

## ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ ФОЛЬГИ ИЗ ПОРОШКОВОГО НИКЕЛЬ-ХРОМОВОГО СПЛАВА

И. А. ГУСАРОВА<sup>1</sup>, А. М. ПОТАПОВ<sup>1</sup>, Т. А. МАНЬКО<sup>1</sup>, Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО<sup>2</sup>,  
А. И. УСТИНОВ<sup>2</sup>, Л. В. ПЕТРУШИНЕЦ<sup>2</sup>, Т. В. МЕЛЬНИЧЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>КБ «Южное» им. М. К. Янгеля. 49008, г. Днепр, ул. Криворожская, 3. E-mail: info@yuzhnoye.com

<sup>2</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе рассмотрено влияние параметров режима диффузионной сварки на формирование соединений из фольги порошкового сплава Ni–20Cr толщиной 25 мкм. Показано, что сварка сплава нихрома в диапазоне температур 800...1200 °С без применения промежуточных прослоек не позволяет получить бездефектные соединения. Исследованы особенности формирования соединений сплава Ni–Cr при использовании фольг в качестве промежуточных прослоек, полученных по технологии электронно-лучевого осаждения и конденсации в вакууме. В работе применяли фольгу с многослойной структурой систем Ni–Al, Ti–Cu и с пористой структурой из Cu, Ni и Co. Микроструктуру и химический состав соединений исследовали с помощью оптической и электронной микроскопии. Прочностные свойства металла в зоне соединений оценивали по результатам микроиндентирования и испытания плоских образцов на растяжение. Установлено, что применение при сварке подобных промежуточных прослоек позволяет получить бездефектную микроструктуру зоны соединения. Показано, что при сварке через промежуточную прослойку из пористых фольг на основе меди формируются соединения с прочностными свойствами на уровне основного металла. Библиогр. 18, табл. 2, рис. 9.

*Ключевые слова:* диффузионная сварка в вакууме, порошковый сплав Ni–Cr, пористые фольги, многослойные фольги, микроструктура, микроиндентирование

Создание надежной и экономически эффективной теплозащитной конструкции наветренной части многоразовых космических аппаратов является сложной научно-технической проблемой. Разработка таких перспективных теплозащитных конструкций с наружной металлической панелью ведется в США и Европе начиная с середины XX века, однако теплозащита, обеспечивающая нормальное функционирование космического аппарата в течение требуемого количества пусков практически отсутствует [1].

В Украине также создается теплозащитная конструкция с наружной сотовой панелью из порошкового жаростойкого сплава ЮИПМ-1200 на основе Ni–Cr [2]. Сплав при температурах до 1100 °С имеет прочность порядка 34 МПа и относительное удлинение при растяжении 30...40 %, что обеспечивает его работоспособность в условиях значительных деформаций при повышенных температурах [3]. При изготовлении трехслойной сотовой панели теплозащитной конструкции заключительной и самой ответственной операцией является соединение ее элементов — верхней и нижней крышек с сотовым наполнителем [4].

Существуют различные технологии соединения элементов трехслойных панелей: сварка плавлением, пайка и сварка давлением.

Следует учитывать, что для сохранения характеристик порошкового сплава сварка должна проводиться в твердой фазе, что исключает ис-

пользование сварки плавлением — лазерной и электронно-лучевой. Кроме того, сварка плавлением данной группы материалов затруднена из-за их склонности к образованию горячих трещин. Получение качественных соединений возможно лишь при предварительном подогреве их до температуры 1100...1200 °С [5]. Получение данного вида конструкций может осуществляться пайкой. Однако при эксплуатации паяных соединений в условиях высоких температур происходит образование оксидов в зоне контакта соединяемого металла с припоем. Это приводит к существенной интенсификации окисления и межкристаллитной коррозии основного материала [6].

Наиболее перспективным способом соединения элементов трехслойной конструкции в панель является сварка давлением — диффузионная сварка.

Сложность получения соединений из жаропрочных сплавов на основе никеля методом диффузионной сварки заключается, прежде всего, в наличии на их поверхности термически стойкого слоя оксида и низкой пластичности данной группы материалов. Стандартная подготовка поверхностей образцов или изделий перед сваркой заключается в механической обработке — шлифовании и химическом травлении, что обеспечивает удаление поверхностного слоя металла вместе с оксидными пленками. Однако такая поверхность в атмосферных условиях неустойчива и очень бы-

стро вновь покрывается слоем оксидов [7]. Итак, на свариваемых поверхностях всегда имеется слой оксида, который в процессе нагрева необходимо удалить до проведения процесса сварки. Как правило, при сварке без промежуточных прослоек с учетом нахождения на поверхности жаропрочных никелевых сплавов термически устойчивой оксидной пленки, необходимо применять более жесткие режимы сварки.

Позитивное воздействие на очистку свариваемых поверхностей также может оказывать механическое удаление оксидов из контактной зоны. За счет различий в пластических характеристиках сплава и его оксидов деформация поверхностного слоя, особенно сдвиговая, приводит к нарушению целостности слоя оксида, его растрескиванию и дроблению на осколки. Низкая пластичность жаропрочных сплавов на основе никеля оказывает негативное воздействие на формирование физического контакта и как следствие на процесс схватывания, а также объемное взаимодействие соединяемых поверхностей.

С учетом сказанного выше при диффузионной сварке жаропрочных сплавов на основе никеля рекомендуются повышенные режимы сварки: температура  $T = 1140 \dots 1240$  °С, давление  $P = 20 \dots 60$  МПа, время процесса  $t = 30 \dots 120$  мин [8, 9].

Для ускорения образования физического контакта и активации свариваемых поверхностей при диффузионной сварке применяются промежуточные прослойки. Наиболее широкое применение при сварке находят прослойки из фольги (50...500 мкм), полученные по технологии литья и последующей прокатки. Данные фольги относительно дешевы и технологичны, но для обеспечения деформации прослойки процесс сварки необходимо проводить при повышенных значениях сварочного давления, при этом в зоне соединения возникает существенная химическая неоднородность. Использование при диффузионной сварке в качестве промежуточных прослоек порошковых [10] или перфорированных фольг [11] позволяет снизить температуру и давление сварки, а также повысить равномерность распределения элементов в зоне соединения, однако их изготовление является достаточно сложным и трудоемким процессом.

С целью уменьшения химической неоднородности в стыке необходимо применять более тонкие фольги, способные пластически деформироваться в процессе сварки. К таким фольгам относятся быстрозакристаллизованные фольги [12] и конденсаты, полученные методами напыления, в частности, электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме [13]. Данная технология позволяет получать фольги различного химиче-

ского состава и структурного состояния: многослойные, пористые, градиентные. Особенностью как многослойных, так и пористых фольг является то, что в условиях нагрева они способствуют формированию структурно-неравновесного состояния как в самой фольге, так и в приповерхностных слоях свариваемого металла. Нагрев фольги и приложение растягивающих напряжений вызывают резкое увеличение скорости их деформации, которая приобретает экспоненциальную зависимость, что характерно для материалов при переходе их в сверхпластичное состояние. Использование подобных конденсатов в качестве прослойки при диффузионной сварке способствует улучшению условий формирования физического контакта в стыке и увеличению диффузионной подвижности атомов [14].

Целью работы является изучение особенностей формирования сварных соединений из порошкового сплава Ni-Cr с использованием промежуточных прослоек разного химическим составом, полученных методом электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме.

**Материалы и методы исследования.** Для исследований применяли экспериментальный сплав ЮИПМ-1200 (Ni-20Cr-3...4Fe-0,40...0,6Al-0,25...0,35Ti-0,5Y, мас. %), полученный по порошковой технологии. Диффузионную сварку образцов из фольги сплава Ni-Cr проводили в свободном состоянии в вакууме с помощью установки У-394М.

Сваривали фольги Ni-Cr размером  $18 \times 11 \times 0,025$  мм. После сварки из образцов изготавливали шлифы для проведения металлографических исследований и уточнения влияния термометрического цикла сварки на структуру полученных соединений. Параметры процесса сварки были следующие: температура сварки  $T = 800 \dots 1200$  °С, продолжительность сварки  $t = 5 \dots 30$  мин, сварочное давление  $P = 5 \dots 40$  МПа, вакуум в рабочей камере поддерживали на уровне  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па.

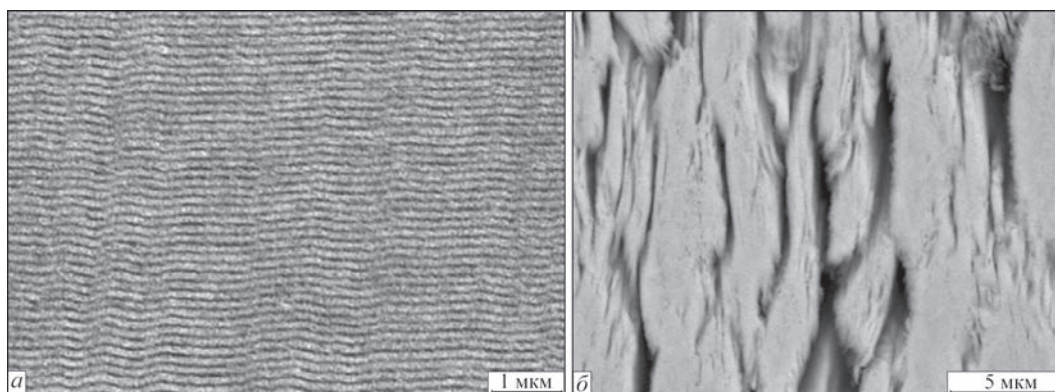
Для активации схватывания на стадии формирования физического контакта исследовали возможность применения в качестве промежуточных прослоек вакуумных конденсатов (табл. 1) с многослойной (Ni/Al, Ti/Cu) (рис. 1, а), и пористой структурой (Ni, Co, Cu) (рис. 1, б).

Промежуточные прослойки для сварки получали путем электронно-лучевого осаждения в вакууме по методике, описанной в работе [15].

Анализ структурных характеристик прослоек и сварных соединений проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа CAMSCAN 4, оснащенного системой энергодисперсионного анализа EDX INCA 200 для локального химического состава на плоских образцах. Для этого по стан-

Таблица 1. Параметры пористых и многослойных фольг

Прослойка	Химический состав, мас. %					Период чередования слоев, мкм	Толщина, мкм	Пористость, об. %
	Ni	Al	Ti	Co	Cu			
Ni	100	–	–	–	–	–	25	23
Co	–	–	–	100	–	–	50	25
Cu	–	–	–	–	100	–	30	30
Ni/Al	86,68	13,32	–	–	–	0,40	32	–
Cu/Ti	–	–	48,32	–	51,68	0,86	40	–


 Рис. 1. Микроструктура поперечного сечения фольги: *a* — многослойная Al/Ni (светлые слои соответствуют никелю, темные — алюминию); *б* — пористая из Ni

дартной методике с использованием шлифовально-полировального оборудования фирмы «Struers» были приготовлены шлифы поперечного сечения фольг и сварных соединений.

Механические свойства сварных соединений оценивали методом автоматического индентирования в плоскости поперечного сечения сварных соединений с записью диаграммы нагружения и разгрузки индентора на установке «Микрон-гамма» [16] и испытанием плоских образцов на растяжение на машине MTS-810.

**Экспериментальные результаты и обсуждение.** Как было показано ранее, на поверхности сплавов Ni–Cr всегда присутствует оксидная пленка [7]. Полученные нами результаты показывают, что содержание кислорода на поверхности сплавов может превышать 16 % (рис. 2, *a*). Очистка поверхности фольги наждачной бумагой P1000 до металлического блеска и обезжиривание в спирте позволяют уменьшить толщину оксидной пленки и, соответственно, содержание кислорода на поверхности фольги до 3 % (рис. 2, *б*). Поэтому непосредственно перед сваркой поверхности образцов зачищали и обезжиривали в спирте.

Как показали наши эксперименты, нагрев фольги в вакууме  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па при температуре  $T = 1000$  °C в течение 30 мин также приводит к окислению предварительно очищенной поверхности. На рис. 3 приведен вид поверхности фольги и ее химический состав. Как видим, после нагрева в вакууме содержание кислорода на поверхности фольги возрастает от 3,05...3,39 до 12,35...15,13 мас. %. Необходимо отметить, что полученные нами данные согласуются с резуль-

татами работ [8, 17]. Авторами этих работ при сварке сплавов Ni–Cr рекомендуется применение покрытий из никеля, что обеспечивает защиту поверхности сплавов в процессе нагрева.

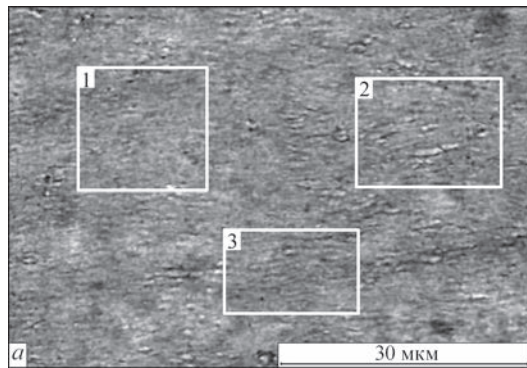
Для выбора параметров диффузионной сварки сплава Ni–Cr проведены исследования влияния температуры отжига на структуру металла.

Нагрев образцов проводили при температуре  $T = 1050$  °C, давлении  $P = 5$  МПа в течение  $t = 5$  мин в условиях вакуума. При анализе микроструктуры фольги установлено, что под действием температуры и давления в ней происходит снижение содержания пор (рис. 4).

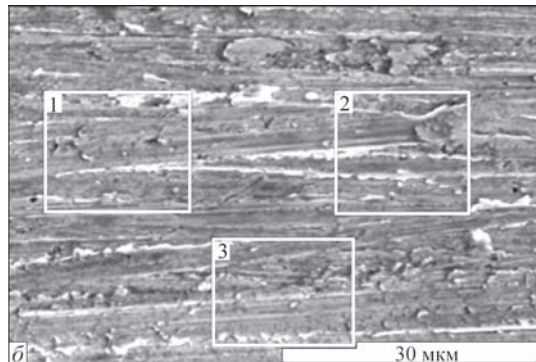
Установлено, что пористость в фольге в исходном состоянии составляет 7,7 %, а после отжига снижается до 5,2 %. Методом микроиндентирования установлено, что в образцах исходного материала среднее значение микротвердости равно 3,754 ГПа, значение модуля Юнга составляет 139,8 ГПа, отклонение модуля упругости равно 4,6 %, что указывает на однородность материала, а также равномерность распределения пор по всему поперечному сечению образца фольги. Отжиг фольги в условиях вакуума приводит к снижению значений микротвердости в 1,6 раза по сравнению с материалом в исходном состоянии (до 2,293 ГПа) и к увеличению модуля Юнга до 148,7 ГПа.

Увеличение модуля упругости может быть показателем снижения общей пористости материала [18]. Однако увеличение диапазона отклонений его значений до 7,1 % может указывать на менее равномерный характер распределения пор по всему поперечному сечению фольги в сравнении с образцом в начальном состоянии.



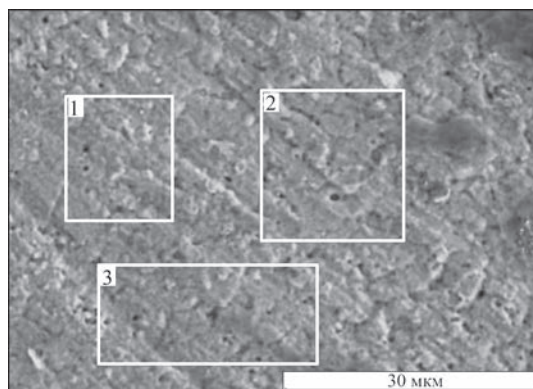


Номер п/п	Химический состав поверхности фольги (мас. %) в состоянии поставки							
	C	O	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Y
1	4,86	16,75	0,66	0,55	18,22	2,27	56,69	–
2	4,60	16,38	0,45	0,18	17,51	2,51	57,66	0,71
3	4,41	16,98	0,53	0,57	18,70	2,57	56,24	–



Номер п/п	Химический состав поверхности фольги (мас. %) после механической обработки и обезжиривания							
	C	O	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Y
1	9,29	3,39	–	–	15,87	3,30	68,15	–
2	7,65	3,05	–	–	16,36	3,13	69,81	–
3	6,87	3,17	0,47	0,68	15,98	3,95	68,87	–

Рис. 2. Вид поверхности фольги из сплава Ni–Cr и ее химический состав: *a* — в состоянии поставки, *б* — после механической обработки наждачной бумагой P1000 и промывания в спирте



Номер п/п	Химический состав поверхности фольги, мас. %							
	C	O	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Y
1	6,64	12,35	6,70	3,42	15,17	2,46	53,26	–
2	8,62	13,25	6,87	2,18	13,81	1,73	53,54	–
3	10,60	15,13	6,76	2,63	13,71	2,38	48,80	–

Рис. 3. Вид поверхности фольги из сплава Ni–Cr и ее химический состав после механической очистки и нагрева в вакууме

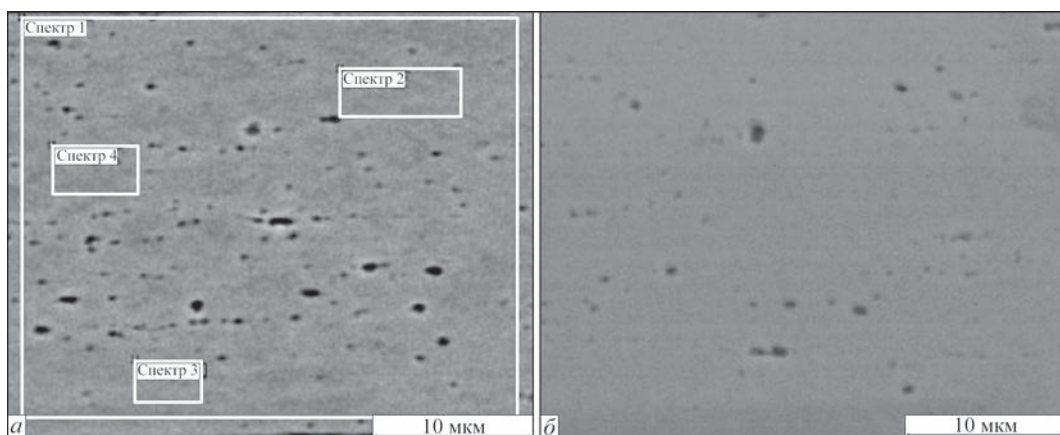


Рис. 4. Микроструктура фольги из сплава Ni–Cr в исходном состоянии (*a*) и после нагрева при температуре  $T = 1050$  °C под давлением  $P = 5$  МПа в вакууме (*б*)

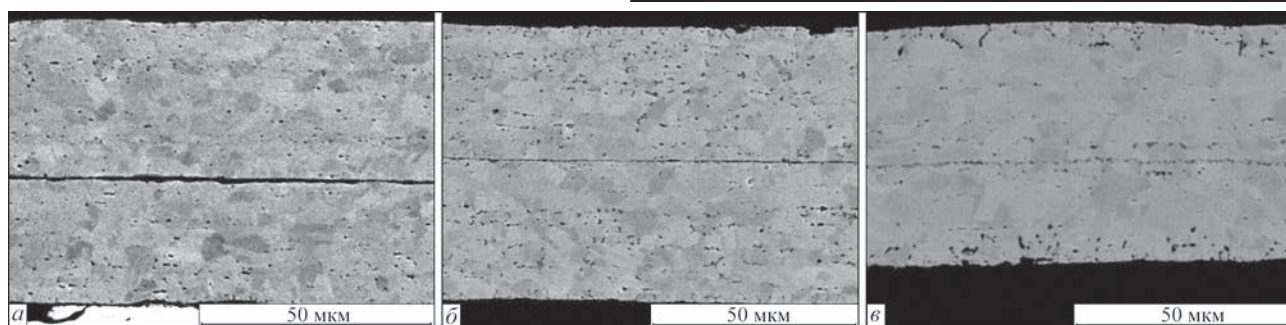


Рис. 5. Микроструктура соединений из сплава Ni–Cr, полученных при температуре сварки: а — 800; б — 1000; в — 1200 °С



Номер п/п	$H$ , ГПа	$E$ , ГПа
1	2,547	110,7
2	3,029	127,1
3	2,750	112,6
4	2,689	121,4
5	2,804	125,8
6	2,403	131,1
7	2,519	140,4
8	2,707	143,5
9	2,487	154,3
Среднее значение	2,659	129,7

Рис. 6. Результаты автоматического индентирования зоны соединения образцов из фольги Ni–Cr ( $T = 1200$  °С,  $P = 40$  МПа,  $t = 20$  мин): отпечатки, полученные вследствие индентирования; таблица расчетов (индентирование проводилось при одинаковых значениях  $P = 20$  г и  $V = 2$  г/с для всех точек)

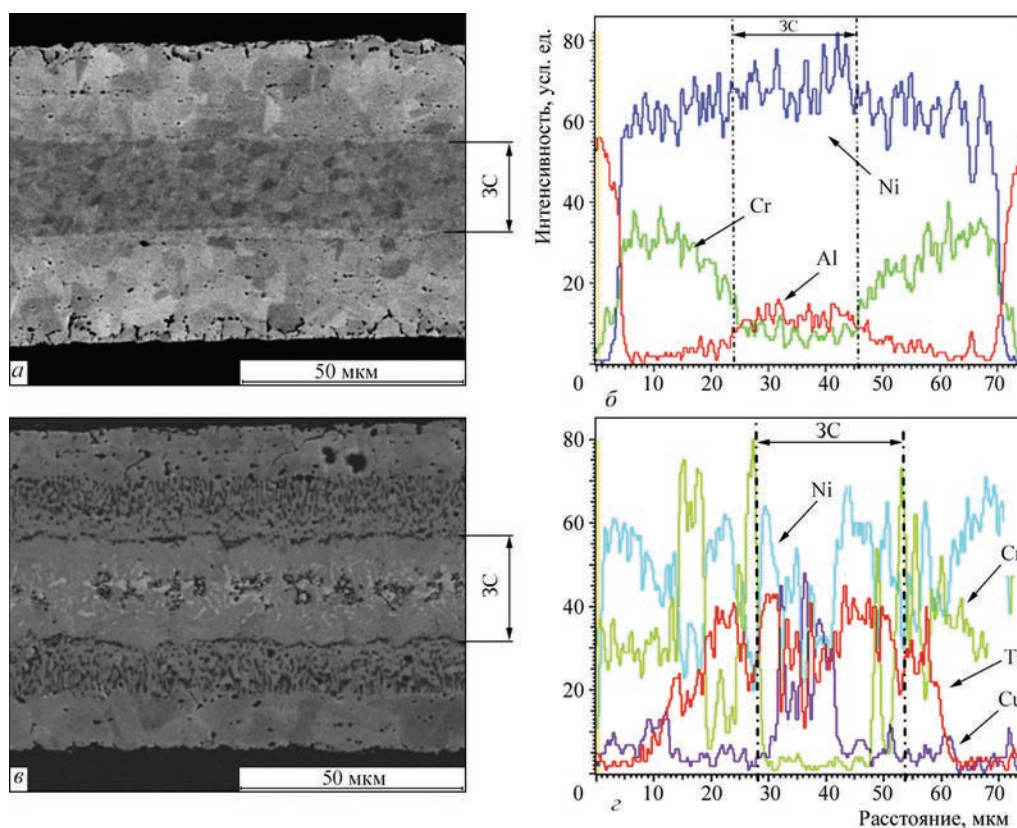


Рис. 7. Микроструктура и распределение элементов в соединениях, полученных с применением многослойных прослоек систем Al/Ni (а, б) и Cu/Ti (в, з)



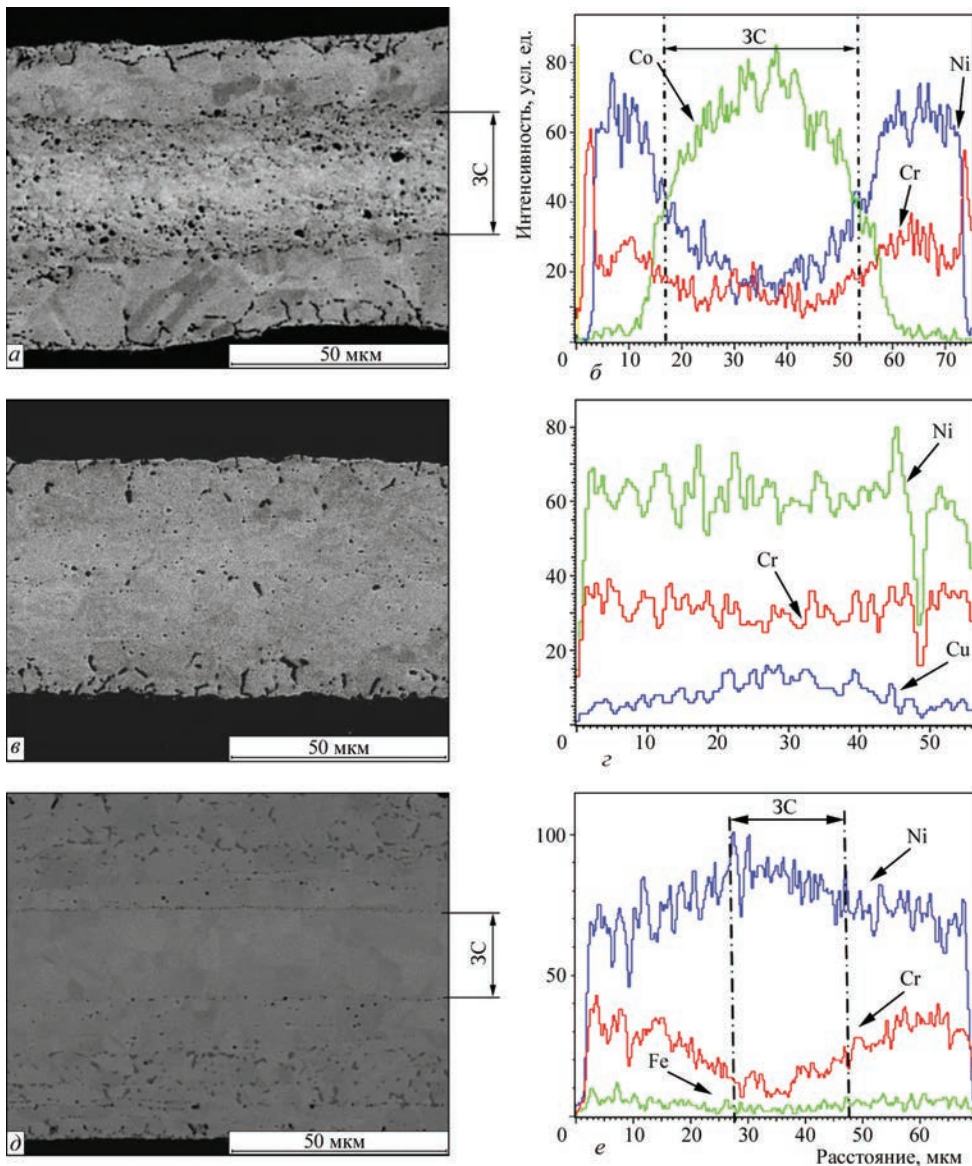


Рис. 8. Микроструктура и распределение элементов в соединениях, полученных с применением пористых прослоек Co (а, б), Cu (в, з) и Ni (д, е)

Для определения оптимальных параметров сварки сплава Ni–Cr была проведена серия экспериментов по получению соединений при температурах 800, 900, 1000, 1100, 1200 °С. Сварку проводили без применения промежуточных прослоек. Давление сварки во всех случаях составляло 40 МПа, время процесса 20 мин.

Микроструктуры соединений из сплава никрома, полученные при температуре 800, 1000 и 1200 °С, представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, по мере увеличения температуры сварки дефектность зоны соединения уменьшается. Однако даже при температуре сварки 1200 °С, в зоне соединения сохраняется цепочка оксидов, расположенная вдоль стыка.

При сварке сплава Ni–Cr без применения промежуточных прослоек ( $T = 1200$  °С,  $P = 40$  МПа,  $t = 20$  мин) микротвердость в зоне соединения имеет значения, которые близки к значениям,

характерным для отожженного материала  $H = 2,823$  ГПа. Исходя из результатов металлографических исследований, а также широкого диапазона изменения модуля Юнга  $E = 110,7 \dots 154,3$  ГПа можно сделать вывод, что влияние высоких значений температуры сварки и давления приводит, с одной стороны, к коагуляции пор в фольге, а с другой — к неоднородному перераспределению пористости в зоне соединения (рис. 6).

Исследовали влияние многослойных прослоек на формирование структуры сварных соединений. Анализ микроструктуры соединений, полученных с применением прослоек системы Al/Ni, показывает, что в стыке дефекты отсутствуют (рис. 7, а). Ширина зоны соединения (3С) составляет 20 мкм. Глубина диффузии алюминия с прослойки в сплав Ni–Cr, исходя из распределения элементов, равна 5...7 мкм (рис. 7, б). Содержание химических

элементов в стыке составляет: 85,53 Ni; 3,75 Cr; 10,16 Al; 0,56 Fe, мас. %.

Зона соединения образцов, полученных с многослойной прослойкой Al/Ni, характеризуется повышенными средними значениями как микротвердости  $H = 4,340$  ГПа, так и модуля Юнга  $E = 161,3$  ГПа.

В случае применения фольги системы Cu–Ti в стыке наблюдается формирование нескольких диффузионных зон с разным химическим составом элементов (рис. 7, в, г). Общая ширина ЗС составляет 25...30 мкм. Как следует из графиков распределения элементов, в процессе сварки диффузия никеля проходит по всей толщине прослойки. Глубина диффузии титана с прослойки в сплав Ni–Cr, исходя из распределения элементов, равна 12...15 мкм (рис. 7, г). Концентрация никеля в прослойке составляет около 40 %. Диффузия хрома из фольги в прослойку незначительна, его содержание в прослойке 1,81...2,41 %. Среднее значение микротвердости для образцов, полученных с многослойной прослойкой Cu/Ti, равно  $H = 4,340$  ГПа, а модуль Юнга  $E = 161,3$  ГПа.

В работе также исследовали возможность применения при сварке нихрома пористых прослоек из никеля, кобальта и меди (рис. 8). Сварку проводили при температуре  $T = 1200$  °С, давлении  $P = 40$  МПа, времени выдержки  $t = 20$  мин.

Установлено, что использование прослоек на основе кобальта приводит к появлению в зоне соединения значительной пористости (рис. 8, а) и неоднородности распределения элементов (рис. 8, б). Содержание химических элементов в стыке составляет: 15,80 Ni; 6,47 Cr; 1,09 Fe; 76,64 Co, мас. %. Общая ширина ЗС составляет 35...38 мкм. Глубина диффузии кобальта с прослойки в сплав Ni–Cr, исходя из распределения элементов, равна 7...10 мкм (рис. 8, б). Среднее значение микротвердости для образцов, полученных с пористой прослойкой из кобальта, равно  $H = 3,224$  ГПа, а модуль Юнга  $E = 157,3$  ГПа.

При применении пористых прослоек на основе меди линия контакта прослойка–сплав Ni–Cr в процессе сварки как структурный элемент исчезает (рис. 8, в).

Следует отметить, что, поскольку температура плавления меди составляет 1083 °С, то в данном случае сварку проводили в режиме TLDB (Transient liquid phase diffusion bonding). Наличие жидкой фазы в стыке обеспечило активацию поверхностей свариваемых заготовок и диффузию меди на всю толщину фольги.

Использование прослоек из меди приводит к более равномерному характеру распределения элементов в стыке (рис. 8, г) и минимальному количеству дефектов. Содержание химических элементов в стыке составляет: 68,46 Ni; 17,26 Cr; 0,99

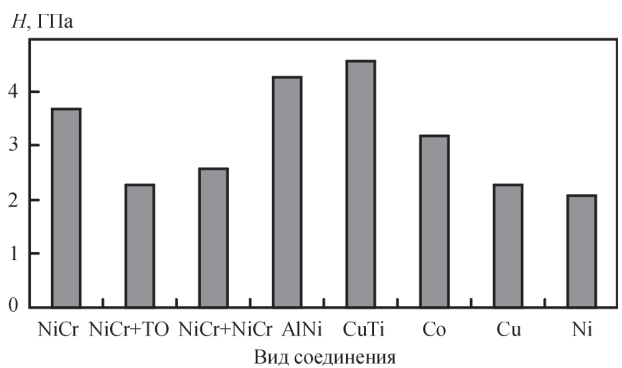


Рис. 9. Значения микротвердости, полученные для основного металла и сварных соединений по результатам автоматического индентирования

Fe; 14,27 Cu, мас. %. Среднее значение микротвердости для образцов, полученных с пористой прослойкой из меди, равно  $H = 2,258$  ГПа, а модуль Юнга  $E = 137,1$  ГПа.

В сварных соединениях, полученных с применением прослойки из пористого никеля, в зоне соединения наблюдается образование крупнозернистой структуры. Ширина зоны соединения составляет 20...25 мкм (рис. 8, д). Дефекты в зоне соединения отсутствуют.

Однако на границе прослойка – сплав Ni–Cr отмечается наличие цепочки из пор, расположенных вдоль стыка. Содержание химических элементов в стыке составляет: 93,67 Ni; 4,96 Cr; 0,46 Al; 0,91 Fe, мас. %, что может свидетельствовать о том, что в стыке сформировался низколегированный сплав на основе никеля.

Среднее значение микротвердости зоны соединения образцов, полученных с пористой прослойкой из никеля, равно  $H = 2,119$  ГПа, а модуль Юнга  $E = 158,5$  ГПа.

Результаты микромеханических исследований исходного материала и сварных соединений представлены на рис. 9.

Как видно из приведенных данных, микротвердость фольги (среднее значение) после отжига снижается с 3,754 до 2,293 ГПа. В сварных соединениях, полученных с многослойной фольгой Al/Ni и Cu/Ti, средние значения микротвердости в зоне соединения соответственно равны 4,340 и 4,637 ГПа, что, по нашему мнению, может свидетельствовать о формировании в стыке интерметаллидных фаз. В соединениях, полученных с применением пористых фольг из Cu и Ni, средние значения микротвердости в стыке (соответственно 2,258 и 2,119 ГПа) близки к значениям микротвердости фольги Ni–Cr после отжига. В соединениях, полученных с применением фольги из кобальта, микротвердость в зоне соединения составляет 3,224 ГПа, что превышает средние значения микротвердости для основного материала после отжига.

Таблица 2. Результаты механических испытаний сварных соединений на растяжение

Номер образцов	Тип образца	Вид прослойки, толщина, мм	Место разрушения образцов		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{B\text{ ср}}$ , МПа
			Основной металл	Зона соединения		
1	ОМ	--	+	-	440	405
2			+	-	-	
3			+	-	370	
1	ОМ после отжига	-	+	-	200	305
2			+	-	215	
3			+	-	500	
1	Сварное соединение	Cu/Ti, $\delta = 0,04$	-	-	75	161
2			+	-	250	
3			+	-	160	
1	"-	Al/Ni	-	+	-	100
2			-	+	100	
3			-	+	-	
1	"-	Ni, $\delta = 0,025$	+	-	120	108
2			+	-	160	
3			-	+	45	
1	"-	Cu, $\delta = 0,03$	+	-	200	317
2			+	-	310	
3			+	-	360	
4			+	-	400	
1	"-	Co, $\delta = 0,05$	+	-	175	233
2			+	-	260	
3			-	+	-	
4			+	-	265	

Исследовали механические свойства сварных соединений, полученных при диффузионной сварке в вакууме образцов из сплава Ni–Cr. Длина образцов составляла 18, ширина 11 мм. Нахлест при сварке образцов составлял 5 мм. Результаты механических испытаний сварных соединений на растяжение приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2 средняя прочность основного металла из сплава Ni–Cr составляет 405 МПа. Отжиг фольги приводит к снижению ее уровня прочности до 305 МПа. Применение многослойных фольг систем Cu/Ti и Al/Ni обеспечивает средние прочностные свойства соединений соответственно на уровне 161 и 100 МПа, что, как было показано выше, может быть связано с значительной химической неоднородностью в зоне соединения и повышением в стыке микротвердости отдельных структурных элементов.

Средняя прочность образцов, изготовленных с применением пористой прослойки из кобальта, равна  $\sigma_B = 223$  МПа. Образцы, полученные с применением промежуточной прослойки из кобальта, характеризуются наличием дефектов в зоне соединения как в виде пор, так и значительной химической неоднородности по распределению элементов: Cr, Ni, Al. По нашему мнению возникновение пористости в стыке может быть связано с проявлением эффекта Киркендалла.

Средняя прочность образцов, полученных с применением пористой прослойки из никеля, равна  $\sigma_B = 108$  МПа. Исходя из результатов металло-

графических исследований, можно предположить, что полученные результаты связаны как с образованием в стыке зоны, которая состоит из низколегированного никеля, так и наличием с двух сторон от прослойки цепочек пор, что, вероятно, и приводит к снижению прочности сварных соединений.

Применение пористой прослойки из меди при сварке сплава Ni–Cr позволяет получить соединения со средним значением прочности  $\sigma_B = 317$  МПа. Анализ микроструктуры сварных соединений показывает, что в случае применения пористой прослойки из меди и режима сварки, который обеспечивает протекание интенсивных диффузионных процессов в стыке, прослойка исчезает как структурный элемент. Прочность соединений находится на уровне прочности основного металла, подвергнутого термической обработке.

### Выводы

1. Диффузионная сварка в вакууме порошкового сплава Ni–Cr ЮИПМ-1200 (Ni–20Cr–3...4Fe–0,40...0,6Al–0,25...0,35Ti–0,5Y, мас. %) без применения промежуточных прослоек во всех исследуемых температурных диапазонах сварки обуславливает формирование в зоне соединения дефектов в виде пор.

2. Показано, что отжиг фольги сплава Ni–Cr в вакууме  $B = 1,33 \cdot 10^{-3}$  Па при температуре, соответствующей температуре диффузионной свар-



ки, сопровождается окислением поверхности образцов.

3. Применение при диффузионной сварке сплава Ni-Cr многослойных прослоек Al/Ni и Ti/Cu, полученных по технологии электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме, способствует формированию бездефектных соединений. В зоне соединения формируются диффузионные зоны с повышенным уровнем микротвердости.

4. Применение прослоек на основе пористой фольги из никеля, меди и кобальта, позволяет обеспечить установление физического контакта свариваемых поверхностей, способствует протеканию диффузионных процессов и формированию сварного соединения. Промежуточные прослойки на основе меди при диффузионной сварке сплава Ni-Cr обеспечивают получение соединений с прочностью на уровне основного металла после термической обработки.

1. Tumino G. European Development and Qualification Status and Challenges in Hot Structures and Thermal Protection Systems for Space Transportation Concepts: Proceedings of the 4th European Workshop «Hot Structures and Thermal Protection Systems for Space Vehicles» (Palermo, Italy, 26–29 Nov. 2002). – Paris: European Space Agency, 2003. – P. 39–43.
2. Багатошарова теплозахисна система багаторазового космічного апарату: пат. 91891 Україна, МПК В64G 1/58, В64C 1/38, В64C 3/36. – № 201313658; заявл. 25.11.2013; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14.
3. Фролов Г. А., Цыганенко В. С., Пасичный В. В. Тепловые испытания элементов изделий ракетно-космической техники при радиационном нагреве // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 10. – С. 28–32.
4. Оценка термостойкости трехслойной сотовой панели, полученной из сплава ЮИПМ-1200 способом диффузионной сварки в вакууме / И. А. Гусарова и др. // Автоматическая сварка. – 2016. – № 12. – С. 31–35.
5. Медовар Б. И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 1966. – 431 с.
6. Sporer D., Fortuna D. Selecting materials for brazing a honeycomb in turbine engines // Welding Journal. – 2014. – Vol. 93, Issue 2. – P. 44–48.
7. Atkinson H.V. A Review of the Role of Short-Circuit Diffusion in the Oxidation of Nickel, Chromium, and Nickel-Chromium Alloys // Oxidation of Metals. – 1985. – Vol. 24, Issue 3/4. – P. 177–197.
8. Мусин Р. А., Анциферов В. Н., Квасницкий В. Ф. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.
9. Столяров В. Н. Жаропрочные соединения никелевых сплавов, выполненных диффузионной сваркой и прессовой сваркой-пайкой // Сварочное производство. – 1971. – № 1. – С. 26–29.
10. Люшинский А. В. Диффузионная сварка разнородных металлов. – М.: Академия, 2006. – 208 с.
11. Мусин Р. А., Лямин Я. В. Применение перфорированных прокладок при диффузионной сварке // Сварочное производство. – 1991. – № 2. – С. 2–4.
12. Сварка давлением микродисперсного композиционного материала AMg5 + 27 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с применением быстро-закристаллизованной прослойки эвтектического состава

Al + 33 % Cu / Ю. В. Фальченко и др. // Автоматическая сварка. – 2010. – № 2. – С. 10–14.

13. Диффузионная сварка стали с оловянной бронзой через пористые прослойки никеля и меди / А. И. Устинов и др. // Там же. – 2015. – № 9. – С. 15–22.
14. Дослідження дифузійних процесів у зварних з'єднаннях алюмініду титану (TiAl) / Г. К. Харченко та ін. // Вісник ЧДТУ. Серія технічні науки. – 2009. – № 37. – С. 117–119.
15. Исследование фазовых превращений и пластических деформаций при непрерывном нагреве многослойной фольги Al/Cu / А. И. Устинов и др. // Автоматическая сварка. – 2009. – № 10. – С. 29–34.
16. Уравнение индентирования / С. А. Фирстов и др. // Доповіді Національної академії наук України. – 2007. – № 12. – С. 100–106.
17. Davies B. J., Stephenson S. Diffusion bonding and pressure brazing of Nimonic 90 nickel-chromium-cobalt alloy // British Welding Journal. – 1962. – Vol. 2, Issue 3. – P. 139–148.
18. Влияние пористости на упругие характеристики твердых сплавов TiC-TiN / В. В. Акимов и др. // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50, № 4. – С. 136–138.

І. О. Гусарова<sup>1</sup>, А. М. Потапов<sup>1</sup>, Т. А. Манько<sup>1</sup>,  
Ю. В. Фальченко<sup>2</sup>, А. І. Устинов<sup>2</sup>,  
Л. В. Петрушинець<sup>2</sup>, Т. В. Мельниченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля.  
49008, м. Дніпро, вул. Криворізька, 3.  
E-mail: info@yuzhnoye.com

<sup>2</sup>ЧЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

#### ДИФУЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ В ВАКУУМІ ФОЛЬГИ З ПОРОШКОВОГО НІКЕЛЬ-ХРОМОВОГО СПЛАВУ

У роботі розглянуто вплив параметрів режиму дифузійного зварювання на формування з'єднань з фольги порошкового сплаву Ni-20Cr товщиною 25 мкм. Показано, що зварювання сплаву ніхрома в діапазоні температур 800...1200 °C без застосування проміжних прошарків не дозволяє отримати бездефектні з'єднання. Досліджено особливості формування з'єднань сплаву Ni-Cr при використанні фольги в якості проміжних прошарків, отриманих за технологією електронно-променевого осадження і конденсації в вакуумі. У роботі застосовували фольгу з багатошаровою структурою систем Ni-Al, Ti-Cu і з пористою структурою з Cu, Ni і Co. Мікροструктуру і хімічний склад з'єднань досліджували за допомогою оптичної та електронної мікроскопії. Міцність металу в зоні з'єднань оцінювали за результатами мікроіндентування і випробування плоских зразків на розтягання. Встановлено, що застосування при зварюванні подібних проміжних прошарків дозволяє отримати бездефектну мікροструктуру зони з'єднання. Показано, що при зварюванні через проміжний прошарок з пористої фольги на основі міді формуються з'єднання з властивостями міцності на рівні основного металу. Бібліогр. 18, табл. 2, рис. 9.

*Ключові слова:* дифузійне зварювання в вакуумі, порошковий сплав Ni-Cr, пористі фольги, багатошарові фольги, мікροструктура, мікроіндентування

Поступила в редакцію 02.02.2017