

УДК 621.791.725

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ И МЕДНО-НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

*Доктора техн. наук, профессора ПАНТЕЛЕЕНКО Ф. И., ДЕВОЙНО О. Г.,  
асп. ЛАПКОВСКИЙ А. С., инж. ЛУЦКО Н. И.*

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: scvdmmed@bntu.by

## PECULIAR FEATURES OF LASER WELDING PROCESS FOR DISSIMILAR MATERIALS ON FERRUM OR COPPER-NICKEL BASE

*PANTELEENKO F. I., DEVOINO O. G., LAPKOVSKIY A. S., LUTSKO N. I.*

*Belarusian National Technical University*

Исследовано влияние параметров процесса лазерной сварки с применением волоконных лазеров на процесс формирования сварного соединения, его геометрические и физико-механические свойства при сварке рессорно-пружинной стали и системы «железо – медь – никель».

**Ключевые слова:** лазерная сварка, волоконный лазер, композитный материал.

Ил. 9. Табл. 2. Библиогр.: 4 назв.

The paper presents investigations on influence of laser welding parameters with fiber lasers on formation of a welding joint, its geometrical and physical and mechanical properties while welding spring steel and Fe–Cu–Ni system.

**Keywords:** laser welding, optical fiber laser, composite material.

Fig. 9. Tab. 2. Ref.: 4 titles.

**Введение.** Среди технологических применений мощных лазеров все более широкое распространение получает лазерная сварка. Это связано со специфическими особенностями указанной технологии, делающими ее привлекательной, а в ряде случаев – незаменимой для решения технических проблем. К таким особенностям относятся [1, 2]:

- концентрация в зоне воздействия лазерного луча высоких плотностей мощности, что позволяет реализовать механизм «кинжального проплавления», обеспечивающий минимизацию размеров зоны термического влияния;
- высокий энергетический КПД процесса сварки;
- высокий уровень физико-механических свойств сварного шва;
- возможность точного дозированного подвода энергии в зону сварки.

Последнее обстоятельство определяет перспективность применения лазерной сварки для решения сложной технологической задачи – соединения разнородных материалов. Особенно остро она стоит для соединения материалов,

сильно отличающихся между собой по свойствам. Примером такой задачи может служить проблема качественного соединения алмазосодержащих сегментов дисковых пил, изготовленных методом порошковой металлургии, со стальным корпусом. Как правило, связку указанных сегментов изготавливают из железо-медно-никелевых сплавов, температура плавления которых (порядка 1200–1300 К) значительно ниже температуры плавления металла корпуса.

Известные методы получения соединений (пайка, механическое крепление) не в полной мере удовлетворяют техническим требованиям к таким изделиям либо по неудовлетворительным прочностным характеристикам соединения, либо из-за перегрева сегментов, приводящего к частичному разложению алмазной фазы, либо по критерию сложности и нетехнологичности конструкции дисковой пилы. Предыдущие исследования, касающиеся технологии лазерной сварки сильно разнородных материалов [3, 4], показывают возможность получения соединений методом лазерной сварки при сквозном проплавлении, пути реализации такой тех-

нологии, в частности посредством смещения оси сварочной ванны в сторону более тугоплавкой детали. Однако конкретные технологические рекомендации по обеспечению качественного сварного соединения таких материалов отсутствуют.

В настоящей статье представлены исследования влияния технологических параметров лазерной сварки на качество композитного соединения Cu–Ni–Fe со сталью 65Г при сварке с применением оптоволоконного лазера.

**Методики исследования.** Для проведения экспериментов использовали иттербиевый оптоволоконный лазер IPG модели YLR-1000 с максимальной выходной мощностью 1,00 кВт и длиной волны излучения 1,06 мкм, обеспечивающий маломодовый тип излучения в квазинепрерывном режиме. Фокусировку осуществляли объективом с фокусным расстоянием 150,00 мм, обеспечивающим диаметр сфокусированного луча 0,16 мм. В качестве варьируемых параметров были выбраны: скорость перемещения луча  $v$ , положение фокальной плоскости  $\Delta F$  и смещение луча относительно шва  $\Delta t$ .

За нулевое положение фокальной плоскости принимали поверхность стальных образцов, отрицательным значениям которой соответствует заглубление фокуса в материал. Положение фокуса варьировали в диапазоне  $(+1)–(-7)$  мм. Горизонтальное смещение изменялось в диапазоне  $(+0,1)–(-0,3)$  мм, за отрицательное направление принимали смещение в направлении стального основания от линии стыка сегмент/сталь.

В качестве образцов использовали заготовки в виде дисков и алмазосодержащие сегменты в состоянии поставки, без специальной подготовки, в которых зона сварки не имела алмазов, и ее химический состав отличался от состава алмазосодержащей матрицы. Геометрические параметры и химический состав образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Применяемые материалы

| Свариваемая пара      | Химический состав                          | Геометрические параметры, мм |
|-----------------------|--------------------------------------------|------------------------------|
| Диск пилы (сталь 65Г) | C0.62–0.7; Si0.17–0.37; Mn0.9–1.2; Fe осн. | Ø336×3                       |
| Сегмент               | Cu33; Sn3; Ni29.3; Fe осн.                 | 40×7×3,5                     |

Образцы сегмент/сталь закрепляли механически без зазора при помощи специально скон-

струированного приспособления. В качестве защитного газа в процессе сварки применяли аргон. Сварку начинали и заканчивали за пределами сегментов, так как начало либо завершение сварки на сегменте ведет к образованию пор (трещин).

В результате предварительных исследований путем визуального осмотра оценили пределы варьирования основных технологических параметров лазерной сварки, в пределах которых в дальнейшем проводили их оптимизацию по полученным данным. Первым этапом каждого эксперимента являлась визуальная оценка сваренных образцов на отсутствие открытых пор, брызг и т. д. Прочность сварного соединения оценивали по результатам исследования усилия разрушения на изгиб по схеме, представленной на рис. 1. Геометрические параметры сварного шва изучали с помощью оптического микроскопа MICRO-200. Распределение микротвердости по ширине сварного шва исследовали на микротвердомере ПМТ-3. Распределение элементов определяли на поперечных микрошлифах с помощью рентгеновской дифракционной системы SmartLab RIGAKU (X-ray diffraction system).

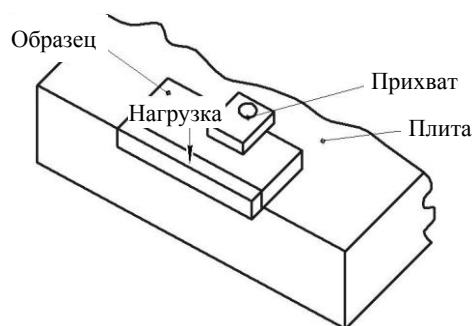


Рис. 1. Схема испытания на изгиб

Величину энерговклада, Дж/мм<sup>2</sup>, определяли по следующей формуле:

$$J_{уд} = \frac{P}{vD},$$

где  $P$  – мощность излучения, Вт;  $v$  – скорость сварки, мм/с;  $D$  – диаметр луча, мм.

**Результаты.** На предварительном этапе исследований было установлено, что при сварке сегментов и корпуса дисковой пилы излучением иттербиевого лазера за один проход объемный разогрев сегмента не превышает 300 °С,

что исключает разложение алмазной составляющей. Анализ макроструктуры сварного соединения (рис. 2) показал, что геометрические размеры и форма соединения зависят от режимов обработки. При оптимальном режиме верхняя и нижняя части шва в поперечном сечении имеют трапециевидальную форму, а центральная – прямоугольную (рис. 2а). Ширина шва варьируется от 0,6 до 1,0 мм в зависимости от режимов сварки, а ширина зоны термического влияния составляет порядка 1,0 мм. При режимах, обеспечивающих сквозное проплавление, шов имеет «кинжальную» форму (характерную для лазерной сварки), а при режимах с избыточным энерговыделением приобретает характерную бочкообразную форму (рис. 2б).

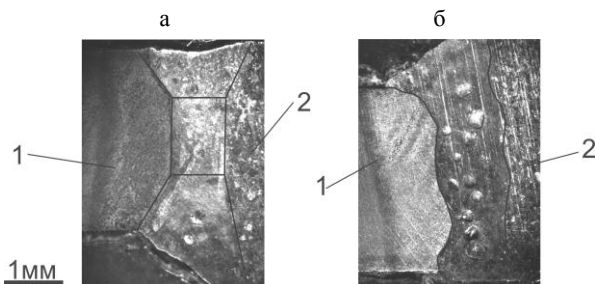


Рис. 2. Макроструктура сварного шва при различных энерговыделениях: а – удельная энергия 681,8 Дж/мм<sup>2</sup>; б – 833,3 Дж/мм<sup>2</sup>; 1 – основание; 2 – сегмент

Более вероятно было бы ожидать появления горячих трещин при неоптимальных режимах в зоне сварного шва со стороны углеродистой стали. В реальности они образовывались со стороны железо-медно-никелевого сплава, что, вероятно, связано с увеличенной скоростью теплоотвода в сторону более теплопроводного сплава и попаданием кривой охлаждения в «температурный интервал хрупкости».

Оценка влияния технологических параметров сварки на изгибную прочность сварного шва показала (рис. 3–5), что все описанные выше параметры существенно определяют достигнутый уровень прочности формируемого соединения. Из рис. 3 видно, что максимальная прочность соединения достигается при скорости сварки порядка 550 мм/мин, при ее снижении имеет место перегрев материала с образованием значительного количества пор. В свою очередь увеличение скорости приводит к появлению дефектов типа «непровар». Установлено,

что оптимальным положением фокальной плоскости является ее заглубление на 5 мм ниже материала сегмента, что соответствует общепринятым рекомендациям по лазерной сварке и связано с механизмом формирования парогазового канала в процессе лазерной сварки. Расфокусировка луча на поверхности изделия, соответствующая данному заглублению фокуса, не оказывает значительного влияния на плотность мощности, так как не превышает длину перетяжки (длина, на которой диаметр пучка увеличивается в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с полностью сфокусированным лучом). Увеличение значения параметра заглубления фокуса более чем на 5 мм приводит к снижению плотностей мощности на поверхности заготовки ниже величин, обеспечивающих эффективный нагрев зоны сварки.

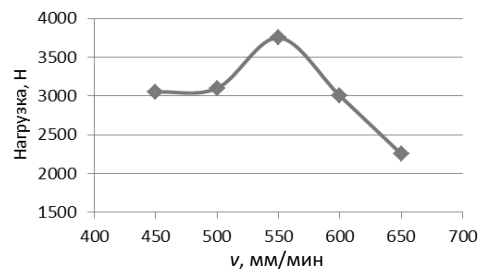


Рис. 3. Влияние скорости сварки на изгибную прочность шва

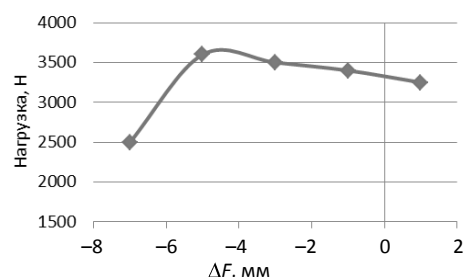


Рис. 4. Влияние положения фокуса на изгибную прочность шва

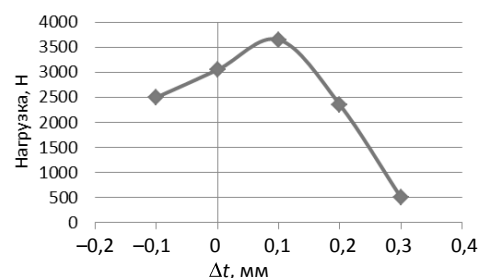


Рис. 5. Влияние горизонтального смещения луча на изгибную прочность шва

Как уже отмечалось, высокое качество лазерной сварки разнородных по теплофизическим свойствам материалов достигается при боковом смещении лазерного луча относительно свариваемого стыка. Из рис. 5 видно, что максимальная прочность сварного шва обеспечивается при смещении луча в направлении более тугоплавкого металла на 0,1 мм. При таких условиях формируется распределение температуры, при котором происходит одновременное плавление кромок. При большем смещении наблюдается неполное сплавление кромок, приводящее к резкому снижению прочности соединения. Следует отметить, что при нагрузках более 3500 Н разрушение происходит по материалу алмазосодержащей части сегмента.

Было проведено исследование процесса изменения микротвердости по ширине шва, результаты которого представлены на рис. 6–8. За нуль по оси  $Y$  принимали границу зоны плавления/ЗТВ стали. Практически при всех исследованных режимах микротвердость сварного шва находилась в пределах 7000–9000 МПа при смещении луча в зону углеродистой стали, а микротвердость – порядка 4500 МПа при образовании ванны расплава в легкоплавкой части стыка (рис. 8, ряд  $\Delta t = 0,1$  мм). При этом ширина сварного шва составляла 0,5–0,8 мм. Ширина зон термического влияния со стороны стали – 0,8–1,2 мм, и они имеют микротвердость 4000–6000 МПа, характерную для закаленной лазером углеродистой стали [1]. Характерным также является наличие зон отпуска в прилежащих к лазерно-закаленным слоям с микротвердостью 3000–4500 МПа. Со стороны легкоплавкого сегмента зона термического влияния не превышала 0,3 мм и имела микротвердость 3000–5000 МПа.

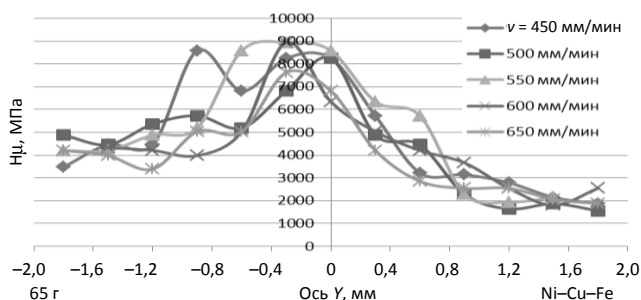


Рис. 6. Влияние скорости сварки на распределение микротвердости по ширине шва:  $\Delta F = -5,0$  мм;  $\Delta t = -0,1$  мм

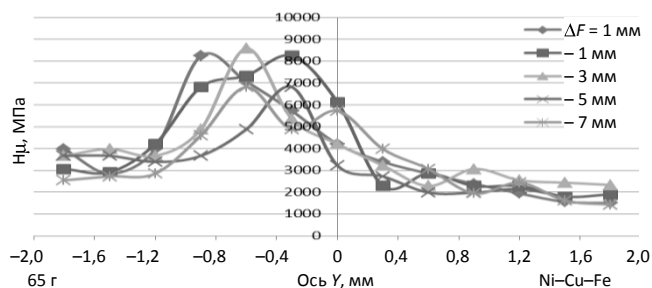


Рис. 7. Влияние параметра заглупления фокуса на распределение микротвердости по ширине шва:  $v = 550$  мм/мин;  $\Delta t = -0,1$  мм

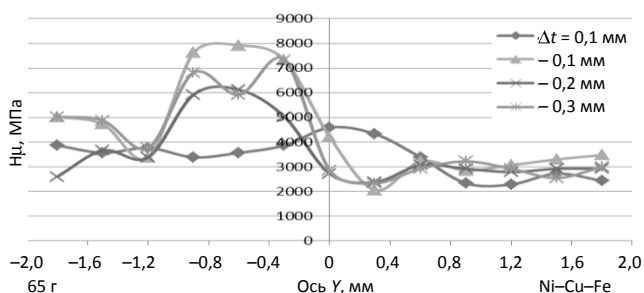


Рис. 8. Влияние горизонтального смещения луча на распределение микротвердости по ширине шва:  $v = 550$  мм/мин;  $\Delta F = -5$  мм

Оптимальным режимом сварки по критерию прочности сварного соединения был принят режим, соответствующий боковому смещению луча 0,1 мм ( $v = 550$  мм/мин;  $\Delta F = -5$  мм). В этом случае, учитывая, что диаметр луча составляет 0,16 мм, предположительно механизм образования сварного шва заключается в следующем. На первом этапе сварочная ванна образуется на стальной части стыка в соответствии со смещением лазерного луча, затем происходит ее углубление и формирование парогазового канала, что подтверждается наличием прямолинейной составляющей по глубине формы сварного шва. Место стыка свариваемых элементов находится в зоне расплава, примыкающей к парогазовому каналу. При этом более интенсивно зона плавления смещена в сторону стального элемента вследствие его низкой теплопроводности. Плавление материала легкоплавкого сегмента происходит за счет теплопроводности через расплав стальной части стыка. В указанной зоне можно наблюдать взаимное перемешивание свариваемых материалов с образованием в жидкой фазе переходной зоны. Учитывая малое время существования расплава, происходит неполное перемешивание.

вание ванны расплава, что приводит к формированию сварного шва с плавными градиентами по химическому составу, обеспечивая допустимый уровень остаточных напряжений. Сказанное подтверждается результатами анализа распределения элементов в поперечном сечении сварного шва (рис. 9, табл. 2). Конические зоны сварного шва образуются в его верхней и нижней частях вследствие ограниченного теплоотвода в этих зонах.

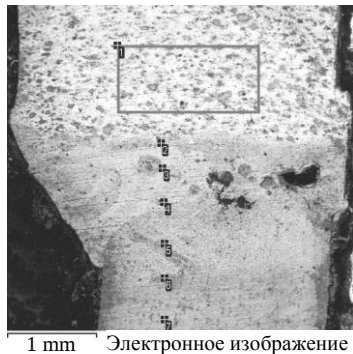


Рис. 9. Зоны определения химического состава образца:  
 $v = 450$  мм/мин;  $\Delta F = -5$  мм;  $\Delta t = -0,1$  мм

Таблица 2

Распределение элементов в шве и околошовной зоне

| Спектр | C   | Fe   | Ni   | Cu   | Si  | Sn  | Mn  |
|--------|-----|------|------|------|-----|-----|-----|
| 1      | –   | 34,7 | 29,3 | 33,0 | –   | 3,0 | –   |
| 2      | 0,2 | 57,8 | 20,6 | 21,1 | –   | –   | 0,3 |
| 3      | 0,4 | 70,4 | 14,3 | 14,1 | –   | 0,5 | 0,3 |
| 4      | 0,6 | 72,5 | 11,8 | 11,7 | 0,2 | 1,4 | 0,5 |
| 5      | 0,6 | 97,4 | –    | –    | 0,2 | –   | 0,7 |
| 6      | 0,7 | 97,3 | –    | –    | 0,2 | –   | 0,8 |

## ВЫВОДЫ

1. На примере сварки корпусов дисковых пил с алмазосодержащими сегментами установлена возможность реализации процесса сварки сильно разнородных материалов (сталь 65Г – железо-медно-никелевый сплав) толщиной до 3 мм, излучением иттербиевого оптоволоконного лазера мощностью 1 кВт.

2. Установлено, что наиболее сильное влияние на прочностные свойства сварного соединения оказывают скорость сварки и боковое смещение лазерного луча относительно свариваемого стыка.

3. Максимальная прочность сварного шва для данного типоразмера дисковых пил достигается при следующих режимах:  $P = 1$  кВт;  $v = 450$  мм/мин;  $\Delta F = -5$  мм;  $\Delta t = -0,1$  мм. При этом сварное соединение формируется плавлением легкоплавкой составляющей путем теплопередачи от расплавленной зоны тугоплавкой стальной части стыка, примыкающей к парогазовому каналу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Технологические** процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц [и др.]; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2006. – 667 с.
2. **LIA Handbook of Laser Materials Processing** / J. F. Ready [et al.]. – Orlando: Laser Institute of America, 2001. – 704 p.
3. **Weber, G.** Laser welding of diamond tools / G. Weber. – [S.l.]: Ind. Diam. Rev., 1991. – 315 p.
4. **Technological Aspects of Laser Joining of Steel and Hard Metal Components** / S. Sandig [et al.] // ICALEO-1995. – Miami, 1995. – P. 112–118.

## REFERENCES

1. **Technological Processes of Laser Processing: Manual for HEI** / A. G. Grigoriantz [et al.]; Edited by A. G. Grigoriantz. – M.: MGTU named after N. E. Bauman (MSTU named after N. E. Bauman), 2006. – 667 p.
2. **LIA Handbook of Laser Materials Processing** / J. F. Ready [et al.]. – Orlando: Laser Institute of America, 2001. – 704 p.
3. **Weber, G.** Laser Welding of Diamond Tools / G. Weber. – [S.l.]: Ind. Diam. Rev., 1991. – 315 p.
4. **Technological Aspects of Laser Joining of Steel and Hard Metal Components** / S. Sandig [et al.] // ICALEO-1995. – Miami, 1995. – P. 112–118.

Поступила 15.10.2013