

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №4 (130). С. 34-40.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №4 (130). P. 34-40.

Научная статья
УДК 621.791, 621.9
doi: 10.30987/2223-4608-2022-4-34-40

Специфика реализации лазерных технологий упрочнения и наплавки на оборудовании с ЧПУ

Александр Владимирович Хандожко¹, д.т.н., Константин Александрович Макитрук², аспирант,
Александр Григорьевич Федуков³, аспирант
^{1,2,3}Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия
¹chandosh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0604-8537>,
²kostia0320@gmail.com,
³fedukov.lvdu.@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены вопросы реализации на оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ) технологических операций с применением лазерного излучения. Рассмотрены особенности реализации процесса лазерной наплавки проволокой и влияние на него основных технологических параметров.

Ключевые слова: лазерная наплавка, аддитивные технологии, оборудование с ЧПУ

Для цитирования: Хандожко А.В., Макитрук К.А., Федуков А.Г. Специфика реализации лазерных технологий упрочнения и наплавки на оборудовании с ЧПУ // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №4 (130). – С. 34-40. doi: 10.30987/2223-4608-2022-4-34-40.

Original article

Specifics of the implementation of laser hardening and surface building-up technologies on NC-machining technique

Alexander V. Khandozhko¹, Dr. Sc. Tech., Konstantin A. Makitruk², post graduate student,
Alexander G. Fedukov³, post graduate student
^{1,2,3}Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia
¹chandosh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0604-8537>,
²kostia0320@gmail.com,
³fedukov.lvdu.@gmail.com

Annotation. The issues of implementation of technological operations using laser radiation on equipment with numerical control (CNC) are described. The features of the implementation of laser building-up using wire and the influence of the main technological parameters on it are discussed.

Keywords: laser building-up, additive technologies, NC-machining technique

For citation: Khandozhko A.V., Makitruk K.A., Fedukov A.G. Specifics of the implementation of laser hardening and building-up technologies on CNC equipment / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.4 (130), pp. 34-40. doi: 10.30987/2223-4608-2022-4-34-40.

Введение

Использование энергии лазерного луча позволяет расширить технологические возможности оборудования для операций закалки, наплавки, аддитивных технологий. Высокая концентрация энергии в малых областях сопровождающаяся сверхвысокими скоростями изменения температуры позволяет проводить локальную закалку режущих кромок инструмента, восстановление сколов и других повреждений закаленных высоколегированных

деталей инструментального производства (пуансоны, матрицы и т.п.) [1].

Лазерные технологии являются основными при реализации аддитивных технологий (для металла) типа SLS (селективное лазерное спекание), SLM (селективное лазерное плавление). Преимущественно в таких технологиях используют волоконные лазеры непрерывные или квазинепрерывные. Современные технологические лазерные системы в целом доступны по цене, имеют сравнительно большой ресурс, относительно несложны в эксплуата-

ции. Тем не менее, эти технологии требуют высокого уровня культуры производства. Высокая плотность энергии при несоблюдении режимов может привести к перегреву поверхности при закалке, переходу от режима SLS к режиму SLM, процесса сварки в процесс резки (прошивания). Поэтому реализации лазерных технологий требует либо совершенного оборудования, как правило с ЧПУ, либо рабочих высокой квалификации.

Особую сложность представляют процессы полуавтоматической наплавки (аддитивной технологии) с использованием проволоки [2]. Этот процесс намного производительнее порошкового, стоимость проволоки существенно ниже стоимости порошка. Но существует ряд технологических трудностей, затрудняющих широкое использование его в промышленности. В отличие от порошка, проволока в процессе наплавки должна находиться строго в зоне луча, а величина её подачи должна быть синхронизирована с процессом плавления и перехода металла в сварочную ванну. Даже небольшие отклонения позиционирования проволоки ведут к аварийному завершению процесса: проволока не плавится, но продолжает подаваться в зону обработки.

Аналогичная проблема возникает при чрезмерной величине скорости подачи проволоки: материал не успевает расплавляться, проволока подается в сварочную ванну без расплавления. При недостаточной скорости подачи проволоки она плавится быстрее, чем в зону луча подается следующая порция наплавочного материала. Стабильность и результативность зависит от большого числа параметров. Значения этих параметров теоретически определить сложно, информации в технической литературе крайне мало, поэтому необходимы дополнительные экспериментальные исследования процесса для различных поверхностей, материалов.

Постановка задач

В ходе исследований планируется определить основные параметры процесса: траекторию движения рабочего органа установки с лазерной головкой, скорости перемещения, скорости подачи проволоки, характер и мощность излучения, влияние защитного газа.

Исследования были выполнены на специально созданном технологическом оборудовании с ЧПУ для реализации наплавочных, аддитивных процессов, в том числе и с применением лазерного излучения. Оборудование имеет компоновку, характерную для токарного станка, дополненную модулем, имеющим две линейные и одну круговую координату (рис. 1).

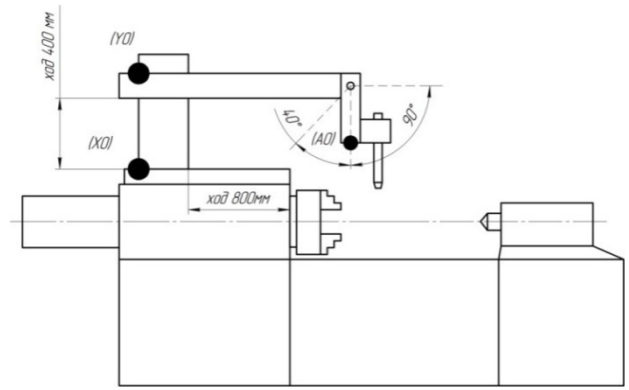


Рис. 1. Компоновка установки

Управление установкой обеспечивает СЧПУ NC410 (производство РФ), исполнение с 12 управляемыми координатами. Привод вращения шпинделя является управляемой угловой координатой. Установка оснащена волоконным иттербиевым лазером мощностью 2 кВт. Длина волны 1070...1090 нм. Мощность излучения регулируется в диапазоне от 10 до 100 % номинального значения, режим работы непрерывный или импульсный. В рабочую зону излучение подается с помощью головки, установленной на исполнительном органе дополнительного модуля (рис. 2).



Рис. 2. Лазерная головка в зоне обработки

Лазер установлен в непосредственной близости от установки, с головкой соединен с помощью оптоволоконка. Управление лазером (включение/выключение, изменение режима и мощности) производится от системы ЧПУ установки. Обработка проводится преимущественно в среде аргона, возможно использование азота.

Проволока подается в зону обработки с помощью модернизированного устройства подачи проволоки установки для полуавтоматической сварки в среде защитного газа. Использование для этой цели исходной конструкции

невозможно из-за низкой точности управления подачей проволоки. Для решения этой проблемы штатный двигатель устройства заменен на сервопривод, управляемый от системы ЧПУ, а скорость подачи проволоки является программируемым параметром.

Процесс лазерной наплавки (выращивания) зависит от большого числа параметров: материала основы, наплавляемой проволоки, габаритов и массы основы, диаметра проволоки и скорости вращения изделия и скорости подачи проволоки. При этом часть из этих параметров взаимосвязаны, т.е. изменение одного из них требует изменения другого. Это в первую очередь относится к скорости изделия и скорости подачи проволоки: количество подаваемого металла в зону должно соответствовать объему формируемого валика наплавленного металла. Для первого приближения можно принять линейные скорости изделия и подачи проволоки равными. То есть проволока наматывается на цилиндр без натяга и ослабления. На практике это соотношение можно изменять в разумных пределах увеличивая или уменьшая высоту наплавляемого валика.

Исследования

Были проведены эксперименты по определению влияния скорости изделия при наплавке кольцевого шва. Один из вариантов процесса исследовался на толстостенной трубе из стали 20, диаметр 100 мм, толщина стенки 15 мм. Наплавляемый материал – сварочная омедненная проволока Св.08Г2С диаметром 1 мм. Второй – на чугунной детали с использованием двухслойной наплавки (буферный слой + износостойкий слой).

Процесс лазерной наплавки происходил в режиме условно линейной интерполяции. Использовался стандартный цикл линейной интерполяции системы ЧПУ G01 только по угловой (круговой) координате при наплавке кольцевых валиков и угловой + линейной вдоль оси Z при наплавке по винтовой поверхности.

Лазерная наплавка с использованием проволоки имеет еще дополнительные ограничения (рис. 3).

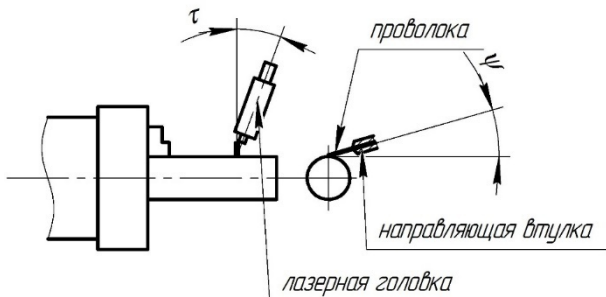


Рис. 3. Ориентация головки и проволоки относительно детали

Во-первых, лазерная головка должна быть расположена таким образом относительно обрабатываемой поверхности, чтобы ни при каких условиях отраженный луч не мог попасть в оптическую систему лазера – это может привести к проблемам, вплоть до выхода его из строя. Особенно это опасно при работе с медными сплавами. То есть головка должна быть отклонена от нормали на угол τ (15..30°).

Во-вторых, проволока должна подаваться в зону плавления под углом к касательной к наплавляемой поверхности. При этом очень хорошие результаты дает подача проволоки касательно наплавляемой поверхности, но такое направление возможно лишь на поверхности одного диаметра. На практике угол ψ отличен от нуля, выбирают его минимально возможным (до 10..30°).

Существенное значение имеет расстояние от торца проволоки до наплавляемой поверхности. Его желательно минимизировать, вплоть до касания. В противном случае металл на поверхность переносится в виде остывающих капель, падающих на недостаточно прогретую поверхность детали. При таком протекании процесса велика вероятность непроплавления основы, возникновения пор, раковин.

Большое значение для стабильности процесса играет точность позиционирования проволоки, зависящая, в том числе, и от величины зазора между проволокой и наконечником направляющего канала. Зазор должен быть минимален, лишь обеспечивая свободное перемещение проволоки (max 0,10...0,15 мм).

Предварительно были выполнены эксперименты по подбору энергии излучения. Величина энергии излучения является оптимизируемым параметром: при недостатке мощности возникают дефекты, связанные с недостаточным проплавлением, при излишней мощности в зоне луча возможно возникновение кратеров.

Эксперименты показали, что при использовании проволоки диаметром 1 мм наплавка становится возможной уже при мощности 450 Вт. Однако наплавленный металл при этом имеет большое число дефектов, в первую очередь поры и плохое сплавление присадки и основного металла. Увеличение мощности до 850 Вт сопровождалось заметным улучшением качества и стабильности процесса. Дальнейшее увеличение мощности до 1400 Вт дало ограниченный положительный эффект: сварочная ванна увеличивалась, наплавленный валик имел меньшую высоту и большую ширину, процесс сопровождался значительным нагревом детали и большим окислением наплавленного металла.

Основные эксперименты проводились при мощности излучения 850 Вт. Измерения теп-

ловых полей показали, что в этом случае после выполнения 1...2-х кольцевых швов температура детали на расстоянии 10 мм от зоны наплавки не превышает 150...200°. Это позволяет вести наплавку, в том числе, на закаленные стали, например, для устранения дефектов (сколов, износа).

В ходе эксперимента были нанесены несколько кольцевых швов на цилиндрическую поверхность с различными сочетаниями скоростей изделия, подачи проволоки, мощности. Результаты показаны на рис. 4, условия обработки приведены в табл. 1.

Крайняя левая дорожка №1 выполнена без подачи проволоки при мощности излучения 500 Вт для проверки возможности расплавления массивной подложки. На образце видно, что на поверхности металла имеются локальные зоны оплавления, но основной материал

не расплавляется при такой энергии излучения и скорости изделия 200 мм/мин.



Рис. 4. Внешний вид образцов лазерной наплавки проволокой

1. Условия лазерной обработки образцов

№ дорожки	Мощность, Вт	Скорость изделия, мм/мин	Скорость подачи проволоки, мм/мин	Защитный газ	Подача проволоки
1	500	200	-	Аргон	Нет
2	850	200	200	Аргон	Да
3	850	220	200	Азот	
4	850	270	200	Азот	
5	850	250	200	Аргон	
6	850	250	200	Аргон	
7	1100	200	200	Азот	
8	1100	200	210	Азот	
9	1300	200	210	Азот	
10	1100	220	220	Азот	
11	1100	220	220	Аргон	
12	1100	220	200	Аргон	
13	1100	220	200	Аргон	

Наплавка выполнялась с использованием в качестве защитных газов аргона и азота. На рис. 4 хорошо видно отличие результатов использования этих газов: дорожки, наплавленные с защитой азотом, приобретают желтый цвет.

Дорожка №1 обработана без подачи присадочной проволоки, при использованных режимах на поверхности появляются локальные участки оплавления.

Дорожки, наплавленные при скорости подачи проволоки равной скорости изделия или превышающей её имеют хорошее качество (№2, №7 – №11). Визуально наблюдаемых дефектов нет, поверхность гладкая.

При увеличении номинальных скоростей и сохранении их соотношения необходимо увеличение мощности излучения, для расплавления растущего объема присадочного металла.

Небольшое превышение скорости подачи проволоки над скоростью изделия (дорожки №8, №9) позволяет обеспечить качество наплавки при увеличении объема наносимого

материала и, соответственно, размеров наплавленных дорожек.

При подаче проволоки меньше скорости изделия качество резко снижается. Расплавленного металла не хватает для формирования кольцевой дорожки, металл переносится на основу каплями (дорожки №4, №5, №12, №13).

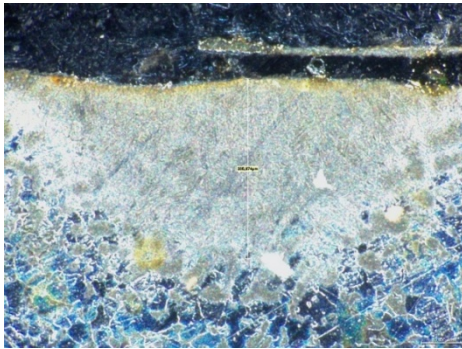
Увеличение энергии излучения при равных условиях приводит к дополнительному расплавлению металла в зоне шва, валик теряет высоту, становится шире.

Из обработанных участков были вырезаны образцы и проведены металлографические исследования. Характерные структуры зоны лазерной обработки показаны на рис. 5.

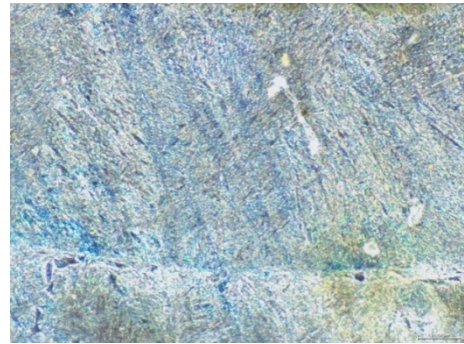
При обработке лазерным лучом без присадочного материала происходят изменения в структуре: зерно сильно измельчается. Это наблюдается как при наплавке, так и при воздействии лазерного луча без присадочного материала. На рис. 5, а, б представлены структура материала дорожки 1 (без наплавки). Зо-

на температурного воздействия хорошо выражена, величина зерна уменьшается кратно,

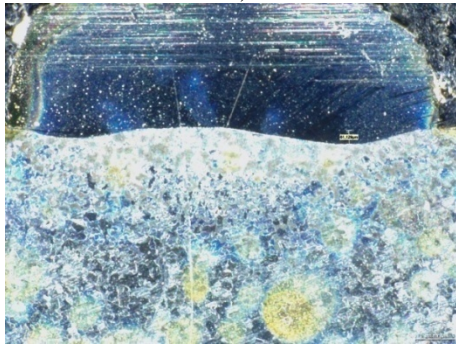
зерна становятся вытянутыми. Граница зоны воздействия явно выражена.



а)



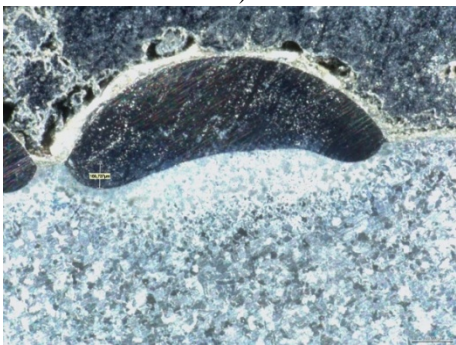
б)



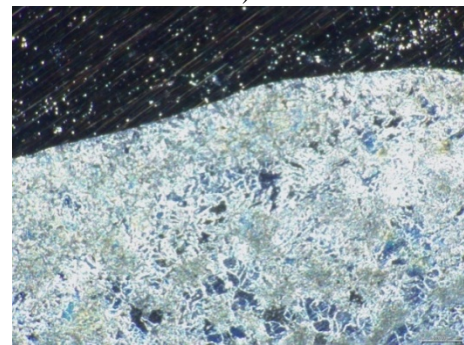
в)



з)



д)



е)

Рис. 5. Структура материала образцов, полученных лазерной обработкой:

а – зона обработки лазером без наплавки, $\times 800$; б – структура исходного материала поверхностного слоя после лазерного воздействия, $\times 1400$; в – зона наплавки образца дорожки 3, $\times 800$; з – зона наплавки дорожки 7, $\times 800$; д – зона наплавки дорожки 8, $\times 800$; е – зона наплавки дорожки 9, $\times 800$

На рис. 5, в, з показан внешний вид шлифа наплавленного металла при одинаковых скоростях изделия и подачи проволоки, но разных мощностях. При меньшей мощности (850 Вт) валик имеет большую высоту, при увеличении мощности до 1100 Вт валик приобретает каплевидную форму, заглубляется в основной материал по краям дорожки. При этом основной материал под наплавкой поднимается. Характер наплавленного валика металла сохраняется при увеличении скорости подачи проволоки на 10 % по сравнению со скоростью изделия (см. рис. 5, д).

Увеличение мощности излучения при неизменных номиналах и соотношении скоростей изделия и проволоки приводит к допол-

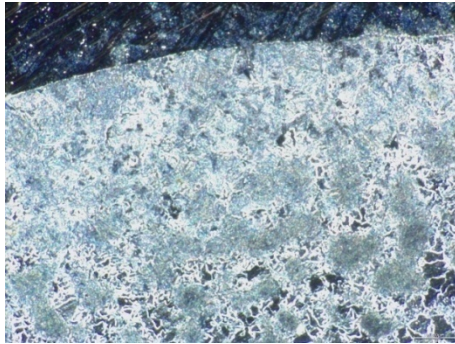
нительному оплавлению и растеканию наплавленного металла по основе (см. рис. 5, е).

Характерным является сохранение четкой границы между наплавленным слоем и основным материалом (рис. 6).

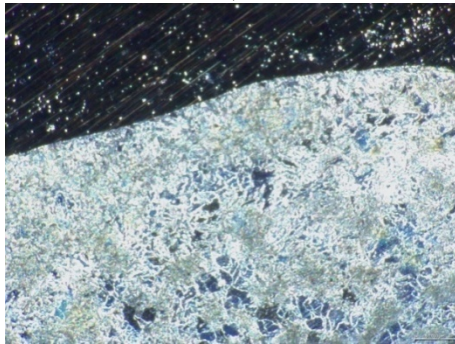
Из-за высокой скорости процесса диффузия металлов наблюдается в очень тонком слое. При этом приграничный слой основного материала изменил структуру. Характер изменения такой же, что и при лазерном воздействии без присадочного металла. Наблюдается существенное измельчение зерен в зоне, примыкающей к наплавке.

При наплавке материала на детали производится нанесение гораздо больших объемов металла на большую площадь, процесс темпе-

ратурного воздействия более длительный, а сами температуры существенно выше. Кроме этого, как правило, целью наплавки является создание деталей с различными свойствами (повышенной поверхностной твердостью, жаростойкостью и т.п.), а значит материалы основы и наносимого слоя различны. При разработке технологии приходится учитывать возможность сваривания этих материалов, при необходимости использовать промежуточные слои.



а)



б)

Рис. 6. Переходная зона при лазерной наплавке, $\times 800$:

а – дорожка 9; б – дорожка 10

Эксперименты по наплавке относительно больших объемов металла на протяженные поверхности были выполнены применительно к аналогам фрагмента стеклоформы. Деталь по существующей технологии изготавливается из жаростойкого чугуна. Во время эксплуатации изнашиваются отдельные поверхности детали. Технология электродуговой наплавки изношенного металла нестабильна, процесс сопровождается возникновением раковин, микро- и макротрещин, отслоением наплавленного слоя.

В качестве альтернативы была проведена лазерная наплавка изношенных участков стеклоформы. Материал основы – специальный чугун, по своему составу близкий к чугуну ЧХЗ (ГОСТ 7769-82). Для наплавки использована проволока диаметром 1 мм из никелевого сплава (содержание никеля около 60 %, хрома 22 %, молибдена 9 %). Этот сплав разработан для создания промежуточного

слоя при наплавке чугунов износостойкими материалами. Эксперименты показали, что процесс стабильнее, а качество лучше при наплавке проволоки по винтовой траектории. Наплавка была выполнена на цилиндрическую и коническую поверхности (рис. 7).

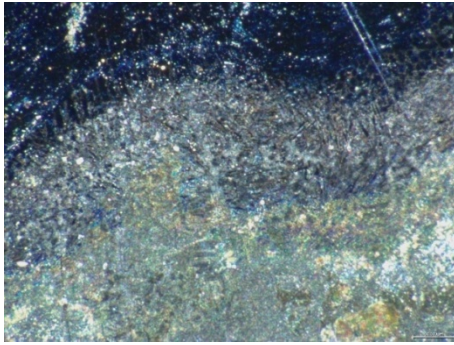
В ходе экспериментов уточнялась величина шага винтовой линии (осевой подачи). Опыты показали, что наилучшие результаты дает величина шага равная $(1,5 \dots 1,8) d_{\text{проволоки}}$. При меньших величинах витки наползают друг на друга, при больших между ними образуются разрывы. Наилучшие результаты показала наплавка при подаче 1,5 мм/мин.

Траектория относительного движения обеспечивалась в режиме двухкоординатной линейной интерполяции на цилиндрическом участке и трехкоординатной на коническом. Наплавка производилась при мощности излучения 860 Вт. Скорость изделия и скорость подачи проволоки одинаковы и равны 190 мм/мин. Наплавка выполнялась в среде аргона. Температура детали после наплавки составляла примерно 400° для образца, показанного на рис. 7.

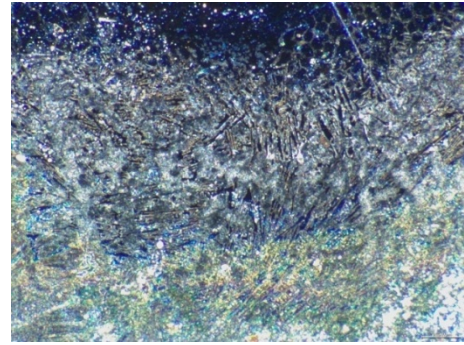


Рис. 7. Лазерная наплавка цилиндрической и конических поверхностей

Визуальный осмотр показал, что качество наплавки хорошее, раковин и отслоений нет. В тоже время из-за разнородности материалов основы и наплавки в детали возникают большие внутренние напряжения. Поэтому сразу после наплавки выполнялась термическая обработка – высокотемпературный отпуск с выдержкой в печи 2 часа. В противном случае в процессе остывания на деталях возникали трещины, захватывающие как наплавленный слой, так и металл подложки. Металлографические исследования показали (рис. 8), что в процессе наплавки формируется промежуточный слой, в котором происходит взаимное проникновение материалов наплавки и основы. Явно выраженная граница двух материалов отсутствует, что позволяет предполагать хорошее сцепление наплавленного слоя с основой.



а)



б)

Рис. 8. Микроструктура промежуточного слоя при наплавке никелевого сплава на чугун:
а – $\times 800$; б – $\times 1300$

Заклучение

Использование лазерного излучения для наплавки позволяет выполнять эту операцию для различных металлов и сплавов, в том числе, имеющих ограничения по сварке. При этом наблюдается изменение микроструктуры основного материала вблизи области воздействия луча.

Наплавка с использованием проволоки (по сравнению с порошками) в автоматическом режиме несколько сложнее из-за необходимости точно выдерживать взаимное расположение луча и проволоки в течении всей операции. Конструкция держателя направляющего канала должна обеспечивать возможность настройки его положения с точностью не хуже $0,1 \dots 0,2$ мм, а зазор между наконечником и проволокой не более $0,10 \dots 0,15$ мм. Расстояние от проволоки до подложки должно быть минимизировано, вплоть до касания.

Скорость подачи проволоки в зону наплавки тесно связана со скоростью изделия. Точная величина подачи проволоки уточняется в ходе экспериментов. В первом приближении можно принять ее равной скорости изделия. Для обеспечения стабильности процесса и качества наплавки регулирования скорости должно выполняться с высокой точностью всистеме ЧПУ.

В ряде случаев успешная наплавка может быть реализована с использованием в качестве защитного газа азота.

Для снижения уровня остаточных напряжений в детали после наплавки целесообразно проводить термическую обработку.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисюров, А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. Пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. 2-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с.
2. Возможности аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.А. Жирков и др. // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – №4 (52). – С. 151-160.

REFERENCES

1. Grigoryants, A.G., Shiganov, I.N., Misyurov, A.I. Technological processes of laser treatment: manual for colleges / under the editorship of A.G. Grigoryants, 2nd edition, stereotyped, Moscow: Publishing House of Bauman STU, 2006, pp. 664.
2. Potentialities in additive-subtractive-strengthening techniques. / A.V. Kirichek, D.L. Solovyov, A.A. Zhirkov et al. Bulletin of the Bryansk State Technical University, 2016, no. (52), pp. 151-160.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.11.2021; одобрена после рецензирования 13.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

The article was submitted 29.11.2021; approved after reviewing 13.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.