

УДК 621.791

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФУЗИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК6 И СТАЛИ 45 ЧЕРЕЗ ПОРОШКОВЫЕ СЛОИ Ni/Co

©2024 г. Г.М. Зеер, Е.Г. Зеленкова, А.А. Шубин, Ю.П. Королёва, М.Ю. Кучинский

ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет, Красноярск
E-mail: g-zeer@mail.ru

Поступила в редакцию 20 марта 2024 г.

После доработки 31 сентября 2024 г. принята к публикации 2 октября 2024 г.

Получены образцы слоистого композита сталь—порошковая прослойка—твердый сплав. Исследованы микроструктура и фазообразование в диффузионных соединениях. Определена ширина переходных зон диффузионных соединений сталь—порошковая прослойка и твердый сплав—порошковая прослойка, показана зависимость ширины переходной зоны от состава прослойки. Максимальная ширина переходной зоны наблюдается в диффузионных соединениях, полученных через никелевый порошковый слой. Выявлено, что переходные зоны формируются в основном твердыми растворами и незначительным количеством химических соединений.

Ключевые слова: слоистый композит; диффузионное соединение; твердый сплав; нанопорошки; переходная зона; диффузия; фазообразование.

В связи с расширяющимся использованием в современном производстве цифровых технологий, для которых стабильность, долговечность и надежность функционирования инструмента является одним из главных показателей, возрастает актуальность получения износостойких и особо точных инструментов с использованием твердых сплавов [1—4]. Наибольшее распространение получили твердосплавные сверла, фрезы, резцы, детали штампов, уплотнители, буровые коронки, износостойкие элементы измерительных устройств. Используются следующие методы соединения твердосплавных элементов с корпусом инструмента: механическое крепление, пайка, сварка плавлением, диффузионное соединение (ДС). При этом методы соединения в существенной степени влияют на прочность, надежность, коррозионную стойкость и герметичность соединения [5, 6].

Механическое крепление твердосплавных элементов не обеспечивает достаточной надежности и, кроме того, из-за использования дополнительных крепежных деталей приводит к увеличению размера конструкции инструмента [7]. Пайка низкотемпературными припоями повышает надежность крепления, но из-за разницы температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) и на-

личия в связи с этим напряжений в паяном шве прочность такого соединения мала. Кроме того, при пайке возможно появление микротрещин на поверхности твердого сплава, которые в период эксплуатации инициируют процесс разрушения инструмента [8, 9]. Сварка плавлением не может быть применена для соединения твердых сплавов со сталями ввиду металлургической несовместимости этих материалов. При электронно-лучевой сварке твердого сплава со сталью без промежуточного слоя максимальное остаточное напряжение возникает либо в сварном шве, либо в твердом сплаве [10]. Из перечисленных возможных методов соединения управлять скоростями нагрева и охлаждения соединяемых деталей позволяет технология ДС [11—15].

Инструмент с использованием твердосплавных пластин целесообразно изготавливать в виде слоистых композитов, например из твердого сплава на основе карбида вольфрама и термообрабатываемой стали, полученным методом ДС [16]. При этом композит твердый сплав—сталь образуется при температуре ниже температуры появления жидкой фазы, поэтому из-за разности ТКЛР соединяемых материалов в зоне соединения напряжения практически не возникают. Од-

нако осуществить ДС твердых сплавов одного с другим или со сталями при температурах, составляющих 0,7—0,9 температуры плавления наиболее легкоплавкого материала в соединении, практически невозможно, так как диффузионная активность компонентов при этих температурах минимальна. Поэтому при ДС твердых сплавов со сталями применяют прослойки из фольги, порошков, напыленных или химически осажденных металлов, активирующие диффузионные процессы на свариваемых поверхностях и обеспечивающие получение соединений высокого качества [17].

Авторами ранее проведены исследования влияния промежуточных слоев на снижение температуры, их активизирующего действия на механизмы формирования прочного ДС без пор и включений, была также уточнена классификация прослоек [18]. Исследования фазообразования в переходной зоне сталь—порошковая прослойка никеля позволили обосновать технологию изготовления ДС, подобрать оптимальные режимы температуры, давления и длительности выдержки. Методом ДС с применением порошковой прослойки никеля получено качественное соединение стальных образцов при температурах 0,6 температуры плавления более легкоплавкого из соединяемых компонентов; в исследуемых материалах таким компонентом выбрана сталь 45 [19]. Процессы спекания порошковой прослойки и формирования переходной зоны между ней и сталью идут одновременно, в результате чего формируется переходная зона [19, 20]. Математическое моделирование деформационных изменений в зоне ДС проведено для более полного представления о давлении, которое следует при-

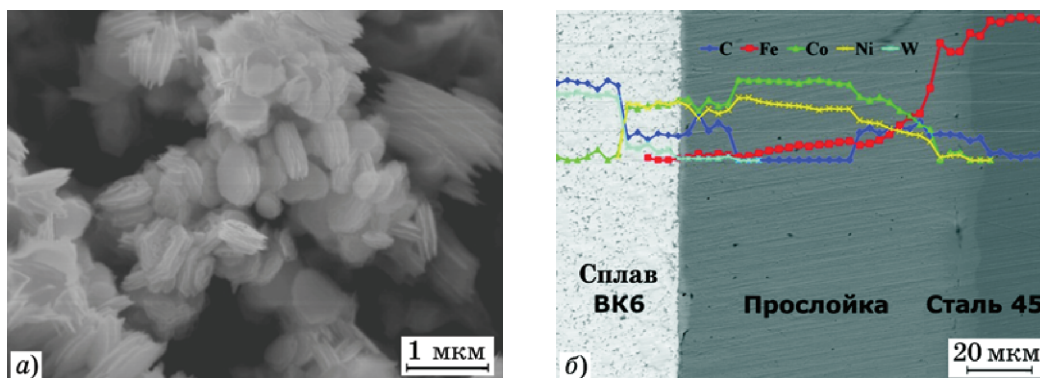
ложить к соединяемым материалам в процессе ДС [21].

Настоящая работа посвящена исследованию качества ДС слоистых композитов твердый сплав ВК6—сталь 45 с применением активирующих прессованных прослоек из порошков никеля, кобальта и их смеси.

Материалы и методика эксперимента.

Для изготовления слоистых композитов использованы образцы стали 45, твердого сплава ВК6, в качестве прослоек — прессованные порошки и никелевая фольга. Элементный состав стали 45, %: С 0,45; Si 0,26; Mn 0,7; Cr 0,25; S 0,04; P 0,035; Fe — остальное. Состав твердого сплава ВК6, %: WC 94; Co 6. Порошковые прослойки выполнены из никеля, кобальта и их смеси. Размер частиц никеля 100 ± 20 нм, форма частиц близка к сферической (фиг. 1, а) [19]. Частицы кобальта в форме дисков диаметром 600 ± 20 нм и толщиной 20 ± 2 нм (фиг. 1, б). Количество кислорода, определенное методом энергодисперсионного микроанализа, в порошке никеля составило 13 ат.%, в порошке кобальта — 9 ат.%. Исследованы пять составов прослоек: 100% Co, 100% Ni (и порошковая прослойка, и фольга), смеси порошков 75% Co-25% Ni, 50% Co-50% Ni, 25% Co-75% Ni.

Образцы стали 45 получены чистовым точением, образцы сплава ВК6 — методом порошковой металлургии. Образцы стали 45 и сплава ВК6 изготовлены в виде цилиндров с размерами: $d = 10$ мм, $l = 10$ мм. Для создания необходимой площади физического контакта и удаления оксидной пленки соединяемые поверхности образцов стали и твердого сплава непосредственно перед сборкой шлифовали на абразивных бумагах с размером зерна 100—125 и 50—63 мкм. Акти-



Фиг. 1. СЭМ-изображения порошка кобальта (а) и типичного ДС твердый сплав ВК6—прослойка—сталь 45 (б)

вирующую прослойку получали прессованием на гидравлическом прессе порошка (навеска 300 мг) в жесткой матрице при давлении 300 МПа. Прослойки имели размеры: диаметр $d = 10$ мм, толщина фольги никеля 90 ± 1 мкм, прессованных порошковых прослоек 60 ± 2 мкм.

В процессе ДС для передачи сварочного давления сборка из стали, прослойки и твердого сплава помещалась в специальное приспособление. Оптимальные параметры процесса ДС образцов получены авторами ранее: сварочное давление 8 МПа [21], изотермическая выдержка 20 мин при температуре 850°C , что составляет 0,6 температуры плавления никеля [19]. Процесс ДС образцов осуществлен в муфельной печи ТА2-4-ТР (ТЕГИС ВЮТЕСН) в вакууме.

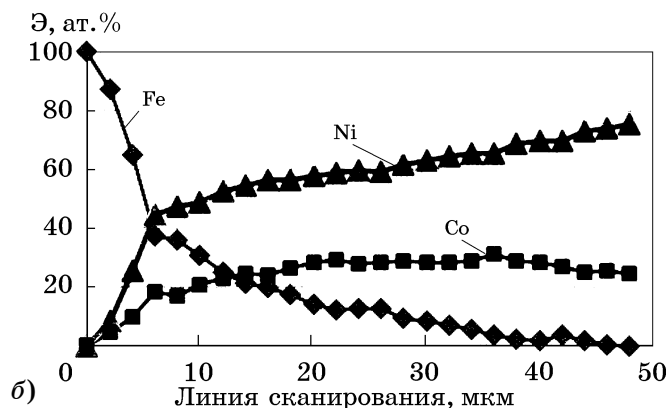
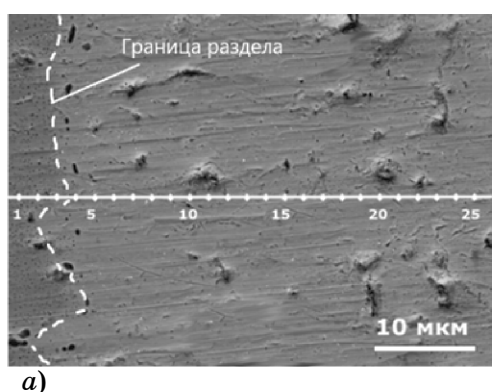
Для исследования микроструктуры ДС, определения ширины переходных зон (ПЗ) и элементного состава формирующих их фаз на образцах изготовлены поперечные шлифы. Исследование микроструктуры поперечных шлифов и определение химического состава порошковой прослойки и ДС проведены методами электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM 7001F, укомплектованном спектрометром (Inca PentaFetx3). Микроструктуру ДС изучали с использованием композиционного контраста, концентрационное распределение элементов определяли набором точечных спектров с шагом 2 мкм и 0,3 мкм по линии, пересекающей ДС под углом 90° .

Результаты исследований и их обсуждение. Диффузионное соединение разнородных материалов с применением промежуточ-

ных порошковых прослоек при определенной шероховатости соединяемых поверхностей позволяет реализовать интенсификацию массопереноса и формирование качественного соединения в процессе твердофазного взаимодействия. Диффузионное соединение образцов стали и твердого сплава через прессованную порошковую прослойку и прослойку из фольги образуется вследствие формирования в процессах твердофазной реакции общих зерен в ПЗ между соединяемыми разнородными материалами и спекания самой порошковой прослойки. Все это приводит к перераспределению в ПЗ химических элементов и образованию новых фаз.

В данной работе рассмотрено два типа ДС: между сталью 45 и активирующей прослойкой, с одной стороны, и твердым сплавом ВК6 и активирующей прослойкой, с другой. Типичная микроструктура слоистого композита представлена на фиг. 1, б. Концентрационное распределение химических элементов, построенное под углом 90° к ДС, показывает, что слева расположен сплав ВК6, в середине — порошковая прослойка Co-Ni, а справа — сталь 45.

Типичная микроструктура диффузионного соединения сталь 45—порошковая прослойка (Ni-Co) и концентрационные кривые распределения химических элементов по линии сканирования состава приведены на фиг. 2. Вдоль границы соединения разнородных материалов наблюдается цепочка горизонтально вытянутых пор, максимальная длина которых составляет ~ 1 мкм, ширина $0,2\text{--}0,3$ мкм (фиг. 2, а). Переходные зоны в ДС сталь 45—Co, сталь 45—(xCo-yNi) формируются вследствие взаимодействия железа,



Фиг. 2. Микроструктура ДС сталь 45 (слева)—порошковая прослойка (75% Ni-25% Co) с выделенными областями анализа состава (а) и концентрационное распределение химических элементов (Э) по линии сканирования (б)

никеля и кобальта. В системе Fe-Ni в процессе сканирования по линии сканирования при кристаллизации возможно образование твердых растворов на основе α -Fe или γ -Fe и Ni. Кроме этого, со стороны Ni-содержащей прослойки возможно образование твердого раствора, близкого по составу к упорядоченной фазе FeNi₃ [22]. В свою очередь, в системе Fe-Co отмечается широкая область гомогенности фазы упорядочения FeCo [23]. Кобальт и никель взаимодействуют с образованием непрерывного ряда твердых растворов на основе α -Co, ε -Co и Ni. В системе Fe-Co-Ni показано присутствие следующих фаз: твердый раствор на основе α -Fe и упорядоченные твердые растворы α , близкие по составу к интерметаллидам FeNi₃, FeCo [17, 19, 21].

Как видно из графиков распределения химических элементов по диффузионному соединению (см. фиг. 2, б), диффузия никеля и кобальта в сталь 45 происходит на глубину 10 мкм, а диффузия железа в прослойку состава 75% Ni-25% Co — на 36 мкм. Для данного ДС ширина переходной зоны составляет 46 мкм.

Ширина ПЗ остальных ДС стали 45 и прослоек определена по соответствующим концентрационным кривым и составляет: 34 мкм для прослойки из порошка никеля; 42 мкм для прослойки из фольги Ni; 46, 36 и 35 мкм для прослоек из смесей порошков соответственно 25% Co-75% Ni, 50% Co-50% Ni и 75% Co-25% Ni и, наконец, 45 мкм для прослойки из порошка кобальта. Диффузия никеля в сталь в процессе твердофазного взаимодействия происходит в основном по границам зерен стали, имеющих средний размер 8 ± 2 мкм [20], вследствие чего по их границам формируется слой, ширина которого составляет $2 \pm 0,5$ мкм. Различие в ширине ПЗ в зависимости от состава прослойки может быть связано с тем, что при определении состава по линии сканирования под анализ попадают области как границ зерен, содержащих никель, так и сами зерна, в которые никель не диффундировал.

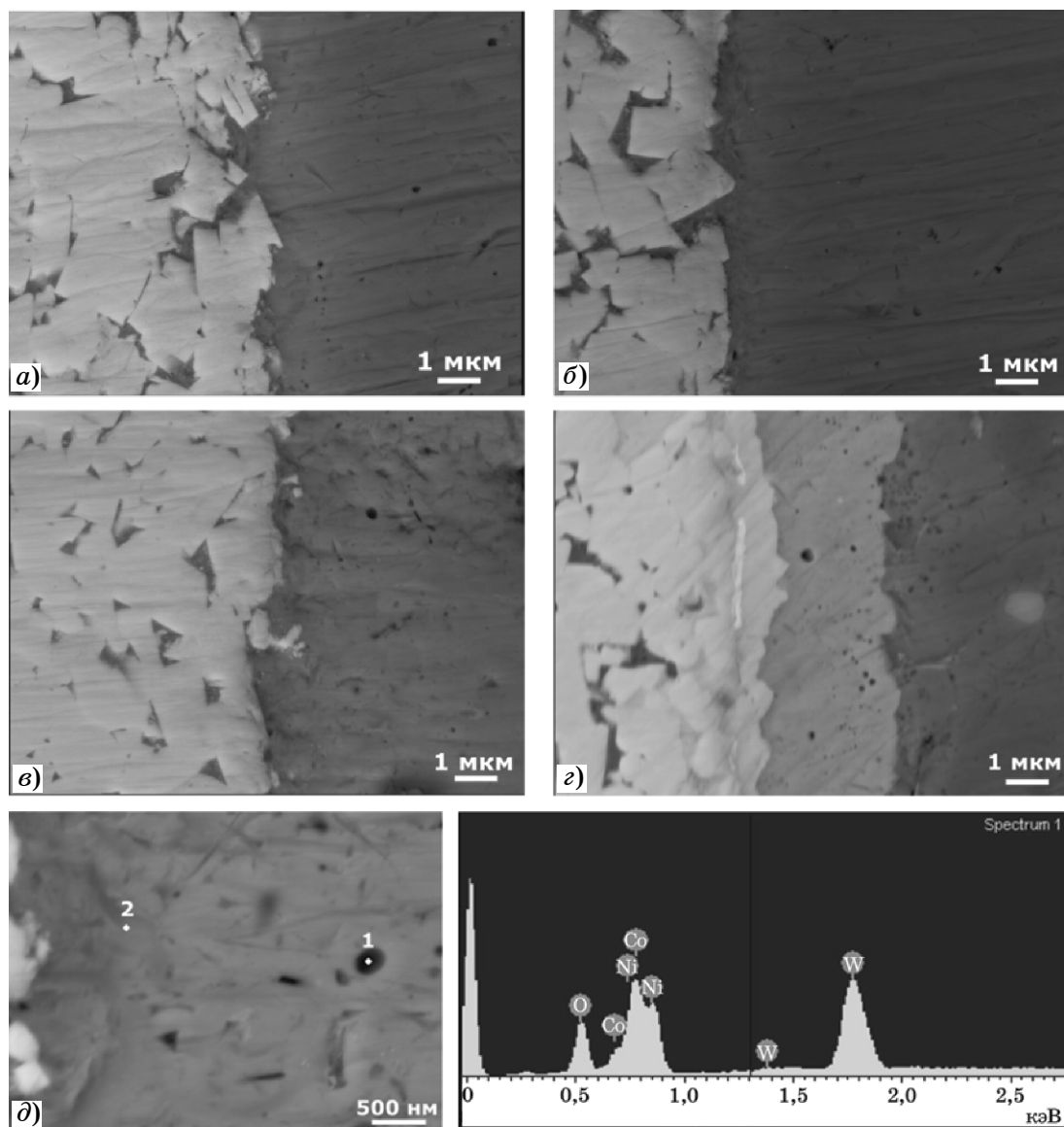
Изображения микроструктуры типичных ДС сплав ВК6—прослойка представлены на фиг. 3. Для слоистых композитов, полученных методом ДС, характерно наличие таких дефектов структуры, как несплошности и трещины в зоне соединения, поры и оксидные включения, образующиеся вдоль соединения [24—26].

Для всех соединений, полученных через порошковые прослойки и фольгу, характерно незначительное количество дефектов в виде включений, микротрещин и пор со средним размером $0,3 \pm 0,2$ мкм, что говорит об удовлетворительном качестве сформировавшейся в процессе твердофазного взаимодействия ПЗ. Несплошности и трещины в зоне соединения нами не обнаружены. Микроструктура ДС, полученного через порошковый слой Co, имеет некоторые отличия (см. фиг. 3, г и 4, е). Между твердым сплавом и порошковым слоем обнаружена прослойка.

В процессе формирования ДС в вакууме происходит восстановление оксидов, кислород частично удаляется из образца, возникают отдельные включения в ПЗ диффузионных соединений и в порошковой прослойке. Выявленные включения темно-серого цвета в ДС всех образцов, как правило, расположены в виде отдельных образований или коротких цепочек вдоль соединения разнородных материалов и имеют средний размер $0,3 \pm 0,1$ мкм (фиг. 3, д). Элементный состав такого типичного включения представлен в табл. 1. Спектр 1 показывает высокое содержание кислорода, наличие которого вероятно обусловлено адсорбированными молекулами воздуха и воды на соединяемых поверхностях разнородных материалов. Формальная оценка по соотношению элементов (в ат.%) позволяет предположить, что темно-серая фаза в ПЗ представляет собой NiWO₄. Так как размер области, на которой проводится определение элементного состава, превышает размер включения, элементный состав, представленный в табл. 1 для спектра 1, дополняется вкладом порошковой прослойки Co-Ni. Спектр 2 показывает состав ПЗ в ДС сплав ВК6—порошковая прослойка Ni-Co и WC.

Изображения образцов ДС сплав ВК6—прослойка с областями анализа элементного состава, проведенного с шагом 2 мкм, и концентрационные кривые распределения химических элементов по линии сканирования представлены на фиг. 4.

Расстояние, на которое взаимно диффундируют W, Ni, Co, позволяет определить ширину ПЗ, формирующейся в процессе ДС твердого сплава ВК6 и порошковой прослойки. В ДС, полученных через прослойку, в составе которой есть никель, ширина ПЗ определена по глубине взаимной диффузии воль-



Фиг. 3. Микроструктура ДС сплав ВК6—прослойка (справа), $\times 10000$. Диффузионное соединение получено с прослойками разного состава: *a* — фольга Ni; *б* — порошок Ni; *в* — смесь порошков 75% Ni-25% Co; *г* — порошок Co; *д* — снимок с областями 1 и 2 анализа состава (табл. 1) и типичный спектр (справа), полученный на включениях в ПЗ в соединении 75% Ni-25% Co

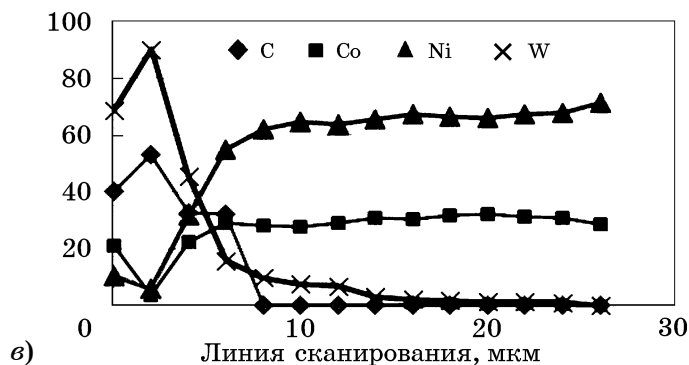
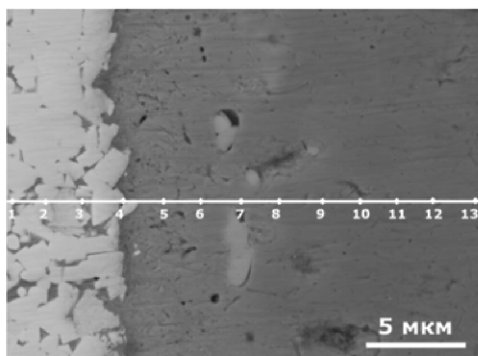
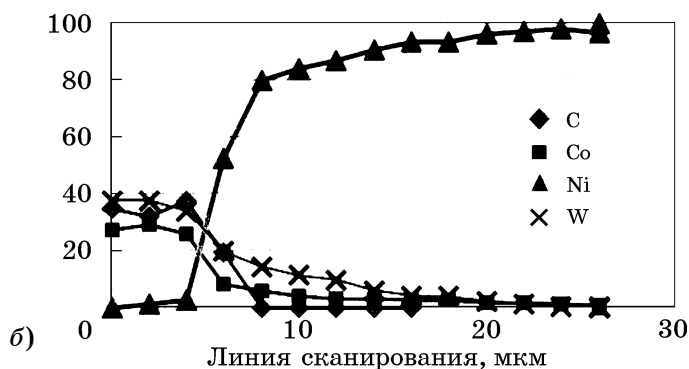
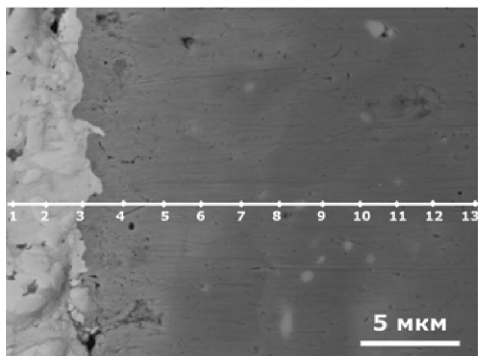
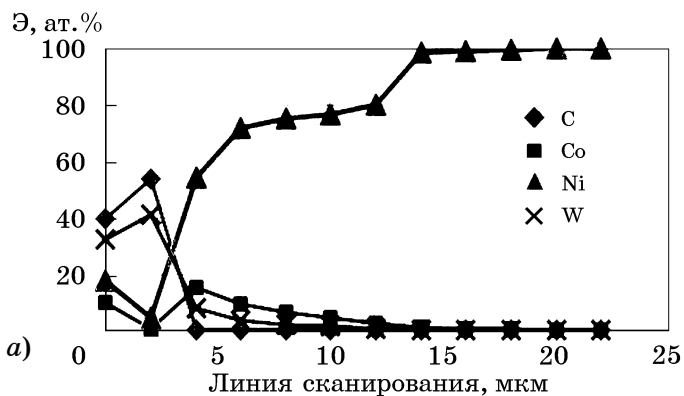
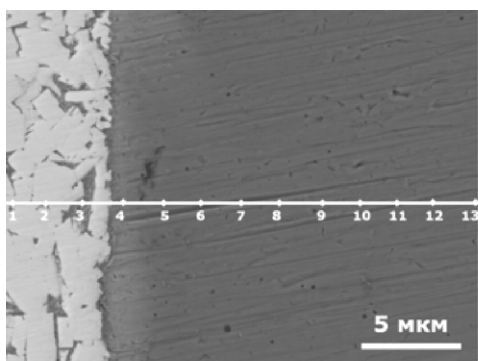
Таблица 1
Химический состав (ат.%) фаз ДС
сталь 45—порошковая прослойка (75% Ni-25% Co)

Спектр (см. фиг. 3, д)	C	O	Co	Ni	W
1	—	24,06	28,42	40,20	7,32
2	10,71	—	31,34	49,58	8,37

фрама и никеля, а через прослойку из порошка Co — по диффузии вольфрама в кобальтовую прослойку.

Ширина ПЗ в ДС сплава ВК6 в зависимости от состава прослойки следующая: 18 мкм — фольга Ni (фиг. 4, *a*); 36 мкм — порошок

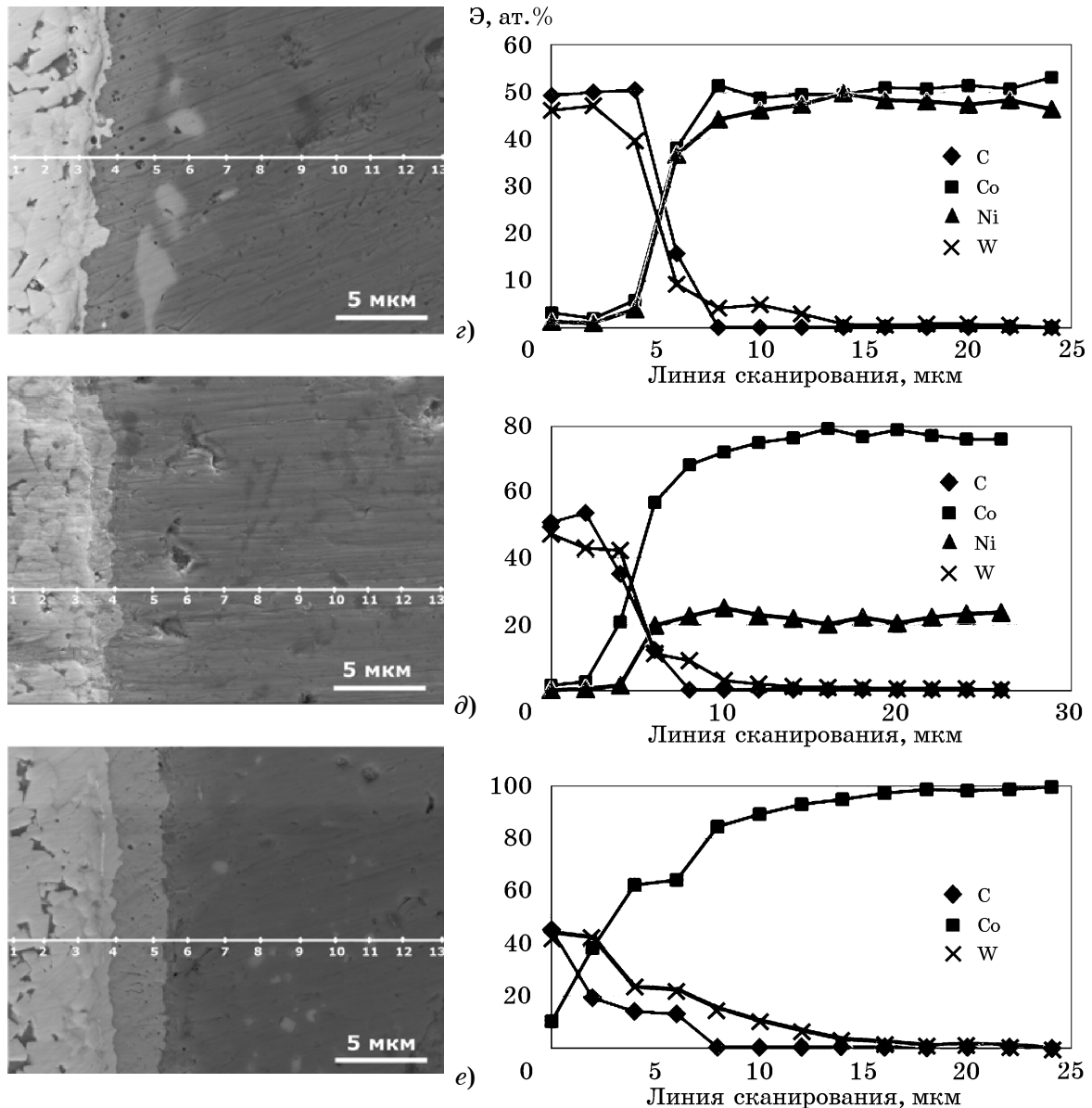
Ni (фиг. 4, *б*); 32 мкм — смесь порошков 25% Co-75% Ni (фиг. 4, *в*); 28 мкм — смесь 50% Co-50% Ni (фиг. 4, *г*); 35 мкм — смесь 75% Co-25% Ni (фиг. 4, *д*). Минимальная ширина ПЗ (22 мкм) получена в соединении сплав ВК6—прослойка Co (фиг. 4, *e*). Средняя ширина ПЗ в ДС сплав ВК6—порошковая прослойка равна 29 ± 6 мкм. Диффузия никеля в глубину твердого сплава ВК6 составляет 10—15 мкм, в свою очередь вольфрам диффундирует в прослойку состава Ni-Co на глубину до 26 мкм, а в прослойку Co — до 20 мкм. Более глубокое проникновение вольфрама в прослойку никеля по сравнению с Co-содержащими прослойками обус-



ловлено тем, что коэффициент диффузии вольфрама в никеле значительно выше, чем в кобальте [27].

Между твердым сплавом и порошковым слоем выявлена прослойка шириной 1–2 мкм с повышенным содержанием кобальта, что явно видно на фиг. 3, з, 4, д, е. Эти композиты получены через прослойку, в которой содержится соответственно 70 и 100% Co. Образование выявленной прослойки можно объяснить тем, что при повышенном содержании кобальта на границе раздела сплав ВК6—порошки (75% Co-25% Ni) она состоит из твердого раствора WC в Co и WC [27]. На изображении с применением композиционного контраста прослойка (см. фиг. 4, д) имеет серый цвет, в отличие от светло-серого цвета сплава ВК6 и темно-серого цвета порошковой смеси (75% Co-25% Ni).

Изменение ширины ПЗ в ДС в зависимости от состава прослойки графически показано на фиг. 5. Наибольшая ширина ПЗ получена в ДС сталь 45—прослойка и, независимо от состава прослойки, ее средняя величина составляет 40 ± 6 мкм. Средняя ширина ПЗ в соединениях сплав ВК6—прослойка составляет 33 ± 5 мкм, что достаточно для формирования качественных и вакуум-прочных ДС стали 45 и сплава ВК6. Качество ДС при такой ширине ПЗ подтверждается испытаниями на разрыв слоистых композитов, результаты которых получены А.В. Люшинским [17]. Предел прочности на разрыв слоистых композитов, полученных через пористую ленту состава 25% Co-75% Ni, составляет 735 МПа и разрушение происходит по твердому сплаву как более твердому и наименее прочному компоненту в композите.

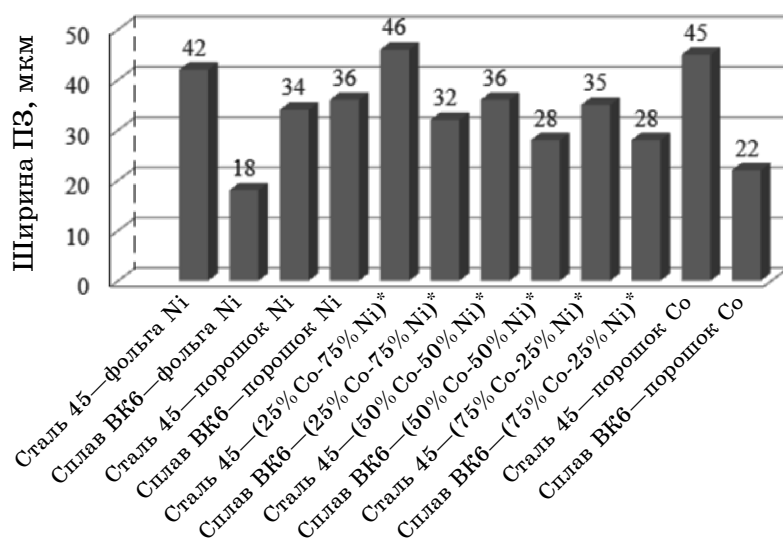


Фиг. 4. Микроструктура образцов с выделенными областями анализа состава и концентрационные кривые распределения химических элементов в ПЗ сплав ВК6—прослойка. Состав прослойки: *a* — фольга Ni; *b* — порошок Ni; *c*—*d* — смеси порошков соответственно 75% Ni-25% Co, 50% Ni-50% Co, 25% Ni-75% Co; *e* — порошок Co

Анализ фаз, формирующих ПЗ в ДС сплав ВК6—порошковая прослойка (25% Ni-75% Co), выполнен с учетом количественного состава 22 точечных спектров (в ат.%), полученных по линии сканирования с шагом 0,3 мкм (фиг. 6, *a*). Концентрационное распределение построено по усредненному количеству каждого элемента в четырех спектрах (фиг. 6, *b*, табл. 2). В ДС сплав ВК6—Co, сплав ВК6—(xCo-yNi) ПЗ формируются вследствие твердофазного взаимодействия вольфрама, углерода, никеля и кобальта с образованием общих зерен. Наличие общих зерен подтверждается полученным в области ПЗ спектром

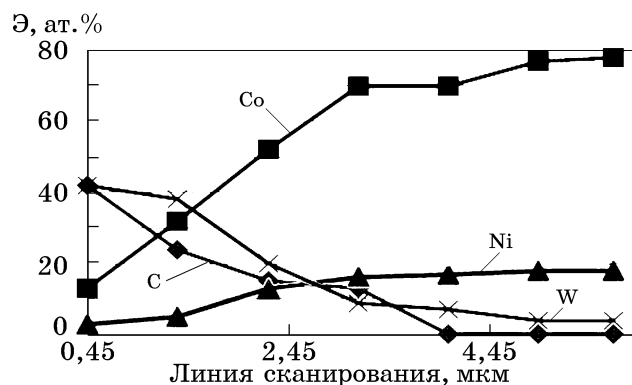
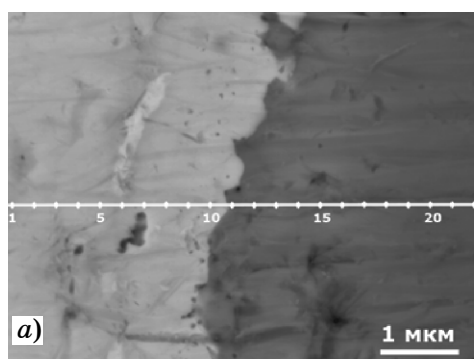
2 (см. табл. 1) и усредненным значением для спектров 10—13 (табл. 2). Присутствующие в составах спектров элементы (Co, Ni, W и C) входят в состав соединяемых материалов.

Элементный состав ПЗ показал, что в слой твердого сплава ВК6 частично диффундируют никель и кобальт. Как видно из табл. 2, в составе серий точечных спектров 1—4 и отчасти 4—7 сохраняется соотношение W/C, соответствующее соединению WC. Содержание кобальта обусловлено кобальтовой связкой и частично диффузией, а содержание никеля объясняется только диффузией из



Диффузионное соединение

Фиг. 5. Изменение ширины ПЗ в ДС сталь45—прослойка—сплав ВК6 в зависимости от состава прослойки (звездочкой помечены прослойки из смеси порошков)



Фиг. 6. СЭМ-изображение микроструктуры с выделенными областями анализа состава (а) и концентрационные кривые распределения химических элементов (б) в ПЗ, полученной в соединении сплав ВК6—порошковая прослойка (25% Ni-75% Co)

Таблица 2

Химический состав по линии сканирования 22 точечных спектров в ПЗ сплав ВК6— порошковая прослойка (25% Ni-75% Co)

Спектры	Линия сканирования состава, мкм	Содержание элемента, ат.%			
		C	Co	Ni	W
1—4	0,45	42	13	3	42
4—7	1,35	24	32	5	38
7—10	2,25	15	52	13	20
10—13	3,15	13	70	16	9
13—16	4,05	0	70	17	7
16—19	4,95	0	77	18	4
19—22	5,70	0	78	18	4

области порошкового слоя (25% Ni-75% Co) в кобальтовую связку в сплав ВК6. Кобальтовая связка, в свою очередь, в соответствии с диаграммой состояния W-C-Co [27] представляет собой γ -твердый раствор Co-W-C.

В области порошкового слоя (25% Ni-75% Co) следует отметить диффузию исключительно вольфрама; углерод при этом не обнаруживается (см. серии точечных спектров 13—22 в табл. 2). Как известно, вольфрам частично растворим не только в никеле (до 13 ат.% при 850 °C [28]), но и в кобальте (до 4 ат.% при 850 °C [23, 25]), что позволяет допустить растворимость вольфрама в порошковой прослойке (25% Ni-75% Co).

Таким образом, для ДС сплав ВК6—Co, сплав ВК6—(xCo-yNi) на примере соедине-

ния сплав ВК6—порошковый слой (25% Ni-75% Co) показано, что ПЗ формируется за счет взаимной диффузии вольфрама, никеля и кобальта с образованием твердых растворов Co-Ni (спектры 16—19 в табл. 2), Co-Ni-W (спектры 1—4).

Выводы. 1. Применение порошкового слоя в качестве активирующей порошковой прослойки позволяет получить качественное диффузионное соединение при температуре процесса диффузионного соединения 850 °С, что составляет 0,6 температуры плавления никеля ($t_{пл}^{Ni}$), тогда как диффузионное соединение образцов без порошковой прослойки следует проводить при температуре 1018—1164 °С, составляющей $(0,7—0,8)t_{пл}^{Ni}$.

2. Переходная зона (ПЗ) диффузионных соединений порошковая прослойка—твердый сплав ВК6 в основном формируется твердыми растворами Co-Ni, Co-W, Co-Ni-W, а также возможно незначительным количеством химических соединений Ni₄W, NiW, NiW₂. В ПЗ диффузионных соединений сталь 45—порошковая прослойка образуются следующие фазы: твердые растворы Co-Ni на основе γ -Co и ε -Co, α -Fe, γ -Fe и упорядоченные α -твердые растворы на основе соединений FeNi₃ и FeCo.

3. На основе анализа микроструктуры диффузионных соединений и порошковой прослойки, концентрационного распределения химических элементов по диффузионным соединениям, микроструктуры и ширины ПЗ сделан вывод, что применение в качестве активирующей прослойки порошкового слоя обеспечивает получение качественного диффузионного соединения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stephenson, D.A.* Metal cutting theory and practice / D.A. Stephenson, J.S. Agapiou. — [S.l.] : CRC press, 2018. 969 p. DOI : 10.1201/9781315373119
2. *Fan, W.* A review on cutting tool technology in machining of Ni-based superalloys / Fan W., Ji W., Wang L., Zheng L., Wang Y. // Intern. J. Adv. Manufact. Techn. 2020. V.110. P.2863—2879. DOI : 10.1007/s00170-020-06052-9
3. *Rizzo, A.* The critical raw materials in cutting tools for machining applications : A review / A. Rizzo, S. Goel, M. Luisa Grilli, R. Iglesias, L. Jaworska, V. Lapkovskis [et al.] // Materials. 2020. V.13. №6. P.1377. DOI : 10.3390/ma13061377
4. *Krylov, E.* Development of multicriteria approach to cutting tools selection for automated manufacturing systems / E. Krylov, N. Fedorova, N. Kozlovteva // Intern. Russian Automation Conf. (RusAutoCon). IEEE. 2018. P.1—5. DOI : 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501730. EDN: NZIOZU

5. *Dwivedi, D.K.* Fundamentals of metal joining / D.K. Dwivedi. — Singapore : Springer, 2022. 451 p. DOI : 10.1007/978-981-16-4819-9
6. *Northrop, I.T.* The joining of tungsten carbide hardmetal to steel / I.T. Northrop // J. Southern Afr. Inst. Mining and Metallurgy. 1987. V.87. №5. P.125—135.
7. *Shalamov, V.G.* FEM analysis of carbide insert strength for milling application / V.G. Shalamov, S.D. Smetanin, I.S. Boldyrev // Proceed. 6th Intern. Conf. Industrial Eng. (ICIE 2020). — [S.l.] : Springer Intern. Publ., 2021. V.II. №6. P.180—188. DOI : 10.1007/978-3-030-54817-9_21. EDN: JOCKEB.
8. *Hasanabadi, M.* Interfacial microstructure and mechanical properties of tungsten carbide brazed joints using Ag-Cu-Zn+Ni/Mn filler alloy / M. Hasanabadi, A. Shamsipur, H.N. Sani, H. Omidvar, S. Sakhaei // Trans. Nonferrous Metals Soc. China. 2017. V.27. №12. P.2638—2646. DOI : 10.1016/S1003-6326(17)60292-9
9. *Sharma, N.K.* Progress in improving joint strength of brazed cemented carbides and steels / N.K. Sharma [et al.] // Sci. Techn. Welding and Joining. 2021. V.26. №5. P.420—437. DOI : 10.1080/13621718.2021.1931764
10. *Chen, G.* Electron beam welding—brazing of hard alloy to steel with Ni-Fe intermediate / Chen G., Zhang B., Wu Z., Mao W., Feng J. // Intern. J. Refract. Metals Hard Mater. 2013. V.40. P.58—63. DOI : 10.1016/j.jirmhm.2013.03.002
11. *Поварова, К.Б.* Изучение свойств и выбор сплавов для дисков с лопатками («блисков») и способа их соединения / К.Б. Поварова, В.А. Валитов, С.В. Овсепян, А.А. Дроздов, О.А. Базылева, Э.В. Валитова // Металлы. 2014. №5. P.61—70. EDN : SLQVRV.
12. *Коллеров, М.Ю.* Влияние режимов термической обработки и диффузионной сварки на структуру и свойства заготовок пористого материала из волокон титана / М.Ю. Коллеров // Металлы. 2015. №6. С.32—36. EDN : VDDFKH.
13. *Pan, Y.* Effect of Ni interlayer thickness on the welding morphology and mechanical properties of SPS diffusion-welded YG8/40Cr joints / Pan Y., Yang X., Fan Z., Liu D., Zhang J., Xie S., Du Y., Huang L. // J. Mater. Eng. Perform. 2024. V.33. P.7008—7019. DOI : 10.1007/s11665-023-08480-6
14. *Sun, H.* Microstructure and strength of diffusion bonding W alloy/304 stainless steel joint using a Cu interlayer / H. Sun, Y. Han, Y. Li // Intern. J. Refract. Metals Hard Mater. 2023. V.113. Art.106188. DOI : 10.1016/j.jirmhm.2023.106188
15. *Samiuddin, M.* Diffusion welding of CoCrNi medium-entropy alloy (MEA) and SUS 304 stainless steel using different interlayers / Samiuddin M., Li J., Sun X., Xiong J. // Met. Res. Techn. 2022. V.119. №3. P.312. DOI : 10.1051/metal/2022019
16. *Люшинский, А.В.* Изготовление инструмента различного назначения с применением диффузионной сварки / А.В. Люшинский // Сварочное производство. 2018. №10. С.30—33. EDN : YULCWT.
17. *Люшинский, А.В.* Сравнение некоторых методов интенсификации процесса диффузионной сварки / А.В. Люшинский // Сварочное производство. 2021. №12. С.22—29. EDN : JZWQSH.
18. *Зеер, Г.М.* Диффузионная сварка через промежуточные слои / Г.М. Зеер, Е.Г. Зеленкова, Ю.П. Коро-

- лева [и др.] // Сварочное производство. 2012. №7. С.17—22. EDN : PVVWOL.
19. Зеер, Г.М. Исследование микроструктуры, элементного и фазового составов диффузионного соединения стали 45 через порошковую прослойку / Г.М. Зеер, Е.Г. Зеленкова, О.В. Белоусов [и др.] // ЖТФ. 2015. Т.85. №4. С.46—51. DOI : 10.1134/S1063784215040313. EDN : UFTDGB.
 20. Михеев, А.А. Формирование микроструктуры и переходной зоны при диффузионной сварке стали 45 через порошковый слой / А.А. Михеев, Г.М. Зеер, Ю.П. Королева [и др.] // Сварочное производство. 2015. №9. С.18—21. EDN : VDACQH.
 21. Зеер, Г.М. Моделирование термомеханического напряженного состояния в диффузионном соединении, полученном через порошковый слой / Г.М. Зеер, Е.Г. Зеленкова, Н.А. Колбасина, Ю.П. Королева, М.Ю. Кучинский // Металлы. 2022. №2. С.92—98. EDN : YSPQCR.
 22. Банных, О.А. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа / О.А. Банных, П.Б. Будберг, С.П. Алисова [и др.]. — М. : Металлургия, 1986. 563 с.
 23. Диаграммы состояния двойных металлических систем : справочник : 3 т. Т.1 / под общ. ред. Н.П. Лякишева. — М. : Машиностроение, 1996. 992 с.
 24. Ustinov, A.I. Diffusion welding through vacuum-deposited porous interlayers / A.I. Ustinov [et al.] // J. Mater. Proc. Techn. 2017. V.247. P.268—279. DOI : 10.1016/j.jmatprotec.2017.04.029
 25. Guo, Y. Rapid diffusion bonding of WC-Co cemented carbide to 40Cr steel with Ni interlayer : effect of surface roughness and interlayer thickness / Y. Guo [et al.] // Ceramics Intern. 2016. V.42. №15. P.16729—16737. DOI : 10.1016/j.ceramint.2016.07.145
 26. Balasubramanian, M. Characterization of diffusion-bonded titanium alloy and 304 stainless steel with Ag as an interlayer / M. Balasubramanian // Intern. J. Adv. Manufact. Techn. 2016. V.82. №1. P.153—162. DOI : 10.1007/s00170-015-7376-8
 27. Холлек, Х. Двойные и тройные карбидные и нитридные системы переходных металлов : справ. изд. / Х. Холлек; пер. с нем. ; под ред. Ю.В. Левинского. — М. : Металлургия, 1988. 319 с.
 28. Диаграммы состояния двойных металлических систем : справочник : 3 т. Т.2 / под общ. ред. Н.П. Лякишева. — М. : Машиностроение, 1997. 1024 с.