

А. Ю. Медведев, С. П. Павлич

## ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ

В работе предложена методика проведения испытаний соединений, полученных линейной сваркой трением, на растяжение, отличающаяся от применявшихся ранее формой образцов и критериями оценки результатов испытаний. Проведенное по предложенной методике испытание соединений сплава ВТ6 со сплавом ВТ8М-1, сваренных с различной величиной осадки, показало, что при малых значениях осадки разрушение происходит хрупко. Увеличение осадки при сварке приводит к изменению вида излома, места разрушения и диаграммы растяжения. Предел прочности сварного соединения при этом увеличивается незначительно, в то время как работа, затраченная на пластическое деформирование образцов до разрушения, увеличивается на порядок. *Линейная сварка трением; двухфазные титановые сплавы; прочность сварных соединений; испытания на растяжение; качество сварных соединений*

Испытания на статическое растяжение являются важнейшим видом механических испытаний, они применяются для оценки прочности сварных соединений, полученных практически всеми способами сварки. Российской промышленностью осваиваются новые разновидности сварки трением, в частности линейная сварка трением (ЛСТ). Освоение новых технологических процессов подразумевает также отработку методов контроля качества продукции, в том числе и разрушающих испытаний.

В иностранной печати имеются сведения о проведении испытаний сварных соединений титановых сплавов на растяжение с использованием образцов, имеющих цилиндрическую форму рабочего участка [1, 2]. При этом разрушение образцов происходило по основному металлу, вдали от шва и зоны термомеханического

влияния (ЗТМВ). Собственные исследования дали аналогичный результат – место разрушения соединений титановых сплавов, полученных ЛСТ, находится примерно на равном расстоянии от места закрепления и от сварного шва (рис. 1).



**Рис. 1.** Образец с цилиндрической формой рабочего участка, вырезанный из сварного соединения после испытаний на растяжение

Если прочность металла сварного шва выше прочности основного металла, то даже при наличии некоторого количества дефектов в плоскости стыка разрушение более вероятно по основному металлу или зоне термомеханического влияния. Поскольку разрушение не по шву всегда трактуется как признак высокого качества сварки, можно говорить о снижении чувствительности испытаний к наличию дефектов в этом случае.

В связи с изложенным возникает необходимость в отработке методики испытаний на растяжение соединений титановых сплавов, полученных линейной сваркой трением.

### УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для отработки методики испытаний были использованы соединения двух различных титановых сплавов. В качестве материала одной

Контактная информация: 8(347)273-08-66

Работа выполнена в рамках проекта «Создание технологий и промышленного производства узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений» (шифр 2010-218-01-133) в рамках реализации Постановления № 218 Правительства РФ от 9.04.2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Экспериментальные результаты были получены с использованием оборудования НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии» ФГБОУ ВПО УГАТУ.

из деталей использовался сплав ВТ6, ответная деталь изготавливалась из сплава ВТ8М-1. Оба сплава относятся к группе  $\alpha + \beta$  сплавов, несколько отличаясь по схеме легирования. Сварка осуществлялась с применением установки, обеспечивающей сварку параллелепипедов поперечным сечением  $13 \times 26$  мм. Система управления гидроприводами установки обеспечивает поддержание колебательных движений с заданной частотой и амплитудой и возможность проковки. Длительность процесса ограничивалась заданием осадки нагрева – величины осадки, при достижении которой прекращалось возвратно-поступательное движение. Таким образом, основными задаваемыми параметрами, определяющими протекание процесса сварки, являются частота  $f$  и амплитуда колебаний  $a$ , усилия осадки  $P_{СВ}$  и проковки  $P_{ПР}$ , величина осадки нагрева  $h$ .

Из перечисленных параметров в качестве варьируемого был выбран один – величина осадки нагрева. Такой выбор связан с тем, что данный параметр достаточно предсказуемо влияет на качество сварного соединения – при малых значениях  $h$  сварной стык содержит дефекты преимущественно в виде окисных включений, представленные на рис. 2. Неизменяемые параметры режима сварки принимались:  $a = 2$  мм,  $f = 50$  Гц,  $P_{СВ} = P_{ПР} = 100$  МПа.

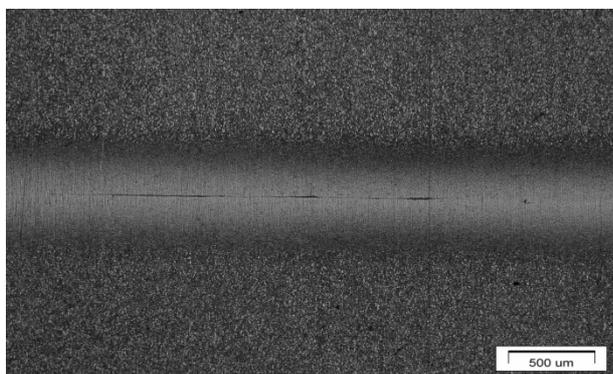


Рис. 2. Дефекты в стыке, вызванные недостаточной осадкой при сварке

Для испытаний на растяжение были изготовлены образцы с ослабленным сечением в зоне сварного шва, соответствующие типу XXVI из [3]. Эскиз образца для проведения испытаний представлен на рис. 2. Толщина образцов была принята равной 2 мм, радиус скругления – 6 мм, минимальная ширина – 6 мм. Испытания проводились на разрывной машине INSTRON 5982.

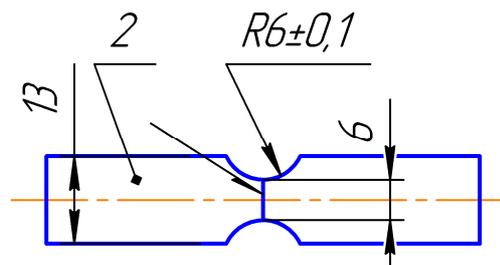


Рис. 3. Эскиз образца для проведения испытаний сварных соединений на растяжение

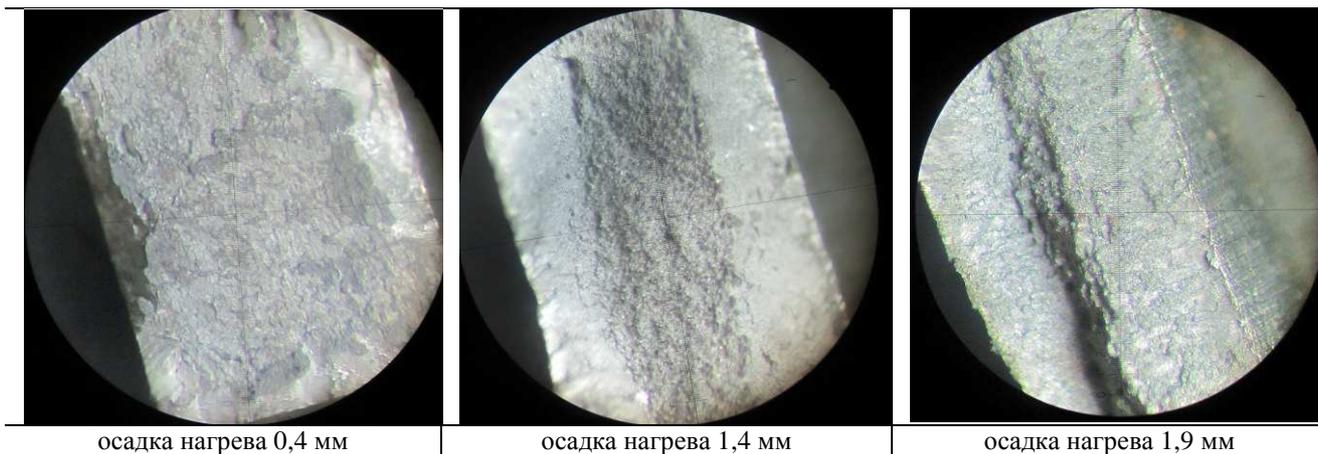
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В ходе эксперимента было испытано 12 образцов, изготовленных из соединений сваренных осадкой нагрева 0,4, 1,4 и 1,9 мм. Результаты испытаний в табличном виде представлены ниже. Методика проведения испытаний сварных соединений на растяжение, изложенная в [3], предполагает определение единственной характеристики – предела прочности.

Из представленных на рис. 3 фотографий изломов видно, что образцы, сваренные с осадкой нагрева 0,4 мм, существенно отличаются по строению излома от прочих. Разрушение данных образцов происходило по плоскости стыка, в то время как образцы, сваренные с осадкой нагрева 1,4 и 1,9 мм, разрушались по ЗТМВ со стороны ВТ8М-1 и имели вязкий излом, по строению практически не отличающийся от изломов, имеющих место при испытании основного металла. Величина предела прочности не отражает выявленных качественных изменений. Изменение осадки нагрева с 0,4 до 1,4 мм приводит к увеличению  $\sigma_B$  всего на 3 %, а изменение осадки нагрева с 1,4 до 1,9 мм приводит к росту предела прочности на 7 %.

$h$ , мм	0,4	1,4	1,9
$\sigma_B$ , МПа	1089	1124	1201
$\sigma_{РАЗР}$ , МПа	1089	1036	1083
$\Delta$ , мм	0	0,7	0,9
$A_{ПД}$ , Дж	1,3	12,5	14,1
место разрушения	по плоскости стыка	по ЗТМВ со стороны ВТ8М-1	по ЗТМВ со стороны ВТ8М-1

Дополнительная информация о поведении образцов в ходе испытаний может быть получена при исследовании показанных на рис. 4 диаграмм растяжения. При испытании образцов, сваренных с осадкой нагрева 0,4 мм нагрузка увеличивалась монотонно: максимум нагрузки достигался при разрыве, остаточная деформация отсутствовала.



осадка нагрева 0,4 мм

осадка нагрева 1,4 мм

осадка нагрева 1,9 мм

Рис. 4. Фотографии изломов соединений, сваренных с различной величиной осадки

В остальных случаях диаграммы имеют экстремум для соединений, сваренных с осадкой нагрева 1,4 мм и 1,9 мм, отношение  $\sigma_{\text{РАЗР}}/\sigma_{\text{В}}$  составило 0,92 и 0,9, а удлинение при разрыве, определенное по диаграммам растяжения, 0,7 и 0,9 мм соответственно.

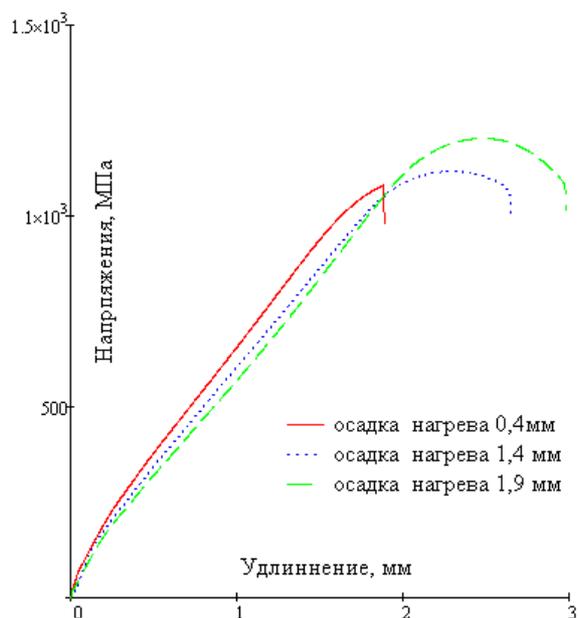


Рис. 5. Диаграммы растяжения для образцов, сваренных с различной осадкой

В количественном выражении наиболее наглядным показателем является работа, затраченная на пластическое деформирование образцов до разрушения  $A_{\text{ПД}}$ . Сравнение вычислен-

ных значений показателя  $A_{\text{ПД}}$  позволяет достоверно разделить результаты испытаний. У соединений, разрушившихся по сварному шву и по ЗТМВ, работа, затраченная на пластическое деформирование, отличается на порядок.

## ВЫВОДЫ

При испытаниях на растяжение образцов типа XXVI по ГОСТ 6996 характер разрушения определяется величиной осадки.

При  $h = 0,4$  мм диаграмма представляет собой монотонно возрастающую кривую, разрушение образцов происходит в плоскости свариваемого стыка без заметной пластической деформации, что свидетельствует о незавершенности процесса формирования соединения и неполном удалении загрязнений из стыка.

Увеличение осадки нагрева при сварке с 0,4 до 1,4 мм приводит к качественному изменению характера разрушения и вида диаграммы растяжения. При незначительном увеличении предела прочности работа, затраченная на пластическое деформирование до разрушения, увеличивается на порядок, появляется заметное остаточное удлинение образца. Дальнейшее увеличение осадки нагрева до 1,9 мм приводит лишь к количественным изменениям – некоторому увеличению  $\sigma_{\text{В}}$ ,  $\Delta$  и  $A_{\text{ПД}}$ .

Для оценки качества сварных соединений, полученных ЛСТ, рациональна замена образцов с цилиндрической формой рабочего участка на образцы типа XXVI по ГОСТ 6996. В этом случае браковочным признаком является разрушение по плоскости стыка, для количественной

оценки результатов испытаний наряду с пределом прочности могут быть использованы остаточное удлинение и работа, затраченная на пластическое деформирование до разрушения образца.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Process optimization for linear friction welding of Ti6Al4 / V. P. Wanjara [et al.] // Proc. of the 7th Intern. conf. on trends in welding research, 2005, Callaway Gardens resort, Pine Moentain, Georgia, USA. P. 885–860.

2. **Wanjara P., Jahazi M.** Linear Friction Welding of Ti-6Al-4V: Processing, Microstructure, and Mechanical-Property Inter-Relationship // Metallurgical and materials transactions A. August 2005. Vol. 36A. P. 2149–2164.

3. ГОСТ 6996 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств».

#### ОБ АВТОРАХ

**Медведев Александр Юрьевич**, доц. каф. оборудования и технологии сварочн. производства. Дипл. магистр техники и технологий (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по машинам и технологии сварочн. производства (Тольяттинск. гос. ун-т, 2003). Иссл. в обл. моделирования нагрева при сварке, аргонодуговой сварки, сварки трением.

**Павлинич Сергей Петрович**, зам. управляющего директора, техн. директор ОАО «УМПО». Дипл. инженер-механик по оборудованию и технологии сварочн. производства» (УАИ, 1976). Иссл. в обл. линейной сварки трением.