



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## К вопросу выбора и оптимизации параметров непрерывной лазерной сварки чугуна

Дмитрий Илюшкин <sup>a, \*</sup>, Валерий Солдатов <sup>b</sup>, Олег Петраков <sup>c</sup>, Ирина Котлярова <sup>d</sup>

Брянский государственный технический университет, бульвар 50 лет Октября, 7, г. Брянск, 241035, Россия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4265-9570>, [shirke@mail.ru](mailto:shirke@mail.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6318-5522>, [soldat-tu@bk.ru](mailto:soldat-tu@bk.ru),  
<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4937-1411>, [typeofpeople@mail.ru](mailto:typeofpeople@mail.ru), <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6162-0199>, [ikotlyarova@list.ru](mailto:ikotlyarova@list.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791:[ 725+014]

#### История статьи:

Поступила: 19 января 2021  
 Рецензирование: 26 января 2021  
 Принята к печати: 05 августа 2021  
 Доступно онлайн: 15 сентября 2021

#### Ключевые слова:

Лазерная сварка  
 Чугун  
 Регрессионный анализ  
 Серый реляционный анализ  
 Оптимизация

#### Благодарности:

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Чугуны крайне плохо переносят термические циклы сварки, в связи с чем требуется тщательно выбирать технологические параметры. Основными параметрами непрерывной лазерной сварки являются: мощность лазерного излучения, скорость сварки, параметры фокусирующей системы. **Цель работы** заключается в определении оптимальной мощности и скорости непрерывной лазерной сварки чугуна в зависимости от геометрии сварного шва. **В работе исследованы** сварочные швы, полученные на образцах из серого нелегированного чугуна с перлитной металлической основой, на иттербиевом волоконном лазере ЛС-1. **Методы исследования.** Количественную оценку геометрических параметров швов провели в программе для количественного анализа и обработки изображений ImageJ. Полученные данные обработали методом регрессионного анализа. Для оптимизации параметров процесса составили ортогональный план пассивного эксперимента, включающий 9 опытов, в которых факторы варьировались на 3 равноотстоящих уровнях. Параметрами качества в пассивном эксперименте являлись геометрические размеры сварочной ванны и размеры зоны закалки. Для решения оптимизационной задачи использовали методы серого реляционного анализа и линейного программирования. **Результаты и обсуждения.** Полученные регрессионные модели объясняют значительную долю дисперсии зависимых переменных, коэффициенты регрессии, как и сами модели, статистически значимы, что свидетельствует о тесной линейной взаимосвязи между геометрией шва и параметрами процесса. Расчетная форма сварочной ванны в зависимости от мощности излучения и скорости сварки показывает, что сварочный шов требуемых размеров может быть получен при различных параметрах процесса, что позволяет решать многокритериальную оптимизационную задачу. Серая реляционная оценка геометрических параметров шва показывает, что наиболее подходящими параметрами с точки зрения получения шва максимальной глубины с минимальной шириной, выпуклостью (вогнутостью) и зоной закалки являются минимальная мощность и максимальная скорость сварки. Расчет оптимальной мощности излучения и скорости сварки в зависимости от глубины шва показал, что сварку малых толщин оптимально вести с минимальной мощностью, а глубину шва регулировать путем изменения скорости луча. Сварка больших толщин оптимальна на высокой скорости, при этом для увеличения глубины шва мощность должна возрастать.

**Для цитирования:** К вопросу выбора и оптимизации параметров непрерывной лазерной сварки чугуна / Д.А. Илюшкин, В.Г. Солдатов, О.В. Петраков, И.А. Котлярова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 20–30. – DOI:10.17212/1994-6309-2021-23.3-20-30.

## Введение

Технология лазерного производства – сравнительно новый технологический метод, который находит применение в сварке, резке, поверхностной обработке и упрочнении. В силу своей универсальности лазер может стать пер-

спективным инструментом в единичном и мелкосерийном производстве.

По сравнению с электродуговой сваркой, получившей самое широкое распространение, лазерная сварка имеет ряд преимуществ: шов не загрязняется материалом электрода, из расплава улетучивается ряд вредных примесей (сера, кислород, азот и др.), снижается склонность к образованию горячих и холодных трещин, улучшаются условия кристаллизации, что повышает свойства шва. Кроме этого существенно повышается производительность [1].

#### \*Адрес для переписки

Илюшкин Дмитрий Алексеевич, к.т.н., доцент  
 Брянский государственный технический университет,  
 бульвар 50 лет Октября, дом 7,  
 241035, г. Брянск, Россия  
 Тел.: 8 (4832) 58-82-61, e-mail: shirke@mail.ru

Лазерные технологии обработки чугуна могут быть использованы для получения сварно-литых изделий, ремонта, исправления дефектов, поверхностного микролегирования и улучшения их эксплуатационных характеристик [2].

Чугуны имеют пористую структуру. Включения графита, нарушающие сплошность его металлической основы, затрудняют процесс сварки, приводят к пористости и дефектам сварного шва [3, 4]. При плавлении и последующей кристаллизации в сварочной ванне образуется структура белого чугуна [5–7]. В связи с этим чугуны крайне плохо переносят термические циклы сварки: неоднородность структуры, а также местные напряжения приводят к хрупкости [8].

В зависимости от рабочих параметров лазера принято различать два характерных режима лазерной сварки: сварка малых толщин (до 1 мм) и сварка с глубоким проплавлением (более 1 мм). Принципиальным отличием первой группы являются режимы, обеспечивающие только плавление материала без его интенсивного испарения. Процессы в сварочной ванне нестационарные и неустойчивые. Сварка с глубоким проплавлением сопровождается образованием турбулентных течений расплава и парогазового канала [9].

Геометрические параметры сварочной ванны (глубина, ширина и их соотношение) являются одним из показателей качества сварного шва и для двух описанных режимов сварки различаются. Основными технологическими параметрами, обеспечивающими заданную геометрию ванны, являются мощность излучения, скорость сварки и параметры фокусирующей системы [1].

При низких скоростях парогазовый канал имеет цилиндрическую форму, соотношение сторон сварочной ванны может быть довольно большим, тогда как при высоких скоростях соотношение сторон низкое [10].

Для выбора оптимальных параметров процесса сварки, оптимизации структуры чугуна, повышения энергетической эффективности необходимы математические модели процесса.

Модели, основанные на уравнениях баланса энергии и импульса, позволяют количественно оценить зависимость глубины зоны плавления и других геометрических характеристик швов от основных технологических параметров сварки [11–13]. Однако оптимальная скорость сварки

зависит не только от параметров излучения, но и от структуры свариваемых материалов, например, от поведения графитной фазы при сварке чугуна. При чрезмерно малых или слишком больших скоростях процесс становится нестабильным. Так, в работе [14] показано, что при высокой мощности излучения и относительно небольшом времени лазерного воздействия значительная часть графита в структуре зоны плавления сохраняется. Увеличение времени лазерного воздействия при высокой мощности приводит к взрывному испарению и сублимации графита, что сопровождается образованием кратеров на поверхности шва. Данные явления значительно затрудняют математическое описание процесса.

В работе [15] показано, что для построения эффективной модели прогнозирования качества сварного шва необходимо рассматривать множество параметров. В качестве примера приведена упрощенная прогностическая модель на основе искусственной нейронной сети, демонстрирующая возможные и перспективные показатели прогнозирования качества сварки листа из низкоуглеродистой оцинкованной стали.

В работе [16] приведены качественные данные о влиянии двух параметров процесса на геометрические параметры ванны (табл. 1, [16]). Кроме того, имеются рекомендации по выбору оптимальных параметров для некоторых сталей и сплавов цветных металлов.

В работе [17] показано, что площадь сечения зоны плавления (геометрия сварочной ванны) при сварке чугуна пропорциональна времени лазерного воздействия: при снижении скорости луча убыль массы расплава в результате его испарения растет.

В работе [18] методом планирования факторного эксперимента построены математические модели, связывающие глубину сварочной ванны с мощностью излучения, скоростью сварки и фокусным расстоянием. Показана значительная разница в оценках коэффициентов при сварке сталей двух различных марок. Это указывает на то, что универсальных статистических моделей для оценки геометрии сварочной ванны не существует: модели применимы только к тому набору данных, на которых они построены.

Структура чугуна при одном и том же химическом составе может иметь непредсказуемое и

Таблица 1

Table 1

**Влияние двух параметров лазерной сварки на различные геометрические параметры сварочной ванны**

**Influence of two laser welding parameters on various weld pool geometry parameters**

Геометрический параметр/ Geometry parameter	Параметр процесса/ Process parameter	
	Мощность лазера/ Laser power	Скорость сварки/ Welding speed
Глубина ванны/ Weld pool depth	+	–
Ширина ванны/ Weld pool width	+	–
Отношение глубина/ширина ванны/ Weld pool depth /width ratio	В работе не указано/ not state in the report	+
Длина ванны / Weld pool length	+	–
Радиус парогазового канала/ Keyhole radius	+	–
Скорость охлаждения/ Cooling rate	–	+
Площадь поверхности ванны/ Weld pool surface area	+	–
Скорость испарения/ Vaporization rate	+	В работе не указано/ not state in the report

хаотичное распределение графитных включений различной формы и размеров. Поведение графитной фазы при плавлении, как было отмечено выше, зависит от режима сварки, что в итоге определяет основные характеристики и качество сварного шва.

Таким образом, для повышения энергоэффективности процесса и обеспечения требуемой геометрии сварочной ванны для каждого варианта техпроцесса требуется подбор оптимальных режимов сварки. Данная задача эффективно решается с применением математических моделей. В связи с этим возникает необходимость в изучении и количественной оценке геометрии сварочной ванны при сварке чугуна с различной структурой в зависимости от технологических параметров процесса.

**Цель работы** заключается в построении математической модели сварки чугуна с пластинчатым графитом и определении оптимальной мощности и скорости сварки в зависимости от геометрии сварочной ванны.

**Задачи работы**

1. Проведение эксперимента и регрессионный анализ зависимости геометрии сварочной ванны от режимов сварки.

2. Изучение структуры чугуна в зоне плавления.

3. Серая реляционная оценка геометрических параметров ванны.

4. Расчет оптимальной мощности излучения и скорости сварки в зависимости от геометрии сварочной ванны.

**Методика исследований**

Для эксперимента были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 30 мм и высотой 10 мм из серого нелегированного чугуна с перлитной металлической основой. Чугуны с такой структурой имеют хорошую прокаливаемость, что упрощает оценку влияния параметров сварки на размеры зоны термического влияния. Лазерную обработку для моделирования процесса сварки провели на иттербиевом волоконном лазере ЛС-1 в соответствии с планом (табл. 2). Фокусное расстояние в эксперименте не варьировалось и составляло 120 мм.

На расстоянии, исключающем термическое влияние, проплавили 4 дорожки на каждом образце. Образцы изучали традиционными металлографическими методами. Исследование про-

Таблица 2

Table 2

### План эксперимента Design of experiment

Образец/ Sample	Мощность излучения, кВт/ Laser power, kW	Скорость сварки, мм/с/ Welding speed, mm/s
1	0,7	50
2	1,3	20
3	0,575	35
4	1,0	56
5	1,0	14

водили на компьютеризированном комплексе, созданном на базе металлографического микроскопа Leica DM IRM. Количественную оценку геометрических параметров швов проводили в программе для количественного анализа и обработки изображений ImageJ.

### Результаты и их обсуждение

Зона лазерного воздействия состоит из двух слоев: зоны плавления и зоны закалки из твердой фазы (рис. 1). Зона отпуска на полученных образцах выявлена не была.

Включения графита частично или полностью (в зависимости от режима обработки) растворились в жидкой фазе, кристаллизация прошла

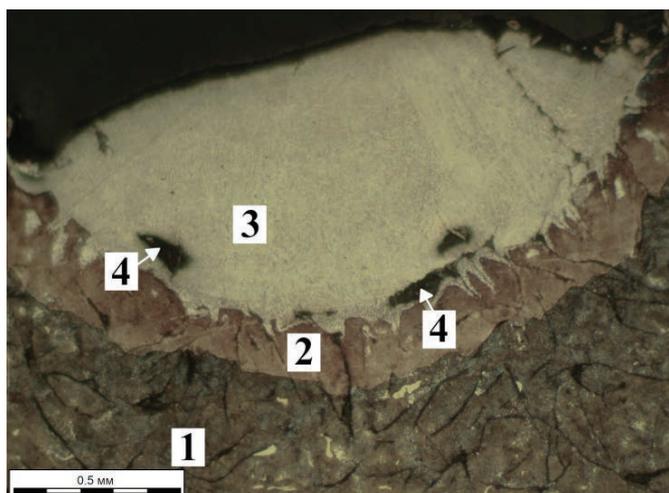


Рис. 1. Микроструктура образца № 5:

1 – исходная структура; 2 – зона закалки из твердой фазы; 3 – зона плавления; 4 – дефект сварки

Fig. 1. Microstructure of sample No. 5:

1 – source material; 2 – hardening area; 3 – penetration area; 4 – welding defect

по метастабильной диаграмме железо-углерод без выделения свободного графита. Из-за высокой скорости кристаллизации выделение избыточных фаз было подавлено, в результате весь расплав перешел в мелкодисперсную смесь аустенита и цементита (квазиэвтектический ледебурит).

Точное аналитическое описание процессов гидродинамики, тепло- и массопереноса в сварочной ванне, оказывающих влияние на геометрию шва, ввиду их сложности оказывается непростой задачей. Поэтому для оптимизации параметров сварки удобно строить упрощенные математические модели. С этой целью провели регрессионный анализ полученных данных, результаты которого представлены в табл. 3.

Регрессионные модели объясняют значительную долю дисперсии зависимых переменных. Коэффициенты регрессии, как и сама модель, статистически значимы. Предпосылки регрессионного анализа относительно каждой модели выполняются. Все это свидетельствует о тесной линейной взаимосвязи между геометрией шва и параметрами процесса.

Высокая мощность излучения и одновременно высокая скорость сварки обеспечивают наименьшую ширину сварочной ванны и получение «кинжального» проплавления (рис. 2). Таким образом, могут быть получены узкие глубокие швы. Из-за низкой теплоемкости графитные включения нагреваются до значительно более высокой температуры по сравнению с основным металлом. Испарение металла и сублимация графита вызывают избыточное давление в канале шва, что приводит к вытеснению расплава из сварочной ванны, в результате в этой области образуются несплошности значительных размеров преимущественно в корневой части шва. При этом выпуклость валика существенно увеличивается.

Снижение скорости движения лазера при высокой мощности излучения увеличивает ширину сварочной ванны и уменьшает глубину проплавления. В результате образуется широкий валик с малой выпуклостью. Объемы несплошностей в зоне плавления значительно сокращаются (рис. 1). Однако уменьшение отношения глубины проплавления к ширине шва повышает уровень растягивающих напряжений, возникающих при усадке чугуна в сварочной ванне. Снижение

**Результаты регрессионного анализа**  
**Regression analysis results**

Статистики/ Statistics	Зависимые переменные/ Dependent variables			
	Ширина, мм/ Width, mm	Глубина, мм/ Penetration, mm	Выпуклость, мм/ Convexity, mm	Зона закалки, мм/ Hardening area, mm
Мощность излучения, кВт/ Laser power, kW	1,127*** (Std. Error 0,112)	2,889*** (Std. Error 0,141)	0,798** (Std. Error 0,188)	0,083*** (Std. Error 0,017)
Скорость сварки, мм/с/ Welding speed, mm/s	-0,023*** (Std. Error 0,002)	0,021*** (Std. Error 0,002)	0,015*** (Std. Error 0,003)	-0,001** (Std. Error 0,001)
Константа/ Intercept	1,170*** (Std. Error 0,142)	-1,979*** (Std. Error 0,180)	-1,034** (Std. Error 0,278)	0,079** (Std. Error 0,022)
Объем выборки/ Observations	20	20	10	20
$R^2$	0,966	0,961	0,794	0,765
Скорректированный $R^2$ / Adjusted $R^2$	0,962	0,956	0,735	0,737
Стандартное отклонение остатков/ Residual Std. Error	0,115 (df= 17)	0,145 (df= 17)	0,127 (df= 7)	0,018 (df= 17)
F-статистика/ F-statistic	240,182*** (df= 2; 17)	209,358*** (df= 2; 17)	13,484*** (df= 2; 7)	27,64*** (df= 2; 17)

Примечание: \*  $p < 0,1$ ; \*\*  $p < 0,05$ ; \*\*\*  $p < 0,01$ / Note: \*  $p < 0,1$ ; \*\*  $p < 0,05$ ; \*\*\*  $p < 0,01$ .



Рис. 2. Микроструктура образца № 4

Fig. 2. Microstructure of sample No. 4

скорости нагрева и охлаждения увеличивает зону закалки из твердой фазы, имеющую хрупкую мартенситную основу. В совокупности эти факторы повышают риск образования поперечных трещин в швах большой протяженности.

Снижение мощности излучения и скорости сварки позволяет обеспечить плавление чугуна без его интенсивного кипения и испарения. При этом возможно полное растворение графитных включений.

Сварочный шов требуемых размеров может быть получен при различных мощностях и скорости сварки (рис. 3). Выбор оптимальных технологических параметров, обеспечивающих получение качественного соединения, является многокритериальной оптимизационной задачей. С другой стороны, процесс сварки хотелось бы вести при минимальной мощности на максимальной скорости.

В задачах оптимизации сразу по нескольким зависимым переменным (глубина, ширина, выпуклость шва, толщина зоны закалки) требуется

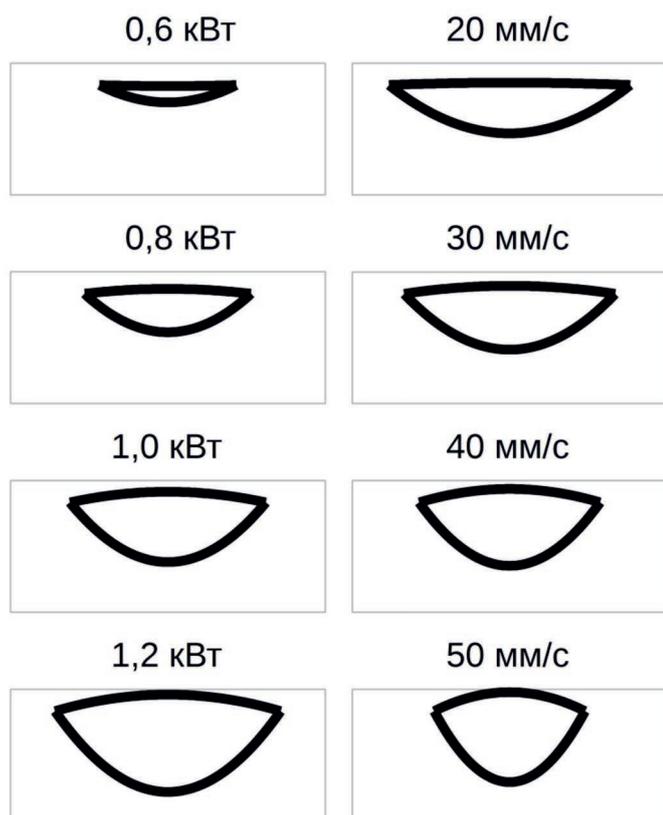


Рис. 3. Расчетная форма сварочной ванны в зависимости от мощности излучения и скорости сварки:  
*a* – скорость сварки 35 мм/с; *б* – мощность излучения 1 кВт

Fig. 3. Calculated shape of the weld seam depending on laser power and welding speed:

*a* – welding speed 35 mm/s; *b* – laser power 1 kW

оценка некоторого комплексного показателя качества. Для решения вопроса об оптимальных уровнях мощности и скорости сварки был выбран метод серого реляционного анализа [19, 20]. Построена ортогональная матрица (9×2), представляющая собой пассивный эксперимент, состоящий из 9 опытов, в которых факторы варьируются на трех равноотстоящих уровнях. План эксперимента и рассчитанные при помощи регрессионных моделей (см. табл. 2) геометрические параметры швов представлены в табл. 4.

Исходные для анализа данные должны быть нормированы. Нормирование глубины зоны плавления выполнили в соответствии с принципом «больше – лучше» по формуле

$$x_{ij} = \frac{\max_j y_{ij} - y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}},$$

где  $y_{ij}$  – величина  $i$ -го параметра (глубина зоны плавления) в  $j$ -м эксперименте.

К другим геометрическим параметрам шва подходит характеристика «меньше – лучше», нормирование проводили по формуле

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_j y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}}.$$

Таблица 4

Table 4

**Матрица планирования, значения факторов в натуральном масштабе и геометрические параметры шва**

**Orthogonal array, natural values and corresponding response values**

№ П/П	$x_1^*$	$x_2^*$	Мощность излучения, кВт/ Laser Power, kW	Скорость сварки, мм/с/ Welding speed, mm/s	Глубина ( $y_1$ ), мм/ Penetration ( $y_1$ ), mm	Ширина ( $y_2$ ), мм/ Width ( $y_2$ ), mm	Выпуклость ( $y_3$ )**, мм/ Convexity ( $y_3$ )**, mm	Зона закалки ( $y_4$ ), мм/ Hardening area ( $y_4$ ), mm
1	1	1	0,6	14	0,04	1,53	-0,34	0,12
2	1	2	0,6	35	0,48	1,04	-0,03	0,10
3	1	3	0,6	56	0,91	0,56	0,29	0,08
4	2	1	0,95	14	1,05	1,92	-0,06	0,15
5	2	2	0,95	35	1,49	1,44	0,25	0,13
6	2	3	0,95	56	1,92	0,96	0,57	0,11
7	3	1	1,3	14	2,07	2,31	0,22	0,18
8	3	2	1,3	35	2,5	1,83	0,53	0,16
9	3	3	1,3	56	2,93	1,35	0,85	0,14

Примечание / Note.

\* Кодированные значения мощности излучения и скорость сварки / Coded values of laser power and welding speed.

\*\* Знак минус означает вогнутость шва / A minus means concavity of the weld seam.

Степень несоответствия идеальных (наилучших) и экспериментальных значений параметров выражается величиной серых реляционных коэффициентов, значения которых рассчитываются по формуле

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|}{|x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|},$$

где  $y_{ij}$  – идеальный нормированный результат  $i$ -го параметра;  $x_i^0 = 1$ ;  $\zeta$  – коэффициент различия, в данном исследовании принят  $\zeta = 0,5$ .

Серая реляционная оценка определяется путем усреднения серых реляционных коэффициентов:

$$\gamma_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \xi_{ij}.$$

Серые реляционные оценки, усредненные по уровням варьирования факторов, показаны на рис. 4. Горизонтальная линия на графике соответствует средней реляционной оценке в эксперименте.

График на рис. 4, а также данные табл. 5 показывают, что наиболее привлекательными параметрами с точки зрения получения шва максимальной глубины с минимальной шириной, выпуклостью (вогнутостью) и зоной закалки являются минимальная мощность и максимальная скорость сварки, что соответствует режиму № 3. Кроме того, при данных параметрах достигается максимальная производительность и экономичность процесса.

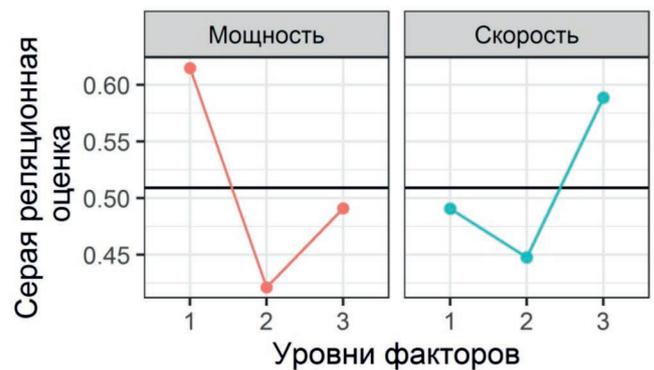


Рис. 4. Серая реляционная оценка геометрических параметров шва

Fig. 4. Main effects plot for Grey relational grade

Потребуем выполнение этих условий в задаче оптимизации:

$$\left\{ \begin{array}{l} p \rightarrow \min, \\ v \rightarrow \max, \\ d - 1,979 = 2,889p + 0,021v, \\ m + 0,079 = 0,083p - 0,001v, \\ d + m = t, \\ 0,6 \leq p \leq 1,3, \\ 14 \leq v \leq 56, \end{array} \right.$$

где  $p$  – мощность лазера, кВт;  $v$  – скорость сварки, мм/с;  $d$  – глубина зоны плавления, мм;  $m$  – размер зоны закалки из твердой фазы, мм;  $t$  – глубина шва, мм. Ограничения на глубину зон плавления и зоны закалки взяты в соответствии с полученными регрессионными моделями (см. табл. 2), интервалы варьирования мощности

Таблица 5

Table 5

**Результаты серого реляционного анализа**  
**Grey relational grade results**

№ п/п	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$\xi_4$	$\gamma$	Ранг/ Rank
1	0,48	1	0,58	0,33	0,6	2
2	0,61	0,62	0,7	0,33	0,56	4
3	1	0,4	1	0,33	0,68	1
4	0,33	0,62	0,36	0,37	0,42	8
5	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	9
6	0,63	0,33	0,55	0,52	0,51	5
7	0,33	0,52	0,33	0,63	0,45	6
8	0,36	0,36	0,33	0,73	0,45	7
9	0,53	0,33	0,44	1	0,57	3

и скорости – в соответствии с принятыми в ходе эксперимента уровнями факторов (см. табл. 1). Задачу решали методом линейного программирования. Решение представлено в виде графика на рис. 5.

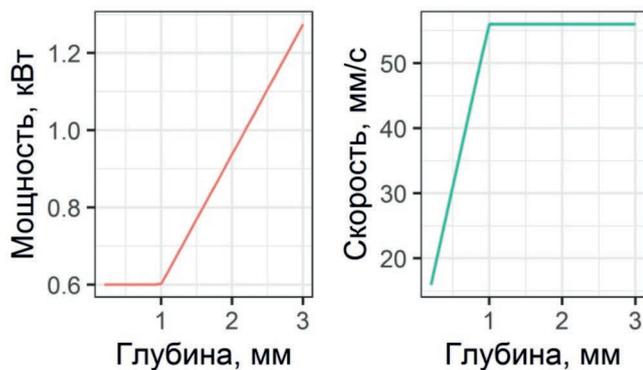


Рис. 5. Оптимальная мощность и скорость сварки в зависимости от глубины шва

Fig. 5. Optimal laser power and welding speed depending on the weld penetration

Зависимость, представленная на рис. 5, показывает, что сварку малых толщин (до 1 мм) оптимально вести с минимальной мощностью, а глубину шва регулировать путем изменения скорости движения лазера. Высокая скорость оптимальна при сварке больших толщин (более 1 мм), при этом оптимальная мощность линейно возрастает с увеличением глубины шва. При глубине более 3 мм задача не имеет решения, т.е. получить такой шов с принятыми интервалами варьирования технологических параметров невозможно.

## Выводы

Для каждого материала существуют оптимальные параметры лазерной сварки. В данной работе использовали методы регрессионного анализа, серого реляционного анализа, метод линейного программирования для выявления зависимости, позволяющей делать обоснованный выбор технологических параметров непрерывной лазерной сварки (мощность лазера, скорость сварки) чугуна на глубину до 3 мм. Установлено, что сварка малых толщин оптимальна на минимальной мощности, сварка больших толщин – на максимальной скорости. Выводы в чистом

виде справедливы для чугунов с пластинчатым графитом с перлитной металлической основой при сварке на иттербиевом волоконном лазере мощностью от 0,6 до 1,3 кВт со скоростью от 14 до 56 мм/с с фокусным расстоянием 120 мм.

## Список литературы

1. ASM Handbook. Vol. 6. Welding, brazing, and soldering / D.L. Olson, T.A. Siewart, S. Liu, G.R. Edwards. – ASM International, 1993. – 2873 p. – ISBN 0-87170-377-7.
2. Гусев А.А. Перспективы импульсного лазерного легирования и наплавки // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14, №6. – С. 247–253.
3. Repair welding of ductile cast iron by laser cladding process: microstructure and mechanical properties / C.-M. Lin, A.S. Chandra, L. Morales-Rivas, S.-Y. Huang, H.-C. Wu, Y.-E. Wu, H.-L. Tsai // International Journal of Cast Metals Research. – 2014. – Vol. 27, iss. 6. – P. 378–383. – DOI: 10.1179/1743133614Y.0000000126.
4. Microstructure formation and fracturing characteristics of grey cast iron repaired using laser / Q. Fu, P. Yi, P. Xu, C. Fan, G. Yang, D. Liu, Y. Shi // The Scientific World Journal. – 2014. – Vol. 2014. – P. 541569. – DOI: 10.1155/2014/541569.
5. Piątkowski J., Grabowski A., Czerepak M. The influence of laser surface remelting on the microstructure of EN AC-48000 cast alloy // Archives of Foundry Engineering. – 2016. – Vol. 16, iss. 4. – P. 217–221. – DOI: 10.1515/afe-2016-0112.
6. Мамвеев Ю.И., Казаков С.С. Формирование структур серого чугуна в зоне лазерного воздействия // Вестник НГИЭИ. – 2011. – Т. 2, № 1 (2). – С. 41–53.
7. Surface melting of nodular cast iron by Nd-YAG laser and TIG / K.Y. Benyounis, O.M.A. Fakron, J.H. Abboud, A.G. Olabi, M.J.S. Hashmi // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 170, iss. 1. – P. 127–132. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.04.108.
8. Bhatnagar R.K., Gupta G. A review on weldability of cast iron // International Journal of Scientific and Engineering Research. – 2016. – Vol. 7, iss. 5. – P. 126–130. – URL: <https://www.ijser.org/researchpaper/A-REVIEW-ON-WELDABILITY-OF-CAST-IRON.pdf> (accessed: 13.08.2021).
9. Kou S. Welding metallurgy. – John Wiley & Sons, 2003. – 468 p. – ISBN 0-471-43491-4.
10. Fabbro R. Depth dependence and keyhole stability at threshold, for different laser welding regimes // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, iss. 4. – P. 1487. – DOI: 10.3390/app10041487.
11. Лазерные технологии обработки металлов: современные проблемы фундаментальных исследо-

ваний и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко. – М.: Физматлит, 2009. – 664 с. – ISBN 978-5-9221-1023-5.

12. *Lankalapalli K.N., Tu J.F., Gartner M.* A model for estimating penetration depth of laser welding processes // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1996. – Vol. 29, iss. 7. – P. 1831–1841. – DOI: 10.1088/0022-3727/29/7/018.

13. *Tan W., Bailey N.S., Shin Y.C.* Investigation of key-hole plume and molten pool based on a three-dimensional dynamic model with sharp interface formulation // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2013. – Vol. 46, iss. 5. – P. 055501. – DOI: 10.1088/0022-3727/46/5/055501.

14. *Dikova T., Stavrev D.* Behaviour of graphite in laser surface hardening of irons // *Machines, Technologies, Materials*. – 2007. – Vol. 4–5, iss. 9. – P. 98–101.

15. *Oussaid K., El Ouafi A., Chebak A.* Experimental investigation of laser welding process in overlap joint configuration // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. – 2019. – Vol. 7. – P. 16–31. – DOI: 10.4236/msce.2019.73002.

16. A review on melt-pool characteristics in laser welding of metals / B. Fotovvati, S.F. Wayne, G. Lew-

is, E. Asadi, P. Ferro // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 2018. – P. 4920718. – DOI: 10.1155/2018/4920718.

17. Исследование микроструктуры и микротвердости зон лазерного оплавления чугуна нирезист ЧН16Д7ГХ / В.Г. Гилев, Е.А. Морозов, И.Б. Пуртов, Е.С. Русин // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2014. – Vol. 16, iss. 6. – P. 227–233.

18. *Metzbower E.A.* Penetration depth in laser beam welding // *Welding Research Supplement*. – 1993. – Vol. 407. – P. 403–407.

19. *Ravikumar S.M., Vijian Dr.P.* Optimization of weld bead geometry in Shielded Metal Arc Welding using Taguchi Based Grey Relational Analysis // *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. – 2014. – Vol. 14, iss. 4. – P. 86–91.

20. Оптимизация селективного лазерного сплавления методом оценки множественных параметров качества в двигателестроении / А.И. Хаймович, В.И. Санчугов, И.С. Степаненко, В.Г. Смелов // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2018. – Т. 20, № 6. – С. 41–46.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## On the issue of selecting and optimizing parameters of continuous laser welding of cast iron

*Dmitry Ilyushkin<sup>a,\*</sup>, Valery Soldatov<sup>b</sup>, Oleg Petrakov<sup>c</sup>, Irina Kotlyarova<sup>d</sup>*

Bryansk State Technical University, 7, 50 Let Oktyabrya Boulevard, Bryansk, 241035, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-4265-9570>,  [shirke@mail.ru](mailto:shirke@mail.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-6318-5522>,  [soldat-tu@bk.ru](mailto:soldat-tu@bk.ru),

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-4937-1411>,  [typeofpeople@mail.ru](mailto:typeofpeople@mail.ru), <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-6162-0199>,  [ikotlyarova@list.ru](mailto:ikotlyarova@list.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 19 January 2021

Revised: 26 January 2021

Accepted: 05 August 2021

Available online: 15 September 2021

#### Keywords:

Laser welding

Cast iron

Regression analysis

Grey Relational Analysis

Optimization

#### Acknowledgements

Research were conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

### ABSTRACT

**Introduction.** Cast iron extremely poorly tolerate thermal welding cycles, and therefore it is necessary to choose carefully the technological parameters. The main parameters of continuous laser welding are: the power of laser radiation, the welding speed, the parameters of the focusing system. **The aim of the work** is to determine the optimal power and speed of continuous laser welding of cast iron, depending on the geometry of the weld. **In this paper**, the welding seams obtained on samples of gray alloyed cast iron with a pearlitic metal base, using an LS-1 ytterbium fiber laser, are studied. **Research methods.** The geometric parameters of the joints were quantified in the program for quantitative analysis and image processing ImageJ. The obtained data were processed by regression analysis. To optimize the process parameters, an orthogonal plan of the passive experiment was developed, including nine experiments in which the factors varied at three equally spaced levels. The quality parameters in the passive experiment were the geometric dimensions of the weld pool and the size of the quenched zone. To solve the optimization problem, we used the methods of gray relational analysis and linear programming. **Results and Discussions.** The obtained regression models explain a significant proportion of the variance of the dependent variables, the regression coefficients, as well as the models themselves, are statistically significant, which indicates a close linear relationship between the seam geometry and the process parameters. The calculated shape of the weld pool depending on the radiation power and welding speed shows that the required welding seam of the required dimensions can be obtained at various process parameters which allow solving a multi-criteria optimization problem. The gray relational evaluation of the geometric parameters of the seam shows that the most correct parameters in terms of obtaining the seam of the maximum depth with the minimum width, convexity (concavity) and the quenched zone are the minimum power and maximum welding speed. The calculation of the optimal radiation power and welding speed depending on the seam depth showed that welding of small thicknesses is optimally carried out with minimal power, and the seam depth is adjusted by changing the beam speed. Welding of large thicknesses is optimal at high speed, and to increase the depth of the seam, the power must increase.

**For citation:** Ilyushkin D.A., Soldatov V.G., Petrakov O.V., Kotlyarova I.A. On the issue of selecting and optimizing parameters of continuous laser welding of cast iron. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 20–30. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-20-30. (In Russian).

### References

1. Olson D.L., Siewart T.A., Liu S., Edwards G.R. *ASM Handbook*. Vol. 6. *Welding, brazing, and soldering*. ASM International, 1993. 2873 p.
2. Gusev A.A. Perspektivy impul'snogo lazernogo legirovaniya i naplavki [Outlooks for pulse-laser alloying and pad welding]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 6, pp. 247–253.

#### \* Corresponding author

*Ilyushkin Dmitry A.*, Ph.D. (Engineering), Associate Professor  
 Bryansk State Technical University,  
 7, 50 Let Oktyabrya Boulevard,  
 241035, Bryansk, Russian Federation  
**Tel.:** 8 (4832) 58-82-61, **e-mail:** [shirke@mail.ru](mailto:shirke@mail.ru)

3. Lin C.-M., Chandra A.S., Morales-Rivas L., Huang S.-Y., Wu H.-C., Wu Y.-E., Tsai H.-L. Repair welding of ductile cast iron by laser cladding process: microstructure and mechanical properties. *International Journal of Cast Metals Research*, 2014, vol. 27, iss. 6, pp. 378–383. DOI: 10.1179/1743133614Y.0000000126.
4. Fu Q., Yi P., Xu P., Fan C., Yang G., Liu D., Shi Y. Microstructure formation and fracturing characteristics of grey cast iron repaired using laser. *The Scientific World Journal*, 2014, vol. 2014, p. 541569. DOI: 10.1155/2014/541569.
5. Piątkowski J., Grabowski A., Czerepak M. The influence of laser surface remelting on the microstructure of EN AC-48000 cast alloy. *Archives of Foundry Engineering*, 2016, vol. 16, iss. 4, pp. 217–221. DOI: 10.1515/afe-2016-0112.
6. Matveev Yu.I., Kazakov S.S. Formirovanie struktur serogo chuguna v zone lazernogo vozdeistviya [Formation of structures of grey pig-iron in the zone of laser influence]. *Vestnik NGIEI = Bulletin NGIEI*, 2011, vol. 2, no. 1 (2), pp. 41–53.
7. Benyounis K.Y., Fakron O.M.A., Abboud J.H., Olabi A.G., Hashmi M.J.S. Surface melting of nodular cast iron by Nd-YAG laser and TIG. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 170, iss. 1, pp. 127–132. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.04.108.
8. Bhatnagar R.K., Gupta G. A review on weldability of cast iron. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 2016, vol. 7, iss. 5, pp. 126–130. Available at: <https://www.ijser.org/researchpaper/A-REVIEW-ON-WELDABILITY-OF-CAST-IRON.pdf> (accessed 13.08.2021).
9. Kou S. *Welding metallurgy*. John Wiley & Sons, 2003. 468 p.
10. Fabbro R. Depth dependence and keyhole stability at threshold, for different laser welding regimes. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, iss. 4, p. 1487. DOI: 10.3390/app10041487.
11. Panchenko V.Ya., ed. *Lazernye tekhnologii obrabotki metallov: sovremennye problemy fundamental'nykh issledovaniy i prikladnykh razrabotok* [Laser technologies of metal processing: modern problems of fundamental research and applied developments]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 664 p. ISBN 978-5-9221-1023-5.
12. Lankalapalli K.N., Tu J.F., Gartner M. A model for estimating penetration depth of laser welding processes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1996, vol. 29, iss. 7, pp. 1831–1841. DOI: 10.1088/0022-3727/29/7/018.
13. Tan W., Bailey N.S., Shin Y.C. Investigation of keyhole plume and molten pool based on a three-dimensional dynamic model with sharp interface formulation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, vol. 46, iss. 5, p. 055501. DOI: 10.1088/0022-3727/46/5/055501.
14. Dikova T., Stavrev D. Behaviour of graphite in laser surface hardening of irons. *Machines, Technologies, Materials*, 2007, vol. 4–5, iss. 9, pp. 98–101.
15. Oussaid K., El Ouafi A., Chebak A. Experimental investigation of laser welding process in overlap joint configuration. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 2019, vol. 7, pp. 16–31. DOI: 10.4236/mjce.2019.73002.
16. Fotovvati B. Wayne S.F., Lewis G. Asadi E., Ferro P. A review on melt-pool characteristics in laser welding of metals. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 2018, p. 4920718. DOI: 10.1155/2018/4920718.
17. Gilev V.G., Morozov E.A., Purtov I.B., Rusin E.S. Issledovanie mikrostruktury i mikrotverdosti zon lazernogo oplavleniya chuguna nirezist ChN16D7GKh [Microstructure and microhardness research of Ni-resist cast iron after laser surface melting]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 16, no. 6, pp. 227–233.
18. Metzbowler E.A. Penetration depth in laser beam welding. *Welding Research Supplement*, 1993, vol. 407, pp. 403–407.
19. Ravikumar S.M., Vijian Dr.P. Optimization of weld bead geometry in Shielded Metal Arc Welding using Taguchi Based Grey Relational Analysis. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 2014, vol. 14, iss. 4, pp. 86–91.
20. Khaimovich A.I., Sanchugov V.I., Stepanenko I.S., Smelov V.G. Optimizatsiya selektivnogo lazernogo splavleniya metodom otsenki mnozhestvennykh parametrov kachestva v dvigatelestroenii [Optimization of selective laser melting by evaluation method of multiple quality characteristics]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 41–46.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).