

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ni_3Al С ПРОСЛОЙКАМИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ ДЛЯ TLP-СОЕДИНЕНИЯ

В.В. Квасницкий¹, Г.Ф. Мьяльница², М.В. Матвиенко³, Е.А. Бутурля⁴, Dong Chunlin⁵

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

²ГП «Научно-производственный комплекс газотурбостроения «Зоря»-«Машпроект». 54018, г. Николаев, просп. Октябрьский, 42а

³Херсонский филиал Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова. 73022, г. Херсон, просп. Ушакова, 44

⁴Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова. 54025, г. Николаев, просп. Героев Украины, 9.

⁵Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding), Guangzhou, 510650, China

Сварка плавлением литейных жаропрочных никелевых сплавов с высоким содержанием упрочняющих дисперсных фаз является проблематичной. Еще более острой является проблема сварки материалов на основе интерметаллидов. Поэтому для соединения таких материалов наиболее широко применяют различные способы пайки. За границей наиболее часто используют термин TLP-соединение (Transient Liquid Phase Bonding). Учитывая, что припои имеют более низкую температуру плавления, чем основной металл, для повышения рабочей температуры TLP-соединений в процессе их формирования концентрация элементов депрессантов (снижающие температуру плавления припоя) в шве должна сводиться к минимуму. Депрессанты жаропрочных припоев разделяют на несколько групп. В работе исследовали взаимодействие сплава на основе Ni_3Al с припоями, содержащими кремний, бор, цирконий и гафний. По результатам исследований разработан припой SBM-3 системы Ni-Cr-Co-Al-Ti-Ta-Re-W-Mo-Hf-B. Библиогр. 19, рис. 7.

Ключевые слова: пайка, никелевые сплавы, упрочняющая фаза, депрессанты, разработка припоя, температура плавления

Эффективность газовых турбин существенно зависит от температуры рабочего газа. Поэтому для изготовления направляющих и рабочих лопаток разрабатываются материалы с более высокой жаропрочностью. Такими являются новые сплавы на основе интерметаллидов, в частности, на основе интерметаллида Ni_3Al . Перспективными способами их соединения являются сварка в твердом состоянии, например, сварка трением, диффузионная сварка в вакууме с расплавляющимися или нерасплавляющимися прослойками или пайка [1, 2]. Пайка является более универсальным способом соединения, но ее главной проблемой является обеспечение прочностных свойств паяных соединений, близких к свойствам основного металла. Хорошие результаты обеспечивает технология TLP-соединения.

Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al является конструкционным материалом газовых турбин нового поколения [3, 4]. Фаза Ni_3Al имеет гранцентрированную кубическую решетку, в которой ограниченно растворимы хром, молибден и вольфрам, причем растворимость элементов в этом ряду уменьшается. Металлы титан, тантал и ниобий растворяются в γ' -фазе, замещая алюминий и упрочняя

ее. Высокую растворимость в никеле имеет кобальт, замещая никель в γ -твердом растворе. Упорядоченная структура γ' -фазы обеспечивает ее высокую стабильность и работу сплава до 1200 °С. Интерметаллид, легированный небольшими количествами тантала и хрома, имеет высокую стойкость в окислительной среде при температурах до 1100...1200 °С.

При соединении различных конструкций на основе интерметаллида Ni_3Al , работающих при высоких температурах и повышающих эффективность газовых турбин, необходимы технологии соединения деталей как в однородном, так и в разнородном сочетаниях с другими жаропрочными сплавами. Решение такой проблемы является безусловно актуальным.

Постановка проблемы. Авиационное материаловедение успешно развивается и интерметаллидные материалы на основе Ni_3Al известны с конца прошлого века [5, 6]. Исследования способов их соединения начали активно проводиться только в последнее время, причем впервые в работах рассматривалась возможность применения существующих припоев для пайки жаропрочных никелевых сплавов. Эти припои можно разделить на три группы [2]:

1) легированные припои на основе никеля с использованием в качестве депрессантов кремния и бора, которые в большинстве случаев вводятся совместно для снижения температуры пайки и концентрации каждого из них;

2) припои на основе легированного никеля с применением в качестве депрессантов элементов IV и V групп таблицы Периодической системы химических элементов;

3) припои системы Ni–Pd.

Наиболее широко в Украине и за рубежом известны припои первой группы, например, ВПр11, ВПр11-40Н, ВNi1, ВNi2, ВNi5, ВПр42, НС12, НС12А, СТЕМЕТ 1301, СТЕМЕТ 1311. Сложнолегированными припоями, содержащими кремний и бор, являются ВПр24, ВПр27 и другие.

В работах [7–9] исследованы сложнолегированные припои ВПр36, ВПр37 и ВПр44 для пайки высокожаропрочных никелевых сплавов ЖС32, ЖС36 и сплава ЭП975 со сплавом ВКНА-4У на основе интерметаллида Ni₃Al. Полученные результаты описаны мало, но приведенные системы припоев показывают возможность повышения жаропрочности паяных соединений сплавов на основе интерметаллида Ni₃Al.

Цель работы — исследование взаимодействия сплава на основе интерметаллида Ni₃Al с припоями различных систем и повышение прочности соединений, полученных по TLP-Bonding технологии, до уровня 70...80 % прочности основного металла.

Материалы и методика исследований. Для проведения исследований выплавлен экспериментальный высоколегированный сплав на основе интерметаллида Ni₃Al со следующим содержанием основных элементов (мас. %): 0,085 С; 6,6 Cr; 11,63 Со; 4,67 W; 1,49 Мо; 5,61 Si; 7,44 Та; 1,6 Нf; 2,0 Ti; Ni — остальное. Микроструктура сплава показана на рис. 1. В исходном термообработанном со-

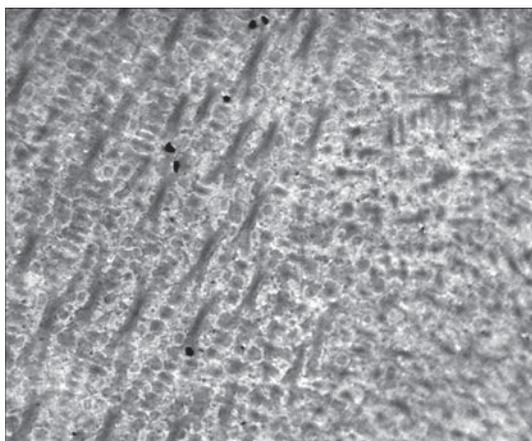


Рис. 1. Микроструктура (×45) выплавленного сплава на основе Ni₃Al (увел. в 1,5 раза)

стоянии сплаву присуща однородная структура $\gamma + \gamma'$ с высокой долей γ' -фазы (68...72 об. %).

Размеры и форма образцов для проведения исследований и механических испытаний, определялись согласно принятым стандартным методикам (ISO 783–89) и данным, приведенным в работе [10].

Основу исследованных припоев составлял никель, легированный теми же элементами, что и основной материал системы Ni–Co–Cr–Al–Ti–Ta–W–Mo. Для этого использовали имеющиеся компьютерные программы расчета содержания фаз и критических температур. Для снижения температуры плавления в сплав вводили в качестве депрессанта бор и кремний вместе или раздельно и аналогично цирконий и гафний.

Качество смачивания жаропрочного сплава оценивали по краевому углу смачивания при различных температурах. Растекание припоя определяли по удельной площади растекания. После этого образцы разрезали по центру капли припоя и по фотографии макрошлифа определяли краевой угол смачивания.

Для исследования затекания припоя в зазор использовали клиновидные образцы размером 20×12×3 мм нижний и 20×6×3 мм верхний, которые выставляли один на другой по длине с нулевым зазором с одной стороны и зазором 0,3 или 0,6 мм с другой.

Формирование соединений стыковых швов исследовали на цилиндрических образцах диаметром 13 мм и длиной 35 мм.

Структурные исследования проводили с помощью оптической металлографии, растровой электронной микроскопии. Химический состав определяли локальным рентгеноспектральным микроанализом по отдельным точкам и по площади. Структуру жаропрочных сплавов выявляли при химическом травлении в растворе, состоящем из 10 г хлорного железа, 30 мл соляной кислоты и 120 мл спирта, или реактиве Марбле: 100 мл HCl, 20 г CuSO₄, 100 мл H₂O с добавлением H₂SO₄ (0...20 мл). Для дифференциации карбидов и σ -фазы применяли реактив Мураками: 10 г красной кровяной соли, 10 г едкого калия или 7 г едкого натрия.

Дифференциальный термический анализ проводили на термоанализаторе ВДТА-8М с одновременным измерением температуры исследуемого образца и эталона при нагреве и охлаждении в печи электросопротивления. Скорость нагрева и охлаждения автоматически поддерживалась постоянной.

Исследования по определению температур плавления и кристаллизации проводили в атмос-

фере высокочистого гелия. Скорость нагрева и охлаждения составляла 0,8 °С/с. Образцы массой 1 г помещались в тигли из оксида иттрия Y_2O_3 . Температуры фазовых превращений определяли с использованием градуировочной кривой, построенной по точкам плавления Al, Cu, Fe и Pt. Кривые охлаждения использовали для качественного контроля количества фазовых переходов и для определения температур начала кристаллизации. Погрешность результатов составляла ± 7 °С.

Определение механических характеристик проводили при статических кратковременных и длительных испытаниях на растяжение цилиндрических образцов.

На первом этапе, применительно к выплавленному сплаву на основе Ni_3Al , по результатам анализа источников [7–9] для исследований и корректировки состава выбран припой ВПр36. Корректировка состава припоя ВПр36 с целью снижения температуры пайки проводилась также авторами работ [11, 12], которые для этого в припой вводили кремний, используя припой НС12, содержащий 12 % Si. Для сплава на основе Ni_3Al нужна более высокая температура плавления припоя, а для повышения жаропрочности соединений содержание кремния в основном металле жестко ограничено. Поэтому в наших исследованиях кремний не использовался. Кроме того, в припое необходимо было использовать легирование по аналогии с жаропрочными сплавами нового поколения, что учтено в данной работе.

При выборе депрессантов учитывали исследования, изложенные в работе [13], в которой была установлена перспективность применения в припоях в качестве депрессантов циркония и гафния.

Поэтому на втором этапе исследований в припоях для пайки интерметаллидного сплава использовали в качестве депрессантов цирконий и гафний. Эти элементы образуют между собой неограниченные растворы и замещают один другого в интерметаллидах никеля в любых соотношениях. Температура пайки припоями с гафнием составляла 1225...1230 °С, а припоями с цирконием 1200...1210 °С.

Растекание припоя с цирконием по интерметаллидному сплаву показано на рис. 2, из которого видно, что площадь растекания припоя состоит из центральной зоны припоя в точках 1 и 2, периферийной зоны в точке 3 и ореола капли в точке 4. Химический состав металла в этих зонах существенно отличается. В центральной зоне состав изменяется по высоте капли, но содержит элементы основы припоя. Дальше в периферийной зоне и в ореоле капли растет концентрация циркония и появляется эвтектический слой, который повто-

ряет микронеровности поверхности и обволакивает отдельные частицы припоя. При введении 2,5 % Zr на отдельных участках поверхности его концентрация возрастает до 11...12 мас. %. При введении в припой 5,0 % Zr на отдельных участках концентрация циркония достигает 21 %, резко увеличиваются концентрации ниобия (до 30 %) и вольфрама (до 14 %), снижается концентрация никеля (21..25 %), алюминия и титана, что свидетельствует о формировании интерметаллидов.

Аналогом циркония является гафний, который, в отличие от циркония, имеет низкую диффузионную подвижность атомов. Оба элемента имеют низкую растворимость в никеле и аналогичные диаграммы состояния с никелем. Низкая растворимость гафния и циркония в никеле с образованием эвтектики расширяют температурный интервал плавления и кристаллизации припоев, что плохо для сплавов на основе Ni_3Al , предназначенных для работы при температурах до 1200 °С. Припой с цирконием и гафнием имеют хорошее смачивание сплава на основе Ni_3Al , при вакууме 10^{-3} Па, а также неравномерное распределение в паяном шве. Краевые углы смачивания в зависи-

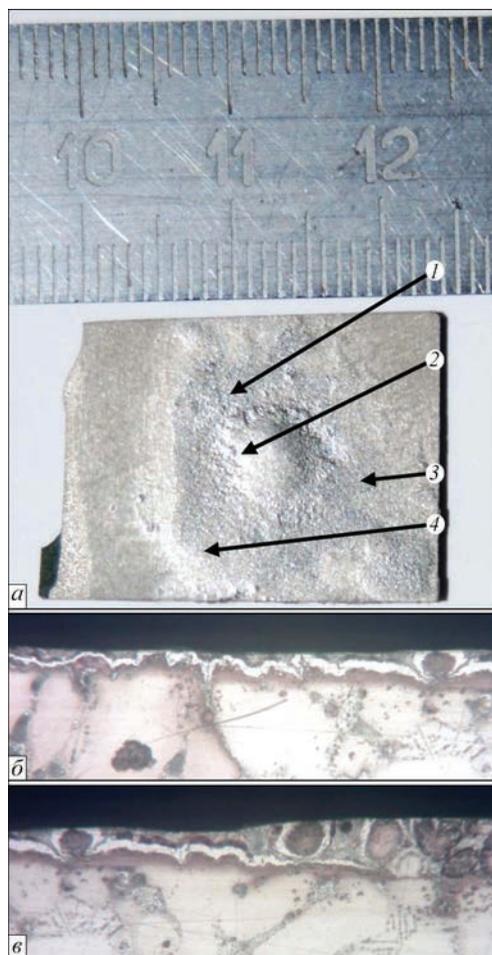


Рис. 2. Общий вид растекшейся капли (а) и микроструктура приповерхностного слоя сплава в ореоле капли (б) и ближе к ее центру (в) припоя с цирконием (описание 1–4 см. в тексте)

мости от состава припоя и температуры изменяются в пределах от 13 до 5 градусов. Учитывая высокое сродство циркония и гафния к кислороду при пайке необходимо жестко контролировать давление в рабочей вакуумной камере (не более $3 \cdot 10^{-3}$ Па) и величину натекания, не более $3 \cdot 10^{-5}$ Па·м²·с⁻¹.

Припой с цирконием использовали также для пайки сплава ЖС6У в работе [14]. Исследовали два припоя системы Ni–Co–Cr–Ti–Nb–Al–(Me)–Zr, содержащие 1 и 2 % Zr. Их температуры солидуса 1101 и ликвидуса 1231 °С с 2 % Zr и соответственно 1141 и 1259 °С с 1 % Zr. Рекомендован для применения припой с 1 % Zr. По температуре пайки припой не подходит для пайки сплава на основе Ni₃Al. Припой с цирконием и гафнием хорошо изучены в работах [15–18] применительно к жаропрочным никелевым сплавам с температурой пайки до 1210 °С. Повышение температуры пайки может привести к деградации структуры основного металла.

На третьем этапе исследовали припой с применением в качестве депрессанта бора. Эти припои наиболее изучены и распространены в промышленности. При разработке припоя решались две задачи: выбор основы припоя и определение необходимой концентрации бора для обеспечения необходимых температуры ликвидуса и солидуса. Припои с бором традиционно имеют высокую технологичность.

При выборе основы припоя использовали общие положения разработки жаропрочных сплавов, исходя из влияния каждого из легирующих элементов, в том числе сплавов нового поколения, на механические свойства, образование упрочняющих фаз, а также хрупких фаз, жаростойкость, температур ликвидуса, солидуса, сольвуса, температуры выделения и количество фаз, их состава и другие. Одновременно рассматривали авиационные материалы, в частности, интерметаллид Ni₃Al, и сплавы для морских газовых турбин, работающие при более низких температурах, но в условиях высокотемпературной солевой коррозии (ВСК). Условия работы морских турбин существенно влияют на содержание хрома в сплавах, снижая их жаропрочность.

Найденные пути повышения жаропрочности и стойкости против ВСК позволили создать сплавы для морских турбин нового поколения с повышением их рабочей температуры на 50...60 °С [19]. Соответственно необходимо повышать и жаропрочность соединений, а также температуру пайки. Для этого необходимо создать новые припои, используя те же принципы легирования, которые использованы при создании сплавов.

Многие другие проблемы являются общими для авиационного и судового газотурбостроения, что позволяет использовать одинаковые расчетные методы и компьютерные программы. При выборе основы припоев использовались также расчёты, но при одинаковых системах основы припоев концентрации ряда элементов в них существенно отличаются. Например, стойкость сплавов против образования σ-фазы зависит от группы элементов, в том числе от хрома. Поэтому при высоком содержании хрома, концентрации других элементов, упрочняющих твёрдый раствор, необходимо уменьшать при одном и том же числе электронных вакансий, для чего легировался сплав элементами, являющимися наиболее эффективными упрочнителями. Такое легирование используют в жаропрочных сплавах нового поколения.

Для расчета второй задачи (выбора концентрации бора) необходимо иметь регрессионное уравнение влияния бора на температуру ликвидуса и солидуса основы припоя. Статистических данных для этого пока мало. Поэтому задачу решали экспериментально. Было выплавлено несколько сплавов (основы припоя), к которым добавляли бор при трех различных концентрациях. Полученные образцы подвергали ВДТА, исследованиям на смачивание и растекание припоя. На рис. 3, а приведена термограмма одного из выплавленных сплавов (основы припоя), а на рис. 3, б — результаты ВДТА после добавления бора.

Растекание одного из припоев по сплаву на основе Ni₃Al показано на рис. 4.

В зависимости от основы припоя и концентрации бора краевые углы смачивания и удельные площади растекания изменяются. Главную роль играет температура пайки. Все выплавленные припои хорошо смачивают сплав, но температурный интервал применения припоя определяли по краевому углу смачивания не более 10°.

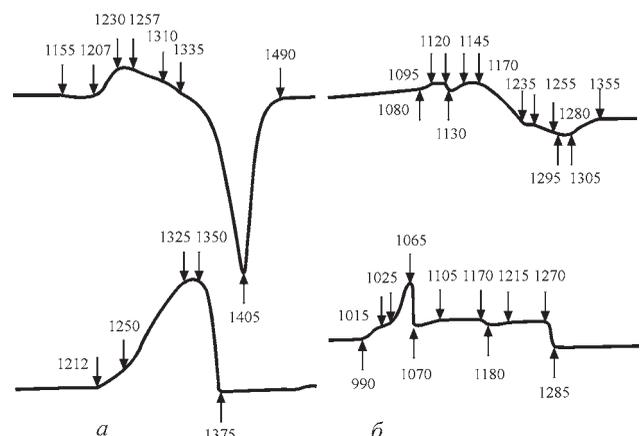


Рис. 3. Кривые ВДТА для основы припоя (а) и после введения бора (б)

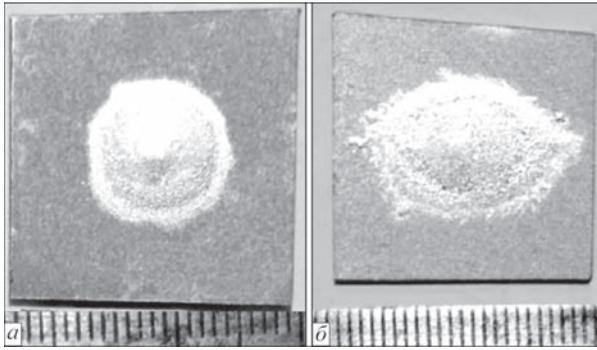


Рис. 4. Растекание навески 100 мг порошка припоя SBM-3 по сплаву Ni_3Al при температурах 1250 (а) и 1265 °С (б)

Оптимальным является угол 3...5°. Удельная площадь растекания при температуре исследований 1250...1265 °С составила 1,7...2,0 мм²/мг.

Формирование паяного соединения оценивали по структуре шва, его химическому составу (по площади и пофазно), а также по величине максимальных и минимальных зазоров, которые заполняются без дефектов при температуре пайки. Наиболее точно это можно определить при пайке клиновидных образцов с изменением зазора от нуля до 0,6 мм. На таких образцах определяли также глубину растворения основного металла. Независимо от химического состава припоя с повышением температуры пайки глубина растворения основного металла увеличивается и тем больше, чем шире зазор и выше концентрация бора. Изменение концентрации бора изменяет также количество и состав фаз: γ , γ' , M_xC_y , M_3B . При анализе по площадям состав сплава изменяется мало. Совместная объемная доля карбидной и боридной фаз возрастает уже при увеличении концентрации бора от 1,0 до 1,2 мас. %, а содержание хрома, молибдена и вольфрама уменьшается почти вдвое.

Микроструктура металла шва, паяного припоём, содержащим 2,5 % Re, показана на рис. 5.

По результатам анализа структуры и химического состава выплавленных образцов разработан припой SBM-3, микроструктура соединения которого показана на рис. 6.

Анализируя результаты исследований фаз и химического состава соединения сплава на осно-



Рис. 6. Микроструктура (×250) соединения сплава на основе интерметаллида Ni_3Al при пайке с постоянным зазором 0,08 мм припоём SBM-3

ве Ni_3Al , полученных методом TLP-соединения с припоём SBM-3, следует отметить, что матрица припоя имеет состав, близкий к составу основного металла, плюс отдельные элементы, которых нет в основном металле, но они введены в припой. Структурное строение металла шва и основного металла близки. Структура соединения не имеет сплошных эвтектических прослоек, карбидных, боридных или карбоборидных выделений.

Паяные соединения проходят термическую обработку, включающую высокотемпературную гомогенизацию и ступенчатое охлаждение. Режим термической обработки сплава включает нагрев до 1180 °С с выдержкой 2 ч → нагрев до 1265 °С с выдержкой 2 ч и охлаждение на воздухе, нагрев до 1050 °С с выдержкой 4 ч и охлаждение на воздухе. После термической обработки боридная эвтектика отсутствует за счет образования высокодисперсных боридов и карбоборидов, для которых характерно наличие активных образователей карбидов и боридов, которые четко определяются на спектрах при локальном рентгено-спектральном анализе. Во всех таких включениях низкое содержание алюминия.

Механические испытания соединений проведены при температурах эксплуатации с определением кратковременной и длительной прочности на базе 50 и 100 ч испытаний. Испытание на кратковременную прочность поликристаллическо-

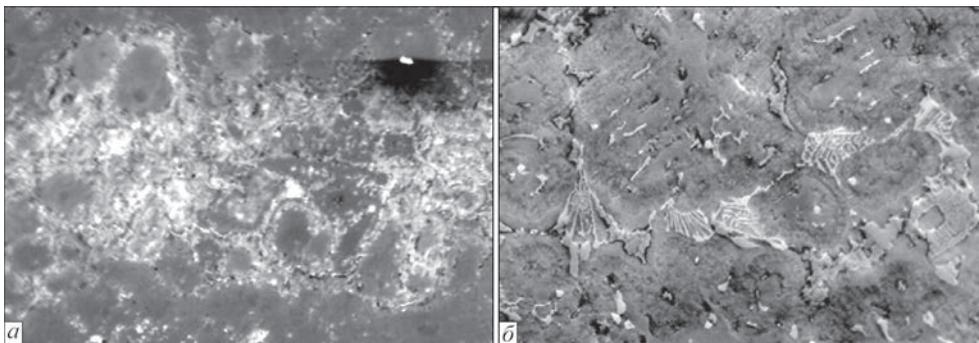


Рис. 5. Микроструктура металла шва при пайке клиновидного образца с зазором 361 (а) и 297 мкм (б)

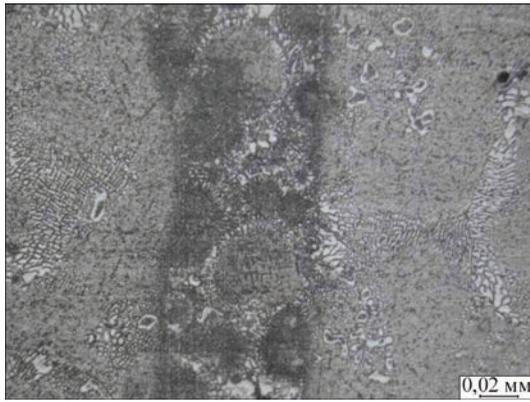


Рис. 7. Микроструктура соединения сплава на основе Ni₃Al с припоем SBM-3

го основного металла при 900 °С показали среднее значение: $\sigma_B = 830$ МПа, $\sigma_{0,2} = 720$ МПа; при 1000 °С — $\sigma_B = 530$ МПа и $\sigma_{0,2} = 460$ МПа. Прочность соединений находилась на этом же уровне. Разрушение образца происходило по основному металлу. Микроструктура соединения в зоне стыка показана на рис. 7.

Длительная прочность соединений сплава на основе Ni₃Al при температуре 900 °С на базе испытаний 100 ч составила $\sigma_{100}^{900} = 280$ МПа, что составляет 81,9 % прочности основного металла, на базе 50 ч $\sigma_{50}^{900} = 320$ МПа, что составляет 85,6 % прочности основного металла.

На базе выполненных исследований разработаны также припой SBM-3М для пайки жаропрочных никелевых сплавов морских газовых турбин, существенным отличием которого от припоя SBM-3 является более высокое содержание хрома. Оба припоя разработаны на основе системы Ni–Co–Cr–Al–Ti–Ta–Re–W–Mo–B.

Выводы

1. В работе предложены новые подходы к выбору легирующих элементов основы припоев, обеспечивающих твердорастворное и дисперсионное упрочнение. В частности, введение в припой тантала и рения, которые используются для легирования жаропрочных сплавов турбин нового поколения и имеют более высокую эффективность в повышении жаростойкости и жаропрочности и снижении концентрации молибдена и вольфрама или их замене.

2. При температуре пайки 1250 °С краевые углы смачивания жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ni₃Al припоем SBM-3 не превышают 7°, по химическому составу и структуре металл шва близок к основному металлу, кратковременная прочность при 900 °С находится на уровне основного металла, а длительная прочность TLP-соединений на базе 50 и 100 ч испытаний не ниже 80 % основного металла.

3. Результаты работы показали, что созданный припой SBM-3 и технология TLP-соединения соответствуют цели исследований.

4. По итогам работы для опытно-промышленного использования выплавлены припой системы Ni–Co–Cr–Al–Ti–Ta–Re–W–Mo–B с Hf и без него.

Список литературы

1. Кривцун І.В., Квасницький В.В., Максимов С.Ю., Єрмолаєв Г.В. (2017) *Спеціальні способи зварювання*. Підручник. Патон Б.Є. (ред.). Миколаїв, НУК.
2. Єрмолаєв Г.В., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф. и др. (2015) *Паяння матеріалів*. Підручник. Хорунов В.Ф., Квасницький В.Ф. (ред.). Миколаїв, НУК.
3. Каблов Е.Н. (2012) Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. *Авиационные материалы и технологии*, **5**, 24–30.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. (2011) Материалы для высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*, **9**, 13–19.
5. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Качанов Е.Б., Шалин Р.Е. (1994) Високотемпературные конструкционные материалы на основе интерметаллида Ni₃Al. *Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков. Научно-технический сборник*. Москва, ВИАМ.
6. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А., Морозова Г.И. (1999) Сплавы на основе алюминидов никеля. *Металловедение и терм. обработка металлов*, **1**, 32–34.
7. Лукин В.И., Рьльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. (2012) Особенности пайки монокристаллических отливок и сплава ЖС32. *Сварочное производство*, **5**, 24–30.
8. Лукин В.И., Рьльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. (2010) Особенности получения паяных соединений из сплава ЖС36. *Технология машиностроения*, **5**, 21–35.
9. Лукин В.И., Рьльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Тимофеева О.Б. (2013) Особенности технологии диффузионной пайки жаропрочного сплава ЭП 975 и литейного монокристаллического интерметаллидного сплава ВК-НА-4У применительно к конструкции «Блиск». *Сварочное производство*, **7**, 19–25.
10. Xiong Yue, Fengmei Liu, Hexing Chen et. al. (2018) Effect of Bonding Temperature on Microstructure Evolution during TLP Bonding of a Ni₃Al based Superalloy IC10. *ICCEMS 2018, MATEC Web of Conferences 206, 03004*.
11. Малашенко И.С., Куренкова В.В., Белявин А.Ф., Трохимченко В.В. (2006) Кратковременная прочность и микроструктура паяных соединений сплава ВЖЛ-12У, полученных с использованием борсодержащих припоев с присадкой кремния. *Современная электрометаллургия*, **4**, 26–42.
12. Малашенко И.С., Мазурак В.Е., Кушнарєва Т.Н. и др. (2014) Пайка в вакууме литого никелевого сплава ЖС6У композиционными припоями на основе ВПр36. Ч. 1. *Современная электрометаллургия*, **4**, 49–58.
13. Квасницький В.Ф., Костин А.М., Квасницький В.В. (2002) Влияние элементов-депрессантов на свойства никелевых припоев и жаропрочных сплавов. *Адгезия расплавов и пайка материалов*, **5**, 129–139.
14. Максимова С.В., Воронов В.В., Ковальчук П.В. (2017) Припой без бора и кремния для пайки жаропрочного никелевого сплава. *The Paton Welding J.*, **8**, 15–21.
15. Kvasnitskiy V.V., Timchenko V.L., Ivanchenko V.G., Khorunov V.F. (1998) The investigation of Ni (Nialloy)-Hf-Cr system for heat-proof nickel alloy brazing. *DVS-Berichte: Band 192. Dusseldorf: DVS – VERL*, ss. 262–264.
16. Kvasnitskiy V.V., Timchenko V.L., Ivanchenko V.G., Khorunov V.F. (1998) Die Untersuchung des System Ni(Nilq)-Hf–Zr- für das Loten warmfester Nickellegierungen. *Ibid*, ss. 257–259.
17. Kvasnitskiy V.V. (1998) Composite filler metal brazing of heat-proof nickel alloys. *Ibid*, ss. 260–262.

18. Khorunov V.F., Ivanchenko V.G., Kvasnitskiy V.V. (1998) Investigation des system Ni–Cr–Zr and Ni–Cr–Hf alloys. *Ibid.*, ss. 59–61.
 19. М'яльниця Г.П., Максютя І.І., Квасницька Ю.Г., Михнян О.В. (2013) Вибір легуючого комплексу нового корозій-ностійкого сплаву для соплових лопаток ГТД. *Металознавство та обробка металів*, **2**, 29–34.
- References**
1. Krivtsun, I.V., Kvasnytskyi, V.V., Maksymov, S.Yu., Yermolayev H.V. (2017) *Special methods of welding: Manual*. Ed. by B.E. Paton. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
 2. Yermolayev H.V., Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F. et al. (2015) *Brazing of materials: Manual*. Ed. by V.F. Khorunov, V.F. Kvasnytskyi. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
 3. Kablov, E.N. (2012) Strategic tendencies in development of materials and technologies of their processing for period up to 2030. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, **5**, 24-30 [in Russian].
 4. Kablov, E.N., Ospennikova, O.G., Bazyleva, O.A. (2011) Materials for high-loaded parts of gas turbine engines. *Vestnik MG TU. Seriya Mashinostroenie*, **9**, 13-19 [in Russian].
 5. Buntushkin, V.P., Kablov, E.N., Kachanov, E.B., Shalin, R.E. (1994) High-temperature structural materials based on intermetallic Ni₃Al. In: *Aircraft materials at the turn of the XX-XXI centuries: Sci.-Techn. Transact. Moscow*, VIAM [in Russian].
 6. Buntushkin, V.P., Kablov, E.N., Bazyleva, O.A., Morozova, G.I. (1999) Alloys based on nickel aluminide. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **1**, 32-34 [in Russian].
 7. Lukin, V.I., Rylnikov, V.S., Afanasiev-Khodykin, A.N. (2012) Peculiarities of brazing single-crystal castings and alloy ZhS₃₂. *Svarochn. Proizvodstvo*, **5**, 24-30 [in Russian].
 8. Lukin, V.I., Rylnikov, V.S., Afanasiev-Khodykin, A.N. (2010) Peculiarities of producing of ZhS36 alloy brazed joint. *Tekhnol. Mashinostroeniya*, **5**, 21-35 [in Russian].
 9. Lukin, V.I., Rylnikov, V.S., Afanasiev-Khodykin, A.N., Timofeeva, O.B. (2013) Peculiarities of diffusion brazing technology of high-temperature alloy EP 975 and cast single-crystal intermetallic alloy VKNA-4U applying to structure «Blisk». *Svarochn. Proizvodstvo*, **7**, 19-25 [in Russian].
 10. Xiong Yue, Fengmei Liu, Hexing Chen, et al. (2018) Effect of Bonding Temperature on Microstructure Evolution during TLP Bonding of a Ni₃Al based Superalloy IC10. *ICCEMS 2018, MATEC Web of Conferences 206, 03004*.
 11. Malashenko, I.S., Kurenkova, V.V., Belyavin, A.F., Trokhimchenko, V.V. (2006) Short-term strength and microstructure of brazed joints of alloy VJL12U produced using boron-containing brazing alloy with addition of silicon. *Sovrem. Elektrometall.*, **4**, 23-38 [in Russian].
 12. Malashenko, I.S., Mazurak, V.E., Kushnareva, T.N. et al. (2014) Vacuum brazing of cast nickel alloy ZhS6U with composite brazing alloys on VPr-36 base. Pt 1. *Ibid.*, **4**, 49-58 [in Russian].
 13. Kvasnytsky, V.F., Kostin, A.M., Kvasnitsky, V.V. (2002) Influence of elements-depressants on properties of nickel brazing filler metals and high-temperature alloys. *Adgeziya Rasplavov i Pajka Materialov*, **3**, 129-139 [in Russian].
 14. Maksymova, S.V., Voronov, V.V., Kovalchuk, P.V. (2017) Brazing filler metal without boron and silicon for brazing of heat-resistant nickel alloy. *The Paton Welding J.*, **8**, 12-17.
 15. Kvasnitskiy, V.V., Timchenko, V.L., Ivanchenko, V.G., Khorunov, V.F. (1998) The investigation of Ni(Nialloy)-Hf-Cr system for heat-proof nickel alloy brazing. *DVS-Berichte: Band 192, Duesseldorf: DVS – VERL*, 262-264.
 16. Kvasnitskiy, V.V., Timchenko, V.L., Ivanchenko, V.G., Khorunov, V.F. (1998) Die Untersuchung des System Ni(Niliq)-Hf-Zr fuer das Loten warmfester Nickellegierungen. *Ibid.*, 257-259 [in German].
 17. Kvasnitskiy, V.V. (1998) Composite filler metal brazing of heat-proof nickel alloys. *Ibid.*, 260-262.
 18. Khorunov, V.F., Ivanchenko, V.G., Kvasnitskiy, V.V. (1998) Investigation of systems Ni-Cr and Ni-Cr-Hf alloys. *Ibid.*, 59-61.
 19. Myalnytsa, G.P., Maksyuta, I.I., Kvasnitska, Yu.G., Mykhnyan, O.V. (2013) Selection of alloying complex of new corrosion-resistant alloy for nozzle blades of GTE. *Metaloznavstro ta Obrobka Metaliv*, **2**, 29-34 [in Ukrainian].

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ СПЛАВА НА ОСНОВІ Ni₃Al З ПРОШАРКАМИ РІЗНИХ СИСТЕМ ЛЕГУВАННЯ ДЛЯ TLP-З'ЄДНАННЯ

В.В. Квасницький¹, Г.П. М'яльниця², М.В. Матвієнко³, Е.А. Бутурля⁴, Dong Chunlin⁵

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».
03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

²ДП «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект».
54018, м. Миколаїв, просп. Октябрський, 42а

³Херсонська філія Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова.
73022, м. Херсон, просп. Ушакова, 44

⁴Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова.
54025, м. Миколаїв, просп. Героїв України, 9.

⁵Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology,
Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding), Guangzhou, 510650, China

Зварювання плавленням ливарних жароміцних нікелевих сплавів з високим вмістом зміцнюючих дисперсних фаз є проблематичним. Ще більш гострою є проблема зварювання матеріалів на основі інтерметалідів. Тому для з'єднання таких матеріалів найбільш широко застосовують різні способи пайки. За кордоном найбільш часто використовують термін TLP-з'єднання (Transient Liquid Phase Bonding). З огляду на те, що припой мають більш низьку температуру плавлення, ніж основний метал, для підвищення робочої температури концентрація елементів депресантів (що знижують температуру плавлення припою) у шві повинна зводитися до мінімуму. Депресанти жароміцних припоїв поділяють на кілька груп. В роботі досліджували взаємодію сплаву на основі Ni₃Al з припоями, що містять кремній, бор, цирконій та гафній. За результатами досліджень розроблено припой SBM-3 системи Ni-Cr-Co-Al-Ti-Ta-Re-W-Mo-Hf-B. Бібліогр. 19, рис. 7.

Ключові слова: пайка, нікелеві сплави, упрочнююча фаза, депресанти, розробка припою, температура плавлення

INVESTIGATION OF INTERACTION OF Ni₃Al-BASED ALLOY WITH INTERLAYERS OF DIFFERENT ALLOYING SYSTEMS FOR TLP-BONDING

V.V. Kvasnytskyi¹, H.F. Myalnitsa², M.V. Matviienko³, E.A. Buturlyya⁴, Dong Chunlin⁵

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

37 Pobedy ave., Kyiv, 03056. E-mail:kvas69@ukr.net

²SE «Scientific-production gas turbine construction complex «Zorya»-«Mashproekt», 42a Oktyabrskii Ave, Mykolaiv, 54018

³Kherson Branch of National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov, 44 Ushakova Ave, Kherson, 73022

⁴Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Geroev Ukraine Ave, Mykolaiv, 54025

⁵Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology,

Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding), Guangzhou, 510650, China

Fusion welding of cast high-temperature nickel alloys with high content of strengthening disperse phases is problematic. Even more serious problem is welding of intermetallic-based materials. Therefore, different methods of brazing are widely used for such materials joining. TLP-bonding (Transient Liquid Phase Bonding) is a term which has the most often application abroad. Considering that brazing filler materials have lower melting temperature than base metal the concentration of depressants (reducing brazing filler metal melting temperature) in brazed weld shall be reduced to the minimum in order to increase working temperature of brazed joints in brazing process. The depressants of high-temperature brazing filler metals are divided on several groups. Interaction of Ni₃Al-based alloy with brazing filler metals containing boron, zirconium and hafnium was investigated in the work. SBM-3 brazing filler metal of Ni-Cr-Co-Al-Ti-Ta-Re-W-Mo-Hf-B system was developed based on research results. 19 Ref., 7 Fig.

Keywords: brazing, nickel alloys, strengthening phase, depressants, brazing filler metal development, melting temperature

Поступила в редакцию 14.06.2019

Крупнейшая сварочная выставка в азиатском регионе

С 25 по 28 июня 2019 г. в Шанхайском новом международном выставочном центре была проведена BEIJING ESSEN WELDING & CUTTING, крупнейшая сварочная выставка в азиатском регионе.

BEIJING ESSEN WELDING & CUTTING, ведущая отраслевая выставка сварки в азиатском регионе, проводится уже в 24-й раз. Более 1000 экспонентов представили свои продукты и услуги на экспозиции площадью более 87000 м² в Шанхайском выставочном центре.

Продукты, относящиеся к сварке и резке, пользуются большим спросом в Китае: при ежемесячном производстве стали в 85 млн т стали эта страна является мировым лидером и, следовательно, также имеет соответствующие требования для дальнейшей обработки. BEIJING ESSEN WELDING & CUTTING предложила посетителям идеальную платформу для поиска информации об инновациях в ключевых технологиях, связанных с соединением, резкой и нанесением покрытий, а также для обмена идеями и заказа продукции.

Компании имеют возможность предложить свои услуги на многочисленных международных стендах, в том числе в павильоне Германии, который увеличился в размере на 38 % по сравнению с последним мероприятием в Шанхае в результате высокого спроса. 25 компаний присутствуют на стенде павильона, который продвигает Федеральное министерство экономики Германии, где они продемонстрируют свою продукцию «Сделано в Германии».

В дополнение к высококачественным презентациям для экспонентов, BEIJING ESSEN WELDING & CUTTING предлагает множество возможностей для дальнейшего обучения. Эксперты поделятся своими знаниями на конференции под названием «IFWT 2019 Сварка и соединение» и на «Китайском форуме сварочной промышленности 2019».

В этом году организаторы мероприятия также рады участию таких известных компаний, как KUKA, Yaskawa, ESAB, ABB и Golden Bridge. Эта выставка с участием более 1000 экспонентов из 30 стран мира является крупнейшим зарубежным проектом Messe Essen.

