

# АДГЕЗИОННО-АКТИВНЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ ИЗНОСОСТОЙКИЕ НАПЛАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ КМХ И КМХС

А. М. КОСТИН<sup>1</sup>, В. А. МАРТЫНЕНКО<sup>1</sup>, А. Б. МАЛЫЙ<sup>2</sup>, В. В. КВАСНИЦКИЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова.

54025, г. Николаев, пр-т Героев Сталинграда, 9. E-mail: university@nuos.edu.ua

<sup>2</sup>ГП НПКГ «Зоря-Машпроект». 54018, г. Николаев, пр-т Богоявленский, 42-а. E-mail: office@zorya.com.ua

<sup>3</sup>НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, пр-т Победы, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

Разработаны новые адгезионно-активные износостойкие жаропрочные композиционные наплавочные материалы КМХ и КМХС, обеспечивающие существенное повышение износостойкости контактных поверхностей деталей горячего тракта газотурбинных двигателей. Установлено, что дополнительное введение карбида хрома в сплав на основе твердого раствора кобальта, легированного молибденом, хромом, бором и кремнием, способствует стабилизации его структуры и свойств с одновременным снижением температуры плавления композиции. Бор и кремний обеспечивают повышение адгезионной активности сплавов при нанесении на контактные поверхности и образуют равномерно распределенные термодинамически устойчивые высокодисперсные комплексные силициды и бориды. Испытания износостойкости показывают, что среднее значение интенсивности износа рабочих поверхностей, наплавленных новыми материалами КМХ и КМХС, в условиях работы при критических температурах в окислительной среде в 3...4 раза ниже, чем поверхностей, наплавленных известными промышленными сплавами. Высокие характеристики износостойкости и возможность работы в условиях действия критических температур позволили рекомендовать разработанные композиционные материалы и технологию их наплавки к промышленному применению. Библиогр. 10, табл. 3, рис. 1.

*Ключевые слова:* наплавка, адгезионно-активные износостойкие композиционные материалы, жаропрочные сплавы, структура, фазовый состав, интенсивность изнашивания

Одной из главных проблем судового машиностроения является повышение эффективности, надежности и ресурса газотурбинных двигателей (ГТД). Прежде всего, эти параметры определяются износом контактных поверхностей рабочих лопаток, которые эксплуатируются в экстремальных условиях при высоких рабочих нагрузках и температурах.

В настоящее время существует широкий выбор износостойких материалов для наплавки на контактные поверхности с расплавлением или без расплавления основного металла.

Основными критериями их технологичности являются: температура плавления и возможные способы нанесения на контактные поверхности жаропрочных сплавов. На практике перечисленные критерии могут иметь взаимоисключающее влияние, что существенно усложняет либо делает невозможным одновременный выбор оптимального состава сплава для наплавки и способа формирования износостойкого слоя, который мог бы удовлетворять специфическим требованиям конкретного производства [1].

Целью настоящей работы являлась разработка новых адгезионно-активных износостойких жаропрочных композиционных материалов, обеспечивающих существенное повышение ре-

сурса контактных поверхностей деталей горячего тракта ГТД.

Известно, что в судовом газотурбостроении для изготовления турбинных рабочих лопаток применяют жаростойкие никелевые сплавы типа ЧС88У-ВИ, ЧС70У-ВИ и др. Эти сплавы упрочняются дисперсными выделениями  $\gamma'$ -фазы  $Ni_3(Al, Ti)$ , имеющей склонность к коагуляции в процессе контактного взаимодействия при высоких температурах, что приводит к формированию благоприятных условий для увеличения износа, в том числе и за счет интенсификации процессов окисления поверхностного слоя, обедненного легирующими элементами. Эти сплавы относятся к материалам с неудовлетворительной технологической свариваемостью, поэтому температура их нагрева при нанесении износостойкого слоя на контактную поверхность не должна превышать  $1220 \pm 10$  °С. В противном случае невозможно избежать резкого снижения прочности основного металла в результате деградации  $\gamma'$ -фазы и формирования трещин в месте наплавки [2]. В этой связи сплавы, применяемые для упрочнения контактных поверхностей, должны, при нанесении в виде расплава, иметь температуру плавления не выше  $1220 \pm 10$  °С. При более высокой температуре плавления износостойкого материала его нанесение осуществляют пайкой, но

конструкция лопаток турбин не всегда позволяет применить этот эффективный метод.

Таким образом, износостойкие сплавы удобно разделить на две группы по температуре плавления: до и более  $1220 \pm 10$  °С.

Крайне сложной проблемой является разработка сплавов, относящихся к первой группе, имеющих необходимый уровень износостойкости при рабочих температурах (до 900 °С) и способных выдержать кратковременный нагрев до температуры 1150 °С, которая близка к температуре растворения упрочняющей  $\gamma'$ -фазы в основном металле.

К сплавам первой группы относится композиция КБНХЛ-2, имеющая никель-кобальтовую матрицу с содержанием, мас. %: 35,5...36,5 никеля; 20,5...21,5 кобальта; 24,5...25,5 хрома; 11,5...12,5 карбида хрома; 2,5...3,5 бориды хрома и 2,9...3,1 бора [3]. Высокая относительная износостойкость сплава обеспечивается упрочнением никель-кобальтовой матрицы карбидами и бориды хрома. Недостатком сплава является его низкая температура плавления ( $\sim 1070...1090$  °С), что не обеспечивает сплаву возможность выдерживать кратковременные термические нагрузки при температурах до 1150 °С.

Все другие известные сплавы можно отнести ко второй группе, что существенно затрудняет их использование при нанесении на контактную поверхность наплавкой. Например, известен сплав на основе кобальта ВЗК-р, имеющий в своем составе в качестве основных легирующих элементов, мас. %: 28,0...32,0 хрома; 7,0...11,0 вольфрама; 1,6...2,0 углерода и дополнительно легированный в небольшом количестве Si, Mn, Ni, B, Fe. Упрочнение сплава обеспечивается образованием карбидов вольфрама и хрома [4]. Температура стабильной эксплуатации этого сплава не превышает 600 °С.

Похожий химический состав имеет сплав на основе кобальта Stellite 12, имеющий в своем составе в качестве основных легирующих элементов, мас. %: 28,0...31,0 хрома; 7,2...9,2 вольфрама; 1,55...1,75 углерода и дополнительно Ni, Si, Fe, Mo. Упрочнение сплава происходит в результате образования карбидов вольфрама и хрома [5]. Температура эксплуатации этого сплава так же не превышает 600 °С.

Известен сплав на основе никеля Х30Н5Ю5Т2, содержащий, мас. %: 32,0...36,0 хрома; 5,0...6,0 алюминия; 1,4...2,1 титана; 1,2...1,6 углерода в качестве основных легирующих эле-

ментов и дополнительно в небольшом количестве бор и железо. Высокая относительная износостойкость этого сплава обеспечивается путем образования интерметаллидов  $Ni_3(Al, Ti)$  и комплексных карбидов хрома и титана. Такой механизм упрочнения является недостаточно эффективным ввиду нестабильности  $\gamma'$ -фазы в условиях действия значительных контактных нагрузок при повышенных температурах в окислительной среде. Это способствует увеличению интенсивности изнашивания сплава, что является его существенным недостатком.

В авиационной технике достаточно успешно применяют сплав на основе кобальта ХТН-61, содержащий, мас. %: 19,0...21,0 хрома; 15,0...16,0 ниобия; 2,7...3,3 вольфрама; 1,8...2,2 молибдена; 0,8...1,2 алюминия; 1,95...2,30 углерода, упрочненный дисперсными выделениями монокарбида ниобия и имеющий высокую износостойкость, превышающую износостойкость сплавов на основе никеля за счет стойкости упрочняющей фазы [6]. Существенным недостатком этого сплава является его низкая жаростойкость и потеря свойств при расплавлении (температура плавления  $1340 \pm 10$  °С). Нанесение этого сплава на контактные поверхности возможно исключительно пайкой.

Похожий состав имеет сплав на основе кобальта ХТН-62, содержащий, мас. %: 5,0...25,0 хрома; 13,5...17,0 ниобия; 6,0...12,0 вольфрама; 2,0...3,5 алюминия; 2,0...5,0 железа; 1,6...1,9 углерода. Сплав обладает высокой жаростойкостью, однако относительно низкое содержание карбидной фазы (NbC) приводит к значительному снижению износостойкости сплава, что является существенным недостатком и не обеспечивает в полной мере всего необходимого комплекса свойств.

В основу разработки новых адгезионно-активных износостойких жаропрочных композиционных материалов поставлена задача обеспечения необходимого уровня их износостойкости при рабочих температурах (до 900 °С), способности выдерживать временные термические нагрузки в окислительной среде при температурах до 1150 °С и возможности нанесения в виде расплава на контактные поверхности при температурах их нагрева не выше  $1220 \pm 10$  °С.

Совместно с ГП НПКГ «Зоря-Машпроект», разработаны новые износостойкие жаропрочные материалы КМХ и КМХС, которые соответствуют требованиям, приведенным в работах [7, 8].

Таблица 1. Свойства сплавов КМХ и КМХС

Марка сплава	Химический состав, мас. %							Температура плавления*, °С
	Со	Cr	Mo	Si	В	Ni	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	
КМХ	Основа	17...18	27...28	2,8...3,2	0,8...1,2	-	-	1185
КМХС	Основа	17...18	27...28	2,8...3,2	0,8...1,2	2,8...3,2	1,9...2,1	1165

\* Температура плавления определялась методом высокотемпературного дифференциального термического анализа.

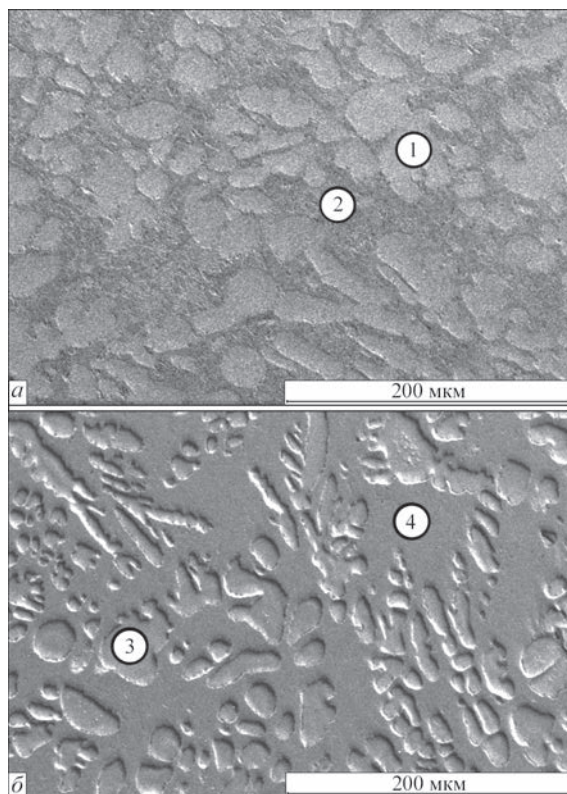
Химический состав и температура плавления сплавов КМХ и КМХС приведены в табл. 1.

Идеология конструирования новых материалов базируется на использовании в качестве матрицы легированного молибденом и хромом твердого раствора на основе кобальта, который хорошо выдерживает контактные и термические нагрузки до температур 1000 °С включительно, с дополнительным введением бора и кремния, которые снижают температуру плавления и повышают адгезионную активность сплавов до необходимого уровня во время нанесения на контактные поверхности в жидком состоянии. Кроме того, после кристаллизации бор и кремний активно формируют равномерно распределенную, термодинамически устойчивую, высокодисперсную упрочняющую фазу, которая состоит из комплексных силицидов и боридов, что обеспечивает необходимый высокий уровень износостойкости сплавов. Дозированные добавки карбидов хрома в сплав КМХС несколько снижают температуру плавления, по сравнению со сплавом КМХ, и стабилизируют его структуру и свойства.

Микроструктура сплавов, полученных вакуумно-индукционной плавкой в вакууме порядка  $10^{-2}$  Па с последующим отжигом в течение 1 ч при температуре 1100 °С, показана на рисунке. Сплавы имеют регулярную двухфазную структуру, плотность и однородность которой повышаются при переходе от сплава КМХ к КМХС. Твердость сплава КМХ составляет порядка 710...715 ед. (HV10), а сплава КМХС — 735...740 ед. Средняя микротвердость (H<sub>μ</sub>50) составляющих фаз для сплава КМХ соответствует 4771 МПа (зона 1, рисунок) и 2365 МПа (зона 2), а для сплава КМХС соответственно 6661 МПа (зона 3) и 3213 МПа (зона 4).

Рентгеноструктурный анализ образцов сплавов свидетельствует о том, что основу обоих сплавов составляет твердый раствор легированного стабильного кубического кобальта (β — модификация), который равномерно армирован дисперсными выделениями упрочняющих фаз: CoB, Mo<sub>2</sub>B, MoSi, CoSi. Сплав КМХС, кроме этого, содержит карбиды хрома Cr<sub>2</sub>C<sub>6</sub> (табл. 2). Все идентифицированные фазы имеют переменный стехиометрический состав и содержат в различном соотношении химические элементы — компоненты сплавов.

Сравнительные испытания износостойкости промышленных сплавов и новых композиционных материалов КМХ и КМХС осуществляли по известной методике [10] в условиях высокотемпературного фреттинга на газодинамическом стенде, позволяющем полностью воссоздать условия работы контактных поверхностей рабочих лопаток турбин в двигателе как по нагрузкам, уровням ускорений, скоростям нагрева и охлаждения, частоте вибраций,



Микроструктура сплавов КМХ (а) и КМХС (б)

так и по газовой среде. В качестве топлива использовали авиационный керосин ТС-1.

При испытаниях износостойкости исследуемых образцов определяли интенсивность изнашивания:  $J_V = V/N$ , где  $J_V$  — объемная интенсивность изнашивания, мм<sup>3</sup>/цикл;  $V$  — объем изношенно-

Таблица 2. Фазовый состав сплавов КМХ и КМХС

Марка сплаву	Межплоскостное расстояние (экспериментальные данные), $d_{hkl}$	Межплоскостное расстояние (литературные данные), $d_{hkl}$	Фаза [9]
КМХ	2,046	2,040	Co
	1,775	1,770	
	0,219	0,219	CoB
	0,185	0,183	
	0,237	0,237	Mo <sub>2</sub> B
	0,220	0,219	
	0,237	0,237	MoSi
0,219	0,220		
КМХС	0,198	0,197	CoSi
	0,181	0,183	
	2,047	2,040	Co
	1,776	1,770	
	0,219	0,219	CoB
	0,185	0,183	
	0,237	0,237	Mo <sub>2</sub> B
	0,220	0,219	
	0,237	0,237	MoSi
	0,219	0,220	
0,238	0,237	Cr <sub>2</sub> C <sub>6</sub>	
0,218	0,219		



Таблица 3. Результаты испытаний износостойкости наплавленных образцов

Испытываемый материал	X30H50Ю5T2	V3K-p	КБНХЛ-2	КМХ	КМХС
min/max среднее	7,718/14,408 10,126	разрушился	разрушился	1,817/3,750 2,761	1,548/2,894 2,372
Интенсивность изнашивания, $J_v$ , мм <sup>3</sup> /цикл	(на базе испытаний 40 мин)			(на базе испытаний 2 ч)	(на базе испытаний 2 ч)

го материала, мм<sup>3</sup>;  $N$  — количество циклов нагружения (производная от частоты колебаний образцов). Остальные параметры соответствовали следующим условиям: статическая контактная нагрузка — 50 МПа; амплитуда относительного перемещения образцов — 0,169 мм; частота колебаний — 2500 мин<sup>-1</sup>; время испытаний — 2 ч; температура в области контакта исследуемых образцов ~ 1150 °С.

Исследуемые образцы из жаропрочного никелевого сплава ЧС88У-ВИ с размерами полок 22×12×2 мм наплавливали слоем износостойкого материала толщиной 2 мм с последующим отжигом при температуре 1100 °С в вакууме 10<sup>-2</sup> Па на протяжении одного часа для снятия напряжений. Все наплавочные материалы использовали в виде прутков сечением 2×2 мм. Промышленные наплавочные материалы X30H50Ю5T2 и V3K-p наплавливали аргонодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона (код сварки 141), при этом микротрещины в переходной зоне от основного к наплавленному металлу условно не считали недопустимыми дефектами. Наплавку стеллитом КБНХЛ-2 и новыми адгезионно-активными наплавочными материалами КМХ и КМХС выполняли ацетилено-кислородным пламенем нормальной регулировки горелкой ГС-2, наконечник № 2 (код сварки 311). Поверхность под наплавку и наплавочные прутки флюсовали раствором флюса ПВ200 в спирте (соотношение 1:7). После наплавки образцы очищали от остатков флюса гальваническим способом, механически обрабатывали и проводили неразрушающий контроль люминесцентным методом. Испытания на износ выполняли на парах идентичных образцов с площадью взаимного контакта около 50 % (12...14 мм<sup>2</sup>). Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Анализ результатов испытаний показал, что в условиях нагрева до температуры ~1150 °С промышленные износостойкие жаропрочные сплавы V3K-p и КБНХЛ-2 не выдерживают контактные нагрузки и полностью разрушаются. Образцы, наплавленные промышленным износостойким жаропрочным сплавом X30H50Ю5T2, могут лишь ограниченное время работать в таких условиях ввиду интенсивного износа. Разработанные новые адгезионно-активные материалы КМХ и КМХС демонстрируют значительно более высокую износостойкость, при этом среднее значение интенсивности их износа на базе испытаний два часа в 3...4

раза ниже, чем поверхностей, наплавленных промышленным сплавом X30H50Ю5T2 на базе испытаний сорок минут. Дозированные добавки карбидов хрома (в количестве около 2 мас. %) в сплав КМХС одновременно со снижением температуры плавления сплава (на ~20 °С) приводят к повышению его износостойкости по сравнению со сплавом КМХ на 15...20 %. Высокие характеристики износостойкости и возможность работы в условиях действия критических температур позволили рекомендовать разработанные композиционные материалы и технологию их наплавки на бандажные полки лопаток судовых газотурбинных двигателей к промышленному применению на ГП НПКГ «Зоря-Машпроект».

### Выводы

1. В условиях нагрева до критических температур промышленные износостойкие жаропрочные сплавы, используемые в судовом машиностроении, такие как V3K-p, КБНХЛ-2, X30H50Ю5T2, не выдерживают контактные нагрузки и разрушаются.

2. Предложенные новые адгезионно-активные композиционные материалы КМХ и КМХС не только способны выдерживать критические температуры до 1150 °С, но и демонстрируют при этом высокие показатели износостойкости, удовлетворяющие эксплуатационным требованиям и требованиям к восстановительному ремонту современных судовых ГТД.

- Костин А. М. Материалы для упрочнения лопаток газовых турбин / А. М. Костин, А. Ю. Бутенко, В. В. Квасницкий // Автоматическая сварка. — 2014. — № 6-7 (733). — С. 136–138.
- Костин А. М. Анализ материалов для упрочнения бандажных полок лопаток турбин (Обзор) / А. М. Костин, А. Ю. Бутенко, А. Б. Малый // Вестник НУК. — 2012. — № 5. — С. 137–141 (<http://ev.nuos.edu.ua/ru/material?publicationId=19317>)
- Алтухов А. А. Применение жаростойкого материала КБНХЛ-2 для наплавки деталей газовых турбин / А. А. Алтухов, О. В. Гаврилов // Сварщик. — 2004. — № 2. — С. 22–23.
- Пейчев Г. И. Сравнительные характеристики износостойких сплавов для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток газотурбинных двигателей / Г. И. Пейчев, В. Е. Замковой, Н. В. Андрейченко // Вестник двигателестроения. — 2009. — № 2. — С. 123–125.
- Сом А. И. Плазменно-порошковая наплавка стеллитом фиксаторов труб / А. И. Сом, В. Ю. Ищенко, А. Б. Малый // Сварщик. — 2004. — № 2. — С. 18–19.
- Структура и свойства износостойкого сплава на основе кобальта с карбидом ниобия / Г. П. Дмитриева, Т. С. Че-

- репова, Т. А. Косорукова [и др.] // Металлофизика и новейшие технологии. – 2015. – т. 37, № 7. – С. 973–986.
7. Пат. № 107286 Украина, МПК С22С 19/07, С22F 1/10. Зносостійкий жароміцний композиційний сплав на основі кобальту / О. М. Костін, В. О. Мартиненко, О. Б. Малий, А. Ю. Бутенко; заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № у 2015 12664; заявл. 21.12.2015; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.
8. Пат. № 111213 Украина, МПК С22С 19/07, С22С 29/00. Жароміцний зносостійкий композиційний сплав на основі кобальту / О. М. Костін, В. О. Мартиненко, О. Б. Малий, А. Ю. Бутенко; заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № у 2016 02906; заявл. 22.03.2016; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 21.
9. Миркин Л. И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов. Справочник / Л. И. Миркин. – М.: Машиностроение, 1979. – 134 с.
10. Івченко Л. Й. Метод трибологічних випробувань за умов циклічного силового і температурного навантаження / Л. Й. Івченко, А. Г. Андрієнко // Металознавство та обробка металів. – 1996. – № 3. – С. 62–65.

О. М. Костін<sup>1</sup>, В. О. Мартиненко<sup>1</sup>, О. Б. Малий<sup>2</sup>,  
В. В. Квасницький<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова.  
54025, м. Миколаїв, пр-т Героїв Сталінграду, 9.  
E-mail: university@nuos.edu.ua

<sup>2</sup>ДП НВКГ «Зоря-Машпроект».  
54018, м. Миколаїв, пр-т Богоявленський, 42-а.  
E-mail: office@zorya.com.ua

<sup>3</sup>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».  
03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

### АДГЕЗИЙНО-АКТИВНІ ЖАРОМІЦНІ ЗНОСОСТІЙКІ МАТЕРІАЛИ КМХ ТА КМХС ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ

Розроблено нові адгезійно-активні зносостійкі жароміцні композиційні матеріали КМХ і КМХС для наплавлення, що забезпечують істотне підвищення зносостійкості контактних поверхонь деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів. Встановлено, що додаткове введення карбиду хрому в сплав на основі твердого розчину кобальту, легованого молібденом, хромом, бором і кремнієм сприяє стабілізації його структури і властивостей з одночасним зниженням температури плавлення композиції. Бор і кремній забезпечують підвищення адгезійної активності сплавів при нанесенні на контактні поверхні і утворюють рівномірно розподілені термодинамічно стійкі високодисперсні комплексні силіциди та бориди. Випробування зносостійкості доводять, що середні значення інтенсивності зносу робочих поверхонь, наплавлених новими матеріалами КМХ і КМХС, в умовах роботи при критичних температурах в окислювальному середовищі у 3...4 рази нижче, ніж поверхонь, наплавлених відомими промисловими сплавами. Високі характеристики зносостійкості і можливість роботи в умовах дії критичних температур дозволили рекомендувати розроблені композиційні матеріали і технологію їх наплавлення до промислового застосування. Бібліогр. 10, табл. 3, рис. 1.

*Ключові слова:* наплавка, адгезійно-активні зносостійкі композиційні матеріали, жароміцні сплави, структура, фазовий склад, інтенсивність зношування

Поступила в редакцію 09.12.2016

## Компания «Витаполис» — новый национальный производитель на рынке сварочных материалов

Первого декабря 2016 г. производственную площадку завода компании ООО «Витаполис» в г. Боярка (Киевская обл.) посетила делегация Института электросварки им. Е. О. Патона в составе зам. директора, акад. Лобанова Л. М., акад. Григоренко Г. М., член-корр. Ахонина С. В. Делегацию принимали технический директор Алимов А. Н. и коммерческий директор Водопьянов А. В.

Гостям были продемонстрированы производственные возможности компании «Витаполис» в части производства сварочных проволок специального назначения диаметром 0,8...4,0 мм из перлитных, ферритных, мартенситных и аустенитных сталей. Все проволоки производятся с прецизионной намоткой на каркасные катушки после специальной обработки поверхности до и после волочения, разработанной специалистами предприятия. В составе завода работает лаборатория контроля качества производства и готовой продукции, аккредитованная НААУ с 7 ноября 2016 года.

После ознакомления с производственными возможностями компании «Витаполис», обсуждались направления сотрудничества с ИЭС им. Е. О. Патона в разработке и запуске производства сварочных материалов специального назначения для решения широкого круга производственно-технических задач промышленности Украины в авиационной, ракетно-космической и военной технике, а также энергетике и машиностроении. Стороны договорились о долгосрочном сотрудничестве в области производства сварочных проволок и других сварочных материалов.

А. Н. Алимов,  
технический директор ООО «Витаполис»

