

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

**Valentinas VARNAUSKAS**

**CREATION OF HARDFACED SURFACES AND  
INVESTIGATION OF ITS WEAR RESISTANCE**

Summary of Doctoral Dissertation  
Technological Sciences, Mechanical Engineering (09T)

Vilnius  2008

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2004–2008.

Scientific Supervisor

**Prof Dr Habil Algirdas Vaclovas VALIULIS** (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T).

**The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Mechanical Engineering at Vilnius Gediminas Technical University:**

Chairman

**Prof Dr Vytautas TURLA** (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T).

Members:

**Prof Dr Habil Mykolas DAUNYS** (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T),

**Prof Dr Habil Mindaugas Kazimieras LEONAVIČIUS** (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T),

**Assoc Prof Dr Nikolaj VIŠNIAKOV** (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T),

**Dr Nerija ŽURAUSKIENĖ** (Semiconductor Physics Institute, Physical Sciences, Physics – 02P).

Opponents:

**Prof Dr Habil Algis BRAŽĖNAS** (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T),

**Prof Dr Habil Andrejus Henrikas MARCINKEVIČIUS** (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Mechanical Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 10 a. m. on 26 January 2009.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112;

e-mail: doktor@adm.vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 24 December 2008.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

**Valentinas VARNAUSKAS**

**ATSPARIŲ DILIMUI APVIRINTŲ PAVIRŠIŲ  
FORMAVIMAS IR TYRIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka  
Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (09T)

Vilnius  LEIDYKLA  
TECHNIKA 2008

Disertacija rengta 2004–2008 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.  
Mokslinis vadovas

**prof. habil. dr. Algirdas Vaclovas VALIULIS** (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

**Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos inžinerijos mokslo krypties taryboje:**

Pirmininkas

**prof. dr. Vytautas TURLA** (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

Nariai:

**prof. habil. dr. Mykolas DAUNYS** (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T),

**prof. habil. dr. Mindaugas Kazimieras LEONAVIČIUS** (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T),

**doc. dr. Nikolaj VIŠNIAKOV** (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T),

**dr. Nerija ŽURAUSKIENĖ** (Puslaidininkų fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Oponentai:

**prof. habil. dr. Algis BRAŽĖNAS** (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T),

**prof. habil. dr. Andrejus Henrikas MARCINKEVIČIUS** (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

Disertacija bus ginama viešame Mechanikos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2009 m. sausio 26 d. 10 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4952, (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112;

el. paštas doktor@adm.vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2008 m. gruodžio 24 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos „Technika“ 1569-M mokslo literatūros knyga.

## **GENERAL CHARACTERISTIC OF THE DISSERTATION**

### ***Topicality of the problem***

One of the most modern tools' and machine parts' production and restoration field is hard-facing of constructional steel parts by an alloy layer providing their surfaces with required properties.

There are various types of surface strengthening and various welding materials for hard-facing the surfaces. To increase the strength to wear of parts operating in the abrasive and impact-abrasive environment under real working conditions, the optimal structural-phase composition of the hard-faced metal which is also determined by the chemical composition of the deposited metal is a requisite.

Welding electrodes are being produced in Lithuania, multi-purpose hard-facing electrodes being among them. All over the world a lot of welding materials manufacturers produces the analogous production, but their products are expensive. A challenge to the competition in the electrodes market is to expand the production range, to offer new products whose quality and price could satisfy customer's demands.

The dissertation analyzes the regularities of alloying elements transition in developed electrodes from electrode coating to deposited metal and the influence of alloying elements on the properties of coated layers. Two principal tasks are solved: development of coated electrodes coatings and investigation of hard-faced surfaces. The first task is formulated with respect to the investigation of alloying elements transition regularities from an electrode to deposited metal. The second task concerns the investigation of abrasive wear of the hard-faced alloy structure.

### ***Research object***

The objects of this dissertation are:

- developed experimental electrodes for hard-facing;
- surfaces produced with these electrodes.

### ***Aim of the work***

To develop proper coated electrodes for hard-facing the surfaces of parts working under abrasive and abrasive-impact conditions by applying raw materials found in Lithuania. For this purpose the alloying dependences of deposited metal when hard-facing iron alloys by coated electrodes are to be investigated.

Taking into account the effect of alloying elements on mechanical properties of an alloy, the most suitable composition of electrode components is to be determined. As in addition to alloying of the melted metal, the developed electrode coating has to form a protecting slag layer to ensure the steady excitation of a welding arc and good weld pool protection against the environment influence, the irreproachable welding reinforcement formation and proper slag separation after the joint cooling.

### ***Tasks of the work***

1. To analyze the principles of development of electrode hard-facing materials.
2. To offer electrode coating formation methods.
3. To develop and produce experimental electrodes for hard-facing.
4. To determine the regularities of alloying elements transition from an electrode to deposited metal.
5. To determine the effect of basic alloying elements on abrasive wear.
6. To examine the structures of hard-faced surfaces.
7. To analyze the possibilities of applying hard-facing electrodes.

### ***Scientific novelty***

When doing this research, new results have been obtained in mechanical engineering science, namely:

- new methods have been suggested for making hard-facing electrodes;
- regularities of transition of alloying chemical elements from the electrode coating to the deposited metal and slag have been examined having a new suggested composition of coating components;
- influence of the change in the alloying elements concentration on abrasive wear of hard-faced layers has been investigated;
- newly developed hard-facing electrodes have been experimentally investigated.

### ***Methodology of research***

Analytical and experimental investigation methods have been applied when carrying on this research.

For newly developed coating structures the chemical composition of a deposited metal has been analytically determined which should be obtained after hard-facing the metal surface by experimental electrodes.

Hard-facing electrodes have been produced specially for planned experiments and for their investigation the methods of optical emission spectrometry, abrasive wear tests (according to ASTM G65), X-ray diffractions scanning electronic microscopy and optical microscopy have been applied

### ***Practical value***

The quantity and ratio of alloying components in the electrode coating has been experimentally determined at which the layers hard-faced by these electrodes acquire the highest to abrasive wear properties and good quality without fractures, pores, slag inclusions of deposited metal.

The research results and the methods suggested for making hard-facing electrodes have enabled development of electrodes of various coating composition suitable for hard-facing the surfaces with an alloy possessing desirable chemical and mechanical properties.

### ***Defended propositions***

1. Evaluation of dependences of alloying elements (carbon, silicon, manganese, chromium, molybdenum, titanium, boron) transition from an electrode to a deposited metal in the manual arc welding with coated electrodes.
2. Influence of alloying elements on the strength to wear of hard-faced layers.
3. Dependences of transition of alloying chemical elements from the electrode coating to a deposited metal on the ratio of their quantity in coating.
4. Interdependences of the structures of the layers hard-faced by developed electrodes and their wear.

### ***The scope of the scientific work***

The scientific work consists of the general characteristic of the dissertation, 3 chapters, conclusions, list of literature, list of publications and addenda. The total scope of the dissertation – 100 pages, 36 pictures, 24 tables and 3 addenda.

## **STRUCTURE OF THE WORK**

**In the general characteristic of the dissertation** relevance of the problem is considered, the research objective and tasks are stated, novelty is described and the author's reports, publications and set-up of the thesis are presented.

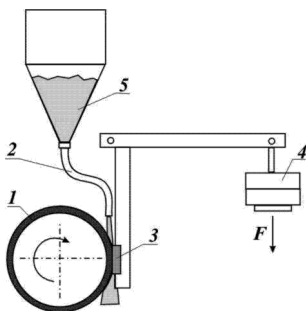
**The first chapter** is a survey of literature. It reviews the papers dealing with the methods of steel surface strengthening by arc-welding, the manual arc-welding by facing coated electrodes, the structure and properties of a welded layer, the experimental methods of wear investigation, the principles of development of electrode welding materials. At the end of the chapter conclusions are drawn and the thesis tasks are concretized.

**The second chapter** is a methodical section presenting the research methodology. The essence of experiments, their application, the layouts of instruments and their mode of operation, the experiments and the methods of their treatment are presented there.

For chemical analysis the specimens of pure deposited metal were obtained by depositing 5 layers of electrode metal on a metallic plate. Before welding of a new layer, the plate was slowly cooled in air up to the ambient temperature. Specimens surfaces were polished to  $R_a = 5 \mu\text{m}$ . Experiments were made by a BELEC-compact-lab-N spectrometer.

The wear resistance experiments have been made according to Standard ASTM G65. The schematic diagram is given in Fig. 1. The operating conditions have been: load 130 N, experiment time 20 min, wear path 2890 m, abrasive – 0.2–0.425 mm fraction quartz sand. Wear resistance standard (unit) is boron hardened microalloyed steel 38MnB5 (C 0.39%, Si 0.17%, Mn 1.26%, Cr 0.19%, B 0.002%), 52 HRC. The wear intensity change is expressed by relative wear resistance coefficient  $\varepsilon$  calculated as a ratio of steel  $I_{38MnB5}$  and alloyed layer  $I_{COATING}$ , wear:

$$\varepsilon = I_{38MnB5} / I_{COATING} \cdot$$



**Fig. 1.** Schematic diagram of the mechanism abrasive wear estimation (according to ASTM G65): 1 – rubber coated wheel; 2 – abrasive supply channel; 3 – specimen; 4 – load; 5 – quartz sand



**The third chapter**, the experimental part presents the process of experiments, the obtained results and discussion on them. The methodology developed for producing electrode coatings is described. Chemical compositions of the alloy obtained by hard-facing with experimental electrodes are analytically calculated and experimentally determined, the dependences of the transition of alloying chemical elements from an electrode to a deposited metal are analyzed. The results of X-rays diffraction (XRD), optical and scanning electronic microscopy (SEM) are presented. The results of an abrasive wear test according to the ASTM G65 method are presented and analyzed. The influence of alloying elements on the wear of hard layers is discussed.

Electrodes of 4 mm diameter were produced for research investigations. Applying the previously investigated patterns of elements transfer from an electrode to deposited metal, appropriate compositions of electrode coatings were made so, that chromium content in coated layers would vary (changing the carbon ferrochromium content in coating), while there the content of other alloying elements (carbon ~3%, silicon ~2%, manganese ~1.1%, titanium ~0.5%, boron ~0.6%) remained in a settled level. Change of the chromium contents of in an electrode is reached at change of electrode coating thickness. At research of transfer of carbon patterns, the compositions of electrode coatings were made so, that carbon content in coated layers would vary from 0.1% up to 4% (content of chromium is approximately 20%).

The results of chemical compositions of metal deposited by experimental electrodes are presented in Table 1.

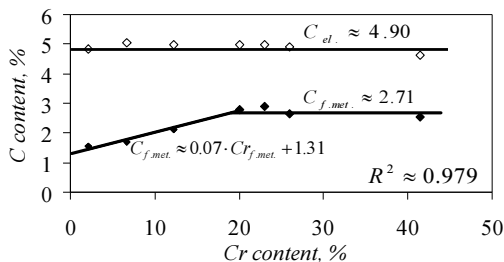
**Table 1.** Chemical compositions of metal deposited by experimental electrodes

Electrode code	Alloying elements, %					
	C	Si	Mn	Cr	Ti	B
671	2.53	2.04	0.85	41.4	0.29	0.70
672	2.64	3.05	1.21	25.95	0.80	0.77
673	2.88	2.47	1.19	23.05	0.79	0.77
674	2.80	2.58	1.18	20.1	0.93	0.76
675	2.13	2.23	1.15	12.3	0.73	0.60
676	1.70	2.16	1.03	6.63	0.73	0.65
677	1.54	1.69	1.00	2.07	0.40	0.54

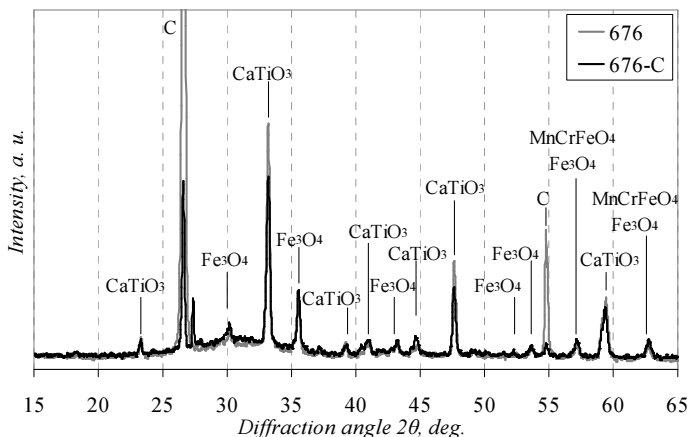
When chromium content in alloy is up to 20%, assimilation of other chemical elements to deposited metal increases. If chromium content varies from 20% up to 40%, carbon content practically does not change – an alloy assimilates carbon maximally. If chromium content is reduced, the content of the element, which forms carbides with carbon, decreases. Therefore carbon does not transfer into alloy, but burns away and turns into slag. The influence of

chromium content in alloy to the assimilation of carbon is graphically presented into the Fig. 2.

X-ray diffractions curves of 676 and 676-C specimens of slag are given in Fig. 3. X-ray diffractions curves of hard-faced surfaces are given in Fig. 4.



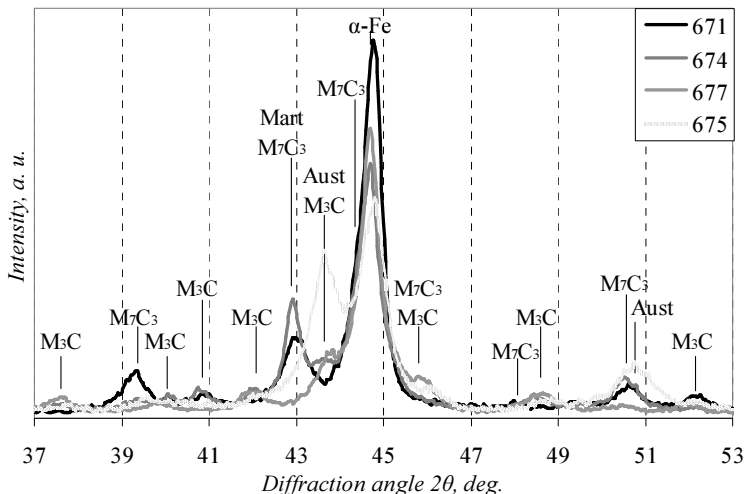
**Fig. 2.** Chromium content influence on carbon transfer in a deposited metal



**Fig. 3.** Diffraction curves of X-rayed slag of specimens 676 and 676-C

In diffraction analysis the following compounds have been determined:  
 carbon ( $C$  – graphite) – largest content in specimen 676;  
 perovskite, whose chemical composition (and crystallographic pattern) is about  $CaTiO_3$ , but some  $Ca$  atoms may be replaced by those of other metals;  
 spinel –  $Fe_3O_4$  but  $Fe$  atoms may be replaced by  $Cr$ ,  $Mn$ .

In all specimens of the slag there is also a lot of amorphous material which is unidentified by diffraction analysis, but according to the available data some part of this material can be ranked to glass.



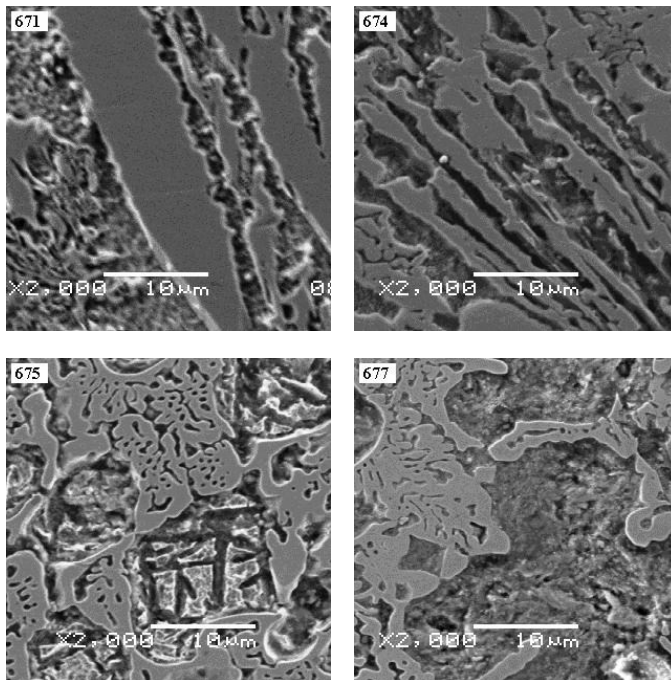
**Fig. 4.** Diffraction curves of X-rayed hard-faced surfaces of specimens 671, 674, 675 and 677

The main phase of all deposited layers is ferrite ( $\alpha-Fe$  diffractive maximum is at  $2\theta \sim 44.7^\circ$ ) in which dissolved  $Cr$  and other alloying elements have to be present.

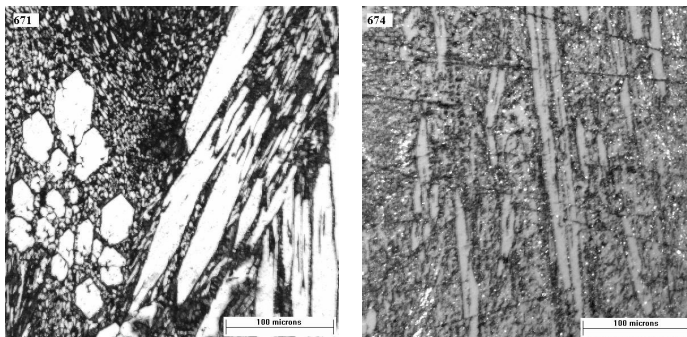
Furthermore, in layers deposited from electrodes 673–677 the unequal content of residual austenite may be identified (most of it in specimen 675) (diffractive maximum at  $2\theta \sim 43.66^\circ$ ). Yet, this maximum may also belong to carbide of a cementite type  $M_3C$  where  $M$  – atom of the metal, most frequently of  $Fe$ , but may be  $Cr$  or  $Mn$ , while  $B$  atoms are partly replacing  $C$ . Carbide  $M_3C$  is quite properly identified in specimen 674, while this carbide can be fully distinguished from austenite by etching a specimen electrochemically.

The other main phase of deposited layers is  $M_7C_3$ , it is carbide with a lot of  $Cr$ . There  $M - Cr, Fe, Mn$  and the others. Its biggest content is in layers 671 and 672.

SEM images of the hard-faced layers given in Fig. 5. Optical microstructure of the hard-faced layers given in Fig. 6.

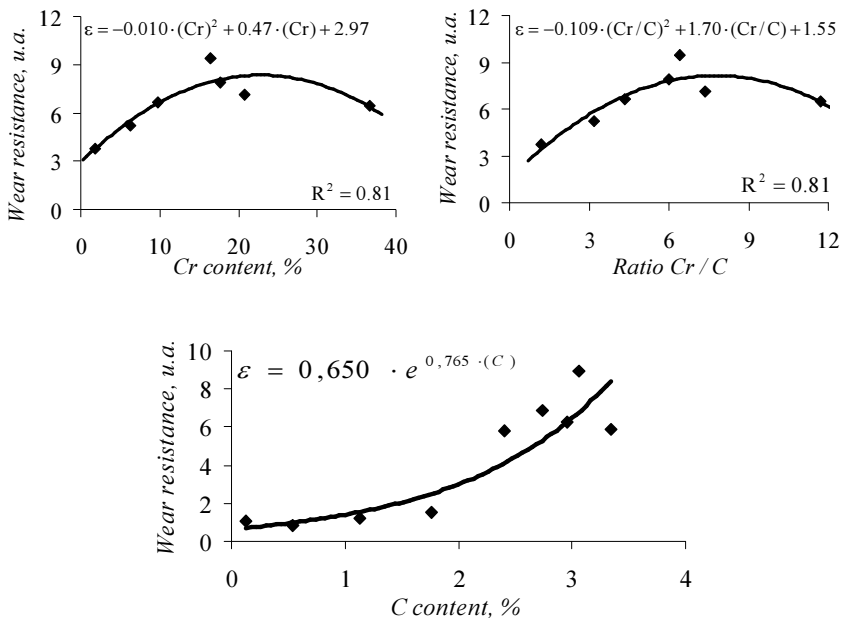


**Fig. 5.** SEM images of the hard-faced layers of specimens 671, 674, 675 and 677



**Fig. 6.** Optical microstructure of the hard-faced layers of specimens 671 and 674

In Fig. 7 presented influence of chemical composition (Cr, C and ratio Cr/C) of deposited layers on hard layers wear.



**Fig. 7.** Influence of chemical composition of deposited layers on hard layers wear

Wear resistance is influenced by both chromium content and a ratio of chromium and carbon contents. The latter determines the chromium carbides content in an alloy and is the most significant component influencing wear resistance. In both cases the influence of both chromium content and a ratio of chromium and carbon content on relative wear resistance is characterized by second degree polynomial equations.

The effect of carbon content on abrasive wear of hard layers is best described by an exponential function.

## General conclusions

1. For the surfaces of machine parts working under abrasive and impact-abrasive conditions the arc hard facing layers properties depend on deposited

metal structural phase composition and in case multi component alloying these composition must be optimised.

2. Transition of chromium from an electrode to a deposited metal in range 0–40% is of a linear mode. When an alloy has 20–26% chromium, it assimilates other alloy chemical elements best. When the chromium content changes from 20% to 40%, the content of carbon practically does not change – an alloy assimilates it maximally. When the content of chromium in an alloy is sufficient, the carbon transition coefficient in it is 0.557. With a decrease in chromium content (from 20%), assimilation of carbon into an alloy decreases linearly, because carbon burns out, and according to diffraction analysis of slag X-rays it passes to slag.

3. With an increase in carbon content in an alloy from 0.2 to 4%, assimilation of titanium increases significantly (from 0.06 to 1.3%), but it does not affect assimilation of other elements.

4. The influence of the chromium content and the ratio of chromium and carbon contents to the relative strength to wear is defined by the second degree polynomial equations. The greatest alloy strength to wear is achieved when the chromium content is from 16% to 30% and chromium to carbon ratio being from 6 to 10.

5. The proportion of layer components (Fe+Cr) and (C+B) characterizes the wear of hard layers accurately. The lower this proportion (in range 25...45), the smaller the wear is.

6. The effect of carbon content on abrasive wear of Fe–C–Cr–B hard layers is best described by an exponential function.

7. Having examined the methods intended for wear measurement, it is seen that neither of them is universal. For this reason, it is impossible to measure precisely enough the wear of the part surface which depends on the mechanism construction, its geometrical form, measurements and kinematics of the parts movement. Each time a proper method, measuring apparatus and equipment are to be selected, and sometimes even developed.

8. Application of synthetic electrodes for hard-facing with an alloy possessing special properties is economically expedient as allowed both to decrease the electrode cost price and to obtain a significant technological effect.

9. Three marks hard-facing electrodes have been developed and are being produced:

- 1) Since March of 2005, 20 tons of electrodes have been produced which are used for hard-facing surfaces to acquire medium strength to abrasive and big impact loads.

2) Since April of 2006, 4 tons of electrodes have been produced which are used for hard-facing surfaces working under intensive abrasive conditions.

3) Since April of 2007, 0.5 ton electrodes have been produced which provide the corrosion resistance layers. They can be also used to form buffer layers prior to hard-facing with hard layers.

## **List of published works on the topic of the dissertation**

### **In the reviewed scientific periodical publications**

1. JANKAUSKAS, V.; KREIVAITIS, R.; KULU, P.; ANTONOV, M.; MILČIUS, D.; VARNAUSKAS, V. Research of abrasive erosion wear for Fe-C-Cr-B hard layers. *Mechanika*, Kaunas, 2008, Nr.4 (72), p. 71–76. ISSN 1392–1207 (Thomson ISI Web of Science, INSPEC, Compendex, Academic Search Complete, FLUIDEX, Scopus).
2. VARNAUSKAS, V.; VALIULIS, A. V.; RUDZINSKAS, V. Investigation of alloy elements transfer in arc facing by high carbon and chromium content electrodes. *Diffusion and defect data. Solid state data. Part B: Solid State Phenomena: Mechatronic Systems and Materials II*, Stafa-Zürich: Trans Tech Publications, 2009, Vol.144, p. 257–260. ISSN 1012–0394 (Elsevier: SCOPUS).
3. VALIULIS, A. V.; VARNAUSKAS, V. Manufacturing of welding electrodes in Lithuania. *Welding in the world*, London, 2007, Vol.51, SPI, p. 347–356. ISSN 0043–2288 (Compendex, Science Direct, CSA).
4. JANKAUSKAS, V.; VARNAUSKAS, V.; KREIVAITIS, R.; ADAMONIS, D. Apvirintų paviršių abrazyvinio dilimo tyrimai. *Inžinerija = Engineering*, Kaunas, 2006, Nr.7 (1), p. 64–68. ISSN 1392–8279.
5. VARNAUSKAS, V.; RUDZINSKAS, V.; ČERNAŠĖJUS, O. Influence of covering components of welding electrodes on chemical composition and mechanical properties of fused metal. *Medžiagotyra*, Kaunas, 2004, Vol.10, No.1, p. 7–10. ISSN 1392–1320.
6. ВАРНАУСКАС, В.; РУДЗИНСКАС, В.; ЧЕРНАШЕЮС, О. Исследование влияния состава покрытия сварочных электродов на химический состав и механические свойства наплавленного металла. *Теория и практика машиностроения: международный научно–технический журнал*, Минск, 2004, № 2, с. 68–71.

7. VARNAUSKAS, V.; RUDZINSKAS, V.; ČERNAŠĖJUS, O. Suvirinimo elektrodų savybių tyrimas. *Mechaninė technologija: mokslo darbai*, Kaunas, 2003, T.31, p. 8–14. ISSN 1648–4711 (VINITI).
8. VARNAUSKAS, V.; RUDZINSKAS, V.; ČERNAŠĖJUS, O. Research of properties of welding electrodes with rutile covering. *Journal of Vibroengineering*, Vilnius, 2003, Vol.5, No.1 (10), p. 49–52. ISSN 1392–8716 (VINITI).

### **In the other editions**

9. VALIULIS, A. V.; VARNAUSKAS, V. Manufacturing of welding electrodes in Lithuania. In *60th Annual Assembly and International Conference. 01–08 July 2007, Dubrovnik–Cavtat, Croatia: Proceedings of the IIW International Conference „Welding & Materials. Technical, Economic and Ecological Aspects“*, Zagreb, 2007, p. 347–355. ISBN 978–953–7518–00–4.
10. JANKAUSKAS, V.; VARNAUSKAS, V.; VALIULIS, A. V.; KREIVAITIS, R. Research into wear of welded hard layers. In *International Conference BALTRIB'2007. Lithuanian University of Agriculture, Kaunas, Lithuania, 21–23 November 2007: proceedings*, Kaunas, 2007, p. 58–62. ISSN 1822–8801 (Thomson ISI Proceedings)
11. VARNAUSKAS, V.; VALIULIS, A. V. Cr ir C patekimo iš elektrodo glaisto į prilydomą metalą dėsningumų tyrimas. Iš *Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba: 10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2007 m. balandžio 19–20 d., pranešimų medžiaga*, Vilnius, 2007, p. 105–111. ISBN 9955–28–049–2.
12. JANKAUSKAS, V.; KREIVAITIS, R.; KLIMAS, V.; VARNAUSKAS, V. Strengthening of machine elements used in abrasive environment by hard layers alloying. In *Mechanika – 2006: Proceedings of the 11th International Conference, April 6–7 2006, Kaunas University of Technology, Lithuania*, Kaunas, 2006, p. 105–108. ISSN 1822–2951 (INSPEC).
13. VARNAUSKAS, V.; VALIULIS, A. V.; JANKAUSKAS, V.; KREIVAITIS, R. Investigation of chromium transfer from electrode coating into weld pool and its influence on cladding or surfacing weld metal properties. In *2nd International Conference Mechatronic Systems and Materials, MSM '2006:*



[Elektroninis išteklius], 31 August – 3 September 2006, Cracow, Poland [CD], Opole, 2006, p. [1–8].

14. VARNAUSKAS, V.; VALIULIS, A. V. Aplydymo elektrodų glaisto komponentų įtaka prilydyto metalo savybėms. Iš *Mechanika – 2005: 10-osios tarptautinės konferencijos pranešimų medžiaga, Kauno technologijos universitetas, Lietuva, 2005 m. balandžio 7–8*, Kaunas, 2005, p. 505–510. ISBN 9955–09–850–3.
15. VARNAUSKAS, V.; VALIULIS, A. V. Elektrodų glaistų medžiagos, jų gavybos būdai bei naudojimo technologiniai ir ekonominiai aspektai. Iš *8-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2005 m. balandžio 21–22 d., medžiaga: Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba*, Vilnius, 2005, p. 71–77. ISBN 9986–05–907–0.
16. VARNAUSKAS, V.; RUDZINSKAS, V.; ČERNAŠĖJUS, O. Suvirinimo elektrodų glaisto metalinių komponentų įtaka prilydyto metalo cheminei sudėčiai. Iš *7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2004 m. balandžio 20–21 d., medžiaga: Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba*, Vilnius, 2004, p. 108–112. ISBN 9986–05–779–5.

### **The papers are handed to the publications**

17. VARNAUSKAS, V.; VALIULIS, A. V.; JANKAUSKAS, V.; KREIVAITIS, R. Investigation of chromium transfer from electrode coating into weld pool and its influence on cladding or surfacing weld metal properties. *Materials Science*, New York: Springer Science+Business Media, Inc. ISSN 1068–820X (Print), ISSN 1573–885X (Online) (Thomson ISI Web of Science, SCOPUS) [Article in press].

### **About the author**

Valentinas Varnauskas was born in Šakiai, on 13 of May 1971.

First degree in Industrial Engineering, Faculty of Mechanics, Vilnius Gediminas Technical University, 1994. Since 1994 works at JSC Anykščių varis as the engineer-technologist. Master of Science in Industrial Engineering, Faculty of Mechanics, Vilnius Gediminas Technical

University, 2004. In 2004–2008 – PhD student of Vilnius Gediminas Technical University.

In June 1997, he took a three weeks training course on the program “Organization and Technology of Welding Electrodes Production” held in Kiev, the E. O. Paton Electric Welding institute.

In the period of 2007 October to April 2008, he took the course in “Refresher Course for Welding Engineers and Technologists for Certification according to the EU Requirements” in the Research Institute of Welding and Materials Science, Vilnius Gediminas Technical University.

## **ATSPARIŲ DILIMUI APVIRINTŲ PAVIRŠIŲ FORMAVIMAS IR TYRIMAS**

### ***Mokslo problemos aktualumas***

Viena iš šiuolaikinės įrankių ir mašinų detalių gamybos ir restauravimo sričių yra konstrukcinio plieno detalių apvirinimas reikiamų savybių lydinio sluoksniu, taip suteikiant įrankių ir detalių paviršiams reikiamas savybes.

Yra žinoma daug įvairių paviršių stiprinimo būdų ir sukurta daug įvairių suvirinimo medžiagų, skirtų paviršių apvirinimui. Detalių, kurios yra eksploatuojamos abrazyvinio ir smūginio-abrazyvinio poveikio aplinkoje, siekiant padidinti atsparumą dilimui konkrečiomis darbinio apkrovimo sąlygomis, reikalinga optimali struktūrinė-fazinė apvirinto metalo sudėtis, kuri sąlygojama ir prilydyto metalo chemine sudėtimi.

Lietuvoje yra gaminami suvirinimo elektrodai. Viena iš gaminamos produkcijos rūšių yra įvairios paskirties apvirinimo elektrodai. Pasaulyje yra daug suvirinimo medžiagų gamintojų, kurie gamina analogišką produkciją, tačiau šie elektrodai yra brangūs. Siekiant konkuruoti elektrodų rinkoje, būtina plėsti gaminamos produkcijos asortimentą, teikti naujus gaminius, kurie savo kokybe ir kaina galėtų patenkinti įvairiausių vartotojų poreikius.

Disertacijoje nagrinėjami kuriamų elektrodų glaistų legiruojančiųjų elementų perėjimo iš elektrodo glaisto į prilydomą metalą dėsniumai, tiriama legiruojančiųjų elementų įtaka apvirintų sluoksnių savybėms. Darbe sprendžiami du pagrindiniai uždaviniai: glaistytųjų elektrodų glaistų kūrimas ir jais apvirintų sluoksnių savybių tyrimas. Pirmasis uždavinys suformuluotas, atsižvelgiant į legiruojančiųjų elementų perėjimo iš elektrodo į prilydomą

metalą dėsningumą tyrimą. Antrasis siejasi su apvirinto lydinio struktūros ir abrazyvinio dilimo tyrimu.

### ***Tyrimų objektas***

Disertacinio darbo tyrimų objektai yra:

- kuriami eksperimentiniai apvirinimo elektrodai;
- šiais elektrodais apvirintas gaminių paviršius.

### ***Darbo tikslas***

Panaudojant Lietuvoje turimas žaliavas sukurti tinkamus detalių paviršių, dirbančių abrazyvinio ir smūginio-abrazyvinio poveikio sąlygomis, apvirinimui elektrodus. Šiam tikslui pasiekti būtina ištirti prilydyto metalo legiravimo dėsningumus apvirinant geležies lydinius glaistytaisiais elektrodais.

Žinant legiruojančiųjų elementų įtaką lydinio mechaninėms savybėms, reikia surasti tinkamiausią elektrodų glaisto komponentų sudėtį bei jų santykį, nes elektrodo glaistas turi ne tik legiruoti išlydytą metalą, bet ir sudaryti apsauginį šlakų sluoksnį, užtikrinantį stabilų suvirinimo lanko sužadimą ir degimą, tinkamą suvirinimo vonelės apsaugą nuo aplinkos poveikio, neprikaištingą suvirinimo rumbelės formavimą ir gerą šlako luobelės atsiskyrimą.

### ***Darbo uždaviniai***

1. Išnagrinėti elektrodinių apvirinimo medžiagų kūrimo principus.
2. Pasiūlyti naują elektrodų glaisto sudarymo metodiką.
3. Sukurti ir pagaminti eksperimentinius apvirinimo elektrodus, kuriais apvirinti sluoksniai įgyja atsparumo abrazyviniam dilimui savybes.
4. Nustatyti legiruojančiųjų elementų perėjimo iš elektrodo į prilydomą metalą dėsningumus.
5. Nustatyti pagrindinių legiruojančiųjų elementų įtaką abrazyviniam dilimui.
6. Ištirti naujais elektrodais apvirintų sluoksnių struktūras.
7. Išnagrinėti naujų apvirinimo elektrodų panaudojimo galimybes.

### ***Mokslinis darbo naujumas***

Rengiant disertaciją buvo gauti šie mokslui nauji rezultatai:

- pasiūlyta nauja metodika apvirinimo elektrodų glaistų sudarymui;

- ištirti legiruojančiųjų cheminių elementų perėjimo iš elektrodo glaisto į prilydomą metalą ir šlaką dėsningumai, esant naujai pasiūlytai glaisto komponentų sudėčiai;
- ištirta lydinio legiruojančiųjų elementų koncentracijos kitimo įtaka apvirintų sluoksnių abrazyviniam dilimui;
- ištirta sukurtais glaistytaisiais elektrodais apvirintų sluoksnių struktūros ir jų dilimo tarpusavio priklausomybė.

### ***Tyrimų metodika***

Disertaciniame darbe taikomi analitiniai ir eksperimentiniai tyrimo metodai.

Sudarytoms glaistų kompozicijoms analitiškai apskaičiuota prilydyto metalo cheminė sudėtis, kuri būtų gaunama apvirinus metalo paviršių eksperimentiniais elektrodais.

Eksperimentams buvo pagaminti apvirinimo elektrodai ir jų tyrimams panaudoti optinės emisijos spektrometrijos, abrazyvinio dilimo bandymų (pagal ASTM G65), rentgeno spindulių difrakcijos, nuskaitytosios elektroninės mikroskopijos, optinės mikroskopijos metodai.

### ***Praktinė vertė***

Tyrimais nustatytas legiruojančiųjų komponentų kiekis elektrodų glaiste, kuriam esant šiais elektrodais apvirinti sluoksniai įgauna geriausias atsparumo abrazyviniam dilimui savybes.

Tyrimų rezultatai ir pasiūlyta elektrodų glaistų sudarymo metodika leido sukurti įvairios glaistų sudėties elektrodus, tinkamus apvirinti paviršius pageidaujamų cheminių ir mechaninių savybių lydiniumi.

### ***Ginamieji teiginiai***

1. Nustatyti legiruojančiųjų elementų (anglies, silicio, mangano, chromo, titano, boro) perėjimo iš elektrodo į prilydomą metalą dėsningumai, apvirinant rankiniu elektrolankiniu būdu glaistytaisiais elektrodais.
2. Legiruojančiųjų elementų įtakos apvirintų sluoksnių dilimo atsparumui mechanizmas.
3. Legiruojančiųjų cheminių elementų perėjimo iš elektrodo glaisto į prilydomą metalą priklausomybės nuo jų kiekio glaiste santykio.
4. Apvirintų sukurtais glaistytaisiais elektrodais sluoksnių struktūros ir jų dilimo tarpusavio priklausomybės.

## ***Darbo apimtis***

Disertaciją sudaro, įvadas, 3 skyriai ir rezultatų apibendrinimas.

Įvade nagrinėjamas problemos aktualumas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašomas mokslinis darbo naujumas, pristatomi autoriaus pranešimai ir publikacijos, disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame apžvelgti darbai, kuriuose nagrinėjami plieno paviršiaus stiprinimo metodai, lankinio apvirinimo būdai, rankinio elektrolankinio apvirinimo glaiistytaisiais elektrodais ypatumai, apvirinto sluoksnio struktūra ir savybės, eksperimentiniai dilimo tyrimo metodai, elektrodinių apvirinimo medžiagų kūrimo principai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir konkretizuojami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje, metodinėje dalyje, pateikta tyrimų metodika. Aprašyta bandymų metodų esmė, taikymas, prietaisų schemas ir veikimo principai, eksperimentų atlikimų bei rezultatų apdorojimo metodai.

Trečiajame skyriuje, eksperimentinėje dalyje, aprašyta eksperimentų atlikimo eiga, gauti rezultatai, bei jų aptarimas.

Darbo apimtis yra 100 puslapių (neskaičiuojant priedų), tekste panaudota 31 numeruota formulė, 36 paveikslai ir 24 lentelės. Taip pat yra 3 priedai. Rašant disertaciją buvo panaudoti 109 literatūros šaltiniai.

## ***Bendrosios išvados***

1. Eksperimentais patvirtinta, kad detalių, kurios yra eksploatuojamos abrazyvinio ir smūginio-abrazyvinio poveikio sąlygomis, paviršių apvirinimui reikalinga optimali konkrečioms poveikio sąlygoms struktūrinė-fazinė prilydyto metalo sudėtis. Nustatyta, kad didžiausias atsparumas dilimui gaunamas, kuomet nedideli karbidai išsidėstę tolygiai, nesudaro sankaupų, o pagrindo mikrostruktūroje susidaro ledeburitas ir austenitas.

2. Nustatyta, kad chromo perėjimas iš elektrodo į prilydomą metalą (tirtame 0–40 % intervale) turi tiesinį pobūdį. Esant lydinyje 20–26 % chromo, kitų cheminių elementų įsisavinimas į lydinį yra didžiausias. Chromo kiekiui keičiantis nuo 20 % iki 40 %, anglies kiekis praktiškai nekinta – lydinyje įsisavina maksimaliai. Anglies pernešimo koeficientas, esant lydinyje pakankamai chromo, yra lygus 0,557. Mažėjant chromo kiekiui (nuo 20 %), tiesiškai mažėja anglies įsisavinimas į lydinį, nes anglis išdega ir, kaip rodo šlako rentgeno spindulių difrakcinė analizė, pereina į šlaką.

3. Eksperimentais nustatyta, kad didėjant anglies kiekiui lydinyje nuo 0,2 iki 4 %, ženkliai didėja titano įsisavinimas (nuo 0,06 iki 1,3 %). Kitų elementų įsisavinimui anglies kiekis lydinyje įtakos neturi.

4. Atlikus apvirintų sluoksnių cheminės analizės ir atsparumo dilimui tyrimus, nustatyta, kad chromo kiekio bei chromo ir anglies kiekių santykio įtaką santykiniam atsparumui dilimui apibūdina antro laipsnio polinominės lygtys. Didžiausias lydinio atsparumas dilimui pasiekiamas esant lydinyje nuo 16 iki 30 % chromo bei esant nuo chromo ir anglies kiekių santykiui ( $Cr/C = 6-10$ ).

5. Atlikus tyrimus, paaiškėjo, kad kietųjų sluoksnių dilimą tiksliausiai atspindi sluoksnio metalo legiruojančiųjų elementų (Fe+Cr) ir (C+B) santykis. Kuo šis santykis (intervale 25...45) yra mažesnis, tuo dilimas mažesnis.

6. Nustatyta, kad anglies kiekio įtaką Fe–C–Cr–B kietųjų sluoksnių abrazyviniam dilimui geriausiai aprašo eksponentinė funkcija  $\varepsilon = 0,650 \cdot e^{0,765 \cdot (C_1)}$ .

7. Išnagrinėjus dilimo matavimo metodus, matyti, kad nė vienas iš jų nėra universalus, todėl negalima palyginti įvairiuose literatūros šaltiniuose teikiamų atsparumo dilimui duomenų, nes jie priklauso nuo mechanizmo konstrukcijos, geometrinės formos, matmenų ir detalių judėjimo kinematikos. Kaskart reikia parinkti, o kartais ir sukurti tinkamiausią metodą, matavimo aparatūrą ir įrenginius.

8. Sukurtų glaistytųjų elektrodų panaudojimas apvirinant specialių savybių lydinio yra ekonomiškai tikslingas, nes leido sumažinti elektrodo savikainą bei gauti ženklų technologinį efektą. Elektrodų savikainos sumažėjimas pasiektas glaisto komponentams panaudojus vietines žaliavas, kurios yra ženkliai pigesnės nei importuojamos, ir mažanglią nelegiruotą vielą, kuri yra pigesnė už legiruotą.

Sukūrus naujus apvirinimo elektrodus, įmonė gali rinkai pasiūlyti geresnių techninių charakteristikų pigesnę produktą, tokiu būdu padidindama savo produkto konkurencingumą, arba gali pasiūlyti rinkai šį produktą už tą pačią kainą padidindama pelno maržą, o produkto konkurencingumą padidindama pagerintų technologinių savybių dėka.

9. Tyrimų išdavoje sukurti ir jau pramoniniais kiekiais gaminami trijų markių apvirinimo elektrodai:

- 1) elektrodai, kuriais apvirinti sluoksniai įgauna vidutinio atsparumo abrazyviniam poveikiui ir didelėms smūginėms apkrovoms savybes (nuo 2005 m. kovo mėn. pagaminta 20 tonų);
- 2) elektrodai, kuriais apvirinti paviršiai gali būti naudojami intensyviaus abrazyvinio poveikio aplinkoje (nuo 2006 m. balandžio mėn. pagamintos 4 tonos);
- 3) elektrodai, kuriais apvirinti sluoksniai pasižymi atsparumo korozijai savybėmis, taip pat gali būti naudojami barjerinių sluoksnių

sudarymui prieš apvirinant kietaisiais sluoksniais (nuo 2007 m. balandžio mėn. pagaminta 0,5 tonos).

### ***Trumpos žinios apie autorių***

Valentinas Varnauskas gimė 1971 m. gegužės 13 d. Šakiuose.

1994 m. įgijo pramonės inžinerijos bakalauro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos fakultete. Nuo 1994 m. dirba UAB „Anykščių varis“ inžinieriumi technologu. 2004 m. įgijo pramonės inžinerijos mokslo magistro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos fakultete. 2004–2008 m. – Vilniaus Gedimino technikos universiteto doktorantas.

1997 m. birželio mėn. Kijevo E. Patono elektros suvirinimo institute dalyvavo trijų savaičių mokymuose pagal programą „Suvirinimo elektrodų gamybos organizavimas ir technologija“. 2007 m. spalio mėn. – 2008 m. balandžio mėn. Vilniaus Gedimino technikos universiteto Suvirinimo ir medžiagotyros problemų institute dalyvavo mokymuose „Suvirinimo inžinierių ir technologų kvalifikacijos tobulinimas ir patvirtinimas pagal ES reikalavimus“.

**Valentinas Varnauskas**

**CREATION OF HARDFACED SURFACES AND  
INVESTIGATION OF ITS WEAR RESISTANCE**

**Summary of Doctoral Dissertation  
Technological Sciences, Mechanical Engineering (09T)**

**Valentinas Varnauskas**

**ATSPARIŲ DILIMUI APVIRINTŲ PAVIRŠIŲ  
FORMAVIMAS IR TYRIMAS**

**Daktaro disertacijos santrauka  
Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (09T)**

2008 12 16. 1,5 sp. l. Tiražas 100 egz.  
Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla „Technika“,  
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, <http://leidykla.vgtu.lt>  
Spausdino UAB „Baltijos kopija“,  
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius, <http://www.kopija.lt>