

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Широкое применение в изделиях авиационной техники находят сварные конструкции из титановых сплавов, во многом определяющие ресурс и надежность изделий. Объем применения сварных титановых конструкций в летательных аппаратах зависит как от показателей их ресурсных характеристик, так и от себестоимости их изготовления.

К числу наиболее важных условий достижения высокой работоспособности сварных титановых соединений относится назначение оптимальных термических циклов сварки и режимов отжига.

В настоящее время недостаточно обоснован вопрос о возможности назначения низкотемпературного отжига сварных титановых конструкций. Неясно, как будет влиять различная степень окисления поверхности после воздушного и вакуумного отжига на изменение концентрации водорода в металле и, как следствие, на вероятность замедленного разрушения в процессе эксплуатации. Отсутствуют данные и о сравнительном влиянии полного и низкотемпературного отжига на стойкость к замедленному разрушению.

Отсутствие таких сведений приводит к тому, что в ряде случаев устанавливаются требования подвергать сварные титановые конструкции заключительному полному вакуумному отжигу, осуществляемому, как правило, в дорогостоящих вакуумных печах. Это усложняет технологию, требует изготовления специальной оснастки, удлиняет цикл изготовления и существенно повышает производственные расходы.

Кроме того, не исследованным является вопрос совместного влияния различных термических циклов аргонодуговой сварки и последующего отжига на механические характеристики, в частности, циклическую долговечность и ударную вязкость сварных соединений.

Настоящая работа направлена на совершенствование процесса изготовления тонколистовых сварных титановых конструкций и решение перечисленных задач.

Работа выполнена в рамках научного направления ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет» «Научоёмкие технологии в машиностроении, авиастроении и ракетно-космической технике», а также в рамках ГБ НИР 2007.28 «Разработка и исследование прогрессивных технологических процессов в сварочном производстве».

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является выбор оптимальных вариантов термической обработки титановых сварных конструкций, обеспечивающих повышение их эксплуатационной долговечности при упрощении технологического процесса и снижении производственных затрат.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- исследовать закономерности влияния температуры отжига на длительную прочность зоны термического влияния титановых сплавов;
- изучить влияние интерференционно окрашенных поверхностных оксидных плёнок, формирующихся на изделиях при воздушном отжиге, на кинетику изменения концентрации водорода в металле в процессе эксплуатации;
- исследовать воздействие термических циклов аргонодуговой сварки в сочетании с различными вариантами последующего отжига на циклическую долговечность и ударную вязкость сварных соединений титановых сплавов;
- разработать технические рекомендации по выбору оптимальных режимов термической обработки, обеспечивающие высокую длительную прочность, ударную вязкость и циклическую долговечность листовых сварных соединений титановых сплавов.

Объектом исследования являются титановые тонкостенные сварные конструкции.

Научная новизна. Обнаружено, что при отжиге различных типов структур металла зоны термического влияния сварных соединений сплава ОТ4, подвергавшихся нагреву свыше температуры полиморфного превращения, максимумы стойкости к замедленному разрушению зафиксированы после низкотемпературного отжига, что объясняется эффектом термического упрочнения сплава по механизму дисперсионного твердения. При этом эффект упрочнения проявляется для показателей как длительной, так и кратковременной прочности для всех исследованных типов микроструктур.

Установлено, что низкотемпературный отжиг в сочетании с жёсткими режимами сварки повышает на 30-40 % долговечность при повторно-статических нагрузках титановых сплавов α -, псевдо α -, а также мартенситного типа.

Выявлено, что при наличии интерференционно окрашенных оксидных плёнок, формирующихся на поверхности сварных титановых соединений в процессе воздушного отжига при $T = 400-600^\circ\text{C}$, практи-

чески не происходит рост концентрации водорода в металле при вылёживании. Состояние поверхности после вакуумного отжига, характеризующее отсутствием интерференционно окрашенной оксидной плёнки, приводит к большему насыщению водородом титана в сравнении с состоянием поверхности после воздушного отжига.

Обнаружено, что максимумы ударной вязкости сварного шва и различных участков зоны термического влияния высокопрочного сплава ВТ64 достигаются после низкотемпературного отжига, при этом для жёсткого режима сварки максимум ударной вязкости смещён в сторону более высокой температуры (500...550 °С) в сравнении с мягким режимом (390...460 °С).

Практическая значимость работы. На основе анализа стойкости к замедленному разрушению и циклической долговечности обоснована целесообразность применения низкотемпературного отжига сварных изделий из титановых сплавов взамен дорогостоящего вакуумного отжига.

Показано, что наличие оксидных плёнок цветов побежалости, формирующихся на поверхности сварных изделий из титановых сплавов при воздушном отжиге, не приводит к росту концентрации водорода в металле и при длительной эксплуатации обеспечивает меньшее наводороживание в сравнении с вариантом вакуумного отжига, при котором оксидные плёнки существенно тоньше.

Разработаны и внедрены на ВАСО в серийное производство оптимальные варианты аргонодуговой сварки и последующего низкотемпературного отжига, позволяющие повысить эксплуатационную долговечность сварных изделий из титановых сплавов при снижении прямых производственных затрат в процессе их изготовления.

По материалам работы выпущено дополнение к отраслевой производственной инструкции НИАТ ПИ 1.4.1898-2003 и инструкции АНТК «Антонов» ТИ 148.00.5800.001.000И.

Методы исследования. Металлографический анализ производили на металлографическом микроскопе МИМ-8. Структуру изломов изучали на электронном сканирующем микроскопе JSM-35CF (фирма JEOL). Содержание водорода в образцах определяли фотоэлектрическим методом на спектрографе ИСП-51 с фотоэлектрическим окончанием. Испытания на кратковременный разрыв и повторно-статическое растяжение проводили на модернизированной установке УММ-10. Испытания на пробу Эриксона выполняли на приборе МТЛ-10Г-1, на ударную вязкость (КСУ) - на маятниковом копре МК-10.

Достоверность научных положений, выводов и практических рекомендаций подтверждается систематическим характером экспериментальных исследований, использованием методов математической статистики при обработке результатов экспериментов, а также практическим использованием полученных результатов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технической конференции, посвящённой 30-летию кафедры «Оборудование и технология сварочного производства ВГТУ» (Воронеж, 2003), Международной научно-технической конференции «Славяновские чтения» (Липецк, 2004); ежегодных научно-технических конференциях Воронежского государственного технического университета (2004-2009); научных семинарах кафедры оборудования и технологии сварочного производства ВГТУ.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 - в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, основных результатов и выводов, библиографического списка и приложений. Основная часть работы изложена на 141 странице, содержит 62 рисунка, 14 таблиц, список литературы из 119 наименований.

В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, личный вклад соискателя заключается в формулировании идеи [7-9, 11] и постановке задач исследований [4, 6, 7-9], проведении экспериментов [1-11], обработке результатов, их анализе и теоретическом обобщении [1-11].

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель и задачи исследований, показаны научная новизна и практическое значение полученных результатов.

В первой главе на основании литературных данных изложены факторы, влияющие на кратковременные механические свойства, замедленное разрушение и циклическую прочность сварных соединений титана и его сплавов, отмечены вопросы, требующие изучения, сформулированы цель работы и задачи работы.

Рассмотрены особенности структуры и механические свойства зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений титана и его

сплавов α -, псевдо α - и мартенситного типа. Металл ЗТВ, как правило, является наиболее вероятным местом зарождения трещин в процессе как изготовления, так и эксплуатации конструкций.

Вопросы влияния отжига на структуру и механические характеристики титановых сварных соединений наиболее полно рассмотрены в трудах ведущих отечественных учёных, руководителей научных школ Б.А. Колачёва, С.Г. Глазунова, Г.Г. Максимовича, И.И. Корнилова, В.Н. Моисеева, Е.А. Борисовой и др. Титановые α - и псевдо α - сплавы относят к термически неупрочняемым, тонкостенные конструкции из сплавов мартенситного класса также на практике упрочняющей термообработке не подвергают. Преобладает мнение, что механические свойства данных сплавов несущественно изменяются при сварке и отжиге. Режимы отжига таких конструкций назначают, как правило, из соображений снятия остаточных сварочных напряжений, а также исходя из требований по допустимой концентрации водорода.

В трудах В.Н. Моисеева показано, что псевдо α -сплавы типа ОТ4 при упрочняющей термообработке могут повысить прочность за счёт дисперсионного твердения при распаде метастабильных β - и α' - фаз. Учитывая, что листовое сварное соединение при однопроходной сварке металла небольших толщин можно рассматривать как закаленное с температур β - области, в более поздних работах было предложено использовать низкотемпературный ($350-450^\circ\text{C}$) отжиг для повышения циклической долговечности изделий. В то же время не изучен вопрос влияния низкотемпературного отжига на стойкость данных конструкций к замедленному разрушению. Отдельно требует рассмотрения вопрос влияния оксидных плёнок, формирующихся на изделиях при неполном воздушном отжиге, на кинетику изменения концентрации водорода в металле в процессе длительной эксплуатации. Неясно, насколько допустимы эти плёнки, в частности, в сравнении с плёнками, остающимися на изделиях после вакуумного отжига.

Остаётся также неясным, как влияет низкотемпературный отжиг на пластические свойства, ударную вязкость ЗТВ сварных соединений.

Практически не освещён в литературе вопрос влияния режимов сварки, в частности, скорости охлаждения шва и ОШЗ в сочетании с последующими вариантами отжига на их механические характеристики

В заключении главы 1 на основе анализа литературных источников были сформулированы недостаточно изученные вопросы, связанные с выбором режимов сварки и отжига листовых сварных конструкций из титановых сплавов.

Во второй главе приведены характеристики технического титана ВТ1-0, сплавов ОТ4 и ВТ6ч и использованные методы исследований.

Механические характеристики определяли на листовых сварных образцах, при этом ось главных напряжений от внешнего нагружения во всех случаях была перпендикулярна направлению проката листов.

Испытания на кратковременный разрыв с определением временного сопротивления разрыву (σ_b) проводили на модернизированной установке УММ-10 мощностью 10 т.

Испытания на пробу Эриксена с определением глубины вытяжки до образования трещины (Н) производили на приборе МТЛ-10Г-1 при диаметре матрицы и шарика 27 и 20 мм соответственно.

Повторно-статические испытания на растяжение листовых образцов с частотами 0,3-0,8 Гц и коэффициентом асимметрии цикла $R=+0,1$ проводили на модернизированных установках УММ-10 и Р-10.

Испытания сварных образцов на ударную вязкость (КСУ) производили согласно требованиям ГОСТ 6996-66 на маятниковом копре МК-10 со шкалой 5 кг·м. На образцах выполняли надрез с радиусом 1 мм с помощью сверла Ø 2 мм; центр надреза располагали в соответствующих изучаемых зонах сварного соединения.

Испытания на замедленное разрушение выполняли по схеме Трояно с определением предела длительной прочности на базе 1000 часов (σ_d).

Металлографический анализ производили на металлографическом микроскопе МИМ-8.

Содержание водорода в образцах определяли фотоэлектрическим методом на спектрографе ИСП-51.

Проводилась математическая обработка результатов механических испытаний с аппроксимацией по методу наименьших квадратов к кривым типа

$$y = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f$$

Математическая обработка с определением коэффициентов уравнения регрессии и коэффициентов корреляции, построение графиков основных зависимостей производилась на компьютере по программе 1.12 (С). «Статистическая графика». Показатели степени полинома выбирали от 0 до 5. В каждом отдельном случае рассчитывались дисперсии - остаточная, воспроизводимости и адекватности; с помощью критерия Фишера проверялась однородность дисперсий; проверялась значимость коэффициентов уравнения по Т-критерию Стьюдента при уровне значимости 0,05.

В третьей главе изучали влияние наличия оксидов на поверхности после воздушного и вакуумного отжига на изменение концентрации водорода в металле в процессе эксплуатации при повышенных температурах, а также воздействие температур отжига на сопротивляемость замедленному разрушению и циклическую долговечность различных участков зоны термического влияния сплава ОТ4.

Аргондуговой сваркой сваривали листы встык технического титана ВТ1-0 толщиной 1,5 мм. После сварки производили воздушный отжиг по режимам 400-650 °С, 1 ч. и вакуумный отжиг по режиму 550 °С, 1 ч. при остаточном давлении не более $6,65 \cdot 10^{-2}$ Па. Различные условия эксплуатации имитировали вылёживанием сваренных и отожжённых образцов в течение 1000-2500 часов в сухой и влажной атмосфере при 30, 50 и 100 °С.

Выявлено, что температура отжига в интервале 400...650 °С не оказывает заметного влияния на содержание водорода.

Особый интерес вызывает вопрос, в какой мере зависит процесс наводороживания от наличия интерференционно окрашенных плёнок, формирующихся после отжига сварных соединений.

В работе измеряли концентрацию водорода после воздушного (470-550 °С, 1 час.) и вакуумного (550 °С, 1 час.) отжига и длительного (до 2500 часов) вылёживания в сухой атмосфере.

Не обнаружено заметного влияния температуры воздушного отжига на содержание водорода в металле.

Концентрация водорода на глубине 30-40 мкм после вылёживания в сухой атмосфере при 30 °С в течение 100 часов составила $5 \cdot 10^{-3}$ % по массе, а после 2000 часов – $7,8 \cdot 10^{-3}$ % по массе, что, по-видимому, объясняется диффузией водорода с поверхности в глубь металла.

Принципиально важно, что образцы после вакуумного отжига при 550 °С, 1 час., проявили большую склонность к насыщению водородом в сравнении с воздушным отжигом (см. рис.1).

Таким образом, наличие интерференционно окрашенных оксидных плёнок, формирующихся на поверхности сварных титановых изделий, не приводит к росту концентрации водорода в металле. Более того, в условиях длительной эксплуатации состояние поверхности после вакуумного отжига, характеризующееся отсутствием видимых интерференционно окрашенных оксидных плёнок, приводит к большему насыщению водородом титана в сравнении с состоянием поверхности после воздушного отжига, характеризующееся наличием оксидных плёнок с цветами побежалости.

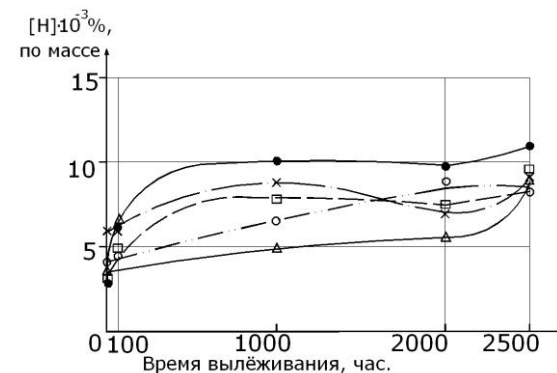


Рис.1. Зависимость содержания водорода (без зачистки) в сварных соединениях титана ВТ1-0 от времени вылёживания в сухой атмосфере:

Вылёживание при 30 °С после часового отжига: х – без отж.; о – возд. 470 °С; Δ – возд. 510 °С; □ – возд. 550 °С; ● – вакуумный 550 °С

Изучали влияние температур отжига на сопротивляемость замедленному разрушению металла различных участков зоны термического влияния сплава ОТ4. Цилиндрические заготовки, вырезанные из прутка, подвергали в целях имитации металла различных участков ЗТВ ускоренному нагреву в установке ТГВ-1М со скоростью ~ 300 °С/с до температур $T_{\text{ун}} = 800-1400$ °С при остаточном давлении ~1,33 Па. Далее заготовки подвергали часовому отжигу при температурах 450-660 °С, и в заключение вытачивали образцы для испытаний.

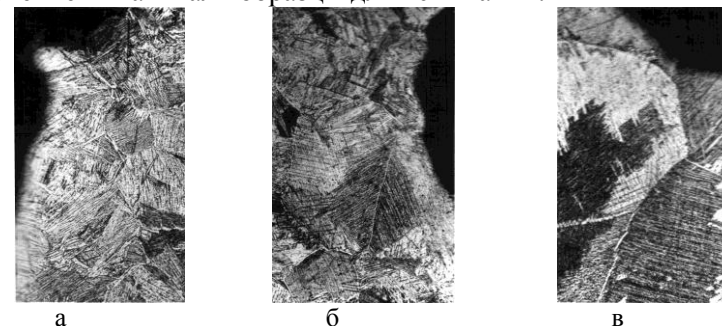


Рис. 2. Микроструктура образцов сплава ОТ4 после ускоренного нагрева до 800 (а), 1000 (б) и 1400 °С (в) в районе излома. $\times 100$

Содержание водорода в образцах не превышало 0,006 % (по массе). σ_d для исследованных типов микроструктур (см. рис. 2) снижается (см. рис. 3) с повышением температуры отжига от 450 до 660 °С.

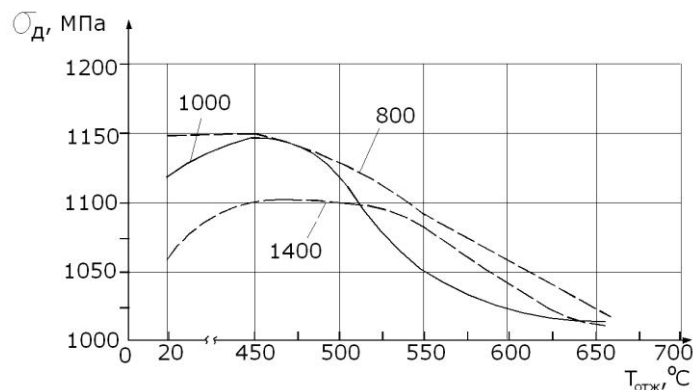


Рис.3. Расчётные зависимости σ_d образцов сплава ОТ4 после ускоренного нагрева до 1000 °С от температуры отжига

Для образцов, подвергнутых ускоренному нагреву выше полиморфного превращения ($T_{ун} = 1000$ и 1400 °С), наибольшая σ_d зафиксирована после отжига при 450 °С. Это можно объяснить эффектом термического упрочнения сплава по механизму дисперсионного твердения при распаде метастабильных фаз. Образцы после $T_{ун} = 1400$ °С показали более низкую σ_d в сравнении с $T_{ун} = 1000$ и 800 °С в неотожжённом состоянии и после низких температур отжига (450-500 °С). При более высоких температурах отжига при $T = 550-660$ °С тип микроструктуры образцов заметного влияния на σ_d не оказывает.

Обнаружено также, что эффект упрочнения после низкотемпературного отжига сходным образом проявляется для показателей длительной и кратковременной прочности надрезанных образцов: зависимости $\sigma_d = f(T_{отж})$ и $\sigma_B = f(T_{отж})$ имеют аналогичный характер (см. рис. 4) для исследованных типов микроструктур. При этом с ростом σ_B соответственно растёт и σ_d надрезанных образцов.

Таким образом, воздушный отжиг при $T = 450-470$ °С обеспечивает сварным титановым соединениям меньшую склонность к наводороживанию в процессе длительного вылёживания в сравнении с полным вакуумным отжигом и более высокую длительную прочность.

В четвертой главе рассматривали вопросы влияния термических циклов сварки и режимов последующего отжига на циклическую долговечность, ударную вязкость, кратковременную прочность и технологическую пластичность титановых сварных соединений.

Образцы для циклических испытаний выполняли с отверстием-концентратором $\varnothing 2,5$ мм с центром на расстоянии $1,0 \pm 0,15$ мм от ли-

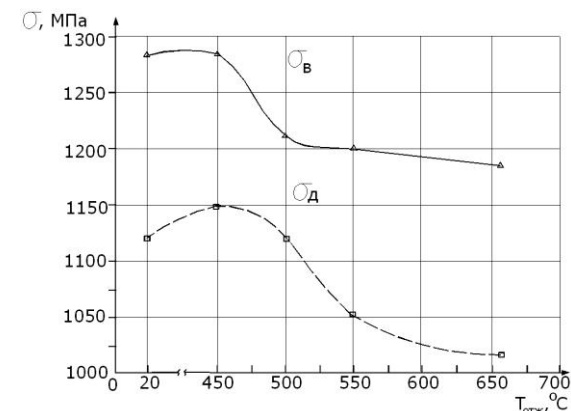


Рис. 4. Влияние температуры часового отжига на σ_B и σ_d образцов с надрезом сплава ОТ4 после ускоренного нагрева до 1000 °С

Установлено, что жёсткие режимы сварки в сравнении с мягкими обеспечивают повышение повторно-статической долговечности в 1,7 - 1,4 раза. Это может объясняться высокими скоростями охлаждения и благоприятными условиями для нагартовки металла ЗТВ; при мягких режимах сварки металл успевает в той или иной мере разупрочняться. Низкотемпературный отжиг заметно повышает циклическую долговечность сварных соединений: для сплава ОТ4 - только при жестком режиме сварки, для титана ВТ1-0 - при обоих режимах сварки.

Следует отметить, что больший рост долговечности для образцов из титана ВТ1-0 в сравнении со сплавом ОТ4 вероятно объясняется более высокой склонностью к деформационному упрочнению технического чистого титана. Этим же можно объяснить, что эффект дорекристаллизационного упрочнения для титана ВТ1-0 имеет место и при “мягких” режимах сварки, т.е. даже при относительно низких скоростях сварки металл ЗТВ нагартовывается в достаточной мере для проявления упомянутого эффекта. У сплава же ОТ4 эффект упрочнения при мягких режимах сварки практически не проявляется. Отжиг при повышенных температурах (650 °С) практически полностью снимает упрочнение и снижает циклическую долговечность до исходного уровня.

Для высокопрочного и низкопластичного сплава ВТ6ч отмечается слабый эффект упрочнения при низкотемпературном отжиге для

мягкого режима сварки и существенно более сильный – для жёсткого (см. рис. 5): при мягком режиме сварки фиксируется меньшее количество метастабильных фаз, и эффект упрочнения существенно меньше.

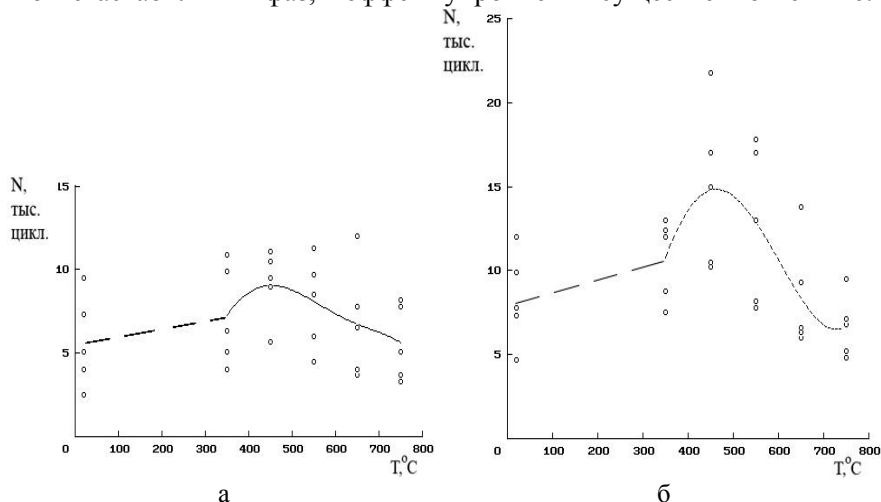


Рис. 5. Влияние температуры отжига на долговечность при повторно-статическом нагружении образцов сплава ВТ6ч, полученных: а - на мягких режимах сварки, б – на жёстких

Таким образом, используя преимущественно “жесткие” режимы сварки в сочетании с низкотемпературным отжигом, можно заметно повысить усталостные характеристики металла зоны термического влияния сварных соединений титановых сплавов.

Исследовали влияние термических циклов сварки и режимов последующего отжига на ударную вязкость сварных соединений сплава ВТ6ч, как наиболее высокопрочного из исследованных в работе. Стыковые сварные швы на листовых заготовках толщиной 0,8 мм имитировали сквозным проплавлением по мягким, промежуточным и жёстким режимам со скоростями сварки от 2,85 до 11,1 мм/с.

Скорость охлаждения w_0 в диапазоне от 1000 до 600 °C в ЗТВ на расстоянии 1 мм от линии сплавления составила для мягкого, среднего и жёсткого режимов сварки 50, 90 и 130 °C/с соответственно. После сварки производили воздушный отжиг заготовок по режимам 350-750 °C, 1 ч. Далее из заготовок вырезали образцы для испытаний на КСУ. Центр надреза располагали в центре шва, по линии сплавления и на расстоянии 1 мм от линии сплавления. В заключение проводили облагораживающее травление для полного удаления газонасыщенного слоя.

Для всех исследованных технологических вариантов фиксируется максимум ударной вязкости в диапазоне 400...550 °C, т. е. температуры максимума для ударной вязкости, кратковременной прочности и циклической долговечности практически совпадают (см. рис. 6).

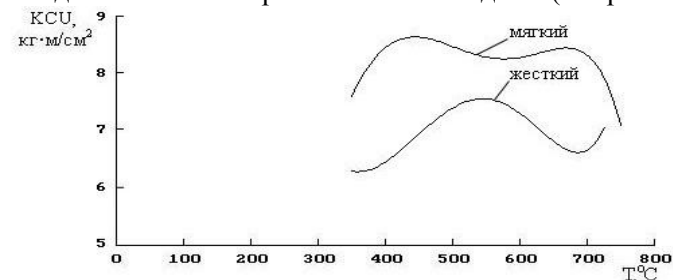


Рис. 6. Расчётные зависимости ударной вязкости шва от температуры отжига образцов сплава ВТ6ч при различных режимах сварки

Для жёсткого режима сварки максимумы ударной вязкости смещены в сторону более высокой температуры (550°C) в сравнении с мягким режимом (430°C): при больших скоростях охлаждения фиксируется соответственно и большее количество метастабильных фаз.

Характер разрушения для всех изученных вариантов сварки и отжига приблизительно одинаковый – вязкий. Только для жёсткого режима сварки при температуре отжига 750°C наблюдаются квазисколы, занимающие не более 15% от общей площади излома (см. рис. 7).

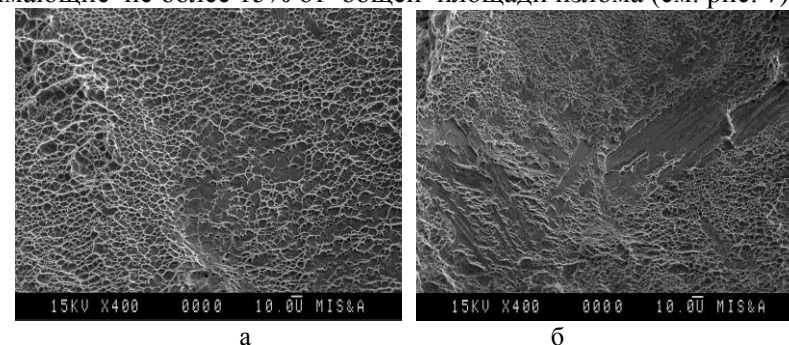


Рис. 7. Фрактографии излома после испытаний на ударную вязкость образца сплава ВТ6ч, выполненного ААрДЭС: а - на мягком режиме без отжига; б – на жёстком режиме после отжига при 750 °C, 1ч. Надрез на расстоянии 1 мм от линии сплавления. x100

Исследовали влияние $T_{отж}$ на технологическую пластичность сварных соединений титановых сплавов, полученных на мягких и жё-

стких режимах сварки. Для титана ВТ1-0 и сплава ОТ4 выявлен практически одинаковый характер пластичности от температур отжига для всех изученных режимов сварки. При $T \sim 450^\circ\text{C}$ выявляются максимумы пластичности, что можно связать с некоторым упорядочиванием структуры нагартованного в процессе сварки металла ЗТВ. Далее пластичность монотонно снижается по мере повышения температуры отжига до $\sim 700^\circ\text{C}$. Для сплава ВТ6ч независимо от термических циклов сварки при $400\text{--}450^\circ\text{C}$ фиксируются минимумы пластичности с последующим её восстановлением и слабо оформленными максимумами в районе температур $550\text{--}620^\circ\text{C}$. Минимумы пластичности можно объяснить дисперсионным твердением при распаде метастабильных фаз.

Изучали влияние температур отжига на σ_b сварных соединений для мягких и жёстких режимов сварки. Для сплавов ОТ4 и ВТ6ч после отжига при $420\text{--}490^\circ\text{C}$ фиксировали максимумы прочности; при повышении температуры отжига свыше 500°C для всех изученных сплавов прочность монотонно падает независимо от режима сварки. При этом жёстким режимам сварки в сравнении с мягкими соответствует несколько бóльшая прочность. Отмечено, что зависимости σ_b и циклической долговечности листовых соединений из титановых сплавов от температуры отжига имеют практически один и тот же характер.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Исследованы и обоснованы термические циклы технологического процесса изготовления тонкостенных сварных конструкций из титана и его сплавов псевдо α - и мартенситного типа с повышенными механическими характеристиками, основанные на использовании преимущественно жёстких режимов аргоно-дуговой сварки и последующего низкотемпературного отжига.

2. Изучено влияние температуры отжига на стойкость к замедленному разрушению металла зоны термического влияния сварных соединений. Выявлен эффект повышения стойкости к замедленному разрушению после низкотемпературного отжига различных типов структур металла зоны термического влияния сварных соединений сплава ОТ4, подвергавшихся нагреву свыше температуры полиморфного превращения, что может быть объяснено дисперсионным твердением при распаде метастабильных фаз. При этом для всех исследованных типов микроструктур длительная прочность снижается с повышением температуры отжига от 450 до 660°C .

3. Исследовано влияние наличия интерференционно окрашенных оксидных плёнок, формирующихся в процессе отжига, на склонность к наводороживанию титановых изделий в процессе эксплуатации. Установлено, что при наличии оксидных плёнок с цветами побежалости после воздушного отжига при температурах $400\text{--}600^\circ\text{C}$ практически не происходит рост концентрации водорода в металле при вылёживании, в то время как существенно более тонкие оксидные плёнки после вакуумного отжига приводят к заметно большему насыщению водородом титана.

4. При исходном содержании водорода в пределах допустимых норм низкотемпературный воздушный отжиг при $T = 450\text{--}470^\circ\text{C}$ обеспечивает сварным титановым соединениям меньшую склонность к наводороживанию в процессе длительного вылёживания в сравнении с полным вакуумным отжигом, а также более высокую стойкость к замедленному разрушению.

5. Установлены основные закономерности совместного воздействия термических циклов аргоно-дуговой сварки и последующего отжига на усталостную прочность сварных титановых конструкций. Выявлено, что жесткие режимы сварки в сочетании с низкотемпературным отжигом позволяют на $30\text{--}40\%$ повысить повторно-статическую долговечность металла зоны термического влияния сварных соединений титановых сплавов α -, псевдо α - и мартенситного класса. Для пластичных сплавов низкой прочности это можно объяснить преимущественно эффектом дорекристаллизационного упрочнения, а для высокопрочных – дисперсионным твердением при распаде метастабильных β - и α' -фаз, зафиксированных в процессе сварки.

6. Исследовано воздействие термических циклов сварки и последующего отжига на ударную вязкость высокопрочного сплава ВТ6ч. Выявлено, что жёсткие режимы сварки в сочетании с низкотемпературным отжигом, обеспечивающие повышение циклической долговечности, не приводят к потере ударной вязкости. Для всех исследованных технологических вариантов фиксируется максимум ударной вязкости в диапазоне $400\text{--}550^\circ\text{C}$, что практически совпадает с температурой максимумов для кратковременной прочности и циклической долговечности. С повышением температуры до режима полного отжига ударная вязкость монотонно снижается.

7. Выявленные закономерности и разработанные технологические рекомендации по выбору оптимальных термических циклов сварки и режимов термообработки позволяют наряду с повышением стой-

кости к замедленному разрушению, циклической долговечности и ударной вязкости сварных титановых конструкций принципиально упростить и сократить технологический процесс их изготовления и снизить производственные затраты. Это достигается заменой вакуумного отжига, требующего применения дорогостоящих вакуумных печей и оснастки из нержавеющей стали, на низкотемпературный воздушный отжиг в универсальных термических печах.

По материалам работы выпущено дополнение к отраслевой производственной инструкции НИАТ ПИ 1.4.1898-2003 и инструкции АНТК «Антонов» ТИ 148.00.5800.001.000И.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Зубарев В.Ю. Влияние мягких и жёстких режимов сварки на ударную вязкость сварных соединений титановых сплавов / В.Ю. Зубарев, Б.А. Коломенский, А.Б. Коломенский // Сварочное производство. – 2010. - № 4. – С. 9-11.

2. Сравнительное влияние режимов отжига на характеристики работоспособности зоны термического влияния сварных соединений сплава ОТ4 / М.Н. Шушпанов, Б.А. Коломенский, В.Ю. Зубарев и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2009. - № 4. - С. 39-42.

3. Пешков А.В. Повышение циклической долговечности сплава ВТ6 / А.В. Пешков, В.Ф. Селиванов, Б.А. Коломенский // Технология машиностроения. - 2006. - № 12. - С. 9-13.

Статьи и материалы конференций:

4. Коломенский Б.А. О влиянии режимов сварки на механические характеристики зоны термического влияния сварных соединений титановых сплавов / Б.А. Коломенский, В.В. Пешков, А.Б. Коломенский // Славяновские чтения: сб. материалов Рос. науч.-техн. конф. с Междунар. участием. – Липецк: ЛГТУ, 2004. - С. 186-188.

5. Оптимизация параметров отжига тонкостенных сварных конструкций из титановых сплавов / М.Н. Шушпанов, Б.А. Коломенский, В.В. Пешков и др. // Славяновские чтения: сб. материалов Рос. науч.-техн. конф. с Междунар. участием. – Липецк: ЛГТУ, 2004. - С. 397-402.

6. Коломенский, Б.А. Влияние мягких и жестких режимов аргонодуговой сварки на выносливость сварных соединений титановых сплавов / Б.А. Коломенский, В.В. Пешков, А.В. Дегтярёв // Сварка и

родственные технологии в машиностроении и электронике: межвуз. сб. науч. тр. - Воронеж: ВГТУ, 2005. - С. 141-145.

7. Влияние поверхностных оксидных плёнок, формирующихся в процессе сварки и отжига, на содержания водорода в сварных соединениях технического титана / Б.А. Коломенский, В.В. Пешков, В.Ю. Зубарев и др. // Сварка и родственные технологии в машиностроении и электронике: межвуз. сб. науч. тр. - Воронеж: ВГТУ, 2006. - С. 77-84.

8. Влияние режимов сварки и отжига на ударную вязкость сварных соединений титанового сплава / Б.А. Коломенский, В.В. Пешков, В.Ю. Зубарев и др. // Сварка и родственные технологии в машиностроении и электронике: межвуз. сб. науч. тр. - Воронеж: ВГТУ, 2007. - С. 8-13.

9. Коломенский Б.А. Влияние режимов отжига на стойкость к замедленному разрушению и циклическую долговечность металла ЗТВ титанового сплава ОТ4 / Б.А. Коломенский, В.Ю. Зубарев // Сварка и родственные технологии в машиностроении и электронике: межвуз. сб. науч. тр. - Воронеж: ВГТУ, 2007. - С. 19-24

10. Коломенский Б.А. К вопросу о низкотемпературном отжиге сварных титановых соединений / Б.А. Коломенский, В.Ю. Зубарев, А.Б. Коломенский // Сварка и родственные технологии в машиностроении и электронике: межвуз. сб. науч. тр. - Воронеж: ВГТУ, 2008. - С. 86-92.

11. Коломенский, Б.А. О воздействии режимов сварки на ударную вязкость титановых сварных соединений / Б.А. Коломенский, В.В. Пешков // Сборник трудов победителей конкурса на лучшую научную работу студентов и аспирантов. – Воронеж: ВГТУ, 2009. – С.113-114.

12. Заявка на изобретение N 2009 122123/02 от 09.06.2009 г. (положительное решение). Способ изготовления сварных листовых изделий из титановых сплавов / А.Б. Коломенский, В.Ю. Зубарев, А.В. Ткачёв, Б.А. Коломенский, М.Н. Шушпанов

Подписано в печать 2010 г.

Формат 60x84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 90 экз. Заказ №

ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»
394026, г. Воронеж, Московский просп., 14