



ВЫБОР ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА γ -АЛЮМИНИДА ТИТАНА ПРИ ЭЛС

В. Н. ЗАМКОВ, д-р техн. наук, Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, канд. физ.-мат. наук, В. К. САБОКАРЬ, канд. техн. наук, Э. Л. ВРЖИЖЕВСКИЙ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализировано развитие упругопластических деформаций при сварочном нагреве и охлаждении образцов γ -сплава алюминидов титана расчетными методами. Определен уровень остаточных продольных напряжений в пластинах сплава толщиной 5...17 мм при ЭЛС в зависимости от температуры предварительного подогрева и отжига сварных соединений после сварки. Установлено, что предупреждение образования поперечных трещин в швах сплава 47ХД, выполненных однопроходной ЭЛС на металле толщиной до 17 мм включительно, обеспечивается предварительным подогревом образцов до 400...500 °С и отжигом сварных соединений в интервале температур 800...900 °С в течение 10...15 мин.

Ключевые слова: алюминид титана, холодные трещины, температурные поля, упругопластические деформации, напряжения, предварительный подогрев, отжиг

Интерес к γ -сплавам на основе алюминидов титана TiAl продиктован их уникальными свойствами. Они обладают высокими жаропрочностью и жаростойкостью и одновременно относительно низкой плотностью (3,8...3,9 г/см³) [1, 2]. Но при нормальной температуре эти сплавы имеют низкую пластичность ($\delta \leq 2\%$), что значительно усложняет их технологическую обработку и тормозит промышленное применение. Поэтому широкое использование γ -алюминидов титана в конструкциях различного назначения в значительной мере будет определяться созданием эффективных процессов их обработки, в том числе и сварки.

В связи с низкой пластичностью (вплоть до температуры 700 °С) γ -сплавы весьма чувствительны к напряжениям, появляющимся в условиях неравномерного нагрева при сварке, и склонны к возникновению холодных поперечных трещин в сварных соединениях (рис. 1). Для предотвращения их образования предлагается [3, 4] предварительный подогрев образцов — этот метод уменьшает скорость нарастания временных напряжений при сварке и снижает уровень остаточных сварочных напряжений. Но в литературе отсутствуют однозначные рекомендации по выбору температуры предварительного подогрева. В работах [3, 4] указан лишь интервал возможных ее значений (от 250 до 650 °С) без каких-либо дополнительных уточнений.

Цель настоящей работы заключалась в том, чтобы определить минимальное значение температуры предварительного подогрева $T_{\text{п}}$, при которой в сварных соединениях γ -алюминидов титана не возникают трещины. С помощью численных методов расчета решены задачи термопластичности, прослежено развитие упругопластических деформаций при сварочном нагреве и охлаждении [5].

Исследования проводили на образцах сплава 47ХД [1], вырезанных из слитка и подвергнутых изостатической обработке при температуре 1260 °С

и давлении 171 МПа в течение 4 ч и последующему стабилизирующему отжигу при $T_0 = 1015$ °С (50 ч). Сварку и предварительный подогрев пластин осуществляли электронным лучом в установке УЛ-144, снабженной источником питания ЭЛА-60/60.

Для расчетов были приняты следующие характеристики сплава: временное сопротивление разрыву $\sigma_{\text{в}} = 480...540$ МПа при нормальной температуре; модуль нормальной упругости $E = 1,6 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$ (по данным [6]); коэффициент поверхностной теплоотдачи в вакууме $\alpha = 21,0$ Вт/(м²·К). В зависимости удельной теплоемкости и теплопроводности сплава 47ХД от температуры определяли экспериментально (рис. 2).

Предварительно на образцах № 1 (рис. 3) толщиной 5 мм сделали сквозные наплавки с замером термического цикла. Опытным путем установили, что минимальное значение $T_{\text{п}}$, при котором не возникают трещины, составляет 400 °С. Исходя из этого и используя схемы, представленные на рис. 3, выполнили расчеты температурных полей. При этом рассматривали два варианта сварки: мощным быстро движущимся линейным источником, (образцы № 1, 2) и неподвижным круговым источником, действующим кратковременно (образцы № 3).

Полагая, что при электронно-лучевом нагреве плоские образцы прогреваются равномерно по всей толщине металла, в расчетах приняты средние зна-

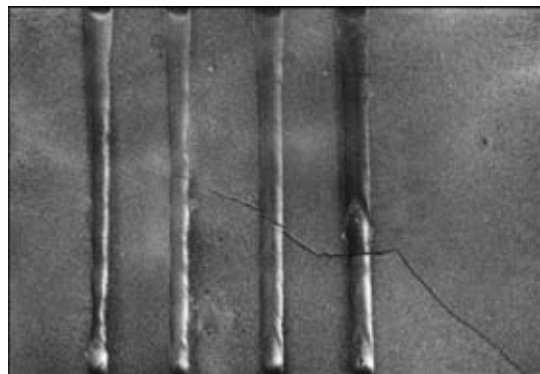


Рис. 1. Холодные трещины в сварном образце сплава 47ХД, выполненном ЭЛС без предварительного подогрева

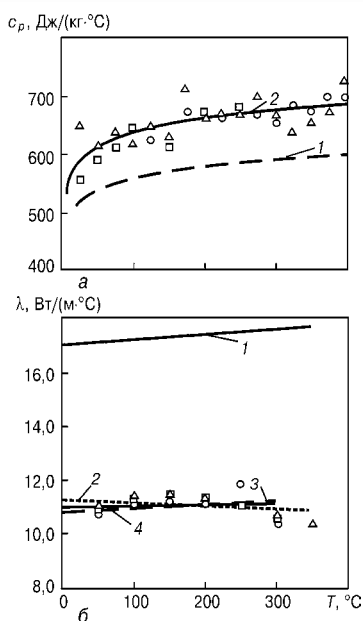


Рис. 2. Зависимость теплофизических характеристик сплавов от температуры: а — удельной теплоемкости c_p (1 — ВТ-0, 2 — γ -сплав 47ХД); б — теплопроводности λ (1 — ВТ-0; 2-4 — γ -сплав 47ХД) (по трем экспериментам)

чения температуры в процессе движения источника нагрева вдоль оси y . Эти же значения температур были использованы затем при решении задачи термопластичности в рамках модели плоского напряженного состояния [5]. Температурные поля определяли численным методом, последовательно прослеживая развитие нагрева и охлаждения во времени, начиная с начального состояния. Пространственную область решения задачи распространения тепла представляли конечными элементами прямоугольной формы со следующими размерами: $\Delta x = 1,0$ мм, $\Delta y = 3,5$ мм для образцов № 1; $\Delta x = 1,0$ мм, $\Delta y = 5$ мм, $\Delta z = 1,0$ мм для образцов № 2; $\Delta r = 0,5$ мм, $\Delta z = 1,0$ мм для образцов № 3.

Расчеты температурных полей выполняли для сварки соответственно с $T_{II} = 300, 400$ и 500 °С. С помощью полученных результатов установили характер изменения температуры вдоль оси шва, особенности формирования продольных временных и остаточных напряжений σ_{yy} . В качестве примера на рис. 4 представлены соответствующие данные для образцов № 1. Относительно низкая теплопроводность сплава способствует сохранению неравномерности температурного поля в пластине в течение длительного времени после окончания процесса сварки. Поэтому рост временных напряжений в металле шва происходит по мере остывания образца вплоть до начальной температуры T_{II} (рис. 5). Уровень остаточных растягивающих напряжений вдоль шва при $T_{II} = 400$ °С составляет ≈ 420 МПа и не превышает временное сопротивление разрыву сплава при нормальной температуре. Этим и объясняется отсутствие трещин в образцах № 1, сваренных с предварительным подогревом до $T_{II} = 400$ °С.

Анализ кинетики изменения пластических деформаций и временных растягивающих напряжений у образцов № 1 в среднем сечении сварного

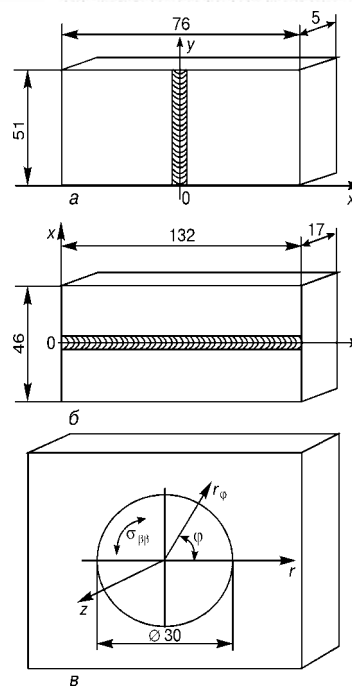


Рис. 3. Размеры образцов № 1-3 (а-б) и схемы расчета

шва на стадии охлаждения (рис. 5, а) свидетельствует о том, что повышение значений T_{II} от 300 до 500 °С существенно смещает процесс активного продольного деформирования в область более высоких температур. Так, если при $T_{II} = 300$ °С деформирование со скоростью более $0,1 \cdot 10^{-5}$ 1/°С заканчивается при $T < 350$ °С, то при $T_{II} = 400$ и 500 °С это происходит уже соответственно при $T = 500$ и 750 °С. Заметное уменьшение уровня временных и остаточных напряжений σ_{yy} имеет место только при $T_{II} = 500$ °С. Учитывая почти полное отсутствие пластического течения сплава при температуре ниже 500... 600 °С, можно считать, что $T_{II} = 400$ °С является той минимальной температурой предварительного подогрева, при которой рост пластических деформаций растяжения заканчивается при $T > 500$ °С, а максимальный уровень напряжений σ_{yy} не превышает 420 МПа. Таким образом, предварительный подогрев до 400... 500 °С является эффективным методом снижения риска возникновения поперечных трещин при ЭЛС сплава 47ХД. Расчеты показали, что уровень возникающих в процессе сварки поперечных напряжений σ_{xx} значительно ниже продольных, поэтому их роль в образовании трещин можно не учитывать.

Увеличение толщины свариваемых пластин до 17 мм (см. рис. 3, образец № 2), а следовательно, и погонной энергии при сварке не оказывает существенного влияния на процессы пластической деформации и формирование временных и остаточных напряжений. Можно лишь отметить, что в этом случае активное деформирование свариваемых пластин заканчивается при более низкой температуре, чем при сварке образцов № 1. Для образцов № 2 эта температура равна 350, 475 и 630 °С соответственно при температуре предварительного подогрева $T_{II} = 300, 400$ и 500 °С. У

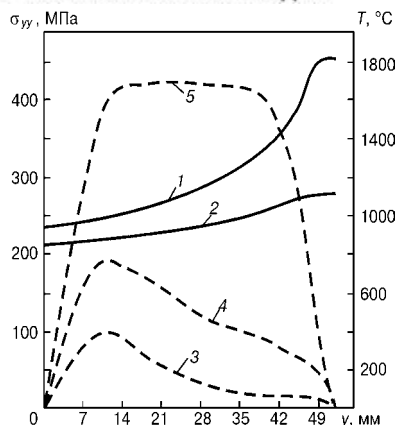


Рис. 4. Распределение температуры (сплошные кривые) и продольных напряжений σ_{yy} (штриховые) по оси шва в образцах № 1 (см. рис. 3) после ЭЛС: 1, 3 — спустя 7, 8 с; 2, 4 — 11, 4 с; 5 — после остывания; $T_n = 400^\circ\text{C}$

этих же образцов значительно ниже, чем у образцов № 1, и уровень остаточных напряжений (рис. 5).

Результаты расчетов проверяли экспериментально. Была осуществлена сварка контрольных образцов № 2 с предварительным подогревом до 400 и 500 °С.

Внешний осмотр и рентген-контроль сварных соединений не выявили каких-либо дефектов, в частности трещин. Механические испытания показали, что сварные соединения, выполненные с предварительным подогревом до 400 °С, имеют предел прочности 330...350 МПа. При $T_n = 500^\circ\text{C}$ временное сопротивление разрыву сварного соединения $\sigma_b = 520$ МПа, т. е. его прочность равна прочности основного металла. Такое различие в значениях σ_b обусловлено, по-видимому, более высоким уровнем остаточных напряжений после сварки с предварительным подогревом до $T_n = 400^\circ\text{C}$. Менее значительные, но достаточно высокие остаточные напряжения сохраняются и в образцах, сваренных с предварительным подогревом до $T_n = 500^\circ\text{C}$ (рис. 5). Поэтому дальнейшие исследования были направлены на поиск параметров термической обработки сварных соединений, способствующих снижению уровня остаточных напряжений. Расчетными методами рассматривали два варианта условий охлаждения после отжига при $T_o = 880$ и 1000°C . Первый — это нагрев сварных соединений электронным лучом, выдержка при заданной температуре и последующее охлаждение непосредственно в сварочной камере ($\alpha = 42,0$ Вт/(м²·К)). Второй вариант — то же с охлаждением вне сварочной камеры при отсутствии воздушных потоков ($\alpha = 21,0$ Вт/(м²·К)), т. е. отжиг в печи. Результаты расчета показали, что для сварных соединений сплава 47ХД более благоприятным является первый вариант. Согласно данным, представленным на рис. 6, термическая обработка сварных соединений электронным пучком в сварочной камере позволяет снизить остаточные напряжения в два и четыре раза соответственно после отжига при температуре 880 и 1000 °С.

Полученные данные позволяют утверждать, что для предупреждения образования поперечных трещин в швах сплава 47ХД, выполненных одно-

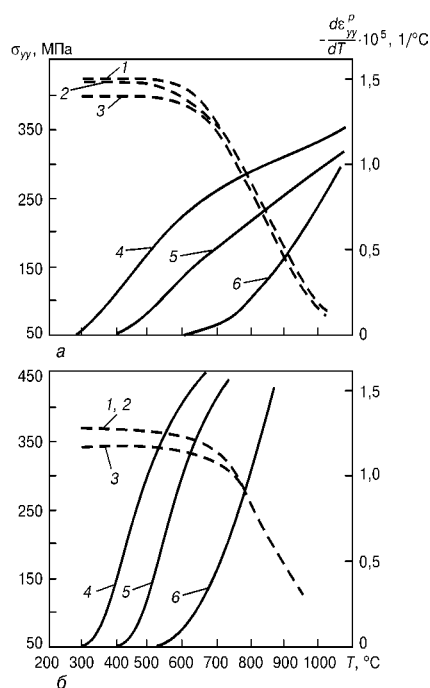


Рис. 5. Распределение по оси шва в образцах № 1 (а) и 2 (б) продольных напряжений (штриховые линии) и скорости изменения пластических деформаций (сплошные) после ЭЛС на стадии охлаждения при $T_n = 300$ (1, 4); 400 (2, 5); 500 °С (3, 6)

роходной ЭЛС на металле толщиной до 17 мм включительно, необходим предварительный подогрев образцов до 400...500 °С и отжиг сварных соединений в интервале температур 800...900 °С в течение 10...15 мин. Нагрев образцов перед сваркой и отжиг сварных соединений следует осуществлять в сварочной камере, используя в качестве источника тепла сканирующий электронный пучок. Временное сопротивление разрыву сварных соединений, выполненных по этой технологии, составляет 460...520 МПа.

Представляло также интерес определение возможности и условий предотвращения трещин при выполнении ремонтной сварки на деталях из сплава 47ХД с целью устранения, например, поверхностных дефектов. Для этого были проведены соответствующие расчеты, основанные на предположении, что источником тепла в данном случае является неподвижный кратковременно действующий круговой источник нагрева (см. рис. 3, образец № 3). Естественно, что при такой схеме нагрева в образце будет формироваться более жесткое напряженное состояние, чем при сварке пластин линейным быстродвижущимся источником. В этом случае вероятно возникновение радиальных трещин под действием напряжений $\sigma_{\beta\beta}$ (см. рис. 3).

Кинетика роста временных напряжений $\sigma_{\beta\beta}$ в зоне сплавления ($z = 0$, $r = 15$ мм) на стадии охлаждения и скорость изменения окружающих пластических деформаций в зависимости от температуры представлены на рис. 7. Как видно из полученных зависимостей, в данном случае температура предварительного подогрева T_n должна быть не менее 600 °С, а после сварки, безусловно, необходим отжиг, поскольку даже при $T_n = 700^\circ\text{C}$ в образце сохраняется высокий уровень остаточных

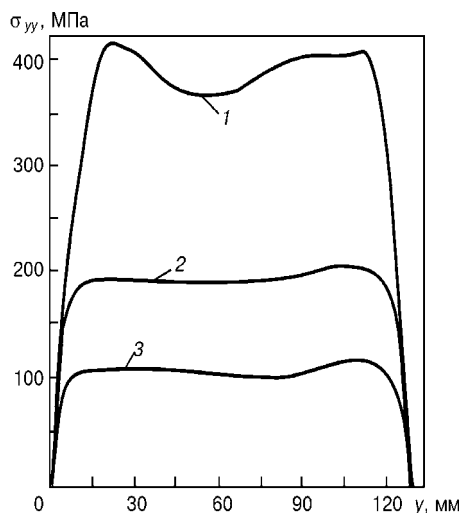


Рис. 6. Влияние температуры отжига после сварки (1 – 400; 2 – 880; 3 – 1000 °С) на распределение продольных остаточных напряжений в образцах № 2 (см. рис. 3); $T_n = 400$ °С

напряжений. Для экспериментальной проверки этих утверждений на поверхности образцов № 2 исследуемого сплава с помощью электронного луча была осуществлена заварка дефектов с предварительным подогревом до $T_n = 600$ °С и отжигом после сварки при $T_o = 850$ °С непосредственно в сварочной камере. Визуальный осмотр и рентген-контроль сварных точек подтвердили отсутствие в них каких-либо дефектов.

Выводы

1. Образование холодных трещин в сварных соединениях γ -сплавов на основе алюминидов титана обусловлено низкой пластичностью этих сплавов при температурах ниже 700 °С и, как следствие, высоким уровнем продольных временных напряжений σ_{pp} , возникающих в процессе охлаждения сварного соединения.

2. Для предотвращения возникновения поперечных трещин в сварных соединениях сплава 47ХД, выполненных ЭЛС, рекомендуется предварительный подогрев свариваемых образцов до температуры 400...500 °С. При выполнении на деталях из сплава 47ХД локальных швов или наплавов в ремонтных целях температура предварительного подогрева должна быть не менее 600 °С.

3. Для снижения уровня остаточных напряжений необходимо непосредственно после сварки

Development of elastic-plastic strains in welding heating and cooling of samples of γ -titanium aluminide alloy has been analysed using the calculation methods. The level of residual longitudinal stresses in the alloy plates 5...17 mm thick in EBW, depending upon the temperatures of preheating and annealing of welded joints after welding, has been determined. It has been established that prevention of formation of cold cracks in the 47KhD alloy welds made by single-pass EBW on metal up to 17 mm thick is provided by preheating the samples to 400...500 °С and annealing of welded joints within a temperature range of 800...900 °С for 10...15 min.

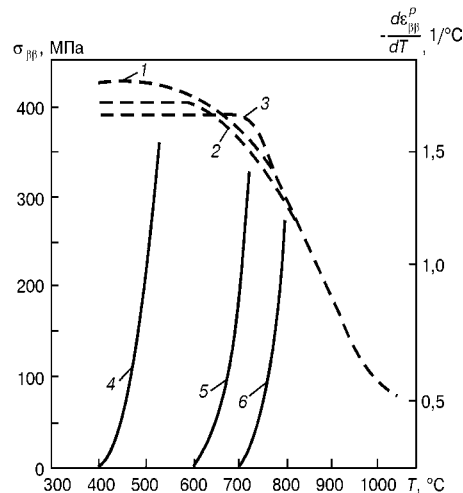


Рис. 7. Изменение временных напряжений σ_{pp} (штриховые кривые) и скорости изменения окружающих пластических деформаций (сплошные) в образцах № 3 (см. рис. 3) сплава 47ХД: 1, 4 – $T_n = 400$; 2, 5 – 600; 3, 6 – 700 °С

производить отжиг сварных соединений в интервале температур 800...900 °С. Чтобы исключить при этом возникновение дополнительных напряжений, следует обеспечить равномерный нагрев и охлаждение сварных соединений.

Работа проведена при финансовой поддержке Лоуренсовской ливерморской национальной лаборатории (США).

- Mantle A. L., Aspinwall D. K., Wise M. L. H. Single point turning of gamma titanium aluminide intermetallic // Proc. of the Eighth world. conf. on Titanium'95: science and technology, Birmingham, UK, 22-26 Oct., 1995. — Cambridge: The University press, 1995. — Vol. 1. — P. 248-255.
- Иванов В. И., Ясинский К. К. Эффективность применения жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов Ti_3Al и $TiAl$ для работы при температурах 600...800 °С в авиационной технике // Технология легких сплавов. — 1996. — № 3. — С. 7-12, 93.
- Titanium aluminid: electron beam weldability / R. A. Patterson, P. L. Martin, B. K. Damkroger, L. Christodoulou // Welding J. — 1990. — **69**, № 1. — P. 39-44.
- The effect of postweld heat treatment on the structure and properties of electron beam welded $Ti-48Al-2Cr-2Nb$ // C. M. Jensen, H. Zhang, W. A. Baeslack, T. J. Kelly // Abs. of papers, presented at 79th AWS annual meeting. — Miami: AWS, 1998. — P. 179-180.
- Махиенко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных деформаций и напряжений. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
- Хино Н., Нисияма Ю. Использование алюминидов титана // Metals and Technol. — 1990. — **60**, № 7. — С. 70-74.

Поступила в редакцию 11.12.2000