

УДК 621.791.92; 621.791.754; 621.791.042

ПРИМЕНЕНИЕ СВАРОЧНЫХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЪЕМНОЙ НАПЛАВКИ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ЦЛТ СамГТУ

© 2020 С.С. Панкратов, Д.А. Дунаев, С.С. Жаткин

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 12.05.2020

Приводятся результаты исследования процесса объемной электродуговой наплавки на базе станка с числовым программным управлением МШ-2.2 в условиях Центра литейных технологий СамГТУ. Проведено исследование наплавленных образцов из низколегированной стали 09Г2С и нержавеющей стали 06Х19Н9Т, полученных при разных режимах электродуговой наплавки на сварочном инверторном аппарате СВАРОГ MIG 200 PRO. Выбраны оптимальные режимы формирования объектов объемной электродуговой наплавкой.

Ключевые слова: наплавка, анализ, аддитивные технологии, исследования, технология, моделирование.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-62-68

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наплавка является одним из наиболее распространенных способов повышения износостойкости и восстановления деталей и конструкций. Наряду с этим, сегодня наплавка широко применяется и в аддитивных технологиях для формирования объемных деталей и изделий.

В отличие от традиционных технологий изготовления методом вычитания материала из заготовки, использование аддитивных технологий подразумевает построение объекта путем добавления слоя за слоем до получения готового изделия. Зачастую для этого используется дорогое оборудование и комплексы на основе лазерных и электронно-лучевых источников [1-2]. Однако, помимо несомненных достоинств такие технологии обладают и рядом недостатков, к числу которых прежде всего следует отнести высокую стоимость оборудования и порошковых расходных материалов и низкую производительность процессов. Кроме того, следует отметить, что до сих пор в России не сформированы ГОСТы и регламент по производству отечественных порошковых материалов. Выпускаемые порошковые металлические материалы часто не отвечают требованиям разработчиков аддитивных технологий.

Наряду с аддитивными технологиями на основе концентрированных потоков энергии (ла-

зерный и электронный пучки) начинают использоваться инновационные технологии наплавки металлической проволоки методом дуговой сварки в защитных газах. Для аддитивных технологий метод имеет следующие достоинства:

- Издержки производства на 60% меньше;
- Высокий коэффициент использования присадочного материала; Скорость 3D печати до 600 см³/ч;
- Более 100 доступных материалов;
- Стоимость материалов в 10 раз дешевле металлопорошков;

Кроме того, по сравнению с методами лазерных и электроннолучевых аддитивных технологий данный процесс характеризуется более высокой производительностью и доступностью в освоении. Прежде всего, сюда следует отнести на порядок более дешевое оборудование, доступность, широкая распространенность и разнообразие расходных материалов в виде проволоки. Процесс позволяет получать, а также восстанавливать определенную номенклатуру металлических деталей и изделий машиностроительного назначения (изготовление штампов и штамповой оснастки, восстановление лопаток ГТД и др.) на базе менее дорогого и менее габаритного оборудования. Благодаря низкой стоимости оборудования и расходных материалов освоение аддитивных технологий на основе электродуговой наплавки доступно для всех видов производства, не требует высокой квалификации персонала, а также предполагает минимальные требования к помещению для установки.

Следует отметить, что применение данного метода позволяет избежать проблем с необходимостью закупки дорогих расходных порошковых материалов (в большинстве случаев импортного производства). При этом на данном этапе приобретаемые импортные расходные

Панкратов Сергей Сергеевич, студент,

E-mail: pankratov.serega@inbox.ru

Дунаев Дмитрий Александрович, студент.

E-mail: dimjkee830@gmail.com

Жаткин Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры литейных и высокоэффективных технологий (СамГТУ).

E-mail: laser@samgtu.ru, sergejat@mail.ru

материалы для дорогого оборудования требуют согласования с соответствующим программным обеспечением, которым оснащается оборудование для аддитивных технологий.

Наплавка с присадочной проволокой в большинстве случаев не требует привязки к программному обеспечению и допускает применение как отечественных так и зарубежных расходных материалов. Кроме того, при наплавке с присадочной проволокой в меньшей степени проявляются такие дефекты как пористость и несплавления в зоне роста, что в целом обеспечивает более высокую прочность формируемого изделия.

В работе представлены результаты исследования процесса объемной электродуговой наплавки на базе станка с числовым программным управлением МШ-2.2 в условиях Центра литейных технологий.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследованиях по объемной электродуговой наплавке использовался сварочный инверторный полуавтомат СВАРОГ MIG 200PRO (N229) – с системой подачи проволоки внутреннего исполнения. Для автоматизации процесса наплавки использовался сверлильно-фрезерный станок с ЧПУ МШ-2.2. Разработка модели наплавляемого образца проводилась с использованием программ КОМПАС-3D и Simplify-3D.

Реализация процесса объемной электродуговой наплавки включала в себя следующие этапы:

1. Разработка модели наплавляемой заготовки определенной формы со всеми необходимыми размерами, с помощью специализированной программы КОМПАС-3D V17.1, в том числе и задание траектории движения стола, с помощью программы Simplify-3D.

2. Построенная модель открывается через специальное программное обеспечение Mach3Loader (профиль ReabinMill), предназначенное для станка с ЧПУ МШ-2.2.

3. В зависимости от размеров и формы выращиваемого образца выбираются режимы наплавки (скорость перемещения станка, сила тока сварочного аппарата и скорость подачи присадочной проволоки), которые задаются на сварочном аппарате.

4. Непосредственно сама наплавка, выполняемая в автоматическом режиме с помощью сварочного полуавтомата на подготовленную подложку, закрепленную на трех-координатном

столе станка. При этом сварочная горелка крепилась в специально изготовленный держатель и базировалась относительно начала наплавки на поверхности заготовки.

В качестве присадочного материала использовались стальные проволоки марок 09Г2С и 06Х19Н9Т диаметром 0,8 мм (табл. 1).

Для исследований выращивались образцы простых и сложных форм. Под простыми формами образцов подразумевалась наплавка кубов и цилиндров, а сложных – эмблема СамГТУ и зубчатое колесо.

Объемная наплавка осуществлялась в непрерывном автоматическом режиме в среде аргона послойно по траекториям, разработанным в программе Simplify-3D. Наплавка проводилась в следующих режимах: скорость движения сварочной горелки относительно стола менялась в пределах от 300 мм/мин до 600 мм/мин.; скорость подачи присадочной проволоки – от 3 м/мин до 4 м/мин; напряжение дуги – от 15 В до 20 В.

Сформированные объемной наплавкой образцы исследовались на соответствие их размеров с размерами модели, а также на однородность структуры по всей зоне наплавки и наличие дефектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рисунке 1 и 2 представлена модель образца простой формы в виде куба, разработанная в программах КОМПАС-3D и Simplify-3D.

В программе КОМПАС-3D создается объемная модель формы, предназначенной для «выращивания», со всеми необходимыми нам размерами (рис. 1).

В программе Simplify-3D по разработанной модели строятся траектории движения наплавки (G-коды), необходимые для работы в программе Mach3Loader (рис. 3).

Программа Mach3Loader (рис. 4) предназначена для работы станка с ЧПУ МШ-2.2. С помощью неё реализуются траектории движения наплавки, полученные ранее с помощью программ КОМПАС-3D и Simplify-3D.

На рисунке 5 и 6 представлены наплавленные на основе модели образцы в виде куба из сталей 09Г2С и 06Х19Н9Т, полученные при различных заданных режимах наплавки.

Как видно из рисунков наплавленные образцы имеют не «идеальную» форму куба в связи с растеканием металла и его усадкой между

Таблица 1. Химический состав присадочной проволоки для наплавки

Материал, ГОСТ	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Fe	Ti
09Г2С (ГОСТ 2246-70)	<0,12	0,5-0,8	1,3-1,7	<0,3	<0,3	<0,3	96-97	-
06Х19Н9Т (ГОСТ 19281-89)	<0,06	<1	<2	9	19	-	67	<1

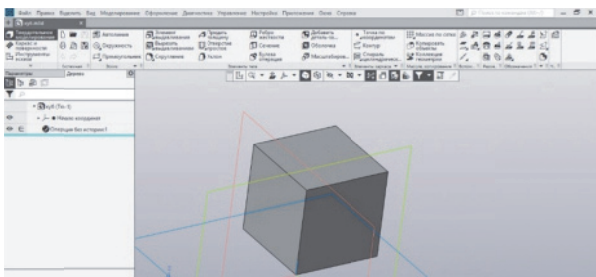


Рис. 1. Интерфейс программы КОМПАС-3D

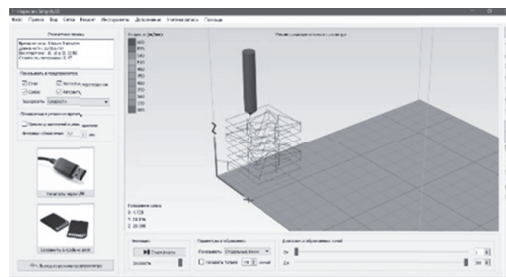


Рис. 2. Интерфейс программы Simplify-3D

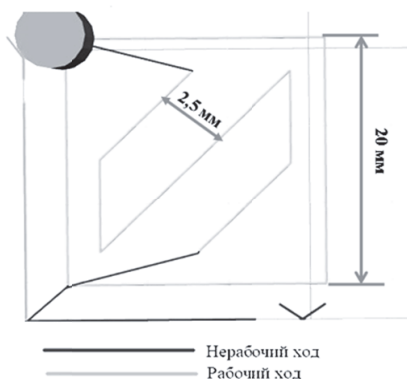


Рис. 3. Траектория движения одного слоя куба

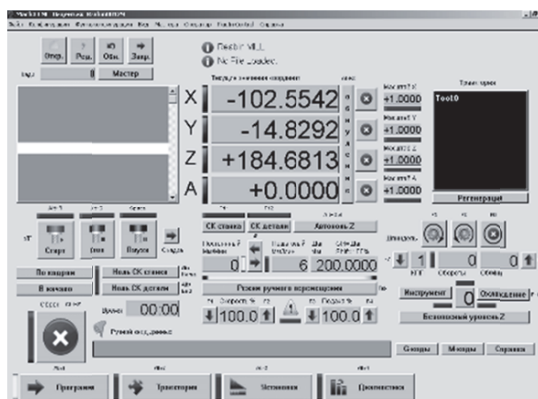


Рис. 4. Интерфейс программы Mach3Loader

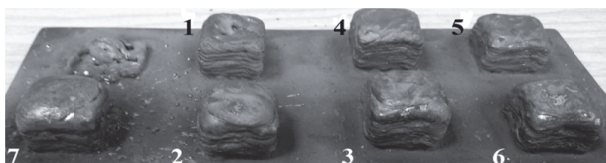


Рис. 5. Примеры наплавленных кубов (сталь 09Г2С)

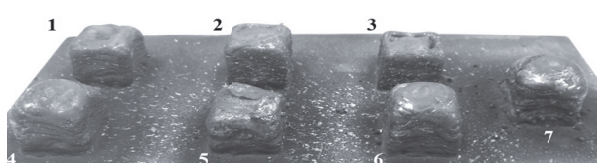


Рис. 6. Примеры наплавленных кубов (сталь 06Х19Н9Т)

слоями, что особенно проявляется в верхних слоях зоны наплавки из-за перегрева материала и снижения скорости теплоотвода по мере роста слоев наплавки.

В таблицах 2 и 3 приведены данные о размерах наплавленных фигур из сталей 09Г2С и 06Х19Н9Т соответственно в зависимости от режимов их наплавки.

Размеры наплавленных кубов имеют отклонения от первоначальных размеров математической модели (20x20x20 мм) из-за усадки и растекания наплавляемого материала. При наплавке проволокой из стали 09Г2С различие между размерами модели и реальным кубом больше чем при наплавке проволокой из 06Х19Н9Т, связанное, очевидно, с большим растеканием первого материала, что потребует большего времени на последующую механическую доработку наплавленного объекта до размеров его модели. Это подтвердилось экспериментами по наплавке многослойных дорожек для каждого материала

ла в зависимости от рабочего напряжения дуги (рис. 7-9).

Как можно заметить из рисунка 7 при наплавке дорожек из стали 09Г2С из-за растекания ширина слоев растет от 3 мм у поверхности подложки до 4,5-5 мм в самом верхнем слое. Это обусловлено более высоким теплоотводом из нижних слоев в подложку и перегревом верхних слоев из-за низкого теплоотвода. В то же время при наплавке проволокой из стали 06Х19Н9Т ширина слоев практически не меняется по высоте и составляет 2,5 – 3 мм.

С ростом напряжения дуги растеканность наплавляемого материала растет, что особенно заметно при наплавке 09Г2С при повышенных напряжениях дуги (рис. 8-9). В то же время при наплавке нержавеющей стали растекание проявляется в меньшей степени.

Для дальнейшего исследования были выбраны куб №3, сформированный из стали 09Г2С в режиме, представленном в табл. 2, и куб №2 из

Таблица 2. Геометрические размеры наплавленных кубов из стали 09Г2С

	Куб 1	Куб 2	Куб 3	Куб 4	Куб 5	Куб 6	Куб 7
ДхШхВ, мм	20,16x20x16,5	21x20,66x17,16	20,83x21x19	20,33x20,33x16,83	20x20x14	20x20,33x16,66	21,16x21x17
Кол-во слоёв	7	7	7	7	7	7	7
Скорость подачи проволоки $v_{под}$, м/мин	3	3,5	3,5	3	3	3,5	4
Рабочее напряжение дуги U , В	15	18	18	15	15	18	20
Скорость движения горелки $v_{дв}$, м/мин	0,30	0,30	0,45	0,45	0,60	0,60	0,60
Время наплавки, с	215	215	175	175	155	155	155

Таблица 3. Геометрические размеры наплавленных кубов из стали 06Х19Н9Т

	Куб 1	Куб 2	Куб 3	Куб 4	Куб 5	Куб 6	Куб 7
ДхШхВ, мм	18,6x18,3x16,6	19x18,6x18	18,6x18x16,8	19,16x19x17,6	19,3x19,16x17,16	19x18,6x16,3	19,6x19,5x17,3
Кол-во слоёв	7	7	7	7	7	7	7
Скорость подачи проволоки, м/мин	3	3	3	3,5	3,5	3,5	4
Рабочее напряжение дуги, В	15	15	15	18	18	18	20
Скорость движения горелки, м/мин	0,30	0,45	0,60	0,30	0,45	0,60	0,60
Время наплавки, с	215	175	155	215	175	155	155

стали 06Х19Н9Т из табл. 3. Их полученные размеры близки к размерам конечной детали ибо только они обеспечили высоту более 18 мм (по условию задачи куб после механической обработки должен быть 18x18x18).

Из выбранных образцов, разрезанных по диагонали пополам изготавливались поперечные шлифы (рис.10), которые после травления исследовались на металлографическом микроскопе по высоте наплавки (рис.11, 12).

Из рисунков видно, что образцы имеют незначительное количество пор и однородную структуру по высоте наплавки. Лишь на образце с наплавленным материалом 06Х19Н9Т на границе с подложкой наблюдаются несплавления (рис. 10), обусловленные

меньшим растеканием расплава. Очевидно, что в дальнейшем это потребует корректировки режимов наплавки (более низкие скорости движения горелки относительно стола, либо более высокие напряжения дуги при наплавке первых слоев) или изменения траектории движения дуги. В целом по высоте наплавленного 06Х19Н9Т поры отсутствуют и наблюдается выраженная однородная дендритная структура.

В работе также рассмотрена возможность создания более сложных наплавляемых форм. В качестве примера ниже приведены пробные результаты формирования объемной электродуговой наплавкой зубчатого колеса и модели в виде прерывистой спирали (рис. 13-15).

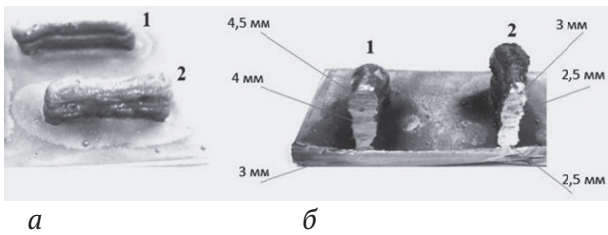


Рис. 7. Наплавленные многослойные дорожки (а) и их вид в разрезе (б) с указанием толщин наплавленных слоёв: 1 – сталь 09Г2С (толщина 3 - 4,5 мм), 2 – сталь 06Х19Н9Т (толщина 2,5 - 3 мм). Режимы наплавки: скорость подачи проволоки 3 м/мин; скорость перемещения стола 450 мм/мин; рабочее напряжение дуги 15 В; количество слоёв 7. Точность измерения 0.1 мм



Рис. 9. Диаграмма изменения ширины наплавки от рабочего напряжения дуги

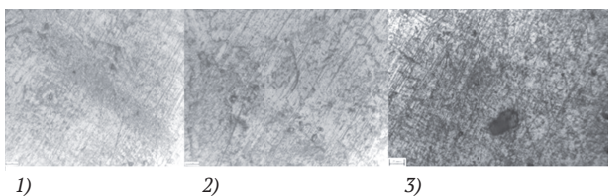


Рис. 11. Микроструктура образца из стали 09Г2С по высоте наплавки (x40): 1 – верх зоны наплавки; 2 – середина зоны наплавки; 3 – низ зоны наплавки

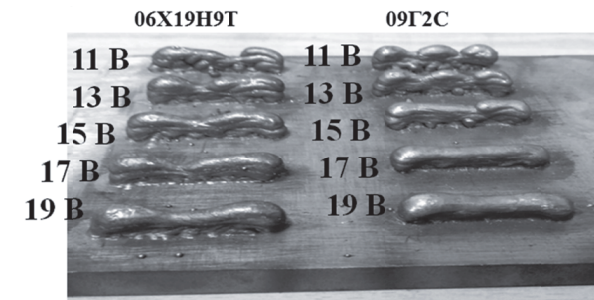


Рис. 8. Влияние рабочего напряжения дуги на формирование наплавленного валика

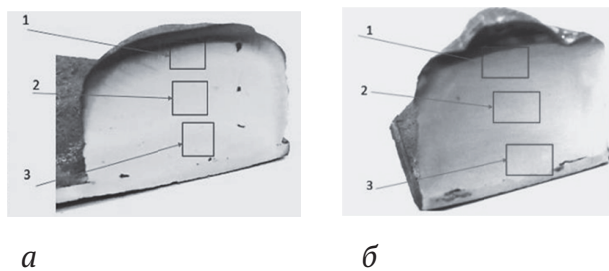


Рис. 10. Шлифы для исследования микроструктуры зон наплавки из стали 09Г2С (а) и 06Х19Н9Т (б): 1, 2, 3 – зоны исследования микроструктуры

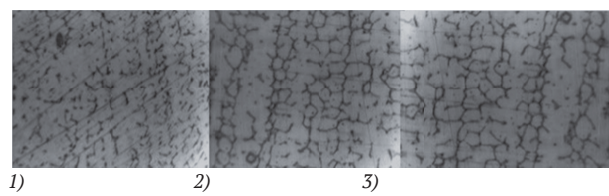


Рис. 12. Микроструктура образца из стали 06Х19Н9Т по высоте наплавки (x40): 1 – верх зоны наплавки; 2 – середина зоны наплавки; 3 – низ зоны наплавки

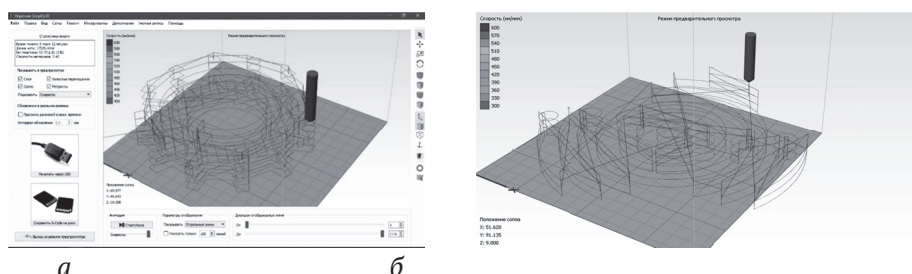


Рис. 13. Разработка модели зубчатого колеса (а) и «прерывистой спирали» (б)

После наплавки зубчатого колеса установлено определенное расхождение в размерах математической модели и наплавленного образца ввиду усадки и растекаемости жидкого металла.

При наплавке «прерывистой спирали» так же присутствует определенное расхождение математической модели с выращенным объектом. По краям образца растекание практически

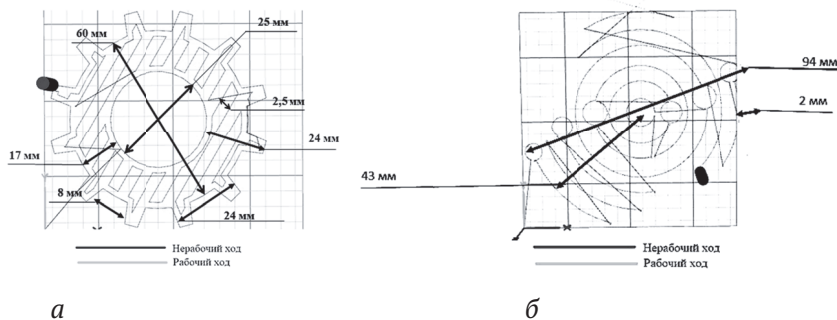


Рис. 14. Траектория движения при наплавке одного слоя зубчатого колеса (а) и «прерывистой спирали» (б) с указанием размеров образца

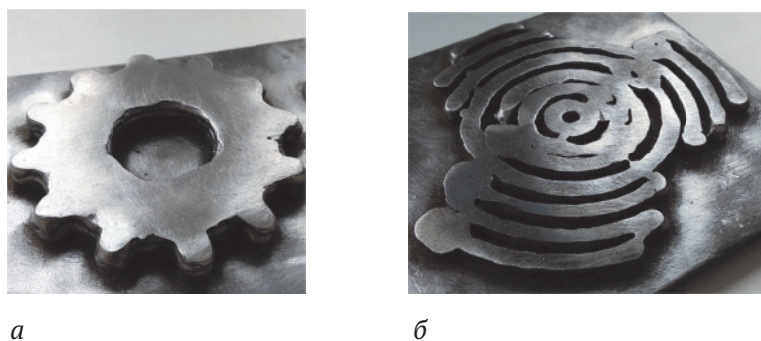


Рис. 15. Наплавленная форма зубчатого колеса (а) и «прерывистой спирали» (б).
 Материал наплавки: низколегированная сталь 09Г2С. Количество наплавленных слоёв: а - 5; б - 3.
 Режимы наплавки: скорость подачи проволоки = 3 м/мин, рабочее напряжение сварочной дуги = 15 В, скорость движения горелки = 600 мм/мин

незаметно, оно наблюдается только внутри наплавленного объекта (малые окружности «слиплись» с линиями и между собой) из-за малых размеров самого образца.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований установлено:

Экспериментальные данные, полученные на разработанном в ЦЛТ СамГТУ сварочном автоматизированном комплексе, показали возможность использования его для формирования изделий с помощью сварочных аддитивных технологий и подтверждают перспективность развития и применения электродуговой наплавки в ряду существующих аддитивных технологий по формообразованию деталей и изделий.

Исследовано влияние типа присадочной проволоки на процесс формирования объекта при автоматизированной электродуговой наплавке. При наплавке с присадочной проволокой из стали 09Г2С наблюдается большее растекание наплаваемого материала, чем при наплавке стали 06Х19Н9Т, что подтверждается участками несплавления с подложкой для данного материала. При этом в целом по высоте наплавленного материала в обоих случаях формируется выраженная однородная структура.

На основе экспериментальных исследований установлены следующие наиболее оптимальные режимы: при наплавке присадочной проволокой из стали 09Г2С $U = 18$ В, $u_{под} = 3,5$ м/мин, $u_{дв} = 0,45$ м/мин, а при наплавке присадочной проволокой из стали 06Х19Н9Т $U = 15$ В, $u_{под} = 3$ м/мин, $u_{дв} = 0,45$ м/мин. В этом случае обеспечивается максимальное соответствие размеров наплавленного объекта его компьютерной модели.

На базе разработанного комплекса на примере наплавленного зубчатого колеса и «прерывистой спирали» показана возможность формирования более сложных объектов с помощью сварочных аддитивных технологий. При этом по предварительным экспериментам наблюдается удовлетворительное соответствие сформированных объектов их моделям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство / О.Н. Гончарова, Ю.М. Березной, Е.Н. Бессарабов, Е.А. Кадамов, Т.М. Гайнутдинов, Е.М. Нагопетьян, В.М. Ковина // Инженерный вестник Дона. 2016. №4. URL: ivdon.ru/tu/magazine/archive/n4y2016/3931 (дата обращения 15.03.2020).
2. Зленко М.А., Попович А.А., Мутьялина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении // Уч.-методич. изд. СПбГПУ. 2013. 222 с.

3. Проволока для аддитивных технологий: инновации и традиции в одном продукте. URL: <https://www.3dpulse.ru/authors/trubashevskii-dmitrii-svyatoslavovich/provoloka-dlya-additivnyh-tehnologii-innovatsii-i-traditsii-v-odnom-produkte/> (дата обращения 15.03.2020).

**APPLICATION OF WELDING ADDITIVE TECHNOLOGIES
FOR VOLUME STEEL SURFACE IN THE CONDITIONS OF CLT SamGTU**

© 2020 S.S. Pankratov, D.A. Dunaev, S.S. Zhatkin

Samara State Technical University

The results of a study of the process of volume electric arc surfacing on the basis of a machine with numerical control MSH-2.2 in the conditions of the Center for Foundry Technologies are presented. The study of deposited samples of low alloy steel 09G2S and stainless steel 06Kh19N9T obtained with different modes of electric arc welding on the welding inverter machine SVAROG MIG 200 PRO. The optimal modes of formation of objects by volumetric electric arc surfacing were selected.

Keywords: surfacing, analysis, additive technologies, research, technology, modeling

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-62-68

*Sergey Pankratov, Student. E-mail: pankratov.serega@inbox.ru
Dmitry Dunaev, Student. E-mail: dimjkee830@gmail.com
Sergey Zhatkin, Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of Foundry and High-Efficient Technologies
(SamSTU). E-mail: laser@samgtu.ru, sergejat@mail.ru*