C. Dijelove koji se zavaruju treba hladiti polagano. Pojednostavljeni toplinski dijagram zavarivanja za 5 Cr čelik dat je na sljedećoj slici.

Ukoliko nismo sigurni da je materijal isporučen u zahtijevanom (uglavnom poboljšanom) stanju, prije zavarivanja može se izvesti i austenitizacija i zatim lagano hlađenje do temperature predgrijavanja, nakon čega odmah započinje zavarivanje. Isto tako, ukoliko nismo sigurni da je cjelokupni postupak zavarivanja završen u potrebnom temperaturnom području (eventualno došlo do pretjeranog ohlađivanja) ili želimo biti potpuno sigurni u strukturu zavarenog spoja, nakon zavarivanja odmah se vrši zagrijavanje na temperaturu austenitiziranja, kaljenje i tek poslije toga popuštanje.



Toplinski dijagram zavarivanja za 5 Cr 1 Mo 0,3 V 1 Si (H1 1 Mod) čelik

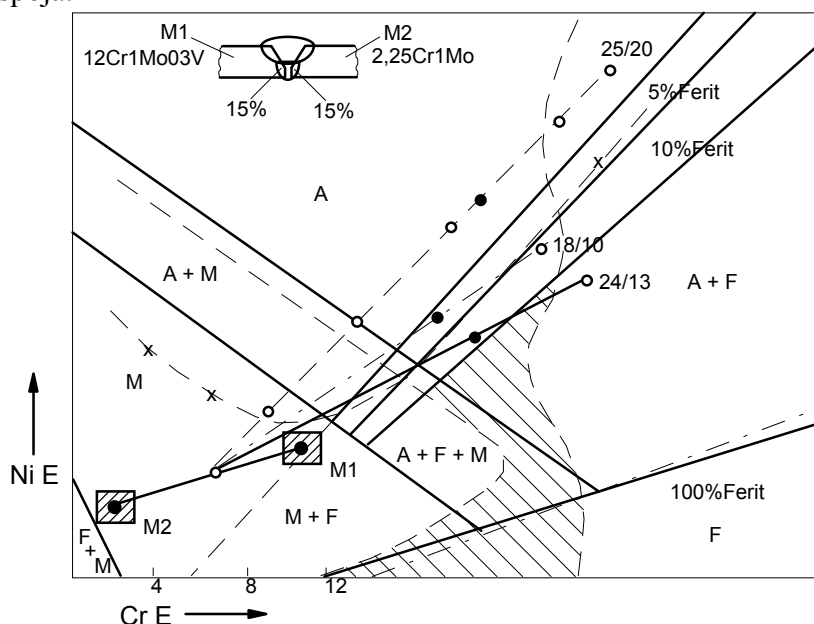
Zavarivanje Cr martenzitnih čelika s drugim čelicima

Izbor kemijskog sastava DM pojednostavljen je ako se pridržavamo slijedećih uputstava:

1. Austenitni DM se u pravilu koristi za zavarivanje bilo kog Cr čelika s austenitnim čelikom.
2. Za zavarivanje jednog, na zraku zakaljivog Cr čelika s drugim, dodatni materijal sadrži Cr u količini koju sadrži bilo koji od zavarenih čelika, ili sadržaj kroma u iznosu srednje vrijednosti zavarenih metala.
3. Zavarivanje bilo kojeg Cr čelika s čelikom nižeg sadržaja legiranih elemenata ili ugljičnim čelikom, zahtijeva DM sastava manje legiranog čelika ili ugljičnog čelika. Preporučljivo je koristiti (ako je moguće) najmanje zakaljiv dodatni materijal.

U mnogo slučajeva primjenjiv je austenitni zavar. Sljedeća slika prikazuje korištenje Schaeffler-ovog dijagrama da bi se odredio konačni sastav ZT, poznavajući stupanj miješanja, sastav metala koji se spajaju i sastav DM. Dane su tri elektrode: 25Cr 20Ni, 24Cr 13Ni i 18Cr 10Ni za zavarivanje 12Cr(M1) s 2.25Cr 1 Mo (M2). Sastav samog zavara treba biti u šrafiranom području, ako je moguće. Objašnjenje povoljnog položaja sastava ZT u šrafiranom području dano u poglavlju o dijagramu Schaeffler.

Miješanje od 30% (za REL postupak) je izabrano u sva tri slučaja. To pokazuje da tok i postupak koji se koristi za zavarivanje igraju bitnu ulogu u određivanju postotka miješanja i u izboru sastava zavarenog spoja.



Dijagram Schaeffler za određivanje sastava ZT spoja martenzitnog čelika 12Cr(M1) i 2.25 Cr1Mo (M2) REL zavarivanjem (30% miješanje OM). Najpovoljniji je DM 24Cr 13 Ni - austenitne strukture s oko 7% ferita.

Ako određeni zavar treba biti izložen značajnim i čestim temperaturnim promjenama kod korištenja, primjena ranije spomenutih austenitnih elektroda nije preporučljiva. Razlog je 50% veći koeficijent toplinske istezljivosti austenita u odnosu na martenzitne i srednje čvrste čelike, što u spomenutim okolnostima može dovesti do pojave pukotina zbog promjenljivih termičkih naprezanja. Za te slučajeve treba upotrijebiti DM istog koeficijenta toplinske istezljivosti kao u OM. Kod zavarivanja Cr čelika različitih kvaliteta, nije moguće dati opće prihvatljivo pravilo, već prethodno treba potražiti savjet metalurga. Dugotrajna izloženost zavarenih spojeva radnoj temperaturi može prouzrokovati povećanje krhkosti i izlučivanje karbida. Ugljik se premješta iz metala s manje kroma prema metalu većeg sadržaja kroma, zbog njegova velikog afiniteta prema kromu, čak i onda ako je sadržaj ugljika veći u omjeru migracije zbog Cr.

Visokolegirani Cr čelici feritnog (F) tipa

Feritni čelici sadrže između 16 i 30% Cr, uz obično nizak sadržaj ugljika između 0.05 i 0.25%. Zbog visokog sadržaja kroma i niskog sadržaja ugljika, ne dolazi do stvaranja austenita ili se stvara izuzetno mala količina koji prelazi u martenzit pri brzom hlađenju. Zbog malog udjela martenzita, on neznatno utječe na tvrdoću ovih čelika. Ferit se stvara već pri skrućivanju i do potpunog ohlađivanja nema nikakvih transformacija. Takav ferit se naziva δ - ferit (prostorno centrirana kubna rešetka).

Iz tih razloga feritni čelik se ne može kaliti. Struktura ovih čelika obično je sastavljena od ferita i karbida.

Zavarivanje feritnih čelika

Kako kod ovih čelika obično ne dolazi do transformacije i pri brzom hlađenju ne dolazi do zakaljivanja, može se steći utisak da su dobro zavarljivi. Međutim, i pri zavarivanju ovih čelika javljaju se određene teškoće.

Najveći nedostatak ovih čelika pri zavarivanju je sklonost porastu zrna u materijalu ZUT iznad 900 °C (ubrzano iznad 1150 °C). Povećanje zrna odvija se veoma brzo, pa se u ovim čelicima mogu naći neobično velika zrna. Feritni čelici su normalno fino zrnati uz relativno dobru istezljivost. No ukoliko dođe do pogrubljenja zrna, prijelazna temperatura udarne žilavosti se povisi znatno iznad sobne temperature, što znači da na sobnoj temperaturi materijal postaje veoma krhak.

Nakon što je materijal postao grubozrnat, nije više moguće nikakvom toplinskom obradom materijal vratiti nazad u fino zrnatu strukturu (ne dolazi do faznih transformacija prilikom zagrijavanja i hlađenja). Do intenzivnog porasta zrna dolazi neposredno uz granicu taljenja na mjestima gdje temperatura prelazi 1150 °C.

Da bismo spriječili povećanje zrna, zavarivanje treba izvoditi na takav način da osnovni materijal, koji se nalazi neposredno uz zavar, što kraće vrijeme provede na temperaturama iznad 1150 °C. Ovo se može postići izborom postupaka zavarivanja koji će dati mali unos topline, a time i brzo hlađenje (REL, EP, MAG).

Teorijski je moguće poboljšati grubozrnatu strukturu ZUT deformacijom metala u toplom stanju, tj. zagrijavanjem i čekićanjem prijelazne zone. Međutim, ovo nije uvijek moguće, a i sam efekt čekićanja nije uvijek pouzdan, pa se zbog toga i ne preporučuje. Hladno čekićanje ZUT ne smije se nikako primjeniti, jer hladno deformiranje krhke zone može dovesti do napuklina.

Skлонost porastu zrna može se smanjiti dodavanjem male količine dušika feritnom čeliku. Oko 0.1% dušika u metalu znatno će usporiti porast zrna, a dodavanjem dušika u metal zavora, ovaj će skrućivati u fino zrnatu strukturu.

S druge strane, krhkost koja je uzrokovana porastom zrna može se spriječiti primjenjujući austenitne elektrode, napr. 18/8 (18%Cr, 8% Ni). Da bi se spriječilo izlučivanje karbida, sadržaj ugljika u ostalom materijalu mora biti ispod 0.1%, te koristiti jače legirane elektrode s 25%Cr i 20%Ni (25/20).

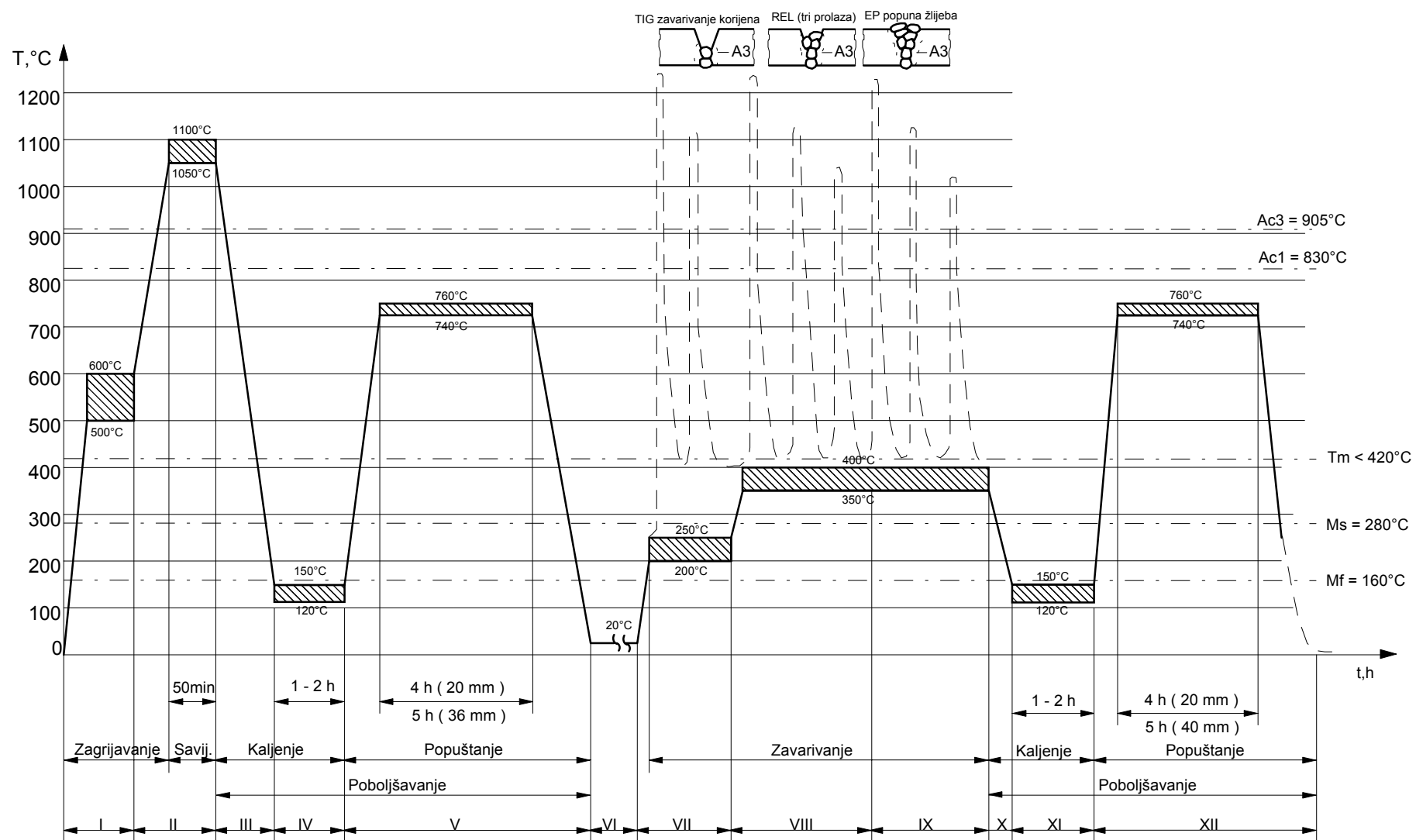
Drugi način smanjenja sklonosti porastu zrna je legiranje čelika, tako da se dobije struktura s malo austenita. Primjer jednog takvog čelika je ;

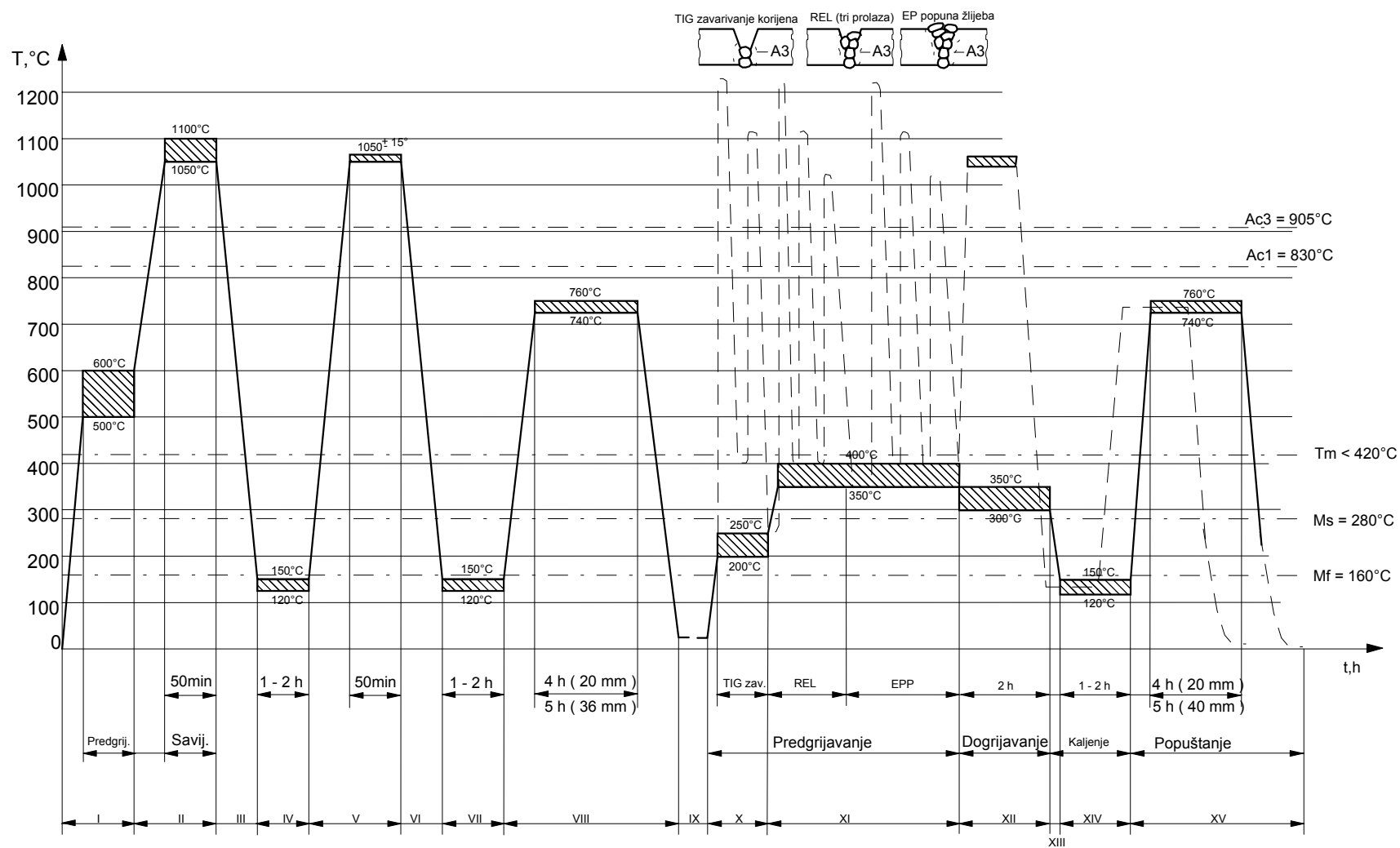
$C < 0.08 \%$, $Cr = 28 \%$, $Ni = 4.5 \%$, $Mo = 1.5 \%$

Slijedeća poteškoća pri zavarivanju feritnih čelika je stvaranje sigma faze. Sigma faza je intermetalni spoj kroma i željeza koja ima veliku tvrdoću, krhka je, nemagnetična i često slabo otporna na koroziju. Još jedna od poteškoća koje se javljaju pri zavarivanju feritnih Cr čelika je i mogućnost pojave izlučivanja Cr karbida. Isto tako, pri dugotrajnijem zagrijavanju na temperaturi između 400 i 540 °C, a naročito na 475 °C može se javiti i krhkost 475 °C.

Predgrijavanje na oko 200 °C može se koristiti pri zavarivanju feritnih čelika s visokim sadržajem kroma i relativno visokim sadržajem ugljika (0.25%). U ostalim slučajevima se normalno ne primjenjuje za ove čelike.

Odžarivanje na temperaturi 750-850 °C i nakon toga brzo hlađenje povećava istezljivost prelazne zone i poboljšava otpornost na interkristalnu koroziju. Ispravljanje i hladne deformacije zavarenih dijelova treba izvoditi nakon zagrijavanja na 300-400 °C, jer je istezljivost pri ovim temperaturama znatno viša.





Iskustva iz prakse

Predgrijavanje i rad na temperaturi predgrijavanja treba biti iznad M_s temperature, počevši od priipajanja na dalje. Ukoliko se dogodi da se pripoj, korijenski prolaz ili bilo koji prolaz pothladi ispod M_f temperature, stvorit će se krhka martenzitna struktura ZT i ZUT na tom mjestu. Daljnjim zavarivanjem preko takvog prolaza, javit će se pukotine u njemu. Isto se zbiva ukoliko ventilator uređaja za zavarivanje nenamjerno ohlađuje mjesto zavarivanja.

Jedan složeniji primjer slijeda toplinskih operacija cjevovoda iz martenzitnog čelika (toplo savijanje, zavarivanje, popuštanje).

Zaštita korijenskog šava u unutrašnjosti cijevi ili cilindra vrši se punjenjem i protokom 2-4 litre u minuti argonom (Ar 99.95%). Za određivanje početka zavarivanja koristi se oksimetar (manje od 1% O_2).

Zajede, greške provara korijena i ukljucci odstranjuju se brušenjem. Brusiti treba brzo i u predgrijanom stanju.

Upozorenje: ventilacija brusilice može pothladiti pregrijani komad ispod M_s temperature. Svako prekidanje zavarivanja zahtijeva popuštanje i tek tada nastavljanje zavarivanja.

Kontrola kvaliteta se vrši poslije završene toplinske obrade. Svaku grešku u zavaru treba sagledati puno ozbiljnije nego kod mekih čelika. Za površinske greške treba koristiti kontrolu magnetskim česticama (ili u nekim slučajevima tekućim penetrantima). Za veće površinske i dubinske greške treba koristiti ispitivanje ultrazvukom.

Nadvišenje zavora treba odstraniti brušenjem, da bi se dobila veća pouzdanost otklanjanja grešaka, a u eksploataciji zavar bez koncentratora naprežanja na granici taljenja.

Ispitivanje tvrdoće daje opću sliku stanja strukture i svojstava koja su posljedica toplinske obrade. Za zavareni spoj treba mjeriti tvrdoću sredine zavarenog spoja, te zonu utjecaja topline. Za 12 Cr čelik zavareni metal i ZUT imaju tvrdoću 500 - 600 HV, a nakon naknadne toplinske obrade tvrdoća treba da iznosi 300-350 HV.

Replike za utvrđivanje strukture treba koristiti ako rezultati tvrdoće ne zadovoljavaju ili su nepouzdana.

CrNi AUSTENITNI NERĐAJUDI ČELICI

Sastav i svojstva

Austenitni CrNi čelici sadrže 12 - 25% Cr i 8 - 25% Ni. Nikl je izrazito γ -geni element. Nema faznih transformacija prilikom hlađenja, pa se struktura ne može toplinskom obradom zakaljavati, niti usitnjavati zrna napr. normalizacijom.

Najpoznatiji predstavnik ove grupe čelika je 18% Cr 8% Ni (18/8) čelik. Ostali austenitni čelici ove grupe imaju sličan sastav, a najviše do 25Cr i 20Ni. Imaju dobru istezljivost ($A_5 = 30 - 50\%$) i žilavost i pri niskim temperaturama. Dobro su zavarljivi. Zadržavaju austenitnu strukturu od solidusa do ispod sobnih temperatura. Nisu skloni povećanju zrna u ZUT. Budući da imaju $> 12\%$ Cr, ovi čelici su otporni na koroziju i oksidaciju. Nisu skloni krhkosti pri 475 °C. U tablici 1 se navode kvalitete austenitnih valjanih čelika prema američkim standardima AISI.

Tablica 1 Austenitni nerđajući čelici prema AISI (American Iron and Steel Institute). Valjani proizvodi

Tip	C ¹ %	Cr %	Ni %	Ostali elementi ^{1,2} %
201	0.15	16.00-18.00	3.50-5.50	N, 0.25; Mn, 5.50-7.50; P, 0.06
202	0.15	17.00-19.00	4.00-6.00	N, 0.25; Mn, 7.50-10.00; P, 0.06
301	0.15	16.00-18.00	6.00-8.00	
302	0.15	17.00-19.00	8.00-10.00	
302B	0.15	17.00-19.00	8.00-10.00	Si, 2.00-3.00
303	0.15	17.00-19.00	8.00-10.00	S, 0.15 min; P, 0.20
303Se	0.15	17.00-19.00	8.00-10.00	Se, 0.15 min
304	0.08	18.00-20.00	8.00-12.00	
304L	0.03	18.00-20.00	8.00-12.00	
305	0.12	17.00-19.00	10.00-13.00	
308	0.08	19.00-21.00	10.00-12.00	
309	0.20	22.00-24.00	12.00-15.00	
309S	0.08	22.00-24.00	12.00-15.00	
310	0.25	24.00-26.00	19.00-22.00	Si, 1.50
310S	0.08	24.00-26.00	19.00-22.00	Si, 1.50
314	0.25	23.00-26.00	19.00-22.00	Si, 1.50-3.00
316	0.08	16.00-18.00	10.00-14.00	Mo, 2.60-3.00
316 L	0.03	16.00-18.00	10.00-14.00	Mo, 2.00-3.00
317	0.08	18.00-20.00	11.00-15.00	Mo, 3.00-4.00
321	0.08	17.00-19.00	9.00-12.00	Ti, 5 x C min
347	0.08	17.00-19.00	9.00-13.00	Cb + Ta, 10 x Cmin
17-7PH ³	0.09	16.00 -18.00	6.50-7.75	Mn, 1.00; Al, 0.75 -1.50
17-10P	0.10-0.14	16.50-17.50	9.75-10.75	Mn, 0.50 - 1.00; P, 0.25 - 0.30; Si, 0.60
17-4PH	0.07	15.50-17.50	3.00-5.00	Mn, 1.00; Cu, 3.00-5.00; Cb + Ta, 0.15-0.45
15-7Mo	0.09	14.00-16.00	6.50-7.75	Mn, 1.00; S, 0.04; Al, 0.75-1.50
AM-350	0.08-0.12	16.00-17.00	4.00-5.00	Mn, 0.50-1.25; Si, 0.50; Mo, 2.50-2.25; N, 0.07-0.13
AM-355	0.10-0.15	15.00-16.00	4.00-5.00	Mn, 0.50-1.25; Si, 0.50; Mo, 2.50-3.25; N, 0.07 - 0.13
A-286	0.08	13.50-16.00	24.00-27.00	Mn, 1.00-2.00; Mo, 1.00-1.50; Ti, 1.75-2.35; V, 0.10-0.50; Al, 0.35; P, 0.04

Primjedbe:

¹ Dani su maksimalni sadržaji, ako nije dano područje.

² Mn 2.00 maks; Si 1.00 maks. P 0.04 maks. S 0.03 maks. ako nije drugačije naznačeno. Ostatak je Fe.

³ Ovaj čelik i ostali u tabeli navedeni ispod ovog čelika nisu standardizirani prema AISI

Zavarljivost VLA čelika

Iz formula za Ni i Cr ekvivalente prema Delongu uočavamo njihov utjecaj na strukturu, da li su α - geni ili γ - geni:

$$\text{NiE} = \% \text{ Ni} + 30 \% \text{ C} + 30 \% \text{ N} + 0,5 \% \text{ Mn}$$

$$\text{CrE} = \% \text{ Cr} + \% \text{ Mo} + 1,5 \% \text{ Si} + 0,5 \% \text{ Nb}$$

Utjecaj pojedinih elemenata u austenitnim Cr-Ni čelicima

Element	Tvori strukturu	Karakteristike
C	A (austenit)	30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Može stvarati Cr_{23}C_6 i uzrokovati interkristalnu koroziju - IKK.
Cr	F (ferit)	Poboljšava otpornost koroziji i oksidaciji
Ni	A	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama i korozijsku otpornost Ni. (γ -gen).
N	A	30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Povišuje čvrstoću. Pomaže stvaranju ferita.
Nb		Dodaje se čeliku $\text{min Nb} \geq 8 \times \% \text{ C}$ da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac finog zrna.
Mn	A	Spriječava vruće pukotine stvaranjem MnS . γ - gen.
Mo	F	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama. Poboljšava antikorozivnost pri djelovanju reducirajućih medija. Pomaže stvaranje ferita (α - gen).
P, S, Se	-	Olakšava obradu odvajanjem čestica. Pogoršava zavarljivost i antikorozivnost.
Si	F	Poboljšava vatrootpornost (otpornost oksidaciji) Dodaje se uvijek zbog dezoksidacije. Pomaže stvaranje ferita.
Ti	-	Dodaje se čeliku $\text{Ti} \geq 5 \times \% \text{ C}$ da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac sitnog zrna. Pomaže stvaranje ferita.

Otpornost izlučivanja štetnih faza i pojava pukotina:

a) **Izlučivanje Cr karbida** u području 450-850 °C (najjače na oko 650 °C) na granicama zrna.

Izlučeni karbidi zaprečavaju dislokaciju atoma na pravicima i ravninama klizanja plošno centrirane austenitne rešetke, što smanjuje istezljivost i žilavost austenitne strukture. Ako je prisutan agresivan medij u eksploataciji, tada će uz granice zrna doći do interkristalne korozije, jer nema dovoljno Cr (<12%), koji je migrirao na granicu zrna tvoreći Cr_{23}C_6 s 94.3% Cr.

Izlučivanje karbida odnosno interkristalnu koroziju možemo spriječiti:

1. **Legiranjem elementima karbidotvorcima Nb, Ti, Ta**, koji tvore stabilne karbide. Ovi elementi imaju veći afinitet prema ugljiku od Cr, pa će se oni prvo vezati za ugljik, a Cr će ostati jednoliko raspoređen. Stabilizirajući elementi se dodaju prema sadržaju ugljika:

$$\frac{\text{Ti}}{\text{C}} \geq 5, \quad \frac{\text{Nb}}{\text{C}} \geq 8, \quad \frac{\text{Ta}}{\text{C}} \geq 16, \quad \text{ili} \quad \frac{\text{Ta} + \text{Nb}}{\text{C}} \geq 8$$

Stabilizatori se dodaju u OM ili DM. Nb izgara jače u električnom luku, pa se za DM koristi Ti umjesto Nb.

2. **Smanjenje sadržaja ugljika** $\text{C} < 0.03\%$ (ELC čelici = Extra Low Carbon)

Stvoreni karbidi su u malim količinama, u diskontinuiranim izlučinama, pa je nepovoljno djelovanje jako smanjeno. Nije moguća korozija po čitavom presjeku.

3. **Gašenjem** - toplinskom obradom na 1050-1100 °C kada se karbidi rastvore, a zatim brzim hlađenjem kroz područje 850-450 °C se zadržava struktura austenita bez izlučenog Cr na granicama zrna vezanog u Cr karbid.

4. **Malim unošenjem topline**. Zavarivati treba u što hladnijem stanju, što se postiže slijedećim mjerama:

- ne predgrijavati
- temperatura između prolaza treba biti što niža, napr 100 °C maks
- toplinski input treba biti što niži dužina izvlačenja elektrode mora biti l_1 velika, širina gusjenice $b \leq 2.5 \times \text{promjer elektrode}$

Ove mjere skraćuju vrijeme zadržavanja u intervalu 850-450 °C pri hlađenju, kada se mogu izlučivati Cr karbidi. Za pospješjenje hlađenja preporuča se ponekad ulaganje predmeta, koji se

zavaruju, u vodu ili dodatno hlađenje zavarenih spojeva vodom. Napr. hlađenje vlažnim krpama ili vlažnim četkama.

Toplinske operacije, napr. grijanje zbog toplog oblikovanja treba izbjegavati u području 450-850 °C. Svi ovi zahtjevi mogu biti ublaženi ili ih se ne treba pridržavati ako je čelik stabiliziran s Ti, Nb ili Ta ili ima nizak sadržaj ugljika (< 0.03%C).

b) Izlučivanje krhkih faza

Sigma faza (FeCr) i hi faza Fe₃₆Cr₁₂Mo₁₂

Pored karbida i nitrida mogu se u nerđajućim čelicima izlučivati i intermetalne faze, koje imaju drugačiju strukturu, te smanjuju istezljivost i otpornost na koroziju.

Sigma faza su spojevi metala - intermetalni spojevi, tetragonalne strukture u kojoj su atomi pravilno raspoređeni. σ faza nije feromagnetična. Postoji oko 50 raznih sigma faza od kojih je najpoznatija željezo - krom sigma faza sa strukturnom formulom FeCr i sa oko 48% Cr. Veoma je tvrda i krhka (HV = 1000 HV). Veći sadržaj Cr, a naročito > 20 Cr daje veću vjerojatnost pojave σ faze.

Kinetika izlučivanja sigma faze je veoma važna za svojstva i pouzdan rad zavarenog spoja bilo da se radi o toplinskoj obradi ili o dugotrajnom pogonu na visokim temperaturama. Također i pri hlađenju zavarenog spoja može doći do pojave σ faze. Vjerojatnije se pojavljuje σ faza pri zagrijavanju dužem od 20 h u području 600-830 °C i to iz feritne faze. No može nastati i iz čistog austenita. Izlučivanje je brže u feritnoj nego u austenitnoj strukturi.

Pri hlađenju se σ faza izlučuje ispod 830 °C. Na stvaranje σ faze bitno utječe mogućnost difuzije Cr, jer je potrebno da se lokalno od oko 20% Cr, poveća sadržaj Cr na oko 48%. Kod nerđajućih čelika izlučuje se σ faza u pravilu kada je sadržaj Cr veći od 16%.

Sigma faza uzrokuje pad žilavosti i istezljivosti, a može uzrokovati i smanjenje antikorozivnosti. Toplinskom obradom na 1200 °C prelazi σ faza u austenit ili ferit, no na visokoj temperaturi možemo očekivati pogrubljenje zrna. Već i kratkim zagrijavanjem od 10 min na 1050 °C se osjetno smanjuje krhkost.

Pored σ faze javlja se intermetalni spoj χ (hi) faza (Fe₃₆Cr₁₂Mo₁₂). Prema Falkhard-u istraživan je utjecaj ostalih elemenata na izlučivanje σ i χ faza koje povećavaju krhkost i dan je utjecaj preko krom ekvivalenta.

$$Cr_e = Cr + 0.31Mn + 1.76Mo + 1.7Nb + 1.58Si + 2.44 Ti + 1.22 Ta + 2.02 W + 0.97 W - 2.66 Ni - 0.177 Co.$$

Veći sadržaj Cr daje veću sklonost stvaranju krhkih faza. Uočavamo da neki elementi čak jače od Cr djeluju na izlučivanje krhkih faza, a jedino Ni i Co djeluju usporavajuće na izlučivanje krhkih faza. Prisustvo C uzrokuje stvaranje M₂₃C₆, pa je okolina osiromašena na Cr, koji je sastavni dio σ faze. Potrebna je dodatna difuzija Cr u ta osiromašena područja da bi došlo do stvaranja σ faze. Kod stabiliziranih čelika je usporavajući utjecaj C na stvaranje intermetalnih spojeva smanjen. Stoga su stabilizirani čelici skloniji povećanju krhkosti. Slično je i sa čelicima koji sadrže malo C (LC, ELC < 0,03 C).

Visok sadržaj Cr, vrlo nizak sadržaj ugljika ili stabilizirani čelik, te visok sadržaj δ ferita pojačavaju izlučivanje σ faze. Sadržaj dušika djeluje slično kao i ugljik.

c) Noževa korozija (engl. knife line corrosion; njem. Messerlinien Korrosion) stabiliziranih čelika nakon zagrijavanja u području 500-700 °C (napr. pri toplinskoj obradi).

Kod zavarivanja stabiliziranih Ti i Nb čelika u ZUT, napr. kod zavarivanja u više prolaza, dolazi do ponovnog otapanja ugljika u krutini, koji je bio vezan s Ti i Nb u karbide. Do korozije će doći samo ponovnim zagrijavanjem na 500-700 °C. Korozijski napad se javlja u uskom području ZUT, koje je bilo zagrijano iznad 1300 °C. U toj uskoj zoni se raspada Nb ili Ti karbid. Pri brzom hlađenju (brzom prolasku kroz područje 450-850 ili uže 500-700 ili još uže 550-650°C) samo će se možda mali dio karbida NbC ili TiC ponovo stvoriti, a ostatak Nb, Ti i C ostaje otopljen u krutini.

Ponovnim zagrijavanjem 500-700 °C zone koja je prethodno bila zagrijana na 1300 °C izlučivat će se M₂₃C₆ kromom bogati karbid, koji će uzrokovati interkristalnu koroziju u obliku linije - uske zone, pa se zato naziva "noževa korozija", koja ima oblik oštire linije nastale rezom

noža. Uska zona ($> 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$) se javlja neposredno uz granicu taljenja u ZUT ili u ZT kod više prolaza u ZUT jednog prolaza, koji djeluje na drugi prolaz, koji je ranije položen.

Pojava interkristalne noževe korozije je moguća samo na Nb ili Ti stabiliziranim čelicima. Izbjeći se može, smanjivanjem $C < 0,04\%$ uz istovremeno stabiliziranje više nego je stehiometrijski potrebno ($\text{Ti} = 8 \cdot C$, $\text{Nb} = 15 \cdot C$). Ako je DM otporan na noževu koroziju, a OM nije, može doći do noževe korozije u ZUT - na osnovnom materijalu.

d) **Vruće pukotine**

Ovisno o kemijskom sastavu, a prema Schaefflerovom dijagramu možemo u depozitu austenitne Cr - Ni elektrode postići čistu austenitnu ili austenitno - feritnu strukturu.

Preporuča se upotreba takvih austenitnih dodatnih materijala, koji daju depozit s 3 - 12% delta ferita, čime postizemo veću otpornost vrućim pukotinama. Potpuno austenitna struktura depozita je sklonija pojavi vrućih pukotina.

Vrste vrućih pukotina:

1. **Kristalizacijske pukotine** u ZT (engl. solidification cracks, njem. Erstarrungsrisse) koji nastaju pri skrućivanju ZT kada je između dendritnih kristala još prisutna rastaljena faza.
2. **Vruće pukotine** ZUT: u OM ili b) u ZT kod zavarivanja u više prolaza (engl. liquation cracks, fissures, micro cracks, njem. Aufschmelzungsrisse). U ZUT uz ZT dolazi do taljenja niskotaljivih faza izlučenih na granicama kristala. Ista pojava se može desiti u ZT pri polaganju više prolaza u donjem prolazu kada se površ njega polaže drugi prolaz.

Mehanizam nastajanja kristalizacijskih pukotina. Glavni razlog pojave kristalizacijskih pukotina je prisustvo filma niskotaljivih faza na granicama kristala pri primarnoj kristalizaciji. Kod stezanja pri hlađenju javljaju se na granici kristala mikropukotine u unutrašnjosti prolaza, koji se pri daljem hlađenju obično šire i izlaze na površinu kao makro pukotine. Širenje pukotine ovisi o stanju naprezanja i svojstvima materijala uz vrh početne pukotine.

Upetost - krutost zavarenog spoja uzrokuje vlačna reakcijska naprezanja pri stezanju, koja su veća od čvrstoće materijala pri visokim temperaturama, a istovremeno istezljivost materijala može jako padati (temperaturno područje krhkosti, interval krhkosti, engl. brittle range).

- e) **Pukotine zbog korozije uz naprezanje** se mogu javiti u eksploataciji, ako su prisutni agresivni mediji. Za austenitne čelike su kloridi najopasniji, pa treba držati sadržaj Cl što niže. Već nekoliko ppm Cl na površini austenitnog čelika može dovesti do pukotina zbog korozije uz naprezanje.
- f) **Osjetljivost na prisutnost sumpora**. Sumporni spojevi ili sumporna atmosfera (u peći) pri visokim temperaturama (napr. ZUT) može uzrokovati stvaranje nikl sulfida Ni_3S_2 , eutektika koja uzrokuje vruće pukotine. Treba čistiti površine prije zavarivanja ili toplinske obrade od materijala koje sadrže S.

Postupci spajanja i rezanja

Obzirom na zavarljivost zavarivanje je moguće svim važnijim postupcima. Dodatni materijali se izabiru tako da po sastavu odgovaraju OM.

Za MIG zavarivanje se koristi Ar 99,95%, Ar + (1 - 3)% O_2 , ili Ar + (1 - 3)% CO_2 ili Ar + (15 + 25)% CO_2 . Time se postiže mirniji - stabilniji električni luk uz manje prskanje kapljica metala, što daje bolju kvalitetu zavara. Lemljenje se uspješno primjenjuje za ove čelike. Termička rezanja kisikom normalno nisu moguća, ali uz pomoć željeznog praha moguće je rezanje kisikom. Bolje je rezanje plazmom ili laserom.

Čišćenje površine je važno za kvalitetu zavarenog spoja i provodi se:

1. Četke (obične ili rotirajuće) od nerđajućeg austenitnog čelika.
2. Pjeskarenje s čistim pijeskom. Ne treba koristiti isti pijesak kojim je čišćen nelegirani čelik, jer sadrži čestice ovog čelika.
3. Pri obradi odvajanjem čestica ili brušenjem alat ne mora biti od nerđajućeg austenitnog čelika. Sredstvo za hlađenje ne smije sadržavati klor.
4. Kemijsko čišćenje - nagrizanje se preporučuje u 10-20% HNO_3 , a posebno nakon toplinskih operacija.

Odmašćivanje OM i DM prije zavarivanja je neophodno kao i odstranjivanje čestica i tragova od premaza i oznaka bojama i markerima. Posebno su opasni halogeni elementi Cl, F, zatim S i niskotaljive legure (Bi, Pb) i metali zbog moguće pojave pukotina i korozije uz naprezanje.

ZAVARIVANJE RAZNORODNIH MATERIJALA

Općenito. Spajanje raznorodnih materijala je s metalurgijskog stajališta teže od spajanja istorodnih materijala. Napr. kako ostvariti spoj čelik - aluminij ili staklo - aluminij.

Spojevi raznorodnih čelika se javljaju u tri slučaja:

- a) Zavarivanje različitih vrsta čelika, kada se ZT razlikuje od bar jednog materijala, ako ne i od oba.
- b) Navarivanje nelegiranog ili niskolegiranog čelika zaštitnim slojem nerđajućeg čelika ili navarivanje tvrdih slojeva specijalnim legurama se ne razmatra.
- c) Zavarivanje istorodnih OM uz primjenu DM drugog sastava. Napr. zavarivanje niskolegiranih materijala austenitnim elektrodama, koje daju žilavu i meku ZT. Ovakav slučaj se javlja napr. kod zavarivanja pancirnih limova.

U ovom poglavlju će se razmatrati samo jednostavniji slučajevi zavarivanja i navarivanja (platiranja) različitih čelika. Vrlo je čest slučaj zavarivanja ili navarivanja austenitnog CrNi čelika sa običnim konstrukcijskim ili niskolegiranim čelikom, pa se ovakav primjer obrađuje u ovom poglavlju. Općenito je važno odrediti principe kako izvršiti izbor uvjeta zavarivanja dva različita čelika M1 i M2:

1. **Koji DM izabrati?** Da li izabrati sastav DM za M1, M2 ili neki srednji kemijski sastav? Za nelegirane, niskolegirane i srednje legirane čelike biramo bolje zavarljivi (niže legirani). Za spoj visokolegiranog s nekim drugim manje legiranim ili nelegiranim čelikom treba koristiti visokolegirani DM (napr. 25/20, ako je spoj između 18/8 i nelegiranog), jer će miješanjem doći do krhke martenzitne ZT miješanjem 18/8 i nelegiranog čelika.
2. Predgrijavanje i temperatura između prolaza moraju odgovarati zahtjevima ZUT M1, ZUT M2 i ZT. Možda će biti potrebno zahtijevati različite temperature za M1 i M2 materijale odnosno za strane spoja.
3. Režim zavarivanja i toplinski input se moraju kompromisno izabrati.
4. Toplinska obrada se mora kompromisno izabrati.

Zavarivanje austenitnog CrNi nerđajućeg čelika s drugim čelicima.

Uvjeti eksploatacije, izbor sastava DM, parametri zavarivanja i mješanje OM i DM su važne veličine za kvalitetu zavarenog spoja austenitnih čelika s drugim čelicima. Navode se neki važniji problemi.

Migracija ugljika Zavareni spojevi različitih oblika mogu biti skloni migraciji ugljika, ako je spoj izložen visokim temperaturama pri naknadnoj toplinskoj obradi ili u eksploataciji. Ugljik migrira kada postoji razlika u sadržaju elemenata tvorca karbida: Cr, Mo, Nb i drugih. Tako napr. kada je zavareni spoj izložen dovoljno vremena visokim temperaturama, ugljik će migrirati iz materijala s nižim sadržajem Cr u materijal s višim sadržajem Cr. Ako je razlika u sadržaju Cr, Mo, Nb i drugih karbidotvoraca dovoljno visoka, C će čak prelaziti iz materijala s nižim sadržajem C u materijal s višim sadržajem C. Budući da se najčešće spaja nelegirani ili niskolegirani čelik sa oko 0.15 C s visokolegiranim CrNi čelikom, koji sadrži oko 0.08 C to će i razlika koncentracije C pored razlike u koncentraciji legiranih elemenata pospješiti migraciju ugljika u CrNi čelik.

Migracija ugljika uzrokuje razugljičenje zone uz granicu taljenja u materijalu s nižim sadržajem Cr i/ili višim sadržajem C. Širina te zone i količina migriranog C ovisit će o razlici legiranih elemenata (najčešće Cr), C, temperaturi i vremenu kojem je bio izložen.

U zoni osiromašenoj ugljikom čvrstoća će biti manja, a u zoni obogaćenoj ugljikom će doći do stvaranja karbida, povećanja čvrstoće i smanjenja istezljivosti.

Termička naprezanja nastaju zbog razlike u koeficijentima linearnog istezanja na mjestu spoja feritnog i austenitnog materijala ($\alpha_{\text{aust}} = 1.5 \cdot \alpha_{\text{ferit}}$). Ova naprezanja mogu dovesti do pojave pukotina, ako dolazi do višekratnih temperaturnih promjena.

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot T$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \cdot \Delta T = \epsilon$$

$$\sigma = \epsilon \cdot E = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \dots\dots\dots \text{pojednostavljen prikaz za jednoosno stanje naprezanja.}$$

Pri temperaturnim promjenama dolazi i do pukotina, obično u zoni nelegiranog ili niskolegiranog materijala, pri visokim temperaturama. Da bismo smanjili temperaturna naprezanja treba koristiti za spajanje visokolegiranog i nelegiranog ili niskolegiranog čelika elektrode na bazi nikla (monel), koji daju depozit s koeficijentom linearnog istezanja bliskim feritnom čeliku.

Krhkost navarenog sloja austenitnog čelika. Depozit austenitnog čelika treba posjedovati veliku istezljivost s 30-50%; obično više od 40%. Struktura mu je austenitno - feritna s 3-12% delta ferita. U strukturi se zahtijeva nešto delta ferita da bi se povećala otpornost pojavi vrućih pukotina.

U nekim uvjetima može doći do povećanja krhkosti i pojave pukotina u navarenom sloju, koje se mogu širiti i u osnovni materijal.

Pojava nepoželjne krhkosti može biti uzrokovana:

- Izborom neodgovarajućeg dodatnog materijala
- Tehnologijom navarivanja (jednoslojno, višeslojno, miješanjem osnovnog i dodatnog materijala, ...)
- Režimima navarivanja (toplinski input, predgrijavanje, ...)
- Kasnijim plastičnim deformiranjem
- Naknadnom toplinskom obradom
- Uvjetima eksploatacije (temperatura, vrijeme, naprezanja, medij).

Utjecaj pojedinih faktora je povezan, pa treba pri izboru dodatnog materijala odlučivati ovisno o iznosu miješanja osnovnog i dodatnog materijala, toplinskoj obradi i o uvjetima eksploatacije.

Ako se vrši naknadna toplinska obrada, tada u strukturi ne bi trebalo biti više od 5% ferita.

Režimi zavarivanja utječu na izgaranje i dolegiranje alfa i gama elemenata pa tako i režimi utječu na sadržaj ferita.

Dolegiranje u kupki rastaljenog metala iz obloge elektrode, praha ili iz OM i izgaranje pojedinih elemenata u električnom luku ovisno je o naponu i struji zavarivanja. Rezultat možemo vektorski izračunati i ucrtati u Schaefflerov dijagram.

Miješanje OM i DM. Pri ručnom elektrolučnom zavarivanju se miješanje kreće 30-40%, kod EPP navarivanja trakom oko 5-20%. Preporučuje se početak navarivanja s jače legiranim dodatnim materijalom 24Cr12Ni (AISI 309), a ostali slojevi su tipa 18Cr8Ni (AISI 347 ili sličan). Jače legirani dodatni materijal i kod jačeg miješanja s OM daje zonu taljenja sastava austenit + ferit, prema Schaefflerovom dijagramu. Ako bismo odmah započeli navarivati s 18Cr8Ni, tada bismo u strukturi dobili, ovisno o stupnju miješanja više ili manje martenzita, što je nepovoljno.

Zavarivanje platiranih materijala. Platiranje nelegiranih i mikrolegiranih konstrukcijskih čelika slojem plemenitijeg materijala vrši se sa svrhom postizanja antikorozijskog sloja, npr. na unutrašnjoj površini posude.

Tanki platirani sloj 3-7 mm se zavaruje na deblji osnovni materijal toplim valjanjem (kovačko zavarivanje), zavarivanjem eksplozijom ili se navaruje pod prahom trakom širine 60 mm ili više.

Platirani sloj može biti od CrNi, Cr nerđajućeg čelika, Ni - legura, Cu - legura i drugih materijala.

Zavarivanjem platiranih materijala se mora postići:

- a) homogenost i kontinuitet platiranog sloja
- b) antikorozivnost
- c) mehanička svojstva moraju biti zadovoljavajuća i za osnovni materijal i za platirani sloj

Pri zavarivanju ili navarivanju raznorodnih materijala kakovi su i platirani čelici javljaju se problemi:

a) Različita fizikalna svojstva:

- temperatura tališta
- koeficijent linearnog toplinskog istezanja (termička naprezanja)
- koeficijent vođenja topline
- granica razvlačenja i razina naprezanja.

b) Različita struktura i različita svojstva uključivo moguća krhkost.

Pri izboru postupaka zavarivanja važan je iznos miješanja osnovnog materijala u ZT, kao i izbor sastava dodatnog materijala.

$$M = \frac{A_{OM}}{A_{OM} + A_{DM}} \cdot 100 \%,$$

Uz pomoć Schaeffler-ovog dijagrama, za slučaj visokolegiranih čelika, određuje se najpovoljnija struktura depozita.

Izbor dodatnog materijala mora odgovarati:

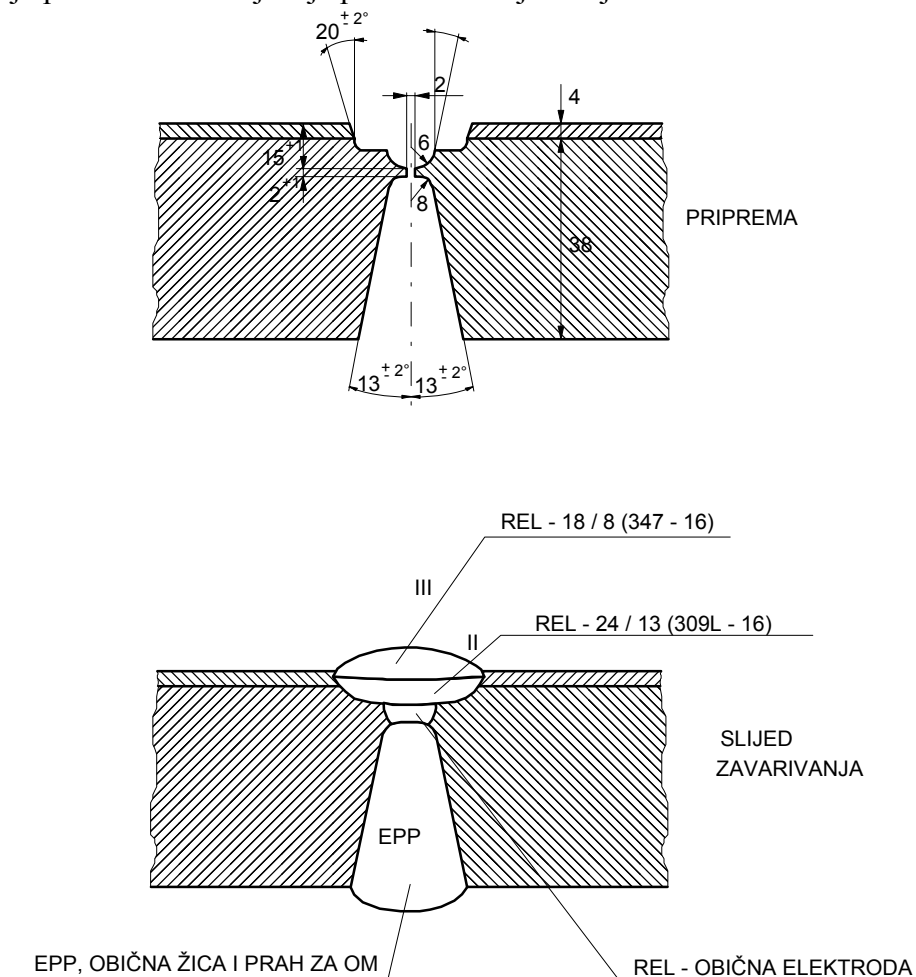
- mehaničkim svojstvima OM, za dio OM, te
- korozijskim svojstvima antikorozivnog platiranog sloja

Kada je DM čvršći, tada će pri visokim temperaturama ZT biti čvršća, javit će se visoka zaostala naprezanja u ZUT i ZT. Ako nema istežljivosti može doći do pukotina u ZT, koje se mogu širiti i u ZUT.

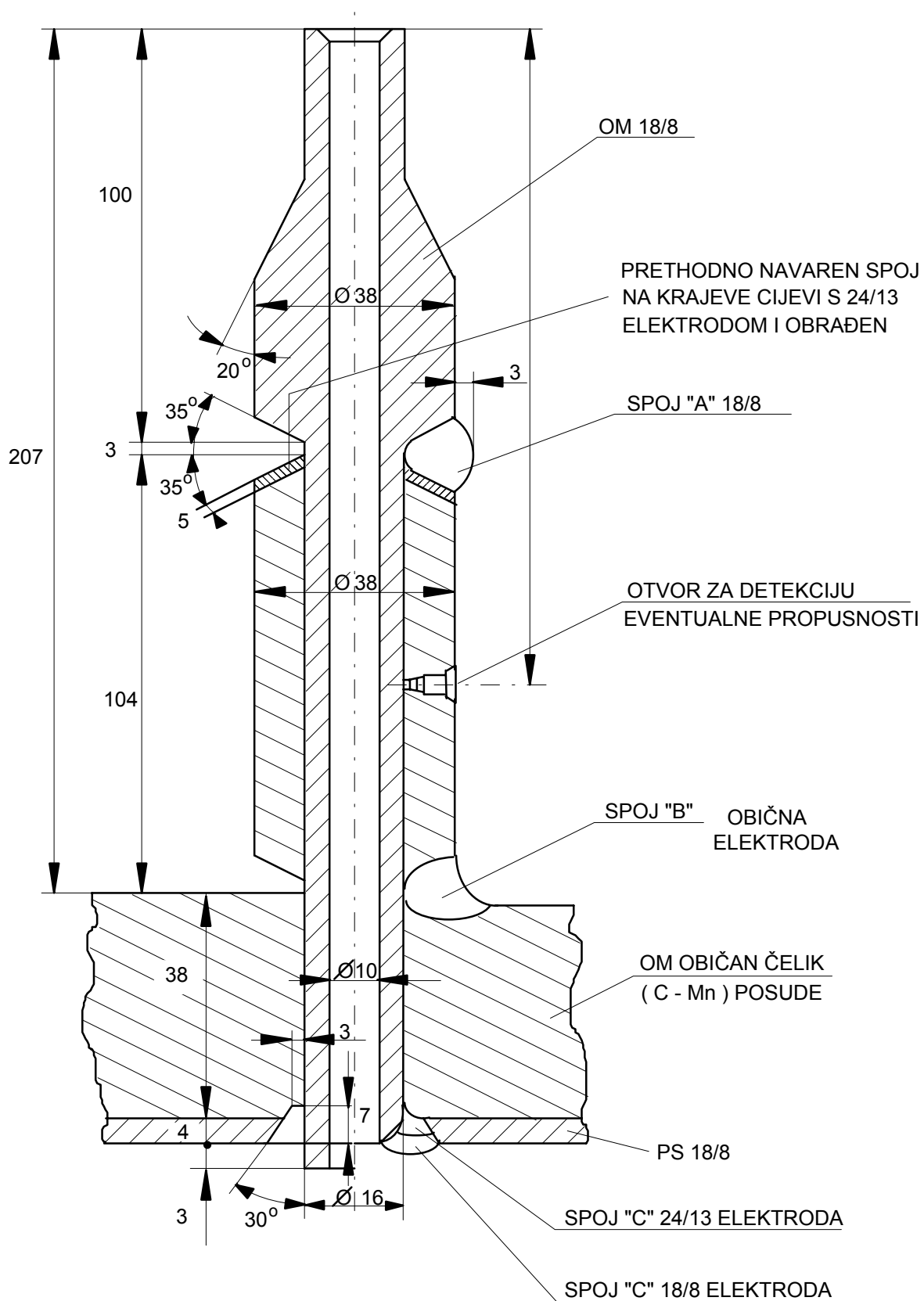
Priprema spoja i slijed zavarivanja

1. Ne zavarivati s nelegiranim ili niskolegiranim DM na platiranom visokolegiranom čeliku, jer će doći do pojave krhke martenzitne strukture u depozitu zbog velikog učešća OM u depozitu.
2. Položaj zavarivanja, po mogućnosti, treba biti "odozgo".
3. Ako je zavar pristupačan sa obje strane, tada treba izabrati oblik 1 i 2, a ako je pristupačan samo s jedne strane (napr. kao kod cijevi), tada se priprema izvodi s vanjske strane, sl. 3 i 4. Dodatni materijal tada mora odgovarati platiranom sloju ili biti još jače legiran (24Cr13Ni).
4. Preporuča se, između osnovnog materijala i završnog nerđajućeg sloja, položiti jedan tanki sloj za odvajanje s 24Cr 13Ni DM. Ovaj će sloj, prema Schaeffler dijagramu, biti udaljeniji po strukturi od zone krhkog i pukotinama sklonog martenzita. Na taj sloj se nanosi 18/8 antikorozivni sloj.

Slijed zavarivanja platiranih materijala je prikazan na sljedećoj slici:



Primjeri pripreme za zavarivanje platiranih limova i priključaka na posude prikazani su na sljedećoj slici:

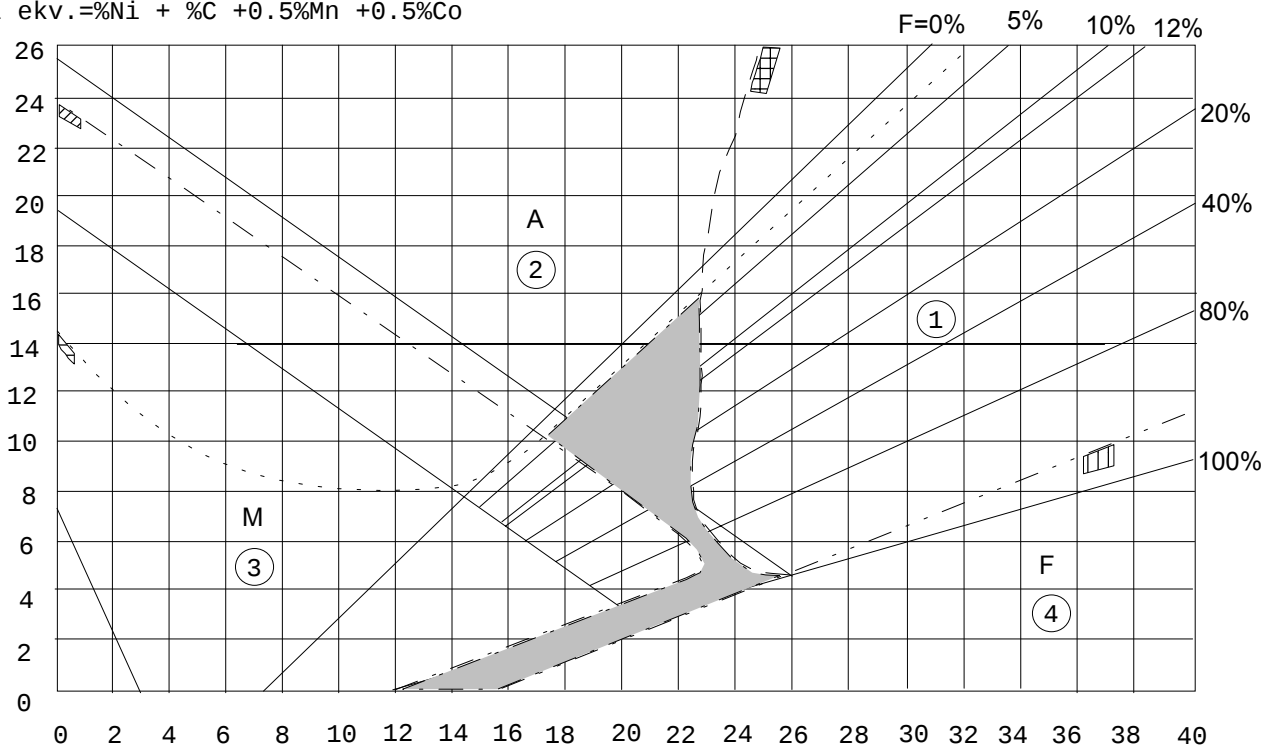


Zavarivanje kontrolnog cijevnog priključka na posudu

Schaeffler dijagram

Općenito možemo reći da se Schaeffler dijagram koristi za određivanje strukture visokolegiranih čelika koji se brzo hlade, a takav slučaj imamo pri zavarivanju.

$$Ni\text{ ekv.} = \%Ni + \%C + 0.5\%Mn + 0.5\%Co$$



$$Cr\text{ ekv.} = \%Cr + 1.5\%Si + \%Mo + 0.5\%(Ta+Nb) + 2\%Ti + \%W + \%V + \%Al$$

- Područje povećane krhkosti poslije toplinske obrade na 500 - 900 °C.
- Područje povećane sklonosti toplim pukotina.
- Područje povećane sklonosti hladnim pukotinama u martenzitu. Neophodno predgrijavanje.
- Ukрупnjavanje zrna iznad 1100°C. Mala radnja loma na sobnoj temperaturi.
- Područje dobre zavarljivosti.

Kod zavarivanja ili navarivanja raznorodnih čelika bitno različitog sastava napr. nelegiranog ili niskolegiranog čelika s visokolegiranim feritnim (Cr) čelikom ili sa auzenitnim (Cr Ni) čelikom koristimo Schaefflerov dijagram, koji daje strukturu depozita odnosno zone taljenja - ZT pri zavarivanju. Za depozit se pretpostavlja relativno brzo ohlađivanje, pa ovaj dijagram ne treba koristiti za osnovni materijal ili za zavarivanje s vrlo sporim hlađenjem.

Ako se osnovni materijal dobiva u gašenom stanju (brzo hlađenje od 1050-1100 °C) tada se može primjeniti Schaeffler dijagram i za ocjenu strukture takvog osnovnog materijala napr. auzenitni Cr Ni čelik.

Struktura depozita se određuje na temelju kemijskog sastava, koji se izračava ekvivalentom Cr, Cr_E - os apcisa za alifagene elemente i ekvivalentom Ni, Ni_E - os ordinata za gamagene elemente.

Dijagramom se određuje sastav strukture depozita:

- auzenit A
- martenzit M
- ferit F
- kombinacije A + F; A + M; A + M + F; F + M

Izbor DM, stupnja miješanja i ostalih navedenih pridruženih uvjeta zavarivanja treba, po mogućnosti da bude u području izvan nepovoljnih pojava.

Delong je modificirao ekvivalent Ni unoseći utjecaj dušika ($30 \cdot N$) i mjereći sadržaj delta ferita feritnim brojem FN (Ferrite Number).

Bystram je ucrtao u Schaefflerov dijagram linije odnosno područja mogućih opasnih pojava kao što su:

- izlučivanje sigma faze, odnosno povećanje krhkosti (500-800 °C)
- pojava vrućih pukotina (> 1250 °C)
- pogubljenje zrna (> 1100 °C)
- zakaljivanje i hladne pukotine (< 400 °C).

Ove nepovoljne pojave ovise o koordinatama, odnosno o sastavu čelika, pa nam pored strukture daju podatke za izbor uvjeta zavarivanja: načina i postupka (režima) zavarivanja, oblika žlijeba, dodatnog materijala, stupnja miješanja osnovnog i dodatnog materijala i slijeda zavarivanja.

Određivanje kemijskog sastava ZT visokolegiranog austenitnog čelika i nelegiranog čelika

Kod zavarenih spojeva, ZT treba, ako je moguće, ležati u području izvan zone martenzita zbog izbjegavanja hladnih pukotina i krhkosti, ali izvan zone 100% austenita, gdje postoji mogućnost pojave vrućih pukotina. Zbog izbjegavanja vrućih pukotina preporuča se sadržaj delta ferita 3-10% ili neki propisi zahtijevaju 5-12% (ASME).

U slučaju kada će proizvod u eksploataciji raditi na temperaturi iznad 500 °C, treba težiti da je sadržaj delta ferita najviše 5%, jer se iz delta ferita izlučuje krhka faza, a također i krhki karbidi. I duga toplinska obrada zavarenih spojeva može uzrokovati povećanje krhkosti iz istih razloga.

Određivanje iznosa osnovnog i dodatnog materijala u ZT, odnosno stupnja miješanja OM i DM u ZT.

$$a = \frac{A_{M1}}{A_{ZT}} \cdot 100\% \quad \text{iznos pretaljenog osnovnog materijala M1 u ZT.}$$

$$b = \frac{A_{M2}}{A_{ZT}} \cdot 100\% \quad \text{iznos rastaljenog osnovnog materijala M2 u ZT.}$$

$$c = \frac{A_{DM}}{A_{ZT}} \cdot 100\% \quad \text{iznos istaljenog dodatnog materijala u ZT.}$$

$$A_{ZT} = A_{M1} + A_{M2} + A_{DM} \dots \text{površina presjeka ZT.}$$

Za slučaj zavarivanja istorodnih materijala ili kod navarivanja $M1 = M2$, bit će iznos osnovnog materijala u ZT (stupanj miješanja - dilucije "d"):

$$d = \frac{A_{M1} + A_{M2}}{A_{ZT}} \quad \text{kod spajanja dva raznorodna materijala ili}$$

$$d = \frac{A_M}{A_{ZT}} \quad \text{kod navarivanja.}$$

Određivanja sastava ZT odnosno položaja ZT u dijagramu:

$$x = \frac{a}{a+b}, \quad y = \frac{b}{a+b}; \quad x+y=100\%$$

$$u = \frac{A_{DM}}{A_{ZT}} = c$$

$$z = \frac{a+b}{a+b+c} = \frac{A_{M1} + A_{M2}}{A_{ZT}}; \quad z+u=100\%$$

Za slučaj jednoprolaznog navarivanja u dijagramu zamjenjujemo $M1$ s M , a umjesto $M2$ stavljamo DM , pa će položaj ZT biti određen sa izrazima:

$$x = \frac{A_M}{A_M + A_D} = \frac{A_M}{A_{ZT}}; \quad y = \frac{A_{DM}}{A_{ZT}}; \quad x+y=100\%$$

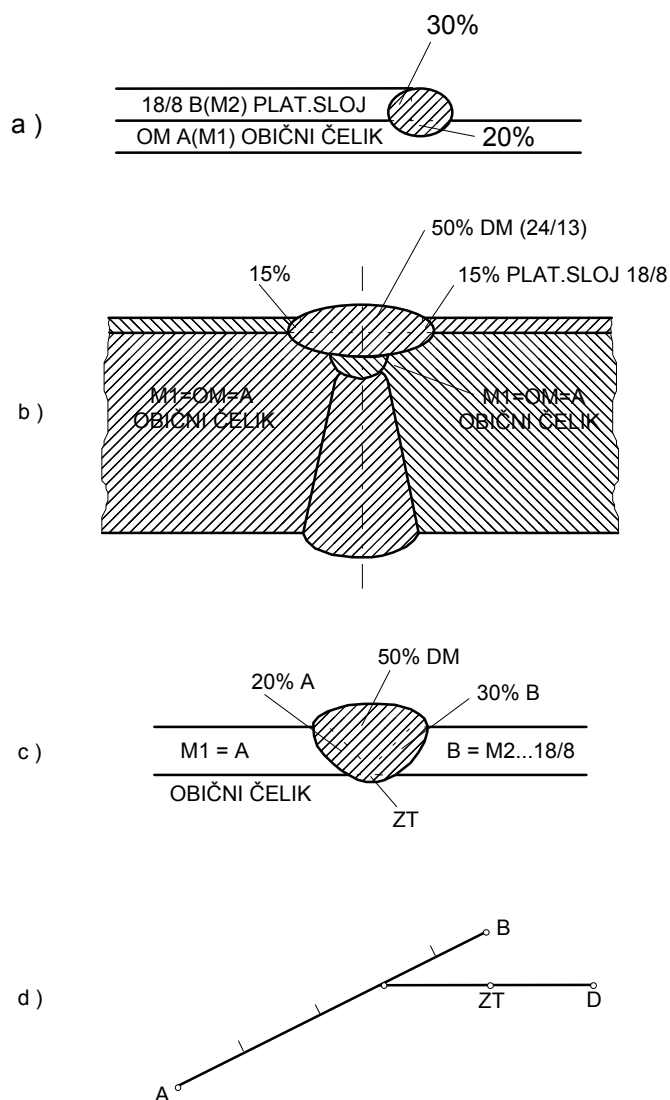
Ako zavarujemo spoj M1 i M2 bez dodatnog materijala, samo pretaljujemo osnovni materijal, tada ćemo odrediti kemijski sastav mješavine i položaj ZT (točka T) na način kako je na slici prikazano s odnosima x i y.

Konkretni primjer spajanja raznorodnih materijala kada nije jednako učešće u ZT materijala M1 i M2 se daje u navedenom tekstu vezano uz sliku 13.6. Na slici 13.7 i navedenom tekstu dano je uputstvo za računanje sadržaja kemijskih elemenata ZT.

Na slici 13.8 dana su tri primjera zavarivanja raznorodnih čelika kod kojih je učešće rastaljenih osnovnih materijala M1 i M2 jednako (50% M1 i 50% M2).

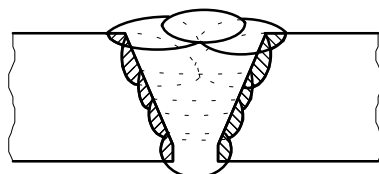
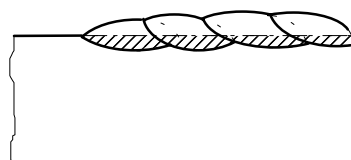
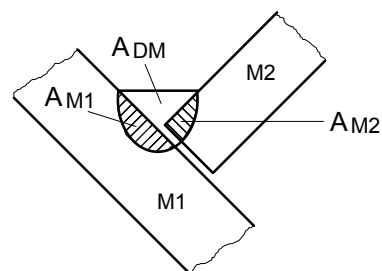
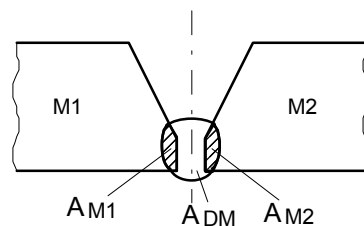
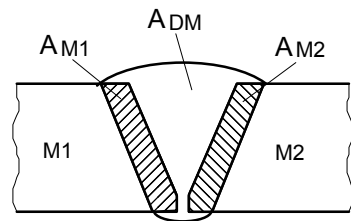
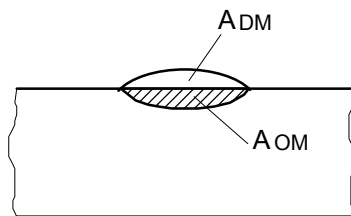
$$\frac{A_{OM}}{A_{ZT}} = 0,2; \quad \frac{A_{p1a}}{A_{ZT}} = 0,3; \quad \frac{A_{DM}}{A_{ZT}} = 0,5$$

A	Nelegirani OM	CrE= 0,3 NiE
B	Platirani OM	CrE= 18,0 NiE= 13,8
D	DM	CrE= 26,0 NiE= 15,6
ZT	ZT	CrE= 18,5 NiE= 12,5



Primjer spajanja raznorodnih materijala kada nije jednako učešće M1 i M2 u ZT.

- Kutni spoj između raznorodnih materijala.
- Sučeonni spoj platiranih limova.
- Sučeonni spoj između raznorodnih materijala.
- Shematski prikaz položaja koordinata u Schaeffler dijagramu.



Zavarivanje u jednom prolazu

$$A_{ZT} = A_{M1} + A_{M2} + A_{DM}$$

Zavarivanje korijenskog zavora

Zavarivanje kutnog zavora u jednom prolazu

Navarivanje jednog sloja iz više prolaza

Zavarivanje u više prolaza

Mješanje osnovnog i dodatnog materijala u zoni taljenja.

Kemijski sastav pojedinog prolaza ili navara se računa:

$$S = (1 - U_{OM}) \cdot S_{DM} + U_{OM} \cdot S_{OM}, \quad \%$$

Npr. u OM se nalazi $S_{OM} = 1 \text{ Cr}$, a

u DM (čisti depozit) se nalazi $S_{DM} = 18 \text{ Cr}$,

$$\text{Udio OM u ZT } U_{OM} = 0,30$$

Sadržaj Cr ZT navarenog prolaza:

$$S = (1 - 0,3) \cdot 18 + 0,30 \cdot 1,00$$

$$S = 12,6 + 0,30 = 12,9 \text{ Cr}$$

Sastav ZT s dva različita OM (M1 i M2), te DM:

$$S = U_{DM} \cdot S_{DM} + U_{M1} \cdot S_{M1} + U_{M2} \cdot S_{M2}$$

Primjer: Određivanje sadržaja kemijskih elemenata

Odredite sadržaj kemijskih elemenata u jednom prolazu pri zavarivanju niskolegiranog čelika, ako je udio OM u zoni taljenja jednog prolaza 20%.

Zadan je slijedeći sadržaj kemijskih elemenata čelika (OM):

$$C = 0,15 \%$$

$$Si = 0,25 \%$$

$$Mn = 0,55 \%$$

$$P_{\max} = 0,035 \%$$

$$S_{\max} = 0,03 \%$$

$$Mo = 0,45 \%$$

Za zavarivanje se koristi elektroda sa slijedećim sadržajem kemijskih elemenata:

$$C = 0,05 \%$$

$$Mo = 3,00 \%$$

$$Cr = 22,0 \%$$

$$Ni = 12,0 \%$$

Rješenje:

$$S = (1 - U_{OM}) S_{DM} + U_{OM} S_{OM}$$

$$S_C = (1 - 0,2) 0,05 + 0,2 \cdot 0,15 = 0,07 \%$$

$$S_{Si} = (1 - 0,2) 0 + 0,2 \cdot 0,25 = 0,05 \%$$

$$S_{Mn} = (1 - 0,2) 0 + 0,2 \cdot 0,55 = 0,11 \%$$

$$S_P = (1 - 0,2) 0 + 0,2 \cdot 0,035 = 0,007 \%$$

$$S_S = (1 - 0,2) 0 + 0,2 \cdot 0,03 = 0,006 \%$$

$$S_{Mo} = (1 - 0,2) 3 + 0,2 \cdot 0,45 = 3,3 \%$$

$$S_{Cr} = (1 - 0,2) 22 + 0,2 \cdot 0 = 17,6 \%$$

$$S_{Ni} = (1 - 0,2) 12 + 0,2 \cdot 0 = 9,6 \%$$