



FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U ČAČKU  
UNIVERZITETA U KRAGUJEVCU  
KATEDRA ZA MEHATRONIKU  
Čačak, Srbija



**38. SAVETOVANJE PROIZVODNOG MAŠINSTVA SRBIJE  
- SPMS 2021 -  
38<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION  
ENGINEERING OF SERBIA  
- ICPE-S 2021 –**

14 – 15. October 2021, Čačak, Serbia

# **ZBORNIK RADOVA PROCEEDINGS**

EDITORS: Jelena Baralić, Nedeljko Dučić



**38. Savetovanje Proizvodnog Mašinstva Srbije - SPMS 2021  
ZBORNIK**

**38th International Conference on Production Engineering of Serbia - ICPE-S 2021  
PROCEEDINGS**

**ISBN: 978-86-7776-252-0**

**Urednici**

**Editors**

Jelena Baralić

Nedeljko Dučić

University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia

**Izdavač**

**Publisher**

University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia  
Svetog Save 65, 32000 Čačak, Serbia

**Za izdavača**

**For the Publisher**

Danijela Milošević

University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia

**Tehnička obrada**

**Technical editor**

Ivan Milićević

University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia

**Edition**

70 copies

**Printed by**

University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia

**Copyright Notice:**

Copyright © 2021 by University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia. Permission to make digital or hard copies of portions of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyright for components of this work owned by others than University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia, must be honored. Abstracting with credit is permitted. To copy otherwise, to republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee. Request permission to republish from Department of Mechatronics, Faculty of Technical Sciences Čačak, University of Kragujevac, Serbia: [jelena.baralic@ftn.kg.ac.rs](mailto:jelena.baralic@ftn.kg.ac.rs)

**The publication of this Proceedings was financially supported by the Ministry of  
Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia**

**Naučni odbor:**  
**International Scientific Committee**

**President:**

Srećko Čurčić, Univerzitet u Kragujevcu, Srbija

**Members:**

Bojan Babić, University of Belgrade, Serbia  
Petar Petrović, University of Belgrade, Serbia  
Zoran Miljković, University of Belgrade, Serbia  
Ljubodrag Tanović, University of Belgrade, Serbia  
Radovan Puzović, University of Belgrade, Serbia  
Ilija Ćosić, University of Novi Sad, Serbia  
Sebastian Baloš, University of Novi Sad, Serbia  
Milenko Sekulić, University of Novi Sad, Serbia  
Slobodan Tabaković, University of Novi Sad, Serbia  
Branko Škorić, University of Novi Sad, Serbia  
Miodrag Hadžistević, University of Novi Sad, Serbia  
Milan Zeljković, University of Novi Sad, Serbia  
Dragiša Vilotić, University of Novi Sad, Serbia  
Marin Gostimirović, University of Novi Sad, Serbia  
Bojan Lalić, University of Novi Sad, Serbia  
Jelena Radonić, University of Novi Sad, Serbia  
Miodrag Manić, University of Nis, Serbia  
Predrag Janković, University of Nis, Serbia  
Dragan Adamović, University of Kragujevac, Serbia  
Goran Devedžić, University of Kragujevac, Serbia  
Milan Erić, University of Kragujevac, Serbia  
Bogdan Nedić, University of Kragujevac, Serbia  
Milan Kolarević, University of Kragujevac, Serbia  
Mirko Đapić, University of Kragujevac, Serbia  
Snežana Dragičević, University of Kragujevac, Serbia  
Jasmina Vesić-Vasović, University of Kragujevac, Serbia  
Slavica Cvetković, University of Pristina, Serbia  
Srećko Manasijević, LOLA Institute, Serbia  
Vladimir Kvrđić, Mihajlo Pupin Institute, Serbia  
Ivan Milićević, University of Kragujevac, Serbia  
Zoran Pandilov, Ss. Cyril and Methodius University, Skopje, North Macedonia  
Radomir Vukasojević, University of Montenegro, Montenegro  
Janez Kopač, University of Ljubljana, Slovenia  
Mirko Soković, University of Ljubljana, Slovenia  
Gordana Lakić Globočki, University of Banja Luka, RS, BiH  
Simo Jokanović, University of Banja Luka, RS, BiH  
Milija Krašnik, University of East Sarajevo, RS, BiH  
Vlatko Marušić, University Josip Jurje Strossmayer, Croatia  
Zoran Jurković, University of Rijeka, Croatia  
Milan Jurković, University of Bihać, BiH  
Radovan Kovačević, Southern Methodist University, USA  
Goran Putnik, University of Minho, Portugal  
Frank Vollertsen, University Bremen, Germany  
Viktor Starkov, State Tehcnological University Stankin, Russia

Sergei Alexandrov, Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences, Russia  
Mykola Ivanovych Bobyr, National Technical University of Ukraine, UA  
Klimenko Sergei Anatolievich, V. Bakul Institute for superhard materials ISM, UA  
Klaus Kabitzsch, Dresden University of Technology, Germany  
Mircea Nicoara, University of Timisoara, Romania  
Stefan Kirilov Kartunov, Technical university of Gabrovo, Bulgaria  
Miroslav Badida, Technical University of Kosice, Slovak Republic  
Sergej Hloch, Technical University of Kosice, Slovak Republic  
Alan Bramley, University Bath, UK  
Peter Hartley, University Birmingham, UK  
Kornel Ehmann, Northwestern University, USA  
Michael Kheifetz, Polotsk State University, Belarusian

**Počasni odbor:**  
**The Honorary Committee**

Pavao Bojanić, University of Belgrade  
Milenko Jovičić, University of Belgrade  
Milisav Kalajdžić, University of Belgrade  
Dragan Milutinović, University of Belgrade  
Miroslav Pilipović, University of Belgrade  
Miloš Glavonjić, University of Belgrade  
Vidosav Majstorović, University of Belgrade  
Sava Sekulić, University of Novi Sad  
Velimir Todić, University of Novi Sad  
Dragoje Milikić, University of Novi Sad  
Bogdan Sovilj, University of Novi Sad  
Jelena Stankov, University of Novi Sad  
Miroslav Plančak, University of Novi Sad  
Pavel Kovač, University of Novi Sad  
Miodrag Lazić, University of Kragujevac  
Milentije Stefanović, University of Kragujevac  
Ratko Mitrović, University of Kragujevac  
Slavko Arsovski, University of Kragujevac  
Branislav Jeremić, University of Kragujevac  
Milorad Jovanović, University of Kragujevac  
Vučko Mečanin, University of Kragujevac  
Tihomir Pantelić, University of Kragujevac  
Ratomir Ječmenica, University of Kragujevac  
Snežana Radonjić, University of Kragujevac  
Miomir Vukićević, University of Kragujevac  
Ljubomir Lukić, University of Kragujevac  
Velibor Marinković, University of Niš  
Vojislav Stoiljković, University of Niš  
Dragan Domazet, University of Niš  
Dragan Temeljkovski, University of Niš  
Miroslav Trajanović, University of Niš  
Miroslav Radovanović, University of Niš  
Svetislav Dekić, University of Priština  
Vid Jovišević, University of Banja Luka

## ISPITIVANJE PROMENE ČVRSTOĆE U ZAVISNOSTI OD KOLIČINE UGLJENIKA I VANADIJUMA KOD VISOKO LEGIRANIH Cr-Mo-V ČELIKA

Aleksandar TODIĆ<sup>1\*</sup>, Milan T. ĐORĐEVIĆ<sup>1</sup>, Vukić LAZIĆ<sup>2</sup>, Dušan ARSIĆ<sup>2</sup>, Branko PEJOVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fakultet Tehničkih Nauka, Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Srbija

<sup>2</sup> Fakultet Inženjerskih Nauka, Univerzitet u Kragujevcu, Srbija

\*office@ftn.pr.ac.rs

**Absdtrakt:** Cilj ovih istraživanja je bio da se ispita uticaj ugljenika i vanadijuma na čvrstoću samokaljivih čelika. Ispitivanja su izvršena na visoko legiranom Cr-Mo-V čeliku. Očigledno da vanadijum utiče na proces ošvrščavanja ovih legura na taj način što sužava temperaturni interval kristalizacije pri čemu se iz rastopa obrazuju  $V_6C_5$  karbidi koji blokiraju dalji rast austenitnih dentrita i na taj način pomažu dobijanje sitnozrnaste strukture. Vanadijum kao legirajući element pomera likvidus i solidus ka višim temperaturama, obrazuje  $V_6C_5$  karbide, jednim delom raspoređuje se između faza prisutnih u čeliku; karbida  $(Cr,Fe)_7C_3$  i austenita. Postojanje vanadijuma omogućuje formiranje  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  karbida i njegovo taloženje u austenitu u toku procesa hlađenja, u lokalnim područjima oko finih karbidnih čestica transformiše u martenzit. To znači da vanadijum smanjuje količinu zaostalog austenita i time poboljšava prokaljivost čelika.

**Ključne reči:** Samokaljivi čelik, ugljenik, vanadijum, čvrstoća, mikrostruktura.

### 1. UVOD

Samokaljivi čelici spadaju u grupu čelika otpornih na habanje što ih čini upotrebljivim u širokom području primene. Osnovne karakteristike ovih čelika je visoka tvrdoća, čvrstoća, zbog visokog sadržaja ugljenika, a relativno mala udarna žilavost. Istraživanja koja su izvršena nad ovim čelicima imala su za cilj da se ispita uticaj nekih legirajućih elementa na mehaničke karakteristike materijala (tvrdoća, čvrstoća i žilavost). Kao legirajući elementi uključeni su hrom, molibden i vanadijum. Istraživanja su imala za cilj poboljšanje karakteristika ovih čelika, kroz povećanu otpornost na abrazivno i udarno-

zamorno habanje. Osnovni cilj istraživanja je da se kod ovih čelika zadrži ili sasvim malo snizi tvrdoća i čvrstoća, a poveća udarna žilavost. Ovakav jedan kompromis može da se potraži u termičkom režimu tako što bi se dobila martenzitna struktura sa manjim sadržajem zaostalog austenita [1].

### 2. UTICAJ Cr i Mo NA STRUKTURU I SVOJSTVA ČELIKA

Hrom je osnovni legirajući element kod čelika sa povišenom tvrdoćom i otpornošću na habanje. Hrom reaguje sa ugljenikom i formira tvrde karbide otporne na habanje, zatim sprečava transformaciju austenita u perlit u

toku hlađenja i utiče na strukturu metalne osnove čelika zatvarajući  $\gamma$  područje u faznom dijagramu. Najbolju žilavost i tvrdoću imaju strukture sa karbidima  $(Cr,Fe)_7C_3$  koji se obrazuju u čeliku koji sadrži preko 6% hroma. Veći procenat hroma ne daje bolje rezultate jer on ograničava procenat ugljenika, a sa povećanjem ugljenika smanjuje se eutektička koncentracija. Hrom ne povećava prokaljivost ali u kombinaciji sa većim sadržajem ugljenika povoljno deluje na dubinu zakaljanog sloja.

Molibden onemogućuje nastajanje perlita i transformaciju austenita premešta u beinitnu i martenzitnu oblast. Iz tog razloga molibden i pri malim sadržajima povećava prokaljivost. Na taj način on obezbeđuje dobijanje tvrde i čvrste martenzitne metalne osnove u kojoj su sadržani legirani karbidi. Molibden gradi intersticijsku fazu  $Mo_2C$ , i pri povećanom sadržaju molibdena formira se određena količina ove faze u strukturi čelika.

### 3. UTICAJ VANADIJUMA

Dodavanjem vanadijuma visokolegiranim hromnim čelicima struktura postaje finija. Usitnjavanje strukture dodavanjem vanadijuma objašnjava se uticajem vanadijuma na proces kristalizacije. Pored toga, vanadijum menja morfologiju eutektičkog  $(Cr,Fe)_7C_3$  karbida. Sa porastom sadržaja vanadijuma radialni raspored karbida postaje dominantniji, a udeo dugačkih usmerenih lamela i ploča se ne smanjuje [2].

Prisustvo vanadijuma i u malim procentima ima pozitivno dejstvo na visokolegirane Cr-Mo čelike jer se u toku izdvajanja primarnog austenita iz rastopine formiraju kristali karbida  $V_6C_5$  koji blokiraju dalji rast austenitnih dendrita i na taj način pomažu dobijanje sitnozrnaste strukture. Kod visokohromnih čelika sa sadržajem oko 12%Cr i 1,4-1,8%C i pri sadržaju iznad 2,5% vanadijuma formira se karbid vanadijuma sa kubnom kristalnom rešetkom. Karbid tipa VC je globularnog oblika i često sa eutektičkim karbidom  $(Cr,Fe)_7C_3$ , koji se kristališe u obliku šipki, koje radialno rastu iz nukleusa formirajući sferične čelije zajedno sa austenitom [3-7].

Kada je sadržaj vanadijuma mali u procesu izdvajanja primarnog austenita obrazuje se  $V_6C_5$  karbidi koji blokiraju dalji rast austenitnih dendrita i na taj način pomažu dobijanje sitnozrne strukture. Pored toga što vanadijum obrazuje pomenute karbide on se jednim delom raspoređuje između faza karbida  $(Cr,Fe)_7C_3$  i austenita. U lokalnim područjima oko finih karbidnih čestica austenit se transformiše u martenzit pa time vanadijum smanjuje količinu zaostalog austenita, a time i poboljšava prokaljivost čelika.

### 4. OPIS EKSPERIMENTA

Istraživanja su bazirana na samokaljivom čeliku hemijskog sastava sa 12,5%Cr, 1,2%Mo dok se procenat ugljenika menja u rasponu od 1,4 do 1,8 % i vanadijuma u rasponu od 0,5 do 3% . Probni uzorci su izliveni u obliku epruveta standardnog oblika za ispitivanje zatezne čvrstoće. Za izlivanje uzoraka korišćena je indukciona frekventna peć ABB tip ITMK-500. Kalupi za izlivanje su izrađeni pomoću modela standardnim metodama. Odlivci su potom termički obrađeni kaljenjem i niskotemperaturnim otpuštanjem na temperaturi od 250°C. Ovaj vid termičke obrade je karakterističan za visokolegirane Cr-Mo čelike. Za svaki sadržaj ugljenika menjan je sadržaj vanadijuma u rasponu od 0,5 do 3%, na taj način je pripremljeno više serija uzoraka. Kako bi rezultati bili merodavni načinjeno je po tri istovetna uzorka. Na slici 1. prikazan je izgled pripremljenih probnih uzoraka za ispitivanje zatezne čvrstoće.



Slika 1. Izgled probnih uzoraka

**Tabela 1.** Hemijski sastav svih uzoraka

Redni broj	Hemijski sastav				
	C (%)	Cr (%)	Mo (%)	S (%)	V (%)
1	1,542	11,831	1,115	0,03	0,554
2	1,536	11,562	1,111	0,03	1,053
3	1,521	11,311	1,094	0,032	1,976
4	1,624	10,076	1,062	0,026	2,992
5	1,753	10,839	1,125	0,035	0,502
6	1,711	10,524	1,130	0,035	1,006
7	1,632	11,466	1,268	0,022	1,908
8	1,626	11,236	1,248	0,020	2,801
9	1,972	9,990	1,138	0,034	0,549
10	1,890	9,995	1,127	0,035	0,981
11	1,836	9,712	1,090	0,033	2,038
12	1,767	9,742	1,129	0,038	2,983

Hemijski sastav izlivenih uzoraka za ispitivanje čvrstoće prikazan je u tabeli 1.

Dimenzije uzoraka za ispitivanje zatezne čvrstoće urađeni su prema standardu JUS EN 10 002-1 (EU 18:1979). Ispitivanje je vršeno na kidalici SCHENCK-TREBEL tipa TYP-PM 400 Rn maksimalne sile 400 KN.

## 5. REZULTATI ISPITIVANJA

Rezultati ispitivanja termički obrađenih uzoraka i otpuštenih na temperaturi 250°C sa različitim sastavom ugljenika i vanadijuma prikazani su u tabeli 2.

**Tabela 2.** Rezultati ispitivanja čvrstoće

r.br.	Hemijski sastav		Zatezna čvrstoća, MPa
	C, %	V, %	
1	1,4	0,5	673,67
2		1	655,10
3		2	642,32
4		3	569,41
5	1,6	0,5	658,52
6		1	631,19
7		2	621,57
8		3	558,63
9	1,8	0,5	629,29
10		1	622,18
11		2	615,99
12		3	547,21

Na slici 2. dat je izgled probnog uzorka nakon ispitivanja, a na slici 3. Izgled prelomne površine.



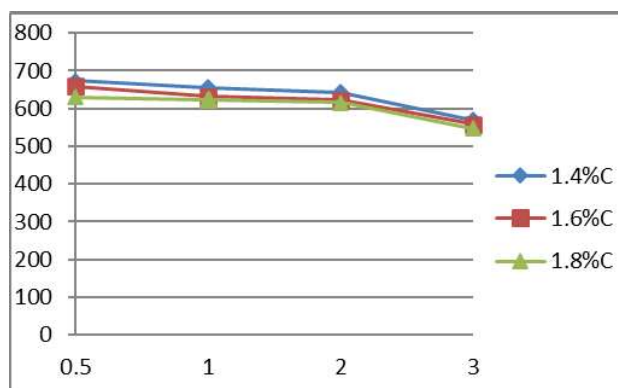
**Slika 2.** Probni uzorak nakon ispitivanja



**Slika 3.** Izgled prelomne površine

Na osnovu izgleda polomljenog probnog uzorka i prelomne površine može se zaključiti da je u pitanju izrazito krti lom, što dalje ukazuje da probni uzorci imaju izrazito veliku tvrdoću.

Na slici 4. prikazan je dijagram promene čvrstoće u zavisnosti od količine vanadijuma i ugljenika.



**Slika 4.** Dijagram promene čvrstoće

### 4.1 Uticaj vanadijuma na zateznu čvrstoću

Ispitivanje zatezne čvrstoće izvršeno je na po tri uzorka iz svake serije tako da je uzeta srednja vrednost kao merodavna. U tabeli 2. prikazani su rezultati ispitivanja zatezne čvrstoće, a na slici 4. dat je dijagram promene

čvrstoće u funkciji promene vanadijuma. Deformacije istezanja su veoma male uz nagli porast sile zatezanja. Analizom dobijenih podataka može se uočiti da vanadijuma ne utiče značajno na zateznu čvrstoću i ona ostaje približno konstantna. U celini moglo bi se konstantovati da vanadijum u pomenutim odnosima sa ugljenikom nema značajan uticaj na promenu zatezne čvrstoće. Takođe, tvrdoća je uglavnom ostala nepromenjena dok je žilavost značajno porasla [8].

## 6. MOGUĆNOSTI PRIMENE

Dodatak 3% vanadijuma čelicima, formira leguru koja ima veoma dobru kombinaciju zatezne čvrstoće i tvrdoće pa samim tim mogu da imaju široku oblast primene.

Stoga čelik uz dodatak 3% V i 1,8%C (ovaj sastav ima najbolji odnos čvrstoće, tvrdoće i žilavosti) može sa uspehom da se koristi za izradu delova i sklopova koji su u eksploataciji izloženi abrazionom, koroziono-abrazionom, udarno-zamornom ili kombinovanom tipu habanja. Asortiman ovih delova čine: delovi građevinskih i rudarskih mašina (zubi bagera i navlake zuba), delovi drobilica i mlinova za kamen, rudu, ugalj i minerale (kugle, čekići, udarne ploče, obloge mlina i separacione rešetke), habajući delovi u procesnim postrojenjima (šipke bunkera za abrazivne materijale, lopatice uređaja za peskarenje, tela muljnih pumpi, kalupi za briketiranje uglja i čeličnih strugotina, gusenice tenkova i transportera itd.).

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu ispitan je uticaj vanadijuma na čvrstoću čelika sa količinom ugljenika: 1,4%, 1,6% i 1,8% i sa sadržajem hroma od 12%, i molibdena 1,3%. Sa povećanjem sadržaja vanadijuma struktura postaje finija što utiče na mehaničke osobine čelika, tj. na čvrstoću i tvrdoću pa i na udarnu žilavost. U ispitivanoj leguri gde je količina ugljenika bila 1,4%, 1,6% i 1,8%; povećavana je količina vanadijuma (0,5%, 1%, 2% i 3%). Evidentno je da veći sadržaj vanadijuma od 3% ne vodi poboljšanju

svojstva ovog čelika, pa iz tog razloga istraživanja sa većim procentom vanadijuma nisu obuhvaćena ovim radom.

Diskusija rezultata u tački 4.1 ukazuje da povećanje količine vanadijuma pozitivno utiče na karakteristike čelika (tvrdoću i žilavost) dok je čvrstoća ostala na prihvatljivom visokom nivou. U odnosu na oblast primene i potrebna mehanička svojstva (nekada se želi povećanje čvrstoće i smanjenje žilavosti i obrnuto) može se izabrati sastav ispitivanih čelika.

Prisustvo tvrdih karbida tipa  $(Cr,Fe)_7C_3$ ,  $V_6C_5$  i VC, njihov sadržaj, povoljan raspored i morfologija obezbeđuju dobru otpornost na abrazivno habanje čak i u slučajevima kada su u kontaktu sa ekstremno abrazivnim materijalima kao što su kvarc, feldspat i drugi.

Istraživanja se mogu naknadno proširiti ispitivanjem čelika sa povećanom količinom ugljenika (od 1,8% do 2,2%) dok će se količina vanadijuma menjati u istim granicama. Takođe, u budućim ispitivanjima bilo bi poželjno sve ove varijacije čelika podvrgnuti ispitivanju otpornosti na habanje.

## LITERATURA

- [1] D. Čikara, S. Marković, D. Čikara: *Otpornost na habanje, struktura i mogućnosti primene visokohromnih legura železa otpornih na habanje*, Journal of Metallurgy, Vol 7 (1) 2001. pp. 45-59
- [2] M. Filipović, Ž. Kamberović, M. Korać: *Uticaj termičke obrade na žilavost i otpornost na habanje Fe-Cr-C-Nb legura*, Journal of Metallurgy Vol 14 (4) 2008. pp. 243-252
- [3] M. Filipović, S. Marković, Ž. Kamberović, M. Korać: *Uticaj titana i cerijuma na mikrostrukturu i svojstva Fe-C-Cr-Nb legura*, Journal of Metallurgy Vol 11 (4) 2005. pp. 345-351
- [4] C. Capdevila, C. Garcia-Mateo, J. Chao, F.G. Caballero, *Advanced vanadium alloyed steel for heavy product applications*, Materials Science and Technology, 2009, 25 (11), pp. 1383-1386.
- [5] D. Čikara, M. Rakin, D. Čikara-Anić: *Quality optimization of steel milling balls*, Proceedings of 18th International Conference on material handling, constructions and logistics, Belgrade, 2006. pp. 131-138.



- [6] N. Yamanaka, K. Kusaka: *Influence of vanadium and molybdenum on the properties of air-hardening die steel containing 1.5% carbon and 12% chromium*, The Iron and Steel Institute of Japan, Vol.41 (6), 1955. pp. 613-620.
- [7] Z. Wang, D. He, C. Yu, J. Jiang: *Effect of vanadium on property of Fe-Cr-C hardfacing alloy*, Hanjie Xuebao/Transactions of the China Welding Institution 2010, 31 (9), pp. 61–64
- [8] A. Todic, D. Cikara, T. Todic, D. Cikara-Anic, D. Minic: *Influence of chemical composition on the structure, hardness and toughness of high alloyed Cr-Mo-V steel*, Materials and Manufacturing Processes, 27:11, 2012. pp. 1193 - 1197

## INFULENCE OF CARBON AND VANADIUM CONTENT ON THE TENSILE STRENGTH OF Cr-Mo-V STEELS

**Abstract:** *The aim of this research was to investigate the influence of carbon and vanadium content on strength of high alloyed air-hardening Cr-Mo-V steel. The vanadium has a strong effect on a solidification of these alloys by narrowing temperature interval of austenite formation. During that process from molten metal the  $V_6C_5$  carbides are formed so they block further growth of austenite dendrites what leads to obtaining the smallgrained structure. Vanadium as an alloying element moves liquidus and solidus temperatures to higher temperatures, forms carbides and is partly distributed between the steel phases; carbide  $(Cr, Fe)_7C_3$  and austenite. The presence of vanadium enables the formation of  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  carbide and its deposition in austenite during the cooling process, in local areas around fine carbide particles it transforms into martensite. This means that vanadium reduces the amount of residual austenite and thus improves the hardenability of steel.*

**Key words:** *Air-hardening steel, carbon, vanadium, strength, microstructure.*