

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА СВАРКИ ТРЕНИЕМ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT3-1

А. Г. СЕЛИВЕРСТОВ¹, Ю. М. ТКАЧЕНКО², Р. А. КУЛИКОВСКИЙ²,
В. И. БРАГИНЕЦ³, И. В. ЗЯХОР⁴

¹ОАО «Мотор Сич». Украина, г. Запорожье, просп. Моторостроителей, 15;

²Запорожский национальный университет МОН Украины. 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64;

³НИЦ плазменных технологий Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
69068, г. Запорожье, ул. Уральская, 3;

⁴Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлены результаты исследований формирования соединений при сварке трением (СТ) титанового сплава VT3-1, который используется в конструкции осевого компрессора авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Цель работы состояла в оптимизации режима СТ сплава VT3-1, исходя из возможности ее реализации на современном оборудовании для линейной сварки трением (ЛСТ) применительно к изготовлению и ремонту моноколес ГТД, так называемых блисков. Определение оптимальных значений параметров режима СТ выполняли на основе результатов механических испытаний на разрыв, металлографических исследований и измерения микротвердости сварных соединений, полученных при СТ на воздухе и в защитной газовой среде (аргоне). Установлено, что при СТ сплава VT3-1 получение качественных (бездефектных) соединений возможно в широком диапазоне изменения технологических параметров при условии обеспечения заданного значения суммарной осадки при сварке. Показатели прочности соединений превышают соответствующие показатели для основного металла сплава VT3-1. В результате интенсивной термомеханической деформации при температурах, превышающих температуру (β -перехода сплава VT3-1 и быстрого охлаждения после СТ, металл в зоне соединения имеет мелкозернистую динамически рекристаллизованную структуру и повышенную твердость. На основе полученных результатов оптимизирован режим СТ титанового сплава VT3-1 при сравнительно низкой линейной скорости относительного перемещения заготовок, которая технически достижима при ЛСТ титановых сплавов на современном оборудовании. Библиогр. 22, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: сварка трением, титановые сплавы, механические свойства, равнопрочность, режимы сварки

Титановые сплавы широко применяют в авиационном двигателестроении, в частности для изготовления деталей осевого компрессора газотурбинных двигателей (ГТД). Современные способы механической обработки позволяют изготавливать сложные детали, себестоимость которых относительно высокая. Однако, чем сложнее процесс механической обработки, тем больше вероятность образования дефектов.

Ремонтные операции наиболее часто выполняются сваркой и наплавкой. Однако при ремонте деталей из сложнолегированных сплавов, в частности титановых сплавов, чрезвычайно трудно получить равнопрочные сварные соединения. Это особенно важно при ремонте подвижных деталей, например, лопаток моноколес ГТД. Так, из-за высокой химической активности титана по отношению к атмосферным газам (кислороду, азоту, водороду) при сварке плавлением происходит насыщение ими металла сварного соединения. Это

приводит к снижению механических свойств и охрупчиванию сварного соединения, что негативно сказывается на уровне надежности восстановленного изделия. Защита зоны сварки бескислородными флюсами, чистым аргоном, гелием либо их смесями обеспечивает коэффициент прочности сварного соединения не более 0,9 [1].

В процессе сварки необходимо также обеспечить минимальные деформации элементов, поскольку от них будут зависеть значения припусков, и, следовательно, объем последующей механообработки. Нежелательна и послесварочная термообработка сварного изделия (в ряде случаев она невозможна). Перечисленные выше причины ограничивают применение известных способов сварки плавлением титана и его сплавов.

Минимизировать указанные недостатки можно с помощью способов сварки давлением, в частности сварки трением (СТ). Соединение металлов этим способом осуществляется в вязкопластичном состоянии без расплавления соединяемых поверхностей. Благодаря этому свойства металла зо-

* В работе принимал участие И. А. Петрик.



ны соединения (ЗС) и зоны термического влияния (ЗТВ) изменяются незначительно, а сварочные напряжения и остаточные деформации, как правило, значительно меньше, чем при сварке плавлением [2].

Вопросам применения различных технологий СТ титановых сплавов посвящен ряд отечественных и зарубежных публикаций [3–18]. В работе [3] показано, что конвенционная (обычная) СТ позволяет получить качественные соединения титанового сплава ОТ4, механические свойства которых находятся на уровне свойств основного металла (ОМ). Параметры режима СТ устанавливали на уровне параметров для низколегированных сталей [2] (давление при нагреве P_n и проковке $P_{пр}$ соответственно 60 и 100 МПа, суммарная осадка при сварке $\Delta_{св} = 6$ мм).

В работах [4, 5] изучено влияние окружающей атмосферы и защитной среды (сварка на воздухе и в аргоне), а также параметров режима конвенционной СТ на формирование структуры и механические свойства системы титана (99,7 %) и титановых сплавов соединений Ti–6Al–4V, Ti–6Al–2Sn–4Cr–2Mo. Установлено, что для всех исследованных сплавов наличие защитной атмосферы не оказывает влияния на формирование структуры металла в ЗС. Параметры режима СТ в [4] отличались сравнительно низкими значениями давления при нагреве P_n и проковке $P_{пр}$ (25,5 и 31,1 МПа соответственно) и линейной скорости относительного перемещения $v = 2,2$ м/с.

В работе [6] исследованы особенности формирования структуры и механических свойств сварных соединений различных титановых сплавов при инерционной сварке трением (ИСТ) дисков ротора компрессора авиационных ГТД. Изучена свариваемость различных титановых сплавов, в частности, Ti–6Al–4V, Ti–6Al–4V–2Sn, Ti–8Al–1V–1Mo, Ti–6Al–2Sn–4Cr–2Mo, Ti–6Al–2Sn–4Cr–6Mo. На основе всесторонних механических испытаний и металлографических исследований установлено, что ИСТ обеспечивает получение сварных соединений, удовлетворяющих нормативным требованиям. При этом показатели прочности сварных соединений выше, а показатели пластичности и усталости ниже, чем таковые для ОМ. Следует отметить очень высокое значение начальной линейной скорости относительного перемещения при ИСТ титановых сплавов: $v_{нач} = 35$ м/с (частота вращения 1130 мин^{-1} , внешний диаметр цилиндрических заготовок 584 мм).

Результаты исследований структурных изменений и связанных с ними сварочных напряжений при ИСТ двухфазного ($\alpha + \beta$)-сплава Ti–6Al–2Sn–4Cr–6Mo представлены в [7]. Установлено, что структурные изменения металла при СТ вызывают существенное увеличение показателей твердости металла в ЗС. В то же время максимальный

уровень остаточных сварочных напряжений фиксируется на границе ЗТВ и ОМ и это вызывает необходимость проведения термической обработки соединений.

В работе [8] приведен пример промышленного использования ИСТ при изготовлении компонентов ротора вертолета из сплава системы Ti–6Al–4V. Отмечается высокое качество металла в ЗС и отсутствие каких-либо дефектов, что обеспечивает соответствие механических свойств требованиям технических условий.

Таким образом, при СТ вращением титановых сплавов возможно получение качественных сварных соединений в широком диапазоне изменения технологических параметров: $P_n = 25,5 \dots 350$ МПа, $\Delta_{св} = 2 \dots 18$ мм, $v = 2,2 \dots 35$ м/с — при условии обеспечения заданной осадки. При соединении изделий из титана и его сплавов используют и другие разновидности СТ. Например, для изготовления трубчатых изделий сложной конфигурации предложено использовать СТ с перемешиванием [9].

При изготовлении и ремонте моноколес ГТД, так называемых блисков, перспективным является использование линейной сварки трением (ЛСТ) [10]. В ряде зарубежных публикаций рассмотрены перспективы использования ЛСТ при изготовлении «блисков» [11, 12], изучены структуры и механические свойства соединений титановых сплавов, полученных ЛСТ [13, 14], описаны модели термомеханических процессов при ЛСТ [15, 16], конструкции и технические характеристики сварочного оборудования [10, 17].

Анализ имеющихся публикаций показывает, что получение качественных соединений титановых сплавов при ЛСТ возможно при условии обеспечения в процессе нагрева определенной мощности тепловыделения, достаточной для быстрой пластификации и деформации на заданную величину свариваемого металла в ЗС. Значение мощности тепловыделения при ЛСТ определяется в большей степени частотой и амплитудой относительного колебательного перемещения и в меньшей — давлением при нагреве [15, 16].

При проектировании прототипа установки для ЛСТ моноколес ГТД, производимых на ОАО «Мотор Сич», возникла проблема оптимизации его технических характеристик. Это связано с выбором оптимального режима ЛСТ отечественных высокопрочных титановых сплавов. Установить оптимальные режимы ЛСТ для конкретных типоразмеров заготовок сварных моноколес ГТД, пользуясь имеющимися данными по СТ вращением (конвенционной, инерционной), сложно. Они могут быть использованы только частично, поскольку в основном изучалась свариваемость зарубежных титановых сплавов и в большинстве работ рекомендовано использование сравнитель-

но больших значений линейной скорости перемещения заготовок ($v = 2,2...35$ м/с).

Принципиальным отличием ЛСТ металлов является сложность технической реализации необходимых параметров процесса. Современные сварочные машины для ЛСТ способны работать в широком диапазоне частот (10...250 Гц) и амплитуды колебаний (1...7 мм) [10]. Это позволяет устанавливать, например, при соединении термопластов требуемое сочетание частоты и амплитуды колебаний и успешно использовать ЛСТ в промышленных условиях. Однако при сравнительно больших значениях осевого давления (ЛСТ высокопрочных сплавов) сочетание высоких значений частоты и амплитуды колебаний технически трудноосуществимо. Поэтому при ЛСТ, как правило, $v \leq 1,0$ м/с [10], что и предопределяет особенности формирования сварных соединений по сравнению с обычной СТ.

По этой причине при оптимизации режима ЛСТ отечественных титановых сплавов актуальным является определение допустимых пределов изменения технологических параметров — давления и времени нагрева t_n при сравнительно низких значениях линейной скорости, обусловленных спецификой процесса и техническими характеристиками оборудования для ЛСТ. Для изучения технической возможности формирования качественных (бездефектных) соединений высокопрочного титанового сплава ВТЗ-1 при изготовлении моноколес ГТД и для оценки их механических свойств проводили эксперименты по СТ вращением, поскольку термодформационный цикл этой разновидности СТ идентичен таковому при ЛСТ [2].

Целью настоящей работы являлась оптимизация режимов СТ высокопрочного титанового сплава ВТЗ-1 при сравнительно низком заданном значении линейной скорости относительного перемещения, что технически достижимо при ЛСТ на современном оборудовании.

Предварительные эксперименты по изучению формирования структуры сварных соединений при СТ образцов сплава ВТЗ-1 диаметром 10...30 мм выполняли на установке СТ120, обеспечивающей регулирование значений частоты вращения, осевого

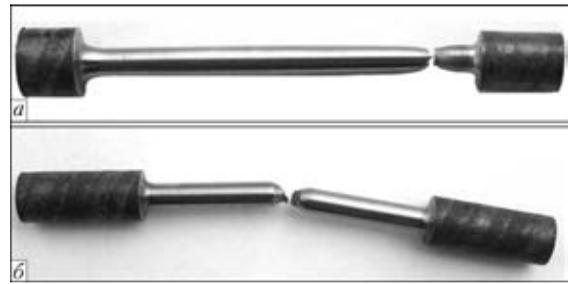


Рис. 1. Стандартный (а) и специальный (б) образцы сварных соединений сплава ВТЗ-1 после испытаний на разрыв

усилия и времени торможения вращения в широких диапазонах [18]. Сварку заготовок диаметром 10 мм сплава ВТЗ-1 для проведения механических испытаний и металлографических исследований выполняли на модернизированной машине МСТ-2, обеспечивающей цикл СТ при постоянной частоте вращения 1430 мин^{-1} и $P_{\text{пр}} = P_n$. СТ образцов выполняли как на воздухе, так и в среде аргона. Химический состав сплава ВТЗ-1 следующий, мас. %: 0,20...0,70 Fe; до 0,10 С; 0,150...0,40 Si; 0,8...2,3 Cr; 2,0...3,0 Mo; до 0,05 N; 5,5...7,0 Al; до 0,50 Zr; основа — Ti; до 0,18 O; до 0,015 H; до 0,3 — примеси [19].

Механические свойства сплава ВТЗ-1 следующие: $\sigma_B = 1000...1250$ МПа; $\delta = 12$ %; $\psi = 32...35$ %; $KCU = 300$ кДж/м²; твердость (HRC после закалки + отпуска) 38...42 [20].

Временное сопротивление растяжению полученных сварных соединений исследовали на разрывной машине ИР-100. Испытывали как стандартные образцы, так и специальные образцы с надрезом по зоне соединения (рис. 1), что позволяло определить показатели прочности металла в этой зоне. Микротвердость металла в ЗС определяли с помощью микротвердомера ПМТ-3. Основным критерием образования качественного сварного соединения являлось условие обеспечения максимальных показателей прочности сварного соединения при минимальном значении осадки. При отработке режимов СТ значения технологических параметров изменяли в следующих диапазонах: $P_n = P_{\text{пр}} = 10...30$ МПа, $t_n = 1,8...8,0$ с. При частоте вращения 1430 мин^{-1} и диаметре заготовок 10 мм $v = 0,75$ м/с, что соответствует

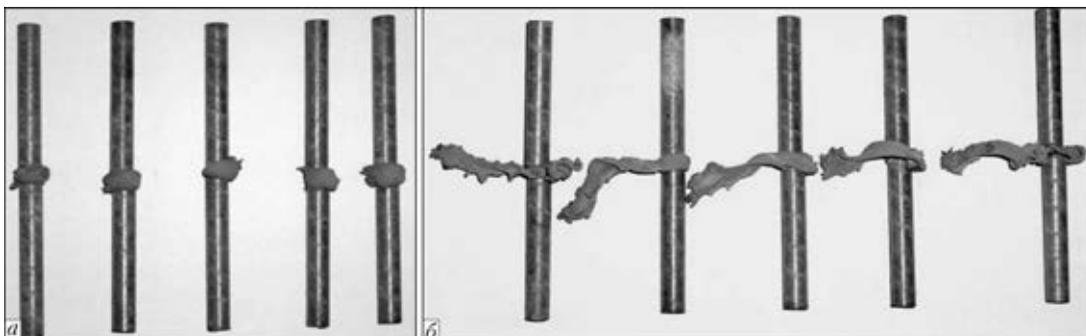


Рис. 2. Сварные соединения, выполненные СТ при $P_n = P_{\text{nm}} = 15$ МПа, $t_n = 2,2$ (а) и 4,5 с (б)

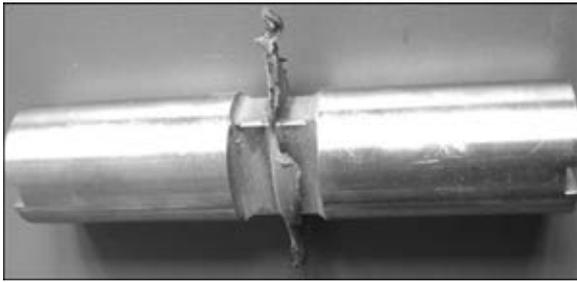


Рис. 3. Сварное соединение титанового сплава, выполненное ЛСТ (образец предоставлен Британским институтом сварки)

значениям, достижимым при ЛСТ высокопрочных сплавов на современном сварочном оборудовании [10].

Как видно из рис. 2, форма образующегося усиления (грата) при $v = 0,75$ м/с приблизительно соответствует форме грата при ЛСТ титанового сплава системы Ti-6Al-4V (рис. 3). Форма грата изменяется при увеличении t_n с 2,2 до 4,5 с, что свидетельствует о предпочтительности режимов СТ с минимальным t_n (рис. 2).

Характеристики прочности сварных соединений, полученных при СТ, представлены на рис. 4.

Анализ полученных результатов показал, что при СТ сплава ВТ3-1 в сварных соединениях достигаются показатели прочности не ниже показателей ОМ при всех рассмотренных выше значениях P_n : 10, 15, 27 МПа. Однако t_n для различных значений P_n существенно отличается. Так, при $P_n = 10$ МПа t_n должно составлять не менее 5,3 с, при $P_n = 15$ МПа — не менее 2,2 с, а при

$P_n = 27$ МПа качественные соединения получены при $t_n = 2$ с.

Увеличение времени нагрева приводит к росту общей осадки образцов при незначительном повышении показателей прочности сварного соединения. Например, при $P_n = 10$ МПа прочность соединений превышает показатели ОМ при $t_n \geq 5,3$ с, однако в этом случае значительно увеличивается суммарная осадка образцов до 24 мм по сравнению с $\Delta_{св} = 7$ мм при $P_n = 15$ МПа и $t_n = 2,2$ с. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в производственных условиях с точки зрения минимизации припусков на осадку и последующую механическую обработку P_n следует устанавливать в диапазоне значений 15...27 МПа.

Аналогичные результаты, полученные при изучении влияния общей осадки при СТ сплава системы Ti-6Al-4V на качество соединений, представлены в работе [4]. Установлено, что при $v = 2,2$ м/с, $P_n = 25,5$, $P_{пр} = 31,1$ МПа возможно снижение суммарной осадки при сварке с 12,7 до 3,2 мм без ущерба для качества соединений. Подобные результаты получены и в работе [5], однако при значительно больших значениях v , P_n , $P_{пр}$.

Как уже отмечалось, титан характеризуется высокой химической активностью по отношению к газам, находящимся в атмосфере при температуре более 350 °С. Проверку влияния возможного насыщения газом металла шва приводили на образцах, полученных СТ на воздухе и в среде газа неактивного по отношению к титану и его сплавам. Для защиты ЗС при СТ использовали аргон. Установлено, что при СТ на воздухе наблюдается повышение твердости металла на поверхности образцов в металле ЗТВ на глубину до 0,5 мм. Кроме того, усиление шва, образующееся в процессе осадки, имеет высокую твердость в результате взаимодействия пластифицированного металла, вытесняемого из стыка, с кислородом и азотом воздуха.

Результаты механических испытаний сварных соединений стандартных образцов сплава ВТ3-1 диаметром 10 мм, выполненных в среде аргона, приведены в таблице. Установлено, что разрушение стандартных образцов происходит по ОМ за пределами ЗС и ЗТВ (см. рис. 1, а). Существенного

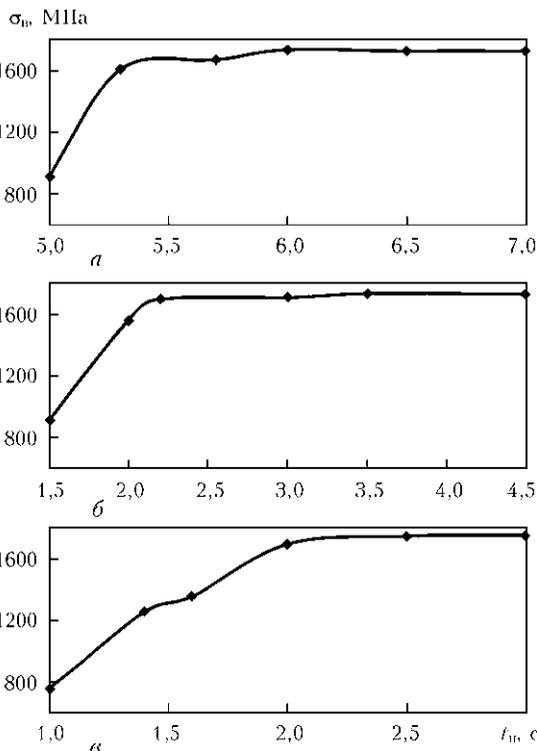


Рис. 4. Зависимость предела прочности металла зоны соединения сплава ВТ3-1 от времени нагрева при $P_n = 10$ (а); 15 (б) и 27 (в) МПа

Результаты механических испытаний сварных соединений стандартных образцов сплава ВТ3-1 на прочность при растяжении ($t_n = 2,2$ с, $P_n = 15$ МПа)

Номер образца	$\Delta_{св}$, мм	σ_v , МПа
1	6	1321
2	7	1446
3	6	1326
4	8	1258

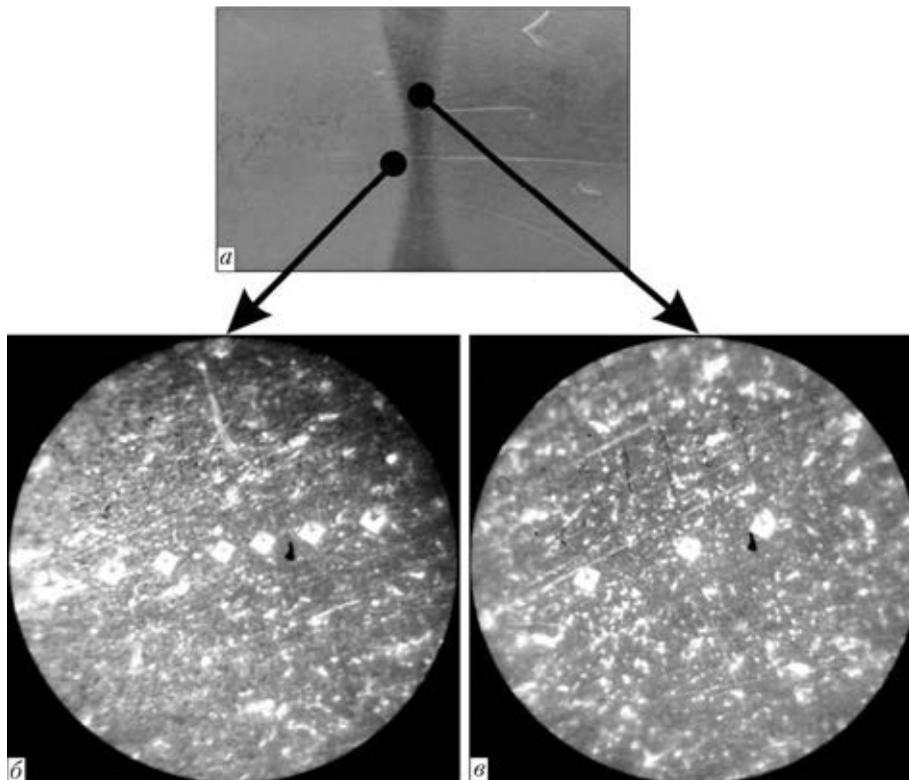


Рис. 5. Макроструктура (а) и зоны определения микротвердости (б, в, $\times 100$) сварного соединения сплава ВТ3-1, выполненного СТ

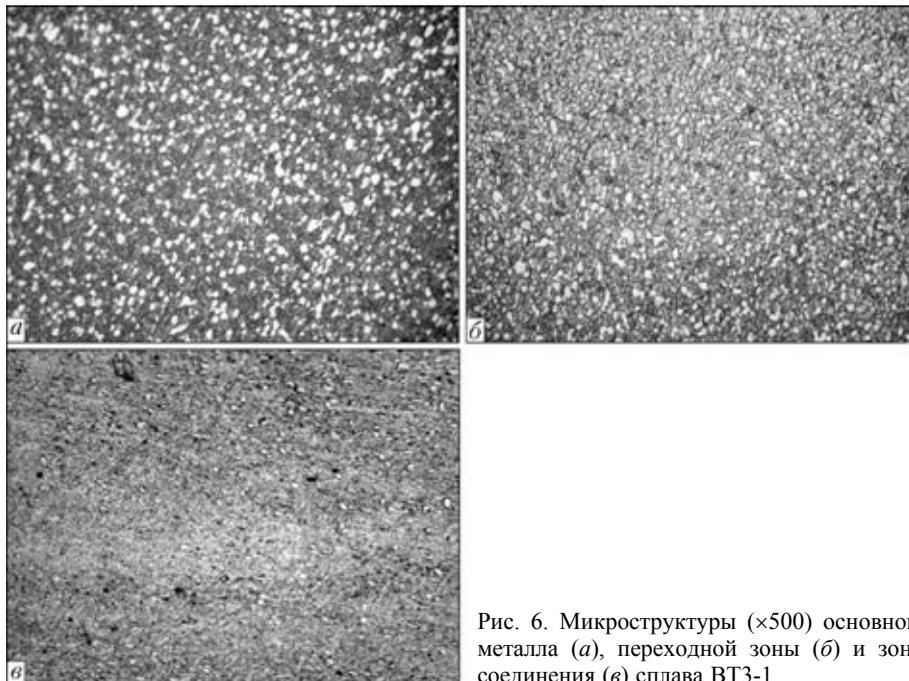


Рис. 6. Микроструктуры ($\times 500$) основного металла (а), переходной зоны (б) и зоны соединения (в) сплава ВТ3-1

влияния окружающей атмосферы на показатели прочности соединений при оптимальных значениях давления и времени нагрева не выявлено.

Полученные результаты позволили установить, что показатели прочности сварных соединений превышают соответствующие показатели для ОМ. Изучение микроструктуры сварных соединений, выполненных как на воздухе, так и в аргоне, выявило разницу травимости металла ЗС,

околошовной зоны и ОМ (рис. 5, а). При этом значения микротвердости изменяются от 4,6 ГПа в ОМ до 4,8 ГПа в металле ЗС.

По нашему мнению, увеличение показателей прочности и твердости металла шва связано с интенсивной термомеханической деформацией металла при температурах, превышающих температуру β -перехода. В результате дробления и перемешивания структурных составляющих сплава



BT3-1 в процессе СТ и быстрого охлаждения после сварки происходят значительные структурные изменения в ЗС: формирование мелкозернистой динамически рекристаллизованной структуры из β -зерен с дисперсными выделениями α -фазы (рис. 6).

Кроме того, для соединений, полученных при СТ на воздухе, повышение твердости может быть обусловлено кратковременным окислением контактных поверхностей на начальных стадиях процесса (до начала вытеснения пластифицированного металла из стыка) и перераспределением образовавшихся оксидных фаз титана в ЗС. Формирование ЗС с повышенной твердостью обусловлено особенностью распада β -титана в условиях резкого охлаждения и присутствия в шве небольших количеств кислорода, а также частичным присутствием β -фазы в метастабильном состоянии [3]. Известно, что упрочнение ($\alpha+\beta$)-сплавов титана при высокотемпературной термомеханической обработке тем больше, чем больше количество остаточной β -фазы после нее [21].

Таким образом, в процессе СТ металл в ЗС подвергается высокотемпературной термомеханической обработке, которая обеспечивает измельчение структуры, увеличение плотности дислокаций количества β -фазы, что, по данным [22], для сплава BT3-1 увеличивает прочность на 280...480 МПа по сравнению с обычной термообработкой.

Выводы

1. Экспериментально установлено влияние параметров режимов СТ на формирование структуры и механические свойства сварных соединений титанового сплава BT3-1. Показатели прочности соединений при $P_n = 15...27$ МПа и t_n более 2,2 с превышают показатели ОМ.

2. Увеличение прочности сварных соединений сплава BT3-1 по сравнению с показателями ОМ связано с высокотемпературной термомеханической деформацией металла при СТ. В результате дробления и перемешивания структурных составляющих сплава BT3-1 в процессе нагрева и деформации и быстрого охлаждения после сварки происходят значительные структурные изменения в ЗС: формирование мелкозернистой динамически рекристаллизованной структуры из β -зерен с дисперсными выделениями α -фазы.

3. На основе полученных результатов оптимизирован режим СТ сплава BT3-1 при сравнительно низкой линейной скорости относительного перемещения, что технически достижимо при ЛСТ титановых сплавов на современном оборудовании.

1. Третьяков Ф. Е. Сварка плавлением титана и его сплавов. — М.: Машиностроение, 1968. — 148 с.
2. Сварка трением: Справочник / В. К. Лебедев, И. А. Черненко, В. И. Вилль и др. — Л.: Машиностроение, 1987. — 236 с.
3. Большаков М. В., Черницын А. И. Структура и свойства соединений титанового сплава OT4, выполненных сваркой трением // Свароч. пр-во. — 1974. — № 7. — С. 40–42.
4. Eichhorn F., Kes P., Maser D. Gefügeausbildung und Eigenschaften artgleicher Reibschweißverbindungen aus Titanwerkstoffen // Schweißen und Schneiden. — 1990. — 42, № 4. — S. 189–191.
5. Parameter study into the friction welding of the intermetallic TiAl and the alloy Ti6Al4V / K.-H. Böhm, V. Ventzke, M. Kocak et al. // Welding and Cutting. — 2003. — № 2. — P. 90–96.
6. Friction welding of titanium alloys / C. G. Nessler, D. A. Rutz, R. D. Eng, P. A. Vozzella // Welding J. — 1971. — 50, № 9. — P. 379–385.
7. Microstructural and residual stress development due to inertia friction welding in Ti–6246 / M. M. Attallah, M. Preuss, C. Boonchareon et al. // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2012. — 43, № 9. — P. 3149–3161.
8. Schwartz M. M. Inertia friction welding of helicopter components // DVS Berichte Lectures of the 2nd Intern. conf. in Essen «Welding and Brazing in Aircraft and Spacecraft Construction», Sept. 16–17, 1985. — P. 36–43.
9. Threadgill Russell M. J. Friction welding of near shape performs in Ti–6Al–4V // The Proc. of the 11th World conf. on titanium «Ti-2007 Science and Technology», Kyoto, Japan, June 3–7, 2007. — The Japan Institute of Metals, 2007. — P. 1283–1286.
10. Штрикман М. М. Сварка линейным трением // Свароч. пр-во. — 2008. — № 12. — С. 35–40.
11. Vairis A., Frost M. High frequency linear friction welding of a titanium alloy // Wear. — 1998, 217. — № 4. — P. 117–131.
12. Wilhelm H., Furian R., Moloney K. C. Linear friction bonding of titanium alloys for aeroengine application // Proc. 8th World conf. «Titanium '95: Sci. and technology», Birmingham, UK, 22–26 Oct., 1995. — London: Institute of Materials, 1996.
13. Mechanical properties and microstructure of linear friction welded TC4+TC17 joint / M. Tie-jun, S. Dong-gang, Z. Yong, Y. Si-qian // J. Aeronaut. Materials. — 2009. — 29(4). — P. 33–37.
14. Wanjara P., Jahazi M. Linear friction welding of Ti–6Al–4V: Proc., microstructure and mechanical property interrelationships // Metallurgy and Material Transactions A. — 2005. — 36, № 8. — P. 2149–2164.
15. Vairis A., Frost M. Modeling the linear friction welding of titanium blocks // Material Sci. and Eng. A. — 2000. — 292. — P. 8–17.
16. Vairis A., Frost M. On the extrusion stage of linear friction welding of Ti6Al4V // Ibid. — 1999. — 271. — P. 477–484.
17. Vairis A., Frost M. Design and Commissioning of a friction welding machine // Materials and Manufacturing Proc. — 2006. — 21. — P. 766–773.
18. Зяхор И. В. Современное оборудование для сварки трением // Автомат. сварка. — 2001. — № 7. — С. 48–52.
19. ГОСТ 19807–91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки. — Взамен ГОСТ 19807–74. — Введ. 17.07.91. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 3 с.
20. Справочник металлста / А. Ю. Акимова, Б. Н. Арзамасов, И. А. Арутюнова и др.; под ред. А. Г. Рахштадта и В. А. Брострема. — М.: Машиностроение, 1976. — Т. 2. — 720 с.
21. Брун М. Я. Влияние фазового состава на термомеханическое упрочнение ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов // Цвет. металлы. — 1971. — № 12. — С. 53–56.
22. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блашук и др. — 2-е изд., доп. и перераб. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.

Поступила в редакцию 14.06.2012