

УДК 621.791.14

## Исследование структуры и свойств неразъемных соединений титан–нержавеющая сталь, получаемых сваркой лазером с использованием промежуточных вставок и нанопорошков\*

А.Н. Черепанов<sup>1</sup>, А.М. Оришич<sup>1</sup>, Н.Б. Пугачева<sup>2</sup>, В.П. Шапеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Институт машиноведения Уральского отделения РАН, Екатеринбург

E-mail: ancher@itam.nsc.ru

Приводятся результаты экспериментального исследования структуры, фазового состава и механических свойств лазерного сварного соединения пластин титан–сталь 12Х18Н10Т толщиной 3 мм, полученных с использованием промежуточных вставок и модифицирующих нанопорошковых добавок. Показано, что скорость сварки, мощность излучения и положение фокального пятна лазерного луча существенно влияют на процессы, происходящие в сварочной ванне, и на структуру шва: максимально однородный по химическому составу и наиболее прочный сварной шов формируется при скорости движения лазера 1 м/мин, мощности 2,35 кВт и заглублинии фокуса до нижней поверхности пластин. Подъем фокуса на поверхность заготовки или выше нее, при прочих равных условиях, приводит к нестационарному проплавлению стали, уменьшению глубины и степени диффузионного перемешивания элементов, реализации соединения пластин по механизму пайки в прикорневой части шва. Материал сварного шва представляет собой пересыщенный твердый раствор легирующих элементов на основе меди с равномерно распределенными дисперсными частицами интерметаллидов  $Ti(Fe, Cr)_2$  и  $TiCu_3$ . При этом участки хрупкого разрушения с фасетками скола и квазискола соответствуют крупным частицам интерметаллидов  $Ti(Fe, Cr)_2$  или диффузионным зонам в основном на границе с титановым сплавом. Приведенные результаты и выводы численных расчетов теплофизических процессов сварки пластин титана со сталью (толщиной 3 мм) через промежуточную медную вставку качественно согласуются с результатами экспериментов, что указывает на адекватность численного описания процессов проплавления контактирующих материалов в зависимости от режима сварки и положения фокального пятна в рассматриваемой системе.

**Ключевые слова:** лазерная сварка, разнородные металлы, вставка, титан, нержавеющая сталь, структура, механические свойства, численное моделирование.

### Введение

Сварка титана со сталью является важным технологическим процессом при производстве деталей и механизмов из разнородных металлов. Лазерная сварка имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами неразъемного соединения металлов. Она более проста, безопасна и может быть использована в труднодоступных местах. Высококонтентрированный луч лазера позволяет существенно уменьшить зону

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 14-08-00633, № 13-01-227).

термического влияния, что положительно сказывается на прочностных и деформационных характеристиках сварного соединения. Применение сварных конструкций из титана и стали позволяет снизить вес изделий, что имеет решающее значение, например, в авиационном и космическом машиностроении. Это делает актуальным исследование лазерной сварки титановых сплавов со сталью. В литературе известны многочисленные работы по сварке разнородных металлов методами проката, трения, взрыва, электронного луча и др. с использованием различных технологических приемов [1–7]. Однако задача соединения плавлением титана со сталью, в частности, аустенитного класса, с помощью лазерного луча до сих пор не получила практического решения.

Согласно диаграмме состояния системы титан–железо, растворимость железа в  $\alpha$ -титане крайне мала и при нормальной температуре лежит в пределах 0,05–0,1 %. При концентрациях более 0,1 % Fe в сплаве образуются хрупкие интерметаллические соединения типов TiFe, TiFe<sub>2</sub>, Ti<sub>2</sub>Fe и эвтектики различного состава. Поэтому одной из основных задач при сварке титана со сталями является выбор таких сварочных материалов, методов и режимов сварки, при которых исключалось бы или значительно затруднялось образование хрупких интерметаллических фаз. Непосредственная сварка титана со сталью не дает положительных результатов [5].

Целью настоящей работы является исследование структуры, фазового состава и свойств сварного соединения титан–сталь 12X18H10T, полученных лазерной сваркой с использованием промежуточной медной вставки и нанопорошковых добавок.

### 1. Материалы и методика эксперимента

В качестве исходных образцов для лазерной сварки использовались пластины размером 100×100 мм толщиной 3 мм из титанового сплава BT1-0, являющегося технически чистым титаном с содержанием примесей по ГОСТ 19807-91 не более 0,76 %, и нержавеющей стали 12X18H10T. Химический состав стали представлен в табл. 1.

Сварку пластин из титанового сплава BT1-0 и нержавеющей стали 12X18H10T проводили с помощью CO<sub>2</sub>-лазера при разных величинах скорости движения луча, мощности и разной степени фокусировки. В качестве переходного слоя, участвующего в формировании сварного шва, использовались промежуточные вставки из различных металлов в виде тонких пластины. Кроме того применялись дополнительные технологические приемы: отжиг пропановой горелкой, добавки нанопорошков TiN, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, плакированных хромом, использование дополнительно тугоплавкой пластины из титана. Подготовка пластин включала зачистку свариваемых участков с помощью наждачной бумаги, мойку горячей водой, затем сушку и обработку ацетоном.

Методами оптической металлографии (использовался микроскоп NEOPHOT 21), а также растровой электронной микроскопии на приборе TESCAN VEGA II XMU (Чехия), оснащенный системами рентгеновского волнодисперсионного микроанализа INCA WAVE 700, энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450 с ADD детектором фирмы OXFORD (Великобритания) и программным обеспечением INCA исследованы микроструктура, распределение элементов, локальный химический состав материала сварных швов и прилегающих к ним диффузионных зон. Фазовый состав сварных швов определялся с поверхности поперечных шлифов на рентгеновском дифрактометре Shimadzu в  $k_{\alpha}$ -излучении хрома. Измерения микротвердости по сварному шву проводились

Таблица 1

Химический состав стали 12X18H10T в масс. %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti	Fe
0,12	0,8	1,8	10	0,01	0,03	18	0,25	0,6	остальное

на приборе LEICA VMHT AUTO (Германия) при нагрузках от 10 до 50 г. Испытания на статическое растяжение осуществляли на сервогидравлической испытательной машине INSTRON 8801 в соответствии с [8]. Скорость растяжения составляла 1 мм/мин.

## 2. Анализ результатов

В первом опыте была проведена сварка пластин титана и стали без вставки. Сварное соединение оказалось настолько хрупким, что шов разрушился на сварочном столе под действием термических напряжений в процессе затвердевания. Анализ показал, что трещины проходили по хрупким интерметаллидам  $FeTi$  и  $Fe_2Ti$ , которые образовались по всей длине сварного шва. В дальнейшем использовали промежуточные вставки из металлов разного химического состава, например бронзы Бр2, молибдена + Бр2, тантала + Бр2. Хотя швы не разрушались после сварки, но в них возникали поперечные трещины, вследствие чего соединения получались непрочными как на изгиб, так и на разрыв. Наилучший результат был получен при использовании вставки из технической чистой меди марки М1 шириной 1 мм. При этом качество соединения существенно зависело от расположения фокального пятна относительно границ контакта пластин и его заглублиения (расстояния от верхней поверхности пластин).

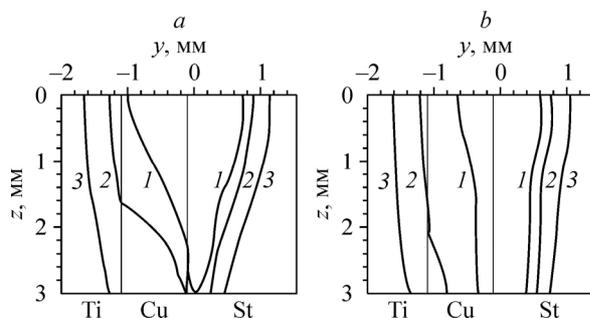
Для анализа характера проплавления разнородных металлов в зоне их соединения был проведен численный анализ процесса сварки пластин титана и стали с использованием промежуточной медной вставки шириной 1 мм и толщиной 3 мм при различных заглублиниях фокального пятна и положениях границ стыка относительно лазерного луча. Расчеты были проведены с использованием трехмерной теплофизической модели, изложенной в предшествующих работах авторов и частично в [9].

На рис. 1, 2 представлены некоторые результаты численного расчета для свариваемых пластин толщиной  $h = 3$  мм, мощности луча  $W = 2,4$  кВт и скорости сварки  $v = 1$  м/мин. Приведена картина положения изотерм плавления в сечении расчетной области поперек стыка пластин. Выбранное сечение расположено параллельно оси луча лазера в плоскости, перпендикулярной стыку пластин, и отстоит от него по направлению движения пластин на расстоянии 0,4 мм. Начало координат находится в точке, помеченной цифрой 0, в средней части на верхней поверхности пластин. Ось  $z$  в указанном сечении параллельна оси луча, ось  $y$  направлена перпендикулярно стыку пластин. Отсчет размеров в вертикальном направлении показан вдоль линии, параллельной оси  $z$ , сбоку каждого сечения. В выбранном сечении сварочная ванна имеет наибольший поперечный размер. Ее границы в этом сечении после остывания определяют границы сварочного шва. В средней части сечения прямоугольник шириной 1 мм, помеченный индексом Cu, занимает положение медной вставки до начала плавления. Вычисляя площади кусков расчетной области, ограниченных соответствующими изотермами и положениями до сварки стыков вставки с пластинами, а также верхней и нижней поверхностями пластин, можно приближенно вычислить, какой объем конкретного материала пластин и вставки расплавляется и в итоге попадает в сварочный шов.

Рисунок 1 иллюстрирует изотермы в сварном соединении, когда лазерный луч воздействует на границу стыка стальной пластины с медной вставкой со стороны стали при различных заглублиниях фокального пятна:  $Z_F = 0$  мм (а) и  $Z_F = h$  (б). Титановая пластина находится

Рис. 1. Распределение изотерм в поперечном сечении расчетной области с различными положениями фокуса луча при воздействии лазера на стальную пластину.

Изотермы плавления: 1 — титан, 2 — сталь, 3 — медь.



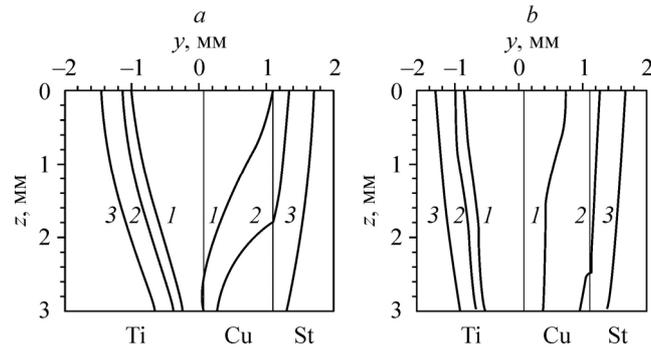


Рис. 2. Распределение изотерм в поперечном сечении расчетной области с различными положениями фокуса луча при воздействии лазера на титановую пластину.

Обозначение см. на рис. 1.

в области  $\{y < -1,1 \text{ мм}\}$ , медная вставка — в полосе  $\{-1,1 \text{ мм} \leq y \leq -0,1 \text{ мм}\}$ , сталь — в области  $\{y > -0,1 \text{ мм}\}$ . В этом случае медная вставка проплавляется полностью при всех вариантах расположения фокального пятна относительно верхней поверхности. Стальная пластина проплавилась по всей ее толщине на ширину 0,4–0,8 мм, титановая пластина прогрелась до температуры, близкой к температуре ее плавления, только в ее верхней части при  $Z_F = 0 \text{ мм}$ , следовательно, конвективного перемешивания титана с медью и сталью здесь не происходит, а соединение с титаном осуществлялось по механизму пайки.

На рис. 2 представлены изотермы в сварном соединении в случае, когда фокальное пятно луча расположено на стыке титановой пластины с медной вставкой со стороны титана также при  $Z_F = 0 \text{ мм}$  (а), и  $Z_F = h$  (б). Титановая пластина здесь расположена в области  $\{y < 0,1 \text{ мм}\}$ , медная вставка — в полосе  $\{0,1 \text{ мм} \leq y \leq 1,1 \text{ мм}\}$ , стальная пластина — в области  $\{y > 1,1 \text{ мм}\}$ . В этом случае имеет место проплавление титановой пластины на ширину 0,4–1 мм во всех вариантах заглабления фокального пятна, полное расплавление медной вставки, а также частичное по высоте вставки проплавление стальной пластины с узкой зоной шириной  $\leq 0,2 \text{ мм}$ . Следовательно, здесь имеет место смешивание всех трех металлов и возможность образования хрупких интерметаллидов. Поэтому можно прогнозировать, что наиболее благоприятный режим сварки будет обеспечен в случае, когда лазерный луч направлен на стык стальной пластины с медной вставкой со стороны стали, а фокальное пятно находится на нижней поверхности  $Z_F = h$ . Выполненные далее экспериментальные исследования подтвердили данные выводы и показали, что режим лазерной сварки оказывает существенное влияние на структуру и прочность соединений. Результаты механических испытаний сварных образцов и образцов из титана ВТ1-0 и стали 12Х18Н10Т при температуре  $T = 20 \text{ °С}$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

Прочность сварных соединений при различных режимах сварки

№ образца	$\Sigma_n$ МПа	Режим сварки
1	335	$v = 1 \text{ м/мин}$ , $W = 2,35 \text{ кВт}$ , $Z_F = 3 \text{ мм}$
2	319	$v = 1 \text{ м/мин}$ , $W = 2,35 \text{ кВт}$ , $Z_F = 3 \text{ мм}$ ; отжиг пропановой горелкой
3	375	$v = 1 \text{ м/мин}$ , $W = 2,35 \text{ кВт}$ , $Z_F = 3 \text{ мм}$ , нанопорошки TiN, $Y_2O_3$ и Cr
4	229	$v = 1 \text{ м/мин}$ , $W = 2,4 \text{ кВт}$ , $Z_F = -1 \text{ мм}$
5	0,8	$v = 1 \text{ м/мин}$ , $W = 1,7 \text{ кВт}$ , $Z_F = 0$
6	485	Образец вырезан из листа сплава ВТ1-0
7	690	Образец вырезан из листа стали 12Х18Н10Т

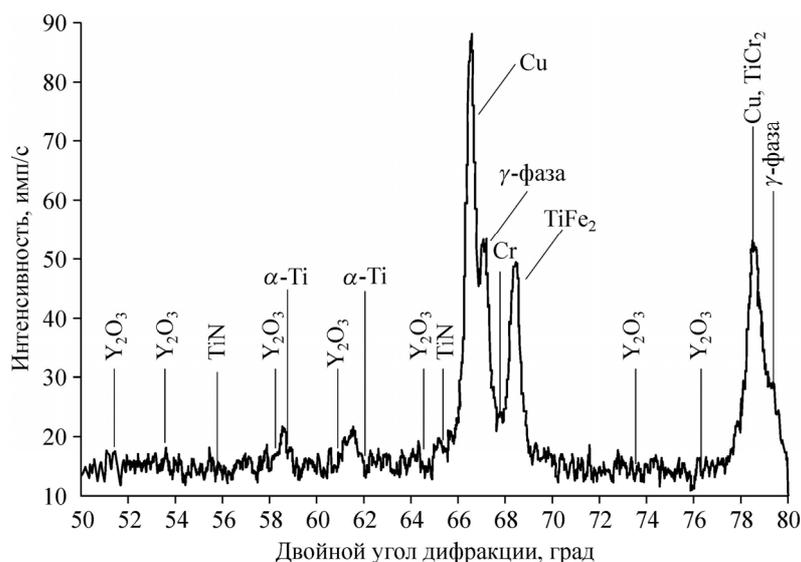


Рис. 3. Дифрактограмма материала сварного шва, полученная при сварке по режиму 3.

Наиболее высоким значением прочности при статическом растяжении характеризуются швы с промежуточным медным слоем и добавкой нанопорошков  $\text{TiN} + \text{Y}_2\text{O}_3 + \text{Cr}$  (см. табл. 2, образец 3), хотя это значение остается ниже прочности титанового сплава ВТ1-0 (образец 6). Нанопорошки присутствуют в материале сварного шва, что подтверждают результаты рентгеноструктурного фазового и локального микрорентгеноспектрального анализов (рис. 3).

Содержание  $\text{TiN}$  составило до 0,1 мас. %,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  — не более 0,05 мас. %,  $\text{Cr}$  присутствует в сварном шве за счет диффузии из нержавеющей стали, поэтому выявить влияние добавок этого элемента не представлялось возможным. Немного ниже значения прочности сварного шва, полученного по такому же режиму, но без нанопорошков:  $\sigma_{\text{в}} = 335$  МПа (образец 1).

Рисунок 4 иллюстрирует макроструктуру двух швов, полученных при сварке без термообработки (а) (режим 1) и с последующим отжигом пропановой горелкой (b) (режим 2). Применение такой обработки позволяет получить однородные по химическому составу швы. Значение временного сопротивления немного ниже ( $\sigma_{\text{в}} = 319$  МПа), чем до отжига ( $\sigma_{\text{в}} = 335$  МПа).

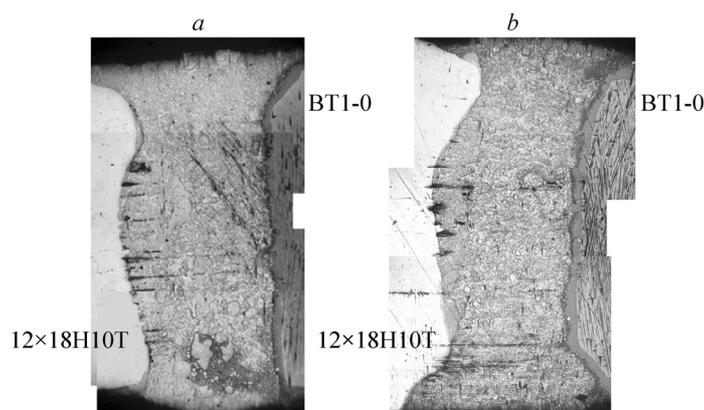


Рис. 4. Структура сварных швов с медной вставкой (поперечное сечение).  
а — структура, полученная по режиму 1, b — структура после отжига пропановой горелкой (режим 2).

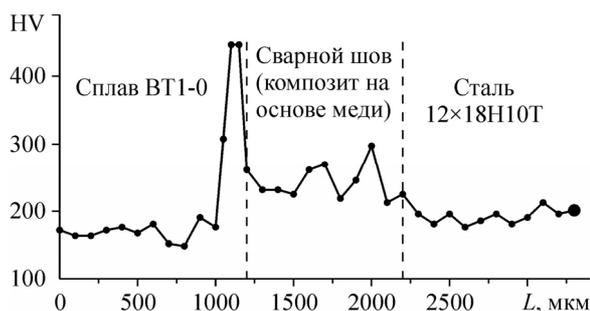


Рис. 5. Распределение микротвердости по ширине сварного шва.

Следует отметить, что в сварных швах обнаружено интенсивное диффузионное взаимодействие соединяемых материалов с веществом вставки, вследствие чего металл шва состоит из пересыщенного твердого раствора легирующих элементов

в меди, в котором выделяются частицы интерметаллидов  $Ti(Fe, Cr)_2$  размерами от 5 до 500 мкм, и частицы  $TiCu_3$ , которые имеют гораздо меньшие размеры и равномерно распределены в твердом растворе на основе меди. Микроструктура шва определяет неравномерный характер распределения значений микротвердости (рис. 5).

Изменение положения фокального пятна при лазерной сварке оказывает заметное влияние на строение и прочность получаемого соединения. Подъем пятна над поверхностью заготовки ( $Z_F = -1$  мм), при прочих равных условиях привел к формированию неравномерного по толщине и крайне неоднородного по химическому составу шва с неправильным профилем, с превышением проплава (избыточное количество наплавленного металла в корне шва) и натеком меди в корне шва (рис. 6). Диффузионное перемешивание свариваемых материалов произошло только до глубины порядка 2,4 мм от поверхности заготовки, а в прикорневой зоне высотой 0,6 мм шов представляет собой чистую медь. В рассматриваемом соединении можно выделить четыре зоны (отмечены цифрами на рис. 6): 1 — зона диффузионного взаимодействия титана с медной пластиной, содержание титана достигает 18 мас. % в медной основе, 2 — зона диффузионного взаимодействия медной пластины со сталью, содержание меди в ней 6–9 мас. %, эта зона подвержена пористости, 3 — зона пересыщенного твердого раствора на основе меди с частицами интерметаллидов  $Ti(Fe, Cr)_2$ , 4 — зона чистой меди без оплавления стали и титанового сплава, характерная для режима пайки, с диффузионной зоной на границе с титановым сплавом шириной 0,15 мм и отсутствием диффузионного взаимодействия на границе со сталью. Ширина шва на половине высоты составила 1,7 мм, среднее значение микротвердости — 396 HV<sub>0,05</sub>, при большом разбросе значений от 148 до 717 HV<sub>0,05</sub>. Прочность этого соединения невысока:  $\sigma_b = 229$  МПа.

При расположении фокального пятна на верхней поверхности пластин ( $Z_F = 0$ ) в полученном сварном шве образовались поперечные трещины и микротрещины на границе со сталью, способствующие разрушению образца при растяжении (см. табл. 2, режим 5). По химическому составу шов имел неоднородную структуру: вблизи стали содержал 2–4 мас. % Cu и около 20 мас. % Ti в железо-хром-никелевой основе (12 % Cr, 5 % Ni, Fe — основа), а вблизи титанового сплава — до 22 мас. % Cu в титановой основе, обогащенной кислородом. Среднее значение микротвердости шва составило 512 HV<sub>0,05</sub> при разбросе значений от 320 до 720 HV<sub>0,05</sub>. В прикорневой

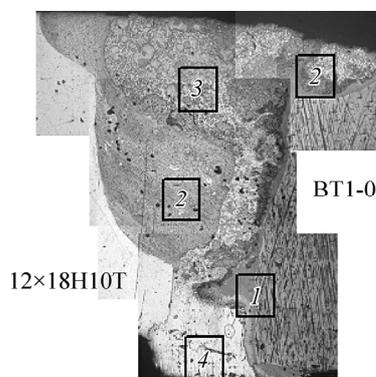


Рис. 6. Макроструктура сварного шва, полученного по режиму 4.

Цифрами отмечены зоны разного химического состава.

части шва ее значение значительно ниже — от 196 до 520 HV 0,05 (среднее значение — 350 HV 0,05). Это свидетельствует о недостаточном проплавлении по всей толщине пластин и слабом перемешивании расплава в сварочной ванне.

При заглублинии фокуса на 3 мм формируются достаточно однородные сварные соединения (режимы 1–3 в табл. 2). Материал швов имеет бездендритное строение (рис. 4) со значительной объемной долей пластичного твердого раствора на основе меди с равномерно распределенными в нем частицами дисперсных интерметаллидов размерами от 2 до 200 мкм. Ширина шва составила 1,2 мм, т.е. при толщине исходной переходной медной пластины, равной 1 мм, данный режим сварки позволил реализовать проплавление соединяемых материалов на минимальную толщину (по 0,1 мм от каждого материала).

Среднее значение микротвердости шва, полученного по режиму 1, составило 315 HV 0,05, что значительно ниже, чем при сварке по режимам 4, 5, и обусловлено равномерным распределением дисперсных частиц интерметаллидов по всему объему шва. Значения микротвердости колеблются по высоте шва от 220 до 577 HV 0,05. Ширина диффузионной зоны на границе с титановым сплавом составила 0,35 мм, среднее значение микротвердости в ней — 536 HV 0,05 при колебаниях от 280 до 720 HV 0,05. На границе со сталью толщина переходной зоны составила 0,2 мм со средним значением микротвердости 420 HV 0,05 при разбросе значений от 227 до 536 HV 0,05. Соединение характеризуется прочностью  $\sigma_b = 335$  МПа. При этом на поверхности излома образцов преобладали участки вязкого разрушения, характеризующиеся условно высокой работой разрушения [6].

### Выводы

Лазерная сварка стали 12X18H10T и титанового сплава BT1-0 с промежуточной медной вставкой на границе между материалом шва и соединяемыми листами характеризуется следующими особенностями:

- формируются диффузионные переходные зоны, состоящие из пересыщенных твердых растворов на основе железа на границе со сталью и на основе титана на границе со сплавом BT1-0;

- высокие скорости охлаждения позволяют получать в сварном шве и диффузионных переходных зонах пересыщенные твердые растворы, которые невозможно получить в обычных условиях;

- скорость движения лазерного луча, мощность излучения и положение фокуса существенно влияют на процессы, происходящие в сварочной ванне и на структуру шва; максимально однородный по химическому составу и наиболее прочный сварной шов формируется при скорости движения лазера 1 м/мин, мощности 2,35 кВт и заглублинии фокуса до нижней поверхности пластин;

- положение фокального пятна на верхней поверхности заготовки или выше ее, при прочих равных условиях, приводит к нестационарному проплавлению стали, уменьшению глубины и степени диффузионного перемешивания элементов, реализации соединения листов по механизму пайки в прикорневой части шва;

- материал сварного шва представляет собой пересыщенный твердый раствор легирующих элементов на основе меди с равномерно распределенными дисперсными частицами интерметаллидов  $Ti(Fe, Cr)_2$  и  $TiCu_3$ , при этом участки хрупкого разрушения с фасетками скола и квазискола соответствуют крупным частицам интерметаллидов  $Ti(Fe, Cr)_2$  или диффузионным зонам в основном на границе с титановым сплавом.

### Список литературы

1. Капырин Г.И. Титановые сплавы в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1977. 247 с.
2. Цвиккер У. Титан и его сплавы. М.: Металлургия, 1979. 512 с.
3. Steen W.M., Mazumder J. Laser material processing. London: Springer, 2010. 558 с.
4. Кучук–Яценко С.И., Швец Ю.В., Кавуниченко С.Д., Швец В.И., Татаренко С.Д., Прошенко В.А. Влияние ширины вставки из нержавеющей стали на эксплуатационные свойства соединений железнодорожных крестовин с рельсовыми окончаниями // Автоматическая сварка. 2007. № 3. С. 3–7.
5. Черепанов А.Н., Афонин Ю.В., Оришич А.М. Лазерная сварка стали с титановым сплавом с применением промежуточных вставок и нанопорошковых инокуляторов // Тяжелое машиностроение. 2009. № 8. С. 24–26.
6. Пугачева Н.Б., Трушина Е.Б., Пугачева Е.И., Оришич А.М., Черепанов А.Н. Структура сварных швов стали 18X18H10T и титанового сплава BT1-0 с промежуточной медной пластиной после лазерного проплавления // Вопросы материаловедения. 2013. № 1(73). С. 166–174.
7. Yao Ch., Xu B., Zhang X., Huang J., Fu J., Wu Y. Interface microstructure and mechanical properties of laser welding copper–steel dissimilar joint // Optics and Lasers in Engng. 2009. Vol. 47, No. 7. P. 807–814.
8. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. Введ. 1967-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1966.
9. Шанеев В.П., Исаев В.И., Черепанов А.Н. Моделирование теплофизических процессов лазерной сварки пластин из разнородных сплавов с применением промежуточной вставки // Докл. V Всес. конф. «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине». Новосибирск: Параллель, 2013. С. 192–194.

*Статья поступила в редакцию 24 июля 2014 г.*