

Б.М. Федоров, М.В. Таксанц

ИНЖЕНЕРНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ГЛУБИНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ ПРИ СВАРКЕ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Приведена математическая модель оценки глубины сварного соединения при сварке с глубоким проплавлением различных материалов лазерным лучом для практических инженерных расчетов. Глубина проплавления материала определена по усредненному значению скорости испарения, изменение которой в зависимости от времени аппроксимировалось экспонентой. Для проверки адекватности модели проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными данными, полученными в ходе проведения лазерной сварки на волоконном лазере ЛС 4-К низкоуглеродистой стали Ст3. Доказана их взаимная корреляция.

E-mail: mt12@bmsu.ru

Ключевые слова: лазерное излучение, глубина проплавления, скорость испарения, парогазовый канал.

В настоящее время наблюдаются две основные тенденции в развитии лазерных технологий:

1. Применение лазерного излучения маломощных лазеров со специальными свойствами в нанотехнологии.
2. Использование мощных технологических лазеров в машиностроении.

Одна из актуальных задач второй тенденции — вычисление глубины проплавления с достаточной степенью точности. Как правило, это относится к нахлесточным, замковым и многослойным сварным соединениям, где глубина проплавления — определяющий фактор работоспособности соединения.

На первом этапе исследователи исходили из предположения, что образование канала проплавления при лазерном воздействии должно сопровождаться интенсивным оплавлением межфазной поверхности. Поэтому глубина проплавления определялась скоростью волны теплопроводности и находилась в диапазоне значений

$$\sqrt{a\tau} \dots 2\sqrt{a\tau}, \quad (1)$$

где τ — время воздействия лазерного излучения на материал, с; a — температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$.

Модель (1) имела неплохую сходимость с экспериментом, но не учитывала плотность мощности лазерного излучения на поверхности материала и обладала узким диапазоном применимости [1].

В дальнейшем была разработана физическая модель глубокого проплавления при наличии парогазового канала. При реализации

этой модели столкнулись с проблемой учета большого числа факторов, влияющих на размеры канала, времени его существования, массопереносом жидкого металла, температурной зависимости теплофизических коэффициентов и т. п. Для решения инженерных задач были предложены простые эмпирические зависимости, в которых глубина проплавления через коэффициенты связана с мощностью и скоростью сварки [2]. Было установлено, что нормализованная мощность и скорость имеют линейную зависимость при сварке CO₂-лазером с помощью луча, сфокусированного по схеме Кассегрена [3].

В результате исследований установлено, что при наличии парогазового канала лазерный луч падает на переднюю стенку, приводя к интенсивному испарению металла [4]. Кинограммы процесса выявили на передней стенке канала ступеньку, движущуюся с поверхности канала до его дна, на которую и попадает лазерный луч. Под действием лазерного луча происходит интенсивное испарение металла и образование жидкой пленки [5].

В начальный момент времени луч падает ортогонально на поверхность металла, что обеспечивает максимальную скорость испарения. По мере продвижения ступеньки вглубь угол наклона ступеньки изменяется, и у дна парогазового канала лазерный луч вследствие зеркальной поверхности расплава и наклона ступеньки будет иметь наибольшее отражение. Это приводит к уменьшению скорости испарения.

В соответствии с изложенным выше предложена методика инженерного расчета глубины проплавления при лазерной сварке полубесконечных тел. Она основана на предположении о максимальной скорости испарения в начальный момент времени и ее уменьшении в конце времени воздействия луча, при этом процесс изменения скорости испарения в течение времени имеет экспоненциальный характер:

$$V_{\text{исп}} = V_{\text{исп max}} e^{-t}.$$

При инженерных расчетах глубину проплавления можно оценить по формуле

$$H = V_{\text{исп. ср}} t_{\text{исп}},$$

где H — глубина проплавления, м; $V_{\text{исп. ср}}$ — средняя скорость движения границы при испарении материала за время $t_{\text{исп}}$, м/с; $t_{\text{исп}}$ — время, в течение которого наблюдается интенсивное испарение материала, с.

Для определения глубины проплавления H за время $t_{\text{исп}}$ необходимо рассчитать среднюю скорость испарения $V_{\text{исп. ср}}$. Скорость испарения материала под воздействием лазерного излучения имеет экспоненциальную зависимость от времени (рис. 1), поэтому ее можно вычислить как

$$V_{\text{исп}} = \frac{1}{t_{\text{исп}}} \int_0^{t_{\text{исп}}} V_{\text{исп max}} e^{-x} dx = \frac{V_{\text{исп max}}}{t_{\text{исп}}} \{1 - e^{-t_{\text{исп}}}\}.$$

Теплота, выделяемая в единицу времени, идет на нагрев материала и его испарение, поэтому скорость $V_{\text{исп max}}$ зависит от плотности мощности падающего излучения и теплофизических характеристик материала [6]:

$$V_{\text{исп max}} = \frac{k_{\text{погл}} q}{\gamma(L_{\text{исп}} + cT_{\text{кип}})},$$

где $k_{\text{погл}}$ — коэффициент, учитывающий поглощение лазерного излучения поверхностью; q — плотность мощности падающего излучения, Вт/м²; γ — плотность материала, кг/м³; $L_{\text{исп}}$ — удельная теплота испарения, Дж/(кг); c — удельная теплоемкость, Дж/(кг · К); $T_{\text{кип}}$ — температура кипения материала, К.

Время, в течение которого происходит интенсивное испарение материала,

$$t_{\text{исп}} = (t_{\text{пр}} - t_{\text{ус}}) + t_{\text{п}},$$

где $t_{\text{пр}}$ — время прямого воздействия луча на материал, с; $t_{\text{ус}}$ — время установления процесса квазистационарного испарения, когда энергия поглощенного излучения расходуется только на испарение, с; $t_{\text{п}}$ — время после окончания прямого воздействия лазерного излучения на исследуемый участок, в течение которого еще наблюдается интенсивное испарение, т. е. время, в течение которого материал охлаждается от температуры T_{max} до температуры $T_{\text{кип}}$, с.

Время прямого воздействия лазерного излучения зависит от диаметра пятна d , м, излучения на поверхности материала и скорости сварки V , м/с, [5]:

$$t_{\text{пр}} = \frac{d}{V}.$$

Время установления процесса квазистационарного испарения, когда энергия поглощенного излучения расходуется только на испарение [6]:

$$t_{\text{ус}} \approx \frac{a}{V_{\text{исп max}}^2}.$$

Время $t_{\text{п}}$ определяется размером парогазового канала, временем его существования и температурой перегрева плазмы.

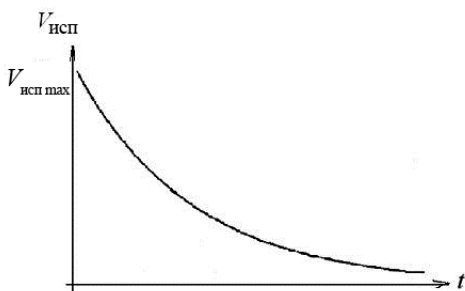


Рис. 1. Зависимость скорости испарения материала от времени

При инженерных расчетах для оценки глубины проплавления можно использовать формулу, которая при больших мощностях источника излучения (1...4 кВт) дает достаточно точные результаты:

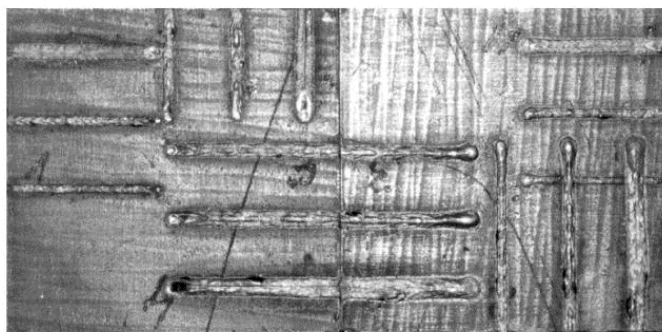
$$k_{\text{попр}} H = \frac{1}{(t_{\text{пр}} - t_{\text{ус}})} \frac{k_{\text{погл}} q}{\gamma(L_{\text{исп}} + cT_{\text{кип}})} \left\{ 1 - e^{-(t_{\text{пр}} - t_{\text{ус}})} \right\} \left\{ (t_{\text{пр}} - t_{\text{ус}}) k_{\text{погл}} + t_1 \right\}.$$

В связи с тем, что практическое определение времени $t_{\text{п}}$ затруднено, предлагается введение поправок в виде коэффициента и дополнительного времени t_1 .

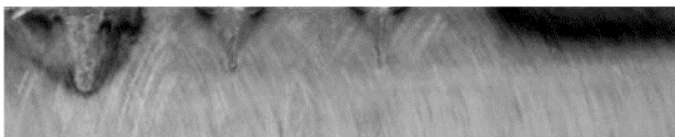
Время $t_{\text{ус}}$, как правило, на порядок меньше времени $t_{\text{пр}}$, характерного для лазерной сварки металлов, определяемого отношением диаметра луча на поверхности к скорости его перемещения, поэтому при расчете его можно не учитывать:

$$H = \frac{1}{t_{\text{пр}}} \frac{k_{\text{погл}} q}{\gamma(L_{\text{исп}} + cT_{\text{кип}})} \left\{ 1 - e^{-t_{\text{пр}}} \right\} \left\{ t_{\text{пр}} k_{\text{погл}} + t_1 \right\}.$$

Для проверки адекватности модели было проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными данными, полученными с использованием волоконного лазера ЛС 4-К при лазерной сварке пластины из низкоуглеродистой стали Ст3 толщиной 10 мм, сфокусированным лучом диаметром 0,5 мм. Торцы пластин шлифовались, швы накладывались поперек стыка с последующим изломом (рис. 2).



a



б

Рис. 2. Образцы пластин экспериментальных сварок:

a – вид сверху; *б* – вид сбоку

Коэффициент поглощения излучения источником поверхностью стали Ст3 составляет $k_{\text{погл}} \approx 0,3 \dots 0,8$ в зависимости от физико-химического состояния поверхности, скорости сварки, мощности и длины волны излучения. Экспериментальная зависимость изменения поправочного коэффициента $k_{\text{попр}}$ от плотности мощности источника излучения для Ст3 приведена на рис. 3, а.

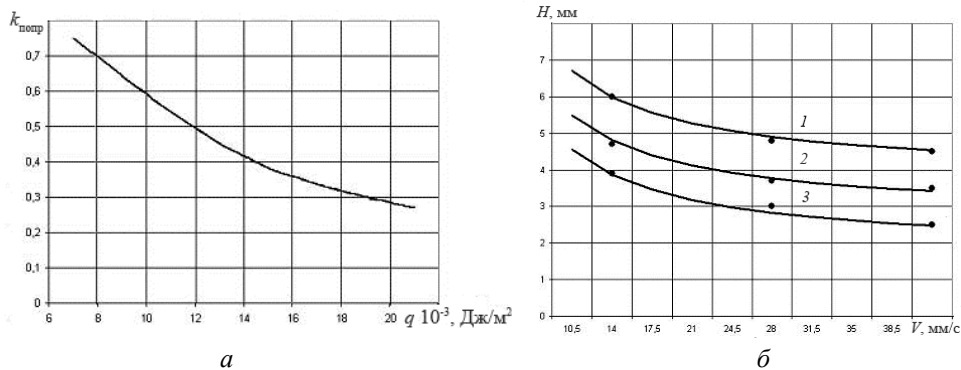


Рис. 3. Зависимость поправочного коэффициента $k_{\text{попр}}$ от плотности мощности источника излучения q на поверхности Ст3 (а) и зависимость глубины проплавления от скорости сварки для источников с различной мощностью излучения (б):

1 — 1 500 Вт; 2 — 2 500 Вт; 3 — 3 500 Вт; — — расчетные данные; • — экспериментальные данные

Значения глубины проплавления при различных значениях мощности источника излучения и скорости сварки при $k_{\text{погл}} = 0,5$ и $t_1 = 0,13$

Скорость сварки, мм/с	Мощность источника излучения, Вт		
	1 500 при $k_{\text{попр}} = 0,67$	2 500 при $k_{\text{попр}} = 0,40$	3 500 при $k_{\text{попр}} = 0,29$
14	3,90/3,87	4,70/5,03	6,00/5,98
28	3,00/2,83	3,70/3,99	4,80/4,90
42	2,50/2,48	3,50/3,65	4,50/4,54

Примечание. Экспериментальные значения приведены в числителе, расчетные — в знаменателе.

В ходе проведения экспериментов было установлено, что время t_1 мало зависит от мощности источника; для Ст3 $t_1 \approx 0,01 \dots 0,02$ с. Значения глубины проплавления при различных значениях мощности источника излучения и скорости сварки представлены в таблице (рис. 3, б). Значения средней квадратичной погрешности расчета, мм, и средней относительной погрешности, %, приведены ниже:

	Мощность источника излучения, Вт		
	1 500	2 500	3 500
Средняя квадратичная погрешность			
расчета глубины проплавления, мм.....	0,06	0,15	0,04
Средняя относительная погрешность, %	2,5	6,4	1,1

При сравнении расчетных и экспериментальных данных наблюдается их взаимная корреляция. Среднеквадратичная погрешность расчета глубины проплавления для низкоуглеродистой стали Ст3 составила 0,08 мм, а средняя относительная погрешность — 3,3 %.

В дальнейшем необходимо исследовать проплавление различных групп металлов в целях определения зависимостей, с помощью которых можно будет проводить инженерные расчеты глубины проплавления по составленным номограммам на рабочих местах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. — М.: Изд-во Наука, 1970. — 272 с.
2. Коваленко В.С. Лазерная технология. — Киев: Вищ. шк., 1989. — 278 с.
3. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 5: Лазерная сварка металлов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов; Под ред. А.Г. Григорьянца. — М.: Высш. шк., 1988. — 207 с.
4. Голубев В.С. Анализ моделей динамики глубокого проникновения лазерного излучения в материалы: Современные лазерно-информационные и лазерные технологии. Сб. трудов ИПЛИТ РАН / Под ред. В.Я. Панченко и В.С. Голубева. — М.: Интерконтакт Наука, 2005.
5. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки / Под ред. А.Г. Григорьянца. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — 664 с.
6. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 4: Лазерная обработка неметаллических материалов / А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов; Под ред. А.Г. Григорьянца. — М.: Высш. шк., 1988. — 191 с.
7. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 3: Методы поверхностной лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов; Под ред. А.Г. Григорьянца. — М.: Высш. шк., 1987. — 191 с.

Статья поступила в редакцию 11.09.2012