

# Prispevek k osvajanju jekel z dualno mikrostrukturo

UDK: 669.017:620.18  
ASM/SLA: M26, 27

Aleksander Kveder



Z laboratorijsko izdelavo talin določenih sestav in z ustreznimi preiskavami smo ugotavljali lastnosti jekel, predvsem s takimi sestavami, ki ne zahtevajo uporabe uvoznih ferozlitin. Bloke talin smo izvaljali v trakove, jih toplotno obdelali in izvršili ustrezne preiskave.

## A. UVOD

Uvodni del z literaturnimi podatki bo zelo kratek, ker je že bil objavljen pregledni članek B. Pretnarja (IMV) (Železarski zbornik, 1983, 17, št. 3), v katerem je avtor zbral večino rezultatov in praktičnih izkušenj, ki so jih do sedaj dosegli s temi jekli v svetu.

Feritno-martenzitna jekla ali dualna jekla se vključujejo v skupino nizkoogljicnih in malolegiranih jekel z visoko trdnostjo. Za HSLA (High Strength Low Alloy) jekli, katerih odlične trdnostne lastnosti dosegamo z izločevalnimi efekti mikrolegiranih elementov (Nb, V, Ti), so se pojavila ta »dual phase« jekla s čisto drugačnimi lastnostmi in uporabnostjo. Ta jekla namreč pokažejo svoje prednostne lastnosti šele pri uporabi, pri uvijanju, zavijanju, vtiskanju, prešanju, valjanju — torej povsod tam, kjer je treba pločevino bolj ali manj močno deformirati, da pridemo do končnega izdelka. Jeklo ima namreč lastnost, da se pri vsaki hladni deformaciji oziroma preoblikovanju močno utrjuje. Pravimo, da ima visok eksponent utrjevanja. Zato ni čudno, da je to jeklo našlo svoje mesto najprej na področjih, kjer sta pomembna teža in energija. Sedaj se za ta jekla, ki jih izdelujejo največ do debeline 6 mm (večinoma pa precej manj), največ zanima avtomobilska industrija.

Ta jekla niso več samo »modna muha« raziskav, temveč so že postala stvarnost. Zaradi svojih specifičnih lastnosti jih uporabljajo v avtomobilski industriji za izdelavo koles, nosilcev, opornikov itd.

Ker imamo drago avtomobilsko proizvodnjo in zamotano železarsko proizvodnjo izdelkov, bi bilo prav, da se z več poguma vključimo v proizvodnjo tega novega materiala. Cilj te raziskave je bil, da mu z določenimi predpreizkusi utremo pot tudi pri nas. Kljub bogatim literaturnim podatkom ta pot ni lahka, saj v sedanjih časih ne moremo kopirati tujih jekel, ki vsebujejo nekatere idealne elemente, kot so Mo, V. Zato je bil naš namen, da s ferozlitinami domače proizvodnje ustvarimo jeklo dualne strukture z vsemi njegovimi značilnimi lastnostmi, ki bi obenem ustrezalo tehnološkim možnostim železarne. V opisu naloge, ki sledi, nam je to delno uspelo, nekaj pa tudi ne. Kljub temu mislimo, da gremo lahko na pravi preizkus izdelave tega jekla v industrijskem merilu.

## B. OPIS PREISKAV IN REZULTATI

### 1. Taline

Naša osnovna ideja je bila, da naj bi izdelali preizkusne taline naslednje sestave:

0,03—0,09 % C  
~ 1 % Si  
~ 1,5 % Mn  
~ 0,6 % Cr

(V proizvodnih razmerah bi bil priporočljiv tudi dodatek cera, za kontrolo izoblikovanosti vključkov. V naših razmerah to ni bilo potrebno, ker smo delali z zelo čistim vložkom (0,015 % P in 0,015 % S)).

Sestave talin so prikazane v tabeli 1.

Tabela 1: Sestave preizkušanih talin

Jeklo	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al <sub>i</sub>
Dual 1	0,09	1,48	1,49	0,01	0,016	0,59	0,013
Dual 2	0,03	1,40	1,62	0,01	0,016	0,60	0,020
Dual 3	0,03	1,13	1,64	0,016	0,016	0,68	0,120
Dual 4	0,05	0,85	1,48	0,018	0,014	0,66	0,025

### 2. Taljenje in predelava talin

Taline smo izdelali v 20-kilogramski indukcijski peči. Ingoti so bili težki okoli 18 kg. Najprej smo jih prekovali v ploščate slabe, debeline okoli 50 mm, nato pa prevaljali v trakove, debeline 2,7 do 3 mm. Začetne temperature valjanja so bile okoli 1250°C. Trakovi so se po valjanju ohlajali na zraku. V nadaljnjem označujemo to stanje kot »valjano«. Razen tega smo preizkušali te trakove tudi v normaliziranem stanju in več stanjih medkritičnega žarjenja. Pred valjanjem slabov v trakove smo slabe površinsko predskoblali, predvsem zaradi lepše površine in da odpravimo razogljichenje. Dejansko so imeli vsi izvaljani trakovi zelo lepe površine, pa tudi razogljichenja so bila minimalna.

### 3. Preliminarni preizkusi medkritičnih žarjenj

Iz izvaljanih trakov smo najprej izrezali kose dimenzij okoli 100 × 100 mm za preizkuse različnih toplotnih obdelav, predvsem medkritičnih žarjenj in za metalografske preiskave. V nadaljnjem označujemo medkritično žarjenje vzorcev in preizkušancev z oznako MŽ in dodatno s temperaturo žarjenja in načinom hlajenja.

Vzorci 100 × 100 mm smo po rezultatih dilatometrijskih krivulj žarili na različnih temperaturah, jih različno

ohlajevali in merili trdote HV. Odločil je seveda metalografski pregled, ki je pokazal bolj ali manj pravilna sorazmerja med feritom in martenzitom. Vsi navedeni rezultati so prikazani na tabeli 2.

Moramo poudariti, da smo vzorce žarili na temperaturah le kratek čas, po segretju na temperature le še nekaj minut.

Tabela 2: Trdote po različnih toplotnih obdelavah

Toplotna obdelava	Trdote HV pri talinah			
	Dual 1	Dual 2	Dual 3	Dual 4
MŽ 760° voda	257			
MŽ 760° zrak	266			
MŽ 780° voda	286		226	216
MŽ 780° olje	282		220	212
MŽ 780° zračni tok	265		212	214
MŽ 780° zrak	270		210	206
MŽ 800° voda	304	239		
MŽ 800° olje	285			
MŽ 800° zračni tok	281			
MŽ 800° zrak	279	247		
MŽ 825° voda		245		
MŽ 825° olje		245		
MŽ 825° zračni tok		233		
MŽ 825° zrak		240		

Tabela 3: Mehanske lastnosti Dual jekel

Jeklo	Toplotna obdelava	$R_{0,2}$ N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	Raztezek %
Dual	Valjano	559	781	14
	Normaliz.	401	715	19
	MŽ 750 voda	491	788	—
	MŽ 750 zrak	451	733	—
	MŽ 780 voda	517	835	15
	MŽ 780 zrak	618	829	15
	MŽ 800 voda	739	989	15
	MŽ 800 zrak	710	842	10
Dual	Valjano	574	698	12
	Normaliz.	385	623	21
	MŽ 750 voda	440	588	16
	MŽ 750 zrak	448*	574	22
	MŽ 780 voda	429	659	13
	MŽ 780 zrak	398	600	—
	MŽ 800 voda	492	700	—
	MŽ 800 zrak	500	660	17
Dual	Valjano	553*	636	17
	Normaliz.	326	516	—
	MŽ 750 voda	512	626	16
	MŽ 750 zrak	307	560	13
	MŽ 780 voda	371	655	18
	MŽ 780 zrak	316	619	20
	MŽ 800 voda	462	712	17
	MŽ 800 zrak	331	612	24
Dual	Valjano	560*	662	15
	Normaliz.	289	526	26
	MŽ 750 voda	367	587	—
	MŽ 750 zrak	346	546	17
	MŽ 780 voda	371	613	17
	MŽ 780 zrak	384	596	17

Opomba:  
Številki z zvezdico pomenita naravno mejo plastičnosti.

Kljub temu da smo trakove po valjanju hladili na zraku, imajo že v tem stanju dokaj visoke trdote — od 200 do 260 HV. Vidi se, da silicij precej utrdi feritno matrico.

Uporabili smo štiri načine ohlajanja:

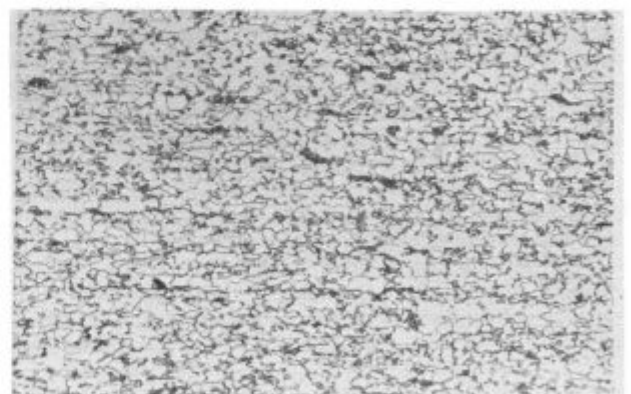
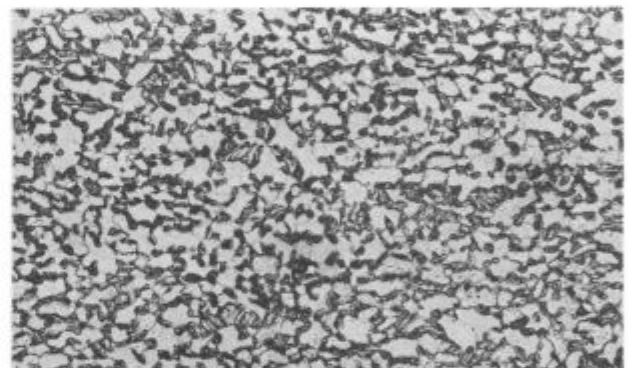
- vodo
- olje
- zračni tok in
- mirujoči zrak.

Jeklo Dual 1 ima visoka C in Si in se delno transformira že pri 760°. Pri 780 in 800° pa pridobi previsoke trdote. Jeklo Dual 2 ima sicer nižji C, vendar preveč Si, zato se transformacija prične precej višje. Trdote so tudi precej visoke, ker Si močno utrjuje ferit.

Jekli Dual 3 in Dual 4 imata optimalni sestavni in najbolj ustrezne trdote pri 780°C. Razlika med hitrim in počasnejšim hlajenjem ni velika.

#### 4. Mehanske lastnosti

Iz trakov vseh štirih talin smo izdelali vzdolžne preizkušance in izvedli natezne preizkuse. Vzorci so bili v valjanem stanju, normaliziranem in medkritično žarjenih stanjih pri dveh ali treh temperaturah, pri vsaki temperaturi z dvema skrajnima hitrostma ohlajanja — v vodi in na mirujočem zraku. Rezultati so navedeni v tabeli 3.



Slika 1:

Zgoraj: Talina Dual 1, medkritično žarjeno na 800°, hlajeno v vodi

Spodaj: Talina Dual 2, medkritično žarjeno na 780°, hlajeno z zračnim tokom

Jeklo Dual 1 z visokima C in Si je po vseh medkritičnih žarjenjih pretrdo, premajhne ima tudi raztezke. Jeklo Dual 2 ima sicer primerne natezne trdnosti, vendar precej visoke meje plastičnosti, kar lahko povzroča težave pri izdelavi izdelkov s hladnim deformiranjem.

Najbolj primerne lastnosti imata jekli Dual 3 in 4. Ustrezne meje plastičnosti in trdnosti dosežeta že pri 750°, še boljše pa pri 780°C. Povprečne vrednosti meje plastičnosti so okoli 375 N/mm<sup>2</sup>, kar naj bi bilo za dualna jekla normalno. Obstoji pa razlika med vzorci, ki so bili hlajeni v vodi, in hlajenimi na mirujočem zraku — prvi imajo mejo plastičnosti okoli 415 N/mm<sup>2</sup>, drugi pa okoli 340 N/mm<sup>2</sup>. Pri natezni trdnosti je to razmerje 640:585 N/mm<sup>2</sup>. Pri toplotni obdelavi trakov v proizvodnji bo torej treba pospešiti hlajenje traku z zračnim tokom.

### 5. Strukture jekel

Strukture dualnih jekel sestojijo iz ferita in martenzita. Koliko je ene ali druge strukturne faze, je odvisno predvsem od količine ogljika v jeklu in temperature medkritičnega žarjenja.

Na sliki 1 sta prikazani dve značilni strukturi; jeklo Dual 2 s preveč ogljika in zato tudi preveč martenzita v strukturi, in jeklo Dual 3 z optimalno strukturo.

### C. SKLEPI

Osnovni motiv raziskave ni bil kopirati nekatere znane sestave dualnih jekel iz svetovne literature in teh-

nologije, temveč priti do preprostega dualnega jekla po sestavi, brez uvoznih surovin, vendar do jekla z lastnostmi, ki bi zadovoljilo naše potrebe. Dualna jekla imajo namreč take lastnosti, ki jih bo naša bodoča tehnologija težko zanemarila. To so bile v nekem smislu preliminarne preiskave, ki naj bi pokazale smer, v kateri naj bi začeli industrijske ali vsaj polindustrijske preizkuse. Preiskave smo izvedli z jekli iz domačih surovin: C, Si, Mn, Cr, event. Al, Ce in s tehnologijo, ki je pri nas možna. Ugotovili smo, da je proizvodnja dualnih jekel pri nas možna z legurami, ki jih imamo na razpolago, in s tehnologijo, ki nam to omogoča.

Predlagamo, da se izvede polindustrijski preizkus proizvodnje dualnega jekla v naslednjih razmerah:

Jeklo naj bi imelo naslednjo okvirno sestavo:

0,03 — 0,05 % C

0,80 — 1,0 % Si

1,40 — 1,60 % Mn

0,40 — 0,60 % Cr

(+ Al in za kontrolo oblike vključkov eventualno še dodatek Ce).

Jeklo naj se normalno izvalja (Blumming, Steckel), površinsko obdela, kot je normalno pred hladnim valjanjem, nato pa interkritično žari na dinamo liniji pri 760—780°C s hitrostjo, da bo trak le nekaj minut na ustrezni temperaturi. Zaželeno je pospešeno zračno hlajenje pri izhodu iz peči, posebno če bo debelina traku presežala 2,5 mm.

## ZUSAMMENFASSUNG

Das Grundmotiv dieser Forschungsarbeit war nicht einige aus der Fachliteratur bekannten Dualstähle zu kopieren, sondern zu einem der Zusammensetzung nach einfachem Dualstahl zu kommen ohne Importlegierungen jedoch zu einem Stahl mit den Eigenschaften die unseren Bedürfnissen entsprechen würden. Die Dualstähle haben nämlich solche Eigenschaften, dass diese von unserer zukünftigen Technologie nicht vernachlässigt werden dürften. Das waren im wahren Sinne Vorversuche, die die Richtung zeigen sollten in welcher die industriellen oder wenigstens halbindustriellen Versuche führen sollten. Die Untersuchungen sind an aus einheimischen Rohstoffen: C, Si, Mn, Cr, Al, Ce erzeugten Stählen und der Technologie die bei uns ohne weiters möglich ist durchgeführt worden. Die Möglichkeit der Herstellung der Dual Stähle auf

der einheimischen Basis ist durch diese Untersuchungen auch bestätigt worden.

Es wird vorgeschlagen einen halbindustriellen Versuch der Erzeugung des Dualstahles mit folgender Zusammensetzung durchzuführen: C 0,03—0,05 %, Si 0,80—1,0 %, Mn 1,4—1,6 %, Cr 0,40—0,60 %, Al und Ce zur Einschlussbeeinflussung.

Der Stahl sollte normal zu Band verwalzt werden und danach kontinuierlich bei 760—780°C interkritisch gegläht, mit einer Geschwindigkeit so, dass der Band nur einige Minuten der entsprechenden Temperatur ausgesetzt wird.

Erwünscht ist eine beschleunigte Luftkühlung beim Austritt aus dem Ofen, besonders bei einer Banddicke grösser als 2,5 mm.

## SUMMARY

The basic motive of the research was not to copy some known compositions of dual steel from the literature and the technologies of manufacturing, but to make a simple dual steel of such a composition that no raw materials need to be imported, but its properties should satisfy domestic demands. Dual steels has namely such properties that our future technology will hardly neglect them. Thus in some extent preliminary tests were made to show the direction of industrial or at least pilot-plant tests. The investigations were made with steel manufactured of domestic raw materials: C, Si, Mn, Cr, event. Al, Ce, and according to the technology which can be without problems applied with us, the findings confirmed that manufactur-

ing dual steel is possible with available alloys and technology. Thus the proposal is made for a pilot-plant test to manufacture dual steel with the following approximate composition: 0,03 to 0,05 % C, 0,80 to 1,0 % Si, 1,40 to 1,60 % Mn, 0,40 to 0,60 % Cr (+ Al, and eventually still addition of Ce to control the shape of inclusions). The steel should be normally rolled (blooming, Steckel), surface treated as it is usual before the cold rolling, then intercritically annealed on the dynamo line at 760 to 780°C with such a rate that the strip will be only few minutes at the corresponding temperature. Speeded air cooling at the furnace exit is desired especially if the strip thickness exceeds 2.5 mm.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной мотив исследования не был в копировании некоторых содержаний дуальных сталей известных из мировой литературы и технологии, а получить по составу обыкновенную дуальную сталь, без импортного сырья, но сталь с свойствами, которые бы удовлетворяли нашим требованиям. Дуальные стали именно имеют такие свойства, которые наша будущая технология едва ли могла пренебречь. Это были в некотором смысле предварительные исследования, которые бы указали направление, в котором бы надо начать промышленные, или же, хотя, полупромышленные исследования.

Исследования выполнялись с сталями изготовленные из домашнего сырья, имея в виду элементы: C, Si, Mn, Cr, также Al, Se и с технологией, которая в нашей практики вполне возможна. Установили, что производство дуальных сталей возможна с сплавами, которые мы имеем в распоряжении и с технологией, которая дает возможность выполнения производства этих сталей.

Автор работы предложил выполнить полупромышленное производство дуальной стали в следующих отношениях состава:

C	... 0,03—0,05 %
Si	... 0,80—1,00 %
Mn	... 1,40—1,60 %
Cr	... 0,40—0,60 %

(\*Al и для проверки формы включений также добавки Se).

Прокатка стали пусть выполняется нормальным способом (блюминг, стан Стеккеля), поверхностно обработается, как это нормально требуется перед холодной прокаткой, и после этого подвергается межкристаллическому обжигу на динамической линии при 760—780°C, с быстротой, чтобы лента была на соответствующей темп-ре лишь несколько минут. Желательно, чтобы воздушное охлаждение проката при выходе из печи велось ускоренно, в особенности, если толщина ленты превышала 2,5 мм.