

---

Научная статья

УДК 621.791.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-13-35

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С ИРИДИЕМ

А.В. Свиридов<sup>1</sup>, А.Н. Афанасьев-Ходыкин<sup>1</sup>, И.А. Галушка<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Исследовано влияние состава припоя на формирование паяного шва иридиевых контактов свечей зажигания со сплавом ХН60ВТ в качестве материала контактодержателя. Проведено сравнение паяного шва, сформированного серийным припоем ВПр50 и опытными припоями, после пайки и выдержки в течение 3 ч при температуре 1000 °С. Выявлены основные фазовые составляющие, способные привести к уменьшению длительной прочности паяного шва при эксплуатации. Определены закономерности перераспределения элементов в паяном шве и диффузионных зонах в результате снижения эрозионной активности припоя по отношению к иридию и сплаву ХН60ВТ.

**Ключевые слова:** пайка, высокотемпературная пайка, никелевые припой, иридиевые свечи зажигания, высоколегированные припой, микроструктура паяного шва

**Для цитирования:** Свиридов А.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А. Особенности формирования микроструктуры паяных соединений жаропрочных никелевых сплавов с иридием // Труды ВИАМ. 2025. № 7 (149). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-13-35.

Scientific article

## FEATURES OF FORMATION OF MICROSTRUCTURE OF SOLDERED JOINTS OF NICKEL SUPER ALLOYS WITH IRIIDIUM

A.V. Sviridov<sup>1</sup>, A.N. Afanasiev-Khodykin<sup>1</sup>, I.A. Galushka<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The results of investigation of the influence of solder composition on the formation of the soldered joint of iridium contacts of spark plugs with CH60VT alloy as the material of the contact holder are presented. The comparison of the soldered joint formed by serial solder VPr50 and experimental solders after soldering and holding for three hours at 1000 °C has been carried out. The main phase components capable of leading to decrease of long-term strength of soldered seam during operation have been revealed. The regularities of redistribution of elements in the soldered joint and diffusion zones have been determined due to decrease of erosion activity of solder in relation to iridium and alloy KhN60VT.

**Keywords:** brazing, high-temperature brazing, nickel brazing alloys, iridium spark plugs, high-alloyed brazing alloys, microstructure of the brazed joints

**For citation:** Sviridov A.V., Afanasiev-Khodykin A.N., Galushka I.A. Features of formation of microstructure of soldered joints of nickel super alloys with iridium. *Trudy VIAM*, 2025, no. 7 (149), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-13-35.

### Введение

В настоящее время в России для газотурбинных двигателей (ГТД) используются свечи зажигания с электродами из жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС). Данные свечи относительно просты в изготовлении, однако имеют ограниченный срок службы из-за электроэрозионного износа. При эксплуатации свечи рабочие поверхности электродов выгорают, что вызывает увеличение межэлектродного зазора и соответствующее повышение пробивного напряжения [1, 2]. При этом снижается стабильность работы свечи, повышается нагрузка на аппарат зажигания, что приводит к выходу свечи зажигания из строя.

Ведущие иностранные производители свечей зажигания, такие как Champion Spark Plug Co (США), Unison Industries (США), NGK Spark Plug Co (Япония), используют в качестве материала электродов иридий. Данный элемент обладает более высокой стойкостью к электроэрозионному износу по сравнению с ЖНС, что обеспечивает увеличение ресурса работы свечей зажигания более чем в 2 раза. Из-за высокой стоимости иридия электроды изготавливают из двух составных частей:

- контактодержатель из ЖНС, обеспечивающий конструкционную прочность и герметичность свечи зажигания, а также подвод электрической энергии к рабочему контакту;

- контакт из иридия в виде цилиндра диаметром 1–4 мм или кольца, обеспечивающий стабильное дугообразование в течение длительного времени.

Одним из методов соединения иридиевых контактов с контактодержателем или корпусом свечи зажигания является сварка (контактная, электронно-лучевая, лазерная) [3, 4]. Данные методы широко применяют при изготовлении свечей зажигания двигателей внутреннего сгорания. Сварка обеспечивает высокую производительность процесса изготовления свечей зажигания, но вызывает образование зоны термического влияния в иридиевом контакте, что приводит к его охрупчиванию и снижению устойчивости к термоциклическим нагрузкам. Проблема особенно актуальна при производстве свечей зажигания ГТД, где электроды имеют значительные геометрические размеры и работают в условиях повышенной эксплуатационной нагрузки. Увеличение размеров контактов требует большего тепловложения при сварке, что, в свою очередь, вызывает расширение зоны термического влияния.

В зарубежной практике производства свечей зажигания ГТД для соединения иридиевых контактов с контактодержателем широко применяется технология высокотемпературной пайки. В отличие от традиционных методов сварки плавлением, этот подход исключает локальный высокотемпературный нагрев и быстрое охлаждение. Благодаря этому в иридиевых контактах не формируются рекристаллизованные закалочные структуры, которые могли бы привести к их охрупчиванию [3–8].

Для пайки иридиевых контактов с ЖНС наиболее перспективными являются сложнелегированные припои на основе никеля [5–9]. Они обладают высокой жаростойкостью (вплоть до 1150 °С) и необходимым сродством с материалом контактодержателя. В качестве депрессантов припоев (элементов, снижающих температуру плавления припоя) на основе никеля наиболее часто используются такие элементы, как марганец, фосфор, палладий, бор и кремний. Марганец и фосфор снижают жаростойкость припоев на основе никеля и используются в системах легирования припоев с относительно невысокой рабочей температурой ( $\leq 800$  °С). Никелевые припои с палладием обладают относительно высокой пластичностью, что положительно сказывается на устойчивости паяных соединений к термоциклированию. Однако такие припои требуют введения значительного количества палладия ( $\geq 30$  %), что значительно увеличивает стоимость изделий, изготовленных с его применением. Жаропрочные никелевые припои, в которых в качестве депрессантов используются бор и кремний, обладают высокой жаростойкостью и обеспечивают высокую прочность паяных соединений ЖНС.

Однако при взаимодействии с иридием на границе раздела «паяный шов–иридиевый контакт» они могут формировать интерметаллидные хрупкие включения на основе силицидов и боридов иридия, которые могут негативно сказаться на стойкости паяного соединения к термоциклированию, особенно после длительных выдержек при высоких температурах (1000 °С) [10, 11]. Поэтому для пайки иридиевых контактов целесообразно использовать припои с ограниченным содержанием бора и кремния. Помимо перечисленных элементов для снижения температуры плавления жаропрочных никелевых припоев применяют также молибден, ниобий и титан.

Жаростойкость никелевых припоев достигается за счет добавления хрома и алюминия. Хром, улучшая жаростойкость, снижает температуру плавления, но одновременно уменьшает жидкотекучесть и способность припоя заполнять протяженные зазоры. Алюминий также эффективно повышает жаростойкость, однако снижает пластичность и жидкотекучесть припоя.

Конструкция паяного соединения иридиевого контакта, как правило, представляет собой соединение типа «втулка–шайба» с глухой заделкой одного конца. Для такого соединения требуется припой с высокой жидкотекучестью, что накладывает ограничения на его состав. Содержание хрома необходимо ограничить до 25 % (по массе), а алюминий следует полностью исключить.

Таким образом, для повышения жаростойкости паяных соединений целесообразно применять сложнелегированные припои на основе никеля. Однако из-за сложного химического состава подобные припои являются недеформируемыми и не могут быть получены традиционными методами в виде полос, фольги или прутков. Для их производства применяется метод газоструйного распыления, позволяющий получать металлические гранулы сферической формы с небольшим интервалом размеров частиц порошка и минимальным содержанием газов. Для повышения удобства использования и точности дозировки порошка припоя применяют специально разработанные полуфабрикаты в виде лент и паст на основе органического связующего [12–18].

В России припои и технологии пайки для соединения иридия с ЖНС, обеспечивающие работоспособность паяных соединений в условиях эксплуатации свечей зажигания ГТД, отсутствуют. Для создания научных основ пайки иридиевых контактов свечей зажигания с ЖНС с использованием припоев на основе никеля проведена работа по опробованию для этих целей серийных и опытных припоев.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.9. «Припои и технологии высокотемпературной диффузионной пайки с компьютерным управлением технологическими параметрами для формирования оптимальной структуры паяного соединения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [19].

### Материалы и методы

Для изготовления центральных электродов свечей зажигания ГТД широко применяется сплав ХН60ВТ. Поэтому данный сплав выбран в качестве материала электрододержателя для перспективных свечей зажигания ГТД с иридиевыми контактами.

При температуре нагрева >200 °С в иридии протекают рекристаллизационные процессы, которые снижают его механические характеристики. Для пайки иридия с никелевым сплавом ХН60ВТ выбран припой ВПр50, используемый для соединений ЖНС с рабочими температурами до 1000 °С. Испытаны также экспериментальные никелевые припои с пониженным содержанием кремния и ниобия, дополнительно легированные титаном. Внешний вид проб на растекаемость при выборе температуры пайки представлен на рис. 1.

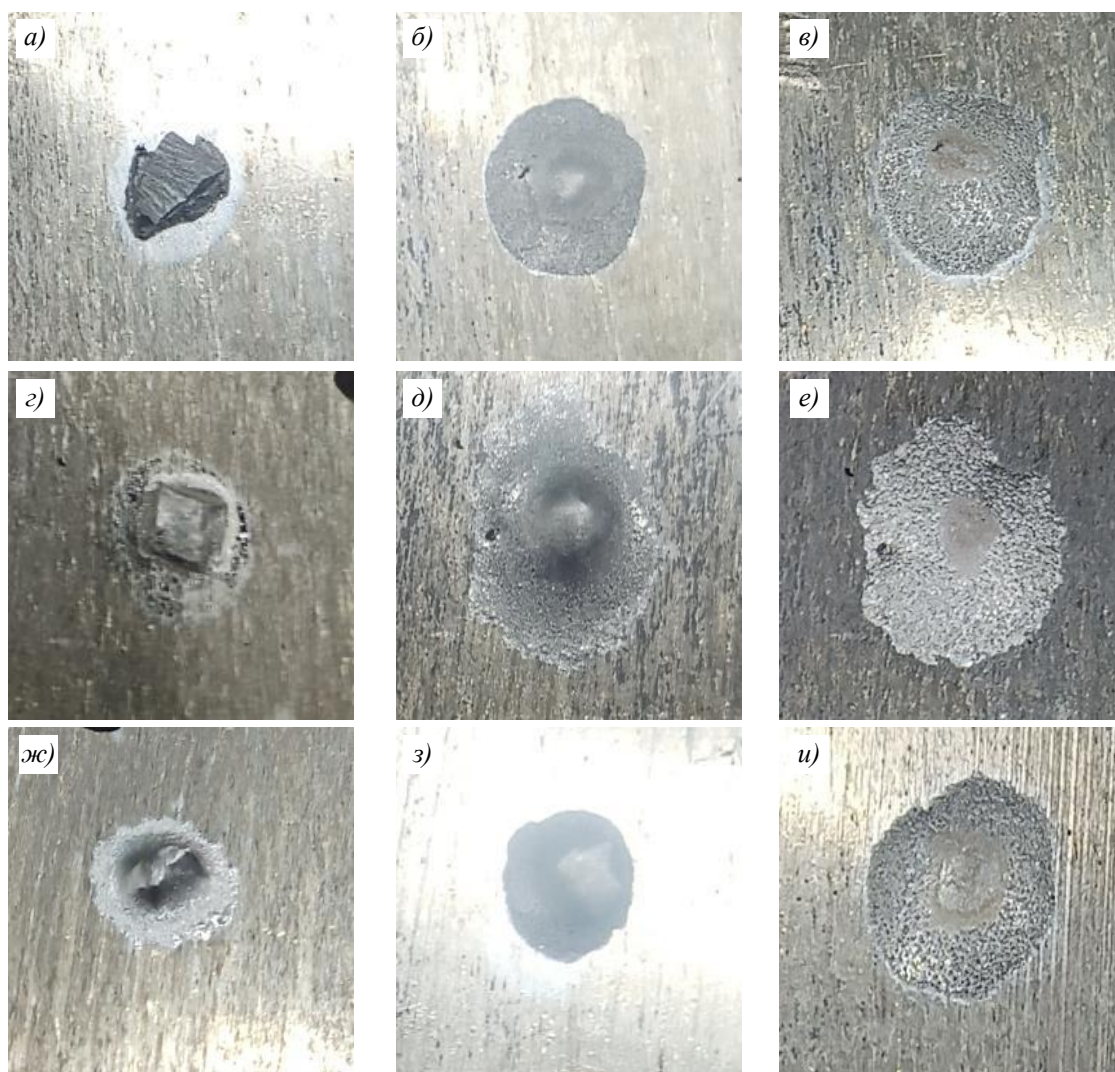


Рис. 1. Пробы на растекаемость опытных составов припоя 6 (а–в), 8 (г–е) и серийного припоя ВПр50 (ж–и) при температуре нагрева 1125 (а, г, ж), 1150 (б, д, з) и 1175 °С (в, е, и)

Выплавку припоев осуществляли в электродуговой печи с медным водоохлаждаемым кристаллизатором, что обеспечивает минимальную зависимость процесса от состава и температуры плавления припоев. Такой подход позволяет проводить выплавку в широком диапазоне температур (от 800 до 1500 °С) без значительных изменений технологических параметров. Использование медного кристаллизатора предотвращает контакт расплава с тиглем, исключая изменения химического состава припоев в процессе выплавки.

Для обеспечения равномерного сплавления всех компонентов шихты и однородного состава по всему объему слитка применялся повторный переплав. Анализ химического состава показал, что отклонения от расчетных значений не превышают 5 % (по массе).

Микроструктуру паяных соединений изучали с использованием растрового электронного микроскопа, оснащенного приставкой для электронно-зондового микроанализа.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

## Результаты и обсуждение

Микроструктура паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного припоем ВПр50, после пайки представлена на рис. 2. Припой в процессе пайки взаимодействует с иридием, в результате чего основные элементы припоя (кобальт, никель и хром) активно проникают в иридий на глубину до 20 мкм. В свою очередь иридий, растворяясь в припое, насыщает паяный шов до содержания 20 % (по массе) (рис. 3). Такое интенсивное насыщение иридием может быть обусловлено только его растворением припоем. В паяном соединении отчетливо видны крупные эвтектические включения на основе боридов хрома и молибдена, а также силицидов никеля. Силициды и бориды в паяном соединении являются нежелательными структурными составляющими, так как они значительно отличаются по физико-механическим характеристикам от соединяемых материалов и при термоциклических нагрузках будут являться концентраторами напряжений и центрами зарождения усталостных трещин, которые в последующем приведут к хрупкому разрушению паяного соединения.

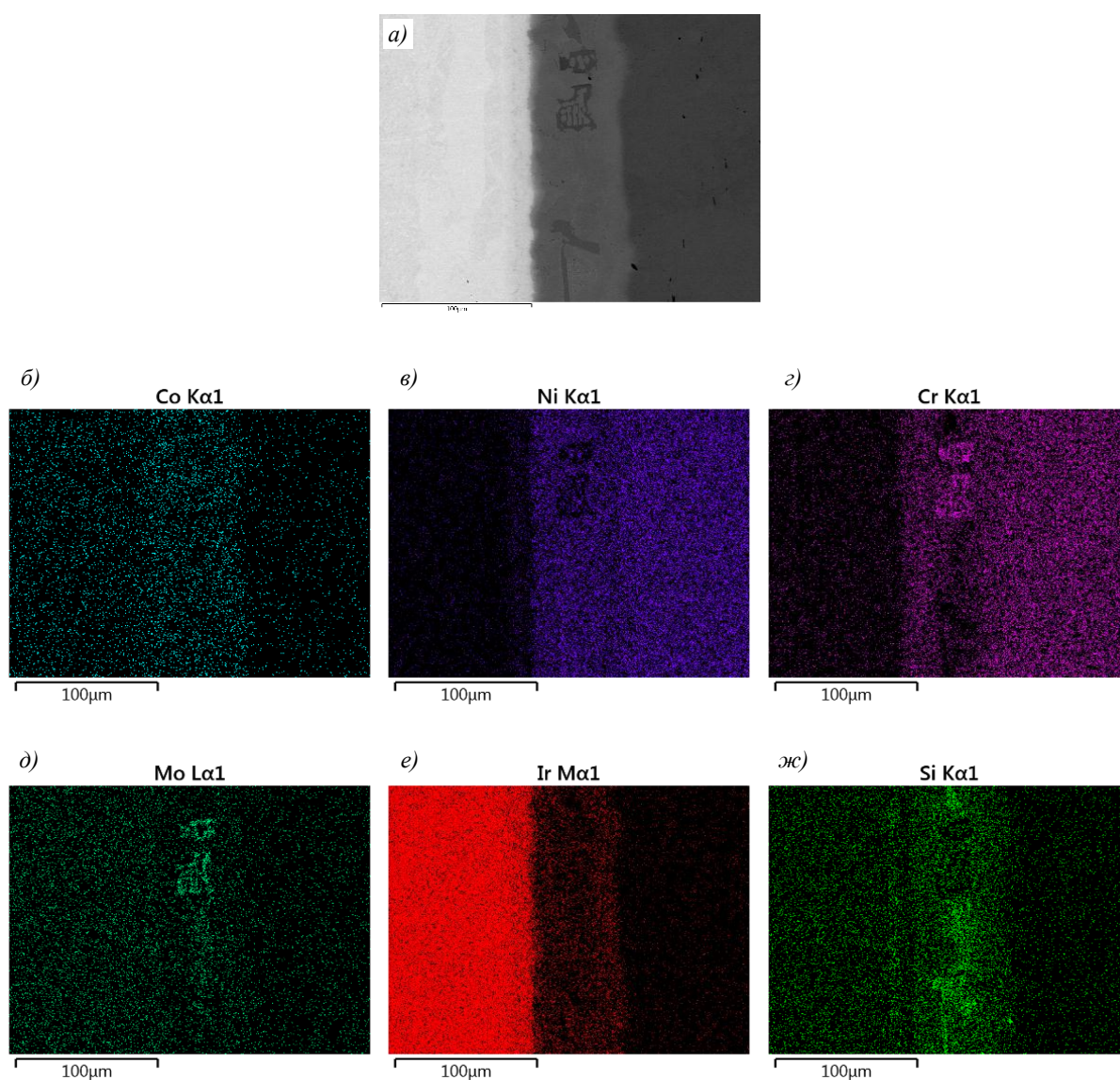


Рис. 2. Микроструктура (а) и энергодисперсионные карты элементов (б–ж) паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного припоем ВПр50, после пайки

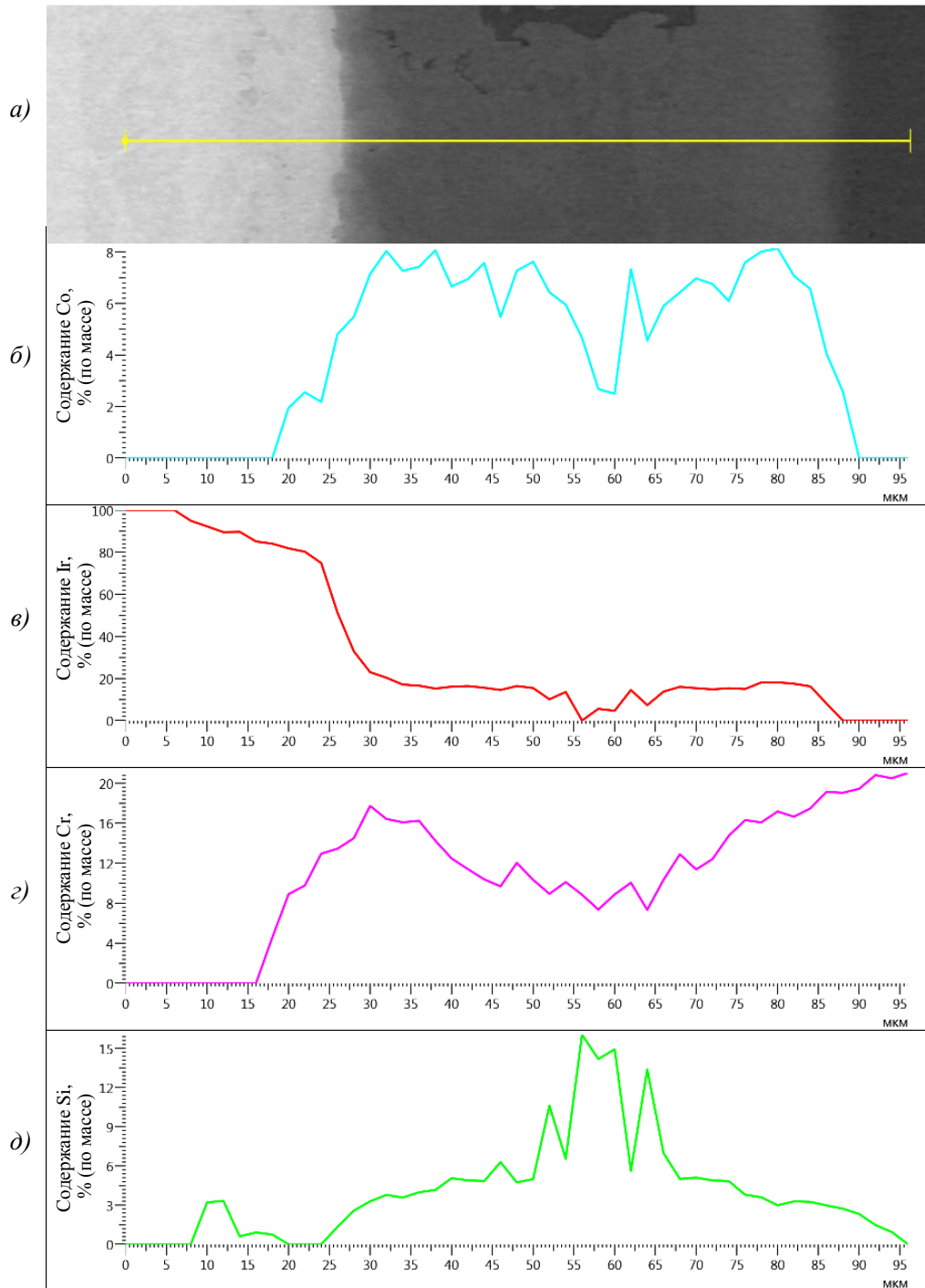


Рис. 3. Микроструктура (а) и распределение элементов (б–д) в разных зонах паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного припоем ВПр50, после пайки

Микроструктура паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного припоем ВПр50, после термической обработки представлена на рис. 4, химический состав различных зон – на рис. 5 и в табл. 1. При термической обработке при температуре 1000 °С в течение 300 ч, имитирующей работу паяного соединения при повышенной температуре, в результате диффузионных процессов кобальт и никель из паяного соединения практически полностью вытесняются иридием и диффундируют в соединяемые материалы (иридий и сплав ХН60ВТ). Глубина диффузии легирующих элементов

припоя в иридий достигает 75 мкм, а иридия в сплав ХН60ВТ: 100 мкм. При этом содержание иридия в паяном шве составляет 80–90 % (по массе). Кремний также диффундирует в соединяемые материалы, образуя зоны по двум сторонам паяного шва, содержащие до 2,5 % (по массе) кремния. Молибден полностью диффундирует в околошовную зону сплава ХН60ВТ. В результате длительной выдержки паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ при температуре 1000 °С паяный шов трансформируется в сплав состава Ir–4Ni–8Cr. Интерметаллидные соединения и эвтектические структуры в паяном шве и околошовных зонах не обнаружены.

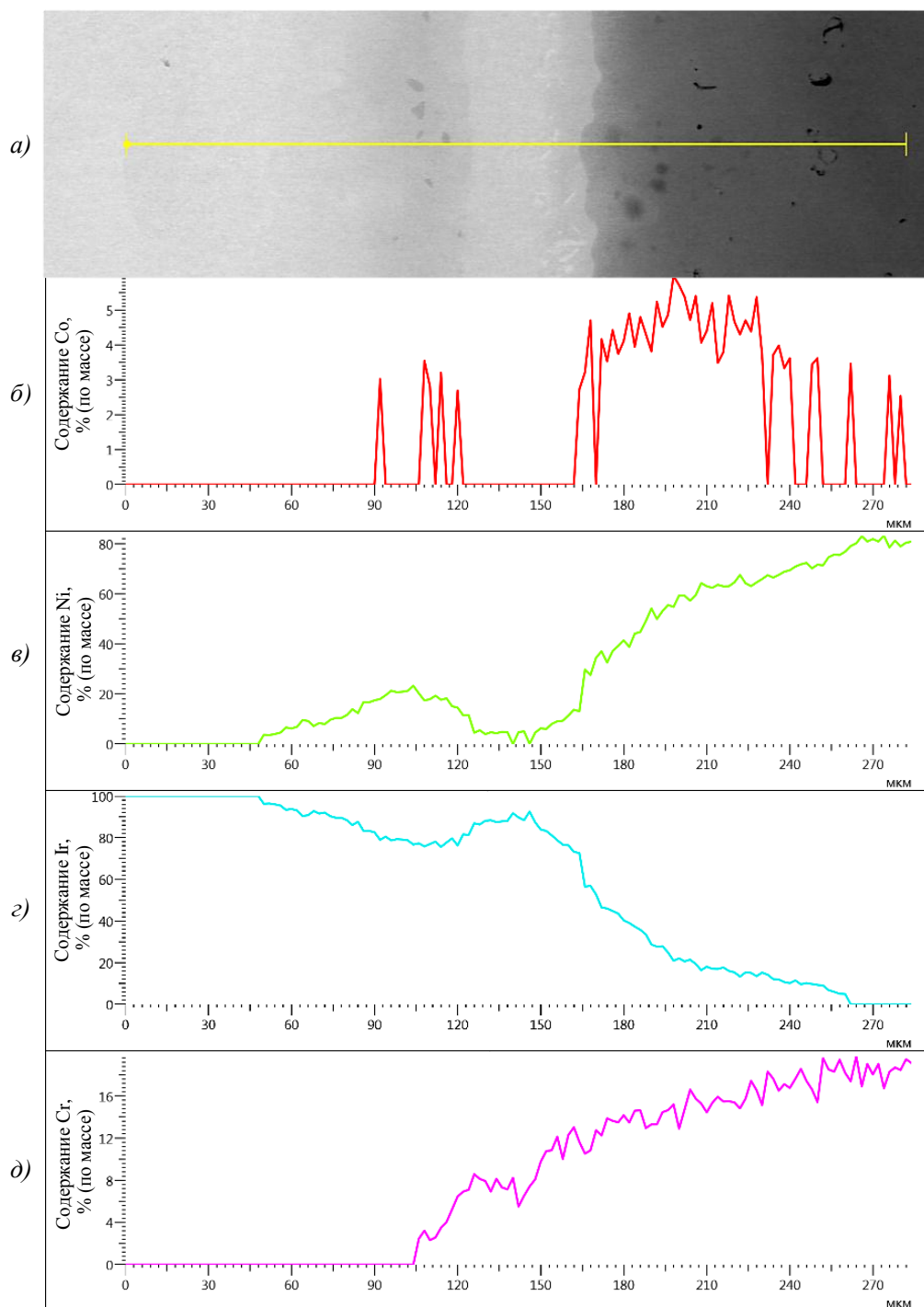


Рис. 4. Микроструктура (а) и распределение элементов (б–д) в разных зонах паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного припоем ВПр50, после термической обработки

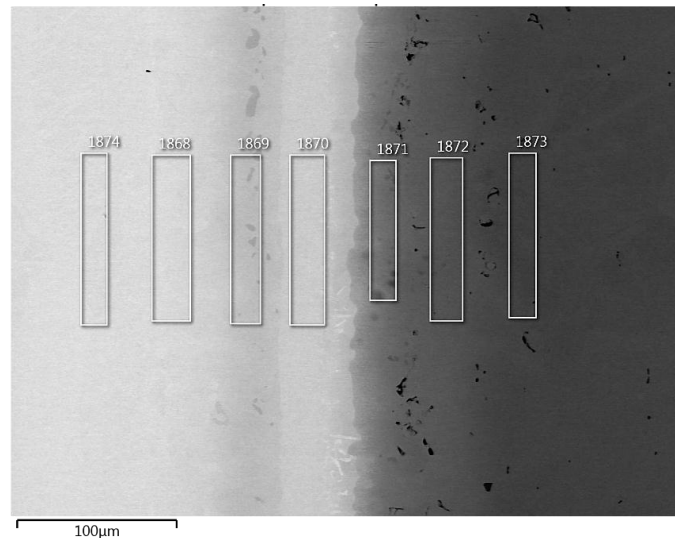


Рис. 5. Микроструктура с указанием различных зон (табл. 1) паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного припоем ВПр50, после термической обработки

Таблица 1

**Содержание элементов в различных зонах паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного припоем ВПр50, после термической обработки**

Спектр	Место измерения	Содержание элементов, % (по массе)					
		Ir	Ni	Co	Cr	Mo	Si
1874	Иридий	100,0	0	0	0	0	0
1868	Диффузионная зона	95,1	4,9				
1869		74,8	20,3	2,1	1,2		1,7
1870	Паяный шов	86,1	4,4	1,5	8,0	4,0	0
1871	Диффузионная зона	30,1	46,7	3,8	13,6		2,4
1872		12,8	63,1	4,1	15,7	1,9	2,2
1873	Сплав ХН60ВТ	0	81,3	0	18,7	0	0

Микроструктура паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем б, после пайки представлена на рис. 6 и 7. Припой в процессе пайки взаимодействует с иридием, в результате чего кобальт, никель и хром проникают в иридий на глубину до 8 мкм. Иридий растворяется в припое и насыщает паяный шов. Содержание иридия в паяном шве достигает 20 % (по массе). Меньшая глубина проникновения легирующих элементов в иридий, по-видимому, обусловлена зоной на границе с иридием, обогащенной титаном (до 4 % (по массе)), которая ограничивает скорость взаимодействия припоя с иридием. В паяном соединении отчетливо видны эвтектические включения на основе боридов хрома и молибдена. Включения силицидов никеля в паяном шве содержатся в незначительном количестве. Включения боридов хрома и молибдена в паяном соединении, выполненном опытным припоем б, в отличие от паяного соединения, выполненного припоем ВПр50, имеют меньший размер и менее плотно топологически упакованы, что снижает их негативное влияние на сопротивление усталости паяного соединения при повышенной температуре. Соединения титана представлены равномерно распределенными мелкими выделениями и не должны оказывать существенного негативного влияния на механические свойства паяного соединения.

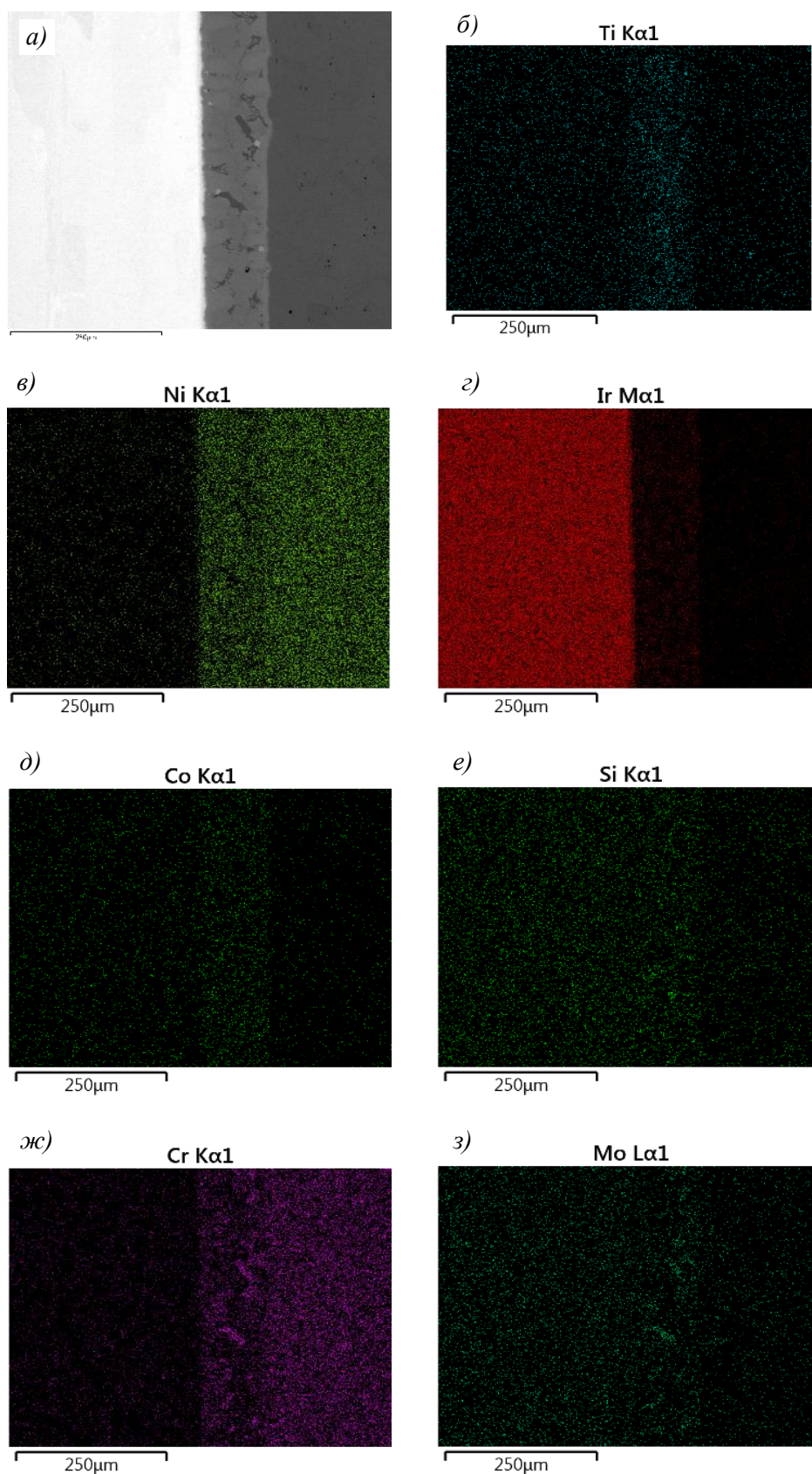


Рис. 6. Микроструктура (а) и энергодисперсионные карты элементов (б–з) паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем б, после пайки

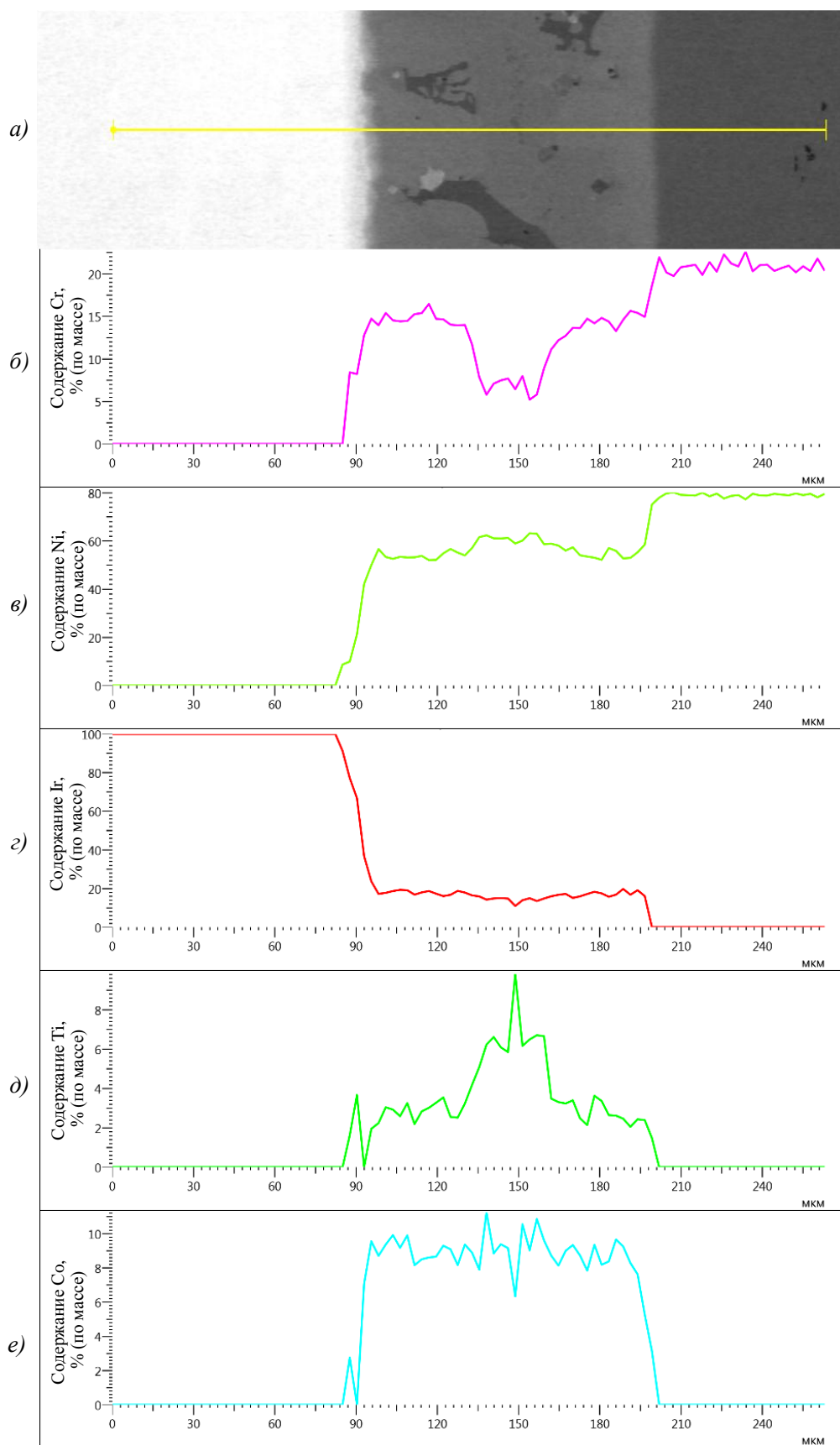


Рис. 7. Микроструктура (а) и распределение элементов (б–е) в разных зонах паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем б, после пайки

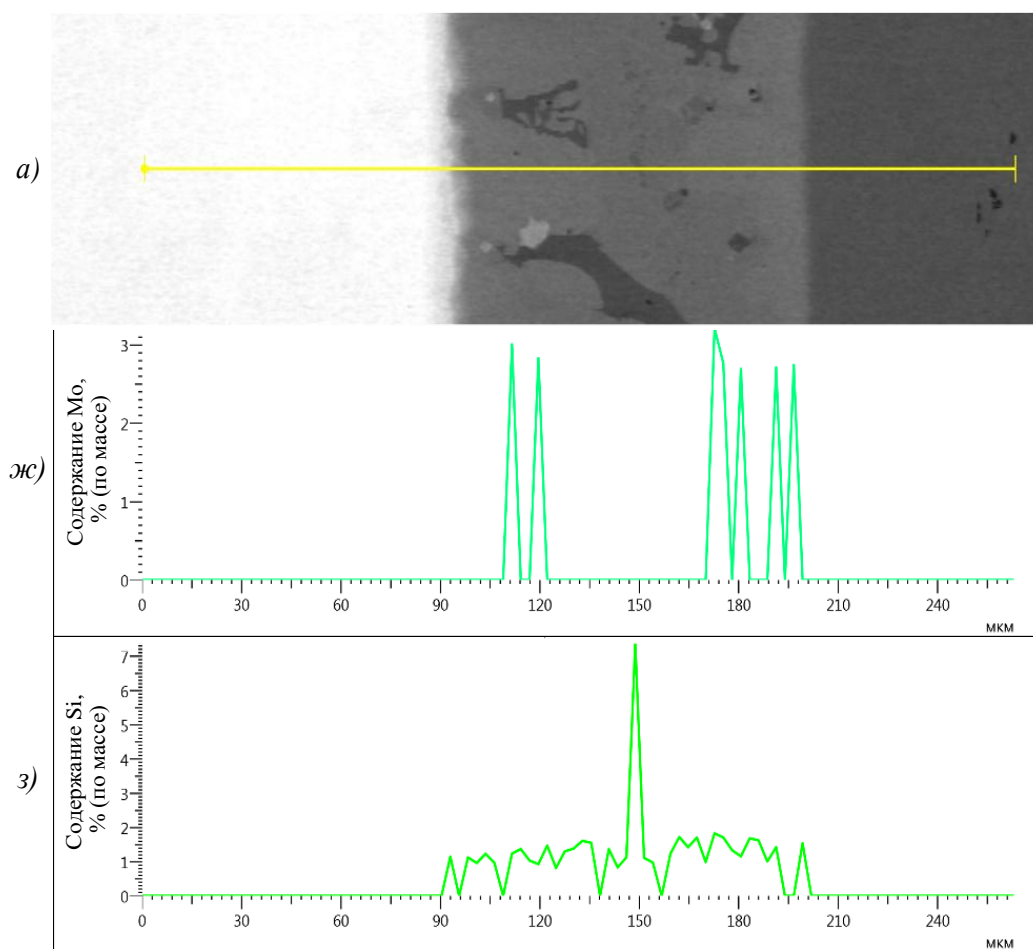


Рис. 7 (продолжение). Микроструктура (а) и распределение элементов (б, в) в разных зонах паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем б, после пайки

Микроструктура паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем б, после термической обработки представлена на рис. 8 и 9, химический состав различных зон – на рис. 10 и в табл. 2. При термической обработке в результате диффузионных процессов кобальт и никель из паяного соединения практически полностью вытесняются иридием и диффундируют в соединяемые материалы. Глубина диффузии легирующих элементов припоя в иридий достигает 44 мкм, иридия в сплав ХН60ВТ: 53 мкм. При этом содержание иридия в паяном шве составляет 75–80 % (по массе). Кремний диффундирует преимущественно в сплав ХН60ВТ, образуя диффузионную зону с содержанием кремния до 1,5 % (по массе). Молибден полностью диффундирует в околошовную зону сплава ХН60ВТ, в которой его содержание составляет до 2,2 % (по массе). В результате длительной выдержки паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ при температуре 1000 °С паяный шов трансформируется в сплав состава Ir–10Ni–10Cr. Со стороны сплава ХН60ВТ формируется зона с повышенным (до 5 % (по массе)) содержанием титана, обедненная хромом (до 3,3 % (по массе)). Интерметаллидные соединения и эвтектические структуры в паяном шве и околошовных зонах не обнаружены.

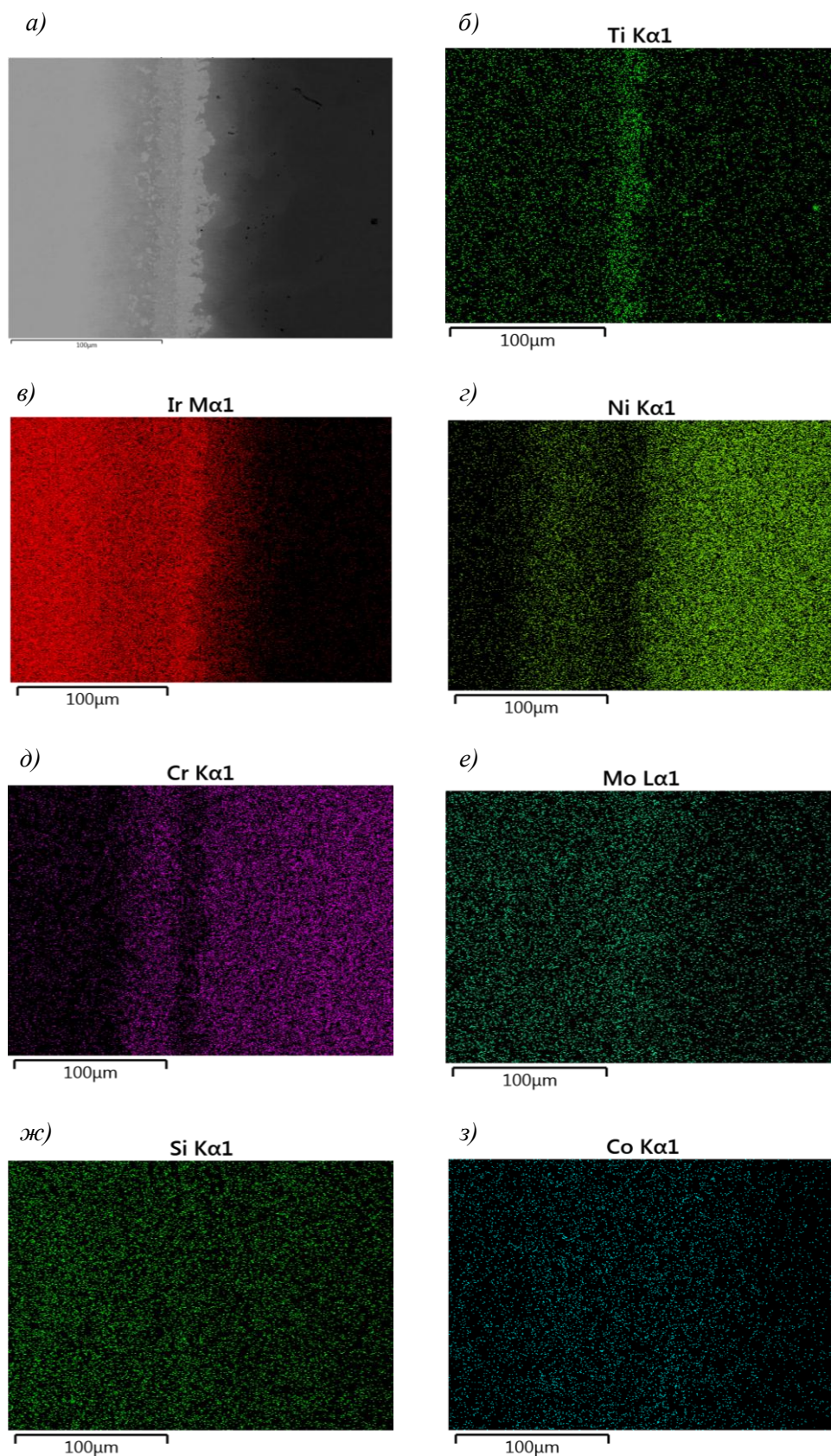


Рис. 8. Микроструктура (а) и энергодисперсионные карты элементов (б–з) паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем б, после термической обработки

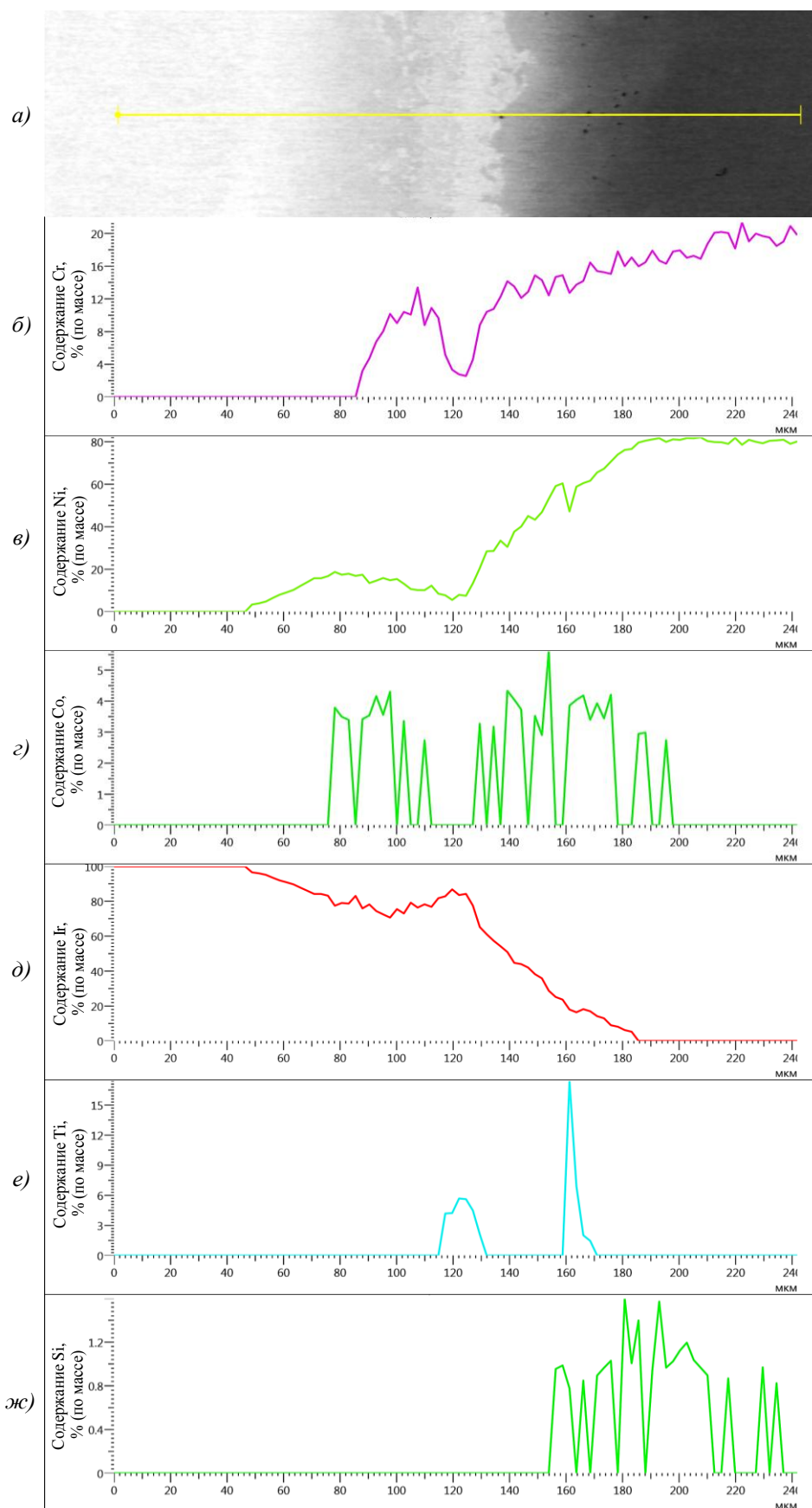


Рис. 9. Микроструктура (а) и распределение элементов (б–ж) в разных зонах паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем б, после термической обработки

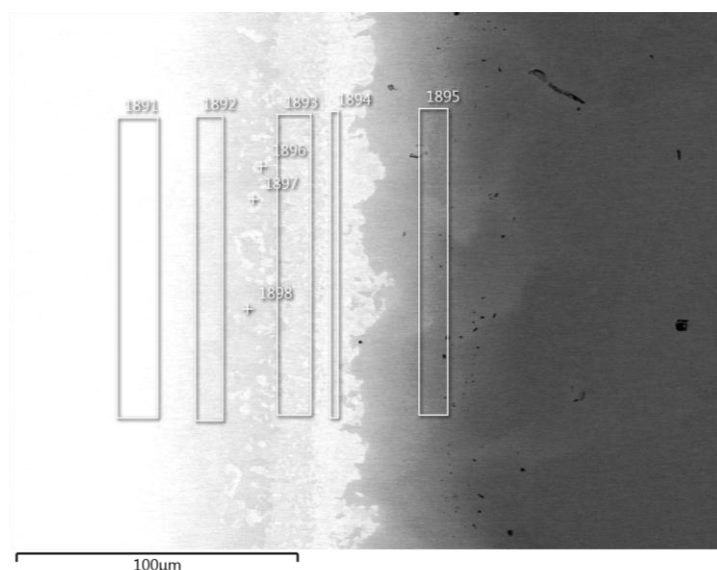


Рис. 10. Микроструктура с указанием различных зон (табл. 2) паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем 6, после термической обработки

Таблица 2

**Содержание элементов в различных зонах паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем 6, после термической обработки**

Спектр	Место измерения	Содержание элементов, % (по массе)						
		Ir	Ni	Co	Cr	Ti	Mo	Si
1891	Диффузионная зона	95,6	4,4	0	0	0	0	0
1892		80,1	15,7	2,7	1,3			
1893	Паяный шов	77,6	10,1	1,9	9,4	1,0		
1894	Диффузионная зона	83,1	6,4	0	3,3	5,0	2,2	
1895		25,2	54,5	3,7	14,3	0,7	0,9	0,7

Микроструктура паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем 8, после пайки представлена на рис. 11 и 12. Припой в процессе пайки взаимодействует с иридием, в результате чего основные элементы припоя проникают в иридий на глубину до 6 мкм, а иридий, растворяясь в припое, насыщает паяный шов до содержания 20 % (по массе). Интенсивность взаимодействия припоя с иридием ограничивается прослойкой с повышенным (до 8 % (по массе)) содержанием титана на границе «иридий–паяный шов». Уменьшению объема взаимодействия также, по-видимому, способствует пониженное содержание кремния в припое. Бориды хрома и молибдена преимущественно выделяются в виде тонких прослоек на границах зерен паяного соединения в середине паяного шва. Такое небольшое количество боридов не оказывает существенного влияния на физико-механические свойства паяного соединения. Мелкодисперсные соединения титана преимущественно распределены на границе «иридий–паяный шов» и в середине паяного соединения и не должны оказывать существенного негативного влияния на механические свойства паяного соединения.

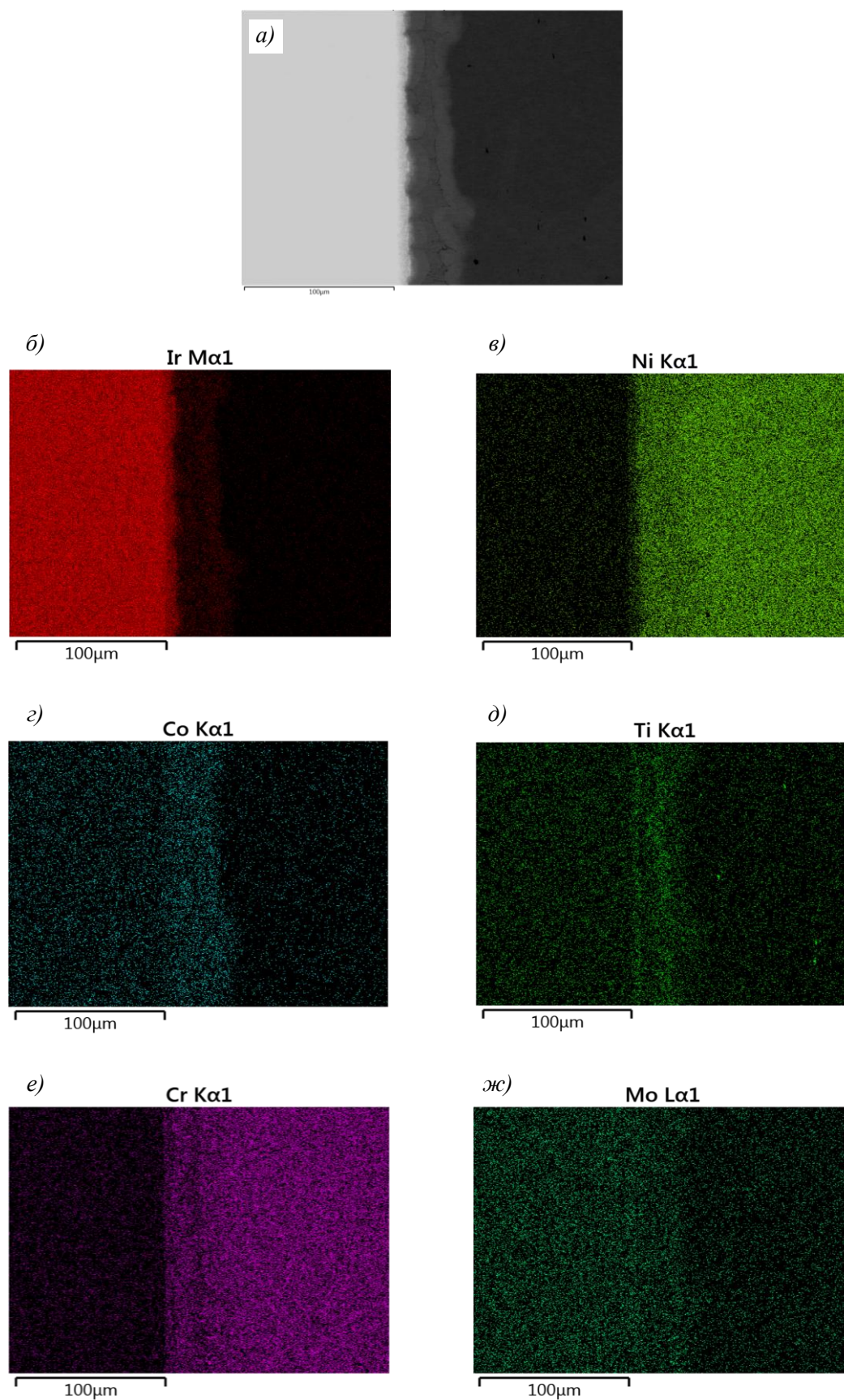


Рис. 11. Микроструктура (а) и энергодисперсионные карты элементов (б–ж) паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем 8, после пайки

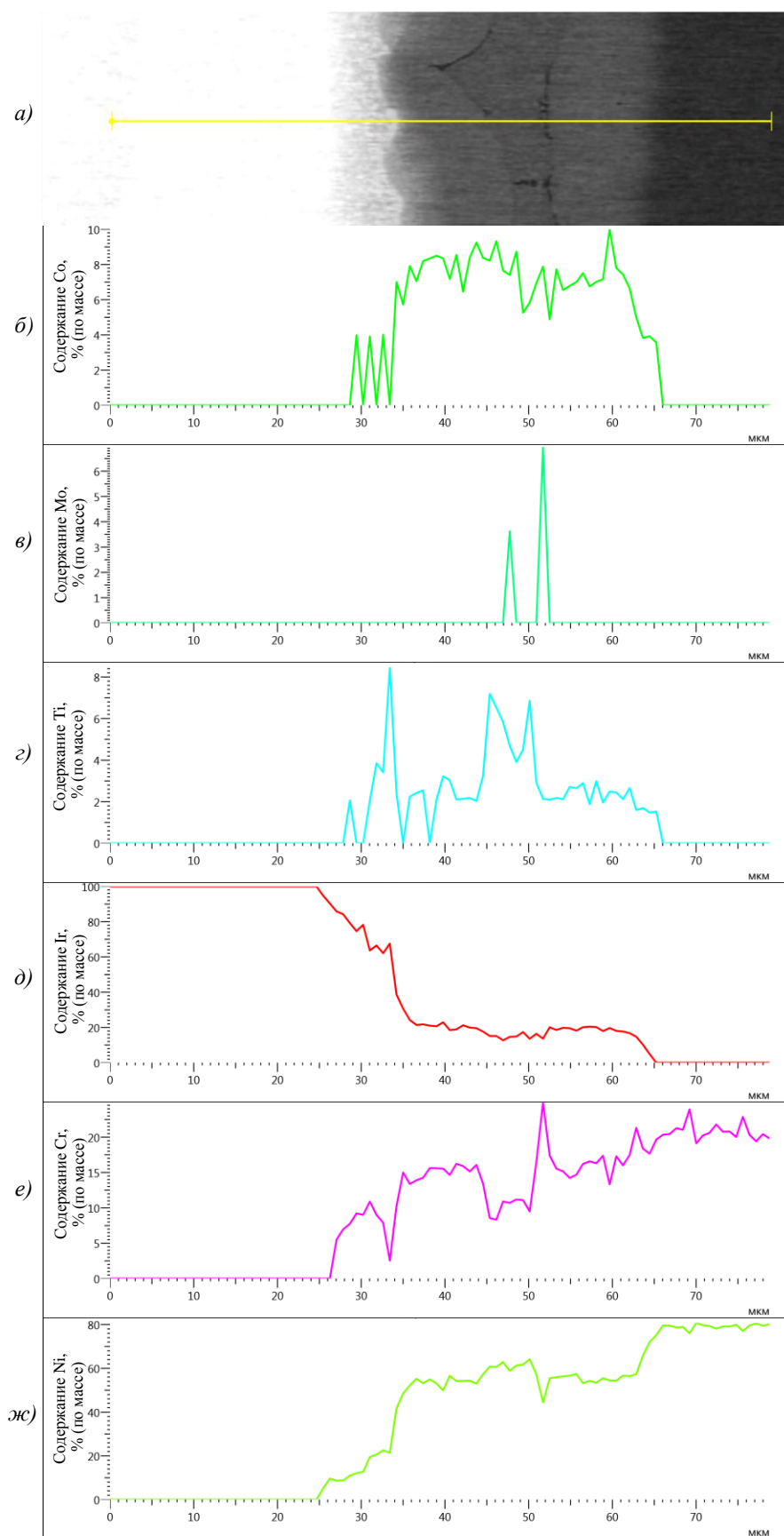


Рис. 12. Микроструктура (а) и распределение элементов (б–ж) в разных зонах паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем  $\delta$ , после пайки

Микроструктура паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем 8, после термической обработки представлена на рис. 13 и 14, химический состав различных зон – на рис. 15 и в табл. 3. При термической обработке в результате диффузионных процессов кобальт и никель из паяного соединения практически полностью вытесняются иридием и диффундируют в иридий и сплав ХН60ВТ. Глубина диффузии легирующих элементов припоя в иридий достигает 38 мкм, а иридия в сплав ХН60ВТ: 55 мкм. При этом содержание иридия в паяном шве составляет 75–80 % (по массе). Кремний, кобальт и молибден равномерно распределяются по зонам паяного соединения при содержании меньше значимого порога обнаружения методом рентгеноспектрального анализа. В результате длительной выдержки паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ при температуре 1000 °С паяный шов трансформируется в сплав состава Ir–16Ni–10Cr. Интерметаллидные соединения и эвтектические структуры в паяном шве и околошовных зонах не обнаружены.

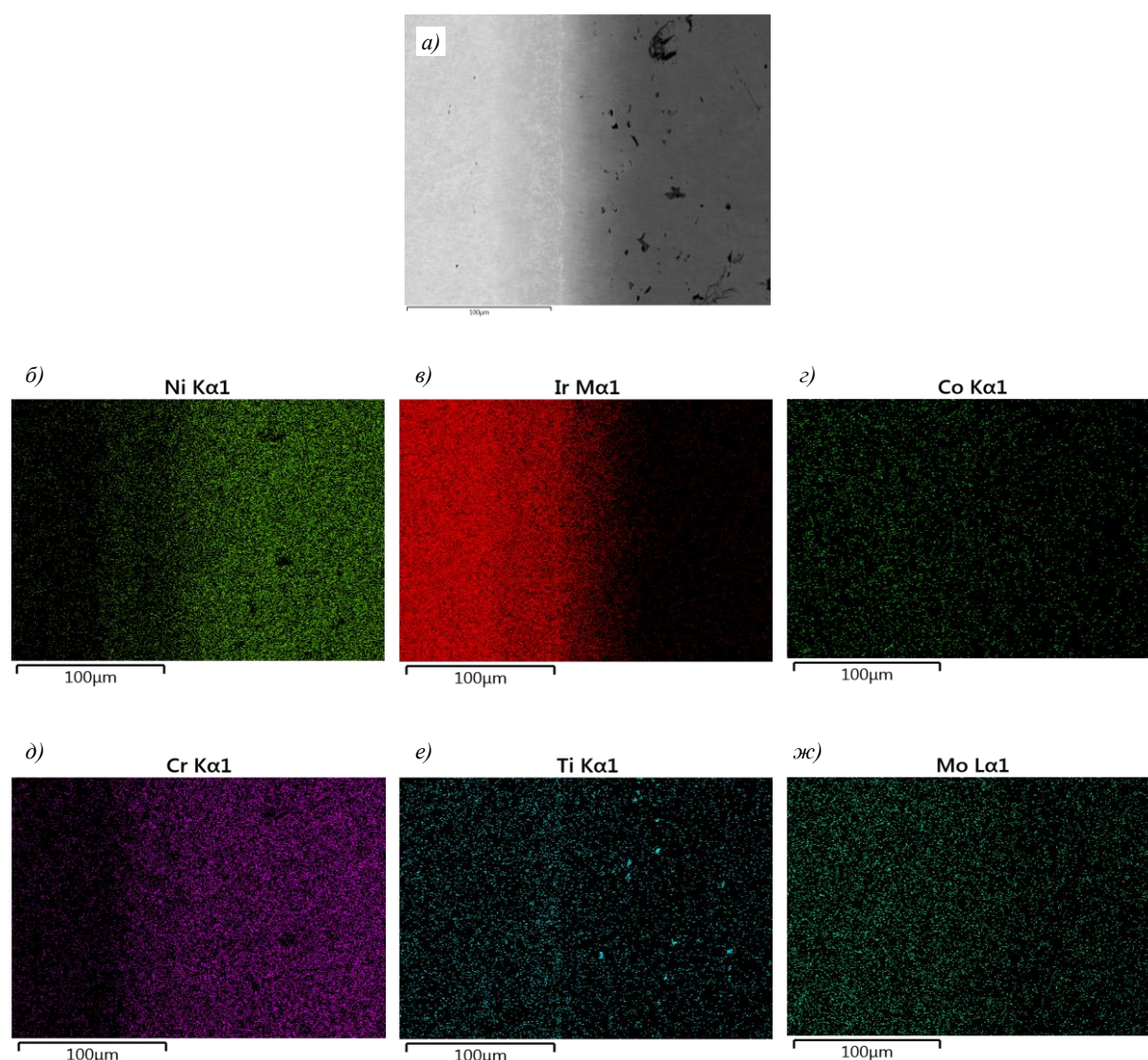


Рис. 13. Микроструктура (а) и энергодисперсионные карты элементов (б–з) паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем 8, после термической обработки

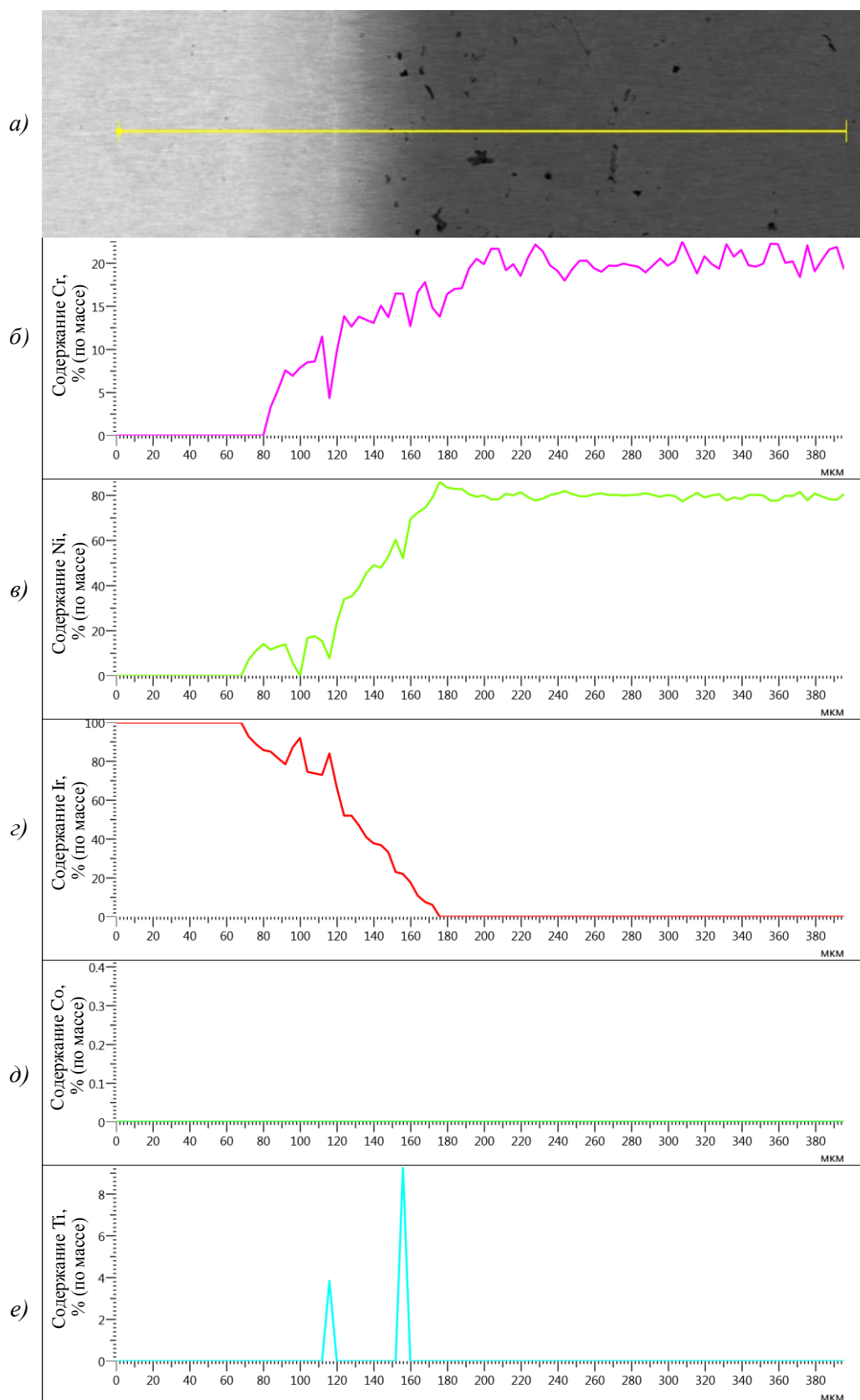


Рис. 14. Микроструктура (а) и распределение элементов (б–е) в разных зонах паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем  $\delta$ , после термической обработки

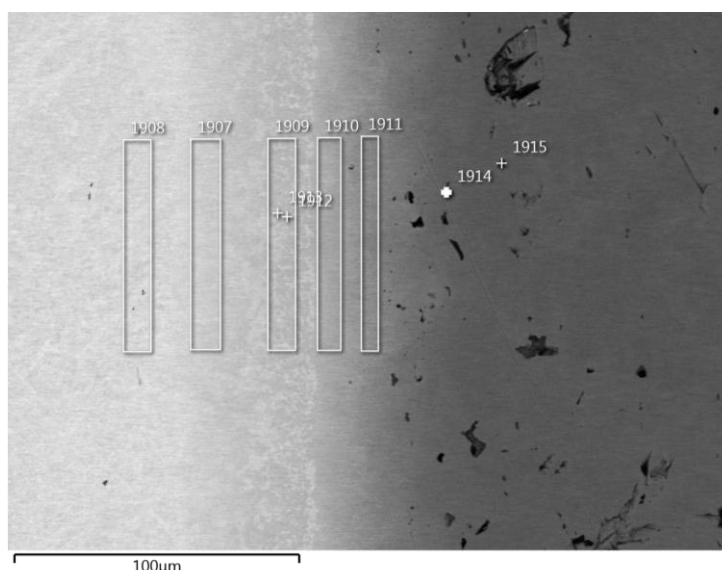


Рис. 15. Микроструктура с указанием различных зон (табл. 3) паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем  $\delta$ , после термической обработки

Таблица 3

**Содержание элементов в различных зонах паяного соединения иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненного опытным припоем  $\delta$ , после термической обработки**

Спектр	Место измерения	Содержание элементов, % (по массе)						
		Ir	Ni	Co	Cr	Ti	Mo	Si
1908	Иридий	100,0	0	0	0	0	0	0
1907	Диффузионная зона	86,2	12,0		1,8			
1909	Паяный шов	73,7	16,3	9,6	1,4			
1910	Диффузионная зона	55,0	31,5	0,9	12,6	0		
1911		37,6	47,6		13,9			

Данные предположения подтверждают результаты исследования микроструктуры галтельных участков паяных соединений иридия со сплавом ХН60ВТ (рис. 16). Анализ показал, что опытные припои  $\delta$  и  $\epsilon$  не образуют зону избыточного облуживания на поверхности иридия. Кроме того, галтели, выполненные с использованием этих припоев, демонстрируют высокую устойчивость к газовой коррозии в процессе длительной термической обработки. На галтелях, выполненных опытными припоями  $\delta$  и  $\epsilon$ , не наблюдаются трещины на стороне иридия, что свидетельствует об их надежности и долговечности.

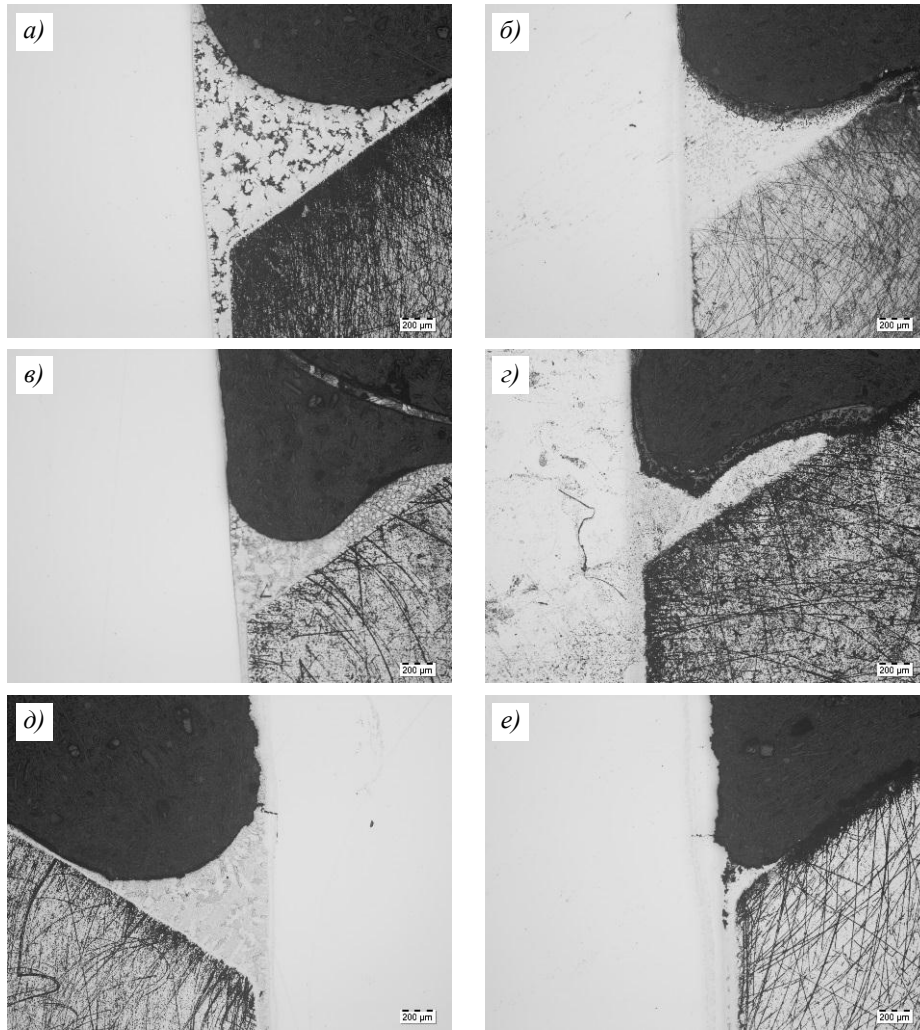


Рис. 16. Микроструктуры галтельных участков паяных соединений иридия со сплавом ХН60ВТ, выполненных опытными припоями 6 (*a*, *б*), 8 (*в*, *г*) и серийным припоем ВПр50 (*д*, *е*), после пайки (*a*, *в*, *д*) и термической обработки при температуре 1000 °С в течение 300 ч (*б*, *г*, *е*)

### Заключения

Иридиевые свечи зажигания демонстрируют превосходные эксплуатационные характеристики благодаря высокой коррозионной стойкости и термической устойчивости иридия, что делает их идеальным выбором для двигателей внутреннего сгорания, работающих в сложных условиях. Анализ микроструктуры паяных швов серийного припоя ВПр50 и опытных припоев позволил определить причины разупрочнения при длительной работе свечей зажигания с иридиевыми контактами. При оптимизации состава припоя удастся избежать избыточного облуживания паяных изделий и улучшить фазовую стабильность соединений, обеспечивая их долговечность и устойчивость к термоциклическим и коррозионным воздействиям. Полученные результаты подтверждают, что экспериментальные составы припоев открывают перспективы для создания более надежных и долговечных свечей зажигания, способных выдерживать высокие эксплуатационные нагрузки.

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 1. Материалы и технологии синтеза // Электromеталлургия. 2022. № 1. С. 2–12.

2. Гаврилов Г.Н., Каблов Е.Н., Ерофеев В.Т. и др. Материаловедение. Теория и технология термической обработки: учеб. пособие. Саранск: Нац. исслед. Мордов. гос. ун-т им. Н.П. Огарева, 2019. 273 с.
3. Electrode material for use with a spark plug: pat. US8436520B2; appl. 28.07.2011; publ. 07.05.2015.
4. High efficiency, extended life spark plug having improved firing tips: pat. US00527198A; appl. 03.04.1995; publ. 18.06.1996.
5. Li Z.-F., Ge Y., Li H.-Y. et al. Study on brazing performance of platinum-iridium alloy solders // Powder Metallurgy Technology. 2017. Vol. 35 (3). P. 202–207. DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2017.03.007.
6. Graff M., Kempf B., Breme J. Iridium Alloy for Spark Plug Electrodes // Materials for Transportation Technology. 2005. Vol. 1. P. 1–8. DOI: 10.1002/3527606025.ch1.
7. Zhao S., Xia J., Xia Y. et al. Microstructure and Isothermal Oxidation of Ir–Rh Spark Plug Electrodes // Materials. 2019. Vol. 12 (19). P. 3226. DOI: 10.3390/ma12193226.
8. Hristov R., Bogdanov K., Dimitrov R. Research the influence of spark plugs types on the performance of the engine operating on gaseous fuels // Mobility and Vehicle Mechanics. 2018. Vol. 44 (1). P. 51–61. DOI: 10.24874/mvm.2018.44.01.05.
9. Różowicz S., Tofil S., Zrak A. An Analysis of the Microstructure, Macrostructure and Microhardness of Ni–Cr–Ir Joints Produced by Laser Welding with and without Preheat // Archives of Metallurgy and Materials. 2016. Vol. 61 (2). P. 1157–1162. DOI: 10.1515/amm-2016-0193.
10. Елисеев Э.А., Севальнев Г.С., Дорошенко А.В., Дружинина М.Э. Влияние температурно-временных параметров длительных выдержек на превращения в конструкционных сталях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-15-23.
11. Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А., Свиридов А.В., Наприенко С.А. Исследование влияния технологических параметров термической обработки на микроструктуру паяных соединений сплава ВТ20, выполненных припоем ВПр16 // Труды ВИАМ. 2024. № 5 (135). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-3-12.
12. Оспенникова О.Г., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А. Исследование особенностей формирования микроструктуры паяного соединения разноименных никелевых жаропрочных сплавов, выполненных сложнолегированным многокомпонентным припоем // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-3-12.
13. Лашко Н.Ф., Лашко С.В. Вопросы теории и технологии пайки. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1974. 248 с.
14. Лашко Н.Ф., Лашко С.В. Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1967. 368 с.
15. Петрунин И.Е., Березников Ю.И., Бунькина Р.Р. и др. Справочник по пайке. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение-1, 2003. 480 с.
16. Петрунин И.Е., Маркова И.Ю., Екатова А.С. Металловедение пайки. М.: Metallurgia, 1976. 264 с.
17. Оспенникова О.Г., Лукин В.И., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А., Шевченко О.В. Перспективные разработки в области высокотемпературной пайки жаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 144–158. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-144-158.
18. Худнев А.А., Плохих А.И., Дворецков Р.М., Щетанов Б.В. Исследование диффузии легирующих элементов в процессе циклической термической обработки слоистого композиционного материала на основе хромистой и углеродистой сталей // Труды ВИАМ. 2021. № 4 (98). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-74-91.

19. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

### References

1. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 1. Materials and synthesis technologies. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 1, pp. 2–12.
2. Gavrilov G.N., Kablov E.N., Erofeev V.T. et al. *Materials Science. Theory and technology of heat treatment*: textbook. Saransk: MSU named after N.P. Ogarev, 2019, 273 p.
3. *Electrode material for use with a spark plug*: pat. US8436520B2; appl. 28.07.2011; publ. 07.05.2015.
4. *High efficiency, extended life spark plug having improved firing tips*: pat. US00527198A; appl. 03.04.1995; publ. 18.06.1996.
5. Li Z.-F., Ge Y., Li H.-Y. et al. Study on brazing performance of platinum-iridium alloy solders. *Powder Metallurgy Technology*, 2017, vol. 35 (3), pp. 202–207. DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2017.03.007.
6. Graff M., Kempf B., Breme J. Iridium Alloy for Spark Plug Electrodes. *Materials for Transportation Technology*, 2005, vol. 1, pp. 1–8. DOI: 10.1002/3527606025.ch1.
7. Zhao S., Xia J., Xia Y. et al. Microstructure and Isothermal Oxidation of Ir–Rh Spark Plug Electrodes. *Materials*, 2019, vol. 12 (19), pp. 3226. DOI: 10.3390/ma12193226.
8. Hristov R., Bogdanov K., Dimitrov R. Research the influence of spark plugs types on the performance of the engine operating on gaseous fuels. *Mobility and Vehicle Mechanics*, 2018, vol. 44 (1), pp. 51–61. DOI: 10.24874/mvm.2018.44.01.05.
9. Różowicz S., Tofil S., Zrak A. An Analysis of the Microstructure, Macrostructure and Microhardness of Ni–Cr–Ir Joints Produced by Laser Welding with and without Preheat. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2016, vol. 61 (2), pp. 1157–1162. DOI: 10.1515/amm-2016-0193.
10. Eliseev E.A., Sevalnev G.S., Doroshenko A.V., Druzhinina M.E. Influence of time-temperature parameters of long-duration exposure on transformations in structural steels (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 24, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-15-23.
11. Afansiyev-Khodykin A.N., Galushka I.A., Sviridov A.V., Naprienko S.A. Investigation of the influence of technological parameters of heat treatment on microstructure of brazing joints of VT20 alloy with VPr16 solder. *Trudy VIAM*, 2024, no. 5 (135), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 24, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-3-12.
12. Ospennikova O.G., Afanasyev-Khodykin A.N., Galushka I.A. Investigation of a brazed joint microstructure formation, made of dissimilar nickel super alloys and the complex brazing alloy. *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 24, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-3-12.
13. Lashko N.F., Lashko S.V. *Theory and Technology of Soldering*. Saratov: Saratov Univ. Publ., 1974, 248 p.
14. Lashko N.F., Lashko S.V. *Soldering Metals*. Moscow: Mashinostroenie, 1967, 368 p.
15. Petrunin I.E., Berezников Yu.I., Bunkina R.R. et al. *Soldering Handbook*. 3rd rev. and add. Moscow: Mashinostroenie-1, 2003, 480 p.
16. Petrunin I.E., Markova I.Yu., Ekatoва A.S. *Metal Science of Soldering*. Moscow: Metallurgiya, 1976, 264 p.
17. Ospennikova O.G., Lukin V.I., Afanasyev-Khodykin A.N., Galushka I.A., Shevchenko O.V. Advanced developments in the field of the high-temperature soldering of heat resisting alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 144–158. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-144-158.

18. Khudnev A.A., Plokhikh A.I., Dvoretsov R.M., Schetanov B.V. Investigation of diffusion of alloying elements during thermal cycling of multilayer composite material made of chrome and carbon steels. *Trudy VIAM*, 2021, no. 4 (98), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 24, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-74-91.
19. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

*Информация об авторах*

**Свиридов Александр Владимирович**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Афанасьев-Ходыкин Александр Николаевич**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Галушка Игорь Александрович**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

*Information about the authors*

**Aleksander V. Sviridov**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Aleksander N. Afanasiev-Khodykin**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Igor A. Galushka**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 30.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 24.02.2025.  
The article was submitted 30.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 24.02.2025.