



БЕЗДЕФОРМАЦИОННАЯ СВАРКА СТРИНГЕРНЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ20

**Б. Е. ПАТОН¹, Л. М. ЛОБАНОВ¹, В. В. ЛЫСАК¹, В. В. КНЫШ¹, В. И. ПАВЛОВСКИЙ¹,
В. П. ПРИЛУЦКИЙ¹, А. Н. ТИМОШЕНКО¹, П. В. ГОНЧАРОВ¹, ГУАНЬ ЦЯО²**

¹ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

² Ин-т авиационных технологий, г. Пекин, Китай. E-mail: guang@cae.cn

Представлены результаты комплекса проведенных исследований по разработке технологии сварки проплавными швами стрингерных панелей из титанового сплава ВТ20, обеспечивающей минимальные остаточные напряжения и деформации, а также высокие показатели их долговечности при циклических нагрузках. На масштабных образцах, имитирующих стрингерные панели, проплавные швы тавровых соединений выполняли тремя способами: электронно-лучевой, автоматической аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом по слою активирующего флюса и автоматической аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом погруженной дугой. Для устранения остаточных сварочных напряжений и деформаций применено предварительное упругое деформирование свариваемых элементов. Проведены испытания всех типов образцов на усталость при продольном циклическом растяжении. Определено влияние на их усталостную долговечность также термической обработки, ударной механической обработки и ремонтно-сварочных технологий. На основе результатов исследований масштабных образцов изготовлены и испытаны партии стрингерных панелей длиной 1200 мм. Проплавные швы, выполненные аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом по слою активирующего флюса с использованием предварительного упругого деформирования и высокочастотной механической проковки швов, обеспечивают более высокие показатели усталостной долговечности сварных стрингерных панелей из высокопрочного титанового сплава ВТ20 по сравнению с электронно-лучевой сваркой и аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом с погруженной дугой. Разработанная технология может быть принята для промышленного производства сварных стрингерных панелей из высокопрочных титановых сплавов. Библиогр. 14, табл. 1, рис. 13.

Ключевые слова: тонколистовые сварные конструкции, стрингерные ребристые панели, тавровые соединения, проплавной шов, остаточные напряжения и деформации, предварительное упругое деформирование, усталостная прочность, высокочастотная механическая проковка

Стрингерные панели из легких сплавов находят все более широкое применение в авиации, космической технике, судостроении и других отраслях промышленности. Ведущие авиастроительные фирмы уделяют повышенное внимание созданию новых и усовершенствованию существующих технологий изготовления несущих тонкостенных панелей из высокопрочных титановых сплавов. Характерным примером является применение в истребителях НПО «Сухой» стрингерных панелей из титанового сплава ВТ20 толщиной 2,5, длиной до 2000 мм с приваренными аргонодуговой сваркой ребрами жесткости высотой до 25 мм. После сварки панели в кондукторе из нержавеющей стали подвергаются термическому отжигу в электровакуумной печи для снятия остаточных напряжений и деформаций [1].

В исследовательском центре Langley (NASA) для изготовления подобных конструкций разработан метод сваркопайки. Этим методом Z-образные ребра жесткости из титанового сплава сначала привариваются к титановому листу точками через промежуточный слой алюминиевого припоя, а затем собранную конструкцию панели помещают в вакуумную камеру, где происходит процесс пайки [1].

Конструкции истребителя F-14 из титанового сплава изготавливаются с использованием электронно-лучевой сварки (ЭЛС), обеспечивающей высокие свойства соединения и производительность [2].

В любом случае, касается ли это конструкций из титановых или иных сплавов, при стремлении авиастроителей перейти от клепаных или фрезерованных тонколистовых ребренных конструкций к конструкциям с приваренными ребрами жесткости, технологи сталкиваются с необходимостью минимизации влияния таких отрицательных факторов как остаточные напряжения и деформации, которые присутствуют в сварочном процессе и существенно снижают служебные характеристики изделия прежде всего точность и долговечность [3].

Для решения проблемы повышения точности и усталостных характеристик сварных тонколистовых конструкций в ИЭС им. Е. О. Патона разработаны такие методы, как предварительное упругое деформирование (ПУД) [4–7] и высокочастотная механическая проковка (ВМП) [8], которые в настоящее время успешно применяются для



судоостроительных конструкций из алюминиевых сплавов и сталей [9]. Следует отметить, что в отличие от других способов поверхностного пластического деформирования, например, дробеструйной обработки, особенность ВМП в воздействии на узкую зону сплавления шириной 4...7 мм. Это создает сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое зоны сплавления и уменьшает концентрацию напряжений вследствие сглаживания перехода от шва к основному металлу.

В работе [9] экспериментально подтверждена эффективность применения ПУД для регулирования остаточных напряжений и деформаций при сварке тонколистовых конструкций из титановых сплавов.

Как правило, в тонкостенных конструкциях соединение листа с ребрами жесткости выполняется сваркой плавлением со стороны ребра. При этом в большинстве случаев используются двусторонние угловые швы, выполняемые автоматической аргодуговой сваркой вольфрамовым электродом (ТИГ), ЭЛС или лазерной сваркой. Перспективной, но и более сложной является технология выполнения проплавных швов в таких конструкциях, когда тавровое соединение производится за один проход только со стороны листа путем его провара по толщине и частичного провара ребра.

Однако при дуговой сварке процессы образования сварочной ванны, нагрев околошовной зоны и проплавление металла в значительной мере зависят от теплопередачи и соответственно теплопроводности металла. Поэтому при обычной дуговой сварке очевидны проблемы с получением в тонколистовых панелях качественных проплавных швов с относительно большой глубиной, неширокими зонами остаточных напряжений растяжения и минимальными деформациями коробления.

Процессы образования и формирования проплавного шва по сравнению со стыковым существенно отличаются. В значительной мере эта задача усложняется при использовании титановых сплавов вследствие их теплофизических и физико-механических свойств.

Известно, что основным видом металлургических дефектов сварных соединений титановых сплавов, полученных как дуговыми, так и лучевыми способами сварки, являются поры. В значительной степени порообразование в металле шва можно уменьшить с помощью тщательной предсварочной подготовки поверхностей свариваемого металла в зоне сварки. Согласно статистическим данным о дефектах в сварных тавровых соединениях из титанового сплава ВТ20 наиболее часто приходится иметь дело с порами небольшого размера (0,1...0,4 мм).

Наличие пор в швах мало влияет на поведение сварных соединений при статических нагрузках, но существенно уменьшает длительность их эксплуатации в условиях циклических нагрузок, резко снижая предел усталости. При циклических напряжениях растяжения очаги разрушения сплавов титана преимущественно возникают от внутренних дефектов шва. Наибольшая долговечность наблюдается у швов с тщательно обработанными плавными переходами от усиления к основному металлу.

Известно, что процесс деформирования при циклических нагрузках вызывает направленную диффузию водорода в зону, прилегающую к поре, с повышенным напряжением. Зародыш трещины может возникнуть не только с внутренней поверхности поры, но и в близлежащей области. При этом рост концентрации водорода на поверхности развивающейся трещины у поры на порядок выше, чем на некотором расстоянии от поры.

Основное влияние на долговечность сварных швов оказывает не столько размер пор, сколько зона их расположения. Поры вдали от концентраторов напряжений снижают долговечность в 2...3 раза, в то время как поры в зоне концентрации напряжений снижают долговечность на порядок [10].

Замечено, что применение поверхностного наклепа задерживает развитие усталостных очагов разрушения от близких к поверхности дефектов и увеличивает долговечность сварного соединения.

Успешное применение технологии сварки с проплавными швами в панельных конструкциях невозможно без разработки специальных мер, которые обеспечивали бы наряду с высоким качеством швов необходимые прочностные и усталостные характеристики сварных соединений и конструкций, низкие остаточные сварочные деформации и напряжения, высокую точность изготовления изделия.

Целью настоящего исследования явилась разработка технологии изготовления сварных стрингерных панелей из титанового сплава ВТ20 с обеспечением их высоких точности и усталостных характеристик.

Титановый сплав ВТ20 относится к псевдо- α' -сплавам со следующим содержанием легирующих элементов: 5,5...7,0 % Al, 1,5...2,5 % Zr, 0,5...2,0 % Mo, 0,8...2,5 % V. Коэффициент стабильности β -фазы в этом сплаве в отожженном состоянии в зависимости от содержания легирующих элементов составляет 5...7 %.

Фазовые превращения в сплаве при охлаждении в процессе сварки протекают по мартенситной кинетике, наблюдается $\beta \rightarrow \alpha'$ -превращение. Повышение скорости охлаждения приводит к измельчению образующейся в металле шва и зоне



термического влияния (ЗТВ) α' -фазы, однако это не существенно влияет на свойства соединений при статических испытаниях.

Образующаяся α' -структура незначительно легирована β -стабилизаторами, поэтому она по своим свойствам близка обычной α' -структуре с соответствующим легированием. Не изменяется структура и в процессе длительного низкотемпературного нагрева. Поэтому отжиг в целях стабилизации структуры и упрочняющая термическая обработка (ТО) после сварки неэффективны. Целесообразно проведение отжига для снятия остаточных сварочных напряжений, уменьшения концентрации напряжений в месте перехода от основного металла к сварному шву.

Следует отметить, что в настоящее время на предприятиях, изготавливающих сварные конструкции из титановых сплавов, отжиг остается основным способом, используемым для устранения остаточных напряжений и деформаций. При этом серьезными недостатками этого технологического процесса являются большие энергозатраты, ограниченность применения из-за габаритов обрабатываемых деталей, а также большая материалоемкость оснастки, применяемой для закрепления отжигаемых конструкций. В связи с этим в настоящих исследованиях преследовалась дополнительная цель – поиск альтернативы операции отжига.

Прочностные свойства металла шва при сварке сплава ВТ20 близки свойствам основного металла (ОМ), а незначительное снижение пластичности связано с особенностью формирования литой структуры. Размер зерна в металле шва зависит от погонной энергии, вводимой при сварке. При мед-

ленном охлаждении сварного соединения после сварки пластичность литого металла шва снижается в результате увеличения размеров зерен. В то же время высокие скорости охлаждения приводят к снижению пластичности вследствие образования мелкоугольчатой β -структуры, в которой отсутствует α' -фаза [11].

Разработка технологии бездеформационной сварки стрингерных панелей из сплава ВТ20 проводилась в два этапа. На первом на экспериментальных сварных тавровых образцах исследовали возможные способы приварки проплавным швом ребра жесткости к листу в комбинации с различными технологическими приемами, направленными на повышение точности изготовления тавровых соединений. На втором этапе на основе отработанных технологических вариантов была изготовлена партия ребристых панелей, которые подвергали испытаниям при циклическом растяжении для подтверждения возможности получения крупногабаритных авиационных панелей, отвечающих эксплуатационным требованиям, без использования ТО.

Сварные тавровые образцы и ребристые панели для исследований имели геометрические параметры, соответствующие параметрам конструкций, которые применяются в авиационной технике. При выполнении задач первого этапа осуществляли сварку тавровых образцов с одним ребром жесткости (рис. 1, а), из которых вырезали образцы лопаточного типа (рис. 1, б) для испытаний на усталость.

Конструкция ребристой панели второго этапа исследований с четырьмя приваренными стрингерами

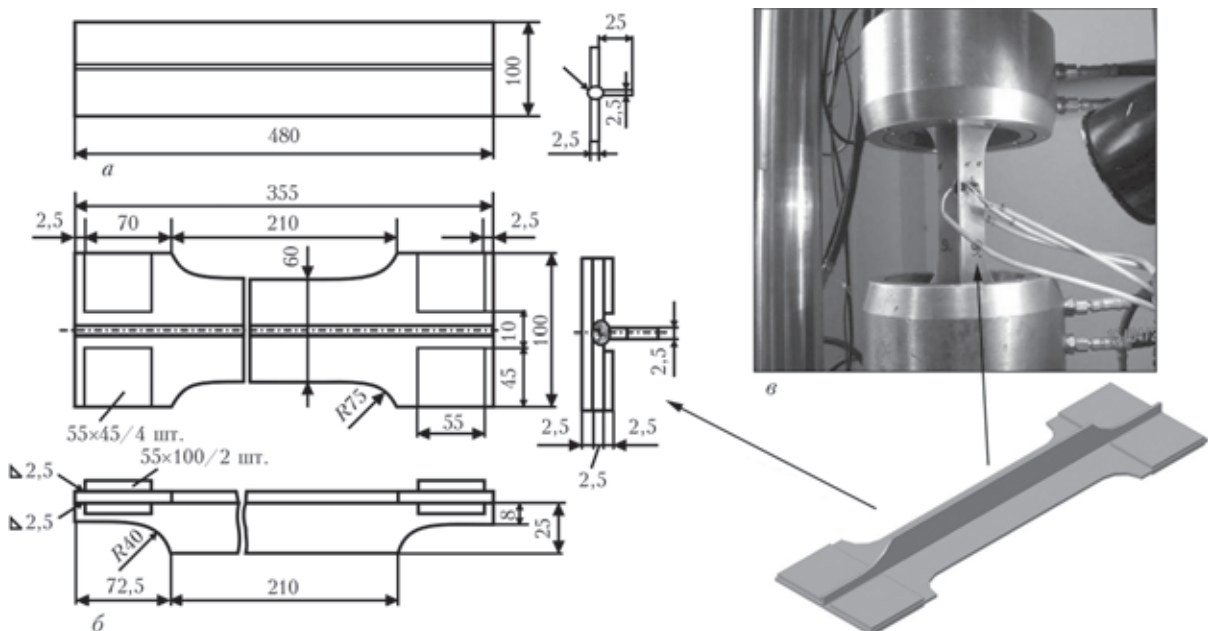


Рис. 1. Сварной тавровый образец из сплава ВТ20 первого этапа исследований: а — эскиз образца; б — эскиз образца лопаточного типа; в — образец для испытаний на усталость, защемленный в машине

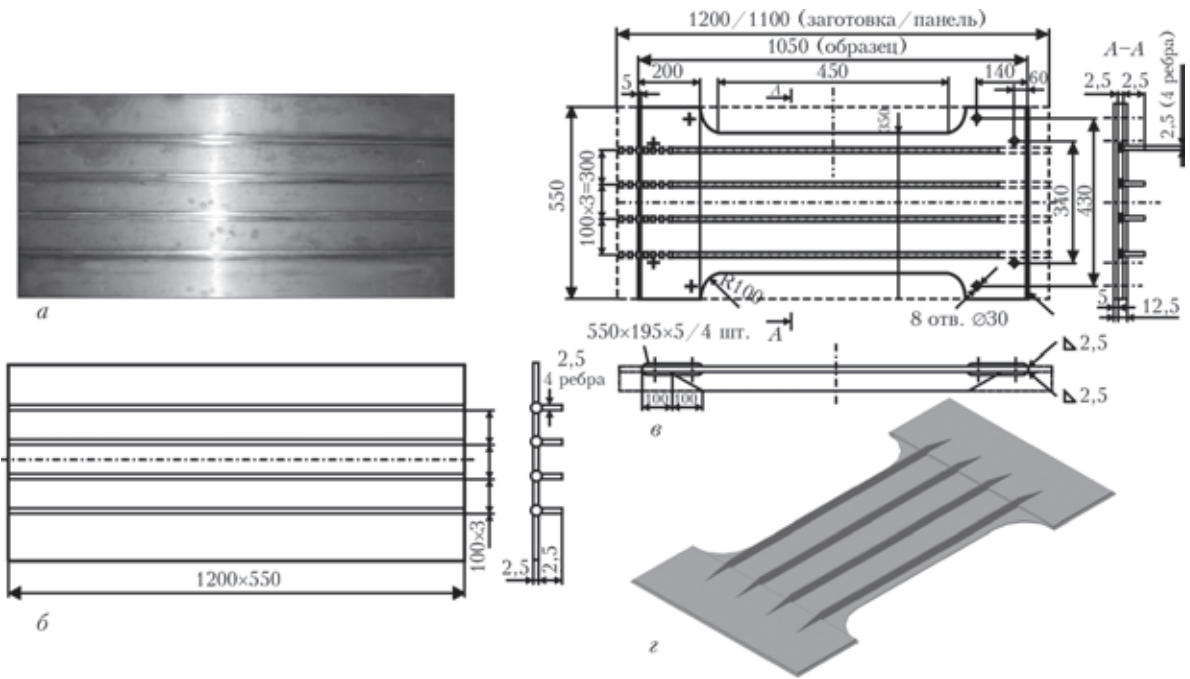


Рис. 2. Сварная ребристая панель из сплава ВТ20 второго этапа исследований: *а* — общий вид; *б* — эскиз панели; *в* — эскиз образца лопаточного типа; *г* — общий вид образца для испытаний на усталость

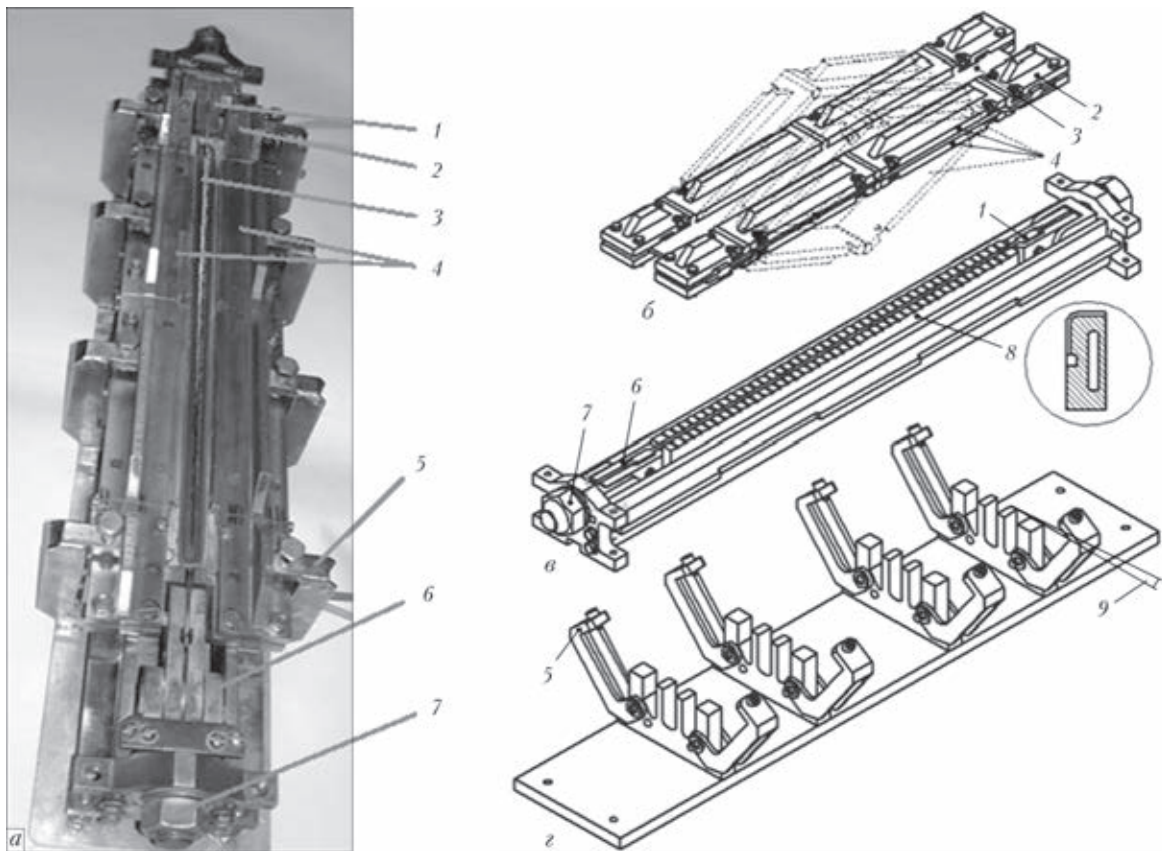


Рис. 3. Силовая сборочная оснастка для сварки тавровых образцов в условиях ПУД: *а* — общий вид оснастки с образцом после сварки; *б* — узел растяжения листа; *в* — узел растяжения ребра; *г* — узел стапеля; 1, 2 — захват соответственно ребра и листа; 3 — лист таврового образца; 4 — ломающийся рычаг; 5 — прижимы; 6 — тяга домкрата; 7 — гайка домкрата; 8 — медная водоохлаждаемая подкладка; 9 — угол поперечного изгиба листа

рами и образец лопаточного типа из нее для испытаний на усталость приведены на рис. 2.

Силовая сборочная оснастка (рис. 3) первого этапа работ предназначена для изготовления

тавровых образцов и обеспечивает возможность создания предварительного упругого растяжения свариваемых листов и ребер, а также одновременного изгиба листа в поперечном направлении. Она

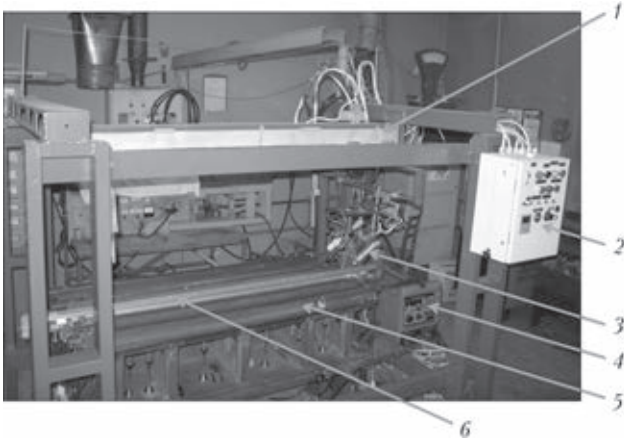


Рис. 4. Лабораторное оборудование для аргодуговой сварки ребристых панелей в условиях ПУД: 1 — портал с тележкой для передвижения сварочной головки; 2 — блок управления; 3 — сварочная головка; 4 — источник питания; 5 — силовой сборочный стенд ПУД свариваемых деталей; 6 — сварная панель

состояла из трех функциональных узлов: растяжения листа, растяжения ребра, стапеля. Узел растяжения листа таврового образца (см. рис. 3, б) выполнен по принципу ломающегося рычага, длина которого больше расстояния между торцами противоположных захватов на величину требуемого растяжения листа.

Применение в конструкции силовой оснастки ломающегося рычага позволило обеспечить ее минимальные габариты и массу, вследствие чего она легко совмещалась без дополнительной переналадки со сварочным оборудованием для различных способов сварки. Причем оснастка позволяла осуществлять неразрушающий контроль качества сварного шва и сразу же его ремонт при обнаружении дефекта непосредственно после сварки без разборки и в растянутом состоянии.

В узле растяжения ребра таврового образца (см. рис. 3, в) растягиваемое ребро находится между двумя траверсами, воспринимающими нагрузку, и растяжение образца создается с помощью винтового домкрата и передается на ребро через его захваты.

Узел стапеля (см. рис. 3, г) выполнен в виде жесткого основания с возвышающимся ложементом, который служит опорой для узлов растяжения и имеет форму обратного выгиба листа в поперечном направлении, а его продольные направляющие являются прямолинейными.

В положении для сварки лист плотно прижимался к ложементу, а ребро — к листу. Кроме того, к листу и ребру прижимались медные водоохлаждаемые подкладки δ , служащие для формирования галтелей корня шва и его газовой защиты.

Силовая сварочная оснастка второго этапа работ, предназначенная для изготовления стрингерных панелей, аналогичная и состоит из тех же уз-

лов, что и оснастка для образцов, но с той лишь разницей, что в ее составе четыре узла растяжения ребер, которые одновременно устанавливаются снизу листа панели.

Применялось также лабораторное оборудование для аргодуговой сварки проплавленными швами тавровых соединений ребристых образцов и панелей в условиях ПУД (рис. 4). В сварочной установке использован источник питания Fronius Magic Ware 3300 и сварочная головка с улучшенной газовой защитой дуги и остывающего участка шва, которая перемещалась трехкоординатным манипулятором. Управление сварочной установкой осуществлялось посредством программируемого контроллера. В состав установки входили также водоохлаждающее и газобаллонное оборудование.

На первом этапе исследований были выбраны три способа сварки: автоматическая аргодуговая неплавящимся электродом по слою флюса (ТИГ-Ф), автоматическая аргодуговая неплавящимся электродом с погружением дуги (ТИГ-П) и ЭЛС. Выбор данных способов был определен с учетом опыта работ ИЭС им. Е. О. Патона по сварке титановых сплавов и необходимости обеспечения полного проплавления листа, надежного его сплавления с ребром, равномерного формирования галтельных переходов со стороны ребра, а также получения усиления шва с лицевой стороны без подрезов.

В связи с некоторыми физическими свойствами титана возникают определенные трудности при сварке, связанные с обеспечением качественного формирования корня проплавленного шва по обе стороны ребра с плавным сопряжением поверхностей ребер и листа. Это обусловлено, с одной стороны, высоким коэффициентом поверхностного натяжения жидкого титана (в 1,5 раза больше чем у алюминия), что затрудняет свободное провисание и формирование твердеющего металла на подкладке. С другой стороны, низкая вязкость жидкого титана способствует интенсификации гидравлических процессов в сварочной ванне, что может не только оказывать влияние на структуру шва и образование пор в нем, но и влиять на проплавленную способность дуги.

Поэтому при сварке титана поверхностной дугой (ТИГ) низкий коэффициент теплопроводности титана и невысокий коэффициент использования тепловой мощности предопределяют получение широких швов с нежелательно малым коэффициентом формы шва (отношение ширины проплавления к глубине шва). Для получения требуемого полного проплавления соединения при этом способе необходимо значительное увеличение сварочного тока и большое тепловложение.



Способ ТИГ-П предназначен для увеличения глубины проплавления и отличается от способа поверхностной дугой тем, что дуга, а также конец электрода погружены в ванну ниже поверхности листа, что существенно осложняет формирование сварного соединения. Условия горения самой дуги и движение металла в ванне принципиально отличаются от сварки поверхностной дугой. Фактически вся дуга горит в конусном углублении, стенки которого омывают потоки расплавленного металла. Он переносится преимущественно от передней части ванны к ее задней части, где происходит его остывание. Причем при сварке погруженной дугой жидкий металл сварочной ванны недостаточно вовлекается в общее перемешивание, что оказывает влияние на процессы формо- и порообразования.

Погружением достигается максимальная эффективность использования тепла сварочной дуги, интенсифицируются гидродинамические процессы и теплообмен в сварочной ванне, однако резко возрастают тепловая и токовая нагрузки на конец электрода. При заниженных значениях тока или завышенных скоростях процесс сварки характеризуется частыми кратковременными короткими замыканиями и соответственно резкими колебаниями тока. Они вызывают изменение формы электрода из-за токовой эрозии его острия. Вследствие этого происходят непредсказуемые скачки параметров сварочного процесса и некачественное формирование сварного таврового соединения. Ширина шва и глубина проплавления изменяются. По мере продвижения дуги частота кратковременных коротких замыканий растет, а общее напряжение на дуге падает. При этом способе имеется высокая вероятность получения нестабильного результата при одинаковых условиях сборки и параметрах режима сварки. Процесс весьма чувствителен к временным сварочным деформациям и при незначительных деформациях листа, как правило, прекращается из-за общего короткого замыкания, гашения дуги и «замораживания» электрода. В связи с этим использование ТИГ-П при производстве конструкций с протяженными сварными швами ограничено.

Способ ЭЛС характеризуется сравнительно высокой концентрацией энергии и, как правило, применяется для сварки больших толщин. При выполнении проплавленных тавровых соединений в отличие от дуги электронный луч достаточно легко прорезает металл листа, обеспечивая гарантированное расплавление ребра, которое находится под листом [12]. В то же время необходимость формирования радиусов галтелей (до 2,0 мм) снизу под листом по обе стороны ребра накладывает весьма жесткие ограничения на подбор режимов,

поскольку влечет за собой необходимость расширения ванны с лицевой стороны соединения. Широкую ванну на тонком листе трудно удержать в равновесии и в результате поверхность шва формируется чешуйчатой, с подрезами. Высока также склонность к прожогам и порам у корня шва. Для устранения дефектов в этом случае необходимо дополнительное разглаживание шва повторным проходом расфокусированного луча.

Анализ результатов подбора параметров режима ЭЛС тавровых соединений из сплава ВТ20 проплавленными швами показывает следующее. Лучшие условия для формирования плавных галтелей снизу шва достигаются при режимах с глубоким проникновением луча в ребро и большими тепловложениями, которые близки к процессу резки листа. Однако лучшее формирование поверхности шва с лицевой стороны достигается при режимах, близких к процессу разглаживания. Выбор оптимального режима заключается в нахождении обоснованного компромисса между этими процессами.

Способ ТИГ-Ф предназначен для выполнения швов на титановых сплавах толщиной 0,8...6 мм [13]. Перед сваркой на поверхность свариваемых деталей наносится слой флюса. Сварка выполняется за один проход без разделки кромок как с присадочной проволокой, так и без нее. Введение в зону сварки галогенидных флюсов вызывает контрагирование дуги, обусловленное физическими процессами, которые происходят в столбе дуги. При этом принципиально изменяются условия формирования сварного соединения и расширяются технологические возможности сварки ТИГ-Ф по сравнению со сваркой поверхностной дугой.

Основные преимущества способа сварки ТИГ-Ф – это увеличение глубины проплавления при значительном снижении погонной энергии, уменьшение ширины шва и ЗТВ, предупреждение пористости. Так, погонная энергия снижается в 1,5...2 раза, ширина швов характеризуется малым значением коэффициентов формы шва. Металлургическая обработка металла сварочной ванны жидким шлаком практически полностью предотвращает появление пор в соединении при сварке различных титановых сплавов. Это связано с тем, что в результате прохождения металлургических реакций в сварочной ванне между флюсом и титаном происходит химическое связывание водорода. Водород, растворенный в жидком металле сварочной ванны, связывается фтором в гидридофториды, остающиеся в металле шва в виде микроскопических шлаковых включений. Поскольку механические свойства металла шва определяются состоянием α - и β -фаз, а не меж-



Способ сварки	Скорость сварки, м/ч	Диаметр присадки, мм	Защита	Ток пучка, мА	Ускоряющее напряжение, кВ	Ток фокусировки, мА	Амплитуда развертки, мм	Частота развертки, Гц	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В
ЭЛС	14	1,0	Вакуум 10^{-5}	70	28	80	8	380	-	-
ТИГ-Ф	18	1,0	Аргон	-	-	-	-	-	195	14,0...14,5
ТИГ-П	17	1,0	->-	-	-	-	-	-	250	11,2...11,5

фазными прослойками, то способ ТИГ-Ф обеспечивает достаточно высокий уровень свойств сварных соединений.

Кроме того, при этом способе сварки увеличивается сварочный ток сверх оптимального на 20...25 %, что приводит к росту ширины обратного формирования (на 30...50 %) при незначительном увеличении (на 7...12 %) ширины шва. Эта особенность позволяет эффективно использовать данный способ для получения сварных тавровых соединений путем сквозного проплавления листа с одновременным расплавлением ребра.

При проведении первого этапа исследований на тавровых образцах с проплавными швами были отработаны оптимальные режимы сварочного процесса. Указанные режимы для каждого из трех способов сварки для сплава ВТ20 приведены в таблице.

Микроструктуры сварных соединений, выполненных указанными способами сварки, достаточно однотипны. Как видно из рис. 5, микротрещины и поры в сварном шве и металле ЗТВ отсутствуют. Следует отметить, что протяженность ЗТВ колеблется в пределах 2,5...3 мм, ширина шва составляет 6...7 мм. В сварном шве от зоны сплавления к центру сварного соединения кристаллизуются неравноосные зерна, преимущественно столбчатые кристаллиты, вытянутые в направлении теплоотвода. В центральной части соединения образуются кристаллиты, близкие равноосной форме, которые срастаются по оси шва под углами примерно 60...90°. Зерна в шве однородные по размеру.

Для усиления шва использовали присадочную проволоку марки ВТ1-00 (технический титан) диаметром 1,0 мм. В экспериментах первого этапа

было исследовано влияние введения в сварочную ванну этой присадочной проволоки на уменьшение содержания легирующих элементов в сварном шве. Количественная оценка изменения уровня легирования металла шва была проведена с помощью рентгеноспектрального анализа. Содержание легирующих элементов, определенное в отдельных точках, изменилось в следующих пределах: 5,91...6,33 % Al; 1,65...1,84 % Zr; 0,77...1,24 % Mo; 1,06...1,17 % V, что соответствует содержанию легирующих элементов в сплаве ВТ20.

Для уменьшения сварочных напряжений и деформаций применяли ПУД свариваемых элементов. Лист и ребро подвергали продольному растя-

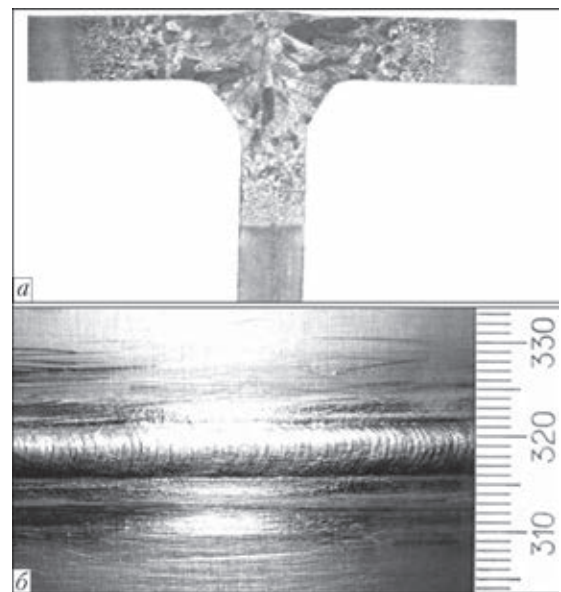


Рис. 5. Макрошлиф (а) и внешний вид (б) с лицевой стороны сварного таврового соединения из сплава ВТ20 с толщиной элементов 2,5 мм, полученного способом ТИГ-Ф по флюсу АНТ-25А

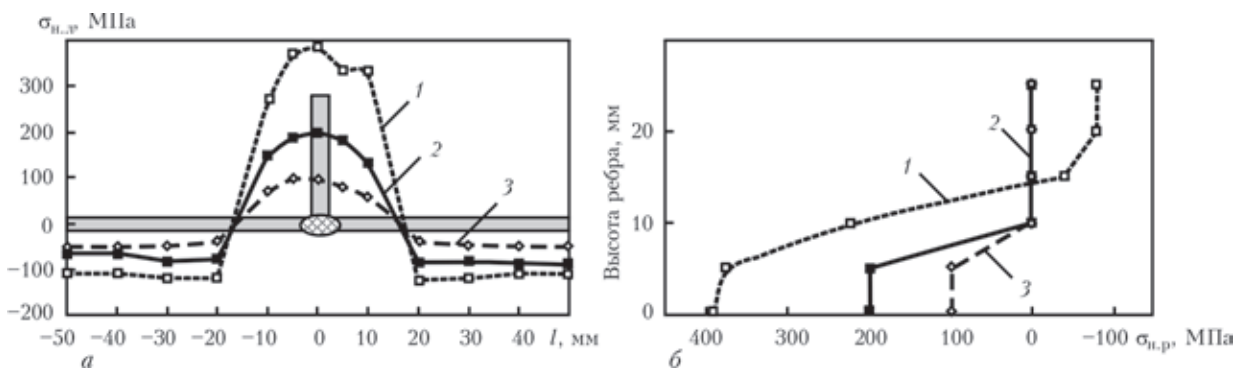


Рис. 6. Эпюры распределения продольных остаточных напряжений в поперечном сечении тавровых образцов из сплава ВТ20 с проплавным швом, выполненным ЭЛС, в пластине (а) и ребре (б): 1 — сварка образца в оснатке без растяжения; 2 — сварка образца в условиях ПУД $\sigma_{н,л} = 220$ МПа и ребра $\sigma_{н,р} = 250$ МПа; 3 — сварка образца в условиях ПУД $\sigma_{н,л} = \sigma_{н,р} = 450$ МПа

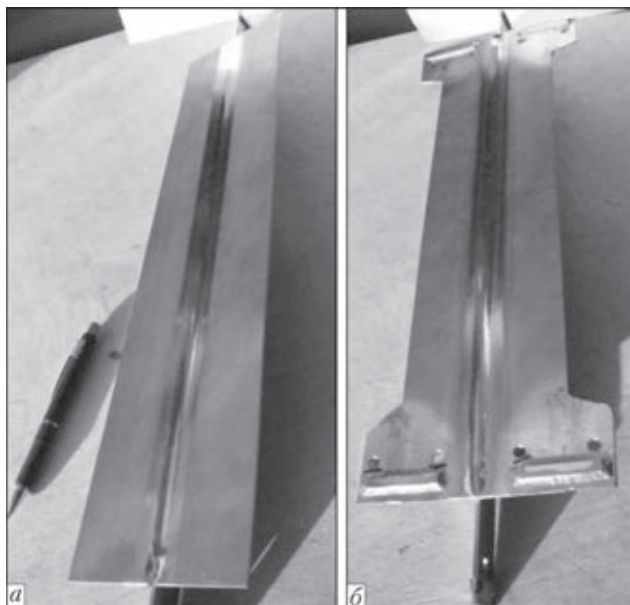


Рис. 7. Внешний вид тавровых образцов, изготовленных ЭЛС без применения (а) и с применением ПУД листа (б) $\sigma_{н.л} = 220$ МПа и ребра $\sigma_{н.р} = 250$ МПа

жению с заданным уровнем напряжений. Кроме того, лист подвергали обратному по отношению к угловым сварочным деформациям изгибу в поперечном направлении.

Для установления оптимальных параметров ПУД были выполнены эксперименты по определению зависимости остаточного напряженно-деформированного состояния образца от предварительных напряжений растяжения листа и ребра. Из рис. 6 видно, что остаточные сварочные напряжения значительно уменьшаются с возрастанием предварительных напряжений растяжения до $0,5\sigma_{0,2}$. Остаточные сварочные деформации формирования тавровых образцов также уменьша-

ются при возрастании начальных растягивающих напряжений. При достижении уровня начальных напряжений $(0,3 \dots 0,35)\sigma_{0,2}$ остаточные сварочные деформации коробления практически соответствуют значениям деформаций исходных заготовок листов.

Обратный поперечный изгиб листа применяется с целью полного устранения угловых остаточных деформаций. Обратный изгиб, определенный экспериментально, составлял до 0,75 значения остаточных угловых деформаций, получаемых при сварке образца в свободном состоянии.

У тавровых образцов (рис. 7), полученных ЭЛС без применения ПУД на оптимальных параметрах, видны значительные деформации кручения, а также продольного и поперечного изгиба, на образцах с применением ПУД указанные деформации отсутствуют. При сварке образцов способами ТИГ-П и ТИГ-Ф в условиях ПУД и без него получены аналогичные результаты.

Пять образцов, выполненных с применением указанных трех технологий сварки, подвергли ТО. В соответствии с рекомендациями, принятыми при изготовлении элементов сварных авиационных конструкций из титановых сплавов, ТО производили в электрической печи в вакууме с автоматическим регулированием температуры (рис. 8). Для предотвращения коробления образцов во время ТО применяли фиксирующую оснастку из нержавеющей стали. Используемый режим ТО был следующим: нагрев до 650°C в вакууме $1,33 \cdot 10^{-1}$ МПа, выдержка 2 ч, остывание вместе с печью в вакууме. Затем все образцы были обработаны ВМП в целях повышения сопротивления усталости (рис. 9). ВМП образцов

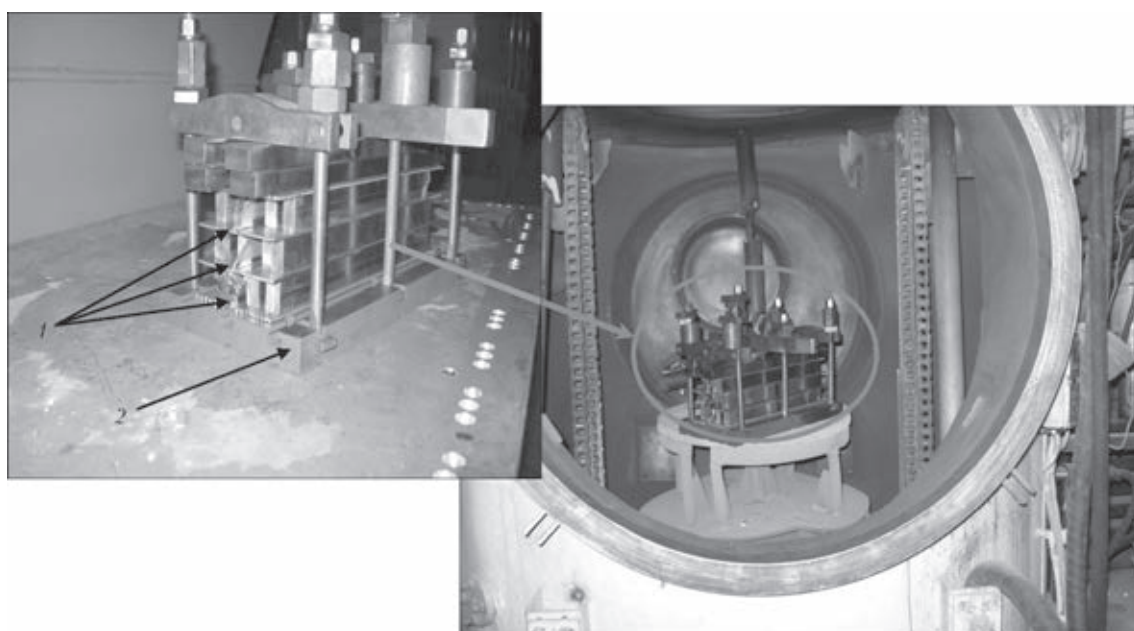


Рис. 8. Термообработка сварных образцов из сплава ВТ20 в электровакуумной печи: 1 — тавровые образцы; 2 — оснастка для отжига в печи



заклучалась в проковке зон плавления сварного соединения как по листу, так и ребру с помощью ультразвукового ударного инструмента, рабочей частью которого были твердосплавные бойки с радиусными закруглениями на концах.

Актуальной задачей при изготовлении тонкостенных конструкций из легких сплавов является разработка ремонтно-сварочных технологий и оценка их влияния на прочность и долговечность сварных соединений. Для тавровых соединений, выполненных проплавным швом, характерны два вида дефектов — это отсутствие плавного перехода (галтели) от листа к ребру, а также наличие внутренних дефектов шва (пор, включений, микротрещин). В этой связи проведена оценка эффективности двух технологий ремонта. Для устранения первого вида дефектов осуществляли разглаживание галтели аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, для устранения второго вида сначала высверливали дефекты с лицевой стороны шва, а затем заправляли аргонодуговой сваркой с использованием присадочной проволоки ВТ20 диаметром 2 мм. Ремонтную сварку выполняли в специальной оснастке, обеспечивающей заземление образца и газовую защиту поверхностей листа и ребра. После ремонта осуществляли ВМП сварных соединений.

Для испытаний на усталость образцы закрепляли в захватах испытательной машины УРС-20 по плоским участкам вблизи торцов (без захвата ребра) (см. рис. 1, а) и нагружали продольной растягивающей циклической нагрузкой с асимметрией цикла $R_\sigma = 0,1$ при частоте 7 Гц. Задаваемое усилие растяжения выбирали таким образом, чтобы расчетный уровень максимальных напряжений цикла в листовой части образца (без учета ребра) составлял $0,5\sigma_{0,2}$ для сплава ВТ20. Однако при указанной схеме нагружения привариваемое ребро воспринимало определенную долю прикладываемой нагрузки. В результате максимальные напряжения цикла в нетто-сечении таврового образца были меньше расчетных. Для определения истинных напряжений использовали тензодатчики. Выполненные с их помощью измерения показали, что максимальные напряжения в среднем сечении листа составляли 350 МПа.

Испытания образцов на усталость проводили до их полного разрушения, а соответствующее количество нагружений принималось в качестве критерия для оценки исследуемого варианта технологии сварки и обработки.

В сводной диаграмме на рис. 10 приведены результаты испытаний тавровых образцов, используемых в экспериментах первого этапа. При испытаниях образцы в основном разрушались в рабочих сечениях, имеющих ширину 60 мм. При

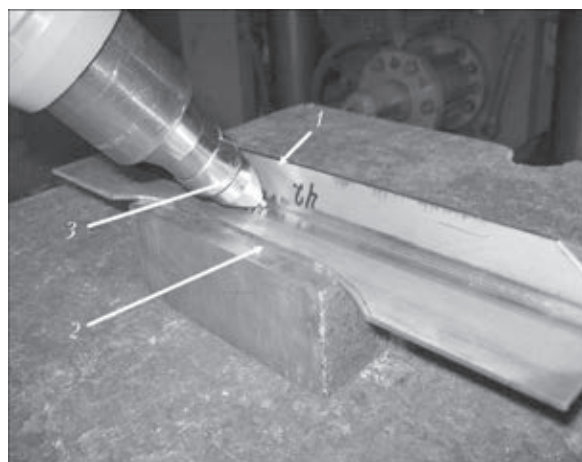


Рис. 9. Обработка таврового сварного соединения образца из сплава ВТ20 ручным ударным инструментом по технологии ВМП: 1 — образец; 2 — подкладка; 3 — рабочая головка ударного инструмента

этом усталостная трещина зарождалась в листе в зоне перехода от шва к основному металлу и в последующем развивалась в обе стороны до полного разрушения. Микрофрактографические исследования поверхности усталостных изломов показали, что характер разрушения в зоне проплавного шва был преимущественно вязкохрупкий и вязкоквазихрупкий.

В качестве базовых вариантов на усталость были испытаны тавровые образцы, изготовленные одним из трех способов сварки (ТИГ-П-1, ТИГ-Ф-1, ЭЛС-1) без ПУД (рис. 10). Как видно, способ сварки влияет на уровень долговечности испытываемых образцов. Наименьшая долговечность наблюдается при ЭЛС и увеличивается при ТИГ-П и ТИГ-Ф.

ПУД приводит к повышению циклической долговечности сварных образцов (ТИГ-П-2, ТИГ-Ф-2, ЭЛС-2) до двух раз по сравнению с базовыми вариантами.

Разглаживание катетов шва уменьшает циклическую долговечность сварных образцов, полученных в условиях ПУД, при всех способах сварки (образцы ТИГ-П-3, ТИГ-Ф-3, ЭЛС-3).

ВМП ультразвуковым ударным инструментом сварных швов, выполненных с применением ПУД, существенно повышает их несущую способность, особенно при сварке по слою активирующего флюса (образцы ТИГ-П-4, ТИГ-Ф-4, ЭЛС-4).

Резко снижаются усталостные свойства сварных образцов вследствие ремонта дефекта поверхностной дугой со стороны листа (ТИГ-П-5, ТИГ-Ф-5, ЭЛС-5).

Образцы, подвергшиеся ТО (ТИГ-П-6, ТИГ-Ф-6, ЭЛС-6), показали значительное увеличение циклической долговечности в случае сварки по активирующему флюсу. Однако следует отметить, что ТО менее эффективна по сравнению с механи-

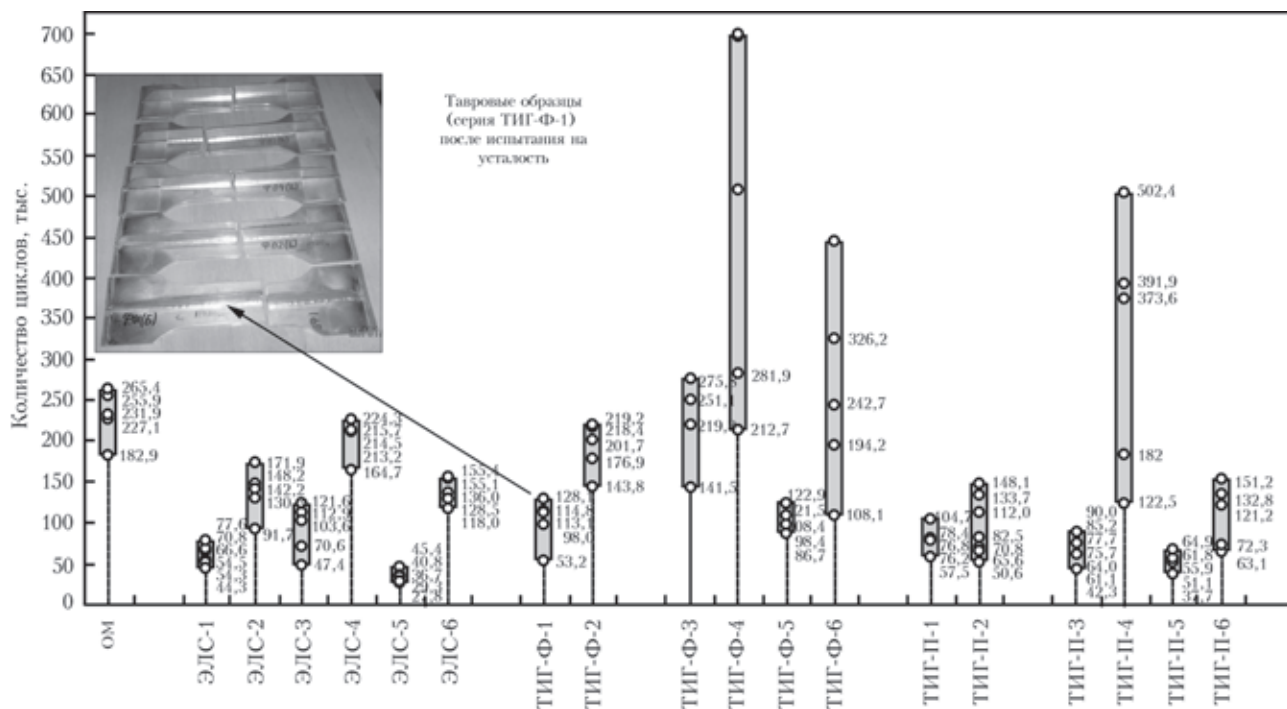


Рис. 10. Результаты испытаний на усталость при циклическом продольном растяжении тавровых сварных образцов из сплава ВТ20 (образцы обозначены способом сварки ЭЛС, ТИГ-Ф, ТИГ-П): 1 — образцы при сварке, жестко заземленные в оснастке без растяжения; 2 — образцы, выполненные с применением ПУД; 3 — образцы с разглаживанием катета шва; 4 — образцы, обработанные ультразвуковым ударным инструментом; 5 — образцы с ремонтом дефекта сверху (или имитацией ремонта); 6 — образцы с ТО

ческой проковкой швов ультразвуковым ударным инструментом.

Таким образом, испытания образцов на усталость показали, что наиболее высокую несущую способность тавровых сварных соединений с проплавным швом можно получить при сварке ТИГ-Ф и ТИГ-П с применением ПУД и ВМП.

На втором этапе осуществляли сварку партий панелей двумя способами — ТИГ-П и ТИГ-Ф (рис. 11). Технологические режимы сварки панелей соответствовали режимам сварки тавровых образцов. Сварку панелей выполняли с применением ПУД листа и ребер на уровне $\sigma_{н.л} = \sigma_{н.р} = 220$ МПа и обратного выгиба со стрелкой выгиба 14 мм. Сварные соединения всех панелей обрабатывали ВМП с использованием инструмента и техно-

логии, которые были отработаны на первом этапе исследований.

Следует отметить, что в результате применения ПУД листа и ребер остаточные деформации панелей после сварки были меньше, чем исходные прогибы листовых заготовок.

Контроль качества сварных соединений осуществляли разработанным в ИЭС им. Е. О. Патона методом на основе применения электронной широгрании [14], который позволяет оперативно определять дефектные участки сварных швов без демонтажа силовой оснастки и при необходимости сразу приступить к ремонту. Таким образом, сварка и ремонт объединяли в одном технологическом процессе, что способствовало повышению качества панелей.



Рис. 11. Сварные стрингерные панели из сплава ВТ20 после испытаний на усталость, изготовленные способами ТИГ-Ф (а) и ТИГ-П (б)



Рис. 12. Панель с наклеенными тензодатчиками, установленная в захватах машины для испытаний на усталость

По результатам контроля качества на двух панелях, изготовленных способом ТИГ-П, были исправлены с применением механической разделки шва дефекты в виде цепочки пор диаметром 2 мм. На двух панелях, соответствующих способу ТИГ-Ф, было выполнено ремонтное разглаживание участка катета.

Для проведения усталостных испытаний сварных панелей изготавливали крупногабаритные образцы лопаточного типа с рабочей частью 450×350×2,5 мм и отшлифованными ее кромками (см. рис. 2, в). Испытания проводили на модернизированной универсальной сервогидравлической испытательной машине HydroPuls-Schenk с максимальным растягивающим усилием 100 т, управление осуществлялось 4-канальным цифровым контроллером МТС Flex Test GT.

Для оценки реального уровня напряжений в рабочем сечении образца и проверки правильности его расположения в захватах испытательной машины для каждого образца производилась установочная тензометрия. Для этого в рабочей части на листе и ребрах образца в трех сечениях по длине его рабочей части наклеивали тензорезисторы КФ 5 П1-200, соединенные с тензоизмерительной системой СИИТ-2 (рис. 12).

В процессе установочной тензометрии панельный образец нагружали ступенчато с шагом 50 кН до максимальной растягивающей нагрузки. На каждом шаге нагружения измеряли уровень напряжений по тензодатчикам. Оценивали равномерность и максимальные напряжения на тензодатчиках и при необходимости максимальную испытательную нагрузку корректировали для сближения условий испытаний каждой панели. В результате максимальная испытательная нагрузка была установлена инди-

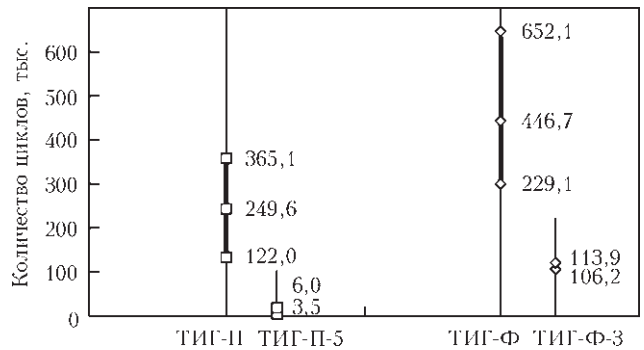


Рис. 13. Результаты испытаний на усталость при циклическом продольном растяжении сварных панелей из сплава ВТ20 (образцы обозначены способом сварки ТИГ-П и ТИГ-Ф); ТИГ-П-5, ТИГ-Ф-3 — панели соответственно с ремонтом дефекта шва с разделкой его лицевой стороны и с разглаживанием катета с обратной стороны шва

видуально для каждой панели в пределах от 300 до 320 кН.

При испытаниях на усталость нагружение образцов осуществлялось циклической нагрузкой с частотой 0,5 Гц при коэффициенте асимметрии цикла $R_\sigma = 0,1$.

Результаты испытаний панелей, изготовленных на втором этапе работ, представлены на рис. 13. Как видно из диаграммы, резко падает усталостная долговечность образцов, в которых выполняется ремонт дефектов сварных швов. Более высокую усталостную долговечность имеют панели, изготовленные с применением технологий сварки по слою активирующего флюса.

Результаты второго этапа исследований показали, что технология аргонодуговой сварки проплавленными швами по слою активирующего флюса с применением ПУД свариваемых элементов и последующей ВМП швов может служить основой для промышленного производства стрингерных панелей из высокопрочного титанового сплава ВТ20.

Выводы

1. Установлено, что выполнение проплавленных швов аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом по слою активирующего флюса с использованием ПУД и ВМП швов обеспечивает более высокие показатели усталостной долговечности сварных стрингерных панелей из высокопрочного титанового сплава ВТ20 по сравнению с ЭЛС и аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом погруженной дугой.

2. Применение ПУД на уровне не ниже $0,25\sigma_{0,2}$ при сварке крупногабаритных стрингерных панелей из сплава ВТ20 дает возможность устранить сварочные деформации коробления и улучшить условия выполнения сварочного процесса в автоматическом режиме.



3. Послесварочная ВМП сварных швов заметно повышает усталостную долговечность конструкций из титановых сплавов.

4. Предложена технология изготовления сварных стрингерных панелей из сплава ВТ20 без последующей ТО.

1. Матвиенко С. В., Астафьев А. Р., Карасев И. Г. Сварка и родственные технологии в самолетостроении. Тенденции развития // Сварка в Сибири. – 2003. – № 2. – С. 36–40.
2. Robert W. Messler JR. The greatest story never told: EB Welding on the F-14 // Welding J. – 2007. – May. – P. 41–47.
3. Братухин А. Г., Дмитриев О. Н., Ковальков Ю. А. Штамповка, сварка, пайка и термообработка титана и его сплавов в авиастроении. – М.: Машиностроение, 1997. – 595 с.
4. Paton B. E. Advanced trends in improvement of welded structures // Proc. of the Intern. conf. «Welded structures», Kiev, Ukraine, 18–22 Sept., 1992. – Harward acad. publ., 1992. – P. 1–8. – (Welding and Surfacing Reviews; Vol. 2).
5. Изготовление сварных крупногабаритных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов / Б. Е. Патон, В. Ф. Уткин, Л. М. Лобанов и др. // Автомат. сварка. – 1989. – № 10. – С. 37–45.
6. Lobanov L. M., Pavlovsky V. I., Lysak V. V. Elastische Vorspannung beim schweissen von Dünnscheiben aus Aluminiumlegierungen // Schweisstechnik (DDR). – 1987. – № 10. – S. 443, 447–449.
7. Lobanov L. M., Pavlovsky V. I., Pivtorak V. A. Optical methods of studying and means of controlling welding strains

and stresses. – Harward acad. publ., 1992. – 96 p. – (Soviet Technology Review. Section C. Welding and Surfacing Reviews).

8. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой / Л. М. Лобанов, В. И. Кирьян, В. В. Кныш, Г. И. Прокопенко // Автомат. сварка. – 2006. – № 9. – С. 3–11.
9. Stanhope F., Hasellhurs R. H. Welding airframe structures in titanium alloys using tensile loading as a means of overcoming distortion // Intern. conf. weld. and fabr. non-ferrous metals, Eastbourne. – 1972. – Vol. 1. – P. 72–82.
10. Муравьев В. И. Особенности изготовления и оценки качества крупногабаритных тонкостенных сварных конструкций из сплава ВТ-20 // Автомат. сварка. – 1986. – № 8. – С. 15–18.
11. Влияние способа сварки плавлением на свойства соединений сплава Ti–6Al–4V / В. Н. Замков, В. П. Прилуцкий, И. И. Петриченко и др. // Там же. – 2001. – № 4. – С. 3–7.
12. Электроннолучевая сварка элементов ребристых панелей из титанового сплава ВТ-20 / В. А. Савицкий, А. Д. Шевелев, В. Н. Замков, В. В. Редчин // Там же. – 1989. – № 4. – С. 55–57.
13. Контракция дуги флюсом при сварке вольфрамовым электродом в аргоне / Б. Е. Патон, В. Н. Замков, В. П. Прилуцкий, П. В. Прилуцкий // Там же. – 2000. – № 1. – С. 2–9.
14. Оперативный контроль качества сварных панелей из сплава ВТ20 с использованием метода электронной широтграфии / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Савицкая и др. // Там же. – 2011. – № 11. – С. 28–33.

Поступила в редакцию 03.12.2013

5-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ»

24–27 июня 2014 г. во Львове на базе Национального университета «Львовская политехника» состоялась 5-я Международная конференция «Механика разрушения материалов и прочность конструкций». Основными организаторами конференции выступили Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Национальный университет «Львовская политехника» и Украинское общество по механике разрушения материалов. Для участия в конференции было заявлено более 200 докладов из 50 организаций, которые представляли ведущие академические институты, государственные научные центры, вузы, частные организации и промышленные предприятия Украины, Польши, Франции и Мексики.

Конференцию открыл председатель организационного комитета, директор ФМИ им. Г. В. Карпенко НАНУ, академик НАН Украины В. В. Панасюк, который в своем вступительном слове подчеркнул необходимость проведения подобного рода мероприятий с целью обмена опытом и налаживания научных и дружественных отношений между сотрудниками различных учреждений. На церемонии открытия конференции с приветственным словом также выступил заместитель директора ИЭС им. Е. О. Патона, академик НАН Украины Л. М. Лобанов, который отметил актуальность вопросов надежности, безопасной эксплуатации и оценки ресурса работоспособности ответственных конструкций промышленной и социальной инфраструктуры. В работе конференции приняли участие более 190 участников, в том числе 137 докторов и кандидатов наук. Было заслушано и обсуждено 26 пленарных, 44 секционных и 47 стендовых докладов, предусмотренных программой конференции. Кроме того, в рамках конференции проведена специальная сессия и круглый стол, посвященный актуальным проблемам влияния водорода на разрушение и прочность конструкционных материалов, где были представлены и обсуждены 12 докладов.

Участники отметили хорошую организацию конференции. Созданная рабочая обстановка способствовала развитию тематических дискуссий и установлению деловых контактов в области механики разрушения материалов, прочности конструкций и оценки ресурса работоспособности ответственных деталей и конструкций.

А. А. Полишко, А. М. Сыротюк