



**Received:** 17.05.2018  
**Revised:** 14.06.2018  
**Accepted:** 31.08.2018  
**DOI:** 10.17804/2410-9908.2018.5.074-085

## THE STRUCTURAL STATE AND PROPERTIES OF A DEPOSITED COATING FOR AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE VALVE

N. B. Pugacheva<sup>a)</sup>, T. M. Bykova<sup>b)\*</sup>, E. B. Trushina<sup>c)</sup>, and I. Yu. Malygina<sup>d)</sup>

*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation*

a) <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>, nat@imach.uran.ru ;  
b) <https://orcid.org/0000-0002-8888-6410>, tatiana\_8801@mail.ru ;  
c) <https://orcid.org/0000-0002-2015-2648> ;  
d) <https://orcid.org/0000-0002-9463-1473>

\*Corresponding author. E-mail: tatiana\_8801@mail.ru

Address for correspondence: 34, Komsomolskaya st., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation  
Tel.: +7 (343) 362 30 43, fax: +7 (343) 374 53 30

The microstructure and properties of a welded Co-based wear-resistant coating on the facet of an internal combustion engine valve are investigated. It is shown that the structure of the deposited coating has a eutectic structure and that it is a  $\gamma$ -Co-based solid solution with hardening carbide and silicide phases. The microstructure of the diffusion layer on the coating–substrate boundary is an  $\alpha$ -Fe- and  $\gamma$ -Co-based solid solution with carbides and silicides of chromium. In this paper, a method of instrumental microindentation is used to study the micromechanical properties of the deposited coating. High values of microhardness, elastic modulus, and creep increase the ability of the surface layer to resist mechanical action.

**Keywords:** plasma surfacing, coating, microhardness, microstructure, phases, eutectics, indentation.

### Acknowledgment

*The research was conducted within the state assignment of FASO Russia, theme No. AAAA-A18-118020790145-0 (the materials studied) and UB RAS project No. 18-10-1-40 (development of methods for microindentation and phase X-ray diffraction analysis of different coating zones. The equipment of the Plastometriya collective use center, IES UB RAS, was used.*

### References

1. Ryabtsev I.A., Kuskov I.M. Materials and energy-saving technologies of surfacing for the restoration and manufacturing of machine parts and mechanisms. *Avtomaticeskaya Svarka*, 2007, no. 3, pp. 21–26. (In Russian).
2. Muktepavel V.O., Khatskin K.E. Plasma surfacing of the sealing surface of the exhaust valve of a diesel engine. *Svarochnoe Proizvodstvo*, 1989, no. 4, pp. 27. (In Russian).
3. Gladky P.V., Perepletchikov E.F., Ryabtsev I.A. *Plazmennaya naplavka* [Plasma-Jet Hard-Facing]. Kiev, Eco Technology Publ., 2007, pp. 292. (In Russian).
4. Perepletchikov E.F., Ryabtsev I.A. Plasma-powder hard-facing of parts of shutoff valves for various purposes. *Technologiya proizvodstva*, 2007, no. 49, pp. 57–61. (In Russian).
5. Gayamov A.M., Budinovskiy S.A., Muboyadzhyan S.A., Kosmin A.A. Choosing a heat-resistant coating for the VZhM4 high-temperature rhenium-ruthenium-containing nickel alloy. In: *Trudy "VIAM"*,

2014, no. 1. Available at: <http://viamworks.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/639.pdf>. (In Russian).

6. Budinovsky S.A., Muboyadzhan S.A., Gayamov A.M., Matveev P.V. Development of ion-plasma heat-resistant metal layers of thermal barrier coatings for cooled turbine rotor blades. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, 2013, no. 12, pp. 16–21. (In Russian).

7. Makarov A.V., Gorkunov E.S., Malygina I.Yu., Kogan L.Kh., Savrai R.A., Osintseva A.L. Eddy-current testing of the hardness, wear resistance and thickness of coatings prepared by gaspowder laser cladding. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2009, vol. 45, iss. 11, pp. 797–805.

8. Zikin A., Badisch E., Hussainova I., Tomastik C., Danninger H. Characterisation of TiC– NiMo reinforced Ni-based hardfacing. *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 236, pp. 36–44. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.02.027.







9. Mendez P.F., Barnes N., Bell K., Borle S.D., Gajapathi S.S., Guest S.D., Izadi H., Gol A.K., Wood G. Welding processes for wear resistant overlays. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, vol. 16, pp. 4–25. DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.06.011.

Подана в журнал: 17.05.2018  
УДК 620.18.186 : 621.793  
DOI: 10.17804/2410-9908.2018.5.074-085

## СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ КЛАПАНА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Пугачева Н.Б.<sup>а)</sup>, Быкова Т.М.<sup>б)\*</sup>, Трушина Е.Б.<sup>в)</sup>, Малыгина И.Ю.<sup>г)</sup>

*Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,  
34, ул. Комсомольская, г. Екатеринбург, Российская Федерация*

- <sup>а)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>,  nat@imach.uran.ru ;  
<sup>б)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-8888-6410>,  tatiana\_8801@mail.ru ;  
<sup>в)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-2015-2648> ;  
<sup>г)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-9463-1473>

\*Ответственный автор. Электронная почта: tatiana\_8801@mail.ru.  
Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, Российская Федерация  
Тел.: +7 (343) 362–30–43; факс: +7 (343) 374–53–30

Исследована микроструктура и свойства наплавленного износостойкого покрытия на основе Со на фаске клапана двигателя внутреннего сгорания. Показано, что структура наплавленного покрытия имеет эвтектическое строение и представляет собой твердый раствор на основе  $\gamma$ -Со с упрочняющими карбидными и силицидными фазами. Микроструктура диффузионного слоя на границе покрытия с основой представляет собой твердый раствор на основе  $\alpha$ -Fe и  $\gamma$ -Со с карбидами и силицидами хрома. В настоящей работе применен метод инструментального микроиндентирования для исследования микромеханических свойств наплавленного покрытия. Высокие значения микротвердости, модуля упругости и ползучести, повышают способность поверхностного слоя сопротивляться механическому воздействию.

**Ключевые слова:** плазменная наплавка, покрытие, микротвердость, микроструктура, фазы, эвтектика, индентирование.

### 1. Введение

Повышение мощности современных силовых установок (дизельных и газотурбинных двигателей, газовых турбин) предъявляет повышенные требования к материалам, из которых изготавливают детали. В большинстве случаев эти материалы должны обладать сочетанием таких свойств, как высокая конструкционная прочность, износостойкость, жаро- и коррозионная стойкость. Если конструкционная прочность обеспечивается материалом сердцевины детали, то износостойкость, жаро- и коррозионная стойкость определяется химическим составом и структурой поверхностного слоя. Решить данную задачу удастся за счет поверхностного упрочнения, в частности, за счет наплавки. Нанесение покрытий на материалы с выбранными механическими свойствами методом наплавки порошковых сплавов на основе кобальта является надежным способом получения требуемой комбинации свойств, например, коррозионной стойкости и износостойкости. Сегодня эти материалы находят все большее применение в судостроении, автотракторостроении, приборостроении, металлургической, горнодобывающей, нефтяной, сельскохозяйственной и др. отраслях машиностроения. Применение износостойких покрытий, полученных наплавкой, позволяет не только повысить надежность и долговечность большой номенклатуры деталей и оборудования, но и существенно сократить расход высоколегированных сталей, снизить энергоемкость и металлоемкость, расходы на техническое обслуживание, производство запчастей и ремонт оборудования [1–2].

Одной из наиболее нагруженных деталей является выпускной клапан дизельных двигателей, подвергающийся в процессе эксплуатации совместному воздействию высоких температур, ударных нагрузок и агрессивной газовой среды. Клапаны выходят из строя главным образом из-за преждевременного разрушения контактной поверхности фаски. Существуют различные способы увеличения ресурса работы фаски клапанов двигателей внутреннего сгорания. Целесообразной представляется наплавка материалами с заданными свойствами.

В настоящее время активно исследуются и находят промышленное применение технологии создания сложных заготовок и готовых изделий плазменной наплавкой порошковых материалов [3]. Наплавка слоя износостойкого материала на поверхности клапанов позволяют увеличить ресурс оборудования в разы. Наиболее эффективным способом предупреждения прогара и изнашивания является наплавка фаски сплавами с высокой жаростойкостью, термической стойкостью и коррозионной стойкостью. В зависимости от условий работы клапанов для наплавки контактных поверхностей фасок используют сплавы на основе кобальта или никеля (стеллиты). Характерной особенностью кобальтовых сплавов является способность сохранять жаропрочность до температур, незначительно меньших (примерно на 110 °С) температуры их плавления. При температуре около 980 °С жаропрочность их намного выше жаропрочности сложнелегированных сплавов на никелевой основе. Кобальтовыми сплавами наплавляют клапаны двигателей внутреннего сгорания, уплотнительные поверхности паровой арматуры сверхвысоких параметров, матрицы для прессования цветных металлов и сплавов. При наплавке сталей необходимо стремиться к минимальному переходу железа из основы в наплавленное покрытие, иначе свойства последнего резко ухудшаются.

В настоящее время малоизученными являются структура и свойства диффузионного слоя на границе покрытия с основой, который определяет прочность сцепления и долговечность покрытия.

Целью данной работы является исследование структуры и свойств наплавленного износостойкого покрытия на фаске выпускного клапана.

## 2. Материалы и методика эксперимента

Выпускной клапан изготовлен из стали 40X10C2M, химический состав стали представлен в табл. 1. Химический состав материала определяли с помощью спектрометра для анализа металлов SPECTRO MAXx LMF04.

Таблица 1 – Химический состав выпускного клапана

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Fe
40X10C2M	0,365	2,06	0,411	10,3	0,124	0,76	0,005	0,03	85,7

Для обеспечения повышенной работоспособности уплотнительный пояс тарелки клапана упрочнен наплавкой. В качестве наплавки использован сплав Tribaloy T400 – это кобальтовый сплав с номинальным составом: 28Mo – 9Cr – 2,6Si – 0,04C. Наличие в сплаве Mo придает сплаву большую износостойкость благодаря формированию дополнительных богатых молибденом карбидных фракций с повышенной твердостью.

Наплавку наносили плазменно-порошковым методом. При плазменной наплавке порошок вдвигается в плазму. Наплавка выполняется с поперечными колебаниями плазматрона. В качестве плазмообразующего, защитного и транспортирующего газа используется аргон. Перед наплавкой тарелку клапана нагревают ацетилено-кислородным пламенем до температуры 200–250 °С. Наплавку осуществляют в один слой. После наплавки производится отжиг при температуре 700 °С [4–5]. На рис. 1 представлен внешний вид клапанов, упрочненных наплавкой.



Рис. 1. Внешний вид клапана, упрочненный наплавкой

Микроструктуру наплавленного покрытия исследовали на поперечном шлифе с помощью растрового электронного микроскопа TESCAN VEGA II XMU при увеличениях до 2 тыс. Локальный химический состав разных зон определяли с помощью системы энергодисперсионного (ЭДС) микроанализа INCA ENERGY 450 с ADD детектором, с программным обеспечением INCA.

Методом рентгеноструктурного анализа определяли фазовый состав покрытия на дифрактометре SHIMADZU в  $\text{Cr-}k\alpha$  излучении.

Микромеханические свойства зон покрытия были исследованы на инструментированном микротвердомере FISHERSCOPE 2000хум с системой кинетического микроиндентирования. Нагрузка на индентор составляла 0,5 Н. Были определены значения микротвердости, модуль Юнга, приведенный модуль упругости ( $E_{\text{ind}}$ ), полная работа вдавливания индентора ( $A$ ), работы сил упругого последействия ( $A_{\text{рел.}}$ ) и остаточного формоизменения ( $A_{\text{о.ф.}}$ ). Полная работа, затраченная на вдавливание индентора, определяется площадью под кривой нагружения, работа сил упругого последействия – площадью под кривой разгрузки, а работа, затраченная на остаточное формоизменение материала при вдавливании индентора, – площадью, ограниченной кривыми нагружения и разгрузки (схема на рис. 2).

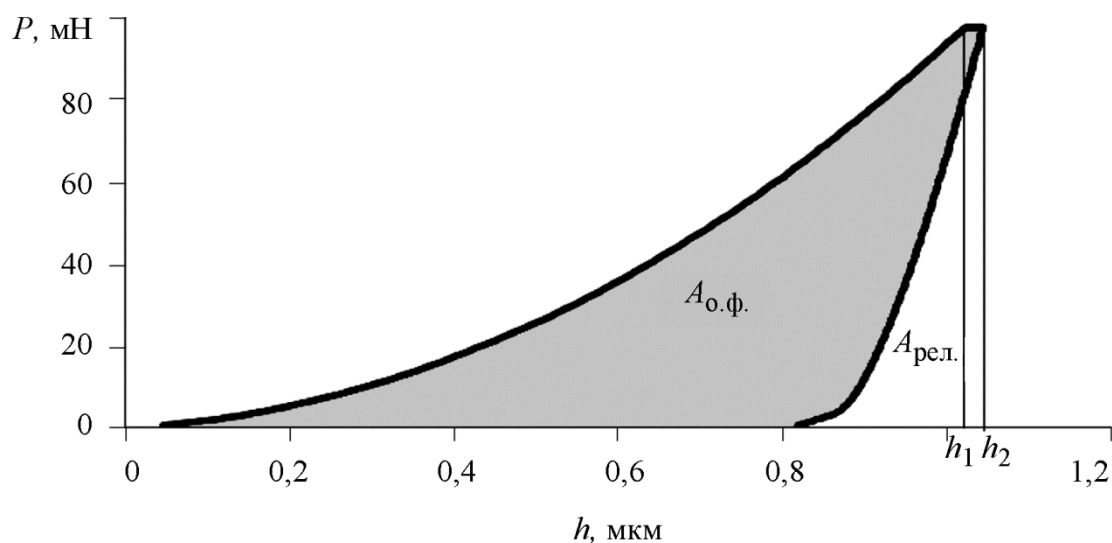


Рис. 2. Схема расчетов работы остаточного формоизменения ( $A_{\text{о.ф.}}$ ) и работы сил релаксации ( $A_{\text{рел.}}$ )



Запас пластичности ( $\varphi$ ) оценивали по формуле:

$$\varphi = \frac{A_{o.\phi.}}{A} \cdot 100\% \quad (1)$$

Ползучесть или indentation creep рассчитывали как

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где  $C_{IT}$  – ползучесть, характеризующая способность материала к формоизменению при постоянно действующей нагрузке;  $h_1$  – глубина внедрения индентора, соответствующая начальной точке горизонтального участка на кривой нагружения (рис. 2);  $h_2$  – глубина внедрения индентора, соответствующая конечной точке кривой. Время выдержки при максимальной нагрузке – 20 с.

### 3. Результаты исследований и их обсуждение

Внешний вид исследованной поверхности шлифа наплавленного износостойкого покрытия показан на рис. 3. Наплавленное покрытие – порошок кобальтового сплава Tribaloy T400, диффузионная зона – зона сплавления покрытия и основы, а основа – сталь 40X10C2M (сильхром), хромкремнистая сталь мартенситного класса, характеризуется сравнительно невысоким содержанием легирующих элементов.

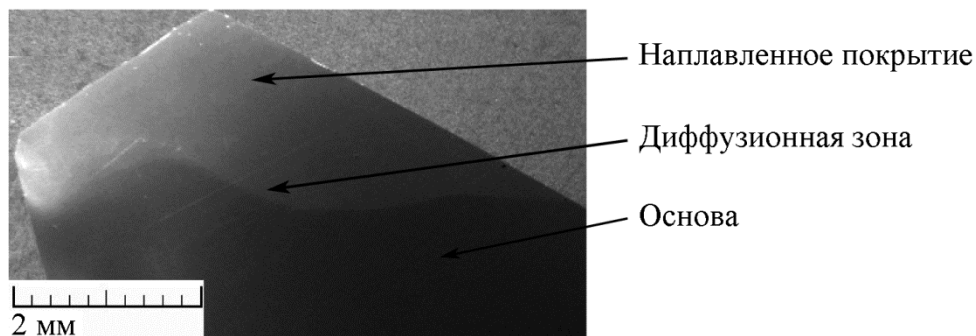


Рис. 3. Внешний вид поверхности шлифа клапана двигателя внутреннего сгорания с наплавленным покрытием

Использованные порошки кобальтового сплава Tribaloy T400 называют сплавами с фазами Лавеса [6]. Фазы Лавеса – прочные интерметаллидные фазы, которые выделяются в кобальтовых сплавах вследствие добавления в них молибдена и кремния. Содержание углерода в сплавах серии Tribaloy минимально возможное, поскольку большое количество карбидных выделений в сочетании с наличием фаз Лавеса может привести к охрупчиванию материала. Эти сплавы характеризуются полным отсутствием вольфрама и большим содержанием молибдена (22–29 %), что отличает эти сплавы от других групп кобальтовых сплавов. Их используют в особо тяжелых условиях работы (коррозионная среда и высокие температуры). Рабочая температура может находиться в диапазоне 800–1000 °C [7–9].

По данным микрорентгеноспектрального и рентгеноструктурного методов анализа, внешняя зона наплавленного покрытия представляет собой  $\gamma$ -твердый раствор на основе Co с упрочняющими фазами: карбидом хрома ( $Cr_{23}C_6$ ) и силицидами молибдена ( $MoSi_2$ ), кобальта ( $Co_2Si$ ) и хрома ( $Cr_5Si_3$ ) рис. 4.

Эвтектическая структура наплавленного покрытия является важным фактором, определяющим сопротивление высокотемпературному изнашиванию. Чем более мягкой и пла-

стичной является эвтектика, тем большую долю энергии трения она воспринимает и имеет большую способность релаксировать напряжения. В крупнозернистой структуре слабее выражена ползучесть по границам и диффузионный перенос в области высоких температур. Структура наплавленного покрытия с исследованными участками микроанализа представлена на рис. 5. Химический состав исследуемых участков наплавленного материала представлен в табл. 2.

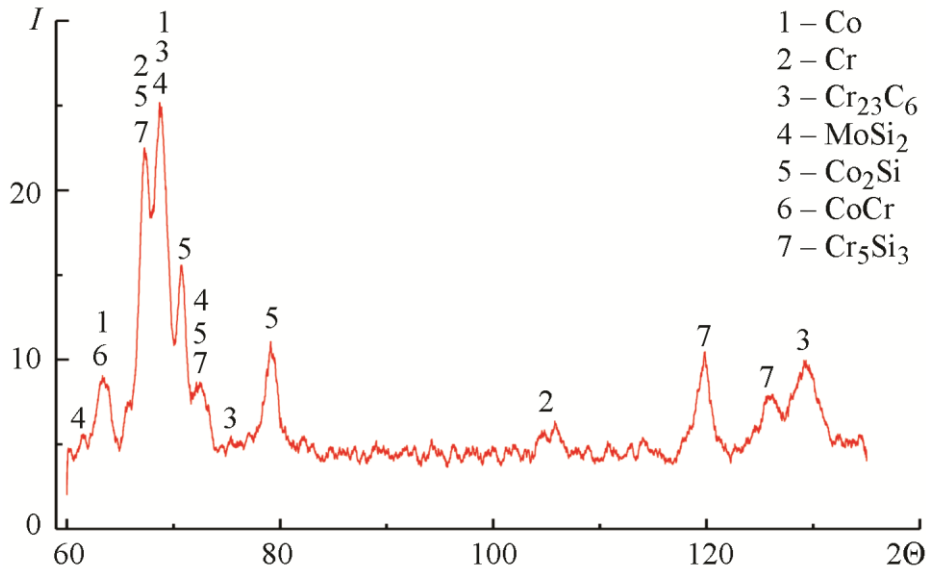


Рис. 4. Дифрактограмма наплавленного покрытия

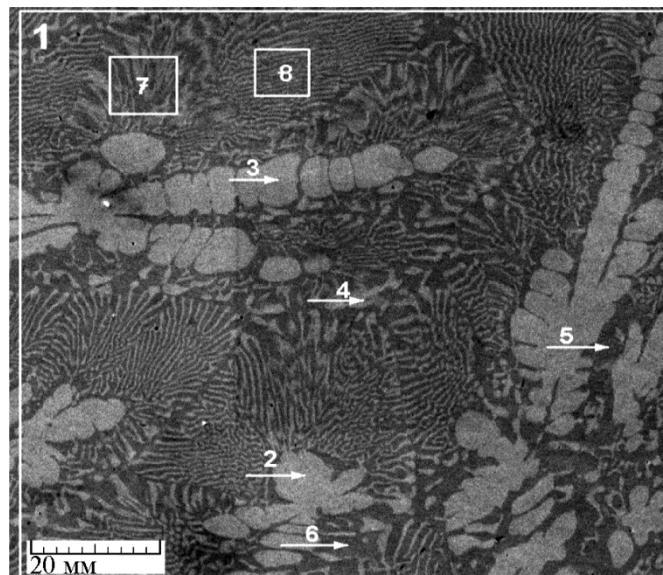


Рис. 5. Структура наплавленного покрытия с отмеченными участками микроанализа

Структура диффузионной зоны состоит из твердого раствора на основе  $\alpha$ -Fe и  $\gamma$ -Co, с карбидами ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  и  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ) и силицидами ( $\text{Cr}_5\text{Si}_3$  и  $\text{CrSi}$ ). Вблизи линии сплавления происходит изменение химического состава наплавленного покрытия за счет обогащения атомами железа из основы (рис. 6).

Таблица 2 – Химический состав участков анализа наплавленного покрытия

Участок анализа	Состав, % мас.				
	Si	Cr	Fe	Co	Mo
1	3,03	9,62	14,22	47,35	25,78
2	4,94	6,93	8,93	37,11	42,09
3	5,00	6,75	8,97	37,00	42,28
4	3,61	9,76	12,36	42,43	31,84
5	2,70	10,14	15,28	49,31	22,57
6	1,90	11,49	17,39	53,24	15,97
7	2,70	10,01	15,62	49,75	21,93
8	2,80	10,06	15,08	49,12	22,94

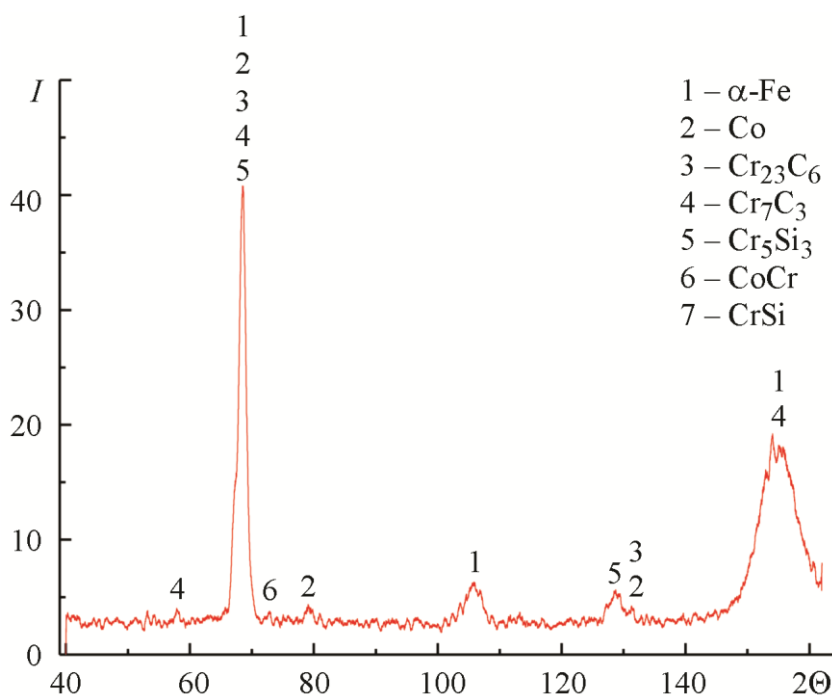


Рис. 6. Дифрактограмма диффузионной зоны

В диффузионной зоне дефекты наплавленного покрытия в виде пор и микротрещин отсутствуют, линия сплавления четко просматривается (рис. 7) химический состав участков анализа представлен в табл. 3.

По мере удаления от линии сплавления вглубь наплаваемого покрытия размеры частиц увеличиваются. Толщина диффузионной зоны примерно 100 мкм при общей толщине покрытия 7 мм.

Таблица 3 – Химический состав участков анализа в диффузионной зоне

Участок анализа	Состав, % мас.					
	C	Si	Cr	Fe	Co	Mo
1	1,40	1,90	10,13	36,09	38,19	11,90
2	1,43	3,07	9,57	24,52	38,55	22,86
3	1,21	2,32	10,05	84,74	0,39	0,75
4	1,77	3,10	9,36	29,06	32,38	22,48
5	0	1,95	10,13	30,05	44,86	13,01
6	0	2,02	10,20	32,97	42,20	12,61



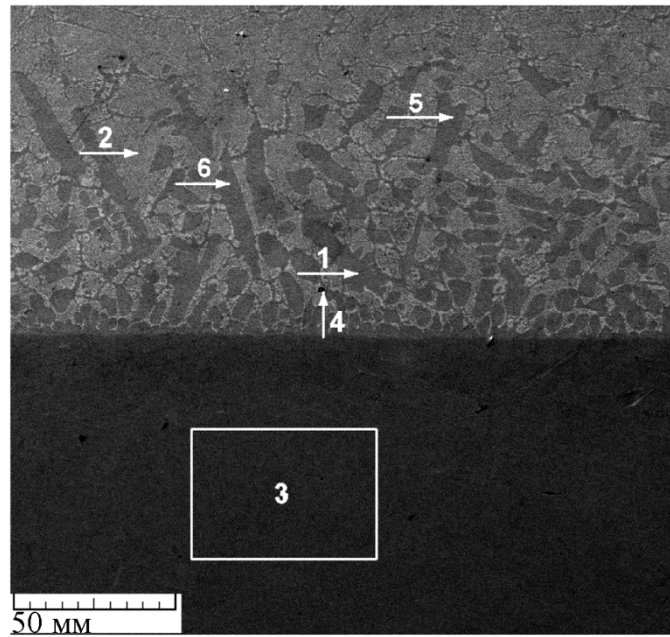


Рис. 7. Структура диффузионной зоны с участками анализа

Диффузионная зона представляет собой слой смешанной структуры, образовавшийся в результате оплавления основы и диффузионного взаимодействия с покрытием. График распределение элементов показан на рис. 8 (линия показывает границу покрытия с основой).

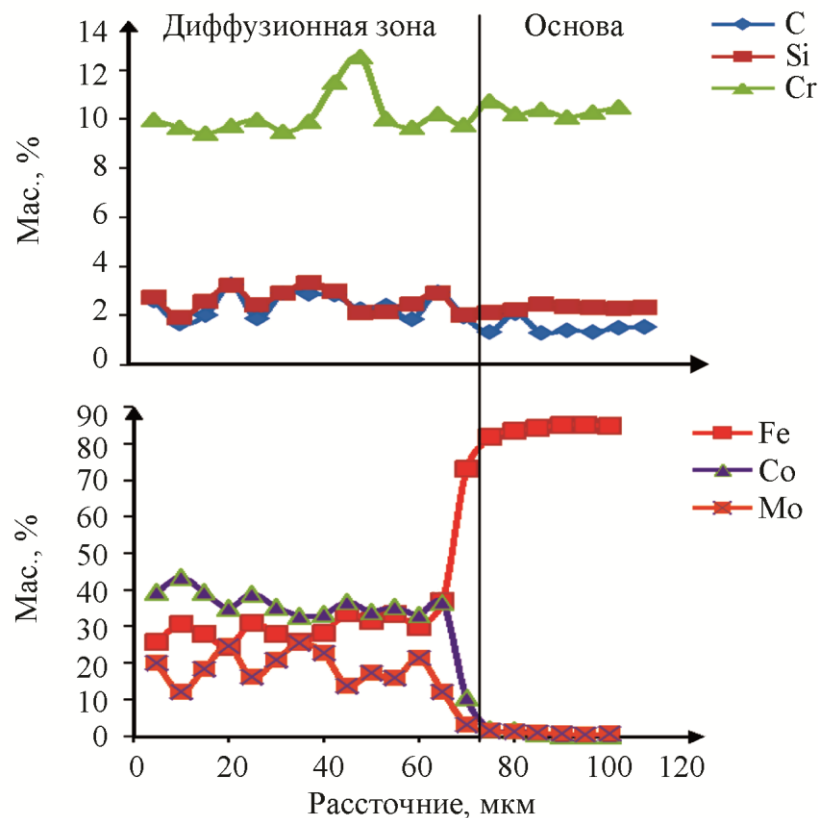


Рис. 8. График распределения элементов в диффузионной зоне покрытия

Твердость наплавленного покрытия составляет 53 HRC, твердость основы 40 HRC. В табл. 4 приведены данные кинетического микроиндентирования, которые показывают, что значения максимальной глубины вдавливания индентора ( $h_{max}$ ) наплавленного покрытия ниже, чем при нагружении в основу, а значение микротвердости (HV 0,5) выше. Модуль упругости в результате наплавки изменился незначительно (в пределах 8 %). Видно также, что показатель ползучести наплавленного покрытия больше по сравнению с основой, что свидетельствует о повышенной способности сопротивляться разрушению.

Таблица 4 – Результаты микроиндентирования

Слои	Расстояние от поверхности, мм	HV 0,5	$h_{max}$	$E_{ind}$ , ГПа	$E_{упр.}$ , ГПа	$\phi$ , %	$C_{IT}$
Наплавленное покрытие	0	457	2	398	362	89	3,2
	0,5	448	2,1	380	345	89	3
	1	468	2,1	342	311	87	3
	1,5	487	2	327	297	87	3
	2	493	2	307	279	86	2,5
	2,5	515	2	289	263	84	2,2
	3	536	2	277	252	83	2
	3,5	563	2	260	236	82	1,7
	4	590	2	261	237	81	1,4
	4,5	568	2	257	234	81	1,3
Диффузионная зона	5	585	2	253	230	81	1,3
	5,5	554	2	240	218	81	1,2
	6	575	2	248	226	81	1,1
	6,5	537	2	246	224	82	1
	7	532	2	241	219	81	1
Основа	7,5	421	2,2	250	227	86	1
	8	375	2,3	246	223	86	1
	8,5	339	2,4	249	226	88	1,1
	9	339	2,4	236	215	88	1,1
	9,5	334	2,5	228	208	88	1
	10	324	2,5	230	208	88	1
	10,5	329	2,5	228	208	88	1
	11	328	2,5	242	220	88	1
11,5	326	2,5	241	219	88	1	
12	334	2,5	252	229	88	1	
12,5	334	2,4	247	225	88	0,9	

Большое количество упрочняющих частиц в наплавленном покрытии способствует неравномерному распределению микротвердости по толщине покрытия (рис. 9 а). Явно выделяется переходный слой, образовавшийся в результате диффузии (рис. 9 а, показано стрелкой). В диффузионной зоне твердость покрытия на 30 % выше, чем твердость внешней зоны. Это связано с наличием дополнительной упрочняющей фазы – частиц карбида хрома  $Cr_7C_3$ . Присутствие зерен  $\alpha$ -Fe является благоприятным в этой зоне покрытия, поскольку они амортизируют возникающие при термических или механических нагрузках напряжения. Такое сочетание мягких и твердых фаз обеспечивает плавное изменение значений модуля упругости и ползучести при переходе из основы в покрытие (табл. 4). Основа является более пластичной по сравнению с наплавленным

покрытием, поэтому серии кривых нагружения расположены немного правее (рис. 9 б) и показатель запаса пластичности  $\phi$  больше (табл. 4).

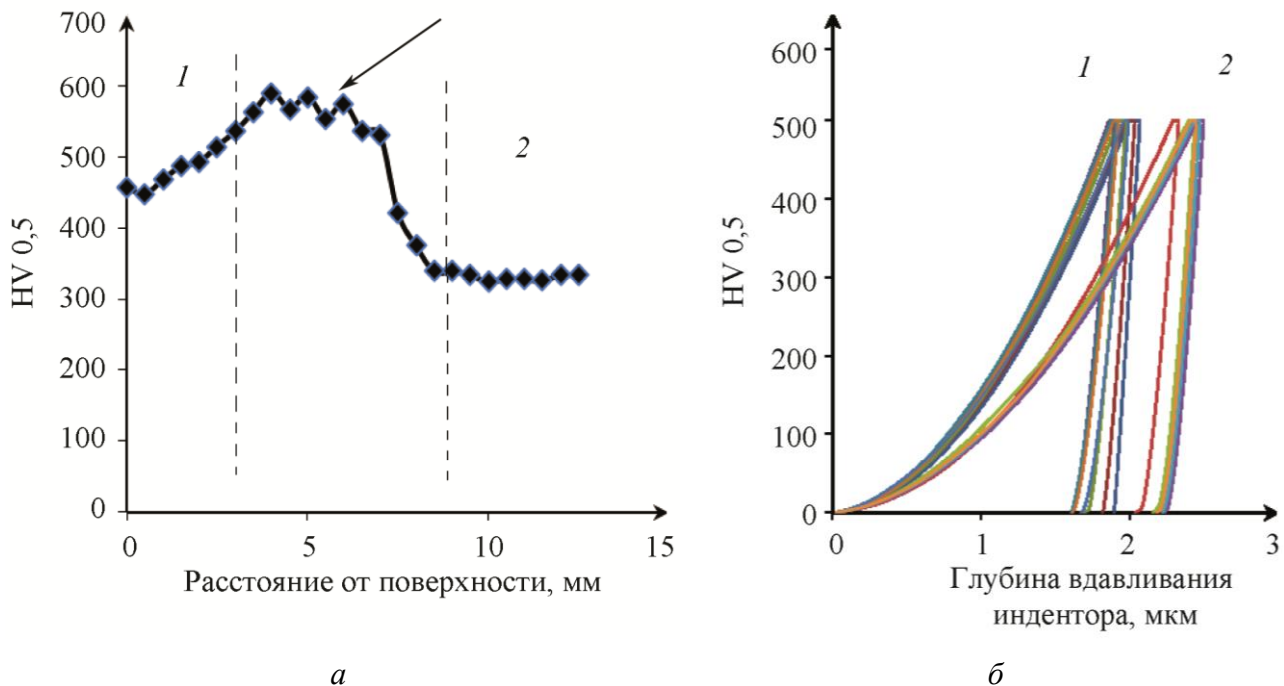


Рис. 9. Распределение микротвердости (а) и кривые микроиндентирования (б):  
1 – наплавленное покрытие, 2 – основа

В отличие от твердости, модуль упругости не является структурно-чувствительной характеристикой, а определяется в основном параметрами кристаллической решетки. Высокие значения модуля упругости говорят о хорошей плотности наплавки и отсутствии микропор в диффузионной зоне. Плавное изменение условного показателя запаса пластичности ( $\phi$ ) от покрытия в основу обеспечивает меньшее растрескивание покрытия при эксплуатации.

#### 4. Выводы

Установлено, что структура наплавленного покрытия Tribaloy T400 имеет эвтектическое строение и представлена твердым раствором на основе Со с упрочняющими частицами карбида ( $Cr_{23}C_6$ ) и силицидов ( $MoSi_2$ ,  $Co_2Si$  и  $Cr_5Si_3$ ). В диффузионной зоне дефекты наплавки отсутствуют, линия сплавления ровная. Диффузионная зона представляет собой твердый раствор на основе  $\alpha$ -железа и  $\gamma$ -кобальта, с карбидами ( $Cr_{23}C_6$  и  $Cr_7C_3$ ) и силицидами ( $Cr_5Si_3$  и  $CrSi$ ).

Исследование микромеханических свойств с помощью кинетического микроиндентирования показало неравномерное распределение микротвердости по толщине наплавленного покрытия за счет большого количества упрочняющих фаз. Происходит плавное распределение свойств от основы к наплавленному покрытию, что при эксплуатации увеличивает сопротивление износу и предотвращает растрескивание наплавленного покрытия в области высоких температур.

#### Благодарность

Исследования проведены на оборудовании центра коллективного пользования «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН в рамках выполнения государственного задания ФАНО России по теме № АААА-А18-118020790145-0 в части исследованных материалов и проекта УрО РАН № 18-10-1-40 в части разработки методов микроиндентирования и фазового рентгеноструктурного анализа различных зон покрытий.

## Литература

1. Рябцев И. А., Кусков И. М. Материалы и энергосберегающие технологии наплавки для восстановления и изготовления деталей машин и механизмов // Автоматическая сварка. – 2007. – № 3. – С. 21–26.
2. Муктепавел В. О., Хацкин К. Е. Плазменная наплавка уплотнительной поверхности выпускного клапана дизельного двигателя // Сварочное производство. – 1989. – № 4. – С. 27.
3. Гладкий П. В., Переpletчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменная наплавка. – Киев : Эко-технологія, 2007. – 292 с.
4. Переpletчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменно-порошковая наплавка деталей запорной арматуры различного назначения // Технология производства. – 2007. – № 49. – С. 57 – 61.
5. Выбор жаростойкого покрытия для жаропрочного никелевого рений-рутений содержащего сплава марки ВЖМ4 / А. М. Гаямов, С. А. Будиновский, С. А. Мубояджан, А. А. Косьмин // Труды «ВИАМ». – 2014. – № 1. – URL: <http://viamworks.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/639.pdf>
6. Разработка ионно-плазменных жаростойких металлических слоев теплозащитных покрытий для охлаждаемых рабочих лопаток турбин / С. А. Будиновский, С. А. Мубояджан, А. М. Гаямов, П. В. Матвеев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – № 12. – С. 16–21.
7. Eddy-current testing of the hardness, wear resistance and thickness of coatings prepared by gaspowder laser cladding / A. V. Makarov, E. S. Gorkunov, I. Yu. Malygina, L. Kh. Kogan, R. A. Savrai, A. L. Osintseva // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2009. Vol. 45, iss. 11. – P. 797–805.
8. Characterisation of TiC–NiMo reinforced Ni-based hardfacing / A. Zikin, E. Badisch, I. Hussainova, C. Tomastik, H. Danninger // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 236. – P. 36–44. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.02.027.
9. Welding processes for wear resistant overlays / P. F. Mendez, N. Barnes, K. Bell, S. D. Borle, S. S. Gajapathi, S. D. Guest, H. Izadi, A. K. Gol., G. Wood // Journal of Manufacturing Processes. – 2014. – Vol. 16, iss. 1. – P. 4–25. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.06.011.