

УДК 621.791.14

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

А.Н. Черепанов¹, А.М. Оришич¹, Н.Б. Пугачева², В.П. Шапеев¹

¹*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

²*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 заглублении 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. Высококонцентрированный 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 α -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, TiFe₂, Ti₂Fe 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 CO₂-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, Y₂O₃, 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), оснащенном 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_{α} -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].

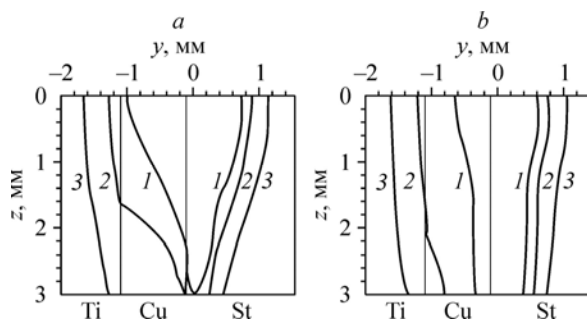
На рис. 1, 2 представлены некоторые результаты численного расчета для свариваемых пластин толщиной $h = 3$ мм, мощности луча $W = 2,4$ кВт и скорости сварки $v = 1$ м/мин. Приведена картина положения изотерм плавления в сечении расчетной области поперек стыка пластин. Выбранное сечение расположено параллельно 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 ставки 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 (a) и $Z_F = h$ (b).

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.



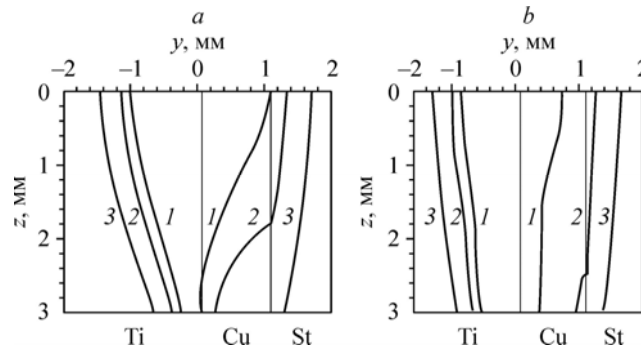


Рис. 2. Распределение изотерм в поперечном сечении расчетной области с различными положениями фокуса луча при воздействии лазера на титановую пластину.

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 $Z_F = 0 \text{ мм}$ (a), и $Z_F = h$ (b). 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 заглубления 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 BT1-0 и стали 12X18H10T при температуре $T = 20 \text{ °C}$ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Прочность сварных соединений при различных режимах сварки

№ образца	Σ_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 BT1-0
7	690	Образец вырезан из листа стали 12X18H10T

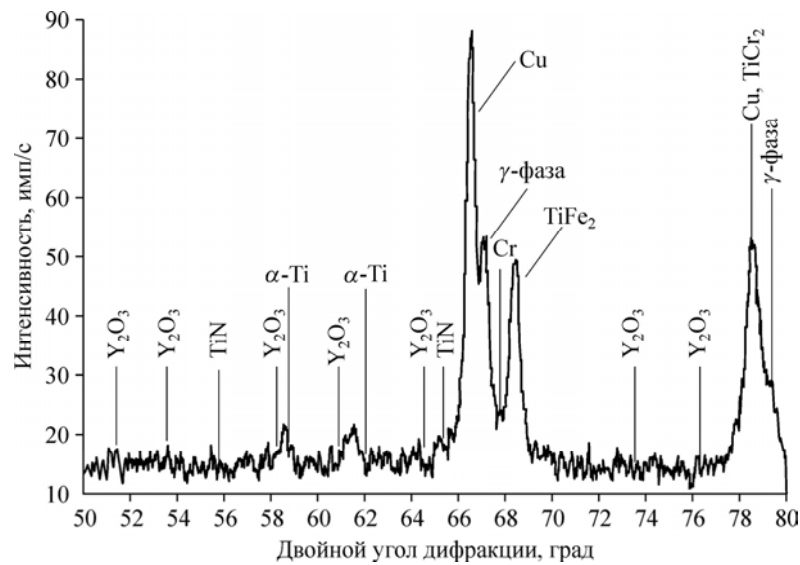


Рис. 3. Дифрактограмма материала сварного шва, полученная при сварке по режиму 3.

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 TiN составило до 0,1 мас. %, Y_2O_3 — не более 0,05 мас. %, 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).

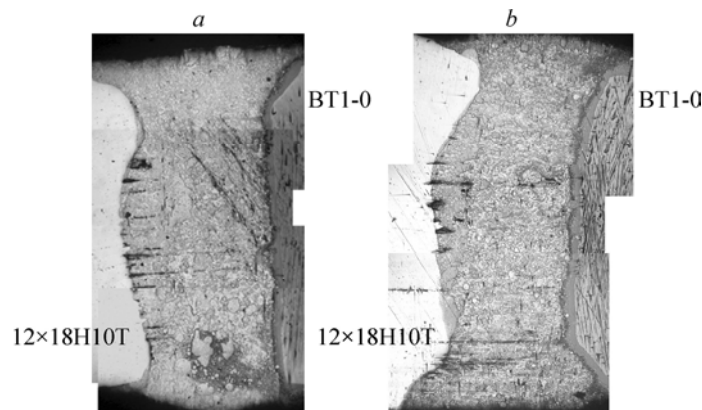


Рис. 4. Структура сварных швов с медной вставкой (поперечное сечение).
а — структура, полученная по режиму 1, b — структура после отжига пропановой горелкой (режим 2).