

## ПРИПОЙ БЕЗ БОРА И КРЕМНИЯ ДЛЯ ПАЙКИ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

С. В. МАКСИМОВА, В. В. ВОРОНОВ, П. В. КОВАЛЬЧУК

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

Использование никелевых припоев, содержащих в качестве депрессантов бор и кремний, обеспечивает хорошее смачивание паяемого материала, позволяет существенно снизить температуру пайки, но приводит к образованию хрупких фаз и легкоплавких эвтектик в паяных швах. В данной работе показана возможность формирования паяных соединений литейного жаропрочного никелевого сплава ЖС6У пайкой в вакууме с применением многокомпонентных никелевых припоев, не содержащих в качестве депрессантов бор и кремний. Методом высокотемпературного дифференциально-термического анализа в атмосфере высокочистого гелия определены температуры ликвидуса и солидуса припоев. Приведены результаты металлографических и микрорентгеноспектральных исследований по изучению особенностей структурообразования паяных швов. Оценена длительная прочность паяных соединений. Показано, что никелевые припои, содержащие большую концентрацию циркония, характеризуются более низкой температурой плавления, однако, в паяных швах образуются выделения фазы  $Ni(Ме)_2Zr$ . Определено, что снижение концентрации циркония в никелевом припое позволяет избежать образования интерметаллидной фазы, обогащенной цирконием, и получить в качестве преобладающей фазы в шве твердый раствор на основе никеля. Результаты испытаний плоских паяных (стыковых) образцов на длительную прочность, проведенные при повышенной температуре 975 °С и напряжении 140 МПа, показали, что соединения сохраняют целостность и не разрушаются после 41...60 ч испытаний. Показано, что цирконий может выступать в качестве альтернативного депрессанта (вместо совместного введения бора и циркония). Библиогр. 13, табл. 3, рис. 8.

*Ключевые слова:* вакуумная высокотемпературная пайка, жаропрочный никелевый литейный сплав, температура ликвидус, солидус, микроструктура, многокомпонентный припой, паяное соединение, длительная прочность

Из многочисленных жаропрочных материалов, применяемых в промышленности, наибольшее внимание привлекают сплавы, используемые для изготовления деталей горячего тракта газотурбинных двигателей, в частности, лопаток турбин. В настоящее время это, в подавляющем большинстве случаев, высоколегированные никелевые сплавы, в которых реализовано твердорастворное, карбидное и интерметаллидное упрочнение [1, 2]. В процессе эксплуатации детали горячего тракта турбин, в первую очередь направляющие и рабочие лопатки, подвергаются коррозионному, эрозионному и термоусталостному разрушению в условиях циклически изменяющихся температур, центробежных нагрузок и воздействия продуктов сгорания газотурбинного топлива. Для продления ресурса этих дорогостоящих деталей применяют ремонтные технологии, например, пайку [3–7]. Во многих случаях пайка является единственным возможным способом соединения.

Дисперсионно-упрочняемые жаропрочные никелевые сплавы содержат большое количество легирующих элементов, соответственно, и припой для пайки, как правило, также являются сложнолегированными системами на никелевой основе. Они содержат компоненты, обеспечивающие необходимую жаропрочность, жаростойкость, сопротивление высокотемпературной коррозии и окислению и другие характеристики паяным сое-

динениям. Для снижения температуры плавления припои легируют элементами — депрессантами.

Анализ систем существующих жаропрочных никелевых припоев (Ni-Cr-Si, Ni-Cr-B, Ni-Cr-Si-B, Ni-Mn-Si, Ni-Mn-Cr-Si, Ni-Cr-Pd, Ni-Cr-Pd-Si и др.) показывает, что в качестве депрессантов они содержат бор, кремний, марганец, палладий, цирконий, гафний [5, 8, 9]. Так, в системе Ni-Cr-Si снижение температуры ликвидуса достигается за счет кремния, а в системе Ni-Cr-B на температуру ликвидуса существенно влияет бор. При использовании данных припоев в паяных швах образуются кроме твердого раствора хрупкие интерметаллиды и легкоплавкие эвтектические фазы, обогащенные бором и кремнием, что затрудняет получение высоких показателей жаропрочности [8–11]. Снизить количество этих фаз позволяет проведение длительной термической обработки, что усложняет технологический процесс получения неразъемных соединений.

Задачей данной работы является создание припойной композиции для пайки жаропрочных никелевых сплавов с приемлемым интервалом плавления, который позволяет уменьшить или избежать образование интерметаллидных фаз, легкоплавких эвтектик и получить химический состав паяного шва близкий к основному материалу.

Анализируя ряд диаграмм состояния никеля с элементами IV-V групп периодической системы, можно отметить, что в данном случае нельзя выделить определенную двойную базовую систему

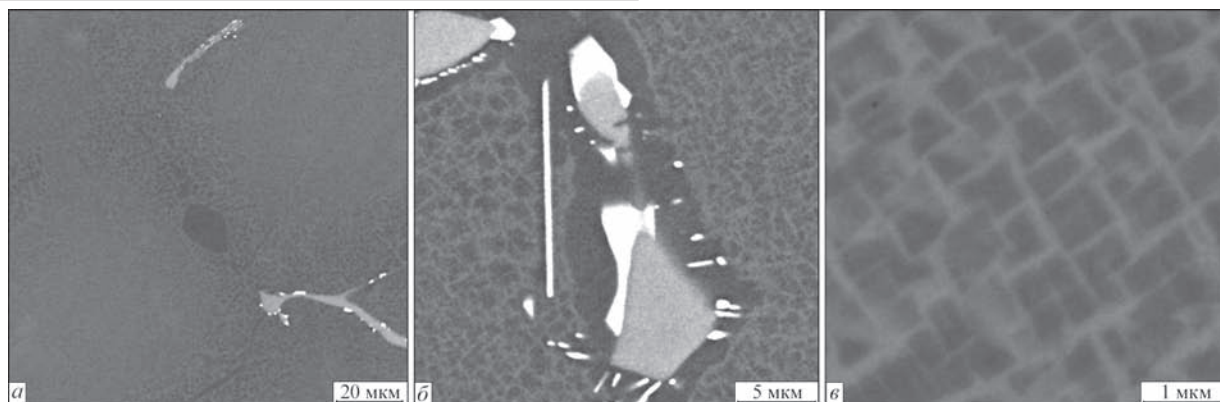


Рис. 1. Микроструктура сплава ЖС6У: *a* — общий вид; *b* — карбидные фазы; *c* —  $(\gamma'+\gamma)$ -структура

для создания припоя или из-за отсутствия высоконикелевой эвтектики с приемлемой температурой плавления (системы Ni-Ti, Ni-Nb), или ввиду крайне низкой растворимости элемента-депрессанта в никеле (системы Ni-Zr, Ni-Hf) [12].

Поставленную задачу можно решить путем применения комплексного многокомпонентного легирования, сочетая в качестве депрессантов такие элементы, как алюминий, цирконий, гафний. Для достижения высокой доли твердого раствора в паяном шве необходимо минимизировать содержание элементов, имеющих низкую растворимость в никеле.

В качестве основного металла использовали литые пластины высоколегированного жаропрочного никелевого литейного сплава ЖС6У (Ni-(8,0...9,5)Cr-(9,0...10,5)Co-(9,5...11,0)W-(5,1...6,0)Al-(2,0...2,9)Ti-(1,2...2,4)Mo-(0,8...1,2)Nb-1Fe-(0,13...0,02)C). Суммарное количество элементов (Al + Ti), определяющих высокую жаропрочность сплава, составляет 7,1...8,9 мас. %. Данный сплав относится к трудносвариваемым в связи с возникновением горячих трещин в зоне термического влияния и сварном шве при кристаллизации или последующей термической обработке [9, 13]. Сплав ЖС6У характеризуется крупнозернистой гетерофазной структурой, состоящей из  $\gamma$ -твердого раствора, упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, выделяющейся в объеме зерна, карбидных и боридных фаз (рис. 1, *a*, *b*). Количество частиц  $\gamma'$ -фазы в матрице сплава в исходном состоянии (до эксплуатации) составляет около 60 об. % и характеризуется кубической морфологией (рис. 1, *c*). Для проведения исследований многокомпонентные припои на основе никеля, содержащие хром, кобальт, вольфрам и другие элементы, плавил дуговым методом на холодной подложке в атмосфере аргона. Методом высокотемпературного дифференциального термического анализа (ДТА) определяли температуры ликвидуса и солидуса, а также промежуточных фазовых превращений опытных сплавов при нагреве с использованием термоанализатора ВДТА-8МЗ в ат-

мосфере высокочистого гелия при скорости нагрева 40 °C/мин.

С использованием полученных припоев пайку образцов (при температуре ликвидуса каждого припоя) из сплава ЖС6У проводили в вакуумной печи СГВ 2,4-2/15-ИЗ (разрежение рабочего пространства  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па). Скорость нагрева около 12 °C/мин, выдержка при температуре пайки составляла 5 мин.

Полученные паяные образцы разрезали перпендикулярно паяному шву и по стандартной методике изготавливали микрошлифы. Микроструктуру паяных соединений и химический состав отдельных фаз исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа TescanMira 3 LMU, оснащенного энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-max 80 mm<sup>2</sup> (программный пакет INCA). Распределение элементов и съемку микроструктур проводили в обратно-отраженных электронах (BSE), позволяющих исследовать микрошлифы без химического травления. Микрорентгеноспектральный метод обеспечивает высокую локальность исследований (до 1 мкм).

Для проведения испытаний на длительную прочность паяли стыковые плоские заготовки, которые подвергали термической обработке по режиму  $T = 1220^\circ \text{C}$ ,  $\tau = 4$  ч с целью гомогенизации структуры паяных швов. В дальнейшем из паяных заготовок вырезали специальные образцы длиной 80 мм для испытаний на длительную прочность при повышенной температуре. Ширина рабочей зоны в месте пайки составляла 5 мм при толщине образца 4,5 мм. Испытания проводили при температуре 975 °C и постоянном напряжении 140 МПа.

В результате проведенных исследований было выбрано два перспективных припоя на базе системы Ni-Co-Cr-Me (Al, Ti, Nb, Zr) с различным содержанием циркония (табл. 1).

Результаты высокотемпературного дифференциального термического анализа показали, что сплав №1, имеющий повышенную концентрацию циркония, характеризуется широким интервалом (130 °C) и минимальной температурой плав-

Таблица 1. Базовые системы и интервалы плавления припоев

Номер сплава	Базовая система легирования	Температура, °C	
		$T_S$	$T_L$
1	Ni-Co-Cr-Ti-Nb-Al-(Me)-2Zr	1101	1231
2	Ni-Co-Cr-Ti-Nb-Al-(Me)-1Zr	1141	1259

ления (рис. 2, а). Полученные тепловые эффекты на термической кривой свидетельствуют о наличии четырех фаз в исходном сплаве. Снижение концентрации циркония (в сплаве №2) приводит к уменьшению количества фаз в припое и повышению температуры солидуса и ликвидуса (рис. 2, б). Температурный интервал сужается до 118 °C.

Внешний осмотр паяных соединений из жаропрочного сплава ЖС6У показал, что при использовании припоя №1, содержащего 2 % циркония, наблюдается хорошее растекание и смачивание основного металла (рис. 3, а, б). Обеспечивается формирование полных галтельных участков, дефекты на образцах отсутствуют, что подтверждают результаты дальнейших металлографических исследований (рис. 4).

Локальным микрорентгеноспектральным анализом определено, что паяный шов характеризуется многофазной структурой. Матрица шва представлена зернами твердого раствора на основе никеля с переменной концентрацией составляющих элементов, что объясняется ликвационными процессами во время кристаллизации. По границам зерен твердого раствора наблюдаются отдельные единичные частицы светлой фазы на основе вольфрама (карбиды), фаза на основе никеля, обогащенная цирконием (21,78 %), пограничная эвтектическая  $\gamma'$ -фаза на основе никеля с повышенной концентрацией алюминия и фаза на основе никеля, обогащенная молибденом, ниобием и вольфрамом (рис. 5, а, б, табл. 2).

В соответствии с диаграммой состояния бинарной системы Ni-Zr можно предположить, что фаза, обогащенная цирконием, относится к интерметаллидному соединению  $Ni_5Zr$  [12]. В связи с тем, что никелевый припой многокомпонентный, то вероятнее всего в паяном шве образуется слож-

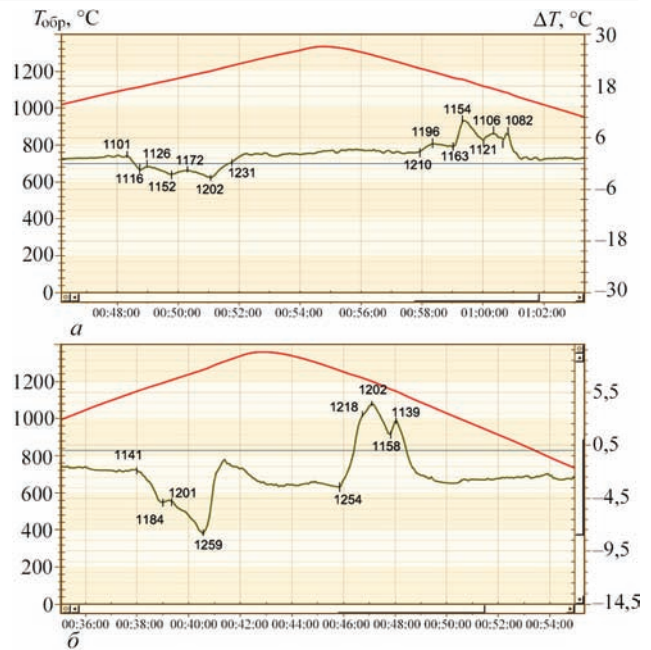


Рис. 2. Кривые дифференциального термического анализа припоев: №1 (а) и №2 (б)

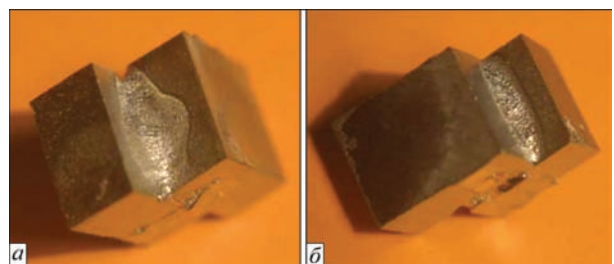


Рис. 3. Внешний вид нахлесточного соединения, паянного припоем №1: а — прямая галтель; б — обратная

ный интерметаллид  $Ni(Me)_xZr$ . Следует отметить, что объемная доля данной фазы незначительная.

Темные выделения фазы на основе никеля с повышенной концентрацией алюминия (12,44 %) соответствуют пограничной фазе  $Ni_3(Al, Ti, Zr, Nb)$ , в которой атомы алюминия замещаются  $\gamma'$ -образующими элементами. Исследование тонкой структуры паяного шва (с большим разрешением) показало наличие  $\gamma'$ -упрочняющей фазы в твердом растворе на основе никеля, которая ха-

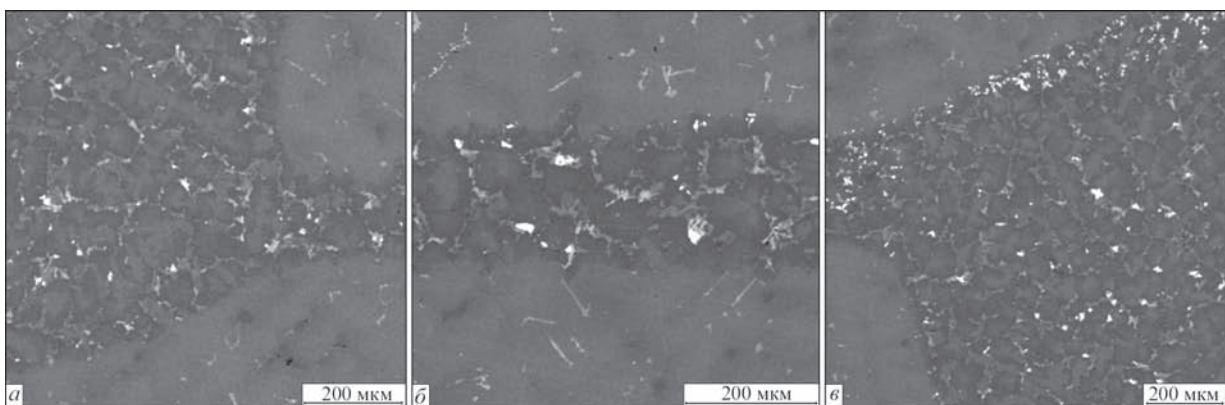


Рис. 4. Микроструктура прямой галтели (а); центральной зоны шва (б) и обратной галтели (в)

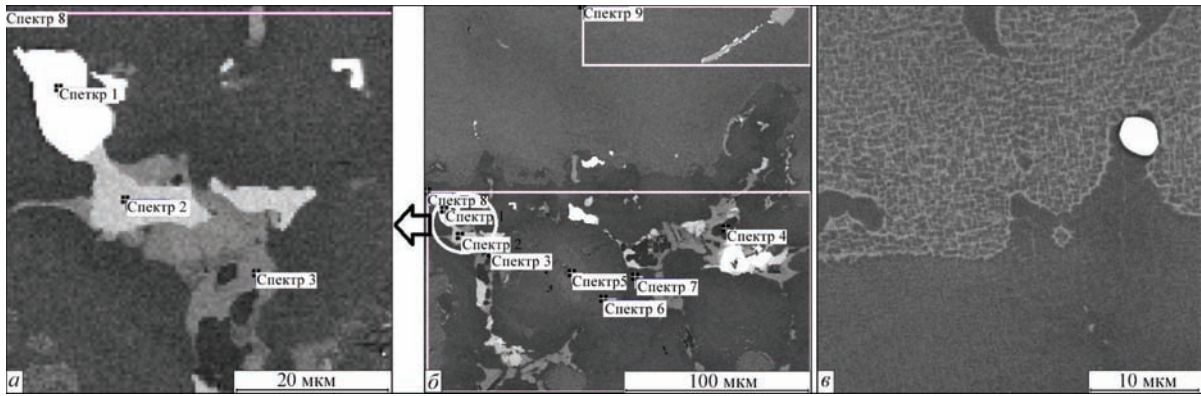


Рис. 5. Микроструктура исследуемых фаз (а, б) и зерна (γ+γ')-структуры в шве соединения сплава ЖС6У, припой №1

Т а б л и ц а 2. Концентрация элементов в паяном соединении при использовании припоя №1, мас. %

Номер спектра	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Zr	Nb	Mo	W
1	0,25	0,19	2,52	0,36	3,23	0,00	0,00	8,32	85,14
2	0,70	1,52	19,24	12,90	17,02	0,00	10,84	10,52	27,26
3	2,03	1,50	3,95	10,12	48,37	21,78	10,14	0,00	2,11
4	12,44	7,63	8,18	10,88	53,81	1,43	4,05	0,46	1,13
5	5,45	4,58	7,60	10,49	58,43	0,00	1,38	1,56	10,52
6	6,12	6,09	4,39	9,01	64,65	0,00	1,52	1,32	6,91
7	6,64	7,31	3,76	9,42	65,68	0,00	2,62	0,48	4,08
8	4,96	6,45	7,42	9,55	55,56	0,71	3,72	1,39	10,25
9	5,08	3,09	8,51	9,44	56,11	0,00	1,77	1,94	14,06

рактируется кубоидной морфологией и обеспечивает паяному шву жаропрочность (рис. 5, в).

В галтельном участке выявлены те же структурные составляющие, что и в паяном шве. Разница в том, что фаза, обогащенная вольфрамом, выделяется преимущественно вдоль межфазной границы припой — основной металл (рис. 4, а, в).

Снижение концентрации циркония до 1 % в припое №2 позволяет избежать образования циркониевого интерметаллида в паяном шве и галтельном участке. Наблюдается формирование плотного бездефектного паяного шва толщиной около 100 мкм и полных галтельных участков (рис. 6, а, б, в).

Структура паяного шва подобна структуре галтельного участка (рис. 6, б, в). Матрица паяного шва представлена твердым раствором на основе

никеля с переменной концентрацией составляющих элементов по зерну (табл. 3).

Наблюдаются также участки (γ+γ')-структуры в металле шва (рис. 6, з). Образование дисперсных карбидных фаз на основе вольфрама типично для обеих систем применяемых припоев. Повышенная температура пайки данным припоем способствует частичному растворению этих фаз в твердом растворе, что приводит к уменьшению их количества.

В междендритных областях паяного шва наблюдается темная фаза, представляющая собой пограничную фазу Ni<sub>3</sub>(Al, Ti, Zr, Nb), как и в предыдущем случае (рис. 6, д, спектр 3, табл. 3). Кроме того, образуется сложная фаза на основе системы Ni-Nb, обогащенная хромом, кобальтом, молибденом, вольфрамом (рис. 6, д, табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Содержание химических элементов в паяном шве соединения сплава ЖС6У, полученного с использованием припоя №2

Номер спектра	Al	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Nb	Mo	W
1	0,19	0,19	3,41	0,00	0,64	3,08	0,00	13,57	78,92
2	0,98	1,31	17,88	0,20	12,95	18,02	14,36	11,68	22,62
3	14,04	5,18	8,82	0,00	9,96	56,62	3,07	0,61	1,70
4	7,16	4,89	3,73	0,00	8,23	67,23	2,57	1,38	4,81
5	7,21	4,99	7,97	0,34	9,57	56,72	5,74	1,80	5,65
6	5,33	3,75	11,04	0,00	10,50	54,70	3,75	2,90	8,03
7	5,49	3,42	8,92	0,19	9,51	58,45	2,46	1,51	10,06
8	5,43	2,27	9,57	0,16	10,41	58,93	0,00	1,30	11,93

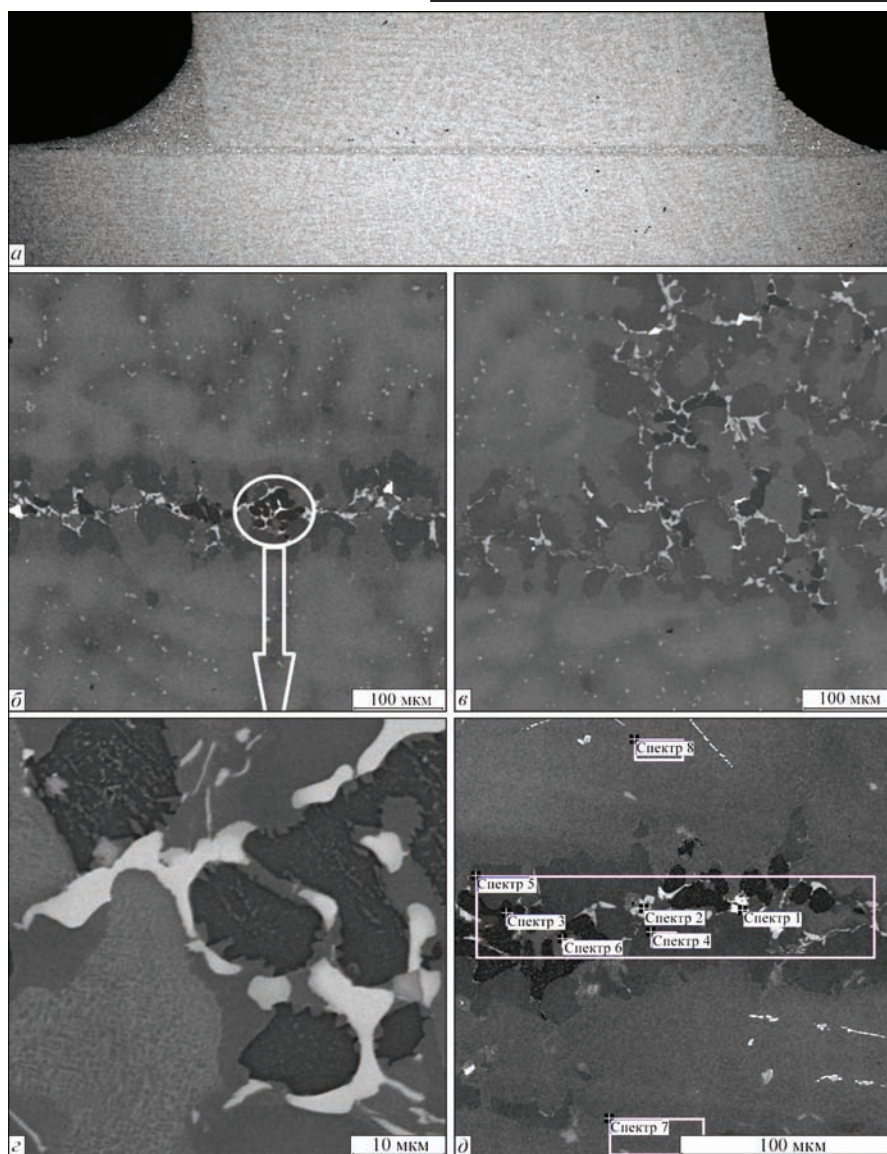


Рис. 6. Микроструктура паяного таврового соединения, полученного с использованием припоя № 2: *a* — общий вид; *б* — паяный шов; *в* — галтельный участок; *г* — фаза в междендритной области; *д* — исследуемые фазы в паяном шве

Полученные результаты микрорентгеноспектральных исследований показали, что при использовании припоя №2 паяные швы содержат минимальное количество карбидных фаз, что положительно отразилось на результатах механических испытаний.

Стыковые паяные образцы (рис. 7), полученные с использованием припоя №1, отличались



Рис. 7. Внешний вид плоских стыковых образцов для испытаний на длительную прочность

минимальными значениями длительной прочности и разрушались после 18...19 ч при температуре испытаний  $T = 975^{\circ}\text{C}$  и напряжении 140 МПа

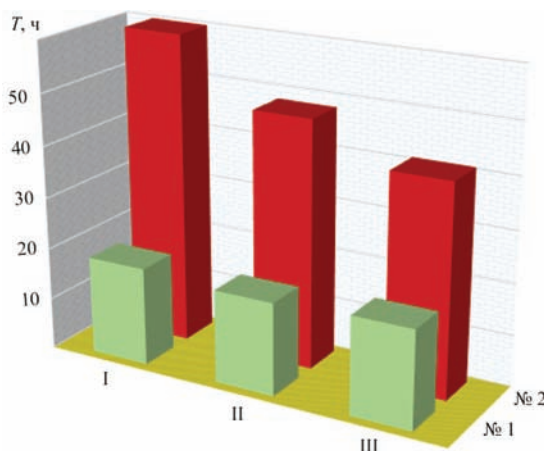


Рис. 8. Результаты испытаний на длительную прочность паяных соединений, полученных с использованием припоев №1 и №2 (I–III — исследуемые образцы)

(рис. 8). Образцы, полученные с применением припоя №2, показали более высокие результаты: они сохраняли конструктивную целостность и не разрушились после 41...60 ч испытаний (рис. 8). Судя по полученным результатам структурных исследований и механических испытаний, наблюдается корреляция между микроструктурой швов и уровнем длительной прочности паяных соединений.

### Выводы

Проведенные микрорентгеноспектральные исследования паяных соединений сплава ЖС6У, полученных высокотемпературной пайкой в вакууме с применением многокомпонентных никелевых припоев, не содержащих бор и кремний, показали формирование качественных бездефектных швов с преобладанием значительной объемной доли твердого раствора на основе никеля в паяном шве.

Установлено, что снижение концентрации циркония в никелевом припое (до 1 %) позволяет существенно повысить длительную прочность паяных соединений при повышенной температуре. Так, при температуре испытаний 975 °С и напряжении 140 МПа образцы сохраняли конструктивную целостность и не разрушились после 41, 48, 60 ч испытаний.

Таким образом, применение припоя с минимальным количеством циркония обеспечило увеличение длительности испытаний в 2...3 раза без разрушения паяных соединений.

### Список литературы

1. Патон Б. Е., Строганов Г. Б., Кишкин С. Т. и др. (1967) *Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления*. Киев: Наукова думка.
2. Каблов Е. Н. (ред.) (2006) Эффект С. Т. Кишкина. *Науч.-техн. сб. «Литейные жаропрочные сплавы»*. Москва, Наука.
3. Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Иванченко В. Г. (2004) Разработка припоев для пайки жаропрочных сплавов на основе никеля и титана. *Автоматическая сварка*, **9**, 27–32.
4. Ермолаев Г. В., Квасницкий В. В., Квасницкий В. Ф. та ін. (2015) *Паяння матеріалів*. Миколаїв, НУК.
5. Максимова С. В. (2007) Аморфные припои для пайки нержавеющей сталей и титана и структура паяных соединений. *Адгезия расплавов и пайка материалов*. **40**, 70–81.
6. Khorunov V. F., Maksymova S. V. (2013) *Advanced in brazing. Science, technology and applications*. UK: Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
7. V. Khorunov, S. Maksymova, S. Samokhin, V. Ivanchenko (2001) Brazing filler metal containing Zr and Hf as depressants. *Proc. of the Third intern. conf. «High temperature capillarity» (HTC-2000), Kurashiki, Japan 2000. Osaka*.
8. Rabinkin A. (2013) *Advances in brazing Science, technology and applications*. UK: Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
9. Малащенко И. С., Куренкова В. В., Белявин А. Ф., Трохимченко В. В. (2006) Кратковременная прочность и микроструктура паяных соединений сплава ВЖЛ12У, полученных с использованием борсодержащего припоя с

присадкой кремния. *Современная электрометаллургия*, **4**, 26–42.

10. Arafina M. A., Medraja M., Turner D. P., Bocher P. (2007) Transient liquid phase bonding of Inconel 718 and Inconel 625 with BNi-2: Modeling and experimental investigations. *Materials Science and Engineering. A*, **447**, 1–2, 125–133.
11. Chaturvedi M. C., Ojo O. A., Richards N. L. (2004) Diffusion brazing of cast Inconel 738 superalloy. *Advances in Technol.: Materials & Materials Proc.*, **2**, **6**, 206–213.
12. Massalski T. B. (1990) *Binary Alloy Phase Diagrams*, American Society for metals. (Ohio: Metals Park: ASM International: CD).
13. Курочко Р. С. (1982) Сварка и пайка жаропрочных материалов горячего тракта ГТД. *Авиационная промышленность*, **8**.

### References

1. Paton, B.E., Stroganov, G.B., Kishkin, S.T. et al (1967) *Heat-resistance of casting nickel alloys and their protection from oxidation*. Kiev, Naukova Dumka.
2. (2006) S.T. Kishkin effect. Ed. by E.N. Kablov. In: *Casting heat-resistant alloys*: Transact. Moscow, Nauka.
3. Khorunov, V.F., Maksymova, S.V., Ivanchenko, V.G (2004) Development of filler metals for brazing heat-resistant nickel- and titanium-base alloys. *The Paton Welding J.*, **9**, 26-31.
4. Ermolaev, G.V., Kvasnitsky, V.V., Kvasnitsky V.F. et al. (2015) *Soldering of materials*. Mykolaiv, NUS.
5. Maksymova, S.V. (2007) Amorphous filler metals for brazing of stainless steels and titanium and structure of brazed joints. *Adgeziya Rasplavov i Pajka Materialov*, **40**, 70-81.
6. Khorunov, V.F., Maksymova, S.V. (2013) *Advanced in brazing. Science, technology and application*. UK: Cambridge, Woodhead Publ. Ltd.
7. Khorunov, V., Maksymova, S., Samokhin, S. et al. (2001) Brazing filler metal containing Zr and Hf as depressants. In: *Proc. of 3rd Int. Conf. on High Temperature Capillarity HTC-2000 (Kurashiki, Japan 2000)*. Osaka.
8. Rabinkin, A. (2013) *Advances in brazing science, technology and applications*. UK, Cambridge, Woodhead Publ. Ltd.
9. Malashenko, I.S., Kurenkova, V.V., Belyavin, A.F. et al. (2006) Short-term strength and microstructure of brazed joints of alloy VJL12U produced using boron-containing brazing alloy with addition of silicon. *Advances in Electrometallurgy*, **4**, 23-38.
10. Arafina, M.A., Medraja, M., Turner, D. (2007) Transient liquid phase bonding of Inconel 718 and Inconel 625 with BNi-2: Modeling and experimental investigations. *Mater. Sci. & Engin. A.*, **447(1-2)**, 125-133.
11. Chaturvedi, M.C., Ojo, O.A., Richards, N.L. (2004) Diffusion brazing of cast Inconel 738 superalloy. *Advances in Technol.: Materials & Materials Proc.*, **2(6)**, 206-213.
12. Massalski, T.B. (1990) *Binary alloy phase diagrams*. American Society for Metals. Metals Park, ASM International: CD).
13. Kurochko, R.S. (1982) Welding and brazing of heat-resistant materials of GTE hot section. *Aviats. Promyshlennost*, **8**.

С. В. Максимова, В. В. Воронов, П. В. Ковальчук

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.

03680, м.Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@kiev.paton.ua

### ПРИПІЙ БЕЗ БОРУ І КРЕМНІЮ ДЛЯ ПАЙКИ ЖАРОМЦЬ-НОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ

Використання нікелевих припоїв, що містять в якості депресантів бор і кремній, забезпечує необхідне змочування матеріалу, що паяється, дозволяє істотно знизити температуру паяння, але призводить до утворення крихких фаз і легкоплавких евтектик в паяних швах. У даній роботі показана мож-

BRAZING ALLOY WITHOUT BORON AND SILICON  
FOR BRAZING OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS

лівість формування паяних з'єднань ливарного жароміцного нікелевого сплаву ЖС6У паянням у вакуумі із застосуванням багатокомпонентних нікелевих припоїв, що не містять в якості депресантів бор і кремній. Методом високотемпературного диференціального термічного аналізу в атмосфері високочистого гелію визначені температури ліквідусу і солідусу припоїв. Наведено результати металографічних і мікрорентгеноспектральних досліджень по вивченню особливостей структуроутворення паяних швів. Оцінена тривала міцність паяних з'єднань. Показано, що нікелеві припої, які містять велику концентрацію цирконію, характеризуються більш низькою температурою плавлення, проте, в паяних швах утворюються виділення фази  $Ni(Me)_xZr$ . Визначено, що зниження концентрації цирконію в нікелевому припої дозволяє уникнути утворення інтерметалічної фази, збагаченої цирконієм, і отримати в якості переважної фази в шві твердий розчин на основі нікелю. Результати випробувань плоских паяних (стикових) зразків на тривалу міцність, проведених при підвищеній температурі  $975\text{ }^\circ\text{C}$  і напрузі 140 МПа, показали, що з'єднання зберігають цілісність і не руйнуються після 41...60 год випробувань. Показано, що цирконій може виступати в якості альтернативного депресанта (замість спільного введення бору і цирконію). Бібліогр. 13, табл. 3, рис. 8.

*Ключові слова:* вакуумна високотемпературна пайка, жароміцний нікелевий ливарний сплав, температура ліквідусу, солідус, мікроструктура, багатокомпонентний припій, паяні з'єднання, тривала міцність

S. V. Maksymova, V. V. Voronov, P. V. Kovalchuk

E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich str., 03680, Kiev-150, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

The use of nickel brazing alloys, containing boron and silicon as depressants, provides a good wetting of material brazed, allows a significant reduction in brazing temperature, but leads to formation of brittle phases and low-melting eutectics in the brazed welds. This work shows the possibility of forming brazed joints of cast heat-resistant nickel alloy ZhS6U applying brazing in vacuum with use of multicomponent nickel brazing alloys which do not contain boron and silicon as depressants. Applying the method of high-temperature differential thermal analysis in atmosphere of high-purity helium, the temperatures of liquidus and solidus of brazing alloys were determined. The results of metallographic and micro-X-ray spectral examinations on studying the features of structure formation of brazed welds are presented. The long-term strength of the brazed joints was evaluated. It is shown that nickel brazing alloys, containing a large concentration of zirconium, are characterized by a lower melting point, however, in the brazed welds the precipitations of the phase  $Ni(Me)_xZr$  are formed. It was determined that decrease in the concentration of zirconium in the nickel brazing alloy allows avoiding the formation of intermetallic phase enriched in zirconium and obtaining a solid nickel-based solution as the predominant phase in the weld. The results of tests of flat brazed (butt) specimens on long-term strength, carried out at the elevated temperature of  $975\text{ }^\circ\text{C}$  and the stress of 140 MPa, showed that the joints preserve integrity and do not fracture after 41...60 hours of testing. It is shown that zirconium can act as an alternative depressant (instead of mutual adding of boron and zirconium). 13 Ref., 3 Tables, 8 Figures.

*Keywords:* vacuum high-temperature brazing, heat-resistant nickel cast alloy, liquidus temperature, solidus, microstructure, multicomponent brazing alloy, brazed joint, long-term strength.

Поступила в редакцію 20.04.2017

**СУПЕРБОЛЬШИЕ ПРОФИЛИРОВАННЫЕ МОНОКРИСТАЛЛЫ  
ВОЛЬФРАМА И МОЛИБДЕНА**



ИЭС выращивает и поставяет монокристаллы вольфрама и молибдена в виде пластин размером 20x160x170 мм. Кристаллографическую ориентацию определяет заказчик. Размеры кристалла могут быть увеличены до 20x250x300 мм.

E-mail: office@paton.kiev.ua