

NEKE OSOBINE KLJUČNE ZA POUZDANU EKSPLOATACIJU TOPLOTNO POSTOJANOG ČELIKA KLASE 1.25Cr1Mo0.3V

Gordana Bakić, Vera Šijački Žeravčić, Miloš Đukić, Bratislav Rajičić, Biljana Anđelić*

*Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd
Tehnički fakultet Čačak Univerziteta u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak**

Apstrakt: Klasa čelika 1.25Cr1Mo0.3V se već dugo koristi za izradu elemenata TE postrojenja izloženih povišenoj temperaturi i unutrašnjem pritisku, tako da je i na našim postrojenjima već dugo u upotrebi. Ovaj čelik je mnogo bolje poznat kao: 15H1M1F (GOST), kao livena verzija 15H1M1FL (GOST), zatim livena verzija razvijena na zapadnom tržištu G17CrMoV510 (DIN EN) i relativno nova verzija od koje se izrađuju valjani proizvodi pod oznakom 15CrMoV510 (VdTUV). Iako je ruska varijanta ovog čelika dobro poznata i sa aspekta osobina i sa aspekta ponašanja u eksploataciji, zapadna varijanta pod oznakom 15CrMoV510 se praktično tretira kao potpuno nov materijal kod kojeg nije jasno pre svega njegovo ponašanje u eksploataciji, pa čak ni neke njegove osnovne karakteristike. S obzirom da se danas čelik 15CrMoV510 intenzivno ugrađuje u naš termoenergetski sistem u procesu revitalizacije parovoda, u ovom radu je dat pregled najznačajnijih karakteristika čelika ove klase. Određene osobine čelika 1.25Cr1Mo0.3V determinišu njegovo ponašanje u uslovima eksploatacije, a one mogu da imaju prihvatljive i neprihvatljive varijacije, koje se javljaju tokom njegove fabrikacije. U ovom radu je stavljen poseban akcenat na korelaciju ključnih osobina i eksploatacione upotrebljivosti, kako za osnovni materijal tako i za zavarene spojeve.

Ključne reči: čelik 1.25Cr1Mo0.3V, parovodi TE postrojenja, radni vek

1.25Cr1Mo0.3V STEEL PROPERTIES RESPONSIBLE FOR RELIABLE HIGH TEMPERATURE APPLICATION

Gordana Bakić, Vera Šijački Žeravčić, Miloš Đukić, Bratislav Rajičić, Biljana Anđelić*

*Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade
Technical Faculty Čačak, University of Kragujevac, Svetog Save 65, 32000 Čačak**

Abstract: 1.25Cr1Mo0.3V steel grade has long been used to produce the thermal power plants (TPP) equipment exposed to elevated temperature and internal pressure, therefore it was also used for a long time in domestic TPP. This steel is better known as: 15H1M1F (GOST), cast steel variant 15H1M1FL (GOST), cast steel developed for western markets G17CrMoV510 (DIN EN) and a relatively new version of which is rolled products produced, under the label 15CrMoV510 (VdTUV). Although the Russian variant of this steel is well known in terms of properties and exploitation behavior, western variant, under the designation 15CrMoV510, was practically treated as an entirely new material and its basic characteristics and exploitation behavior were not clearly defined. Given that today's, 15CrMoV510 steel was extensively used in domestic TPP in the process of revitalization of the steam pipeline, this paper provides an overview of the most important characteristics of this class of steel. Certain properties of the 1.25Cr1Mo0.3V steel determine its behavior in service, and it can have acceptable and unacceptable variations that occur during its fabrication. In this paper, special emphasis is placed on the correlation between key properties and service behavior for both the base material and the welded joints.

Key words: 1.25Cr1Mo0.3V steel, thermal power plant, steam pipeline, lifetime

1. UVOD

Tokom razvoja toplotnopoostojanih čelika između klase niskolegiranih i nove generacije visokolegiranih toplotno postojanih čelika sa 9-12%Cr, a nakon suštinskog izbacivanja iz proizvodnje čelika 14MoV63 kod koga su ustanovljeni problemi tokom dugotrajne eksploatacije, ostalo je „upražnjeno“ mesto koje je trebalo popuniti čelikom koji je po ceni u rangu sa 14MoV63 a po svojim karakteristikama pouzdan i stabilan u radu, u dužem vremenskom periodu. Prvi čelik klase ispod čelika 14MoV63 je čelik 10CrMo910, međutim, iako je pokazao vrlo dobre osobine u dugom vremenskom periodu i našao uspešnu primenu za izradu komponenti termoenergetskih (TE) postrojenja, nije mogao da bude adekvatna zamena čeliku 14MoV63 za komponente koje rade na temperaturama preko 530°C zbog znatno nižih vrednosti vremenskih čvrstoća [1-2].

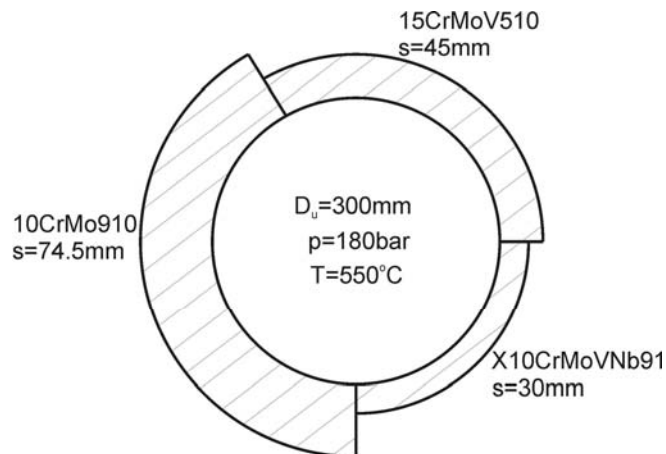
S druge strane, već je bilo zapaženo u Evropi da se određeni čelici sa ruskog tržišta, koji po svom hemijskom sastavu nemaju pandan na evropskom tržištu, kao što su čelici 12H1MF (i 15H1M1F, kao i livena varijanta 15H1M1F sa oznakom 15H1M1FL, koriste pouzdano tokom vrlo dugih vremena eksploatacije koja su prelazila 250000h [3,4]. Za ove čelike je bilo značajno da se po sadržaju hroma (Cr), i odnosu Cr:Mo:V razlikuju od svih čelika razvijenih na zapadu [5] izuzev u slučaju jednog – praktično isto toliko dugo i sa istim uspehom, prvo na Nemačkom, a kasnije i na tržištu cele Evrope u upotrebi je čelični liv G17CrMoV510 (DIN/EN) (1,25Cr1Mo0,3V) koji je razvijen za rad na povišenim temperaturama i našao je primenu uglavnom za izradu kućišta turbina i armature. Međutim, mora se istaći da i pored sličnosti navedenih klasa proizvoda i vrlo sličnih mehanizama koji im daju toplotnu postojanost, liveni i valjani proizvodi nikako ne mogu da imaju iste mehaničke osobine, od kojih treba istaći kao najznačajnije zatezne osobine na sobnoj temperaturi i vremensku čvrstoću i čvrstoću na puzanje.

Tako se praktično odustalo od dalje masovne upotrebe čelika 14MoV63, i na zapadnom tržištu je započeo razvoj čelika, a ubrzo i proizvodnja valjanih proizvoda od čelika klase 1,25Cr1Mo0,25V pod oznakom 15CrMoV510 (DIN/TUV). Prednosti uvođenja ovog čelika su bile višestruke [1]:

- ⇒ Osiguran je stabilan rad komponenti izrađenih od ovog materijala na temperaturama do 550°C i za pritiske koji odgovaraju parovodima sveže i međupregrejane pare uz relativno nisku cenu čelika;
- ⇒ Komponente izrađene od čelika 15CrMoV510 su znatno tanje od onih izrađenih od čelika 14MoV63, a posebno od onih koje su izrađene od čelika 10CrMo910;
- ⇒ Zavarljivost čelika je odlična bez sklonosti ka preranom stvaranju prslina u zoni spoja tokom dugotrajne eksploatacije kao što je to bio slučaj sa čelikom 14MoV63;
- ⇒ I u Evropi je za čelik 15CrMoV510 dokazano da može uspešno da se primenjuje u dugom periodu rada (preko 180000h [2]) zbog njegovih stabilnih vremenskih karakteristika, kako osnovnog materijala tako i zavarenih spojeva.

Uticao je vremenske čvrstoće najslabije može da se prikaže kroz razliku u minimalnoj proračunskoj debljini zida, kako je to prikazano na slici 1, koja se dobija proračunom za iste parametre rada cevovoda, sa istim unutrašnjim prečnikom, za tri materijala koji imaju različite vremenske čvrstoće - 10CrMo910, 15CrMoV510 i X10CrMoVNb91, [1].

S obzirom da se ovaj čelik i dalje uveliko proizvodi, i poslednjih godina vrlo često koristi za izradu elemenata parovoda kod nas, svi podaci o njegovom korišćenju u dugom vremenskom periodu i osobinama koje mu obezbeđuju pouzdanu dugotrajnu eksploataciju su dragoceni. Ova konstatacija se pre svega odnosi na uticaj nekih njegovih osobina na pojavu vremenskih oštećenja i mikrostrukturne degradacije tokom rada u uslovima puzanja, kao i na krajnju mogućnost njegove eksploatacije. Cilj ovog rada je da se razjasne osobine koje su od vitalnog značaja za dugotrajnu eksploataciju delova izrađenih od čelika 15CrMoV510 i dopune podaci o njegovim osobinama sa onima koje su već dugo poznati za rusku varijantu ovog čelika.



Slika 1. Minimalno potrebne debljine zida parovoda izrađenih od čelika 10CrMo910, 15CrMoV510 i P91 (X10CrMoVNb91) za iste radne parametre i unutrašnji prečnik [1]

2. ČELIK 15CrMoV510

Čelik 15CrMoV510 je po svojim osnovnim osobinama svrstan u niskouglenične niskolegirane toplotno postojane čelike sa feritno beinitnom strukturom, a prevashodnu namenu je našao za izradu delova termoenergetskih, ali i ostalih postrojenja, kada su oni izloženi temperaturama do 550°C i unutrašnjem pritisku. Njegove osobine za upotrebu u projektovanju komponenti izloženih povišenim temperaturama i unutrašnjem pritisku su regulisane kroz nekoliko normi od kojih su najviše u upotrebi:

- VdTUV 506 09.2001, u kome se napominje da se podaci za ovaj čelik mogu smatrati delom DIN 17175 standarda (standard za tehničke uslove isporuke bešavnih cevi namenjenih radu na povišenim temperaturama) i
- V&M list 417R, u kome se navodi da cevi izrađene od čelika 15CrMoV510 mogu da se isporučuju prema uslovima datim u VdTUV506, DIN 17175, EN10216-2, ruskim tehničkim normama TU 14-3-460 (TU 14-3R-55-2001) kao 15H1M1F i drugim dokumentima koja regulišu ovaj čelik (npr. ČSN koji se u potpunosti oslanja na TU 14-3-460 oznaka 15Ch1M1F).

U suštini svi ovi standardi regulišu tehničke uslove za isporuku jedne vrste proizvoda – standardi isporuke bešavnih valjanih cevi izrađenih od toplotnopoostojanih čelika.

U tabeli 1 je dat sadržaj glavnih legirajućih elemenata u hemijskom sastavu najpoznatijih čelika koji se koriste za izradu bešavnih cevi i imaju bliski interval temperatura na kojima se primenjuju. Uz svaku oznaku je navedena i generička oznaka čelika koja je od velike pomoći za raspoznavanje iste vrste čelika u različitim standardima jer se formira prema hemijskom sastavu.

Poređenjem sastava čelika (tabela 1) mogu da se uoče sličnosti ali i razlike u filozofiji legiranja koje su u krajnjem dovele do velike razlike u upotrebljivosti, nosivosti i toplotnoj stabilnosti ovih čelika čija je prevashodna namena izrada bešavnih cevi. Male razlike u hemijskom sastavu (nekada reda veličine 0,5%) kao i razlike u relativnom odnosu sadržaja hroma (Cr), molibdena (Mo) i vanadijuma (V), Cr:Mo:V, određuju mikrostrukturu čelika i to koje će karbidne faze da budu dominantno izdvojene tokom termičke obrade u procesu fabrikacije, pa samim tim ovi legirajući elementi imaju presudan uticaj na čvrstoću čelika i mogućnost njihovog stabilnog rada u dugom vremenskom periodu. Takođe, mikrostrukturna degradacija koja nastaje tokom rada i koja je praćena sekvencijalnom transformacije karbidnih faza, izrazito zavisi od legiranja, jer se faze po svojoj morfologiji, hemijskom sastavu, tendenciji ka koagulaciji i stabilnosti znatno razlikuju, a samim tim imaju i različiti doprinos u mehanizmima ojačavanja [3-5].

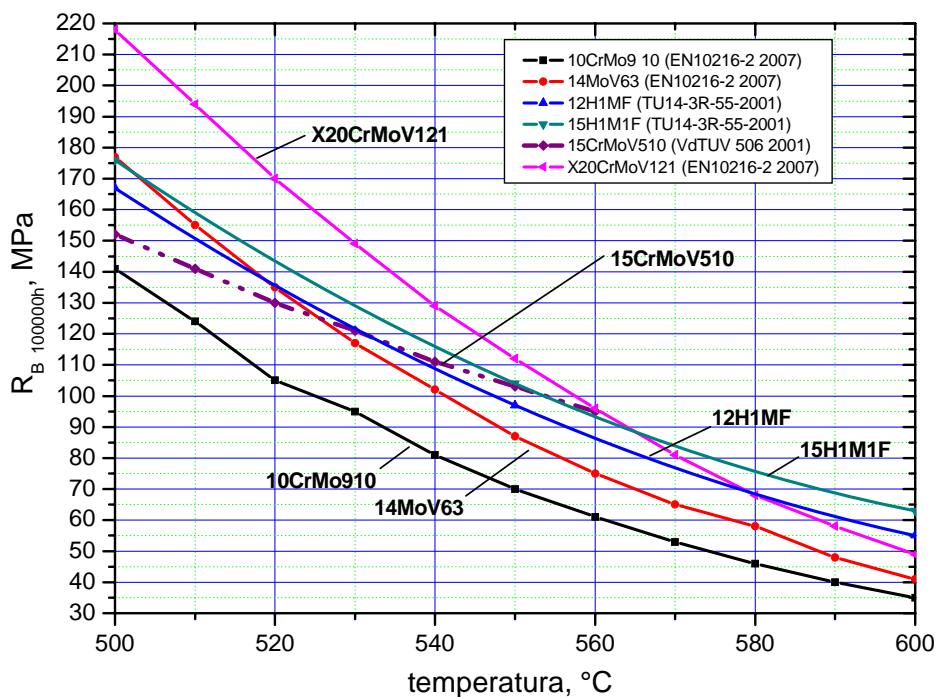
Tabela 1: Sadržaji glavnih legirajućih elemenata kod toplotnopoštojanih čelika stare generacije

Čelik (generička oznaka)	standard	Sadržaj glavnih legirajućih elemenata, %				
		C	Cr	Mo	V	Ni
10CrMo910 (2.25Cr1Mo)	EN10216-2 2007	0.08-0.14	2.0-2.5	0.9-1.1	-	-
14MoV63 (0.5Cr0.5Mo0.25V)	EN10216-2 2007	0.10-0.15	0.3-0.6	0.5-0.7	0.22-0.28	-
12H1MF (1Cr0.3Mo0.25V)	TU 14-3R-55-2001	0.10-0.15	0.9-1.2	0.25- 0.35	0.15-0.30	Max 0.25
15H1M1F (1.25Cr1Mo0.3V)	TU 14-3R-55-2001	0.10-0.15	1.1-1.4	0.9-1.1	0.20-0.35	Max 0.25
15CrMoV510 (1.25Cr1Mo0.3V)	VdTUV506 2001	0.10-0.16	1.1-1.4	0.9-1.1	0.20-0.35	max 0.25
X20CrMoV510 (12Cr1Mo0.3V)	EN10216-2 2007	0.17-0.23	10-12.5	0.8-1.2	0.25-0.35	0.30- 0.80

Najbolji primer za ovu konstataciju je čelik 14MoV63 koji se smatra neuspelom varijantom toplotno postojanog čelika, a u suštini on ima samo 0.5%Cr manje i 0.25% Mo više od vrlo uspešnog i izrazito pouzdanog ruskog čelika 12H1MF [3-5]. Isto tako, ruski čelik 15H1M1F, kome po hemijskom sastavu u potpunosti odgovara čelik 15CrMoV510, ima malo sličnosti u filozofiji legiranja sa ostalim čelicima razvijenim na zapadu sredinom dvadesetog veka. U poređenju sa čelikom 10CrMoV910 ovaj čelik ima gotovo dvostruko manje hroma u svom sastavu, ali mu dodatak od 0.3% vanadijuma (V) daje vremensku čvrstoću i stabilnost za dugotrajni rad koja je znatno viša od navedenog čelika. Interesantno je istaći da odnos molibdena i vanadijuma kod čelika 15H1M1F odgovara onom kod čelika X20CrMoV121, za koji je u praksi dokazano da je jedan od najstabilnijih i najpuzdanijih toplotnopoštojanih čelika ove generacije. S obzirom da molibden (Mo) i vandijum (V), pored toga što su karbidoobrazujući elementi, imaju presudan uticaj na ojačavanje čvrstog rastvora jer izlaze iz njega tek posle dugog vremena rada, i oni time znatno doprinose povećanju vremenske čvrstoće navedenih čelika [2-9]. Takođe, neobičan je podatak da se sa razvojem stare generacije toplotnopoštojanih čelika na zapadu (videti npr. DIN 17175) nije u isto vreme razvijao i neki čelik za izradu cevi klase 1.25Cr1Mo0.3V, s obzirom da su npr. u Nemačkoj već dugo u upotrebi čelične legure iste klase koje imaju nešto veći sadržaj ugljenika i namenjene su za izradu rotore i vijaka koji rade na povišenim temperaturama (21CrMoV57), kao i livenih delova načešće turbina (GS17CrMoV511) [2].

Na slici 2 dato je poređenje promene vremenske čvrstoće na 100000h sa temperaturom za čelike navedene u tabeli 1. Ono što može da se zapazi sa dijagrama na slici 2 je da i pored toga što su 15CrMoV510 i 15H1M1F suštinski isti čelici, njihovi podaci o vremenskim čvrstoćama se razlikuju. Razlog za ovo leži u dve činjenice:

- Čelik 15H1M1F je već jako dugo u upotrebi (šezdesetih godina prošlog veka već se masovno koristio za izradu delova koji rade na temperaturama do 565°C i pritiscima do 25.5MPa [4]), tako da za njega postoji veliki broj podataka iz realne eksploatacije, za sve dimenzije cevi koje se koriste [3,4]; npr. za vrlo velike debljine (za prečnike 377-530mm i debljine 65-90mm) vremenska čvrstoća na 500°C za 100000h je još niža od vrednosti datih za 15CrMoV510 (ovaj podatak nije unet na dijagramu jer je poseban slučaj i odnosi se samo na 500°C);
- Postoji razlika u kvalitetu fabrikacije ova dva čelika, što je poznata činjenica, tako da se u V&M listu 417R iz 2003.god navodi da čelik 15CrMoV510 odgovara niskom kvalitetu čelika 15H1M1F prema TU 14-3-460 (TU-14-3P-55-2001), što je verovatno i razlog zašto su za čelik 15CrMoV510, kao sigurnosno ograničenje, vremenske čvrstoće date samo do 550°C [VdTUV506, V&M 417R], dok se za čelik 15H1M1F ove vrednosti navode do 600°C [TU-14-3P-2001].



Slika 2. Zavisnost vremenske čvrstoće na 100000h od temperature za toplotnopoostojane čelike starije generacije

2.1 Polazna mikrostruktura čelika 1.25Cr1Mo0.3V

Pored legiranja od presudnog značaja za sve toplotno postojane čelike je i termička obrada kojoj se podvrgavaju, jer se njome postiže sa energetskeg aspekta najpovoljnija mikrostruktura koja će ostati stabilna u dugom vremenskom periodu i polagano, predvidljivo u relativno stabilnim uslovima rada, degradirati tokom vremena. Nivo osobina čelika 15CrMoV510 određen je režimom termičke obrade koja se sastoji od normalizacionog žarenja (ili kaljenja) i visokog otpuštanja. Tokom termičke obrade hrom (Cr) potpomaže uticaj molibdena (Mo) pomerajući oblasti transformacije, tako da se perlit kao mikrokonstituent dobija samo pri vrlo sporim brzinama hlađenja i to uglavno u karbidnom obliku. Pri preporučenim brzinama hlađenja završna struktura čelika 15CrMoV510 posle izvedene termičke obrade, tabela 2, sadrži 20-50% beinita, a sadržaj od 20% beinita (uprosečen sadržaj po preseku) je minimalan da bi se obezbedila njegova zadovoljavajuća svojstva. Od sadržaja beinita zavise dugotrajna svojstva čelika i posle otpuštanja. Posle visokog otpuštanja delimično se gubi igličasta usmerenost beinita, smanjuje se izduženost subzrna čime se postiže veća dugotrajna plastičnost čelika bez značajnijeg smanjenja vremenske čvrstoće. Sa povećanjem količine beinita povećavaju se toplotna postojanost i mehaničke osobine dobijene ispitivanjem na sobnoj temperaturi.

Na isti način, s obzirom na to da je po sastavu isti čelik, i nivo osobina čelika 15H1M1F je određen režimom termičke obrade, tabela 2, međutim prema literaturnim navodima [10] kod ovog čelika uobičajeno je da se termička obrada izvodi drugačije: normalizacija na 1050-1070°C i otpuštanje na 740-750°C u trajanju od 10h, u kom slučaju se kao završna struktura dobija većinski otpušteni beinit s malom količinom ferita. I ovde treba napomenuti da usporeno hlađenje sa temperature normalizacije pogoduje povećanju udela feritne faze u mikrostrukturi, pa je moguće dobiti i feritno-beinitnu strukturu sa manjom količinom beinitnog mikrokonstituenta (do 20%) koja ima nešto nižu postojanost na povišenim temperaturama. Najviše vrednosti vremenske čvrstoće i duktilnosti čelika 15H1M1F se dobijaju kada je odnos mikrokonstituenta takav da je količina feritne faze oko 30% a ostatak je beinit. Generalno, kod čelika 15H1M1F se navodi, na osnovu statistike podataka o deformacionoj sposobnosti, hemijskom sastavu i mehaničkim osobinama čelika, da je za povećanje vremenske plastičnosti i otklanjanja opasnosti od krtog loma u dugim vremenima rada, neophodno ograničiti zateznu čvrstoću na sobnoj temperaturi, i strogo kontrolisati sadržaja sumpora (S) i fosfora (P) u čeliku [9].

Tabela 2: Temperature termičke obrade za čelik 1.25Cr1Mo0.3V prema različitim standardima

Čelik (standard)	Termička obrada	
	Normalizacija ili kaljenje	Otpuštanje
15H1M1F (TU-14-3P-55-2001)	970-1000°C hlađenje na vazduhu ili ubrzano; Za cevi izrađene iz čelika iz elektropeći dopuštena temperatura normalizacije 1070°C. Za cevi debljine preko 15mm neophodno je pojedinačno hlađenje komada.	730-760°C ne manje od 10h sa hlađenjem na vazduhu;
15CrMoV510 (VdTUV 506 2001 i V&M 417R)	970-1000°C hlađenje na vazduhu li ubrzano;	700-760°C 2min/mm ali najmanje 90min;

Kod debelozidnih komponenti, u zavisnosti od brzine hlađenja sa temperature austenitizacije, preobražaj austenita protiče u različitim temperaturskim intervalima i na kraju se dobija neujednačena mikrostruktura koja se sastoji iz različitog odnosa strukturnih komponenti ferita i beinita. To znači da mala brzina hlađenja pri normalizaciji debelozidnih cevi otežava dobijanje beinitne strukture po celom preseku, što dovodi do sniženja nivoa dugotrajne čvrstoće čelika. Na primer, za cevi dimenzija 325x90mm izrađenih od čelika 15H1M1F, srednja brzina hlađenja sa temperature austenitizacije na mirnom vazduhu u intervalu 1050-750°C iznosi priližno 20°/min, što je nedovoljno za obezbeđenje preobražaja u beinitnoj oblasti u središnjim presecima cevi [3,4,9].

Pojava nehomogene strukture kod debelozidnih komponenti izrađenih od čelika 15H1M1F je navela na razmatranje mogućnost postizanja toplotne postojanosti, ne na račun povećanja udela beinitne strukture, već ojačanjem strukturno slobodnog ferita. Ovaj ferit se obrazuje sporim hlađenjem sa temperature austenitizacije, sa izdvajanjem veće količine visokodisperznih karbida, od kojih najznačajniji uticaj na čvrstoću i vreme do loma ima karbid vanadijuma. Ovakva razmišljanja su proistekla iz činjenice da je utvrđena direktna zavisnost vremena do loma, pri dugotrajnim ispitivanjima čelika sa beinitnom strukturom, od rastojanja između sekundarno izdvojenih karbida vanadijuma [4,6-9]. Ovo je i postignuto, tako da je kod vrlo velikih debljina zida komponenti izrađenih od čelika 15H1M1F, moguće polazno stanje feritno karbidna struktura.

Iz izloženih podataka može da se zaključi da čelik 15CrMoV510, u stanju u kome se proizvodi i isporučuje, suštinski nema isti kvalitet kao dobro poznati čelik 15H1M1F, pre svega zbog razlike u termičkoj obradi, iako su to zapravo isti materijali. Uobičajeno stanje isporuke cevi, izrađenih od čelika 15CrMoV510 koje su dospevale na naše tržište sa feritno beinitnom strukturom, nije dostizalo stanje sa najnižim mogućim osobinama za čelik 15H1M1F, ali isto tako ni stanje sa najvišim osobinama.

Interesantno je poređenja radi navesti i neke osobine koje se odnose na livenu varijantu čelika 1.25Cr1Mo0.3V – čelični liv 15H1M1FL. I za odlivke izrađene od ove legure, koji rade na temperaturama višim od 450°C, merodavne osobine koje određuju radnu sposobnost su mikrostrukturalna stabilnost (toplotna postojanost) i otpornost na prsline, a obe ove osobine zavise od polaznog mikrostrukturnog stanja [4]. Odlivci izrađeni od čelika 15H1M1FL se podvrgavaju dvostrukoj normalizaciji, pri čemu je prva visokotemperaturna normalizacija (1030-1050°C) čija je uloga homogenizacija, a druga se izvodi na 980-1020°C i njome se ostvaruju finalna svojstva odlivaka. Struktura koja se obrazuje pri takvoj termičkoj obradi materijala zavisi od brzine hlađenja pri normalizaciji. Otpuštanje se izvodi na temperaturama 730-760°C. Na osnovu ispitivanja strukture po debljini odlivaka, utvrđeno je da ona može da ima, u zavisnosti od brzine hlađenja određene zone i sadržaja ugljenika, dominantno feritni, feritno beinitni ili beinitni karakter, što prati karakter promene mehaničkih osobina po debljini odlivka. Najmanja toplotna postojanost, a samim tim i najveća plastičnost se postiže kod feritno karbidne strukture.

Treba istaći, da je ferit kod čelika 15H1M1F, koji se izdvaja pri malim brzinama hlađenja, nehomogen, tako da se u različitim feritnim zrnima količina karbida može razlikovati i nekoliko puta. Pretpostavlja se, kod odlivaka, da se prve količine ravnotežnog ferita, obrazuju u oblastima metala koje su osiromašene na ugljeniku (C). Sa stepenom opadanja temperature razlaganja austenita, ne može da se ostvari preraspodela C iz kog razloga se izdvaja ferit koji je prezasićen C. Posle visokog otpuštanja u feritu se javljaju oblasti sa velikom i malom gustinom raspodele karbidnih čestica, a dalje izdvajanje karbida se odvija u procesu puzanja tokom eksploatacije neravnomerno. Od odnosa ova dva tipa ferita zavise osobine toplotne postojanosti i zadržavanja plastičnosti u dugom vremenskom periodu. U slučaju kada se struktura čelika 15H1M1FL primarno sastoji od ferita, visoku vremensku čvrstoću i nisku plastičnost ima onaj čelik koji prevashodno karakteriše struktura prezasićenog ferita sa povišenim sadržajem C. Pad plastičnosti sa vremenom, ukazuje na ogrubljanje karbidne faze po granicama zrna, što je uobičajena pojava kod svih čelika izloženih puzanju. I kod odlivaka može da se kaže - najviša svojstva toplotne postojanosti imaju odlivci čelika 15H1M1FL u čijoj strukturi nema ferita, odnosno, struktura bez ferita se postiže pri velikim brzinama hlađenja iz austenitne oblasti, pri čemu se obrazuje beinitna struktura. Vremenska svojstva čeličnih odlivaka zavise i od mikrostrukture odlivka po njegovoj debljini, koja mora da se razlikuje zbog različitih uslova hlađenja pri termičkoj obradi. Po debljini zida odlivaka nađeno je da se javljaju dve makro zone koje se međusobno razlikuju po mikrostrukтури – površinski sloj karakteriše zona sa sitnim zrnom, a unutrašnjost zona stubičastih zrna. Ispitivanje vremenske čvrstoće ove dve zone pokazuje da postoji bitna razlika – stubičasta struktura ima znatno više vremenske osobine. Takođe i brzina rasta prsline u ovim zonama je različita.

2.2 Fabrikacija delova od čelika klase 1.25Cr1Mo0.3V

Cevni lukovi. S obzirom na ogromno iskustvo u ispitivanju i radu čelika 15H1M1F, veći deo ovih saznanja je moguće iskoristiti za predviđanje ponašanja i svojstava čelika 15CrMoV510. Poređenjem različitih polaznih stanja cevni lukova (CL) parovoda izrađenih od čelika 15H1M1F, i njihovih svojstava za eksploataciju u dužem vremenskom periodu [10], pokazano je da hladno deformisani i visoko otpušteni čelik 15H1M1F sa feritno karbidnom strukturom ima najniže vremenske osobine od svih mikrostrukturnih varijanti ovog čelika, dok oni sa beinitnom strukturom imaju najviše vremenske osobine. Stoga je prema dosadašnjim iskustvima [4] pri ulaznoj kontroli, posebno ako je ona zasnovana na metodama bez razaranja, najcelishodnije proveravati kvalitet polazne strukture kod cevni lukova sa feritno karbidnom strukturom, koja i dalje ima upotrebljivost i odgovara osnovnim osobinama koje se traže od čelika 15H1M1F, jer sve ostale strukture gotovo sigurno zadovoljavaju osobine date u standardima.

Kod hladno deformisanih lukova važno je napomenuti da sa povećanjem deformacije i sniženjem plastičnih svojstava dolazi do gubitka sposobnosti metala da se amortizuju pikovi naprezanja u mikrooblastima. To sa svoje strane stvara povoljne uslove za nastajanje mikroprsline u ovim oblastima, što se odražava na sniženje čvrstoće [10]. U Ruskim elektranama široko se primenjuju hladno savijene cevi sa debljinom zida do 33mm izrađene od perlitnih čelika. Cevi debljine zida do 12mm, posle hladne plastične deformacije, ne podvrgavaju se termičkoj obradi i u takvom stanju mogu da rade na povišenim temperaturama. Sa gledišta relaksacije napona, nema ni potreba izvoditi otpuštanje posle hladnog savijanja cevi od čelika 12H1MF i 15H1M1F jer će se proces odvijati u uslovima eksploatacije sa istim efektima, ali u nešto dužem periodu. [3,10]

Kod hladno deformisanih cevni lukova parovoda od čelika 15H1M1F, za obezbeđenje pouzdanosti neophodno je odrediti udeo štetne mikrostrukture (mikrostruktura koja se smatra nepoželjnom – mikrokonstituent, najčešće perlit izdvojen po granicama feritnih zrna) i posredno određena zatezna čvrstoća, u istegnutoj zoni (teme) luka. Zatezna čvrstoća metala sa feritno karbidnom strukturom ima vrednost u intervalu 480-530MPa. Tako su proizašle preporuke za CL izrađene od čelika 15H1M1F sa velikim udelom nepovoljne strukture [4, 11], u kojima se preporučuje da se pri oceni preostalog veka koriste proračunske karakteristike koje su za 20% umanjene u odnosu na standardom preporučene vrednosti.

Uobičajeno je da se cevni lukovi najčešće savijaju na toplo, što podrazumeva da cevi prolaze ponovo termičku obradu da bi povratili feritno beinitnu mikrostrukturu. U tom slučaju se pruža prilika da se i polazna mikrostruktura, sa manjim sadržajem beinita nakon savijanja i termičke obrade, dovede do stanja sa znatno većom količinom beinita.

Za parovode koji se posle eksploatacije duže od 100000h odlikuju feritno karbidnom strukturom, moguće je izvesti i revitalizaciju parovoda u smislu izvođenja ponovne termičke obrade [4]. Minimalna temperatura na kojoj bi potpuno nestale mikropore u austenitu, u vremenu od 1h za čelik 15H1M1F, je 1050°C, pod uslovom da klasa oštećenja nije previše velika. Jedan od pratećih efekata ovakve revitalizacije je i delimično podizanje vremenske čvrstoće usled efekata ojačavanja. Takođe, i za livenu varijantu ovog čelika je ustaljena praksa revitalizacija mikrostrukture, jer su poznati parametri kada se izvodi ova obrada, što nije najjasnije određeno za ostale niskolegirane niskouglenične čelike.

Zavareni spojevi. Pouzdano održavanje i rad postrojenja za proizvodnju električne energije ne bi bili mogući bez projektovanja zavarenih spojeva, njihove izrade i kontrole kvaliteta u skladu sa preporukama u standardima. Za istorodne zavarene spojeve čelika 15CrMoV510 moguće je u potpunosti koristiti saznanja dobijena iz dugogodišnje upotrebe i čelika 15H1M1F jer se na ovom polju ne pojavljuju razlike [1-4]. Generalno, čelici klase 1.25Cr1Mo0.3V sa nižim sadržajem ugljenika, što odgovara valjanim proizvodima, imaju odličnu zavarljivost, a zavareni spojevi se odlikuju značajnom tolerancijom oštećenja. Tokom dugotrajne eksploatacije, takvi zavareni spojevi se odlikuju pouzdanošću i stabilnošću u radu, za razliku od npr. čelika 14MoV63, i može se reći da imaju višedecenijsku uspešnu primenu bez zabeleženih posebnih pojava oštećenja.

S obzirom da su sve osobine čelika 1.25Cr1Mo0.3V ključne za njegovu eksploataciju, određene njegovim legiranjem i režimom termičke obrade, od zavarenih spojeva se zahteva da postignu najmanje date osobine. Ovo samo grubo znači da dodatni materijal treba da ima odnos glavnih legirajućih elemenata Cr:Mo:V približno istovetan kao osnovni materijal, u cilju obezbeđenja vremenskih osobina metal šava (i čvrstoće i duktilnosti). Takođe, tokom procesa zavarivanja i naknadne termičke obrade koja se izvodi nakon zavarivanja, potrebno je postići mikrostrukturno stanje koje ima što sličnije osobine osnovnom materijalu sa što je moguće manjim efektom pre svega otpuštanja i izdvajanja krupne karbidne faze. To znači da regulacijom unosa toplote, temperaturom i vremenom naknadne termičke obrade mogu da se postignu zadovoljavajuća svojstva metal šava i zavarenog spoja u celini, i sa aspekta čvrstoće i sa aspekta duktilnosti, međutim, potreban je oprez i pažljiv izbor parametara zavarivanja, kao i kod svih čelika koji sadrže vanadijum, zbog opasnosti od prevelikog izdvajanja nepovoljnih karbidnih faza.

Za raznorodne spojeve X10CrMoVNb91 i 15CrMoV510, ranije je intenzivno korišćen dodatni materijal klase 2,25Cr1Mo, jer po svom sadržaju hroma može da kompenzuje razliku u sadržaju hroma visokolegiranog čelika P91 i niskolegiranih CrMoV čelika, međutim osnovna mana pri izradi raznorodnih spojeva sa dodatnim materijalom klase 2,25Cr1Mo je to što ovaj dodatni materijal nema zadovoljavajuću vremensku čvrstoću. Ovaj problem je prevaziđen uvođenjem mikrolegiranih dodatnih materijala, čiji je osnovni sastav takođe 2.25Cr1Mo, ali kod kojih je mikrolegiranjem značajno podignuta vremenska čvrstoća (npr. dodatni materijal koji odgovara klasi čelika P23). Tehnologija zavarivanje raznorodnih spojeva dodatnim materijalom 1.25Cr1Mo0.3V, je jedna od varijanti kada su u pitanju raznorodni spojevi na parovodima izrađenim od čelika 15CrMoV510.

3. PROMENE OSOBINA ČELIKA 1.25CR1MO0.3V TOKOM EKSPLOATACIJE

Cevni lukovi izloženi puzanju su, uz zavarene spojeve, najpodložniji stvaranju oštećenja tokom rada parovoda na TE postrojenjima. U osnovi, bez obzira koliko su niski naponi koji deluju u toku dugotrajnog rada, pojaviće se mali stepen plastične deformacije i sniženje otpornosti materijala na opterećenje koje deluje tokom puzanja.

Veličine koje su podložne promeni, kao i akumulirana oštećenja koja nastaju tokom vremena, izrazito zavise od polaznog mikrostrukturnog stanja cevnog luka, deformacionog ojačavanja nastalog tokom procesa puzanja i nivoa efektivnih napona koji se generišu tokom rada [5, 12]. S obzirom na polaznu sličnost čelika 15CrMoV510 i 15H1M1F, u pogledu promene radnih osobina nedvosmisleno može da se iskoriste višedecenijska saznanja o ponašanju čelika 15H1M1F u radu.

Starenje čelika 15H1M1F se potpuno analogno odvija kao i starenje čelika 12H1MF, iako se odlikuje višim osobinama čvrstoće, s tim što se proces omekšavanja čelika 15X1M1Φ tokom starenja dešava nešto intezivnije nego kod čelika 12X1MΦ [3,4]. Sa porastom temperature i dužine starenja, sastav karbidne faze se stabilizuje. Takođe, u prvim fazama starenja dolazi i do izvesnog ojačanja čelika, verovatno kao posledica izdvajanja finih čestica karbidne faze, što se odražava na porast tvrdoće feritne osnove. Sa povećanjem vremena rada, tvrdoća ferita se smanjuje zbog koagulacije karbidne faze u feritu i transformacije otpuštenog beinita (sa tvrdoćom preko 360HV) u ferit sa relativno ravnomerno raspoređenim karbidima. Ova pojava je praćena padom makrotvrdoće čelika i manjim porastom plastičnosti. Udarne žilavosti, sa povišenjem temperature starenja i dužine rada, se znatno povećava, npr.: posle 500h na 650°C za oko 3 puta. Generalno, primećeno je da se čvrstoća čelika 15H1M1F pre svega snižava sa porastom temperature starenja i to samo u prvom periodu rada, dok se kasnije stabilizacijom mikrostrukture i procesa starenja postiže da ovaj trend bude neznatan.

Takođe, važno je istaći da u procesu starenja u periodu do 100000h na 540°C kod čelika 15H1M1F dolazi do blagog opadanja čvrstoće i do porasta plastičnosti i žilavosti. Ovaj proces je upravo najizraženiji kod hladno deformisanih lukova zbog izrazito niskih osobina duktilnosti koja se javljaju nakon deformacije, gde je zabeležen porast plastičnosti za 28-35% i porast žilavosti za 38-56% [13].

I u slučaju hladno deformisanih i toplo deformisanih lukova, značajno je da se nakon izvesnog perioda rada postiže relativno stabilno mikrostrukturno stanje, koje daljim izlaganjem radnim uslovima bez obzira na mikrostrukturne promene koje će da uslede, neće imati praktično nikakav uticaj na mehaničke osobine na sobnoj temperaturi, tj., posle izvesnog vremena nema više vidljivog pada čvrstoće koji bi pratio proces starenja. Ono što se menja do 200000h su svojstva duktilnosti, i to pre svega procentualno suženje poprečnog preseka kod ispitivanja zatezanjem. Poređenjem stanja metala cevni lukova, koji su dugo vreme proveli u eksploataciji na temperaturama 540-570°C a koji su nakon fabrikacije kao početnu imali mikrostrukturu sa značajnijom količinom beinita i feritno karbidnu strukturu, ustanovljeno je da je kod feritno karbidne strukture uočen značajan stepen mikrostrukturnih promena sa značajnijim izdvajanjem karbidne faze, dok kod strukture sa polazno feritno beinitnom strukturom nisu uočene značajnije promene u beinitnim kolonijama uz pravilnije izdvajanje karbidne faze. Još jedno zapažanje je značajno istaći – što je finije austenitno zrno postignuto tokom termičke obrade, izraženiji su procesi degradacije koji kasnije nastupaju.

Najintenzivnija preraspodela elemenata između čvrstog rastvora i karbida, odvija se u prvim periodima starenja. Čvrsti rastvor osiromašuje na hromu, molibdenu i vanadijumu pri čemu skoro 50% od ukupne količine molibdena pralazi u karbidnu fazu. Karbidi se ne izdvajaju tokom dugotrajnog rada (do 220000 h) kod opreme, ukoliko ona radi na temperaturama koje su niske (250 – 300°C), dok se na višim radnim temperaturama (520 – 560°C) složeni $M_{23}C_6$ i M_6C karbidi formiraju u osnovi. Karbid tipa M_6C je specifičan kod čelika koji sadrže oko 1% Mo, kao što je 15H1M1F. Izdvajanje Cr iz čvrstog rastvora, i njegovo vezivanje u karbide, zavisi od njegovog početnog sadržaja u čeliku i od sadržaja C. Takođe, za sve varijacije u polaznom stanju Mo se izdvaja iz čvrstog rastvora i vezuje u karbidnu fazu, ali i posle dugotrajnog rada (200 – 220000 h) osnova sadrži izvesnu količinu zaostalog molibdena (0,1-0,2%), nezavisno od početnog sadržaja u čeliku. Vanadijum u vidu vrlo fine karbidne faze, izrazito teško napušta osnovu. Način migracije Cr, Mo i V tokom starenja kod čelika klase 1.25Cr1Mo0.3V je prvenstveno zaslužan za očuvanje njegove čvrstoće i posle izrazito dugih vremena rada [7,8].

Generalno, ispitivanjem čelika 15H1M1F u različitim polaznim mikrostrukturnim stanjima na temperaturama 540–630°C, i u trajanju 104–2·105 h, zaključeno je da struktura sa beinitnom strukturom ima najvišu vrednost napona do loma, međutim na višim temperaturama i pri dužim testovima, razlike u naponu do loma se smanjuju značajno, što svedoči o značajnim promenama u mehanizmima koji dovode do degradacije i pojave oštećenja u različitim temperatursko-vremenskim oblastima rada [14]. Za rad na ustaljenim parametrima kod konvencionalnih TE postrojenja, na temperaturi od oko 540°C, ove razlike postoje i stoga je bitno da polazna struktura ima što veći sadržaj beinitnog mikrokonstituenta koji mu garantuje stabilnu eksploataciju u dugom vremenskom periodu. Takođe, izlaganje povišenim temperaturama u dužem vremenskom periodu neće značajnije uticati na čvrstoću koliko na osobine deformacije (deformaciju i njenu brzinu tokom puzanja), tako da što je viša čvrstoća do loma to je svojstvo plastičnosti osetljivije i brže se menja sa povećanjem temperature i sa vremenom, pre svega zbog slabljenja granica zrna.

4. ZAKLJUČCI

Analizom velikog broja literaturnih podataka, podataka prikazanih u ovom radu, kao i saznanja koja su proistekla iz iskustava i istraživanja autora ovog rada u korišćenju čelika klase 1.25Cr1Mo0.3V, koji se kod nas mahom koristi za izradu parovoda, moguće je izvesti sledeće zaključke:

- Čelik 15CrMoV510 (VdTUV 506) i čelik 15H1M1F (GOST) su vrlo uporedivi i nedvosmisleno može da se kaže da je čelik 15CrMoV510 isti čelik, sa nešto nižom klasom kvaliteta u odnosu na prosečno stanje isporuke čelika 15H1M1F, međutim ne i najniža klasa za koju je, takođe dokazano da ima vrlo veliku dugotrajnost.
- Od svih osobina koje opredeljuju dugotrajnost čelika 1.25Cr1Mo0.3V najznačajnija je njegova polazna mikrostruktura koja se dobija posle pravilno izvedene termičke obrade, jer ona garantuje najvažnije osobine ovog čelika koje određuju njegovu pouzdanu eksploataciju – otpornost na puzanje i plastičnost, a nakon vrlo dugog perioda rada. Odavde nedvosmisleno proizilazi da je jedan od bitnih tehničkih zahteva za naručivanje ovog čelika polazna mikrostruktura. Ne treba smetnuti sa uma da je kod debelozidnih komponenti vrlo izvesna pojava nehomogene strukture nakon fabrikacije, ali to ne znači da stanje cevovoda nije upotrebljivo, jer su generalno čelici sa generičkom oznakom 1.25Cr1Mo0.3V vrlo otporni na pojavu oštećenja i tolerantni na njihovo prisustvo, u poređenju sa drugim niskolegiranim čelicima.
- Zavarljivost 1.25Cr1Mo0.3V čelika je dobra i dokazana kroz višedecenijsku upotrebu. Uz primenu odgovarajućih tehnologija zavarivanja, dobijaju se spojevi kod kojih u dosadašnjoj praksi, i prema literaturnim izvorima, nisu uočeni sistemski nedostaci.
- Zbog vrlo dobro proučenih mehanizama koji dovode do opadanja karakteristika tokom rada čelika 1.25Cr1Mo0.3V, održavanje parovoda izrađenih od njega, ukoliko su prosečnog kvaliteta, ne bi trebalo da zahteva prevelika ulaganja.

ZAHVALNICA

Delovi ovog rada, proistekli su iz Projekta TR35024 finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru programa istraživanja u oblasti Tehnološkog razvoja, u ciklusu istraživanja za period 2011-2014. god.

REFERENCE

- [1] Gordana Bakić, Ljubinka Vujnović, Miloš Vlajić, Mogući problemi u eksploataciji zavarenih spojeva čelika P91 i niskolegiranih toplotnopoostojanih čelika, *Proceedings International Symposium Power Plants 2008*

- [2] Von B.Melzer, H. Dobers, Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung des warmfesten Stahles 15CrMoV510 für zeitstandsbeanspruchte Rohrleitungen, *VGB Kraftwerkstechnik* 72 (1992), 7, pp 642-647
- [3] Е. И. Крутасова, Надежность металла энергетического оборудования, Москва энергоиздат, 1981.
- [4] Бугай Н.В., Березина Т.Г., Трунин И.И., Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования, Энергоатомиздат, Москва, 1994.
- [5] Gordana Bakić: Model procene preostalog radnog veka komponenti termoenergetskih postrojenja, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija, 2011
- [6] Foldyna-Sobotka, How the microstructure affects the high-temperature properties of low-alloy steels strengthened with vanadium carbide, *Int. Conf. "Properties of creep resistant steels"*, Dusseldorf, May, 1972
- [7] G. D. Pigrova, V. M. Sedov, and Yu. I. Archakov, Carbide transformations in Cr – Mo steels in the process of long-term aging and service, *Metalloved. Term. Obrab. Met.*, No. 9, 9 – 13 (1997).
- [8] G. D. Pigrova, EFFECT OF LONG-TERM OPERATION ON CARBIDE PHASES IN Cr – Mo – V STEELS *Metal Science and Heat Treatment* Vol. 45, Nos. 3 – 4, 2003 2 – 4
- [9] I.L.Mirkin, et al, Hromolibdenvanadijeva žaropročnaja stali za paroprovodov, *Teploenergetika* (1972), 7, pp.35-38
- [10] E.I. Krutasova, Promena mehaničkih i vatrootpornih svojstava kotlovskih čelika pri hladnom svijanju i narednom dugotrajnom držanju na visokim temperaturama, *Teploenergetika* (1964), 11, pp.38-42
- [11] M.B. Balahovskaja, et al., O škale mikrostruktur stali 15H1M1F, *Teploenergetika*, 8 (1978), pp. 51-54
- [12] Gordana Bakić, Vera Šijački Žeravčić, Miloš Đukić, Stevan Maksimović, Dušan Plešinac, Bratislav Rajičić: The Thermal History and Stress State of a Fresh Steam–Pipeline Influencing its Remaining Service Life, *THERMAL SCIENCE*, Year 2011, Vol. 15, No. 3, pp. 691-704
- [13] M.B.Balakhovskaya, N.A.Khusainova, E.I.Kaminskaya, N. V. Bugai: Structure and properties of deformed 15Kh1M1F steel after long aging, *Metal Science and Heat Treatment*, 27, (1985), 11, pp. 855-858
- [14] I. I. Mints, N. G. Shul'gina, A. P. Smirnova: Service properties of Cr–Mo–V steels in different structural conditions, *Metal Science and Heat Treatment*, 27 (1985), 11, pp. 858-863