



## ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА ТОНКОЛИСТОВОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ МОДУЛИРОВАННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

А. Г. ЛУКАШЕНКО, Т. В. МЕЛЬНИЧЕНКО, кандидаты техн. наук, Д. А. ЛУКАШЕНКО, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние частоты модуляции мощности и формы импульсов лазерного излучения на формирование структуры металла шва при сварке аустенитной стали типа 18-10. Показано, что импульсное лазерное воздействие может оказывать влияние на кристаллизацию металла шва и формирование мелкозернистой структуры в нем. Определен оптимальный диапазон частоты модуляции.

*Ключевые слова:* лазерная сварка, тонкий лист, нержавеющая сталь, кристаллизация, сварной шов, модулированное излучение, параметры лазерной сварки, микроструктура

В сварочном производстве эффективное использование энергетических и материальных ресурсов может быть достигнуто путем внедрения принципиально новых энергосберегающих технологий и оборудования.

Известны различные методы влияния на процесс кристаллизации. При этом ставится задача модифицирования структуры шва, в частности, получение мелкозернистой структуры, что в большинстве случаев существенно улучшает свойства сварного соединения. Выделяют два основных способа воздействия на формирование структуры шва: металлургический и технологический [1]. Металлургический основан на модифицировании сварочной ванны химическими элементами с помощью как присадочных материалов, подаваемых в зону сварки, так и предварительной подготовки металла перед сваркой (нагартовка, наклеп, применение технологических вставок) [2]. Технологический способ, помимо оптимизации режимов сварки, предусматривает внешнее воздействие на сварочную ванну (механическое, тепловое, электромагнитное).

В последнее время большое распространение получил метод внешнего импульсно-периодического воздействия с применением в качестве источника тепла лазерного излучения [3–8]. Изучение физических процессов, протекающих в сварочной ванне при таком воздействии, крайне сложно [9]. Отсутствие строгих математических моделей процесса, быстротечность тепловых процессов обуславливают проведение исследований на основе комплексного подхода путем сочетания качественных оценок, экспериментов, локального моделирования с теоретическим обоснованием.

Получение высоких технологической прочности и механических характеристик сварных сое-

динений является одной из основных задач при лазерной сварке тонкостенных конструкций. При этом для предотвращения горячих и холодных трещин в металле шва при сварке тонких металлов важное значение приобретает возможность получения в нем мелкозернистой первичной структуры [10–12].

В данной работе исследовано влияние параметров импульсно-периодического лазерного воздействия, формы импульсов лазерного излучения и частоты их следования на формирование структуры шва при сварке аустенитной стали при постоянной средней мощности энергозложения.

Согласно статистическим представлениям термодинамики [13] при кристаллизации металла вероятность образования зародышей  $w_1$  можно представить как

$$w_1 = M_1 \exp(-\Delta G_k / (k_B T)), \quad (1)$$

где  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура;  $\Delta G_k$  — критическое или максимальное значение свободной энергии.

При этом

$$\Delta G_k = \frac{16\pi s^3 T_{пл}^2}{3\Delta T^2 Q^2}, \quad (2)$$

где  $s$  — поверхностное натяжение;  $T_{пл}$  — температура плавления металла;  $Q$  — скрытая теплота кристаллизации.

Однако с увеличением переохлаждения процесс диффузии тормозится, замедляя подход новых атомов из жидкости к кристаллу. При этом вероятность перехода из жидкой фазы в твердую при образовании зародыша

$$w_2 = M_2 \exp(-U / (k_B T)), \quad (3)$$

где  $U$  — энергия активации самодиффузии.

Вероятность  $w$ , определяющая количество центров кристаллизации  $n$ , равна произведению вероятностей составляющих процессов:

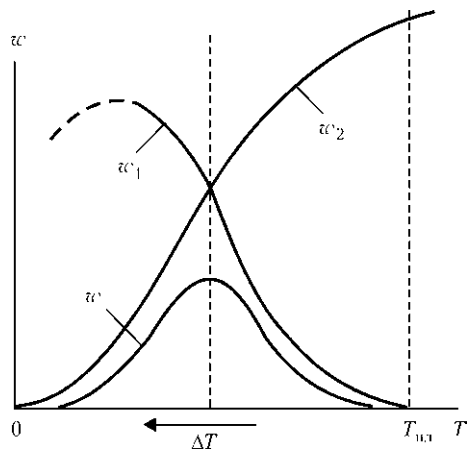


Рис. 1. Влияние степени переохлаждения на условия образования зародышей [13]

$$w = w_1 w_2 = M_3 \exp(-(\Delta G_k + U)/(k_B T)), \quad (4)$$

где  $M_1$ – $M_3$  — постоянные коэффициенты, зависящие от свойств металла.

После подстановки выражения (2) в (4) получим зависимость количества центров кристаллизации от температуры:

$$w = M_3 \exp\left(-\left(\frac{16\pi s^3 T_{пл}^2}{3\Delta T^2 Q^2} + U\right)/(k_B T)\right). \quad (5)$$

Зависимость вероятности появления зародышей от степени переохлаждения приведена на рис. 1.

Таким образом, под влиянием двух противоположных тенденций существует значение переохлаждения, обеспечивающее оптимальные условия для образования максимального количества зародышей.

На образующуюся структуру шва существенное влияние оказывает также скорость кристаллизации. Так, линейная скорость роста грани кристалла определяется как

$$w = M_4 \exp\left(-\left(\frac{\pi s^3 \alpha T_{пл}}{\Delta T Q} + U_1\right)/(k_B T)\right). \quad (6)$$

Увеличение количества центров кристаллизации и замедление скорости роста кристаллов способствует измельчению кристаллитов.

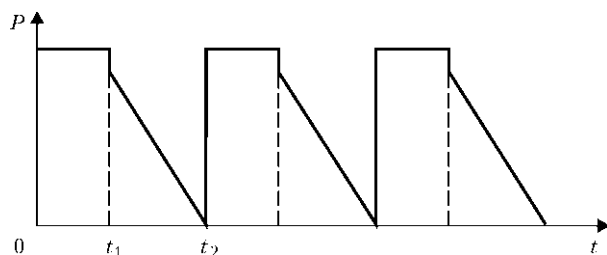


Рис. 2. Импульсно-периодический закон изменения мощности лазерного излучения

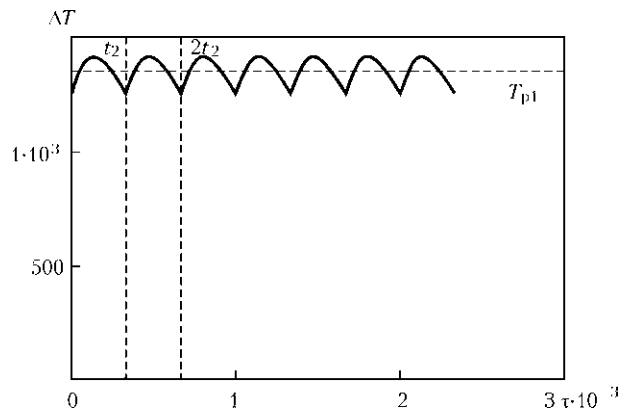


Рис. 3. Квазиустановившийся процесс изменения температуры сварочной ванны

Для определения технологических параметров, обеспечивающих оптимальные условия создания мелкозернистой структуры металла шва, лазерную сварку осуществляли модулированным излучением сложной формы (рис. 2). Форма импульсов имела крутой передний фронт и плавно ниспадающий задний, который содержал два участка: плавящийся и кристаллизационный. Первый ( $0; t_1$ ) обеспечивает плавление материала без интенсивного испарения, а второй участок ( $t_1; t_2$ ) имеет наклон, изменение угла которого позволяет изменять скорость кристаллизации, при этом длительность участка определяет оптимальную степень переохлаждения свариваемого металла.

Используя в качестве модели процесса теплопередачи движущийся линейный сосредоточенный источник в пластине с применением метода источников, получим квазиустановившийся температурный процесс (рис. 3).

Задачей моделирования является выбор формы и частоты следования лазерных импульсов, при которых обеспечивается изменение температуры сварочной ванны в области зоны фазовых переходов ликвидус–солидус, а также получение расчетных значений степени переохлаждения свариваемого металла.

**Материалы и аппаратура.** Применяли ленту толщиной 0,2 мм из стали 1.4541 согласно DIN EN 10028-7:2000, являющуюся аналогом стали 08X18H10T.

Образцы проваривали на трехкоординатном лазерном сварочном комплексе «АРМА-100М» (производитель — ИЭС им. Е. О. Патона), оснащенном иттербиевым волоконным одномодовым лазером типа YLR-100-AC с мощностью излучения 100 Вт (производитель — IPG Laser, Германия), генерирующая сердцевина которого имеет диаметр 10 мкм [14]. Лазерное излучение фокусировалось на металл в пучок диаметром 40 мкм. В качестве защитного газа сверху и снизу использовали аргон. Проплавление изучали по целому листу металла.



Частота модуляции, Гц	Макроструктура шва, ×100	Распределение основных компонентов в сварном шве	Распределение микротвердости в сварном шве
Непрерывное излучение			
100			
1000			
2000			

Рис. 4. Макроструктура шва, распределение основных компонентов и микротвердости в поперечном сечении сварных соединений, полученных при различных частотах модуляции лазерного излучения

**Методика эксперимента.** Образцы ленты нержавеющей стали (химический состав, мас. %: 0,72 Si; 0,25 Ti; 18,8 Cr; 1,68 Mn; 69,65 Fe; 8,9 Ni) были проварены непрерывным лазерным излучением мощностью 57 Вт и модулированным лазерным излучением. Форма модулированного импульса соответствовала приведенному на рис. 2. Амплитуда импульсов 100 Вт, частота модуляции 100, 1000, 2000, 3000, 5000, 10000 Гц, расчетные значения степени переохлаждения соответственно 151, 143, 136, 125, 106, 82 К. Среднее значение вкладываемой мощности 57 Вт, скорость сварки 0,33 см/с. Образцы для металлографического анализа в виде шлифов поперечных сечений сварных соединений готовили по стандартной методике с использованием шлифовально-полировального станка фирмы «Struers». Микроструктуру и химический состав основного металла и сварных соединений анализировали с помощью оптического микроскопа «Reichert Polyvar Met» и ска-

нирующего микроскопа «CamScan», оснащенного энергодисперсионной системой локального анализа «Energy 200». Микротвердость сварных соединений в поперечном сечении шва измеряли индентором Виккерса на микроскопе «Reichert Polyvar Met» при нагрузке 0,2 Н с шагом 50 мкм.

**Результаты и их обсуждение.** Макроструктура сварного соединения образцов нержавеющей стали, полученных при различных типах лазерного излучения, распределение основных компонентов в зоне шва и характер изменения микротвердости в зоне соединения приведены на рис. 4.

Результаты исследования показывают, что предложенный способ сварки лазерным лучом обеспечивает химический состав зоны шва по основным элементам на уровне основного металла как непрерывным, так и циклическим воздействием лазерного излучения. Следует отметить некоторое обеднение зоны расплавления по марганцу примерно до 1,2 мас. %. При всех режимах



Частота модуляции, Гц	Микроструктура шва, $\times 300$	Микроструктура околошовной зоны, $\times 600$
Непрерывное излучение		
100		
1000		
2000		
3000		
5000		
10000		

Рис. 6. Микроструктуры шва и околошовной зоны в сварных соединениях, полученных при различных частотах модуляции лазерного излучения

сварки трещины отсутствуют как в зоне шва, так и в металле ЗТВ.

При воздействии непрерывным излучением в сварном шве формируется дендритная аустенитная структура (рис. 5), характерная для высокой скорости кристаллизации при лазерной сварке. В зоне, примыкающей к линии сплавления, формируются крупные равноосные зерна аустенита размером до 10 мкм.

Лазерная обработка нержавеющей стали модулированным излучением с частотой модуляции 100 Гц приводит к формированию сварочных линий в структуре шва, что существенно ухудшает его качество. Структура шва неоднородна в результате смешанной формы кристаллизации, что вызывает формирование крупных кристаллитов с участками видманштеттовой структуры. Из-за структурной неоднородности микротвердость раз-



личных участков шва отличается (см. рис. 4), что может привести к ухудшению механических свойств сварного соединения.

При частоте модуляции лазерного излучения 1000 Гц однородность структуры не улучшилась, однако появились участки с ячеистой формой кристаллизации (см. рис. 5). При этом микротвердость шва выровнялась. Увеличение частоты модуляции лазерного воздействия до 2000 Гц обеспечивает преимущественно ячеистую форму кристаллизации и формирование мелких аустенитных зерен размером около 3 мкм с ферритными выделениями по границам. При данном режиме сварки формируется структурно-однородный шов, микротвердость различных зон которого одинакова.

Аналогичная однородная микроструктура наблюдалась также при частоте модуляции 3000 Гц. Характеристики распределения основных компонентов и микротвердости практически не отличались от предыдущего эксперимента. Следует отметить, что в этих случаях линия сплавления становится более тонкой, а аустенитное зерно более мелким, что положительно влияет на механические свойства околошовной зоны.

Дальнейшее повышение частоты импульсов до 5000 и 10000 Гц привело к ухудшению однородности формирования структуры шва и ее огрублению.

Данный способ лазерной сварки был применен при разработке технологии изготовления мелких серий прямошовных тонкостенных сварных труб различного диаметра из нержавеющей сталей, используемых для изготовления сильфонов и сильфонных сборок.

## Выводы

1. Использование модулированного лазерного воздействия при сварке образцов нержавеющей стали влияет на морфологические особенности кристаллизации структурных составляющих сварного соединения.

2. Повышение частоты модуляции способствует увеличению количества центров кристаллизации и формированию мелкозернистой ячеистой аустенитной структуры.

3. Применение наклонной формы заднего фронта импульса лазерного излучения обеспечивает замедление роста кристаллитов, что также

приводит к формированию мелкозернистой ячеистой структуры шва.

4. Влияние частоты модуляции на структуру сварного шва имеет предельный характер. Определены оптимальные параметры модулируемого импульса на структуру металла шва. Формирование структурно-однородного шва с минимальным размером аустенитного зерна около 3 мкм происходит при частоте модуляции 2...3 кГц. При этом расчетные значения оптимальной степени переохлаждения находятся в пределах 125...136 К.

1. Морозов В. П. Влияние колебательного механизма кристаллизации на процесс измельчения первичной структуры металла шва и зоны термического влияния // Наука и образование. — 2010. — № 9. — С. 1–18.
2. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
3. Левин Ю. Ю., Ерофеев В. А., Судник В. А. Физико-технологические условия получения бездефектных соединений при импульсной лазерной сварке // Свароч. пр-во. — 2008. — № 4. — С. 20–24.
4. Пат. 2120364 РФ, МКИ В 23 К26/00. Способ импульсной лазерной сварки и установка для его осуществления / С. В. Каюков, А. А. Гусев, Г. В. Самарцев, А. Н. Канавин. — Заявл. 27.09.96; Опубл. 20.10.98, Бюл. № 28, 2002.
5. Пат. 2186667 РФ, МКИ В 23 К26/20. Способ лазерной сварки металлов и сплавов / Т. Т. Басиев, А. В. Федин, Е. А. Чашин, И. В. Шилов. — Заявл. 10.01.2000; Опубл. 10.08.02.
6. Пат. 2269401 РФ, МКИ В 23 К26/20. Способ лазерной сварки металлов / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, С. В. Шалупаев и др. — Заявл. 27.08.04; Опубл. 10.02.06.
7. Bruncko J. Laserove mikrozvaranie kovovych materialov // Zvaranie-svarovani. — 2010. — № 9/10. — S. 219–222.
8. Celen S., Karadeniz S., Ozden H. Effect of laser welding parameters on fusion zone morphological, mechanical and microstructural characteristics of AISI 304 stainless steel // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. — 2008. — 39, № 11. — S. 845–850.
9. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки: Уч. пос. для вузов / Под ред. А. Г. Григорьянца. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 664 с.
10. Назарчук А. Т., Снисарь В. В., Демченко Э. Л. Получение равнопрочных сварных соединений закаливающих сталей без подогрева и термической обработки // Автомат. сварка. — 2005. — № 5. — С. 41–46.
11. Раямяки П., Кархин В. А., Хомич П. Н. Определение основных характеристик температурного поля для оценки типа затвердевания металла шва при сварке плавлением // Свароч. пр-во. — 2007. — № 2. — С. 3–7.
12. Силлен Р. Введение в термический анализ металлов // Литье Украины. — 2005. — № 5. — С. 6–8.
13. Теория сварочных процессов: Учеб. пособие для вузов / В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский и др.; под ред. В. В. Фролова. — М.: Высш. шк., 1988. — 559 с.
14. YLR-100-AC. Ytterbium fiber laser: User's guide. — IPG Laser GmbH, 2009.

The effect of power modulation frequency and shape of laser radiation pulses on formation of structure of the weld metal in welding of austenitic steel of the 18-10 type was investigated. It is shown that the pulse laser radiation can affect solidification of the weld metal and formation of the fine-grained structure in it. The optimal range of the modulation frequency was determined.

Поступила в редакцию 10.11.2011