



17th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE

Hi-tech casting solution and knowledge based engineering

Opatija, May 16th-18th, 2018

<http://www.simet.hr/~foundry/>

TOOL STEELS - CLASSIFICATION AND BASIC PROPERTIES

ALATNI ČELICI – PODJELA I OSNOVNA SVOJSTVA

Sandra Brajčinović^{1*}, Anita Begić Hadžipašić¹, Jožef Medved²

¹ University of Zagreb Faculty of Metallurgy, Sisak, Croatia

² University of Ljubljana Faculty of Natural Sciences and Engineering, Ljubljana, Slovenia

Oral presentation

Review

Abstract

This paper presents an overview of metallurgical processes of advanced metallic materials. The thermodynamic characteristics of the process include the conditions under which it is possible to follow the process in the desired direction and kinetics of the process. Tool steels belong to a group of advanced metallic materials, which are required by special properties such as high hardness and wear resistance, high strength stability at elevated temperatures, good behavior during heat treatment, high corrosion resistance etc. Achieving good properties is enabled by alloying with chromium, tungsten, vanadium, molybdenum or cobalt. It is very important to what extent the alloying elements are added and how the process of production proceeds, because the compounds formed during the production can be altered, and thus affect the transformation processes, and secreted in an undesirable form. Alloying elements are most often combined with carbon in carbides but can also be partially substituted in the iron crystal lattice and create undesirable intermetallic compounds. In order to improve the properties of tool steels, the aim is to find an adequate chemical composition to enable obtaining stable thermodynamic parameters.

Keywords: *tool steels, metallurgical processes, thermodynamics, kinetics, alloying elements*

*Corresponding author (e-mail address): smitic@simet.hr

Sažetak

U ovom radu dan je pregled proučavanja metalurških procesa naprednih metalnih materijala. Termodinamičke karakteristike procesa obuhvaćaju uvjete prema kojima je moguće pratiti odvijanje procesa u željenom pravcu te kinetiku odvijanja procesa. Alatni čelici pripadaju skupini naprednih metalnih materijala od kojih se zahtijevaju posebna svojstva poput visoke tvrdoće i otpornosti na trošenje, postojanost čvrstoće kod povišenih temperatura, dobro ponašanje pri toplinskoj obradi, korozijska otpornost i dr. Postizanje dobrih svojstava omogućeno je legiranjem kromom, volframom, vanadijem, molidbenom ili kobaltom. Veoma je bitno u kojoj mjeri se dodaju legirajući elementi i



17th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE

Hi-tech casting solution and knowledge based engineering

Opatija, May 16th-18th, 2018

<http://www.simet.hr/~foundry/>

kako teče proces proizvodnje, jer spojevi koji nastaju tijekom proizvodnje mogu se mijenjati i tako utjecati na transformacijske procese te se izlučiti u nepoželjnom obliku. Legirajući elementi se najčešće spajaju s ugljikom u karbide, ali također mogu dijelom supstituirati u kristalnu rešetku željeza te stvarati nepoželjne intermetalne spojeve. U svrhu poboljšanja svojstava alatnih čelika, teži se pronalasku adekvatnog kemijskog sastava kako bi se omogućilo dobivanje stabilnih termodinamičkih parametara.

Ključne riječi: alatni čelici, metalurški procesi, termodinamika, kinetika, legirajući elementi

UVOD

Alatni čelici se ubrajaju u visokouglične ili legirane čelike. Ugljični alatni čelici sadrže visok udio ugljika koji se kreće od 0,6 do 2,06%. Najčešći elementi koji se koriste za legiranje alatnih čelika su: krom, kobalt, vanadij, volfram i molibden. Alatni čelici pripadaju skupini naprednih metalnih materijala od kojih se zahtijevaju posebna svojstva poput visoke tvrdoće i otpornost na trošenje, postojanost čvrstoće kod povišenih temperatura, dobro ponašanje pri toplinskoj obradi itd. [1,2].

Kod proizvodnje alatnih čelika važno je utvrditi optimalan kemijski sastav s kojim bi se postigla otpornost materijala u svakodnevnoj upotrebi. Stoga se pri samoj proizvodnji provodi klasifikacija prema kemijskom sastavu bazirana na analizama taline. Ispitivanjem kemijskog sastava čelika u procesu lijevanja dobiva se željeni kemijski sastav, odnosno, precizni rezultat sadržaja određenih prisutnih elemenata.

Alatni čelici primarno se koriste u izradi različitih alata, stoga su podvrgnuti raznim procesima opterećenja i trošenja te se od njih zahtijeva maksimalna trajnost uz minimalno održavanje. Najčešća primjena alatnih čelika je u raznim industrijskim postrojenjima kao što su: toplinski strojevi i uređaji, kemijska i procesna industrija, termo i nuklearne elektrane, rakete i svemirski brodovi, alati za oblikovanje metala i keramike u kojima se rad pri povišenim i visokim temperaturama ne može izbjeći zbog čega zahtijeva velika izdržljivost i otpornost materijala [3].

U ovom radu obrađena je podjela i pregled najtraženijih zahtjeva, koji se odnose na alatne čelike. Također, opisan je pregled utjecaja elemenata, koji mogu sudjelovati u termodinamičkim metalurškim procesima proizvodnje alatnih čelika.

PODJELA ALATNIH ČELIKA PREMA NAMJENI

Alatni čelici mogu biti nelegirani, niskolegirani i visokolegirani, a prema namjeni dijele se u četiri skupine [2,4]:

1. ugljični alatni čelici,
2. alatni čelici za hladni rad – ϑ_r (radna temperatura) $< 200^{\circ}\text{C}$,
3. alatni čelici za topli rad – ϑ_r (radna temperatura) $> 200^{\circ}\text{C}$ i
4. brzorezni čelici.



17th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE

Hi-tech casting solution and knowledge based engineering

Opatija, May 16th-18th, 2018

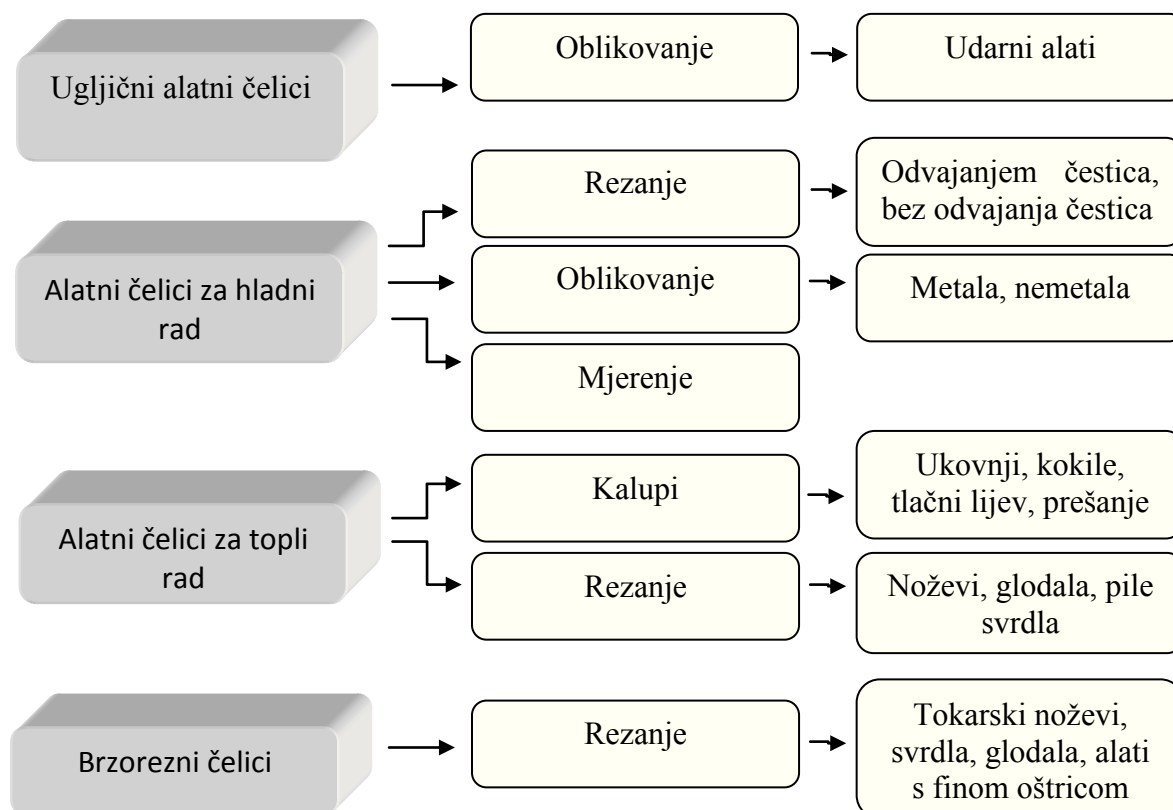
<http://www.simet.hr/~foundry/>

Na slici 1 prikazana je podjela alatnih čelika prema namjeni. Ugljični alatni čelici sadrže 0,6-1,4% C. Karakteristika ove grupe alatnih čelika je visoka tvrdoća (60-64 HRC) [5]. Imaju dobru otpornost pri trošenju, ali samo do temperature 150°C i zbog toga se od ugljičnih alatnih čelika ne izrađuje alat za veće brzine rezanja. Karakteristika im je dobra žilavost, stoga je ova grupa čelika prihvatljiva za izradu alata koji su izloženi jačim udarnim opterećenjima.

Alatni čelici za hladni rad obuhvaćaju skupinu čelika koja je namijenjena za oblikovanje i mehaničku obradu do 200°C. Mogu biti nelegirani ili niskolegirani. Nelegirani čelici za hladan rad sadrže 0,5-1,3% C, imaju nisku prokaljivost i bolju žilavost u odnosu na druge alatne čelike. Namijenjeni su za izradu alata manjih presjeka i jednostavnijih oblika.

Niskolegirani čelik za hladan rad ima znatno bolja svojstva što se postiže dodavanjem legirajućih elemenata: krom, volfram, vanadij i molibden. Svrha legiranja je postizanje toplinski postojanih karbida koji omogućavaju dobru žilavost, zadržavanje visoke tvrdoće pri povišenim radnim temperaturama te dimenzijsku postojanost [6].

U ovoj skupini alatnih čelika postoje i viskolegirani alatni čelici za hladan rad kod kojih je glavni legirajući element krom i njegov udio je veći od 5%. Ova skupina alatnih čelika namijenjena je za proizvodnju alata koji su skloni koroziji, a kromom se postiže otpornost na koroziju. Uz krom, također su prisutni sljedeći legirajući elementi: V, Mo i W. Najvažniji zahtjevi za alatne čelike za rad u hladnom stanju su: otpornost na trošenje i otpornost na udarce [7].



Slika 1. Podjela alatnih čelika prema namjeni

Alatni čelici za topli rad primjenjuju se pri temperaturama višim od 200°C. Osnovni legirajući



17th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE

Hi-tech casting solution and knowledge based engineering

Opatija, May 16th-18th, 2018

<http://www.simet.hr/~foundry/>

elementi kod ove skupine čelika su krom, molibden i vanadij, a često se dodaje i volfram. Ovisno o prisustvu legirajućih elemenata dijele se na grupe čelika tipa: W-Cr-V i Co-Mo-Cr-V. Kod ovih čelika najtraženije svojstvo je otpornost na popuštanje [8]. Naime, kod povišenih temperatura može doći do smanjenja tvrdoće, mikrostrukturnih promjena i toplinskog zamora. Za ovu skupinu alatnih čelika postavljaju se i dodatni zahtjevi poput: otpornost na trošenje, viskotemperaturnu koroziju, pojavu plastičnih deformacija i udarnog opterećenja. Legiranje karbidotvorcima omogućava stvaranje karbida koji povećavaju otpornost na popuštanje i otpornost na trošenje. Niskim sadržajem ugljika (0,35-0,45% C) postiže se dobra žilavost i otpornost na toplinski umor. Silicij se dodaje zbog poboljšanja dinamičke izdržljivosti, a nikal kako bi se povećala žilavost i prokaljivost [1,9].

Brzorezni alatni čelici su otporni na visoke temperature pa tako zadržavaju visoku tvrdoću i otpornost na trošenje pri temperaturama do 650°C [4,10]. Brzorezni čelici spadaju u skupinu visokolegiranih čelika, a osnovni legirajući elementi su volfram i molibden koji osiguravaju temperaturnu postojanost. Dodatkom kobalta i vanadija postiže se visoka tvrdoća pri povišenim temperaturama. Karakteristika ovih čelika je da omogućavaju četiri puta veće brzine rezanja u odnosu na ugljične čelike. Ovisno o udjelu legirajućih elemenata, ova skupina se dijeli na molibdenske, volframske i kobaltne brzorezne čelike [11].

ZAHTJEVI PRI PROIZVODNJI ALATNIH ČELIKA

Primarni zahtjevi za alatne čelike su: otpornost na trošenje (adhezija i abrazija) i otpornost na popuštanje (žilavost). Sekundarni zahtjevi pri proizvodnji alatnih čelika su: mogućnost obrade alata, što viša zakaljivost i prokaljivost, a manja sklonost pogrubljenju zrna prilikom austenitizacije, što manja sklonost razugljičenju kod toplinske obrade, manje deformiranja u kaljenju te veća mogućnost za poliranje (otpornost na koroziju).

Alatnim čelicima se smanjuje vijek trajanja zbog trošenja, najviše abrazijom, tj. mikrorezanjem. Mehanizam abrazijskog trošenja nastaje pri direktnom fizičkom kontaktu između dviju površina te ukoliko se abrazivno sredstvo zaglavi između dviju površina u trenju (slika 2). Pri tome, neravni dijelovi hrapave i tvrde površine klize po mekšoj površini i pritom se pojavljuju oštećenja površine. Tvrde čestice koje djeluju na oštećenje alata mogu biti: tvrdi intermetalni spojevi, tvrdi organski spojevi, nečistoće u obrađivanom predmetu, karbidi u obrađivanom predmetu. Da bi se postiglo svojstvo otpornosti na trošenje, teži se postići prikladna funkcija mikrostrukturnog stanja čelika, tj. martenzitna struktura i što viši udio kvalitetnih karbida. Čelici koji su legirani s jakim karbidotvorcima (krom, volfram, mangan) imaju vrlo visoku otpornost na abrazijsko trošenje [1,3].

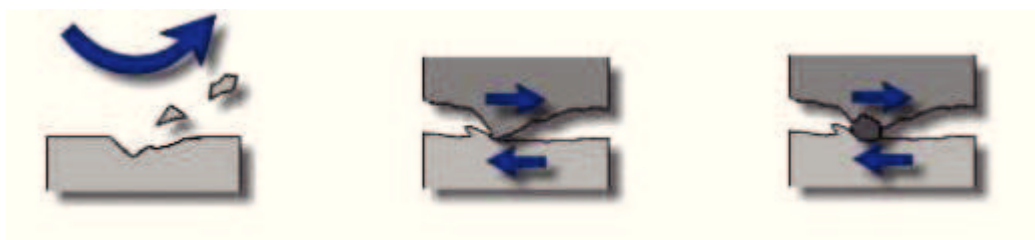


17th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE

Hi-tech casting solution and knowledge based engineering

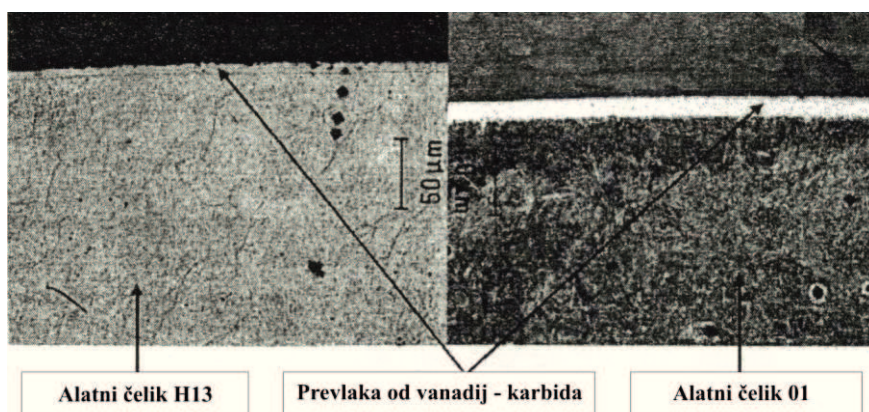
Opatija, May 16th-18th, 2018

<http://www.simet.hr/~foundry/>



Slika 2. Abrazijsko trošenje alata [12]

Za primjer rješavanja problema trošenja može se navesti TD postupak, odnosno, termoreaktivni-difuzijski postupak oblaganja alata vanadijevim karbidom. Vanadij s ugljikom na površini alata stvara stabilan karbid V_8C_7 . Karbidni sloj na površini raste tijekom procesa difuzije ugljika iz površinskog sloja čelika prema karbidnom sloju (slika 3). Pritom, određena količina karbidnog elementa difundira kroz nastali karbidni sloj u površinski sloj čelika. Ovaj postupak omogućio je postizanje visoke tvrdoće pri povišenim temperaturama posebno za alatne čelike za rad u toplom stanju, kao što su kalupi koji se koriste za lijevanje aluminija. Vanadij karbid obloga ne reagira s aluminijem i tako sprječava interakciju legura za lijevanje i kalupa [13]. Iako se postupak provodi u odgovarajućim uvjetima za koje je potrebna solna kupka odgovarajućeg sastava i visoke temperature (950-1050°C), glavni doprinos za nastajanje karbidnog sloja ovisi o kemijskom sastavu alatnog čelika što potvrđuje da se postizanjem odgovarajućeg kemijskog sastava mogu dodatno unaprijediti svojstva čelika te produžiti vijek trajanja alata.



Slika 3. Prikaz nanešenog sloja vanadij karbida na alatnim čelicima za rad u hladnom (AISI 01) i toplom stanju (AISI H13) [13]

Otpornost na popuštanje važna je za alate (slika 4) koji se koriste pri povišenim temperaturama (oko 600°C). Takvi alati pretežito su rezni alati koji postižu visoke temperature dok su u funkciji rada, zatim kokile ili ukovnji. Povišena temperatura dovodi do slabe otpornosti na trošenje te do pada čvrstoće i tvrdoće, a elementi koji doprinose otpornosti na popuštanje su legirajući elementi: volfram, molidben, vanadij i krom [4,6]. Otpornost na popuštanje najviše pokazuju alatni čelici za topli rad i brzorezni čelici. Kod



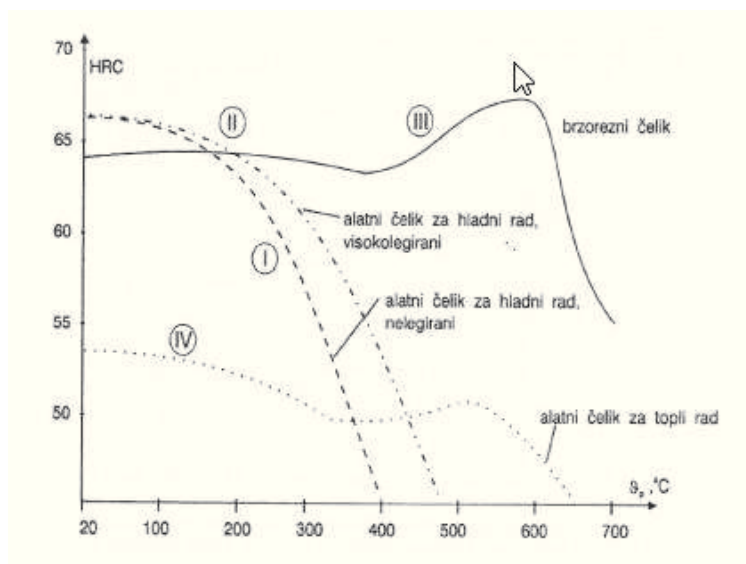
17th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE

Hi-tech casting solution and knowledge based engineering

Opatija, May 16th-18th, 2018

<http://www.simet.hr/~foundry/>

kalupa koji su namijenjeni za topli rad može doći do toplinskog umora zbog toplinskih naprezanja, jer se prilikom rada alati naizmjenično zagrijavaju pa hlade. Otpornost na popuštanje se može iskazati kod razlika u vrijednosti tvrdoće nakon kaljenja i tvrdoće nakon popuštanja pri određenoj temperaturi, a vrijednost se naziva dekrement tvrdoće [1,10].



Slika 4. Dijagram popuštanja osnovnih skupina alatnih čelika [14]

METALURŠKI PROCESI

Metalurškim procesima smatra se proces dobivanja metala koji se zasniva na nizu odvijanja složenih fizikalno-kemijskih procesa koji se istovremeno ili postepeno odvijaju u metalurškim agregatima. Kod svakog metalurškog procesa prerađuje se sirovina u cilju dobivanja određenog produkta, a pritom se izvode fizikalne, kemijske i fizikalno-kemijske transformacije u određenoj mjeri, kako bi se omogućilo dobivanje željenog svojstva produkta, koji će biti prikladan za daljnju preradu. Metalurški procesi praćeni su pretvorbom elemenata, tj. kemijskim reakcijama čija brzina određuje efekte proizvodnje kao što su produktivnost, specifična potrošnja energije, izvadak i dr. [15].

Ravnotežu reakcije proučava termodinamika koja omogućuje predviđanje da li je neki proces moguć i kako ga ostvariti. Pritom se polazne sirovine pretvaraju u konačne produkte, ali ponekad tvori slabo ili uopće ne reagiraju. Stoga je potrebno za odvijanje metalurških procesa poznavati vrijeme u kojem će se neka reakcija ostvariti. To područje proučava kemijska kinetika [16]. Tako se lakše može protumačiti koje reakcije su poželjne u proizvodnji, a koje treba na vrijeme usporiti.

Visoke temperature u elektropećima omogućavaju legiranje čelika s teško taljivim metalima. Kako bi se dobila tražena svojstva materijala poput: otpornost na koroziju, otpornost na trošenje, prokaljivost, vatrootpornost i dr., posebna pažnja se pridodaje odabiru adekvatnog kemijskog sastava, stoga se dodaju legirajući elementi i tako se postiže traženo svojstvo materijala. Osim toga, u proizvodnji su prisutne i prateće primjese elemenata koji mogu



17th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE

Hi-tech casting solution and knowledge based engineering

Opatija, May 16th-18th, 2018

<http://www.simet.hr/~foundry/>

imati negativan utjecaj na kvalitetu čelika te je njihov maseni udio potrebno svesti na minimum. Primjese u čeliku mogu biti zastupljene kao prateći elementi, skriveni ili slučajni elementi [17].

Stoga se općenita podjela elemenata koji su u sastavu čelika može svrstati na:

- korisne elemente – legirajući elementi (Cr, Ni, Mo, Cu, W, V, Al, Ti),
- štetne elemente – (Si, Mn, P, S, N, H, O, te nemetalni uključci).

Naročito se pri proizvodnji izbjegavaju štetni plinovi poput kisika, vodika, dušika koji narušavaju svojstva proizvoda. Kao primjer može se navesti pojava starenja koju uzrokuje dušik, stoga se dodaju elementi Al, Ti, Nb pa dušik iz čvrste otopine prelazi u nitride i tako čelik postaje otporan na starenje. Vodik u kombinaciji sa željezom tvori intersticijske mješance te dovodi do pojave vodikove krhkosti, tj. vodik iz atomarnog stanja prelazi u molekularno stanje u obliku sitnih mjehurića. Kisik djeluje tako da uzrokuje pojavu krhkosti čelika [9,18].

Nemetalni uključci uzrokuju smanjenje žilavosti, čvrstoće i pad duktilnosti. U kojoj mjeri će utjecati na svojstva čelika ovisi o njihovoj vrsti (oksidni, sulfatni ili silikatni), količini i rasporedu.

Osim prethodno navedenih elemenata, među najznačajnije štetne elemente ubrajaju se sumpor i fosfor. Sumpor sa željezom tvori FeS koji je nepoželjan, jer se pojavljuje na granicama zrna. Fosfor također sa željezom tvori supstitucijski kristal mješanac i utječe na pojavu krhkosti kod čelika [19].

UTJECAJ LEGIRAJUĆIH ELEMENATA NA SVOJSTVA ALATNIH ČELIKA

Ugljik (C) se smatra najvažnijim elementom koji utječe na svojstva čelika. Maseni udio ugljika u čeliku iznosi do 2,03%. Visok udio ugljika utječe na porast čvrstoće i granice razvlačenja, dok se pritom smanjuje žilavost i duktilnost. Kod čelika s martenzitnom strukturom, sadržaj ugljika je viši, jer se pritom omogućava toplinska obrada [1,4,10]. Krom u kombinaciji s ugljikom stvara karbide koji povećavaju otpornost na trošenje čime se produžuje vijek trajanja alata. Također, krom djeluje na povišenje toplinske čvrstoće, vatrootpornost i otpornost na djelovanje vodika. Da bi se postigla korozijska otpornost, potrebno je legiranje s minimalno 12% Cr [3, 16]. Molibden povećava prokaljivost i čvrstoću čelika, stvara karbide i povećava otpornost i trošenje čelika te uz krom, povećava otpornost prema koroziji. Vanadij je jak karbidotvorac i omogućava stvaranje VC ili V₄C₃ karbida koji su poželjni pri proizvodnji alatnih čelika za rad pri povišenim temperaturama. Wolfram stvara karbide koji su otporni na trošenje i zbog toga je nužan legirajući element za brzorezne čelike [2,12].

Mangan se dodaje zbog lakšeg oblikovanja čelika u toplom stanju, povećava prokaljivost, čvrstoću i žilavost. Sposobnost mangana očituje se u tome da štiti čelik od sumporne kiseline i sumpornih koncentrata. Koristi se kao dezoksidator i desulfurizator tijekom proizvodnje čelika. Zajedno sa sumporom stvara sulfid MnS pri čemu se sprječava negativno djelovanje sulfida.



17th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE

Hi-tech casting solution and knowledge based engineering

Opatija, May 16th-18th, 2018

<http://www.simet.hr/~foundry/>

Nikal ima slab afinitet prema ugljiku i zbog toga ne stvara karbide. Dodatkom nikla stvara se austenitna struktura koja doprinosi održavanju visoke čvrstoće i duktilnosti. Također daje otpornost prema koroziji, ali zbog svoje visoke cijene uglavnom se upotrebljava u manjoj količini i to u kombinaciji s elementima sličnih svojstava.

Kobalt se u pojedinim legurama dodaje zbog povećanja vlačne čvrstoće i postojanosti na popuštanje pri povišenim temperaturama. Najčešće se koristi kod alatnih, brzoreznih i konstrukcijskih čelika. Ne smije se koristiti njegovo dodavanje pri izradi čelika za dijelove nuklearnih energetske postrojenja zbog stvaranja radioaktivnog izotopa (⁶⁰Co) [1,5].

Količina karbida određena je sadržajem ugljika i legirajućih elemenata. Čelik se legira s određenom količinom nekog elementa kako bi mu se poboljšalo svojstvo ili kombinacija svojstava, ali pritom je važno u kojem postotku se dodaju legirajući elementi i u kojoj kombinaciji su prisutni.

Ako promatramo afinitet prema ugljiku, legirajući elementi u čeliku mogu biti [12,20]:

1. karbidotvorci (Cr, Mo, V, W, Ta, Ti);
2. nekarbidotvorci (Mn, Ni, Co).

Struktura alatnih čelika veoma je složena i ovisi od uvjeta legiranja i od stanja termičke obrade. Metalna osnova kod visokog sadržaja ugljika je perlitna te se može pojaviti i udio ferita. Ovisno o sadržaju ugljika i legirajućih elemenata, alatni čelici se mogu podijeliti na [4,10]:

1. nadeutektoidne čelike,
2. eutektoidne čelike,
3. ledeburitne čelike i
4. čelike s intermetalnim ojačanjem.

Količina karbidnih faza kod nadeutektoidnih čelika iznosi 5-12%, a kod ledeburitnih čelika 25-30%. Karbidne faze u čeliku stvaraju određenu koncentraciju ugljika i legirajućih elemenata pri čemu se omogućava prokaljivost, visoka tvrdoća i otpornost prema trošenju. Osnovna karbidna faza je cementit Fe₃C koji ima visoku tvrdoću i na sobnoj temperaturi je magnetičan [21].

Karbidne faze mogu se podijeliti na tri grupe [1, 3]:

1. grupa su karbidi označeni tipom MC (TiC, VC, TaC, NbC),
2. grupa su karbidi označeni tipom M₂C (Mo₂C, MoC, W₂C, WC) i
3. grupu čine karbidi M₃C (Fe₃C, Mn₃C), M₆C, M₂₃C₆.

Metalne karbidne faze se skraćeno označavaju simbolima MC, a indeks označava broj atoma koji pripada jednoj atomskoj rešetci. Razlika u rasporedu karbidnih faza – cementita je više izražena kod ugljičnih čelika nego kod legiranih čelika. Strukturna građa čelika, odnosno granica zrna ima veliki utjecaj na svojstva čelika. Karbidne faze koje su prisutne u alatnim čelicima uglavnom su smještene na granicama zrna. Mogu biti izražene u obliku mreže oko



17th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE

Hi-tech casting solution and knowledge based engineering

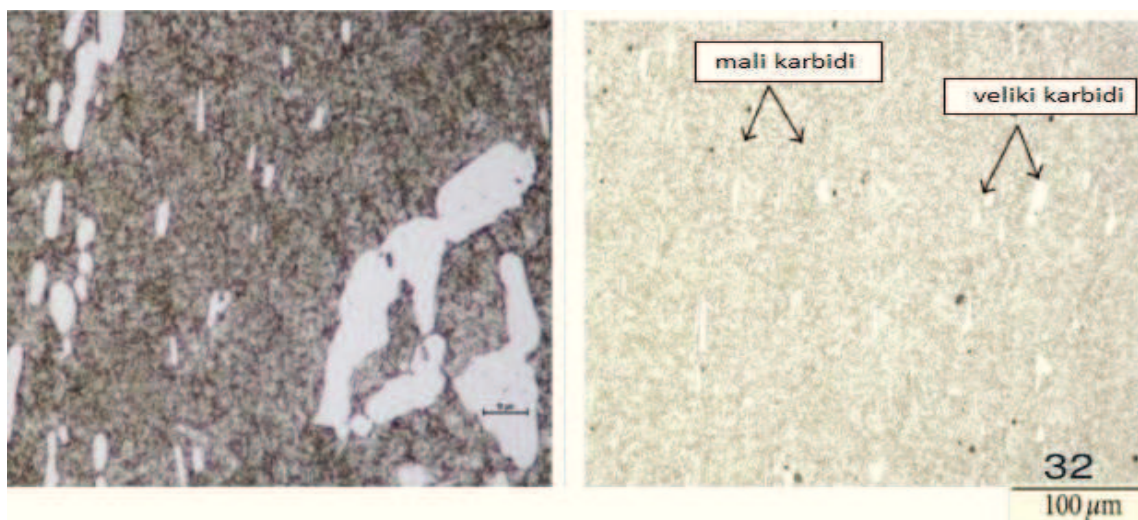
Opatija, May 16th-18th, 2018

<http://www.simet.hr/~foundry/>

metalnih zrna pri čemu dolazi do slabljenja granica zrna što se negativno održava na udarnu žilavost [12,22].

Kod visokih temperatura uslijed kaljenja i sekundarnog otvrdnjavanja pri otpuštanju dolazi do slabljenja granice zbog krupnozrnate strukture. To znači da je rast zrna nepovoljan gdje je prisutna martenzitna struktura, jer dolazi do povećanog sadržaja ugljika u martenzitu, a kao posljedica toga je pad čvrstoće i udarne žilavosti. Ukoliko u strukturi alatnog čelika postoje pojedinačna krupna zrna karbida, ona neće u velikoj mjeri utjecati na osobine alata, ali problem se javlja ukoliko se krupna zrna karbida pojavljuju u grupama i u većem broju. Nastankom sitnozrnate strukture karbidnih čestica na granicama zrna veći je otpor prema stvaranju pukotina i loma [23].

U toku plastične deformacije, dimenzije karbidnih faza se smanjuju, ali nakon izvedene plastične deformacije ne postoji više utjecaj na formiranje veličine karbida [3,24]. Ipak, na nastanak krupnih karbida najviše utječu procesi pri proizvodnji, odnosno sastav čelika, dimenzija odljevka, kristalizacija i dr. Karbidna zrna su uglavnom ovalnog oblika, iako se u strukturi alatnih čelika mogu pojaviti uglati karbidi koji nepovoljno djeluju na svojstva alatnih čelika (slika 5).



Slika 5. Nejednolika raspodjela karbida u alatnom čeliku [25]

Kako je navedeno, legirajući elementi, tzv. karbidotvorci se najčešće spajaju s ugljikom u karbide Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , W_2C , WC , Mo_2C , VC , V_4C_3 , TiC , TaC , NbC , Fe_3C i dr., ali mogu također supstituirati u kristalnu rešetku željeza te stvarati intermetalne spojeve, odnosno faze sa strukturom različitom od strukture polaznih metala.

Krom je sklon formiranju intermetalnih faza koje djeluju negativno na svojstva alatnih čelika. U kombinaciji s ugljikom i dušikom može jako povisiti čvrstoću, a smanjiti žilavost i korozivsku postojanost. Nikal utječe na kinetiku nastanka intermetalne faze iako ne promiče njihovo formiranje. Intermetalne faze pojavljuju se u primarnoj kristalizaciji i njihov raspored formiran je pri lijevanju. Raspored intermetalnih faza je uglavnom ravnomjeran, dimenzije čestica faza su male, ali kao i kod karbidnih faza, zadržava se rast zrna. Slika 6 prikazuje



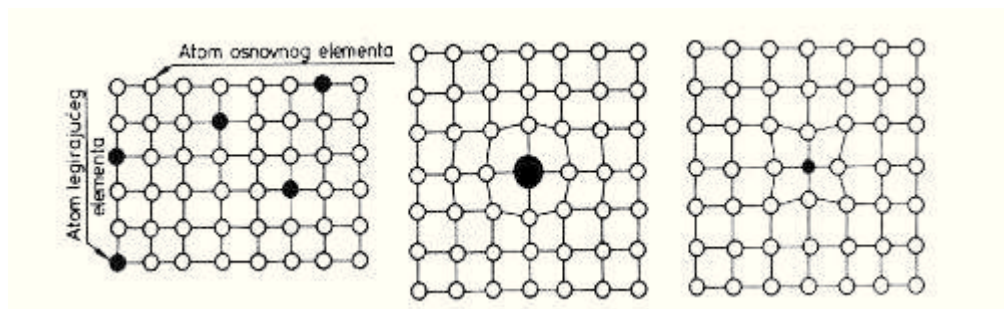
17th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE

Hi-tech casting solution and knowledge based engineering

Opatija, May 16th-18th, 2018

<http://www.simet.hr/~foundry/>

kristalnu rešetku u kojoj je vidljivo kako se atomi jednog elementa mogu zamijeniti atomom drugog elementa. Intermetalni spojevi nastaju kada su fizikalne osobine legura različite od njihovih osobina kod komponenata. Kod metalurških procesa legure reagiraju kao smjesa komponenata, dok u procesu isparavanja legure dolazi do raspada intermetalnog spoja na njegove sastavne komponente [26].



Slika 6. Formiranje intermetalne faze [26]

Najznačajnije intermetalne faze koje mogu biti prisutne u alatnim čelicima su [3,12,23]:

- tip $(Fe, Co)_7(W, Mo)_6$ pojavljuje se kod alatnih čelika koji su legirani kobaltom, volframom i molibdenom;
- tip $Fe_3W(Fe_3Mo_2)$ pojavljuje se također u alatnim čelicima kao i kod prethodnog tipa;
- tip $(NiFe)_3Ti$ pojavljuje se u alatnim čelicima koji su legirani niklom i titanom;
- tip $(Ni, Fe, Cr)_3(Ti, Al)$ pojavljuje se u čelicima legiranim niklom, kromom, titanom i aluminijem;
- tip $(Fe, Ni, Co)_7(Mo, W)_6$ pojavljuje se u čelicima sistema Fe-Co-Mo niklom i titanom, a
- tip $(Fe, Ni, Co)_2Mo$ može biti prisutan najčešće kod martenzitnih čelika.

ZAKLJUČAK

U ovom radu dan je pregled utjecajnih elemenata pri termodinamičkim metalurškim procesima alatnih čelika. Za razvoj naprednih materijala potrebno je težiti strukturnoj stabilnosti, dobrim mehaničkim i korozivnim svojstvima. Odabirom odgovarajućeg kemijskog sastava može se izbalansirati udio elemenata koji sudjeluju u procesu proizvodnje alatnih čelika te tako postići što kvalitetnija svojstva. Jedan od osnovnih razloga zbog čega se legiraju alatni čelici su postizanje kvalitetnijih i toplinski stabilnijih karbida koji doprinose kvaliteti, odnosno daju višu tvrdoću i otpornost na trošenje u radnim uvjetima. Osim radnih zahtjeva, alatni čelici su izloženi povišenim temperaturama koje mogu nepovoljno djelovati na svojstva alatnog čelika, odnosno mogu prouzročiti pad čvrstoće i tvrdoće, što je još jedan razlog zašto bi se trebalo težiti ostvarenju prikladnog kemijskog sastava te pritom omogućiti dodatno oplemenjivanje različitim tehnikama obrade ukoliko se to prema propisima proizvodnje zahtjeva. Zbog toga, važno je nastaviti istraživanja u smislu poboljšanja svojstava alatnih čelika, jer moderan razvoj industrije bez ovih materijala bio bi gotovo nezamisliv. Tako bi se osigurala bolja kvaliteta i duži vijek trajanja alata, ali i omogućili manji troškovi u proizvodnji.



17th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE

Hi-tech casting solution and knowledge based engineering

Opatija, May 16th-18th, 2018

<http://www.simet.hr/~foundry/>

LITERATURA

- [1] G. Roberts, G. Krauss, and R. Kennedy, Tool Steels, 5th ed., ASM International, Materials Park, 1998.
- [2] M. Novosel, F. Cajner, D. Krumes, Alatni materijali, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1996.
- [3] P. M. Novotny, M. K. Banerjee, Tool and Die Steels Introductory Article, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2016, Current as of 30 March 2016.
- [4] T. Kostadin, Čelici i željezni ljevovi, Materijali II, Interna skripta, Karlovac, 2017.
- [5] W. E. Bryson, Heat treatment, selection and application of tool steels, 2nd Edition, Hanser Publications, Cincinnati, 2013.
- [6] R. W. Staehle, Engineering with advanced and new materials, Materials Science and Engineering: A, 198 (1995) 1-2, pp. 245-256.
- [7] A. Molinari, M. Pellizzari, S. Gialanella, G. Straffelini, K. H. Stiasny, Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels, Journal of Materials Processing Technology, 118 (2001), 1-3, pp. 350-355.
- [8] K. Hofmann, F. Neubauer, M. Holzer, V. Mann, F. Hugger, S. Roth, M. Schmidt, Effect of Laser Beam Alloying Strategies on the Metallurgical and Mechanical Properties of Hot Forming Tool Steels, Physics Procedia, 83 (2016) pp. 264-276.
- [9] L. Ugrin, Dobivanje, svojstva i upotreba čelika, Završni rad, Split, 2016.
- [10] T. Filetin, Pregled razvoja i primjene suvremenih materijala, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2000.
- [11] I. Zdelarec, Utjecaj dubokog hlađenja na pojave pri popuštanju brzoreznog čelika, Završni rad, Zagreb, 2010.
- [12] B. Dobranić, Trošenje dijelova građevinskih strojeva, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [13] Ž. Stojanović, S. Stanisavljev, S. Radosavljević, Primena postupka vanadiranja u funkciji produženja radnog veka delova, Zaštita materijala, 54 (2013) 2, pp. 266-271.
- [14] D. Landek, Autorizirane podloge za predavanja iz područja alatnih materijala, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [15] D. R. Gaskell, Introduction the Thermodynamics of Materials, Washington, DC, Taylor and Francis, 1995.
- [16] N. Birks, G. H. Meier, F. S. Pettit, Introduction to the high-temperature oxidation of metals, 2nd Edition, University of Pittsburgh, Cambridge, 2006.
- [17] R. De Hoff, Thermodynamics in Material Science, Taylor and Francis Group, New York, USA, 2006.
- [18] J. O Andersson, T. Helander, L. Höglund, P. Shi, Bo Sundman, Thermo-Calc & DICTRA, computational tools for materials science, Calphad, 23 (2002) 2, pp. 273-312.
- [19] R. Duan, J. X. Deng, X. Ai, Y. Y. Liu, H. Chen, Experimental assessment of derivative cutting of micro-textured tools in dry cutting of medium carbon steels, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 92 (2017) 9-12, pp. 3531-3540.



17th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE

Hi-tech casting solution and knowledge based engineering

Opatija, May 16th-18th, 2018

<http://www.simet.hr/~foundry/>

- [20] D. C. Ko, S. G. Kim, B. M. Kim, Influence of microstructure on galling resistance of cold-work tool steels with different chemical compositions when sliding against ultra-high-strength steel sheets under dry condition, *Wear*, 338 (2015) pp. 362-371.
- [21] S. J. Huang, Tribological properties of the low-carbon steels with different microstructure processed by heat treatment and severe plastic deformation, *Wear*, 271 (2011) pp. 705-711.
- [22] N. S. Kalsi, R. Sehgal, V. S. Sharma, Cryogenic Treatment of Tool Materials: A Review, *Materials and Manufacturing Processes*, 25 (2010) pp. 1077-1100.
- [23] H. Kim, J. Kang, D. Son, T. Lee, K. Cho, Evolution of carbides in cold-work tool steels, Original Research Article, *Materials Characterization*, 107 (2015), pp. 376-385.
- [24] D. Toboła, W. Brostow, K. Czechowski, P. Rusek, Improvement of wear resistance of some cold working tool steels, *Wear*, 382 (2017) pp. 29-39.
- [25] U. Tahir, Cold Work Tool steel, presentation, NED University of Engineering and Technology, 2014.
- [26] N. Haračić, Savremeni materijali za mašingradnju, Univerzitet u Zenici Fakultet za metalurgiju i materijale, Zenica, 2012.

Zahvala

Ovaj rad je financiran sredstvima Sveučilišta u Zagrebu u okviru Financijske potpore istraživanju „Dizajn i karakterizacija inovativnih inženjerskih legura“, šifra: TP167.