

# Nerjavno jeklo za turbinske lopatice s 13% Cr

UDK: 669.14.018.8

ASM/SLA: SS-d

Bogdan Stocca Janez Mesec

Ugotavljali smo vpliv vsebnosti ogljika in niklja na lastnosti jekel za izdelavo vodnih turbin. Izdelali smo preiskave mehanskih lastnosti v litem, kovanem in poboljšanem stanju. Preiskali smo varilne sposobnosti jekel ter njihove mehanske karakteristike.

## SPLOŠNO

Jeklo s 13 % Cr že nekaj let uspešno uporabljamo za izdelavo raznih delov vodnih turbin, in to predvsem takih delov, ki so najbolj obremenjeni. Zaradi številnih prednosti je to jeklo v celoti nadomestilo druga jekla, ki so jih pred tem uporabljali v te namene. Te prednosti so naslednje:

1. visoke vrednosti trdnosti, meje plastičnosti, razmerje  $\sigma_v/\sigma_m$ , žilavosti in predvsem odlična odpornost proti utrujanju;

2. dobra korozijska obstojnost v utrujenem stanju materiala in zelo dobra odpornost proti kavitaciji;

3. velika odpornost proti abraziji in eroziji;

4. dobra varilna sposobnost.

Da bi zagotovili navedene lastnosti, se je razvilo jeklo, legirano:

— z nizko vsebnostjo ogljika zaradi zmanjšanja nevarnosti utrjevanja po varjenju;

— z nikljem, ki nam zagotavlja popolno martenzitno pretvorbo brez prisotnosti feritne faze, kar ugodno vpliva na preoblikovalnost in na korozijsko obstojnost;

— z molibdenom, ki izboljšuje korozijsko obstojnost;

— s 13 % Cr kot osnovnega elementa.

Do sedaj so turbinske lopatice izdelovali in jih še izdelujejo v litem stanju. Vlivanje lopatic pa ima svoje slabe strani, ki se kažejo predvsem v zunanjih luknjicah in notranjih mehurjih, kar povzroča nehomogenost odlitkov in veliko nevarnost, da bi prišlo zaradi teh napak do težkih okvar med obratovanjem turbin. Vlivanje pa prinaša še drugo težko pomanjkljivost, in sicer nevarnost večjih ali manjših deformacij, ki nastanejo pri ohlajanju odlitkov. Velike so tudi nevarnosti deformacij, ki lahko nastanejo pri varjenju lopatic in pri odstranjevanju raznih napak.

Zato, da bi se navedenim težavam, ki jih prinaša lito stanje, izognili in da bi izdelali strukturno ustrežnejše jeklo, smo prišli do zaključka, da bi jeklo najprej izvaljali v debelo pločevino, iz debele pločevine pa bi kasneje izdelovali lopatice z vročim oblikovanjem na stiskalnicah. Ker pa nam ni bilo poznano, kako se ta jekla obnašajo pri vroči predelavi in kakšne so njihove mehanske lastnosti v predelanem in toplotno obdelanem stanju, smo izdelali tozadevne preiskave.

V tem članku bomo objavili le rezultate mehanskih preiskav in rezultate, ki smo jih dosegli pri varjenju, medtem ko bomo rezultate preiskav plastičnosti pri temperaturah vročega preoblikovanja objavili v eni od naslednjih številok *Zelezarskega zbornika*.

## IZDELAVA SARŽ

Ker imata ogljik in nikelj primarni vpliv na prej navedene karakteristike, smo naše preiskave usmerili k iskanju vplivov teh dveh elementov na razne lastnosti tega jekla. Krom in molibden pa smo obdržali v konstantnih mejah. V ta namen smo izdelali šest različnih variant jekel z vsebnostjo ogljika 0,04 in 0,08 % ter niklja z 2, 4 in 6 %. Sarže smo izdelali v 5 kg VF talilni peči. Odlite bloke smo prekovali v palice, kvadratnega preseka 12 mm za preiskave zarezne udarne žilavosti, v palice premera 10 mm za ostale mehanske preiskave in v ploščice debeline 10 mm za preiskave varjenja. Kovali smo v temperaturnem območju 1100—900° C. Po končanem kovanju smo palice in ploščice ohlajevali na zraku do sobne temperature.

Sarže so imele naslednjo vsebnost elementov:

Tabela I.:

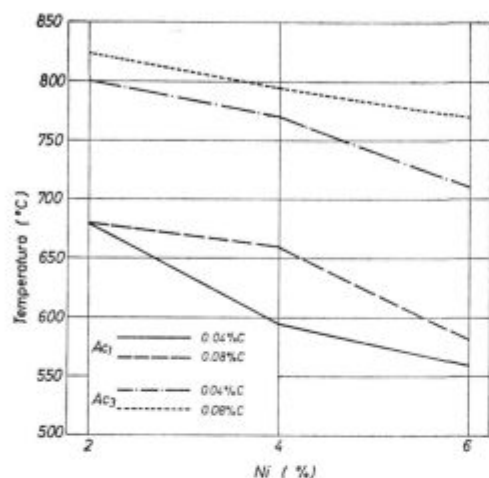
Varianta	Kemična analiza v %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
1	0,04	0,26	0,55	0,015	0,014	12,95	2,11	0,48
2	0,04	0,25	0,59	0,015	0,013	12,65	4,08	0,50
3	0,03	0,27	0,62	0,016	0,012	12,75	6,00	0,50
4	0,08	0,25	0,53	0,017	0,008	13,00	2,23	0,45
5	0,07	0,25	0,60	0,017	0,013	12,70	4,15	0,47
6	0,08	0,25	0,61	0,017	0,015	12,70	6,06	0,45

Bogdan Stocca, dipl. inž., višji strokovni sodelavec *Zelezarne Jesenice*

Janez Mesec, dipl. inž., višji strokovni sodelavec *Zelezarne Jesenice*

### DILATOMETRSKA ANALIZA

Preden smo pristopili k preiskavam mehanskih lastnosti in varjenja, smo želeli ugotoviti za posamezne variante temperature premenskih točk. Premenske točke smo določevali na Leitzovem dilatometru pri hitrosti ogrevanja 3—4° C/minuto in z naknadnim nekontroliranim ter sorazmerno hitrim ohlajanjem v pečici dilatometra. Atmosfera je bila sestavljena iz argona in vodika. Kakor je iz diagrama na sliki 1 razvidno, smo ugotovili naslednje:

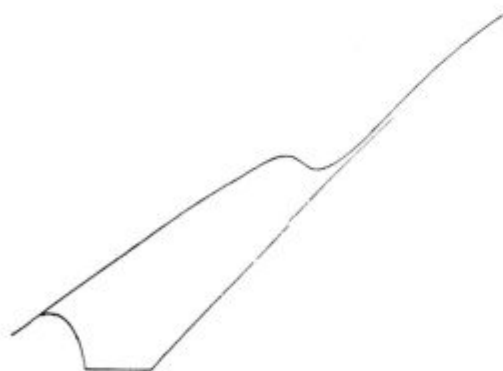


Slika 1

Gibanje premenskih točk  $A_{c1}$  in  $A_{c3}$  v odvisnosti od ogljika in niklja

Fig. 1

Shifting of  $A_{c1}$  and  $A_{c3}$  transformations points depending on carbon and nickel content



Slika 2

Potek dilatometrijske krivulje jekla variante 4

Fig. 2

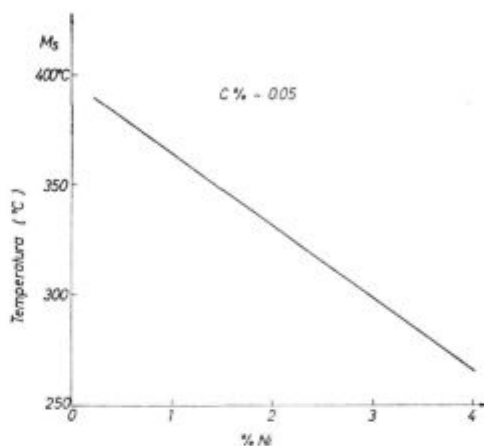
Dilatometric curves for steel No. 4

— pri enaki vsebnosti ogljika točke  $A_{c1}$  in  $A_{c3}$  padajo z naraščajočo vsebnostjo niklja,

— pri enakih vsebnostih niklja točke  $A_{c1}$  in  $A_{c3}$  naraščajo z naraščajočo vsebnostjo ogljika.

Slika 2 pa nam prikazuje dilatometrijsko krivuljo ogrevanja in ohlajevanja jekla variante 4, v kateri je razvidna pretvorba v martenzitno strukturo.

Dejanske temperature nastanka premene  $M_s$  v odvisnosti od vsebnosti niklja pri 0,05 % C nam prikazuje slika 3.



Slika 3

Spremembe točke  $M_s$  v odvisnosti od vsebnosti Ni

Fig. 3

Shifting of  $M_s$  point depending on the nickel content

### TRDOTA IN ŽILAVOST LITE STRUKTURE

Za preiskavo trdote lite strukture smo od vsake variante oddvojili po en blok. Te bloke smo prerežali na polovici višine prečno na glavno os bloka. Na brušenih presekih smo nato merili trdoto rob-sredina-rob in ugotovili naslednje vrednosti: tabela II.

Vrednosti trdote so precej nihale, vendar ni bilo opaziti, da bi bila trdota na robu višja od trdote v sredini bloka. Variante z višjo vsebnostjo ogljika so imele višjo trdoto. Vrednosti trdote so sorazmerno visoke. Poleg preiskav trdot smo na litih blokih izdelali še preiskave udarne zrezne žilavosti. Preizkušance smo izrezali iz sredine blokov, in sicer tako, da je presek ob zarezi preizkušanca ležal vzporedno z glavno osjo bloka. Preizkušance smo izdelali z DVM zarezo. Rezultati, ki smo jih ugotovili na normalnih preizkušancih, so bili naslednji: tabela III.

Tabela II.:

Varianta	1	2	3	4	5	6
HB	350—380	280—340	270—322	360—380	340—362	313—342

Tabela III.:

Varianta	1	2	3	4	5	6
$\rho$ DVM kpm/cm <sup>2</sup>	3—4	4—4,5	4—5	4,0	4—5	4,5

Tabela IV.:

Varianta	1	2	3	4	5	6
$\rho$ DVM kpm/cm <sup>2</sup>	6,3—6,8	7,8—8,0	8,6—9,0	6,8—7,3	8,9—9,4	8,0—8,6

### MEHANSKE LASTNOSTI V ŽARJENEM STANJU

Na vseh šestih variantah smo izdelali preiskave mehanskih lastnosti v žarjenem stanju. Kovane palice smo žarili pri temperaturi, ki smo jo zasledili v literaturi in v nekaterih tehničnih navodilih, to

Tabela V.:

Varianta	$\sigma_v$ kp/mm <sup>2</sup>	$\sigma_m$ kp/mm <sup>2</sup>	$\delta_5$ %	$\psi$ %	HB kp/mm <sup>2</sup>	$\rho_{DVM}$ pri 20 °C kpm/cm <sup>2</sup>
1	81,0	89,9	16	64,1	265	7,0—7,5
2	82,5	92,4	15	63,7	270	8,0—9,0
3	85,0	93,9	14	62,3	260	7,5—8,3
4	87,0	97,0	14	62,0	280	7,1—7,4
5	87,5	97,0	15	63,6	285	9,0—9,4
6	88,0	98,0	15	61,0	285	7,6—8,3

### POBOLJŠANJE

Izdelali smo še preiskave mehanskih lastnosti v popljšanem stanju. Na predhodno žarjenih preizkušancih smo izvedli najprej kaljenje s temperature 1000 do 1050° C. Po 15 minutnem zadrževanju na temperaturi kaljenja smo vzorce ohladili na zraku do sobne temperature. Kaljenje in kasnejše popuščanje smo izvedli na preizkušancih debeline 10 mm.

Ugotovili smo naslednje vrednosti trdote:

Tabela VI.:

Varianta	HR <sub>c</sub>	
	1000 °C	1050 °C
1	38—41	38—42
2	40—41	39—41
3	39—42	39—42
4	41—43	43—44
5	42—43	42—43
6	42—43	41—42

### ZILAVOST KOVANEGA STANJA

Preizkušance za preiskave udarne zarezne žilavosti smo izdelali iz enega dela palic, ki smo jih po kovanju ohlajevali prosto na zraku. Preizkušance smo porušili na Charpyjevem kladivu. Kakor je iz naslednje tabele razvidno, smo dosegli precej visoke vrednosti. Nekoliko nižje so le vrednosti variant z nižjo vsebnostjo niklja. Tabela IV.

je pri 800° C. Palice smo držali 2 uri na temperaturi in nato ohlajevali počasi v peči do sobne temperature.

Rezultati, ki smo jih dosegli, so navedeni v tabeli V. Razviden je precejšen raztros vrednosti žilavosti.

Iz navedenih tabelaričnih podatkov je razvidno naslednje:

— ni bistvene razlike v trdoti med preizkušanci, ki so bili kaljeni s temperature 1000° C ali 1050° C;

— vsebnost niklja (od 2—6 %) nima skoraj nobenega vpliva na trdoto jekla;

— variante z višjo vsebnostjo ogljika H imajo le nekoliko višje trdote.

Poleg preiskav trdote smo na kaljenih preizkušancih izdelali še metalografske analize. Glede na temperaturo kaljenja in varianto nismo ugotovili bistvenih razlik v strukturah. Slika 4 nam prikazuje kaljeno strukturo variante 2 in slika 5 variante 5.

Glede na prej navedene ugotovitve o vplivu temperature na trdoto materiala in glede na dosežene strukture smo si za nadaljnje preiskave izbrali temperaturo kaljenja 1050° C, ki jo tudi priporoča literatura.



Slika 4

Martenzit + bainit. Kaljeno s 1050 °C — 100 ×

Fig. 4

Martensite and bainite. Quenched from 1050 °C 100 x

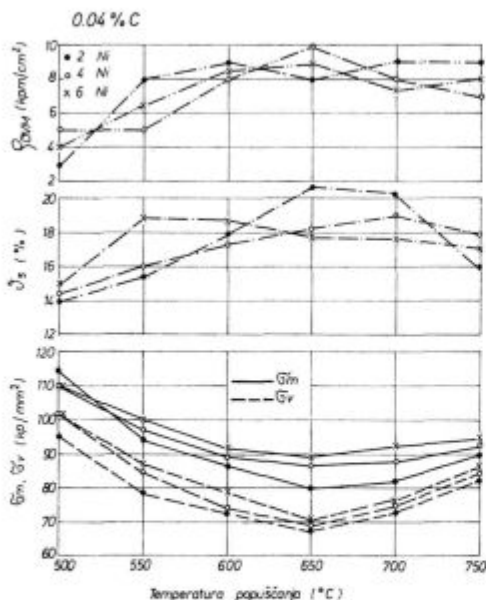


Slika 5

Martenzit + bainit. Kaljeno s 1050 °C — 100 ×

Fig. 5

Martensite and bainite. Quenched from 1050 °C 100 x

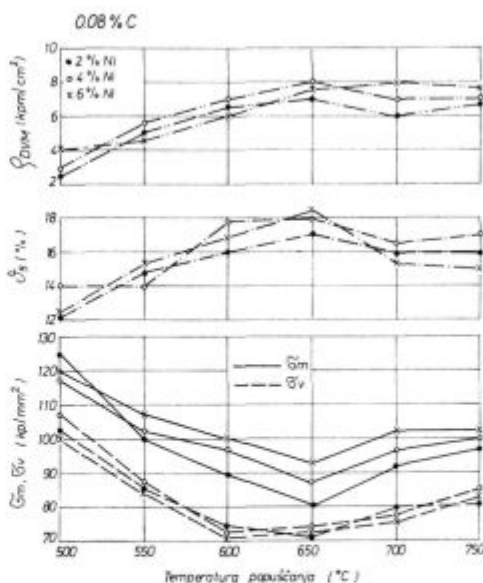


Slika 6

Mehanske lastnosti v poboljšanjem stanju

Fig. 6

Mechanical properties in tempered state



Slika 7

Mehanske lastnosti v poboljšanjem stanju

Fig. 7

Mechanical properties in tempered state

Da bi ugotovili potek mehanskih lastnosti v poboljšanjem stanju, smo kaljene preizkušance popuščali v temperaturnem območju 500—750° C s 60-minutnim zadrževanjem na temperaturi in s počasnim ohlajevanjem v peči.

Rezultati, ki smo jih dosegli, nam prikazujeta sliki 6 in 7.

Iz navedenih diagramov je razviden ugoden potek mehanskih lastnosti v temperaturnem območju med 600—650° C.

## VARJENJE

Ena od glavnih karakteristik martenzitnega nerjavnega jekla s 13 % Cr naj bi bila njegova dobra varilna sposobnost. Z varjenjem naj bi se na turbinah odpravile razne napake, ki nastanejo zaradi erozije, abrazije, kavitacije ter druge napake, med katerimi moramo omeniti razpoke zaradi utrujanja itd. Se bolj pomembno pa je varjenje posameznih delov turbin v celoto. Nič manj pomembne niso mehanske lastnosti varov. Vari naj bi imeli naslednje karakteristike:

- trdota naj ne bi bila v nobenem delu vara višja od 400 HB,
- vrednosti žilavosti vara ne bi smele biti nižje od 6 kpm/cm<sup>2</sup>.

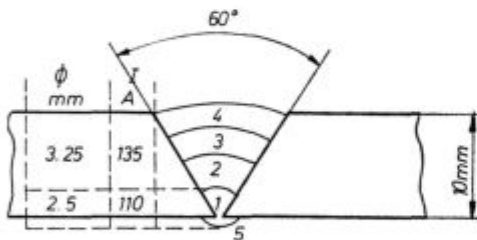
Varjenje smo preiskovali na vzorcih vseh šestih variant. Kot dodajni material smo uporabljali elektrodo, ki jo proizvaja železarna Jesenice pod imenom Inox 13/6 Fe, torej elektrodo, ki ima naslednjo sestavo:

H	0,05— 0,07 %
C	0,06— 0,08 %
Si	0,25— 0,35 %
Mn	0,45— 0,55 %
Cr	12,0 —13,0 %
Ni	5,0 — 5,5 %
Mo	0,45— 0,55 %

To elektrodo smo namenoma izbrali zaradi ugodnega vpliva niklja na stabilizacijo avstenita. Vseh šest variant smo varili pod naslednjimi pogoji:

- debelina osnovnega materiala 10 mm
- oblika zvara V zvar
- odprtina špranje 1 mm
- dimenzija elektrod  $\varnothing$  3,25 mm
- dimenz. elektrod za koren in popravo korena  $\varnothing$  2,5 mm
- položaj varjenja vodoravni
- vrsta toka enosmerni (+)
- predgrevanje 100° C
- jakost in napetost varilnega toka za dimenzijo elektrode  $\varnothing$  3,25 mm 135 A/22 V
- jakost in napetost varilnega toka za dimenzijo elektrode  $\varnothing$  2,5 mm 110 A/22 V
- ohlajanje vmesnih slojev na 150° C
- število varov 3 + 2 = 5

Ostale podatke vara nam prikazuje slika 8.

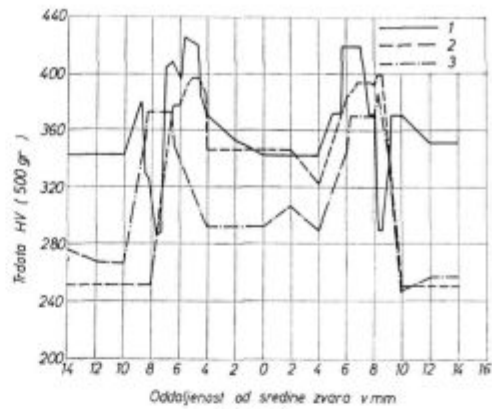


Slika 8  
Shema pogojev varjenja  
Fig. 8  
Scheme of the welding parameters

Na vseh izdelanih varih smo ugotavljali potek trdote po vsej širini vara, in to na srednjem delu, gledano po višini vara. Rezultate, ki smo jih dosegli na toplotno neobdelanih varih, nam prikazuje sliki št. 9 in 10.

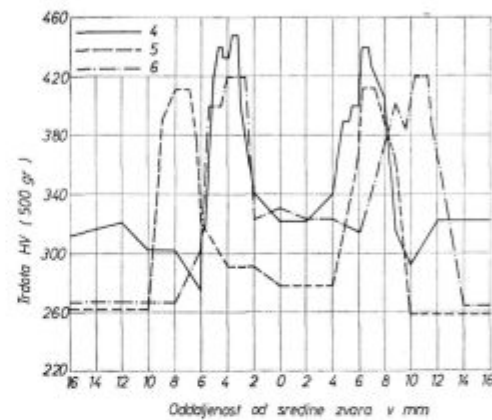
Iz navedenih diagramov je razvidno naslednje:

- trdote varov variant z višjo vsebnostjo ogljika (0,08 %) so višje od trdot variant z nižjo vsebnostjo ogljika (0,04 %),
- z naraščajočo vsebnostjo niklja in pri enaki vsebnosti ogljika trdota vara pada,
- trdota po preseku vara zelo niha. Najvišjo trdoto smo dosegli v prehodni coni, najnižjo pa v sredini vara.



Slika 9  
Potek trdot varov pri variantah 1, 2, 3

Fig. 9  
Hardnesses of welds in variants Nos. 1, 2, and 3



Slika 10  
Potek trdot varov pri variantah 4, 5, 6

Fig. 10  
Hardnesses of welds in variants Nos. 4, 5, and 6

— pri variantah z nizko vsebnostjo niklja (2 % Ni) opazimo močan padec trdote v prehodni coni, ki se drži osnovnega materiala, verjetno zaradi prehoda ogljika iz feritne faze v avstenitno.

Upoštevajoč dejstvo, da obstoji pri nizki vsebnosti niklja (2 % Ni) nevarnost nastanka feritne strukture, pri višjih vsebnostih (6 % Ni) pa nevarnost nastanka prevelikih količin zaostalega avstenita, kar vpliva na zmanjšanje razmerja med mejo plastičnosti in trdnostjo, in na osnovi vseh do sedaj ugotovljenih mehanskih lastnosti smo se odločili, da bomo preiskovali žilavost le na jeklu variante 5, uporabljajoč kot dodajni material elektrode Inox 13/6 Fe.

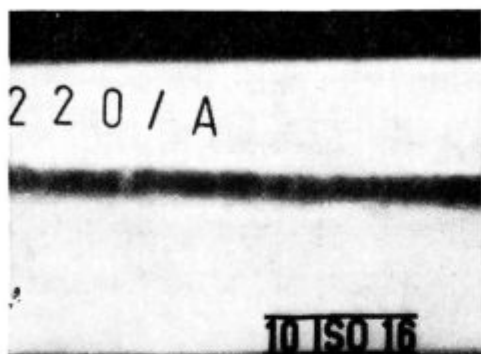
Rezultati, ki smo jih dosegli na toplotno neobdelanih varih, so bili naslednji:

Tabela II

	$\rho_{DVM}$ kpm/cm <sup>2</sup>
Osnovni material	7,8—8,4
Prehodna cona	6,0—6,5
Var	5,5—5, 5—6,0 5—6

Poleg navedenega smo izdelali še rentgenski posnetek takega vara, in kakor je iz slike 11 razvidno, so vari brez sleherne razpoke ali druge napake. Rentgenski posnetki so bili izdelani pod naslednjimi pogoji:

140 KV  
4,6 mA  
2 minuti



Slika 11  
Rentgenski posnetek vara  
Fig. 11  
X-ray picture of the weld

## ZAKLJUČEK

Pri preiskavah vpliva ogljika in niklja na fizikalne in mehanske lastnosti nerjavega jekla s 13 % Cr v različno obdelanem stanju smo ugotovili naslednje:

1. Točki  $Ac_1$  in  $Ac_3$  padata z naraščajočo vsebnostjo niklja.
2. Trdota lite strukture je pri variantah z nižjo vsebnostjo ogljika in enaki vsebnosti niklja, nižja.
3. Ni bistvenih razlik v vrednosti udarne zarezne žilavosti med posameznimi variantami lite strukture. Vrednosti žilavosti so nizke.
4. Ugodne so vrednosti udarne zarezne žilavosti vseh variant v kovanem stanju. Nekoliko nižja je le žilavost variante 1 in 4.
5. Ugodne so vse mehanske lastnosti v žarjenem stanju.
6. Variante z višjo vsebnostjo ogljika imajo nekoliko višjo trdoto v kaljenem stanju.
7. Najugodnejše rezultate pri popuščanju smo dosegli v temperaturnem območju med 600–650° C.
8. Trdota v prehodni coni vara močno narašča.
9. Trdota varov ni nikjer višja od 440 HV (415 HB), vendar zelo niha.
10. Vari, izdelani iz elektrode InOX 13/6 Fe, so brez napak.
11. Žilavost varov zelo niha.

## Literatura

1. M. M. GLEIGNAUD — Note an sujet des eciers a 13 % de chrome. Revue de metallurgie — November 1966
2. Georg Fischer (Schweis), Hochfester: Stahlguss auf der Basis von 13 % Chrom mit gutes Schweissbarkeit Information
3. Zeitschrift für Schweisstechnik 1968, Volumen 12, stran 369–391

## ZUSAMMENFASSUNUG

Nichtrostender Stahl mit 13 % Cr wird für die Herstellung der Wasserturbinenschaukeln angewendet. Die Schaukeln werden im Giessverfahren hergestellt. Um die Nachteile des Gusszustandes zu entfernen und die Stahleigenschaften zu verbessern, sind Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften und des Schweißens am verformten Stahl durchgeführt worden. Es sind sechs verschiedene Varianten der Stahlzusammensetzung mit

einem verschiedenen Kohlenstoff und Nickelgehalt hergestellt und deren Einfluss auf die Stahleigenschaften bestimmt worden. Gute Eigenschaften sind im geschmiedeten und vergüteten Zustand festgestellt worden. Die Anlasstemperatur betrug von 500–750 °C. Geschweisst wurde mit einer umhüllten Schweißelektrode INOX 13/6 Fe, die Härte und die Zähigkeit haben ausreichende Werte erreicht.

## SUMMARY

Stainless steel with 13 % Cr is used for turbine blades. They are cast. In order to eliminate deficiency of the cast state and to improve the steel properties, the mechanical properties and weldability of worked steel were investigated. Six steel with various carbon and nickel contents were manufactured to determine the influence of the con-

tents of both alloying elements. Good properties were found in forged and tempered state. The samples were tempered in the 500 to 750 °C interval. INOX 13/6 Fe electrode was applied for welding and satisfactory hardnesses and toughnesses were achieved.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нержавеющая сталь с 13 % Cr употребляется для изготовления лопаток паровых турбин. Лопатки изготавливаются в литом состоянии. С целью, чтобы устранить недостатки литого состояния и чтобы улучшить свойства стали выполнены испытания механических свойств и опытная сварка переработанной стали. Изготовлено шесть разных видоизменений этого сорта стали с различным

содержанием углерода и никеля и определено влияние этих элементов на механические свойства стали. Благоприятные свойства отмечены в ковком и улучшенном состоянии стали. Сброс напряжения выполняли при темп-ом интервале между 500–700° C. Сварка велась с электродом INOX 13/6 Fe и дала удовлетворительные результаты твердости и вязкости испытанных образцов.