



ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ ПРИСАДКИ ХРОМА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ СВАРКИ И НАПЛАВКИ

Г.А. БАЕВИЧ, В.Н. МЫШКОВЕЦ, А.В. МАКСИМЕНКО

Гомел. гос. ун-т им. Франциска Скорины. 246019, г. Гомель, Беларусь, ул. Советская, 104. E-mail: rector@gsu.by

Лазерные технологии находят все более широкое применение в современной промышленности при сварке и наплавке металлов. При этом важным являются управление нагревом и плавлением присадочного материала, его переносом и формированием на изделии. С использованием математического моделирования тепловых процессов установлены формы лазерного излучения для плавления и переноса присадочного материала с минимальным испарением его. Определены параметры фронтов импульса, обеспечивающие минимальные энергетические затраты на нагрев и плавление присадки из хрома. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических режимов импульсной лазерной сварки и наплавки металлов и сплавов. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 9.

Ключевые слова: лазерная наплавка, форма импульса, плотность мощности, длительность импульса, присадочный материал, хром, термомодеформационное плавление, кристаллизация, сварочная ванна, энергетические затраты, температурные поля

Широкое использование лазеров в современной промышленности для сварки и наплавки металлов зависит от решения ряда проблем, к которым можно отнести необходимость разработки высококачественных и производительных процессов с возможностью их дальнейшей автоматизации.

Лазерная сварка и наплавка металлов сопровождается комплексом одновременно протекающих процессов, основными из которых являются тепловое воздействие на поверхность металла, термомодеформационное плавление и кристаллизация металла в объеме сварочной ванны. При разработке технологических процессов, в которых используется импульсное лазерное излучение и присадочный материал в виде проволоки, необходимо учитывать ряд особенностей, влияющих на характер формирования и динамику расплава в зоне сварочной ванны.

Экспериментально установлено, что в условиях лазерной сварки [1] обеспечение надежного контакта между присадкой и основой способствует переносу расплавленного присадочного материала на основу и формированию сварочного соединения. Проблемы при формировании сварочных соединений возникают тогда, когда между присадкой и основой отсутствует контакт. В этом случае образовавшийся расплав остается на присадке и после прекращения лазерного воздействия кристаллизуется в виде шарика. Такого рода проблемы наиболее часто встречаются в тех технологических процессах, в которых для подачи присадочной проволоки применяют автомат. Это приводит к остановке техно-

логического процесса наплавки и ухудшению качества получаемого покрытия.

Одним из вариантов решения таких проблем может быть использование импульсов лазерного излучения специальной формы, обеспечивающих не только нагрев и плавление присадки, но и пе-

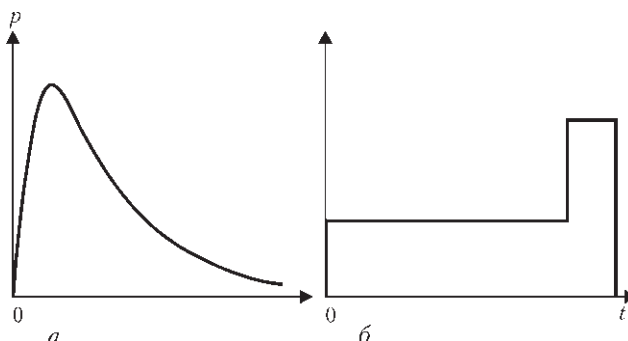


Рис. 1. Временные формы лазерных импульсов (а, б)

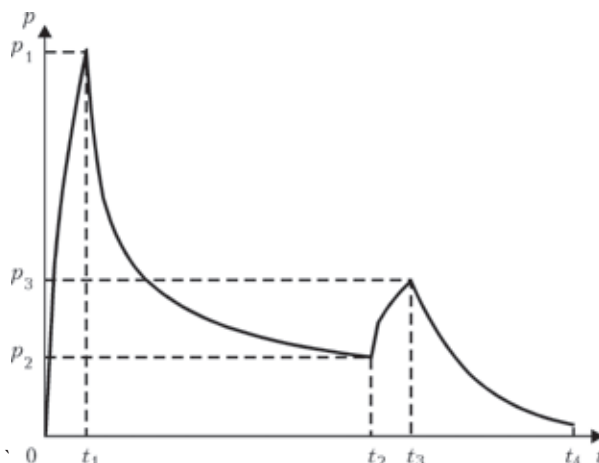


Рис. 2. Общий вид зависимости плотности мощности лазерного импульса от времени



ренос расплавленного металла на основу. Процесс переноса может быть реализован за счет формирования в импульсе участка с повышенной интенсивностью излучения, воздействие которого на присадку инициирует процесс испарения металла и приводит к возникновению силы давления отдачи паров, способствующей отрыву расплавленного металла от присадочной проволоки.

Во многих серийно выпускаемых лазерных технологических установках используется импульс, форма которого приведена на рис. 1, а. В этом случае максимум интенсивности лазерного излучения приходится на первую часть импульса, а убывающий задний фронт данного импульса не создает условий для отрыва расплавленного металла от присадочной проволоки.

В работе [1] предложено для плавления присадочного материала использовать импульс, временная форма которого представлена на рис. 1, б. Плавление присадки осуществляется первой частью импульса, а отрыв образованной капли расплава от проволоки — второй частью. Однако характер зависимости плотности мощности от времени накладывает ограничения при выборе технологических режимов процесса плавления.

Целью настоящей работы являлось определение временных и энергетических параметров импульса лазерного излучения, обеспечивающе-

го плавление и перенос присадочного материала на основу с минимальным испарением металла в процессах сварки и наплавки.

Для этого предлагается использовать импульс, форма которого представлена на рис. 2. Распределение плотности мощности импульса во времени можно представить следующим образом:

$$p(t) = \begin{cases} \frac{2T_m \lambda}{t_1 \sqrt{\alpha \pi}} \sqrt{t}, & 0 < t \leq t_1, \\ \frac{2T_m \lambda}{t_1 \sqrt{\alpha \pi}} (\sqrt{t} - \sqrt{t-t_1}), & t_1 < t \leq t_2, \\ \frac{2T_m \lambda}{(t_3 - t_2) \sqrt{\alpha \pi}} \sqrt{t-t_2} + q(t_2), & t_2 < t \leq t_3, \\ q(t_3) e^{-\frac{t-t_3}{\tau}}, & t_3 < t \leq t_4, \end{cases}$$

где λ — удельная теплопроводность материала присадки; α — температуропроводность материала присадки; T_m — температура плавления материала присадки; $t_1 - t_4$ время окончания соответственно первого–четвертого фронта импульса; τ — время спада фронта импульса.

Импульс имеет крутой первый фронт, достигающий максимального значения, который соответствует плотности мощности, необходимой для плавления поверхности присадочного материала в зоне воздействия лазерного излучения (рис. 3, а), убывающий второй фронт, который обеспечивает плавление всего объема присадочного материала (рис. 3, б) [2]. При крутом третьем фронте происходит отрыв расплавленного металла присадочного материала под действием силы давления отдачи, возникающей при испарении металла с поверхности расплава (рис. 3, в).

Четвертый фронт импульса (см. рис. 2) в результате относительно медленного снижения интенсивности излу-

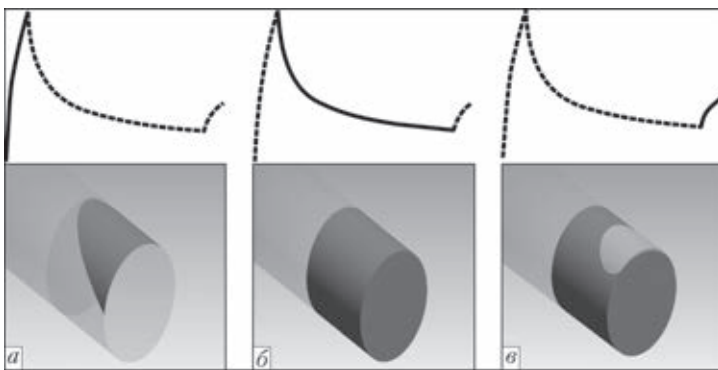


Рис. 3. Схема воздействия импульсного лазерного излучения на присадочный материал (а–в — см. в тексте)

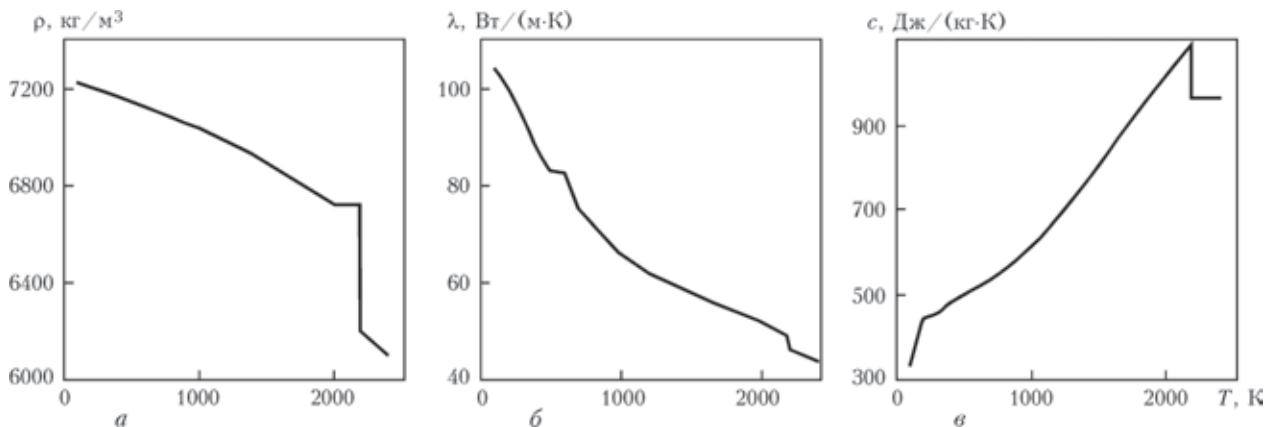


Рис. 4. Температурная зависимость теплофизических свойств хрома: а — плотность; б — удельная теплопроводность; в — удельная теплоемкость

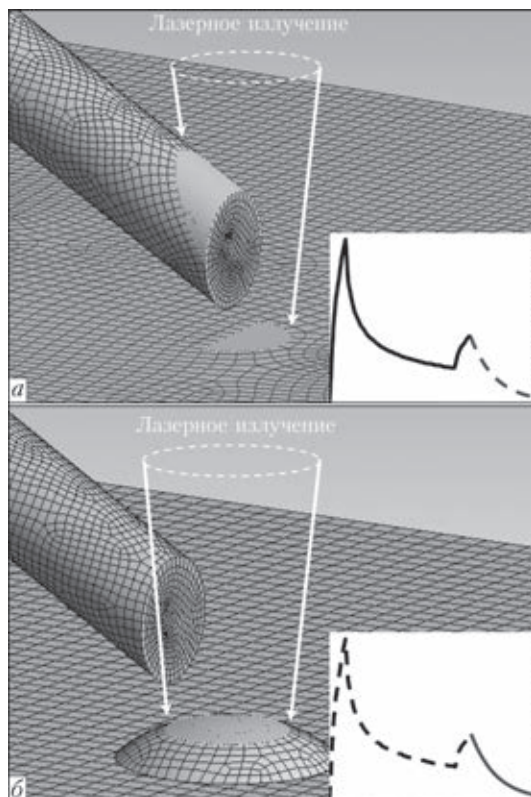


Рис. 5. Конечноэлементное разбиение и схема воздействия лазерного излучения на присадку и основу под воздействием лазерного излучения на поверхность как присадки и основы (а), так и на поверхность наплавленного валика (б)

чения способствует заполнению расплавленным металлом углубления, образовавшегося в начальной части импульса, а также формированию наплавленного валика до момента начала кристаллизации металла [3].

Для определения параметров импульса, обеспечивающего плавление и перенос присадочного материала на основу с минимальным испарением металла, необходимо синхронизировать время возникновения процесса испарения и время полного расплавления присадочного материала в области воздействия лазерного излучения. В ходе исследований выполнено моделирование процесса лазерной наплавки на основу присадочной проволокой из хрома диаметром 0,2...0,4 мм из того же материала. Проведен расчет температурных полей в рамках трехмерной конечноэлементной модели, в которой решалось нелинейное

уравнение теплопроводности [4–7]. Нелинейность уравнения обусловлена зависимостью теплофизических свойств материала от температуры (рис. 4) [8]. Распределение плотности мощности лазерного излучения по сечению пучка считалось однородным (см. приведенное выше выражение).

Конечноэлементное разбиение и схема воздействия лазерного излучения на поверхность присадки и основы представлены на рис. 5. Лазерный пучок фокусируется таким образом, что 50 % энергии поглощается присадкой, а 50 % металлом основы (рис. 5, а). В течение времени $0 < t \leq t_2$ металл присадки в области воздействия лазерного излучения нагревается и плавится, в момент времени t_3 капля расплава под действием сил тяжести и отдачи, возникающей при испарении с поверхности металла, отрывается от присадки, падает на основу и растекается по ней. Четвертый фронт лазерного импульса за время $t_3 < t \leq t_4$ способствует формированию наплавленного валика (рис. 5, б).

В ходе исследований определены энергетические и временные параметры первых двух фронтов импульса, представленные в таблице, которые оказывают существенное влияние на динамику нагрева присадочного материала до температуры $T (T_{пл} \leq T < T_{исп})$.

Как видно из данных таблицы, минимальные затраты энергии ($77,7 \cdot 10^{-3}$ Дж) на нагрев и плавление металла в области воздействия первых двух фронтов импульса лазерного излучения (см. рис. 3) обеспечиваются при длительности второго фронта, равном $4,0 \cdot 10^{-3}$ с. В этом случае температура поверхности присадки составляет $2500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таким образом, оптимизация процессов нагрева и плавления присадочного материала может быть реализована путем изменения временных и энергетических характеристик первых двух фронтов импульса лазерного излучения.

Распределения температурных полей в присадочной проволоке из хрома диаметром 0,2 мм в моменты времени, соответствующие окончаниям фронтов импульса, представлены на рис. 6. Так, в момент времени $t_1 = 0,5$ мс присадка расплавлена на глубину 0,02 мм (рис. 6, а, 7), при $t_2 = 4,0$ мс глубина плавления составляет 0,09 мм (рис. 6, б, 7), при $t_3 = 4,5$ мс объем металла присадки в обла-

Временные энергетические параметры первого и второго фронтов импульса

Температура поверхности присадки, $^\circ\text{C}$	Пиковая плотность мощности $p_1, \text{Вт/м}^2 \cdot 10^{10}$	Длительность второго фронта импульса, $\text{с} \cdot 10^{-3}$	Энергия импульса, $\text{Дж} \cdot 10^{-3}$		Суммарная энергия первых двух фронтов, $\text{Дж} \cdot 10^{-3}$
			первый фронт	второй фронт	
2000	7,88	22,5	13,5	129,5	143,0
2100	8,27	16,5	14,2	108,9	123,1
2200	8,67	11,2	14,9	91,8	106,7
2300	9,06	7,7	15,5	77,4	92,9
2400	9,46	5,7	16,2	67,7	83,9
2500	9,85	4,0	16,9	60,8	77,7

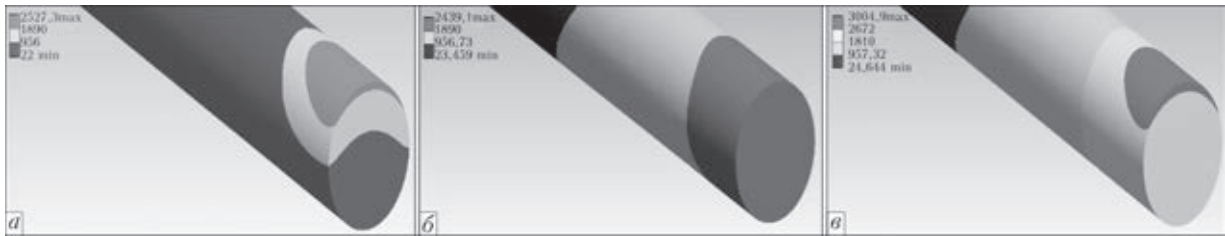


Рис. 6. Распределение температурных полей в присадке из хрома диаметром 0,2 мм: а — $t_1 = 0,5$; б — $t_2 = 4,0$; в — $t_3 = 4,5$ мс

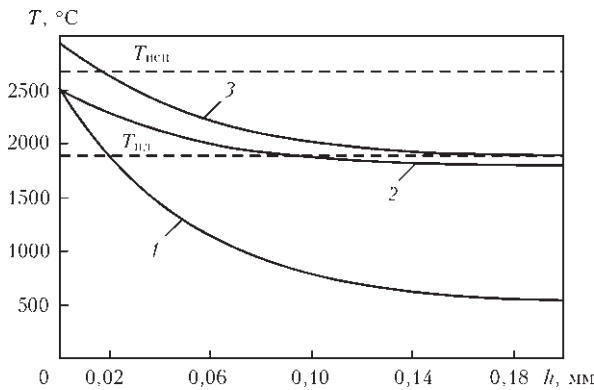


Рис. 7. Распределение температуры по глубине присадки в заданные моменты времени: 1 — $t_1 = 0,5$; 2 — $t_2 = 4,0$; 3 — $t_3 = 4,5$ мс

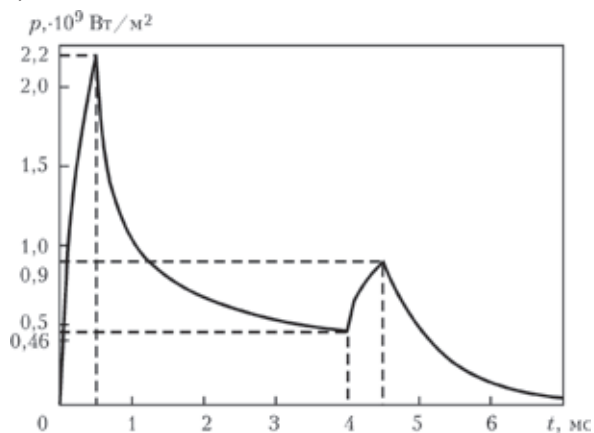


Рис. 8. Форма импульса сфокусированного лазерного излучения для плавления присадки из хрома диаметром 0,2 мм

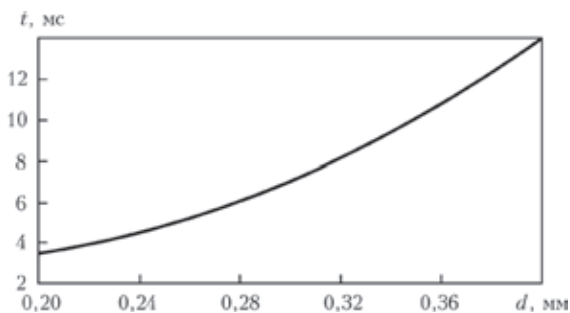


Рис. 9. Зависимость длительности второго фронта импульса лазерного излучения от диаметра присадки

сти воздействия лазерного излучения полностью расплавляется, а поверхность расплава нагревается до температуры испарения (рис. 6, в, 7).

Таким образом, в результате проведенных исследований установлена форма временных и энергетических параметров импульса лазерного излучения для плавления присадки из хрома диаметром 0,2 мм (рис. 8). Кроме того, плавление присадочного материала диаметром 0,2...0,4 мм обеспечивается благодаря использованию данной формы импульса и осуществляется выбором длительности второго фронта импульса (рис. 9).

Выводы

1. Установлена форма импульса лазерного излучения для плавления и переноса присадочного материала на основу с минимальным испарением металла.
2. Определены параметры первых двух фронтов импульса, обеспечивающие минимальные энергетические затраты на нагрев и плавление присадки из хрома.
3. Результаты исследований могут быть использованы при разработке технологических режимов импульсной лазерной сварки и наплавки металлов и сплавов.

1. Jeric A., Grabec I., Govekar E. Laser droplet welding of zinc coated steel sheets // Sci. and Technol. Welding and Joining. – 2009. – 14, № 4. – P. 362–368.
2. Каюков С.В. Расширение возможностей импульсных YAG-лазеров миллисекундного диапазона длительности в технологии сварки // Квант. электроника. – 2000. – 30, № 11. – С. 941–948.
3. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки / Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 663 с.
4. Tseng W.C., Aoh J.N. Simulation study on laser cladding on preplaced powder layer with a tailored laser heat source // Opt. and Laser Technol. – 2013. – 48. – P. 141–152.
5. Мышковаец В.Н., Максименко А.В., Баевич Г.А. Моделирование процесса импульсной лазерной сварки тонкостенных конструкций из алюминиевых сплавов // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2012. – № 3. – С. 16–20.
6. Farnia A., Ghainia F.M., Sabbaghzadeh. Effects of pulse duration and overlapping factor on melting ratio in preplaced pulsed Nd:YAG laser cladding // Opt. and Lasers in Eng. – 2013. – 51. – P. 69–76.
7. Mumtaz K.A., Hopkinson N. Selective laser melting of thin wall parts using pulse shaping // J. Mater. Proc. Technol. – 2010. – 210. – P. 279–287.
8. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справочник. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.

Поступила в редакцию 23.12.2014