

А. Ю. Медведев, В. М. Бычков, Е. Е. Тарасенко, М. П. Савичев, А. В. Супов

ИСПЫТАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ, НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ

На основании серии экспериментов по определению ударной вязкости соединений сплава ВТ6 полученных линейной сваркой трением предложена методика испытаний сварных соединений на ударный изгиб. *Линейная сварка трением; титановые сплавы; ВТ6; Ti6Al4V; моноколесо; блиск; механические испытания; механические характеристики; испытания на ударный изгиб; ударная вязкость*

Второй год продолжают совместные работы ФГБОУ ВПО УГАТУ и ОАО УМПО над проектом «Создание технологий и промышленного производства узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений». Одной из задач проекта является проведение полномасштабных испытаний семейства облегченных лопаток и отработка опытных технологий высокоточного формообразования – сверхпластического формования титана, диффузионной сварки, объемной и изотермической штамповки лопаток, линейной сварки трением (ЛСТ). В отечественном авиадвигателестроении до сих пор не применялись сварные моноколеса, по этой причине на сей день отсутствуют нормы на оценку механических показателей соединений лопаток с диском полученных ЛСТ, нет и общепринятых методик испытаний.

Одним из видов испытаний, обязательных для металлов и сварных соединений, применяемых в авиастроении, является испытание на ударный изгиб. Типы применяемых образцов, методика проведения испытаний стандартизованы [1, 2], отраслевая нормативно-техническая документация [3, 4] регламентирует значения ударной вязкости материалов, применяемых для изготовления лопаток и дисков, однако сварные соединения лопаток с диском имеют перечисленные ниже конструктивные и технологические особенности, влияющие на размеры образцов, форму и положения надреза:

- для конструкции моноколеса, сварка которого осваивается в рамках проекта, толщина лопатки в свариваемом сечении менее 4 мм;
- ширина сварного шва и зоны термомеханического влияния при ЛСТ титановых спла-

вов мала, может составлять миллиметр и менее (рис. 1).

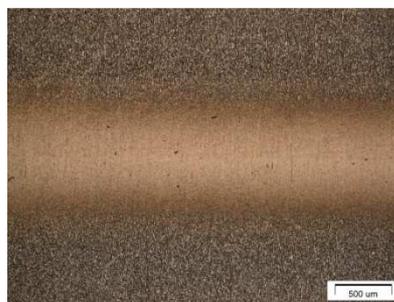


Рис. 1. Структура соединения сплава ВТ6, полученного ЛСТ

С учетом перечисленных особенностей для отработки методики испытаний в качестве основного типоразмера было предложено использовать образцы с рабочим сечением 6×2 в связи с тем, что такие образцы могут быть изготовлены из самого блиска.

При малой протяженности сварного шва важными вопросами становится выбор типа надреза и его расположение относительно сварного шва. Очевидно, что существенного снижения работы разрушения следует ожидать либо в ЗТМВ – в случае неблагоприятных структурных изменений при сварке, либо по оси сварного шва – при недостаточном времени сварки и неполном завершении процесса формирования сварного соединения.

Радиус скругления V-образного надреза составляет 0,25 мм, и протяженность паза в этом случае соизмерима с размерами зон сварного соединения. При этом с одной стороны имеется возможность оценить работу разрушения отдельных зон сварного соединения, с другой стороны необходимо точное позиционирование надреза относительно сварного шва. Ширина

U-образного паза превышает ширину шва и ЗТМВ, и развитие трещины может происходить по любой из зон сварного шва, либо по основному металлу. В этом случае отсутствует возможность оценить работу разрушения отдельных зон сварного соединения, но требования к точности позиционирования надреза несколько ниже.

Для изготовления образцов были использованы сварные соединения ВТ6 + ВТ6 с поперечным сечением 13×26 мм, сварка проводилась на сочетании параметров режима, которое обеспечивало отсутствие дефектов в плоскости стыка по результатам металлографических исследований, и разрушение по основному металлу при испытании на статическое растяжение образцов типа III по ГОСТ 1497.

Из каждого сварного образца изготавливались образцы без надреза, с *U*- и *V*-образным надрезом. Надрез позиционировался по результатам обмера макрошлифов сварных образцов на инструментальном микроскопе. *U*-образный надрез располагался по оси шва. Образцы с *V*-образным надрезом изготавливались в трех исполнениях:

- надрез по оси шва (рис. 2);
- надрез по границе шва (рис. 3);
- надрез на расстоянии 1 мм от границы шва (рис. 4).

Кроме того, для обеспечения возможности сравнения результатов испытаний со свойствами основного материала, из сплава ВТ6 были изготовлены образцы, аналогичные сварным.

Испытания проводились в центре коллективного пользования УГАТУ с использованием башенного копра СЕАСТ 9350, обеспечивающего изменение скорости удара в пределах 0,77... 4,64 м/с, массы бойка в пределах 5...70 кг. Погрешность регистрации энергии удара – не выше 5%.

Для испытаний из имеющихся был выбран боек с наименьшей массой – $m = 5,079$ кг. Скорость бойка составляла 4,5 м/с, энергия удара $E = 51,42$ Дж. Результаты испытаний сварных соединений представлены в таблице, фотографии образцов после испытаний приведены на рис. 5, 6.

Как видно из рис. 5, *a* не надрезанные образцы претерпели в процессе испытаний значительную пластическую деформацию. В условиях отсутствия конструктивных (надреза) и технологических (дефектов по линии стыка) концентраторов напряжений значительная часть энергии затрачивалась на пластическую дефор-

мацию образца, и значения ударной вязкости в этом случае оказались в несколько раз выше, чем для надрезанных образцов.

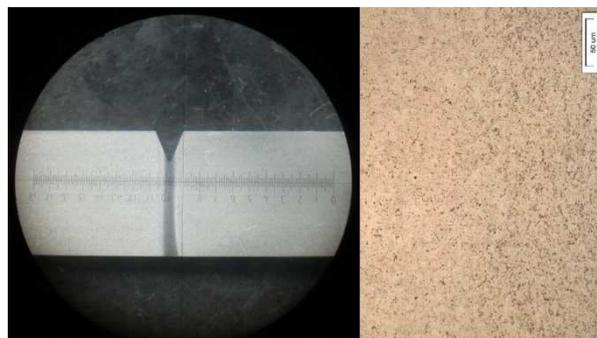


Рис. 2. Положение надреза в образце с *V*-образным надрезом по стыку шва и микроструктура в зоне надреза

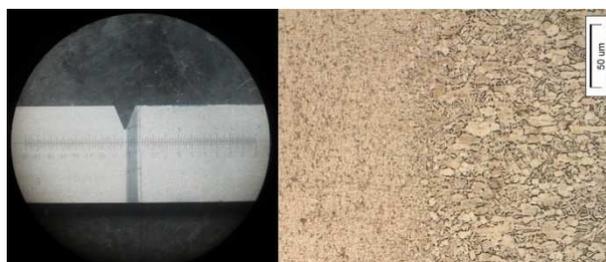


Рис. 3. Положение надреза в образце с *V*-образным надрезом по границе шва и микроструктура в зоне надреза

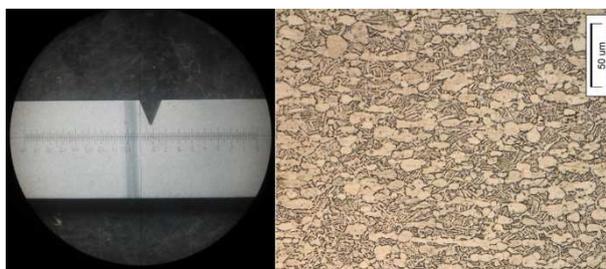


Рис. 4. Положение надреза в образце с *V*-образным надрезом на расстоянии 1 мм от границы шва и микроструктура в зоне надреза

Результаты испытаний образцов с *U* образным надрезом практически не отличаются от полученных в работе [5], где при испытаниях образцов сечением 10×10 выполненных из сварных соединений сплава Ti6Al4V было получено среднее значение ударной вязкости 61 Дж/см². Диаграмма, показанная на рис. 7, хорошо демонстрирует практически полное совпадение результатов испытаний сварных соединений и основного материала. То, что разрушение образцов и в ходе описываемого ис-

следования, и в [5] происходило по ЗТМВ, подтверждает тот факт, что сопротивляемость сварного шва росту трещин по крайней мере не ниже, чем у основного материала.

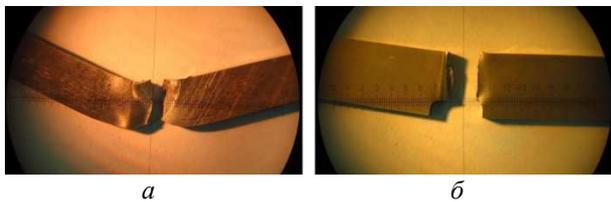


Рис. 5. Изломы образцов после испытаний на ударную вязкость: *a* – образец без надреза; *б* – образец с надрезом КСУ

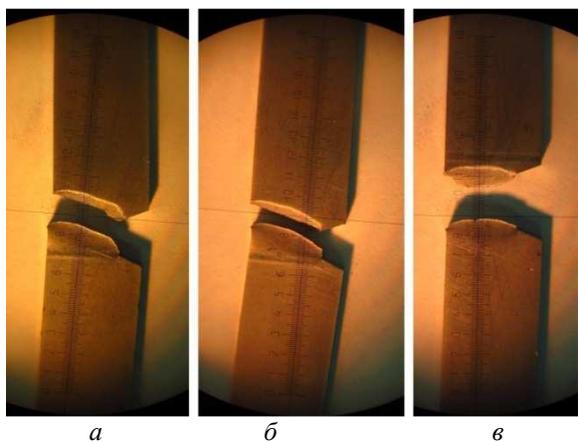


Рис. 6. Изломы образцов после испытаний на ударную вязкость: *a* – образец с надрезом КСВ по оси шва; *б* – образец с надрезом КСВ по границе шва; *в* – образец с надрезом КСВ на расстоянии 1 мм от оси шва

При испытаниях образцов с V-образным надрезом работа разрушения составляла 2,33–3,38 Дж, что составляло порядка 5% от принятой энергии удара. Стандартом [1] оговаривается соотношение работы разрушения и энергии удара (не менее 1/10). Однако точность регистрации энергии удара составляла не более 5%, поэтому можно увеличить это соотношение до 1/5 без ущерба достоверности данных испытаний.

Разрушение для всех образцов с V-образным надрезом начиналось с вершины надреза, развитие трещины происходило по ЗТМВ либо по основному металлу. Как видно из рис. 8, ударная вязкость образцов с расположением надреза по границе сварного шва и в ЗТМВ практически не отличается от аналогичного показателя для основного металла. Наихудший результат зарегистрирован при испытании образцов с надрезом расположенным по оси сварного шва –

среднее значение ударной вязкости в этом случае оказалось на 12% ниже, чем для основного материала

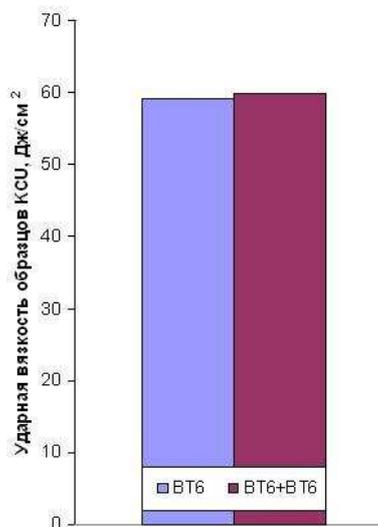


Рис. 7. Результаты испытаний образцов с U-образным надрезом

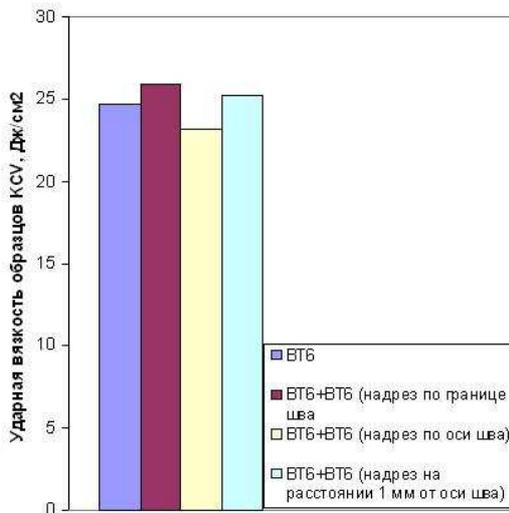


Рис. 8. Результаты испытаний образцов с V-образным надрезом

ВЫВОДЫ

Линейная сварка трением обеспечивает получение соединений с высокими показателями ударной вязкости.

Оптимизация технологии ЛСТ по критерию ударной вязкости может проводиться в два этапа. Для предварительного подбора параметров режима могут быть использованы простые в изготовлении образцы с U-образным надрезом, или даже без надреза. Дальнейшая оптимизация должна осуществляться по результатам испытаний образцов с V-образным надрезом.

Площадь поперечного сечения, мм ²	Работа, Дж	Ударная вязкость, Дж/см ²	среднее, Дж/см ²
без надреза			
12,19	26,056	213,7	194,8
12,52	22,420	179,0	
12,36	23,711	191,8	
с U-образным надрезом			
12,39	6,57	53,0	59,9
11,84	7,26	61,3	
12,01	7,93	65,4	
с V-образным надрезом по оси шва			
10,99	2,33	21,1	23,2
10,31	2,56	21,5	
12,60	3,38	26,8	
с V-образным надрезом по границе шва			
12,51	2,93	23,4	25,9
12,07	3,28	27,2	
11,83	3,22	27,2	
с V-образным надрезом на расстоянии 1 мм от границы шва			
9,64	2,30	23,9	25,3
12,73	3,04	23,9	
12,02	3,37	28,0	

Для сварных соединений сплава ВТ6 значения показателя KCV образцов с расположением надреза по границе шва и на расстоянии 1 мм от границы практически не отличаются от ударной вязкости основного металла. Располагать надрез необходимо по оси шва, поскольку именно в этом случае обеспечиваются минимальные значения ударной вязкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.
- ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.
- ОСТ 1 90197-89. Поковки дисков и валов кованые и штампованные из титановых сплавов. Общие технические условия.
- ОСТ1 90006-86. Заготовки из титановых сплавов для изготовления лопаток. Технические требования.
- Impact toughness and fracture analysis of linear friction welded Ti-6Al-4V alloy joints T.J. Ma, W.-Y. Li, S.Y. Yang. *Materials and Design* 30 (2009) 2128–2132.

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.

Бычков Владимир Михайлович, доц. той же каф. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1976). Канд. техн. наук по машинам и технологии сварочн. производства (Уральск. политехн. ин-т, 1980). Иссл. в обл. физики и техники дуговых и плазменных процессов в сварочном производстве.

Тарасенко Евгений Евгеньевич, мл. науч. сотр. той же каф. Дипл. инженер по оборудованию и технологии сварочн. производства (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. напряженно-деформированного состояния деталей и элементов оснастки в процессе линейной сварки трением.

Савичев Максим Павлович, мл. науч. сот. той же каф. Дипл. инженер по оборудованию и технологии сварочн. производства (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. контроля сварных соединений, полученных линейной сваркой трением.

Супов Андрей Владимирович, нач. технологическ. бюро ОАО «УМПО». Дипл. инженер по оборудованию и технологии сварочн. производства (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. линейной сварки трением.