



ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА ТЕХНИЧЕСКОГО ТИТАНА VT1-0 ДШП, УПРОЧНЕННОГО АЗОТОМ

В.Д. ШЕЛЯГИН, В.Я. САЕНКО, А.А. ПОЛИШКО, В.А. РЯБИНИН, А.В. БЕРНАЦКИЙ,
С.Н. СТЕПАНЮК, И.Н. КЛОЧКОВ

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

Показана возможность получения лазерной сваркой равнопрочных с основным металлом стыковых соединений листового проката VT1-0 ДШП толщиной 12 мм, предварительно упрочненного азотом (0,098 мас. %) из газовой фазы в процессе дугошлакового переплава. В ходе экспериментальных исследований была выполнена двухсторонняя сварка стыковых соединений с применением излучения Nd:YAG-лазера. Результаты макро- и микроисследований, замеры распределения микротвердости HV , механические свойства при испытании на статическое растяжение и ударный изгиб подтвердили высокое качество стыковых соединений. Однородность структуры, отсутствие трещин, пор и других дефектов свидетельствуют о перспективности разработки технологии лазерной сварки технического титана VT1-0 ДШП, упрочненного азотом (до 0,1 мас. %).

Ключевые слова: лазерная сварка, технический титан, упрочнение азотом из газовой фазы, свариваемость, стыковые соединения, микро-, макроструктура, микротвердость, механические свойства

Расширение производства и применения титана и его сплавов в различных отраслях техники вызвано в первую очередь их повышенной удельной прочностью (отношением предела прочности к плотности). Высокая коррозионная стойкость титана в атмосферных условиях, морской воде и ряде высокоагрессивных сред обуславливают эффективное их использование для изготовления сварных конструкций, работающих в самых тяжелых условиях эксплуатации. Объемы промышленного использования этих конструкций во многом зависят от совершенствования технологических процессов их изготовления и прежде всего сварки. К числу основных вопросов проблемы сварки титана относятся серьезные трудности, вызванные его высокой химической активностью при повышенных температурах. При сварке необходима надежная защита сварочной ванны от окружающей среды, чтобы исключить взаимодействие с газами атмосферы, иначе сварные соединения теряют пластичность, в швах образуются дефекты, в частности, поры. Для обеспечения хорошей свариваемости в титане и его сплавах ограничивают содержание вредных примесей — газов (кислорода, азота, водорода) и углерода. Так, в техническом титане VT1-0 содержится, мас. %: 0,12 O₂; 0,04 N₂; 0,01 H₂; 0,07 C [1].

В результате проведенного в ИЭС им. Е.О. Патона комплекса исследований [2–4] установлена возможность повышения более чем в 1,5 раза уровня прочностных характеристик технического титана марки VT1-0 (ГОСТ 23755–79), путем

легирования его азотом до 0,1 мас. % из газовой фазы в процессе выплавки слитков методом дугошлакового переплава (ДШП). При этом, несмотря на фактическое содержание азота (0,069 и 0,098 мас. %), в упрочненном титане VT1-0 ДШП толщиной 14...152 и 5...35 мм, соответственно, показатели относительного удлинения (δ , %) и сужения (ψ , %) находятся на высоком уровне — 14...27 и 32,5...47, соответственно.

Одной из главных задач исследования металлургического качества и технологических свойств упрочненного азотом листового проката VT1-0 ДШП как нового конструкционного материала, является его свариваемость.

Ранее [5] была показана эффективность применения электронно-лучевой сварки (ЭЛС) для получения равнопрочных с основным металлом (ОМ) сварных соединений листового технического титана VT1-0 ДШП толщиной 35 мм, упрочненного азотом до 0,1 мас. % из газовой фазы в процессе ДШП. Металлографические исследования подтвердили получение качественного сварного соединения без трещин, пор и других дефектов, несмотря на то, что фактическое содержание азота (0,098 мас. %) в основном металле почти в 2,5 раза превышает допустимое ($\leq 0,04$ мас. %) содержание в VT1-0 согласно ГОСТ 19807–74. Металл шва и ОМ характеризуются однородной структурой.

Новые возможности в производстве ответственных сварных конструкций из титана и его сплавов открываются в результате применения для этой цели лазерной и гибридной лазерно-ду-

* В работе принимали участие А.В. Сиора, А.Ю. Туник.



Таблица 1. Сравнение химического состава (мас. %) листового проката сплавов ВТ1-0 и ВТ1-0 ДШП (Ti – основа)

Материал	Al	Fe	C	[N]	[O]	[H]
ВТ1-0 ДШП	0,23	0,09	0,02	0,098	0,09	0,002
ВТ1-0 ГОСТ 19807–74	≤0,30	≤0,30	≤0,07	≤0,04	≤0,12	≤0,01

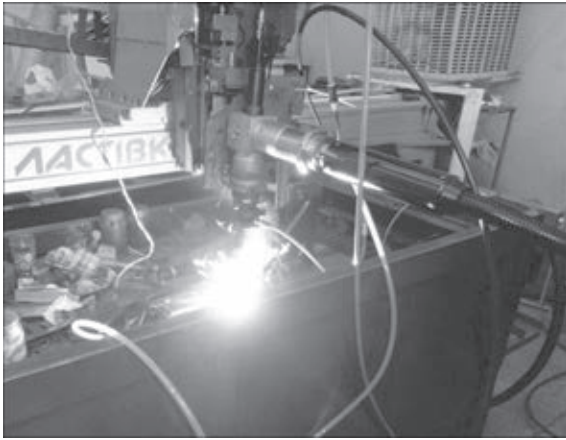


Рис. 1. Процесс лазерной сварки двухсторонних стыковых соединений листового проката ВТ1-0 ДШП толщиной 12 мм, упрочненного азотом (0,098 мас. %) из газовой фазы в процессе ДШП

говой сварки [6, 7]. Важным является также то, что лазерная сварка является одним из перспективных способов сварки, позволяющих получать высококачественные и долговечные сварные соединения практически без остаточных деформаций [8].

Целью настоящей работы является исследование свариваемости лазерным излучением стыковых соединений листового проката ВТ1-0 ДШП толщиной до 12 мм, упрочненного азотом (0,098 мас. %) из газовой фазы с оценкой возможности получения равнопрочных сварных соединений.

Таблица 2. Механические свойства листового проката толщиной 12 мм из титана марки ВТ1-0 и ВТ1-0 ДШП

Материал	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU_{+20}^2 Дж/см ²
ВТ1-0 ДШП	625	705	23	40,5	61
ВТ1-0 по ГОСТ 23755–79	-	375...570	10...13	24...27	-

Таблица 3. Технологические режимы лазерной сварки пластин сплава технического титана ВТ1-0 ДШП, упрочненного азотом (0,098 мас. %)*

Номер образца	Размер образца, мм	Газовая среда (расход газа)
1	198×194×12	He – ванна (20 л/мин), Ar – хвостовая часть ванны (14 л/мин), Ar – обратная сторона сварного шва (10 л/мин)
2	207×197×12	He – ванна (20 л/мин), N ₂ – хвостовая часть ванны (14 л/мин), Ar – обратная сторона сварного шва (10 л/мин)

* Режим сварки: стык сварен с двух сторон, P = 4,4 кВт; v_{св} = 1 м/мин.

Для достижения поставленной цели были выполнены эксперименты по лазерной сварке двухсторонних стыковых соединений листового проката ВТ1-0 ДШП толщиной 12 мм, упрочненного азотом (0,098 мас.%) из газовой фазы в процессе ДШП.

Химический состав (мас.%) листового проката ВТ1-0 ДШП толщиной 12 мм, используемого для сварных образцов, приведен в табл. 1, а механические свойства в табл. 2.

Эксперименты проводили на лабораторном стенде, смонтированном на базе трехкоординатного манипулятора «Ласточка-1» производства ИЭС им. Е.О. Патона. Для экспериментов использовали Nd:YAG-лазер «DY044» производства фирмы «ROFIN-SINAR» (Германия) с длиной волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм. Лазерное излучение передавалось по изготовленному из кварцевого стекла оптическому волокну диаметром 600 мкм и длиной 20 м. Из оптоволокну лазерное излучение попадало в коллиматор, где преобразовывалось с помощью системы оптических элементов, приобретало необходимые геометрические размеры и затем попадало на фокусирующую кварцевую линзу диаметром 50 мм с фокусным расстоянием $F = 300$ мм. Эксперименты проводили по схеме, приведенной в работе [6]. Образцы фиксировали в струбине, расположенной на предметном столе, а лазерную головку закрепляли на подвижной каретке манипулятора, как показано на рис. 1. Сварку осуществляли в атмосфере активных (N₂) и инертных газов (Ar, He). Технологические режимы сварки пластин сплава ВТ1-0 ДШП толщиной 12 мм, упрочненного азотом (0,098 %), представлены в табл. 3.

Полученные сварные соединения подвергали макро- и микроструктурным исследованиям, а также определяли их механические характеристики при испытании на статическое растяжение и ударный изгиб в состоянии после сварки.

Схематическое изображение этапов формирования двухсторонних стыковых швов лазерной сваркой показано на рис. 2.

Внешний вид сваренных пластин и технологические режимы лазерной сварки с двух сторон представлены на рис. 3, 4 и в табл. 3.

Двухсторонние стыковые швы на обеих сварных пластинах отличаются хорошим формированием, каких-либо поверхностных дефектов в металле шва или ЗТВ не обнаружено.

Металлографические макро- и микроисследования (рис. 5, 6) показали, что в

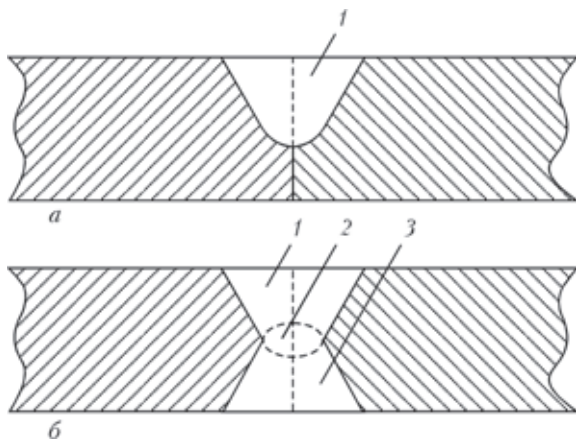


Рис. 2. Схематическое изображение этапов формирования двухстороннего стыкового соединения лазерной сваркой: *а* — лазерная дорожка с одной стороны; *б* — наложение лазерной дорожки со второй стороны (1 — шов 1; 2 — корень шва; 3 — шов 2)

результате выполнения лазерной сваркой двухсторонних стыковых швов по обоим технологическим вариантам получены качественные стыковые соединения без трещин, пор и других дефектов.

В образце 1 (He + Ar + Ar) ширина шва 1 составляет 6,5 мм, шва 2 — 6,6 мм, корня шва — 2,4 мм (рис. 2), при этом ширина ЗТВ составляет 0,3...0,5 мм. Во всем объеме двухстороннего стыкового шва образца 1 микроструктура состоит из игольчатой мартенситной α -фазы. В шве 1

иглы разной длины (10...15 мкм). Размер зерна на этом участке от 250 до 450 мкм, встречаются зерна с размером 100...150 мкм. Пластинчатые выделения α -фазы наблюдаются, в основном, по границам зерен. В корне шва размер зерен составляет 50...100 мкм, при этом они имеют внутризеренную игольчатую структуру с размером игл до 10 мкм. Шов 2 также имеет игольчатую мартенситную структуру. Размер зерен несколько меньше — от 150 до 250 мкм. В металле ЗТВ наблюдается переход от более мелкого зерна в металле шва к более крупному в основном металле. В металле ЗТВ каких-либо дефектов не наблюдается (рис. 5).

В образце 2 (He + N₂ + Ar) ширина шва 1 составляет 6,8 мм, шва 2 — 7,3 мм, корня шва — 2,6 мм (рис. 2), при этом ЗТВ составляет 0,4...0,6 мм. Во всем объеме двухстороннего стыкового соединения образца 2 микроструктура состоит из игольчатой мартенситной α -фазы. В шве 1 иглы разной длины (5...15 мкм). Размер зерна на этом участке от 150 до 250 мкм. Пластинчатые выделения α -фазы наблюдаются, в основном, по границам зерен. В зоне нахлеста размер зерен составляет 40...100 мкм, при этом они имеют внутризеренную игольчатую структуру с размером игл 5...10 мкм. Нижняя часть шва также имеет игольчатую мартенситную структуру. Размер зерен не-



Рис. 3. Внешний вид сваренных в газовой среде He + Ar + Ar с двух сторон пластин сплава технического титана VT1-0 ДШП толщиной 12 мм, упрочненного азотом (0,098 мас. %)



Рис. 4. Внешний вид сваренных в газовой среде He + N₂ + Ar с двух сторон пластин сплава технического титана VT1-0 ДШП толщиной 12 мм, упрочненного азотом (0,098 мас. %)

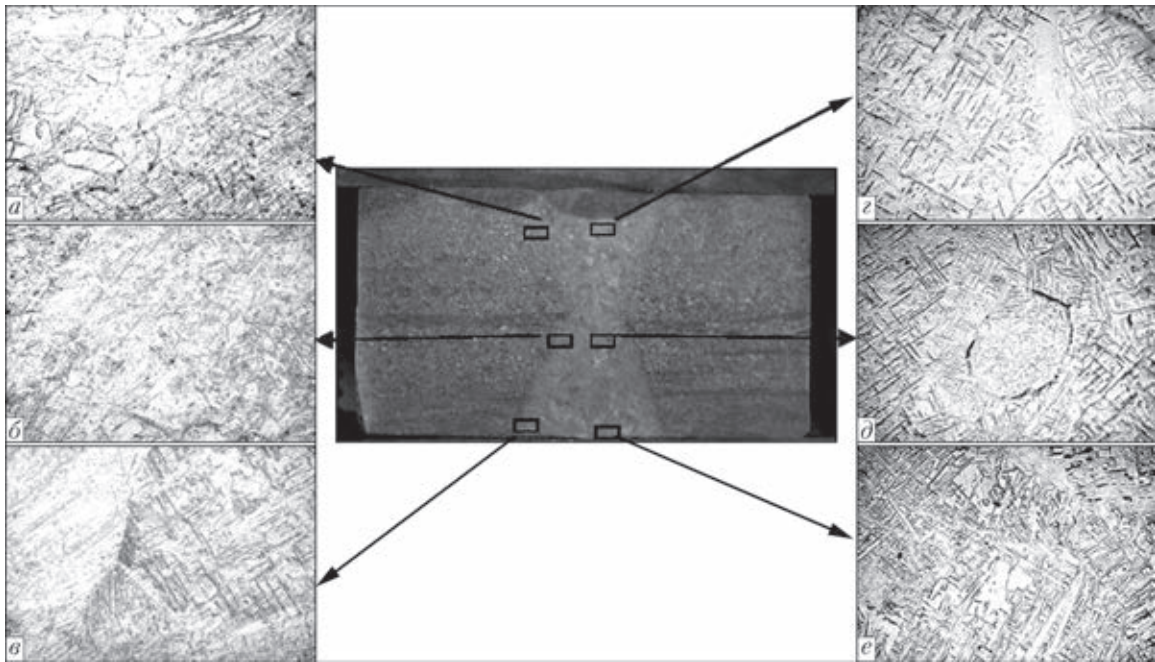


Рис. 5. Макро- ($\times 2,5$) и микроструктура ($\times 500$) двухстороннего стыкового сварного соединения (образец 1) сплава технического титана ВТ1-0 ДШП толщиной 12 мм, упрочненного азотом (0,098 мас. %), полученного в газовой среде He + Ar + Ar: а — ЗТВ шва 1; б — корня шва; в — шва 2; г — шов 1; д — корень шва; е — шов 2

сколько меньше — от 100 до 200 мкм. В металле ЗТВ наблюдается переход от более мелкого зерна в металле шва к более крупному в основном металле. В металле ЗТВ каких-либо дефектов не наблюдается (рис. 6).

Микротвердость измеряли на поперечных микрошлифах с применением твердомера LECO М-400 при нагрузке 50 г с шагом 100 мкм в разных зонах сварных соединений: шов 1, корень шва и шов 2. Наблюдается повышение значений микротвердости от ОМ (HV — 1830...2210 МПа) к металлу ЗТВ: у образца 1 (He + Ar + Ar) среднее значение HV — 2372 МПа; у образца 2 (He + N₂ + Ar)

— 2373 МПа. У металла шва образца 1 среднее значение HV — 2673 МПа; у образца 2 — 2880 МПа. В целом наблюдается повышение уровня микротвердости в металле шва образца 2 в сравнении с металлом шва образца 1 на всех исследуемых по высоте уровнях. В металле ЗТВ распределение микротвердости в поверхностных слоях шва во всем объеме полученного сварного соединения в обоих образцах практически равномерно. Механические испытания стыковых сварных соединений в состоянии после сварки (без термической обработки) проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 9651–84 на стати-

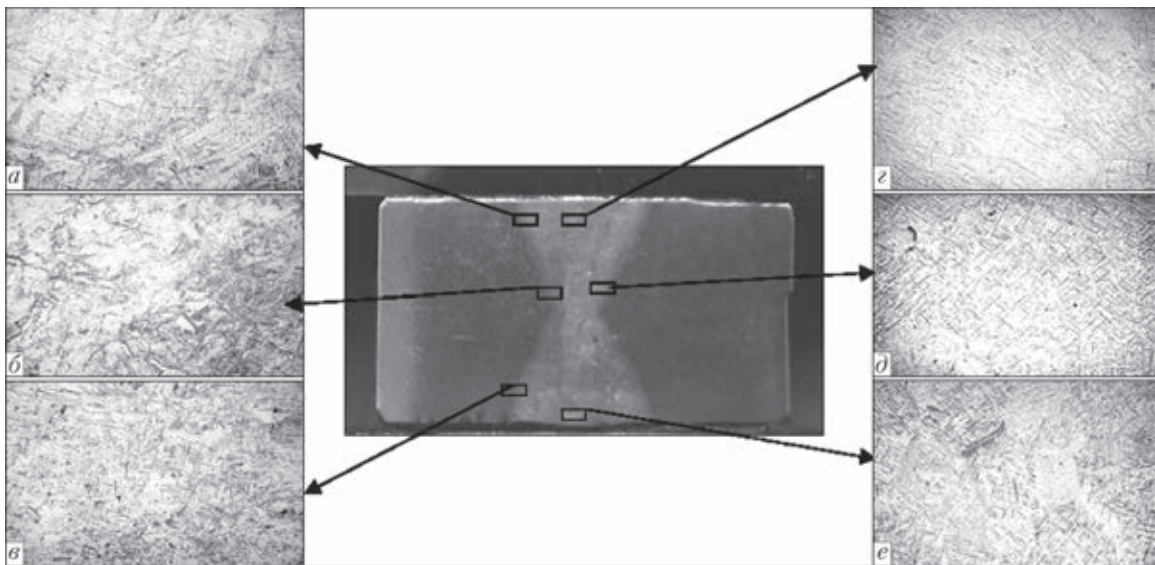


Рис. 6. Макро- ($\times 2,5$) и микроструктура ($\times 500$) двухстороннего стыкового сварного соединения (образец 2) сплава технического титана ВТ1-0 ДШП толщиной 12 мм, упрочненного азотом (0,098 мас. %), полученного в газовой среде He + N₂ + Ar (обозначения а–е такие же, как на рис. 5)

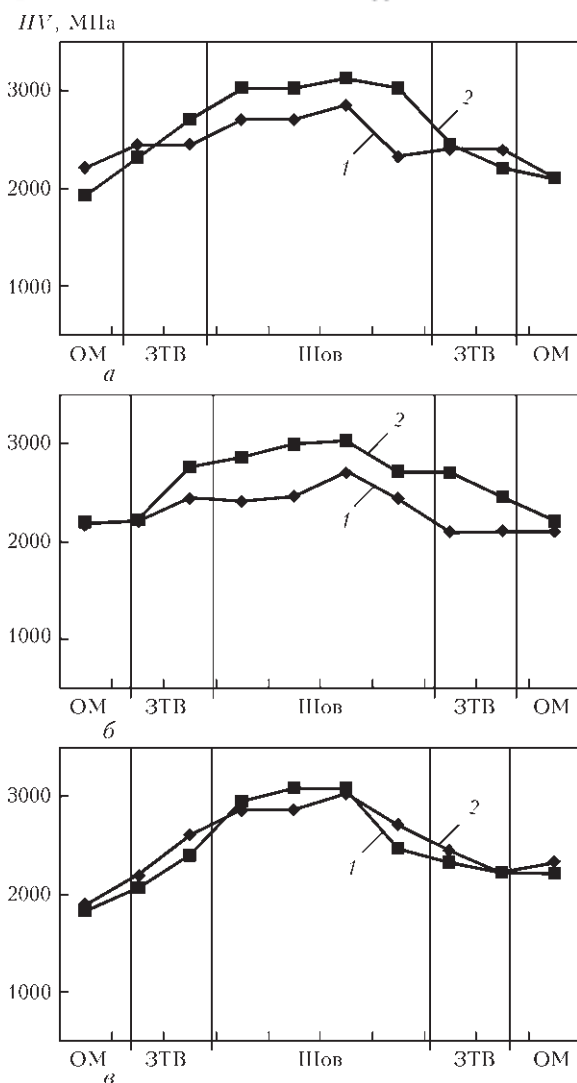


Рис. 7. Распределение микротвердости по высоте сварного соединения, ЗТВ и ОМ образцов технического титана ВТ1-0 ДШП толщиной 12 мм, упрочненного азотом (0,098 мас. %) в газовой среде He + Ar + Ar (1) и He + N₂ + Ar (2): а — шов 1; б — корень шва; в — шов 2 (см. рис. 2)

ческое (кратковременное) растяжение. Испытания проводили на сервогидравлической испытательной машине MTS 318.25 (США), позволяющей проводить нагружение с максимальным усилием

Таблица 4. Механические свойства двухстороннего стыкового сварного соединения технического титана ВТ1-0 ДШП толщиной 12 мм, упрочненного азотом (0,098 мас. %)

Исследуемые образцы	Механические свойства					Угол загиба, °
	σ_b , МПа	σ_r , МПа	δ , %	Ψ , %	KCU , Дж/см ²	
1	656	562	12	22	45	45
2	677	613	15	37	43	63

250 кН с погрешностью до ± 0,5. Результаты обрабатывали при помощи программного обеспечения TestWorks 4 фирмы «MTS». Точность полученных результатов ± 0,5%, а по ГОСТ 1497–78 до 1 %.

Испытания проводились на образцах с надрезом посередине одним ударом маятникового пневматического копра типа 2130-КМ-03 с номинальной потенциальной энергией маятника 300 Дж при температуре 20 °С. Результаты механических испытаний представлены в табл. 4.

Разрушение образцов после испытаний на статическое (кратковременное) растяжение в обоих случаях происходило по основному металлу. Надрезы образцов для испытаний на ударный изгиб выполнены по шву. Угол загиба для лазерного шва варианта 1 составляет 45°, а для шва варианта 2 почти в 1,5 раза больше и составляет 63° (табл. 1, 4).

На макрофрактограммах поверхностей разрушений после испытаний на статическое растяжение в обоих случаях плоский излом, с небольшими следами утяжки на боковых поверхностях образцов (рис. 8).

Фрактограммы поверхностей разрушений после испытаний на статическое растяжение показывают ямочный микрорельеф с уступами. Ямки различных размеров от 5...10 до 20...30 мкм на поверхности разрушения образца 1 (рис. 9, а); и от 2...5 до 15...20 мкм на поверхности разрушения образца 2 (рис. 9, б). В обоих случаях наблюдаются участки вторичного растрескивания (рис. 9).

Макрофрактограммы поверхностей разрушений после испытаний на ударный изгиб образцов волокнистые, на поверхности разрушения образ-

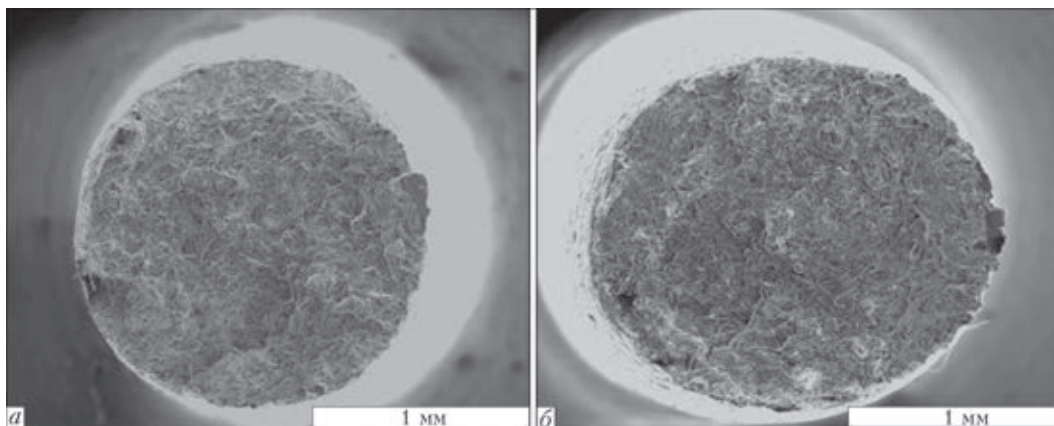


Рис. 8. Макрофрактограммы поверхностей разрушений после испытаний на статическое растяжение: а — образец сварного соединения 1; б — образец 2 сплава технического титана ВТ1-0 ДШП толщиной 12 мм, упрочненного азотом (0,098 мас. %)

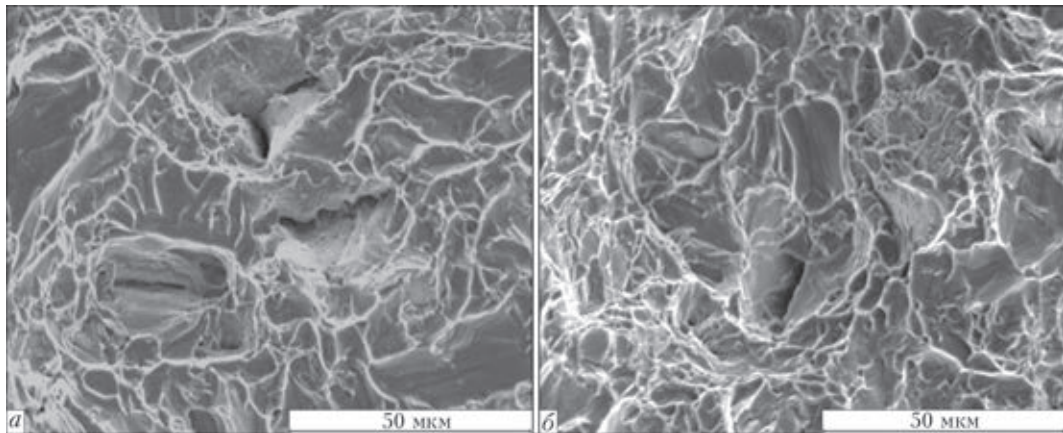


Рис. 9. Фрактограммы поверхностей разрушений после испытаний на статическое растяжение: *a* — образца сварного соединения 1; *б* — образец 2 сварного соединения сплава технического титана BT1-0 ДШП толщиной 12 мм, упрочненного азотом (0,098 мас. %)

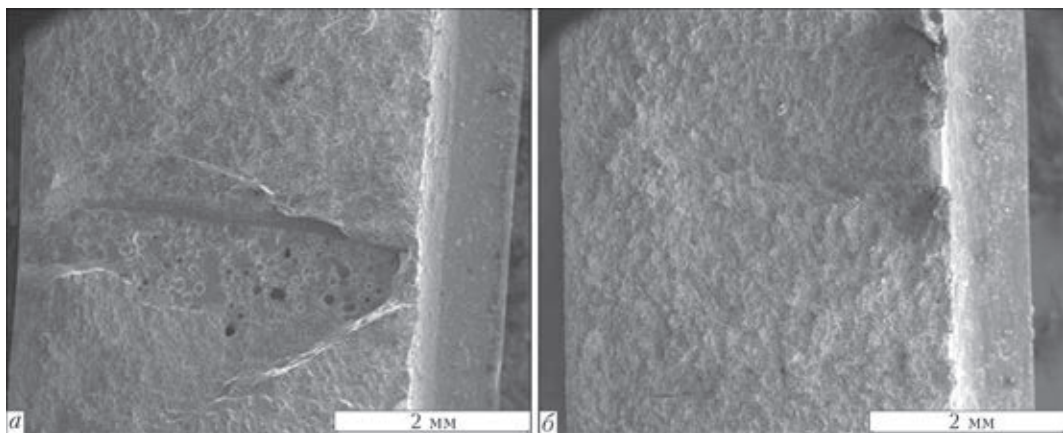


Рис. 10. Макрофрактограммы поверхностей разрушений после испытаний на ударный изгиб: *a* — образец сварного соединения 1; *б* — образец 2 сварного соединения сплава технического титана BT1-0 ДШП толщиной 12, мм упрочненного азотом (0,098 мас. %)

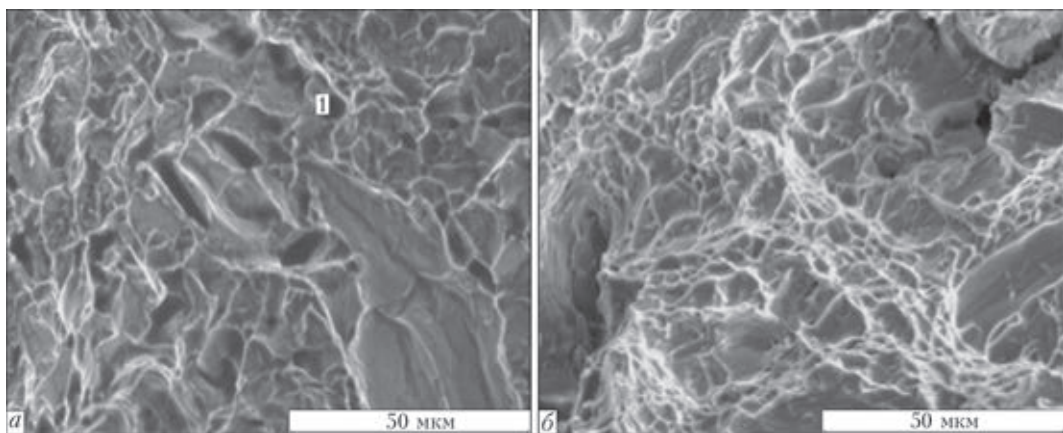


Рис. 11. Фрактограммы поверхностей разрушений после испытаний на ударный изгиб: *a* — образца сварного соединения 1; *б* — образец 2 сварного соединения сплава технического титана BT1-0 ДШП толщиной 12 мм, упрочненного азотом (до 0,098 мас. %)

ца 1 наблюдаются уступы. Поверхность образца 2 волокнистая плоская (рис. 10).

При анализе фрактограмм поверхностей разрушений после испытаний на ударный изгиб наблюдаются глубокие ямки с включениями, являющимися центрами их зарождения. Наблюдается смешанный механизм разрушения — сочетание вторичного межзеренного разрушения и, в случае

1, (рис. 11, *a*), небольшого количества ямок размером от 5...10 до 15...20 мкм, в случае 2 (рис. 11, *б*) — их большее количество, размером от 2...3 до 5...15 мкм.

В целом, фрактографический анализ показал смешанный механизм разрушения — сочетание вторичного межзеренного разрушения и признаков вязкого ямочного характера разрушения [9].



Выводы

1. Показана возможность получения с применением двухсторонней лазерной сварки равнопрочных стыковых швов плоского проката ВТ1-0 ДШП толщиной 12 мм, упрочненного азотом (0,098 мас. %) из газовой фазы в процессе дугошлакового переплава.

2. Результаты макро-, микроисследований, замеры распределения микротвердости *HV*, оценка механических свойств при испытании на статическое растяжение и ударный изгиб (значения ударной вязкости KCU_{+20} находятся практически на одном уровне для обоих случаев, а угол загиба для стыкового лазерного шва 2 (He + N₂ + Ar) почти в 1,5 раза больше, чем для стыкового лазерного шва 1 (He + Ar + Ar), подтверждают высокое качество и равнопрочность стыковых двухсторонних сварных швов: однородность их структуры, отсутствие трещин, пор и других дефектов, что свидетельствует о перспективности развития работ по применению лазерной сварки упрочненного азотом (до 0,1 мас. %) технического титана ВТ1-0 ДШП.

1. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов* / С.М. Гуревич, В.Н. Замков, В.Е. Блашук и др. – Киев: Наук. думка, 1986. – 240 с.

2. *Упрочнение титана путем легирования азотом из газовой фазы в процессе дугошлакового переплава* / Б.И. Медовар, В.Я. Саенко, В.И. Кумыш и др. // Пробл. спец. электротехнологии. – 1994. – № 3-4. – С. 12–17.

3. *Свойства толстых плит, прокатанных из листового крупнотоннажного слитка титана ВТ1-0 ДШП массой 4,5 т* / Б.И. Медовар, В.Я. Саенко, В.И. Кумыш и др. // Там же. – 1995. – № 2. – С. 10–14.

4. *Arc-slag remelting of steel and alloys* / B.I. Medovar, V.Ja. Saenko, G.M. Grigorenko et. al. – Cambridge: Intem. Sci. Publ, 1996. – 160 с.

5. *Электронно-лучевая сварка листового технического титана ВТ1-0, упрочненного азотом в процессе дугошлакового переплава* / В.Я. Саенко, А.А. Полишко, В.А. Рябинин, С.Н. Степанюк // Автомат. сварка. – 2014. – № 11. – С. 50–53.

6. *Laser welding of titanium alloys* / B.E. Paton, V.D. Shelygin, S.V. Akhonin et al. // The Paton Welding J. – 2008. – № 7. – P. 30–34.

7. *Сварка титановых сплавов гибридным способом с использованием излучения ND:YAG-лазера и дуги с неплавящимся электродом* / В.Д. Шелягин, С.В. Ахонин, В.Ю. Хаскин, В.Ю. Белоус // Laser Technologies in Welding and Materials Processing. – Kiev: Intern. Association «Welding» 2013. – С. 96–100.

8. *Лазерно-плазменная сварка нержавеющей стали* / И.В. Кривцун, В.Д. Шелягин, А.Н. Бушма и др. // Laser Technologies in Welding and Materials Processing. – Kiev: Intern. Association «Welding» 2013. – С. 44–47.

9. *Феллоуза Дж. Фрактография и атлас фрактограмм* / Справ. изд. пер. с англ. / Под ред. Дж. Феллоуза. – М.: Металлургия, 1982. – 488 с.

Поступила в редакцию 11.02.2015

Уважаемые коллеги!

**15-я Международная научно-техническая конференция
ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ И РЕНОВАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ (М15-2)**

01–05 июня 2015 г.

ОТЕЛЬ-КУРОРТ «РУТА»,
ЗАТОКА, ОДЕССКАЯ ОБЛ.

Тематика конференции:

- ◆ Научные основы инженерии поверхности:
 - материаловедение
 - физико-химическая механика материалов
 - физико-химия контактного взаимодействия
 - износо- и коррозионная стойкость, прочность поверхностного слоя
 - функциональные покрытия и поверхности
 - технологическое управление качеством деталей машин
 - вопросы трибологии в машиностроении
- ◆ Технология ремонта машин, восстановления и упрочнения деталей
- ◆ Метрологическое обеспечение ремонтного производства
- ◆ Экология ремонтно-восстановительных работ

В рамках конференции будет проведен семинар

**Сварка, наплавка и другие реновационные технологии
на предприятиях горно-металлургической,
машиностроительной промышленности и на транспорте**

Тематика семинара:

- ◆ Сварка при изготовлении и ремонте деталей: оборудование, материалы, технологии
- ◆ Наплавка при восстановлении и упрочнении деталей: оборудование, материалы, технологии
- ◆ Родственные реновационные процессы: оборудование, материалы, технологии